

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DA ESCOLA SECUNDÁRIA DE GONDOMAR

NUNO MIGUEL VIEIRA COUTO

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

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

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

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 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.

À minha família e à Cristiana

" Give me a place to stand, and a lever long enough, and I will move the world."

Arquimedes

AGRADECIMENTOS

Com a finalização deste projeto, gostaria de expressar o meu sincero agradecimento a todos aqueles que contribuíram não só para a concretização deste trabalho como também ajudaram a moldar e a tornar este percurso académico memorável.

Primeiramente, ao Professor António Pedro Oliveira de Carvalho por toda uma oportunidade predispondo sempre todo o seu conhecimento e disponibilidade. Toda a sua paixão pelo ensino e energia transportada para as aulas, que não terminavam sem um momento cultural e/ou uma geringonça, o tornaram uma das pessoas mais marcantes deste percurso.

Ao Engenheiro Eduardo Costa pela disponibilidade e ajuda na realização das medições acústicas.

À Doutora Lília Silva por permitir a realização do estudo na casa que me ajudou a estabelecer raízes desde tenra idade.

Aos Engenheiros Octávio Inácio e Sílvia Vilela por todo o conhecimento transmitido, disponibilidade e documentos fornecidos que ajudaram a enriquecer este trabalho.

À Professora Maria João Gomes por toda a paciência, carinho e conselhos prestados desde o primeiro dia.

Ao Engenheiro Óscar Ferreira pela disponibilidade e acompanhamento.

À minha mãe e ao meu pai, por serem os alicerces da minha pessoa, por todos os valores transmitidos, por todo o apoio, paciência e ternura em tudo o que me proporcionaram ao longo de todos estes anos, por me incentivarem a seguir sempre os meus sonhos com todo o seu amor incondicional.

À Cristiana por estar presente nos momentos belos e menos bons, pela enorme resiliência nos meus períodos de maior dificuldade, por todo o amor, confiança e companheirismo, que sempre tiveram um especial contributo no meu sucesso.

A todos os meus amigos que me acompanharam durante este percurso e que direta ou indiretamente deram o seu contributo para que alcançasse esta meta. Gostaria de agradecer em especial ao Bruno, ao Francisco à Cristiana e ao João por todos os momentos de estudo, de aflição, de companheirismo e de conquista partilhados desde o princípio desta caminhada, bem como outras tantas histórias e peripécias tais que levo para a vida.

A todos, o meu profundo obrigado!

RESUMO

Num mundo em fervilhante evolução, é cada vez mais presente o número de fatores que contribuem para um crescente nível de poluição sonora que se impõe no quotidiano. Este é um fator deveras importante, singularmente para o setor do ensino, no que diz respeito à qualidade de educação. Não só para quem recebe, mas também para quem tenta transmitir a mensagem, a poluição sonora surge como uma barreira ímproba de se superar. As distrações não são apenas frustrantes, mas também desgastantes que se traduzem, no caso dos alunos, numa redução da capacidade de aprendizagem, e um desgaste físico enorme para o transmissor. Sendo a inteligibilidade um parâmetro de qualidade acústica que está relacionado com o bem-estar proporcionado num dado espaço, é, de máxima importância, garantir o conforto acústico em ambientes pedagógicos.

A dissertação tem como objetivo estudar o impacto acústico com a caracterização de diferentes espaços que constituem a Escola Secundária de Gondomar (ESG), após a requalificação gerida pela Parque Escolar (PE), na vertente do desenvolvimento acústico. Realiza-se, no final, uma breve comparação com os resultados obtidos na Escola Secundária Dr. Serafim Leite (ESSL) que não foi alvo de intervenção acústica, de forma a quantificar o melhoramento acústico.

O presente trabalho tem como objeto de estudo duas salas distintas, um refeitório e dois espaços gimnodesportivos. Na caracterização das salas consta a avaliação do tempo de reverberação (TR), do isolamento a ruídos de condução aérea entre salas adjacentes (D_{nT}), do isolamento a ruídos de percussão das lajes (L'_{nT}) e do RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*). Nos pavilhões gimnodesportivos e refeitório apenas é avaliado o tempo de reverberação.

Os ensaios realizados nos diferentes espaços demonstraram um ótimo comportamento acústico em todo o edifício. Nas medições realizadas nas salas, obtiveram-se tempos de reverberação médios entre 0,49 e 0,60 segundos, índices de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre 51 dB e 55 dB, índices de isolamento a ruídos de percussão entre 50 e 56 dB nas lajes e valores médios para o RASTI entre 0,73 e 0,76.

O Pavilhão B, embora com menor volume, é o que apresenta também uma menor correção acústica, resultando um tempo de reverberação médio de 2,2 segundos. Valor relativamente alto quando comparado com o TR do Pavilhão D que, sendo sensivelmente 1,8 vezes maior, consegue atingir valores na ordem de 1,4 segundos. O refeitório caracterizou-se por um tempo de reverberação médio de 1,2 segundos.

Quando avaliado segundo RRAE, a ESG cumpre com todos os parâmetros acústicos.

Por fim, constou-se que, apesar de os espaços semelhantes da ESG possuírem por vezes uma volumetria superior, quando comparados com os espaços da ESSL, a diferença é abismal. O RASTI nas salas passa de 0,58 a 0,73 e 0,76, o isolamento a ruídos de condução aérea sobe cerca de 7 dB, e as médias dos tempos de reverberação baixam entre 0,5 s para salas de aula, 1,4 s para o refeitório e até 3,0 s nos pavilhões gimnodesportivos.

O isolamento a ruídos de percussão, apesar de se tratar do parâmetro mais complexo de controlar, apresenta variações enormes que chegam até - 14 dB.

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

ABSTRACT

In a world in evolution, a number of factors contribute to an increasing level of noise pollution in everyday life. This is a very important factor particularly to the education sector regarding the quality of education. Not only for those who receive it but also for those who try to transmit a message. The distractions are not only frustrating, but also exhausting, which, in the case of students, translate into reduced learning capacity and enormous physical stress for the transmitter. Since the speech intelligibility of a given space depends on its acoustics, it is of utmost importance to guarantee acoustic comfort in pedagogical environments.

The dissertation aims to characterize different spaces of the Escola Secundária de Gondomar (ESG) after the requalification managed by “Parque Escolar” in terms of acoustic development. A brief comparison is also made with the results obtained at Escola Secundária Dr. Serafim Leite (ESSL) which has not acoustic treatment.

The present work has as object of study two distinct classrooms, a cafeteria and two gyms. The characterization of the classrooms includes an evaluation of the reverberation time, the standardized level difference between adjacent classrooms (DnT) the standardized impact sound pressure levels (L'nT) and the RASTI (Rapid Speech Transmission Index). In Gyms and cafeteria, only the reverberation time is evaluated.

The tests carried out in the different spaces revealed the buildings excellent acoustic behavior. These tests showed an average reverberation time between 0,49 and 0,60 seconds, a weighted standardized level difference between 51 dB and 55 dB, a weighted standardized impact sound pressure level between 50 dB and 56 dB for percussion test on the slabs and average RASTI values between 0,73 and 0.76.

Gym B, although with lower volume, is also the one that has the lowest portion of acoustic corrections, obtaining an average reverberation time of 2.2 seconds. Relatively high value when compared to the average reverberation time of Gym D which being approximately 1.8 times bigger can reach values in the order of 1.4 seconds. The cafeteria was characterized by an average reverberation time of 1.2 seconds.

When evaluated according to RRAE, the Escola Secundária de Gondomar complies with all acoustic parameters.

Finally, it was found that, although the similar spaces of the ESG sometimes have a larger volume, when compared with the spaces of the ESSL, the difference is abysmal. The RASTI in the rooms goes from 0,58 to 0,73/0,76 the weighted standardized level difference rises by about 7 dB and the average reverberation time fall between 0.5 seconds for classrooms, 1.4 seconds for the cafeteria and up to 3.0 seconds in gymnasiums.

Although standardized impact sound pressure level being the most complex parameter to control it is able to present variations up to - 14 dB.

KEYWORDS: Acoustics, intelligibility, schools, reverberation time, sound insulation

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE QUADROS.....	XV
SÍMBOLOS, UNIDADES, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	XIX

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS	1
1.2. ESTRUTURA	2

2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. PRINCÍPIOS BÁSICOS	3
2.1.1. SOM E RUÍDO	3
2.1.2. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA	4
2.1.3. NÍVEIS SONOROS.....	5
2.1.4. DIRECIONALIDADE.....	6
2.1.5. FREQUÊNCIA	7
2.1.5.1. Definição	7
2.1.5.2. Bandas de Frequência.....	8
2.1.5.3. Curvas de Ponderação.....	8
2.1.5.4. Comprimento de Onda.....	9
2.1.6. ANÁLISE NO TEMPO	10
2.2. ABSORÇÃO SONORA	10
2.2.1. DEFINIÇÃO.....	10
2.2.2. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS.....	11
2.2.2.1. Introdução.....	11
2.2.2.2. Materiais porosos e fibrosos.....	11
2.2.2.3. Ressonadores	12
2.2.2.4. Membranas	12
2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	12
2.3.1. DEFINIÇÃO.....	12

2.3.2. CAMPO DIRETO E CAMPO REVERBERADO	14
2.3.3. FÓRMULAS DE PREVISÃO.....	14
2.3.3.1. Fórmula de Sabine.....	14
2.3.3.2. Fórmula de Eyring.....	14
2.3.3.3. Fórmula de Millington-Sette	15
2.4. ISOLAMENTO SONORO	15
2.4.1. INTRODUÇÃO	15
2.4.2. RUÍDOS DE PERCUSSÃO	15
2.4.3. RUÍDOS AÉREOS.....	16
2.4.4. RUÍDOS DE EQUIPAMENTOS.....	17
2.5. PERCEÇÃO DA PALAVRA.....	18
2.5.1. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	18
2.5.3. PRIVACIDADE DA PALAVRA.....	20
2.6. ACÚSTICA ARQUITETÓNICA.....	20
2.6.1. REFLEXÕES	20
2.6.2. ECOS	21
2.6.3. DIFUSÃO.....	22
3. ESTADO DA ARTE.....	23
3.1. INTRODUÇÃO HISTÓRICA	23
3.2. EVOLUÇÃO DO PARQUE ESCOLAR EM PORTUGAL	24
3.3. CONFORTO ACÚSTICO EM SALAS DE AULA	25
3.4. ENQUADRAMENTO LEGAL	29
3.4.1. NÍVEL NACIONAL	29
3.4.2. NÍVEL INTERNACIONAL.....	31
3.4.2.1. Estados Unidos da América	32
3.4.2.2. Reino Unido	33
3.4.2.3. Espanha	34
3.4.2.4. França	35
3.4.2.5. Austrália.....	36
3.4.2.6. OMS.....	37

4. MEDIÇÕES ACÚSTICAS	39
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ESCOLA SECUNDÁRIA DE GONDOMAR	39
4.2. OS DOCENTES.....	48
4.3. PARÂMETROS ACÚSTICOS	48
4.4. METODOLOGIA	49
4.4.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	49
4.4.2. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE CONDUÇÃO AÉREA PADRONIZADO	50
4.4.3. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO PADRONIZADO	52
4.4.4. RAPID SPEECH TRANSMISSION INDEX (RASTI)	53
4.5. RESULTADOS	54
4.5.1. SALA A1.10	54
4.5.1.1. Tempo de Reverberação	54
4.5.1.2. Isolamento Sonoro a Ruídos de Condução Aérea.....	57
4.5.1.3. Isolamento Sonoro a Ruídos de Percussão	63
4.5.1.4. RASTI	65
4.5.2. SALA B0.11	65
4.5.2.1. Tempo de Reverberação	65
4.5.2.2. Isolamento Sonoro a Ruídos de Condução Aérea.....	68
4.5.2.3. Isolamento Sonoro a Ruídos de Percussão	70
4.5.2.4. RASTI	73
4.5.3. REFEITÓRIO.....	73
4.5.4. PAVILHÃO GIMNODESPORTIVO BLOCO B.....	76
4.5.5. PAVILHÃO GIMNODESPORTIVO BLOCO D	78
4.6. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM RRAE	80
4.7. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM ESCOLA SECUNDÁRIA DR. SERAFIM LEITE	80
5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	83
5.1. CONCLUSÕES.....	83
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Exemplo de propagação do som (Adaptado de [2]).	3
Figura 2.2 – Representação de uma onda de pressão (Adaptado de [3]).	4
Figura 2.3 – Relação entre intensidade (I), potência (W) e pressão (p), adaptado de [3].	5
Figura 2.4 – Pressão sonora p e níveis de pressão sonora L_p , adaptado de [4].	5
Figura 2.5 – Exemplos de frequências de sons comuns [5].	7
Figura 2.6 – Gama de frequências na zona audível [6].	7
Figura 2.7 – Representação de uma banda de 1/1 oitava (esquerda) e uma banda de 1/3 de oitava (direita) [2].	8
Figura 2.8 – Descrição das curvas de ponderação (filtros) A, B, C, D e C+B [7].	9
Figura 2.9 – Efeito do comprimento de onda face a obstáculos [8].	9
Figura 2.10 – Resposta dos diferentes mecanismos de absorção sonora [9].	11
Figura 2.11 – Exemplificação de impulso direto e impulso refletido [9].	13
Figura 2.12 – Valor de reverberação obtido por definição e por extrapolação do declive, respetivamente, adaptado de [1].	13
Figura 2.13 – Transmissão de ruído por percussão de forma direta e marginal, adaptado de [11].	15
Figura 2.14 – Transmissão de ruído aéreo de forma direta e marginal [12].	16
Figura 2.15 – Curvas <i>noise criterion</i> (NC) (esquerda) e <i>noise rating</i> (NR) (direita) [13].	17
Figura 2.16 – Relação da intensidade do um som com o tempo de decaimento de uma vogal seguida de uma consoante [8].	18
Figura 2.17 - Distribuição direcional horizontal de sons da palavra para duas frequências distintas [14]. A seta representa o sentido do campo de visão.	19
Figura 2.18 – Reflectograma e respetivo esquema das reflexões sonoras [16].	21
Figura 2.19 – Representação gráfica do efeito do eco repetido [8].	21
Figura 2.20 – Exemplo de difusor acústico em madeira [17].	22
Figura 4.1 – Fachada principal da Escola Secundária de Gondomar [50].	39
Figura 4.2 – Vista aérea da Escola Secundária de Gondomar [51].	39
Figura 4.3 – Organização funcional, por piso, da Escola Secundária de Gondomar [52].	40
Figura 4.4 – Sala a1.10 da Escola Secundária de Gondomar [foto do autor].	41
Figura 4.5 – Planta das salas a1.10 e a1.09 com alterações do projeto de acústica [53].	41
Figura 4.6 – Corte construtivo da parede tipo 3 da Escola Secundária de Gondomar [53].	42
Figura 4.7 – Corte construtivo da parede tipo 4 da Escola Secundária de Gondomar [53].	42

Figura 4.8 – Sistema de colmatação de frinchas laterais e superior (esquerda) e frincha inferior (direita) [foto do autor].....	43
Figura 4.9 – Pormenor do teto em gesso cartonado perfurado com lã de rocha na zona posterior [Foto do autor].....	43
Figura 4.10 – Pormenor construtivo de teto tipo 2 da Escola Secundária de Gondomar [53].	44
Figura 4.11 – Sala b0.11 de Escola Secundária de Gondomar [foto do autor].....	44
Figura 4.12 – Refeitório de Escola Secundária de Gondomar [foto do autor].	44
Figura 4.13 – Planta genérica de projeto de acústica para o edifício B [53].	45
Figura 4.14 – Pormenor construtivo da parede tipo 1 da Escola Secundária de Gondomar [53].....	45
Figura 4.15 – Pormenor construtivo do pavimento do bloco C da Escola Secundária de Gondomar [53].	46
Figura 4.16 – Pormenor construtivo do teto aplicado em corredores da Escola Secundária de Gondomar [53].	46
Figura 4.17 – Pavilhão gimnodesportivo no bloco B, PB da Escola Secundária de Gondomar [foto do autor].....	47
Figura 4.18 – Pavilhão gimnodesportivo no bloco D, PD.	47
Figura 4.19 – Medição do TR no refeitório [foto do autor].....	49
Figura 4.20 – Fonte sonora Brüel & Kjaer 4224 à esquerda e sonómetro Brüel & Kjaer 2260 à direita [foto do autor].....	50
Figura 4.21 – Esquema genérico de posicionamento para medição do TR na Escola Secundária de Gondomar.....	50
Figura 4.22 – Medição do nível sonoro na sala emissora (sala de formações) na Escola Secundária de Gondomar [foto do autor].....	51
Figura 4.23 – Esquema genérico do posicionamento do equipamento para medição dos níveis de pressão sonora nas salas emissora e recetora na Escola Secundária de Gondomar.	51
Figura 4.24 – Máquina de impactos normalizado <i>Brüel & Kjaer 3204</i> [foto do autor].....	52
Figura 4.25 - Esquema genérico do posicionamento da máquina de impactos normalizada no piso superior (esquerda) e posicionamento do sonómetro no espaço inferior (direita), para medição dos níveis de pressão sonora na Escola Secundária de Gondomar.	52
Figura 4.26 – Medição do RASTI na sala a1.10 da Escola Secundária de Gondomar [foto do autor]. 53	
Figura 4.27 – Recetor móvel <i>Brüel & Kjaer 4225</i> (esquerda) e emissor <i>Brüel & Kjaer 4419</i> (direita) [foto do autor].....	53
Figura 4.28 Posicionamento genérico dos aparelhos para medição do RASTI na Escola Secundária de Gondomar	54
Figura 4.29 – Valores médios do tempo de reverberação por bandas de 1/3 oitava obtidos na sala a1.10 da Escola Secundária de Gondomar.....	56
Figura 4.30 – Níveis sonoros (L_{eq}) na sala de formação (emissora) e a1.10 (recetora) e isolamento sonoro bruto (D) na Escola Secundária de Gondomar.	57

Figura 4.31 - Níveis sonoros nas salas a1.09 (Leq E) e a1.10 (Leq R) da Escola Secundária de Gondomar e isolamento sonoro bruto (D).....	60
Figura 4.32 – Valores médios do tempo de reverberação por banda de 1/3 oitava obtidos na sala b0.11 da Escola Secundária de Gondomar.	67
Figura 4.33 – Níveis de pressão sonora nas salas b1.13 (Leq E) e b0.11 (Leq R) da Escola Secundária de Gondomar e isolamento sonoro bruto (D).....	70
Figura 4.34- Valores médios do tempo de reverberação por banda de 1/3 oitava obtidos no refeitório da Escola Secundária de Gondomar.	75
Figura 4.36 - Valores médios do tempo de reverberação por banda de frequências de 1/3 oitava obtidos no pavilhão ginnodesportivo D da Escola Secundária de Gondomar.....	79

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes [1].	19
Quadro 2.2 – Escala de valores RASTI para o nível de inteligibilidade da palavra [15].	20
Quadro 2.3 – Principais elementos que influenciam a privacidade da palavra entre locais contíguos [1].	20
Quadro 3.1. – Limites para valores de $D_{nT,w}$ entre locais do edifício, estabelecidos por RRAE [42].	30
Quadro 3.2. – Cálculo para tempo de reverberação máximo estabelecido por RRAE [42].	31
Quadro 3.3. – Limites para níveis de $L_{Ar,nT}$, estabelecidos por RRAE [42].	31
Quadro 3.4. – EUA: Valores máximos de $L_{Aeq,60min}$ e tempo de reverberação (T) em função do volume [44].	32
Quadro 3.5. – EUA: Valores máximos para o ruído de fundo com origem em AVAC [44].	32
Quadro 3.6. – EUA: Valores mínimos para STC entre espaços principais e os espaços adjacentes [44].	32
Quadro 3.7. – EUA: Valores mínimos para STC entre espaços auxiliares e outros espaços adjacentes [44].	33
Quadro 3.8. – Reino Unido: Valores mínimos para $D_{nT,w}$ [45].	33
Quadro 3.9. – Reino Unido: Valores máximos para tempos de reverberação (média 500/1k/2k Hz) consoante a tipologia do espaço [45].	33
Quadro 3.10. – Reino Unido: Valor mínimo de STI para salas de aula [45].	34
Quadro 3.11 – Espanha: Valores máximos para o tempo de reverberação (média 500 – 2k Hz) [46].	34
Quadro 3.12 – Espanha: Valores de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, $D_{2m,nT,Air}$ em dB(A), entre um espaço protegido e o exterior, em função do índice de ruído durante o período diurno, L_d , adaptado de [46].	35
Quadro 3.13 – França: Valores máximos para tempo de reverberação [47].	36
Quadro 3.14 – França: Valores mínimos para isolamento sonoro a ruídos de condução aérea em estabelecimentos de ensino que não cresces e jardins de infância, adaptado de [47].	36
Quadro 3.15 – Austrália: Valores máximos para o tempo de reverberação, adaptado de [48].	37
Quadro 3.16 – Austrália: Valores mínimos recomendados para o índice de redução sonora (R_w), adaptado de [48].	37
Quadro 3.17 – Valores máximos recomendados pela OMS para recintos escolares [49].	38
Quadro 4.1 – Dimensões dos locais em estudo da Escola Secundária de Gondomar.	45
Quadro 4.2 – Dimensões dos pavilhões gimnodesportivos da Escola Secundária de Gondomar.	47

Quadro 4.3 – Valores do tempo de reverberação medidos na sala a1.10 em bandas de 1/3 de oitava da Escola Secundária de Gondomar.....	55
Quadro 4.4 – Valores do tempo de reverberação medidos na sala a1.10 da Escola Secundária de Gondomar em bandas de 1/1 oitava.	56
Quadro 4.5 – Níveis de pressão sonora (P_i) e nível de pressão médio (L_{eq}) por bandas de frequência, medidos na sala de formação (emissora) – Piso 0 da Escola Secundária de Gondomar.	58
Quadro 4.6 – Níveis de pressão sonora (P_i) e nível de pressão médio (L_{eq}) por bandas de frequência, medidos na sala a1.10 (recetora) – Piso -1 da Escola Secundária de Gondomar.	59
Quadro 4.7 – Níveis de pressão sonora (P_i) e nível de pressão médio (L_{eq}) por bandas de frequência, medidos na sala a1.09 (emissora) – Piso -1 da Escola Secundária de Gondomar.....	61
Quadro 4.8 – Níveis sonoros (L_{eq}) medidos na sala a1.10 (recetora) – Piso -1	62
Quadro 4.9 a) – Níveis de pressão sonora (P_i) medidos na sala a1.10 da Escola Secundária de Gondomar.....	63
Quadro 4.9 b) – Níveis de pressão sonora (P_i) medidos na sala a1.10 da Escola Secundária de Gondomar.....	64
Quadro 4.10 – Resultados para a medição de RASTI na sala a1.10 da Escola Secundária de Gondomar.	65
Quadro 4.11 – Valores do tempo de reverberação medidos na sala b0.11 da Escola Secundária de Gondomar em banda de 1/3 de oitava.	66
Quadro 4.12 – Valores do tempo de reverberação medidos na sala b0.11 da Escola Secundária de Gondomar em banda de 1/1 oitava.	67
Quadro 4.13 – Níveis de pressão sonora (P_i) e nível de pressão médio (L_{eq}) por bandas de frequência, medidos na sala b1.13 (emissora) – Piso 1 da Escola Secundária de Gondomar.	68
Quadro 4.14 – Níveis de pressão sonora (P_i) e nível de pressão médio (L_{eq}) por bandas de frequência, medidos na sala b0.11 (recetora) – Piso 0 da Escola Secundária de Gondomar.	69
Quadro 4.15 a) – Níveis de pressão sonora (L_i) medidos na sala b0.11 da Escola Secundária de Gondomar.....	71
Quadro 4.15 b) – Níveis de pressão sonora (L_i) medidos na sala b0.11 da Escola Secundária de Gondomar.....	72
Quadro 4.16 – Resultados para a medição de RASTI na sala a1.10 da Escola Secundária de Gondomar.	73
Quadro 4.17 – Valores do tempo de reverberação medidos no refeitório da Escola Secundária de Gondomar em banda de 1/3 de oitava.	74
Quadro 4.18 – Valores médios do tempo de reverberação por banda de 1/1 oitava obtidos no refeitório da Escola Secundária de Gondomar.....	75
Quadro 4.19 – Valores do tempo de reverberação por banda de 1/3 de oitava obtidos no pavilhão gimnodesportivo B da Escola Secundária de Gondomar.....	76
Quadro 4.20 - Valores do tempo de reverberação medidos em banda de 1/1 oitava no pavilhão gimnodesportivo B da Escola Secundária de Gondomar.....	77

Quadro 4.21 – Valores do tempo de reverberação em banda de 1/3 de oitava obtidos no pavilhão gimnodesportivo D da Escola Secundária de Gondomar.	78
Quadro 4.22 – Valores do tempo de reverberação medidos no pavilhão D em banda de 1/1 oitava. .	79
Quadro 4.23 – Verificação do cumprimento do tempo de reverberação dos espaços ensaiados da Escola Secundária de Gondomar com o RRAE.	80
Quadro 4.24 – Verificação do cumprimento dos índices de isolamento sonoro dos elementos ensaiados nas salas a1.10 e b0.11 da Escola Secundária de Gondomar com o RRAE.	80
Quadro 4.25 – Classificação do RASTI medido nas salas a1.10 e b0.11 da Escola Secundária de Gondomar.....	80
Quadro 4.26 – Comparação de resultados entre Escola Secundária de Gondomar e Escola Secundária Dr. Serafim Leite.....	81
Quadro 5.1 – Variação de valores nos parâmetros entre Escola Secundária de Gondomar e Escola Secundária Dr. Serafim Leite.	84

SÍMBOLOS, UNIDADES, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

τ – Coeficiente de transmissão sonora

α – Coeficiente de absorção sonora

Θ – temperatura do ar [°C]

λ – Comprimento de onda [m]

A – Absorção sonora equivalente [m²]

AVAC – Sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado

c – Celeridade do som [m/s]

dB – decibel (unidade de medida)

DL – Decreto-Lei

$D_{nT,w}$ - Índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado [dB]

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

ESG – Escola Secundária de Gondomar

ESSL – Escola Secundária Dr. Serafim Leite

EUA – Estados Unidos da América

f – Frequência [Hz]

f_0 – Frequência central de banda [Hz]

F.C. – Fator corretivo

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

G – Índice de direcionalidade

G1 – Grupo 1

G2 – Grupo 2

Hz – hertz (unidade de medida)

I – Intensidade sonora [W/m²]

I_0 – Intensidade sonora de referência [10^{-12} W/m²]

L'_{nT} – Nível de pressão sonora padronizado [dB]

L_{Aeq} – Nível de pressão sonora contínuo equivalente, ponderado A [dB]

$L_{Ar,nT}$ - Nível de avaliação padronizado, ponderado A [dB]

L_E – Nível de pressão sonora no compartimento emissor [dB]

L_{eq} – Nível de pressão sonora contínuo equivalente [dB]

L_I – Nível de intensidade sonora [dB]

L_p – Nível de pressão sonora [dB]

- L_R – Nível de pressão sonora no compartimento recetor [dB]
 L_w – Nível de potência sonora [dB]
LF – Fração de energia lateral
 m – Massa superficial do material [kg/m^2]
NC – Critério de ruído (Noise criterion)
OMS – Organização Mundial de Saúde
 p – Pressão sonora [Pa]
 p_o – Pressão sonora de referência [2×10^{-5} Pa]
 p_{ef} – Pressão eficaz [Pa]
 ρ – Massa volúmica [kg/m^3]
PB – Pavilhão gimnodesportivo do bloco B
PD – Pavilhão gimnodesportivo do bloco D
PE – Parque Escolar
Q – Coeficiente de direcionalidade
R – Índice de redução sonora [dB]
R' – Índice de redução sonora aparente [dB]
RASTI - *Rapid Speech Transmission Index*
RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios
 r – Distância [m]
RGR – Regulamento Geral sobre o Ruído
RLPS – Regime Legal sobre a Poluição
 s - Segundos
S – Superfície real do material [m^2]
STC – *Sound Transmission Class*
STI – *Speech Transmission Index*
T – Temperatura [K]
TR – Tempo de reverberação [s]
 TR_0 – Tempo de reverberação de referência [s]
 TR_{30} – Tempo de reverberação determinado por um decaimento de 30 dB [s]
V – Volume [m^3]
W – Potência sonora [W]
 W_o – Potência sonora de referência [W]

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

No quotidiano, inúmeras tarefas cognitivas são realizadas na presença de ruído extremo. Desta forma, vários estudos sobre os efeitos do ruído no desempenho têm vindo a ser realizados desde a segunda metade do século XX demonstrando que, dependendo das características do som e tarefas, ruídos de intensidade baixa a moderada podem, de facto, provocar prejuízos substanciais no desempenho intelectual.

As crianças mais pequenas, são especialmente vulneráveis aos efeitos prejudiciais do ruído ambiente dado o facto de as suas capacidades cognitivas não estarem bem automatizadas, como é exemplo a semântica e pronúncia de palavras.

Assim sendo, é necessário que espaços dedicados ao ensino e instrução sejam projetados de forma a cumprir as necessidades de acordo com a funcionalidade do espaço encontrando assim um ambiente acusticamente adaptado com o objetivo de minimizar potenciais fatores adversos à qualidade do ensino.

Existem quatro principais fontes que podem contribuir para o ruído de fundo numa sala de aula:

- Ruído proveniente do ambiente exterior;
- Ruído proveniente das zonas de recreio/lazer;
- Ruído proveniente de equipamentos;
- Ruído proveniente de espaços adjacentes.

Posto isso, as grandes preocupações acústicas nestes locais passam, essencialmente, por obter um tempo de reverberação, tendo em consideração a geometria da sala, redução de transmissão de ruído tanto das zonas adjacentes bem como do exterior, por fim a adequar o espaço à função do mesmo.

Esta dissertação tem como primordial objetivo a caracterização dos espaços constituintes da Escola Secundária de Gondomar, após uma intervenção gerida pela “Parque Escolar”, prevista no programa de modernização da rede pública. Os principais parâmetros de estudo serão o tempo de reverberação, o nível de isolamento sonoro de paredes e lajes que serão confrontados com os valores estabelecidos legislativamente.

Posteriormente, realizar-se-á uma comparação dos resultados obtidos com os valores representadores de uma avaliação semelhante concretizada na Escola Secundária Dr. Serafim Leite, não tendo sofrido

nenhuma ação de remodelação resultando num nível de preocupação acústica muito baixa ou até inexistente.

1.2. ESTRUTURA

O presente trabalho é dividido em oito capítulos sendo o presente, o primeiro onde existe um breve enquadramento e se abordam os objetivos e estrutura do documento.

O capítulo 2, *Conceitos e Definições*, procura apresentar ao leitor os princípios base necessários para o acompanhar o desenvolvimento do documento.

O capítulo 3, *Estado da Arte*, pretende contextualizar o tema abordado não só em termos históricos, mas também introduzir o conhecimento existente acerca da estruturação de uma sala de aula acusticamente cuidada quer em termos de valores ideais quer em termos de valores regulamentares a nível nacional e internacional.

O capítulo 4, *Caracterização da Amostra*, inicia-se com um desenvolvimento histórico do atual conjunto de edifícios que compõem o agrupamento escolar e a caracterização da recente intervenção na vertente acústica. Compreende a caracterização da Escola Secundária de Gondomar, descreve a metodologia adotada para a realização das medições terminando com a apresentação de resultados bem como com a sua comparação com a legislação em vigor e a Escola Secundária Dr. Serafim Leite, não tendo esta sido alvo de intervenção acústica.

O capítulo 5, *Conclusões e Desenvolvimentos Futuros*, faz um resumo das conclusões retiradas da análise dos resultados, deixando ainda algumas considerações finais para que o tema possa ser mais aprofundado posteriormente.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. PRINCÍPIOS BÁSICOS

2.1.1. SOM E RUÍDO

O “Som” tal como se conhece, não passa da captação, pelo sistema auditivo, de uma alteração de pressão no meio elástico que se traduz em zonas de compressão e rarefação das moléculas adjacentes (Figura 2.1) que se propagam até ao ouvido, induzindo uma sensação gerada no cérebro. Esta sensação pode ser categorizada em dois tipos distintos: Som e Ruído. Som, é não só tudo o que é agradável, mas também o que transmite informação. Inversamente, o Ruído é tudo o que é desagradável ou sem significado [1].



Figura 2.1 - Exemplo de propagação do som (Adaptado de [2]).

Limitando o estudo a apenas à análise do som no ar, este propaga-se a partir do ponto, onde se encontra a fonte sonora, em forma de ondas esféricas, concêntricas. A sensação originada é subjetiva e por isso, o cérebro ditará, para cada indivíduo, se se trata de som, em consequência de um sentimento agradável ou com significado, ou se se trata de ruído, contrariamente [1].

Portanto, para que exista “som”, é necessário coexistir um recetor com capacidade de detetar estas variações de pressão, num meio elástico. Estas variações de pressão são propagadas através da colisão entre as partículas, sem deslocamento permanente das mesmas. Toda esta relação torna este, o parâmetro mais importante a ser medido, admitindo sempre como situação de referência a pressão atmosférica de cerca de 101.400 Pa (aproximadamente 10^5 Pa) (Figura 2.2) [1].

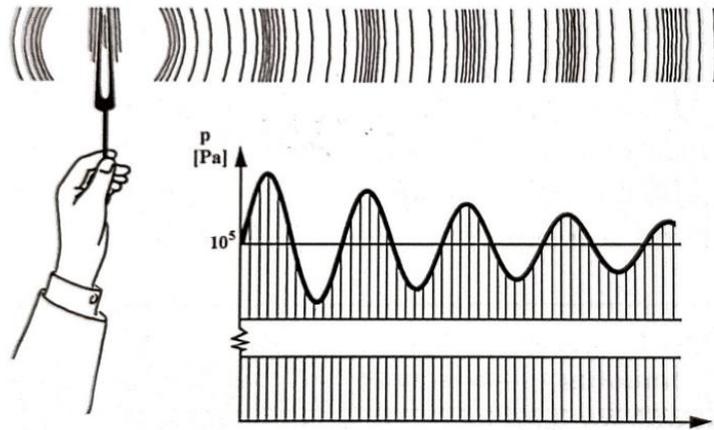


Figura 2.2 – Representação de uma onda de pressão (Adaptado de [3]).

A velocidade de propagação das ondas sonoras é calculada pela expressão da celeridade (2.1), válida para ar seco e ao nível do mar, relacionando-se apenas com a temperatura do ar:

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

Sendo,

c – celeridade (m/s);

T – temperatura em kelvin (K), $T(K) = 273,15 + \theta$ ($^{\circ}C$)

θ – temperatura do ar ($^{\circ}C$).

2.1.2. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA

Para além da pressão sonora, existem também outros parâmetros importantes para a análise da propagação sonora, como é o caso da intensidade e da potência sonora Figura 2.3.

A intensidade (I) de uma onda, medida em W/m^2 , define-se como o valor médio de energia que atravessa uma unidade de área, na direção normal ao sentido de propagação, por unidade de tempo. Desta forma é possível associar a intensidade sonora a um campo vetorial, avaliando a componente direcional desta por uma grandeza vetorial [1][3].

A potência sonora (W), contrariamente à pressão e à intensidade, trata-se de uma propriedade da fonte sonora e não do estímulo gerado por esta. Define-se como a quantidade total de energia emitida por uma fonte por unidade de tempo, expressando-se em W [3].

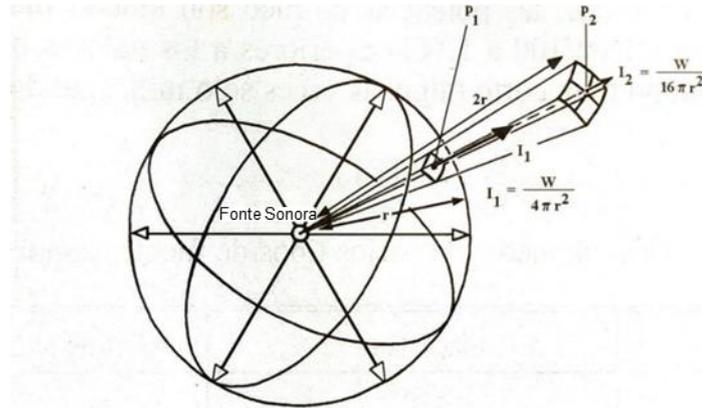


Figura 2.3 – Relação entre intensidade (I), potência (W) e pressão (p), adaptado de [3].

Estas três grandezas, estão relacionadas da seguinte forma:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (2.2)$$

Onde,

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

A grandeza ρc pode ser definida como a resistência característica do meio (impedância) através do qual a onda viaja [3].

2.1.3. NÍVEIS SONOROS

A caracterização da variação de pressão é conseguida recorrendo ao uso do decibel (dB). O ouvido de um humano jovem consegue captar variações de pressão desde cerca de 10^{-5} Pa (limiar da audição) até valores que superam os 100 Pa (limiar da dor) representado pela Figura 2.4 [3].

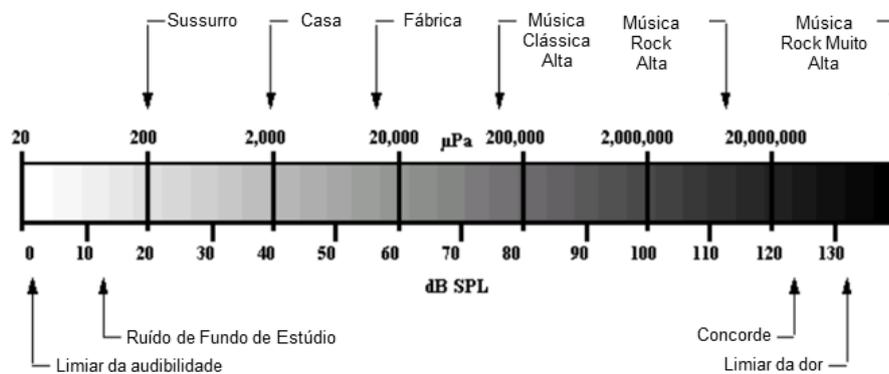


Figura 2.4 – Pressão sonora p e níveis de pressão sonora L_p , adaptado de [4].

O ouvido humano possui uma resposta às perturbações sonoras do tipo logarítmica. Compreende-se então que a quantificação dos níveis em decibel facilita a forma de lidar com a gama extremamente ampla de sensibilidade do ouvido humano [3].

Para a conversão da pressão sonora (p) em níveis de pressão sonora (Lp) utiliza-se a seguinte expressão:

$$Lp = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} \quad (dB) \quad (2.3)$$

Sendo a pressão sonora de referência (p_0) = $2 \times 10^{-5} Pa$

Da mesma forma, o decibel também é utilizado para caracterizar o nível de intensidade sonora (L_I):

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}, \text{ com } I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad (2.4)$$

Bem como o nível de potência sonora (L_W):

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0}, \text{ com } W_0 = 10^{-12} \text{ W} \quad (2.5)$$

Contudo, o que acontece no cotidiano, é o culminar de múltiplas fontes sonoras. Dada a sua natureza, a obtenção do nível de pressão sonora resultante não passa por uma soma algébrica, mas sim recorrendo a uma soma logarítmica, utilizando a expressão (2.6):

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

Para,

L_{total} – nível de pressão sonora total (dB);

L_i – nível de pressão sonora da fonte i .

2.1.4. DIRECIONALIDADE

Na generalidade, as fontes sonoras não emitem a mesma energia em todas as direções, não sendo assim omnidirecionais. Existem dois parâmetros para avaliar esta característica denominados por coeficiente de direcionalidade (Q) e índice de direcionalidade (G) [1].

O coeficiente de direcionalidade (Q), representa a relação entre a intensidade acústica, de uma dada fonte, propagada numa dada direção (φ, ϕ) e a que se propagaria na mesma direção, proveniente de uma fonte omnidirecional, com a mesma potência total [1]:

$$Q_{(\varphi, \phi)} = \frac{I(\varphi, \phi)}{I_{OMNI}} = \frac{p_{RMS}^2(\varphi, \phi)}{p_{OMNI}^2} \quad (2.7)$$

O índice de direcionalidade (G) em dB, é calculado através do coeficiente de direcionalidade:

$$G(\varphi, \phi) = 10 \log Q(\varphi, \phi) \quad (2.8)$$

Estas propriedades direcionais são importantes para solucionar problemas afetos ao controlo de ruído [3].

2.1.5. FREQUÊNCIA

2.1.5.1. Definição

Frequência é nada mais que a “velocidade” com que a fonte produz ondas sonoras, por outras palavras, o número de vibrações completas que o corpo produz por segundo. A frequência é medida em hertz e representa a taxa de compressão/rarefação do ar por segundo [2].

Esta característica é a que permite distinguir sons idênticos emitidos por diferentes fontes tal como mostra a Figura .2.5.

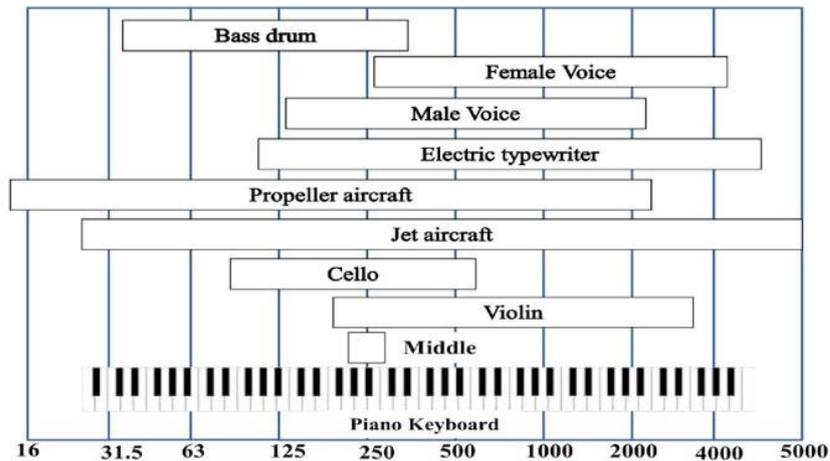


Figura 2.5 – Exemplos de frequências de sons comuns [5].

Na Acústica de Edifícios, é usual dividir-se a gama de frequência em três grupos:

Frequências graves: 20 a 355 Hz;

Frequências médias: 355 a 1410 Hz;

Frequências agudas: 1410 a 20000 Hz.

Os três grupos acima referidos cobrem apenas a gama de frequências audível ao ouvido do ser humano, contudo, existe ainda uma zona que contempla os sons de frequências inferiores ao limiar da audição, denominados como infra-sons e uma outra zona onde se inserem os sons de frequência superior denominados como ultra-sons representado na Figura 2.6 [1].

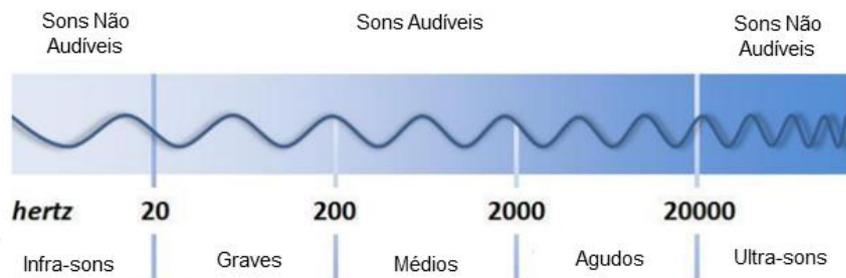


Figura 2.6 – Gama de frequências na zona audível [6].

Não obstante, a capacidade do ouvido humano de distinguir variações em frequência não é apurada e varia consoante o valor desta, por exemplo, para frequências de 125 Hz, consegue-se distinguir variações de cerca de 0,5 Hz, no entanto, para frequências de 8 kHz a diferenciação só é possível para variações mínimas de cerca de 60 Hz [1].

2.1.5.2. Bandas de Frequência

Como a análise individual de centenas ou até milhares de frequências seria uma tarefa muito trabalhosa e demorada, decidiu-se agrupar os ruídos em “bandas” de frequência correspondentes a intervalos de frequência de certa dimensão normalizada. Uma “banda” possui sempre um limite superior (f_2), um limite inferior (f_1) e um valor médio (f_0) designado por frequência central [1].

Os valores dos limiares da banda servem para definir a largura de banda (B). Existem várias bandas de frequências, no entanto, as mais utilizadas em acústica de edifícios são as de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava (figura 2.7).

A largura de banda pode ser calculada a partir da expressão (2.9), sendo $K = 1$ ou $1/3$ se for banda de 1/1 oitava ou de 1/3 de oitava.

$$B = f_2 - f_1 = \frac{2^K - 1}{\sqrt{2^K}} f_0 \quad (2.9)$$

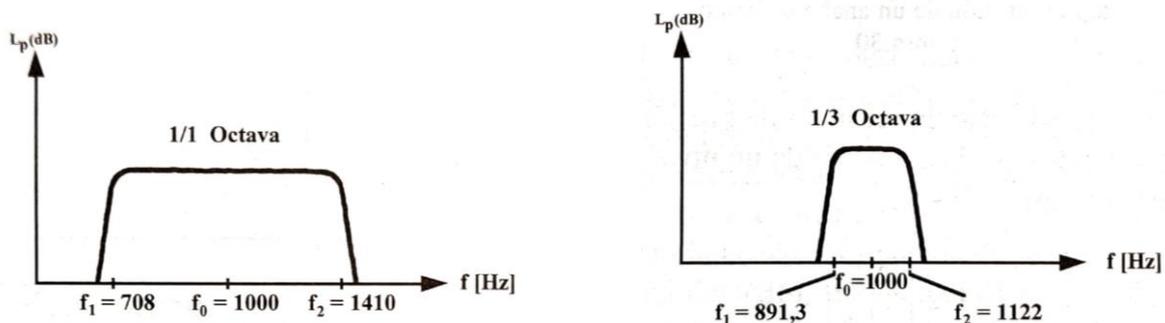


Figura 2.7 – Representação de uma banda de 1/1 oitava (esquerda) e uma banda de 1/3 de oitava (direita) [2].

2.1.5.3. Curvas de Ponderação

O ouvido humano, não é capaz de captar todas as frequências de igual forma, isto é, os seres humanos apresentam uma sensibilidade superior para frequências entre os 2300 e os 2800 Hz e por outro lado, muito pouco sensíveis a frequências abaixo de 125 Hz [1].

Dada esta singularidade dos humanos, há necessidade de adaptar a sensibilidade de captação real dos aparelhos de medição para que se assemelhe à do ouvido. Para isso, criaram-se as chamadas curvas de ponderação que funcionam como um filtro eletrónico. De entre os filtros existentes, o filtro A é o que melhor aproxima os valores medidos à resposta humana (Figura 2.8).

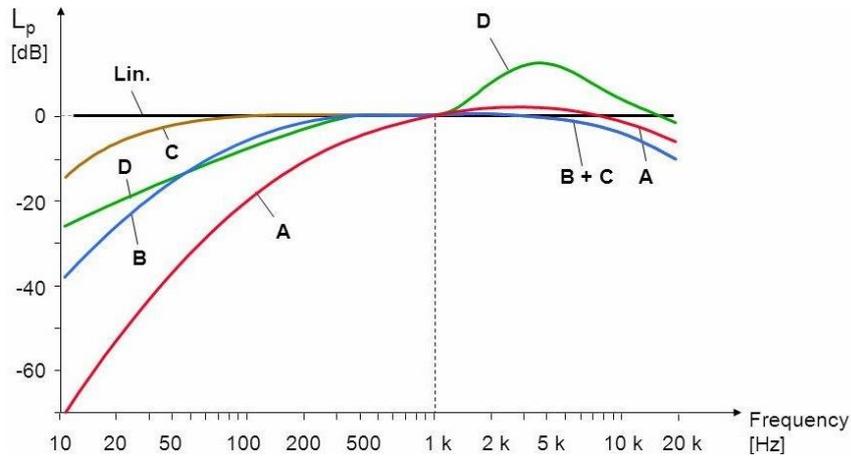


Figura 2.8 – Descrição das curvas de ponderação (filtros) A, B, C, D e C+B [7].

2.1.5.4. Comprimento de Onda

O comprimento de onda (λ) é uma característica das ondas sonoras que está inteiramente correlacionada com a frequência e celeridade e representa a distância entre pontos idênticos consecutivos da onda periódica [1] podendo ser obtido por meio da expressão (2.10):

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (2.10)$$

com,

- λ – comprimento de onda (m);
- c – celeridade (velocidade de propagação do som no ar) (m/s);
- T – período (s);
- f – frequência (Hz).

O comprimento de onda permite relacionar o comportamento das ondas face a obstáculos. Para grandes comprimentos de onda e um painel de dimensões finitas, dá-se um fenómeno de difração sonora e as ondas recombinam-se atrás do obstáculo como se ele não existisse [8]. Mas, para comprimentos de onda pequenos, associados a altas frequências e um obstáculo com dimensões muito superiores, o som é refletido deixando uma sombra atrás do obstáculo que corresponde a uma zona onde o som não consegue chegar.

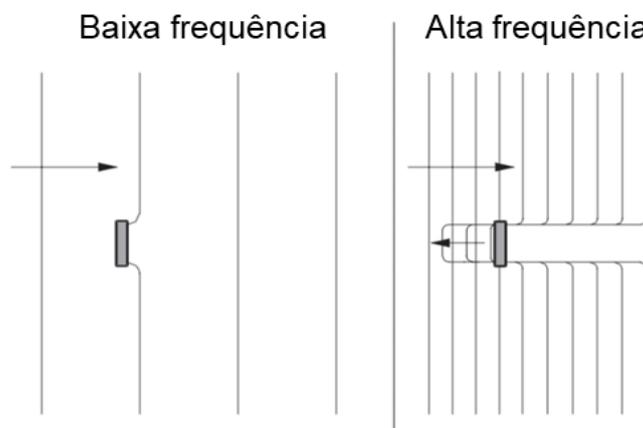


Figura 2.9 – Efeito do comprimento de onda face a obstáculos [8]

2.1.6. ANÁLISE NO TEMPO

A análise da duração do ruído é também um fator importante para a caracterização do mesmo. Havendo ruídos com duração muito variada, desde quase instantânea a praticamente infinita, é necessário recorrer a descritores estatísticos (ou energéticos) de forma a melhor retratar o acontecimento sonoro [1].

Um parâmetro energético é o nível de pressão sonora contínuo equivalente (L_{eq}) que se traduz como o nível que se atuasse constante num dado intervalo de tempo, exibiria a mesma energia que o som que se pretende avaliar [1]. O cálculo do L_{eq} é feito pela seguinte expressão:

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

Por outro lado, os parâmetros estatísticos (L_N) descrevem o nível que num dado intervalo de tempo e excedido em N% da duração temporal desse intervalo estando, desta forma, associado a quantis de densidade de probabilidade [1].

Por fim, existe ainda o SEL (*sound exposure level* ou até *single event level*) que reflete o nível que se se mantivesse constante pelo período de um segundo, conteria a mesma energia sonora que o ruído real [1]. O SEL pode ser obtido pela expressão seguinte:

$$SEL = L_{eq T} + 10 \log T, \text{ com } T \text{ em segundos.} \quad (2.12)$$

2.2. ABSORÇÃO SONORA

2.2.1. DEFINIÇÃO

Existem duas conceções de estudo distintas na acústica de edifícios que são importantes de referir. Por um lado, a correção acústica referente à correção de um espaço para o som aí emitido. Por outro, o isolamento sonoro que concerne o tratamento de um compartimento para ruídos de/para locais contíguos [1].

A absorção sonora é a capacidade que cada material tem de converter a energia incidente noutro tipo de energia. O coeficiente de absorção sonora representa-se por α e exprime a relação entre a quantidade de energia sonora absorvida por um dado material e a que incide sobre este (2.13).

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

Em que,

$E_{\text{absorvida}}$ – energia absorvida pelo material;

$E_{\text{incidente}}$ – energia incidente no material.

Este coeficiente é variável entre 0 e 1 sendo os materiais com valores de α superiores a 0,5, considerados materiais absorventes [1].

Do mesmo modo, é também usual utilizar-se o *NRC* (*noise reduction coefficient*) que se caracteriza pela média aritmética dos valores de α nas bandas de oitava, dos 250 aos 2000 Hz e ainda um outro parâmetro médio (α_w) que se obtém por um ajuste ponderado de uma curva de referência recorrendo às bandas de oitava dos 250 aos 4000 Hz [1].

Para o cálculo do coeficiente de absorção sonora existem dois métodos normalizados:

- Método do tubo de ondas estacionárias (tubo de Kundt);
- Método da câmara reverberante.

O método do tubo de Kundt consiste em colocar a amostra a testar numa extremidade de um longo tubo metálico e na outra extremidade, um pequeno altifalante perfurado para fazer passar uma pequena vareta metálica ligada a um microfone que se desliza sobre rodas num recipiente. Ondas estacionárias são geradas pelo altifalante resultantes da interação da onda incidente com a onda refletida na amostra. A forma desta onda estacionária fornece a informação necessária para que se determine a absorção sonora do material [1].

Porém, este método apresenta uma limitação em relação à câmara reverberante uma vez apenas ser possível avaliar a incidência de ondas perpendicularmente à amostra [1].

O ensaio da câmara reverberante resume-se à colocação de uma amostra de material com cerca de 12 m² no piso de uma câmara reverberante – grande sala com todas as superfícies refletoras conferindo um longo tempo de reverberação conhecido previamente – medindo o tempo de reverberação. A comparação entre o tempo obtido no ensaio com a amostra, com o tempo da câmara vazia, permite calcular o valor de α do material em estudo para cada banda de frequências.

2.2.2. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS

2.2.2.1. Introdução

Tal como referido acima, os materiais e estruturas para tratamento acústico podem ser descritos como aqueles que tem a capacidade de absorver parte da energia transmitida pela onda sonora onde a frequência desempenha um papel fundamental na escolha do tipo de material a utilizar para potenciar o efeito.

Os materiais e sistemas absorventes estão categorizados em três grupos (figura 2.10), segundo as suas propriedades:

- Porosos e fibrosos (texturados) – absorção mais eficaz para o grupo das altas frequências;
- Ressonadores – absorção mais eficaz na gama das médias frequências;
- Membranas – absorção mais eficaz para baixas frequências.

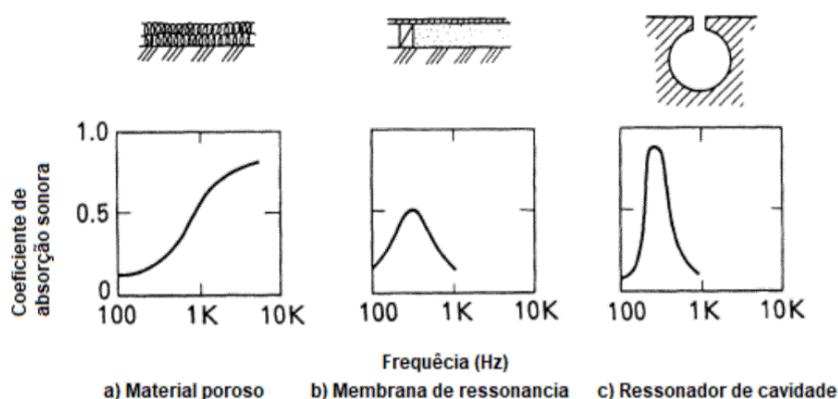


Figura 2.10 – Resposta dos diferentes mecanismos de absorção sonora [9].

2.2.2.2. Materiais porosos e fibrosos

Os materiais porosos, tal como o nome indica, correspondem a materiais constituídos por muitos espaços vazios (poros) preenchidos com apenas com o ar atmosférico. Estes espaços permitem uma melhor

penetração das ondas de propagação sobre o material, cuja energia transportada é transmitida para as fibras que por sua vez resistem por fricção entre elas, transformando a energia em calor [1]. A sua eficiência está dependente da densidade e da espessura.

Contudo, a utilização excessiva deste tipo de material pode resultar numa zona de grande absorção de essencialmente altas frequências, intensificando as restantes frequências [1].

2.2.2.3. Ressonadores

Os ressoadores podem ser divididos em dois grupos: os isolados e os agrupados.

Os ressoadores isolados, também conhecidos como ressoadores de cavidade, são compostos por uma cavidade de paredes rígidas de apenas uma única abertura. A estrutura trabalha como um sistema mecânico de massa/mola. O ar projetado contra a parede equipara-se à massa do sistema referido e o ar no interior da cavidade trabalha como a mola [9].

Os ressoadores agrupados são os mais utilizados dada a sua facilidade de instalação. São constituídos por painéis perfurados, podendo ser metálicos ou em madeira, trabalhando de forma idêntica aos ressoadores isolados [1].

Embora sejam sistemas com melhor desempenho na atenuação das médias frequências, a gama onde este dispositivo se demonstra eficaz pode ser alargada colocando um material absorvente na caixa de ar, sacrificando amplitude de absorção [1].

2.2.2.4. Membranas

As membranas ressonantes, atuam de forma idêntica aos ressoadores sendo que, neste caso, a energia transportada pelas ondas é transmitida ao painel que irá funcionar como a massa do sistema e o ar enclausurado como mola.

Embora este sistema demonstre mais eficaz para baixas frequências, atingindo o pico para a frequência ressonante do material utilizado, pode ser calibrada para uma outra frequência desejada, alterando a massa vibratória e a rigidez da “mola” de ar [9].

2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

2.3.1. DEFINIÇÃO

Num espaço fechado, as ondas sonoras que atingem o recetor podem ser de natureza direta ou refletida. As ondas diretas são aquelas que percorrem uma linha reta desde a fonte sonora até ao recetor (Figura 2.11). Por sua vez, as ondas refletidas apenas chegam ao recetor após reflexões nas superfícies do compartimento [9].

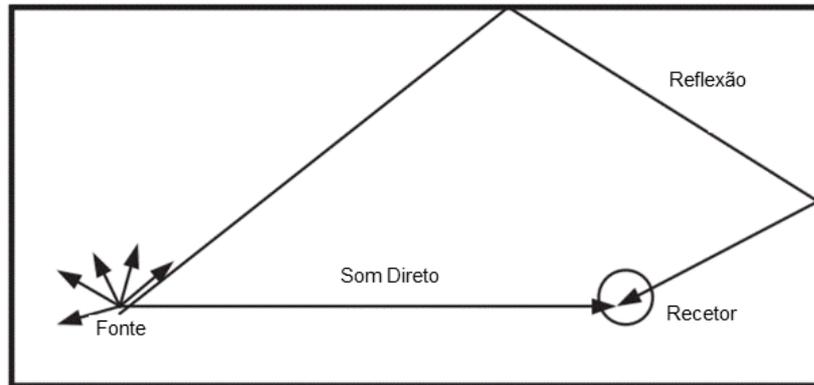


Figura 2.11 – Exemplificação de impulso direto e impulso refletido [9].

O tempo de reverberação (TR) mede o tempo necessário para que o nível de pressão sonora produzido por uma dada perturbação, decaia 60 dB, a partir do momento em que a fonte sonora pára de emitir [9].

No entanto, apenas muito raramente é possível obter um decaimento de 60 dB. O que acontece habitualmente é uma sobreposição do ruído de fundo à medição, antes do decaimento total da perturbação (Figura 2.12). Por isso, utiliza-se a medição do tempo de decaimento para 30 dB (T_{30}) para posteriormente extrapolar o valor para o decaimento dos 60 dB necessários por definição [1].

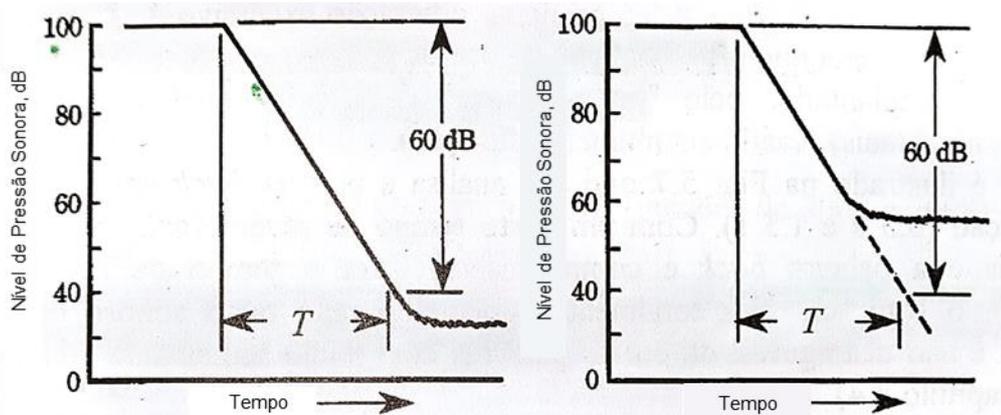


Figura 2.12 – Valor de reverberação obtido por definição e por extrapolação do declive, respetivamente, adaptado de [1].

O tempo de reverberação tem um efeito duplo e antagónico. De uma forma favorável, aumenta o nível sonoro devido ao acréscimo da reflexão ao som direto. Contudo, a reverberação irá sobrepor-se ao som direto, encobrindo-o [1].

O efeito com maior magnitude de um tempo de reverberação excessivo é a redução da inteligibilidade da palavra. Isto acontece devido ao curto período de duração das consoantes e do seu baixo nível sonoro de emissão que são superados pelo “rasto sonoro” de vogais que são emitidas primeiramente com nível e duração superior [1].

Todavia, embora para efeitos de inteligibilidade da palavra, um tempo de reverberação mais baixo será uma situação mais desejável, existem outras situações em que um pouco de reverberação extra demonstra ser favorável. Tal é o caso de espaços dedicados a concertos, igrejas e catedrais. [1].

2.3.2. CAMPO DIRETO E CAMPO REVERBERADO

Numa sala, o recetor está sujeito a ondas diretas e refletidos fazendo com que o nível de pressão sonora seja, conseqüentemente, a soma dos dois campos sobrepostos: o campo direto e o campo reverberado [1].

Num espaço fechado, existirá sempre uma zona em que as ondas diretas perfazem essencialmente o campo sonoro e uma outra zona, esta mais afastada, onde há preponderância do campo reverberado. O campo das ondas diretas decresce com a distância à fonte sendo o campo reverberado em função da capacidade de absorção sonora da sala.

O nível de pressão sonora da soma destes dois campos pode assim ser calculado pela seguinte expressão:

$$L_p \approx L_I = L_W + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi \cdot r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (2.14)$$

onde,

L_p – nível de pressão sonora (dB); Q – coeficiente de direcionalidade da fonte;
 L_I – nível de intensidade sonora (dB); r – distância entre a fonte sonora e o ouvinte (m);
 L_W – nível de potência sonora da fonte (dB); R – “constante R do local” = $A/(1-\alpha_{\text{médio}})$ (m^2).

2.3.3. FÓRMULAS DE PREVISÃO

2.3.3.1. Fórmula de Sabine

Wallace Sabine, demonstrou em 1898, que o tempo de reverberação podia ser calculado apenas em função do volume da sala e a área equivalente de absorção sonora, através da seguinte expressão (2.15).

Esta expressão permite chegar a valores muito próximos dos reais, mas apenas para locais com campos sonoros difusos e com coeficiente de absorção sonora média inferior a 0.20 [1].

$$T = \frac{0.16 \times V}{A} \quad (2.15)$$

Com,

T – tempo de reverberação (s);
 V – volume do compartimento (m^3);
 A – Absorção sonora equivalente (m^2)
 $A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i$ (2.16)
 α – coeficiente de absorção sonora do material;
 S – superfície real do material (m^2)

2.3.3.2. Fórmula de Eyring

Ao longo dos anos, com a necessidade de fórmulas mais abrangentes, foram surgindo outras expressões. Em 1930, Norris e Eyring desenvolveram uma nova fórmula mais adequada a casos em que o coeficiente de absorção é semelhante para todas as superfícies da envolvente [1]:

$$T = \frac{0.16 \times V}{-S \cdot \ln(1-\bar{\alpha})} \quad (2.17)$$

Onde, $\bar{\alpha}$ é a média pesada pelas superfícies S_i , e os correspondentes coeficientes de absorção α_i ($\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i S_i}{\sum S_i}$) e $S = \sum S_i$.

2.3.3.3. Fórmula de Millington-Sette

Em 1932, Millington e Sette surgiram com uma expressão que melhor se enquadra a casos em que as diferentes superfícies apresentam valores distintos de coeficientes de absorção sonora:

$$T = \frac{0.16 \times V}{-\sum_{i=1}^N S_i \ln(1-\alpha_i)} \quad (2.18)$$

2.4. ISOLAMENTO SONORO

2.4.1. INTRODUÇÃO

O conforto acústico de um compartimento apenas é possível atingir com um bom isolamento sonoro de forma a evitar que ruídos provenientes do exterior perturbem as atividades a decorrer e vice-versa. É necessário para o estudo desta característica distinguir duas situações distintas: os ruídos de percussão, gerados por uma excitação mecânica direta nos elementos de construção; os ruídos de condução aérea onde a transmissão é feita unicamente através da vibração do ar [1].

Pode distinguir-se ainda os ruídos provindos de equipamentos e instalações. Por norma, os ruídos de percussão são os que têm um potencial de propagação superior.

A transmissão do som é um fenómeno complexo que pode ser decomposto em transmissão direta e transmissão secundária [10].

2.4.2 RUÍDOS DE PERCUSSÃO

Os ruídos por percussão são os que mais afetam o conforto acústico de uma divisão pelo facto de a energia transmitida à estrutura se repartir e propagar muito rapidamente pelos elementos que estão rigidamente ligados [10].

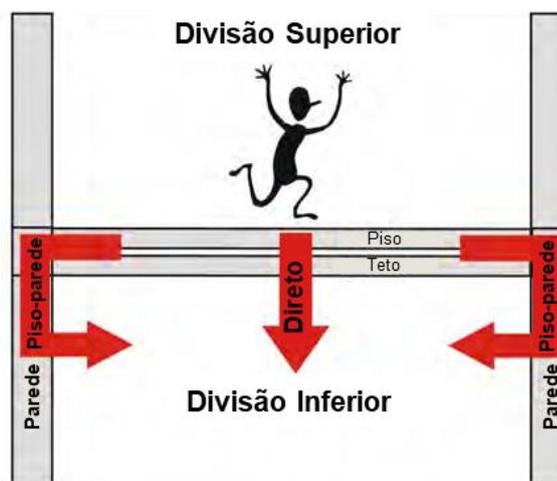


Figura 2.13 – Transmissão de ruído por percussão de forma direta e marginal, adaptado de [11].

Existem três principais modos de intervenção que visam conter a transmissão de ruídos de percussão:

- Na fonte;

- No caminho de transmissão;
- Próximo do recetor.

O isolamento na fonte é o mais eficaz. Este pode ser conseguido através da aplicação de camadas resilientes em superfícies sujeitas a impacto. O controlo da propagação no percurso poderá ser obtido com a separação dinâmica de componentes, introduzindo, por exemplo, ligações flexíveis que absorvem a energia. Por fim, e o menos eficaz, a redução de ruídos próximos do recetor passaria por um processo de isolamento das superfícies radiantes com material absorvente [1].

Para o cálculo pode utilizar-se a expressão (2.19):

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

Sendo,

$L'nT$ – nível de pressão sonora padronizado (dB);

Li – nível de pressão sonora média no compartimento recetor (dB);

T – tempo de reverberação no compartimento recetor (s);

T_0 – tempo de reverberação de referência no compartimento recetor (0,5 s).

2.4.3 RUÍDOS AÉREOS

A transmissão de ruído entre dois espaços por meio aéreo, dá-se quando as partículas do ar, excitadas pela fonte, transmitem energia ao elemento separador que por sua vez irá transmitir o ruído até ao recetor. No entanto, por meio de uma análise mais minuciosa na grande maioria dos casos, a transmissão não acontece isoladamente através de um único elemento, mas sim de uma forma global (Figura 2.14), onde se considera o comportamento de toda a estrutura envolvente [1].

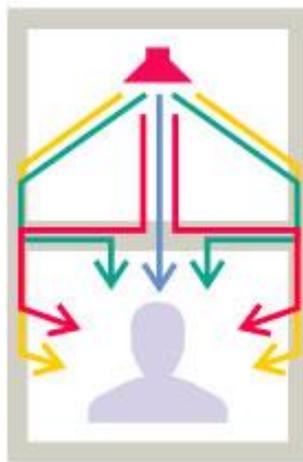


Figura 2.14 – Transmissão de ruído aéreo de forma direta e marginal [12].

A forma como um elemento reage acusticamente a um estímulo está essencialmente dependente da sua massa e/ou existência de duplicação física do material separador [1]. O parâmetro utilizado para quantificar o nível de isolamento sonoro de ruídos aéreos é o R (redução sonora), que pode ser definido pela seguinte expressão:

$$R = 10 \log\left(\frac{1}{\tau}\right) \quad (2.20)$$

Em que,

R – redução sonora (dB);

τ – coeficiente de transmissão;

$$\tau = \frac{I \text{ transmitida}}{I \text{ incidente}} \quad (2.21)$$

Transportando estes cálculos para uma situação *in situ*, recorre-se a uma nomenclatura ligeiramente diferente onde em vez de redução sonora (*R*), adota-se a redução sonora aparente (*R'*) que tem em consideração de transmissões marginais [1]. Nestes casos, é também útil relacionar o nível de isolamento aparente com o isolamento sonoro padronizado:

$$D_{nT} = R' + 10 \log \left(\frac{0,16V}{S \cdot T_0} \right) \quad (2.22)$$

onde,

- D_{nT} – índice de isolamento sonoro
- V – volume do compartimento recetor (m^3);
- S – superfície do elemento separador (m^2);
- T_0 – tempo de reverberação de referência (0,5 s).

2.4.4 RUIDOS DE EQUIPAMENTOS

Na busca insaciável de um nível de qualidade de vida superior, o Homem levou para casa todo o tipo de objetos, inúmeras máquinas e outros aparelhos que em muitos casos funcionam grande parte das vinte e quatro horas do dia. Nos dias de hoje, a grande maioria destes aparelhos, são por si só bastante silenciosos. Porém, a afixação destes elementos a largos painéis faz com que a energia se transfira muito facilmente para sons aéreos, gerando um ruído de nível sonoro superior [1].

Alguns dos casos mais correntes são as canalizações, elevadores e equipamentos de ventilação e climatização.

A incomodidade de uma dada divisão provocada por ruído de equipamentos pode ser avaliada mediante as *Curvas de Incomodidade (NC, NR, etc.)* (Figura 2.15). Utilizam-se na caracterização de ruídos de fundo estáveis e contínuos e não de atividades decorrentes no espaço [1].

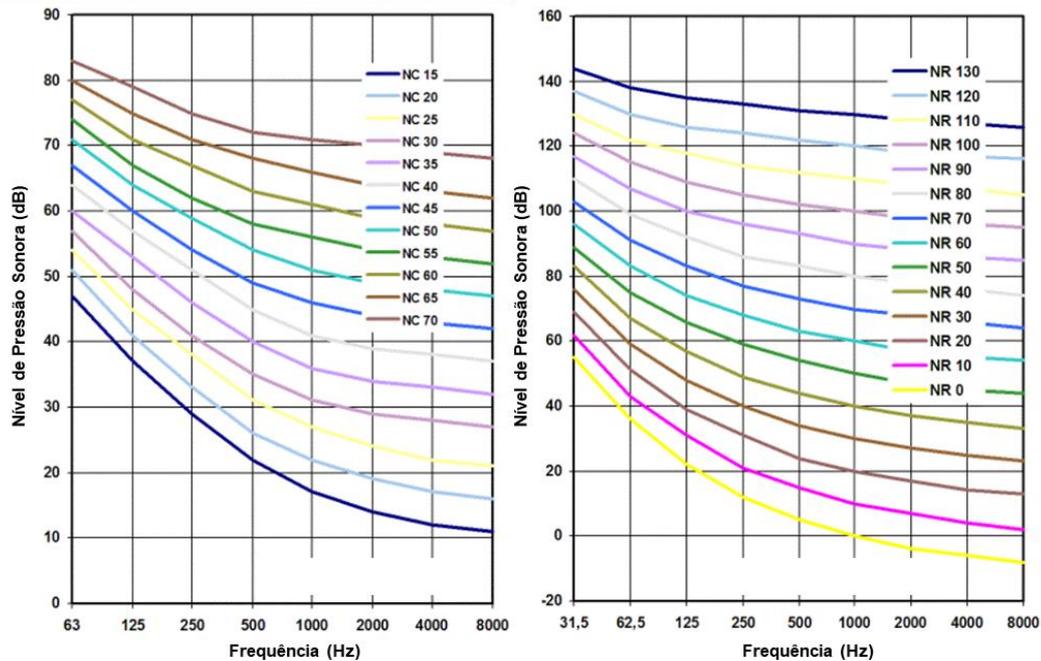


Figura 2.15 – Curvas *noise criterion* (NC) (esquerda) e *noise rating* (NR) (direita) [13]

2.5. PERCEÇÃO DA PALAVRA

2.5.1. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

Existem múltiplas formas de comunicar em sociedade, desde a escrita à arte nas suas diversas formas, mas é a linguagem verbal que tem o maior papel na conceção das relações em sociedade.

A comunicação verbal exige sempre um emissor, um recetor e uma mensagem passível de nem sempre chegar de forma clara ao recetor. Nesse caso, o conteúdo é pouco inteligível. É, portanto, necessário que os espaços sejam otimizados neste domínio, em função do tipo de função que acolhem.

A voz é diferente para todos os humanos e pode ser avaliada segundo quatro propriedades: frequência, intensidade, duração e direcionalidade [1].

A gama de frequências utilizadas durante o discurso é vasta, entrando desde sons de mais baixa frequência a sons de frequência mais alta. Em geral, um homem possui uma voz mais grave enquanto que as mulheres e crianças possuem uma voz mais aguda.

A gama de frequências varia não só pelas diferenças fisiológicas de um ser humano, mas também a dicção dos próprios fonemas e palavras. As vogais são de natureza em baixas frequências, como é o caso do [u] para o qual a frequência se situa entre os 150 e os 300 Hz, enquanto que para as consoantes já utilizam altas frequências como é exemplo o [s] cujas frequências se inserem nos 3500 a 7000 Hz representando estes dois o balizamento do espectro [1].

Num discurso corrente, os sons mais intensos das vogais têm uma duração de cerca de 90 ms enquanto que os sons mais débeis das consoantes apenas possuem uma duração de cerca de 20 ms. Estas últimas, são reproduzidas com uma diferença de nível de pressão sonora de cerca de 21 a 28 dB inferior às vogais [1].

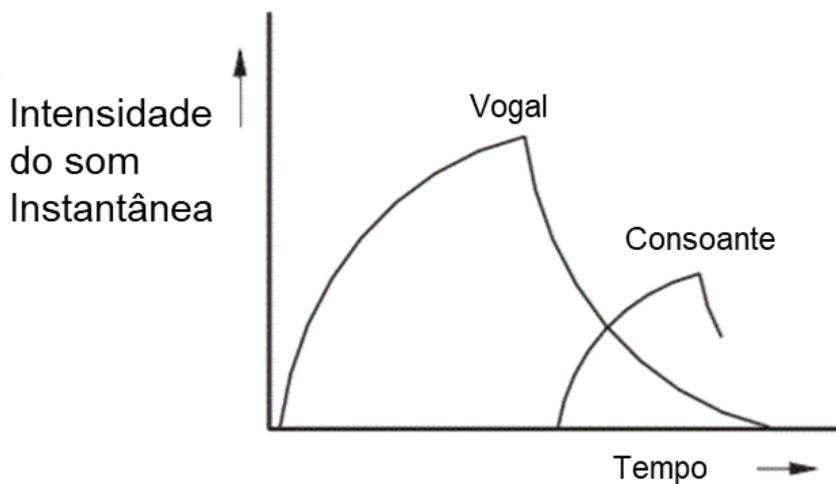


Figura 2.16 – Relação da intensidade do um som com o tempo de decaimento de uma vogal seguida de uma consoante [8].

No domínio da direcionalidade, a voz humana é emitida com maior potência para a frente do orador, onde a inteligibilidade nas restantes direções está dependente da frequência do som emitido conforme é possível constatar na (Figura 2.17).

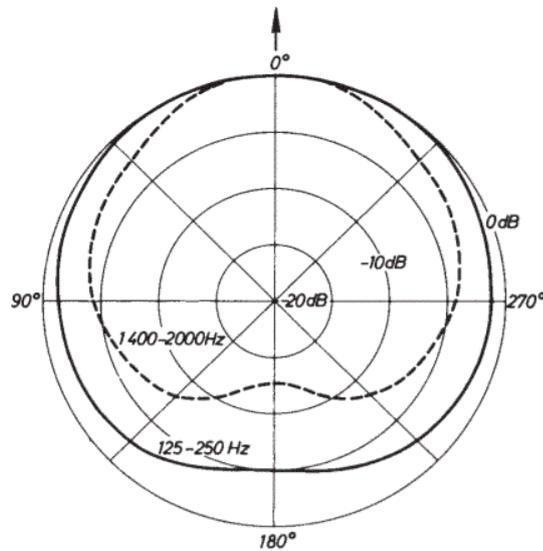


Figura 2.17 - Distribuição direcional horizontal de sons da palavra para duas frequências distintas [14]. A seta representa o sentido do campo de visão.

Em suma,

Quadro 2.1 – Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes [1].

Tipo	Frequência	Intensidade	Duração	Direcionalidade
Vogais	Baixas	Elevado	≈ 90 ms	-5 dB p/ -180°
Consoantes	Altas	Baixo	≈ 20 ms	-20 dB p/ -180°

Para a avaliação da inteligibilidade da palavra existem diversos parâmetros que se repartem essencialmente por dois grupos, os testes objetivos e os testes subjetivos.

Os subjetivos são testes que requerem a presença de um grande número de auditores à qual se segue uma leitura de palavras e frases que deve ser escrita por estes. O grau de acerto é proporcional à inteligibilidade do local [1].

Os objetivos são testes realizados recorrendo ao uso de equipamentos, não sendo necessária componente da resposta humana o que se traduz tanto num erro como desvio padrão menor nas medições [1].

2.5.2. RASTI

O método conhecido como *rapid speech transmission index* (RASTI) é um teste objetivo, desenvolvido de forma a criar um teste rápido para a medição do parâmetro da inteligibilidade do espaço. Os valores variam entre 0 e 1, má inteligibilidade e excelente inteligibilidade, respetivamente. O aparelho é composto por um emissor e um recetor. A fonte, colocada na posição do emissor, produz um sinal rosa, que integra as frequências de 500 e 2k Hz por meio de oitavas de frequências por fim a obter um som representativo “humano”. O microfone, colocado na posição do recetor mede a onda sonora e calcula o valor do parâmetro [15].

Quadro 2.2 – Escala de valores RASTI para o nível de inteligibilidade da palavra [15].

RASTI (%)	Inteligibilidade	RASTI (%)	Inteligibilidade
[0 – 30[Péssima	[60 – 75[Boa
[30 – 45[Fraca	[75 – 100]	Ótima
[45 – 60[Razoável		

2.5.3. PRIVACIDADE DA PALAVRA

Embora a inteligibilidade da palavra seja necessária no dia a dia, a privacidade da mesma é que demonstra ser muitas vezes uma preocupação para os que frequentam o espaço, especialmente em zonas de comércio, serviços, igrejas, etc. Tal é exemplo vários grupos de pessoas a trabalhar em simultâneo com outros grupos independentes, no mesmo espaço (*open space*).

O quadro 2.3 descreve os principais elementos que influenciam a privacidade da palavra entre locais contíguos:

Quadro 2.3 – Principais elementos que influenciam a privacidade da palavra entre locais contíguos [1].

Elemento	Sala fechada	<i>Open space</i>
Nível sonoro de emissão da palavra	X	X
Grau de privacidade desejada	X	X
Absorção sonora total do compartimento recetor	X	
Isolamento sonoro entre locais (DnT,w)	X	
Nível sonoro do ruído de fundo	X	X
Altura da barreira (ecrã)		X
Absorção sonora do teto		X
Absorção sonora do revestimento do piso		X
Distância entre emissor e recetor		X

2.6. ACÚSTICA ARQUITETÓNICA

2.6.1. REFLEXÕES

O primordial elemento responsável pela acústica de um dado espaço são as reflexões sonoras geradas pela sua envolvente geométrica.

Para grandes salas, como é o caso das salas de espetáculos, o recetor chega a estar suscetível a milhares de reflexões sonoras sendo que a primeira onda que o atinge é a do som direto e as restantes reflexões chegam progressivamente ao longo do tempo. Destas, é possível distinguir consoante as ondas que chegam nos primeiros 80 ms e as que atingem posteriormente como som inicial e som tardio, respetivamente. Por conseguinte, o tempo de atraso inicial representa o intervalo de tempo desde a chegada do som direto à chegada da primeira reflexão [1] (Figura 2.18).

A Figura 2.19 procura sintetizar o parágrafo precedente:

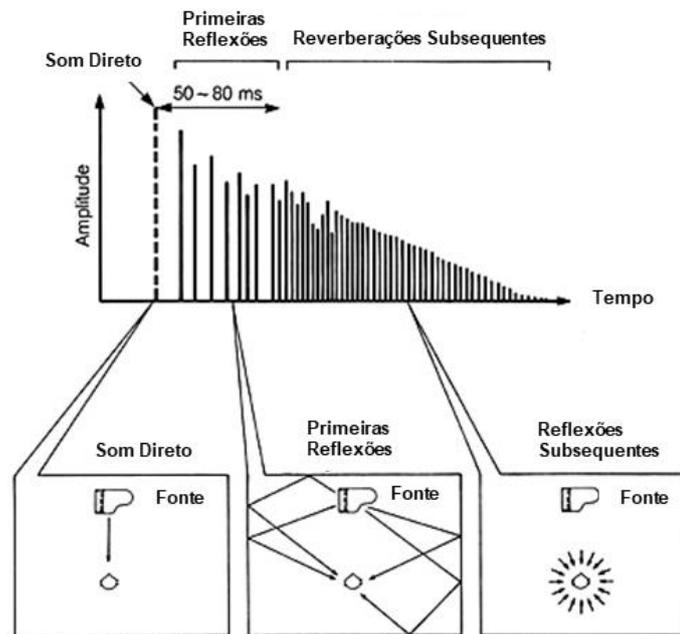


Figura 2.18 – Reflectograma e respetivo esquema das reflexões sonoras [16].

2.6.2 ECOS

No entanto, existem também reflexões indesejadas que se denominam por ecos. Os ecos são reflexões que atingem o recetor demasiado atrasadas e com intensidade suficiente para serem distinguíveis pelo ouvido humano. Este fenómeno ocorre sempre que a diferença temporal é superior a 50 ms [1].

Este acontecimento pode ser controlado recorrendo à colocação de material absorvente e/ou modificando a geometria da superfície refletora, de forma a direcionar a reflexão [1].

Existe ainda o efeito de eco repetido (*flutter echoes*) que caracteriza a situação do eco perto de superfícies paralelas. Dá-se quando a onda sonora é emitida entre duas paredes paralelas que repetem consecutivamente o som. Neste caso também é possível recorrer à colocação de material absorvente como solução [1].

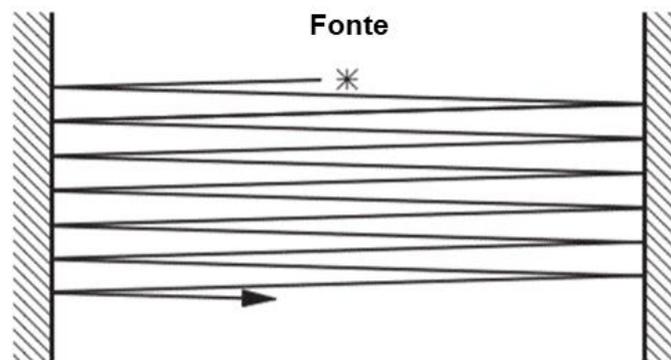


Figura 2.19 – Representação gráfica do efeito do eco repetido [8].

2.6.3 DIFUSÃO

Uma superfície difusora, tem como objetivo refletir o som em todas as direções. Estas reflexões podem ser manuseadas consoante o relevo das irregularidades nela presentes uma vez que as frequências são refletidas em função dos respetivos comprimentos de onda. Assim sendo, um difusor para uma vasta gama de frequências deve ser constituído por variadíssimos relevos (Figura 2.20).



Figura 2.20 – Exemplo de difusor acústico em madeira [17].

3

ESTADO DA ARTE

3.1. INTRODUÇÃO HISTÓRICA

A primeira referência à análise da origem e propagação do som, surge no século VI a.C. quando Pitágoras decide estudar a vibração de cordas esticadas e relacioná-las entre si. Este foi o primeiro passo para compreender o poder da acústica embora tenha sido Galileu Galilei (1564-1642) o primeiro a estudar com rigor os movimentos oscilatórios [18].

Apenas mais tarde, cerca de 50 a.C., o engenheiro e arquiteto romano Vitruvius menciona na sua obra, *De Architectura*, o que acabam por ser as primeiras preocupações a nível da acústica arquitetónica. Surgem assim as primeiras referências acústicas a espaços dedicados ao teatro, onde demonstra conhecimento acerca de reverberações, ecos, falando ainda sobre a utilização de vasos acústicos [18].

No século XVII voltam a surgir avanços na área com o Monge, Marin Mersenne (1588-1648) com a estipulação da velocidade de propagação do som no ar. Isaac Newton (1642-1727), desenvolve uma fórmula aproximada para a determinação da velocidade de propagação [18].

O século XVIII trouxe grandes avanços teóricos levados a cabo por vários matemáticos, no que toca ao entendimento dinâmico da vibração de cordas, sendo que este capítulo apenas ficou resolvido no início do século XIX, em 1822 por Joseph Fourier [18].

No século XIX surgiram ainda o cientista, físico e médico alemão, Hermann Helmholtz (1821-1894) e o matemático e físico inglês, John Rayleigh (1842-1919). Helmholtz fortificou o conhecimento no domínio da acústica fisiológica e desenvolveu, na área da absorção sonora, os conhecidos ressoadores de Helmholtz, muito utilizados na época e que ainda hoje se encontram em construções. Rayleigh faz uma afirmação de maior importância no domínio da acústica com o seu livro *The Theory of Sound* caracterizado pelo uso extensivo da matemática para descrição dos fenómenos acústicos [18].

Wallace Sabine (1868-1919) inicia o século XX com a introdução de conhecimentos que se tornaram base na área da acústica arquitetónica. Realizou inúmeros ensaios acústicos na Universidade de Harvard, onde era professor, a fim de tentar melhorar a péssima acústica de um auditório que possuía uma arquitetura desfavorável à inteligibilidade do discurso. Embora não tenha conseguido melhorar significativamente a acústica da sala, todos os ensaios realizados conferiram-lhe um vasto leque de conhecimentos como é o caso da famosa fórmula de Sabine para cálculo do tempo de reverberação de uma sala. Estes conhecimentos foram posteriormente aplicados no projeto de *Boston Symphony Hall* que viria a ser considerada uma das melhores salas de música de todos os tempos [18].

Durante o século XX existiram inúmeras outras realizações por parte de vários intervenientes dos quais se deve salientar: Cryill Harris, Michael Barron e Vern Knudsen que investigaram o tema de acústica de salas. Philip Morse, Karl Ingard, Allan Pierce e Leo Beranek escreveram grandes textos sobre acústica teórica, tendo Beranek ainda escrito dois livros acerca dos fundamentos da acústica de salas de concerto [18].

Em 1929 foi formada a *Acoustical Society of America* que desempenhou um papel fundamental na globalização do conhecimento acústico através do jornal periódico, o *Journal of the Acoustical Society of America* [18].

Nos dias de hoje, a Acústica é uma ciência vasta e transversal abrangendo vários domínios do conhecimento como são exemplo a bioacústica, psicoacústica, acústica musical, a eletroacústica assim como a que iremos abordar neste capítulo, a acústica de edifícios, mais particularmente, acústica de salas de aula [1].

3.2. EVOLUÇÃO DO PARQUE ESCOLAR EM PORTUGAL

Escola é um local dedicado ao ensino, essencialmente dos mais novos, onde quase todo o processo de transmissão do conhecimento assenta na comunicação verbal que, para existir, é necessário o conjunto: emissor (professor), mensagem e recetor (alunos). Assim sendo, é de grande interesse garantir um ambiente em que a mensagem seja igualmente clara e perceptível para todos os ouvintes.

O sistema educativo tem já uma longa história na sua evolução em Portugal. Durante a Idade Média até ao século das luzes, o ensino inicial era dado em alguns mosteiros e outras escolas mais humildes. No século XIII é criada a primeira Universidade em Portugal, estabelecida por “Estudo Geral” em Lisboa, tendo sido transferida mais tarde, durante o reinado de D. João III, para a cidade de Coimbra.

Durante os séculos XVI a XVIII, os Jesuítas apoderam-se do sistema educativo do país com a construção de inúmeros colégios de ensino gratuito.

Apenas em 1815, no reinado de D. Maria I, é criado o ensino feminino, aparecendo mais tarde, em 1888 os primeiros liceus femininos. Contudo, até aqui, as bases do ensino seguem as diretrizes das ordens religiosas presentes em cada época. É, após a instauração da República em 1910, que o regime procede à abolição das ordens religiosas e começa a surgir uma séria preocupação com a decadência do sistema de instrução português, numa altura em que cerca de 70% da população é analfabeta.

O agrupamento de escolas nacional começa a ganhar forma após a revolução industrial com a necessidade de educar a população. Nesta altura inicia-se a primeira das três fases distintas de construção inicial de 477 estabelecimentos de ensino secundário, muitas das quais ainda hoje integram o agrupamento escolar nacional [19].

A primeira fase, enquadra-se sensivelmente entre 1836 e 1935 contempla a construção de 12 escolas distribuídas pelas cidades do Porto, Lisboa, Coimbra, Beja e Lamego. Pela necessidade de instrução global e sendo estas zonas de grande centralidade, é também nesta primeira fase que se começa a deixar de utilizar o modelo de edifício único, compacto e se começa a adotar o modelo francês de *Lycée*, caracterizado pela sua disposição alargada, geralmente ocupando um quarteirão urbano e vários pátios [19].

O segundo período de construção dá-se de 1936 até 1968 durante o qual é prevista a construção de 94 novas escolas. Nesta altura o ensino assemelhava-se ao modelo fabril – muitas vezes adequado às necessidades locais, com a especialização em tarefas para o maior número de crianças/jovens (produção em série) – tornando a maioria das instituições criadas nesta fase, destinadas ao ensino técnico. Os

edifícios deste período assumiram configurações lineares com agregação de vários corpos com dois ou três pisos [19].

Em 1968 inicia-se o terceiro e último grande período de construção, que visa edificar 356 escolas. Esta fase tem por base o conhecimento resultante dos projetos erguidos durante as duas fases anteriores. Projetos-tipo de liceu, escola-técnica e escola-preparatória são desenvolvidos tendo por base o desempenho das construções anteriores despidendo-as de qualquer ornamentação de modo a acelerar o processo de construção e torná-lo claramente mais económico [19].

Todo o faseamento experimental introduzindo diferentes morfologias, materiais e diversas soluções construtivas, aliado à adaptação natural no tempo dos paradigmas educativos culminou num conjunto de edifícios díspar, com características (acústicas) muito diferentes, o que dificulta muito uma intervenção a nível global posterior.

Embora já existisse conhecimento de acústica de edifícios desde cerca de 1929, isto é, antes de se dar início à primeira grande fase de construção, esta visão teve pouco ou mesmo nenhum peso que diz respeito ao desenvolvimento dos projetos das escolas. Na verdade, isto verifica-se não só em Portugal, mas sim um pouco por toda a Europa:

“Olhando para salas ao longo da Europa, nós temos de referir, que as propriedades destas salas são tão fracas em geral, que nós devemos ter a sensação de que não deve existir qualquer conhecimento disponível a nível da acústica de salas... Contudo, se virmos as datas de publicação de literaturas sobre acústica de salas e a sua importância na inteligibilidade do discurso, veremos que o conhecimento base já tinha sido publicado no fim dos anos 30, início dos anos 40.” [20]

Apenas com o início do século XXI é que o conforto acústico começou a ser estudado mais profundamente e a ser destacado como uma das principais prioridades nas novas construções. Inúmeros estudos começam a surgir com especial interesse a nível académico, no que concerne ao impacto do ruído no desempenho de alunos e professores.

3.3. CONFORTO ACÚSTICO EM SALAS DE AULA

Toda a instituição de ensino desempenha um papel fulcral no desenvolvimento de uma sociedade contribuindo para um crescimento intelectual, presente desde o início da vida de toda a população. A qualidade acústica é uma característica de destaque em espaços onde a comunicação verbal tem o papel fundamental de transmitir o conhecimento. O crescente esforço para compreender os efeitos do ruído no desempenho escolar fez despertar uma nova atenção para a obtenção de espaços de ensino com ambientes acusticamente saudáveis.

A qualidade ambiental de um edifício é a sua aptidão para proporcionar conforto para os seus utilizadores. As capacidades intelectuais de um indivíduo são facilmente comprometidas por um ruído sendo ainda mais gravoso para as crianças dado possuírem baixo conhecimento em termos de vocabulário e conceitos, o que dificulta a compreensão do significado, a contextualização ou até mesmo a interiorização de novos conceitos. Igualmente, pessoas cuja língua utilizada no discurso não seja a sua língua materna possuem na mesma medida essas dificuldades [21].

Tal como referido no capítulo anterior, os ruídos existentes numa sala podem ser categorizados essencialmente em três grupos distintos segundo a sua origem. Distinguem-se assim ruídos provenientes de fontes externas, com é exemplo o ruído de tráfego, zonas industriais e zonas de recreio; ruídos provenientes dos corredores e salas adjacentes. Estes ruídos propagam-se geralmente através da estrutura do edifício e de “pontes acústicas” (isto é, fraca colmatação de frinchas, caixilharias, etc.). Ruídos

provenientes de fontes internas, para os ruídos produzidos no interior do compartimento (diálogo aluno – professor, colegas de grupo, arrastar de cadeiras, quedas de material, etc) que no compartimento onde são gerados se propagam principalmente pelo ar. E por fim, ruídos de equipamentos que resultam de vibrações de máquinas e tubagens que são transmitidas por ligações rígidas existentes entre si, a elementos construtivos que conseqüentemente amplificam as vibrações incidentes [22].

A aprendizagem humana depende fortemente da aprendizagem verbal sendo, portanto, vital para a evolução de uma sociedade com base no conhecimento. Nas escolas, as crianças estão expostas a diversos tipos de ruídos situando-se os casos mais graves no centro das zonas urbanas.

O estudo dos efeitos do ruído, não só em ambiente de aprendizagem, mas também em locais de trabalho como é o caso dos docentes, inicia-se no século XX, ganhando uma grande dimensão com o virar do século [23, 24].

Uma sala acusticamente fraca pode gerar problemas a nível de desempenho dos alunos. Os problemas surgem na compreensão do discurso, na leitura e soletração (que afetam em especial crianças mais jovens dada a sua imaturidade neurológica e falta de experiência necessária para a contextualização da frase). Por outro lado, pode também ter efeitos psicológicos: gerar maus comportamentos que têm como motivo a dificuldade de concentração, fadiga mental, pior memória a longo prazo, entre outros [25].

Não só para os alunos, mas também para quem tenta transmitir a mensagem, o ruído é prejudicial. Em situações onde o ruído de fundo é constante, o professor tem de fazer um esforço para que o nível sonoro do seu discurso supere o nível do ruído presente. Este esforço repetitivo é muitas vezes motivo de fadiga, perda de voz e stress elevado [25] [26]. É assim, essencial criar espaços com uma boa inteligibilidade do discurso para salvaguardar o desempenho e saúde de todos os envolvidos.

Observou-se num estudo [23] que o nível sonoro médio do discurso de um docente, a um metro de distância, aumentava de 60 dB(A) (num ambiente com ruído de fundo considerado baixo) para 62 dB(A) em situações onde o nível do ruído de fundo era de 35 dB(A) e para 67 dB(A) em situações com nível de ruído de fundo igual a 45 dB(A).

A voz moderada de um professor reproduz um nível à volta dos 67 dB a 1 metro. Porém com o aumento da distância, o nível sonoro decresce até que o ruído de fundo se sobreponha. De forma a garantir uma boa inteligibilidade do discurso é necessário manter um diferencial de pelo menos 15 dB acima do nível sonoro do ruído de fundo. Isto significa que, para que um professor seja capaz de lecionar sem alterar o nível natural do seu discurso, mantendo o bom ambiente acústico, o ruído de fundo não deve exceder os 35 dB [27].

Na grande maioria dos casos em edifícios sem qualquer intervenção de cariz acústico, uma elevada percentagem deste ruído de fundo tem como origem sons produzidos no exterior. Em Nápoles, estima-se que cerca de 90% dos 500 edifícios escolares da cidade possuam as fachadas expostas a níveis de ruído que ultrapassam os 60 dB(A) [28].

Foi realizado um estudo [29] na Áustria no ano 2000 que teve em consideração o efeito do ruído numa população de 115 crianças. A amostra é representativa de uma área constituída por pequenas cidades e vilas onde o ruído tem como principais fontes sonoras o tráfego rodoviário e ferroviário. A população de crianças foi dividida em dois grupos distintos: um grupo em que cerca de metade dos intervenientes mora em zonas cuja média do nível de pressão sonora dia-noite era inferior a 50 dB(A) e a outra metade vivia em zonas acima dos 60 dB(A). A recolha dos dados permitiu estabelecer um padrão entre os dois grupos.

Concluiu-se que as crianças expostas a níveis de ruído superiores apresentam não só pressão sanguínea superior, mas também índices de cortisol superiores – hormona cujo aumento de valores está relacionado com o aumento de stress [29].

Em Londres, mediu-se o nível de ruído gerado dentro de salas de aula de escolas primárias, durante o decorrer de diversas atividades, recolhendo-se os níveis de pressão sonora desde situações mais calmas de leitura silenciosa a situações mais agitadas de trabalho de grupo que exigisse a movimentação dos elementos. Observou-se que o nível de pressão sonora equivalente de ruído de fundo gerado no compartimento variava entre 55 dB(A), nos momentos mais calmos e 75 dB(A) nas atividades mais ruidosas, sendo que o decorrer normal de uma aula se situava entre os 62 a 70 dB(A), sendo os próprios alunos a fonte de ruído dominante [30].

Para se obter uma boa inteligibilidade do discurso, é necessário não só que o ruído seja mantido o mais reduzido possível, mas também um tempo de reverberação adequado ao espaço. Para evitar que os sons produzidos dentro da sala perturbem o orador, o teto deve ser revestido por material acusticamente absorvente [31]. Contudo a clareza irá ser mais baixa para filas mais afastadas.

Maxwell e Evans [32], conduziram um estudo durante dois anos consecutivos com 90 crianças (quarenta e oito no primeiro ano e quarenta e duas no segundo), com idades compreendidas entre os três e os cinco anos, sendo a média de idades quatro anos e sete meses. O estudo tinha como objetivo estabelecer uma ligação entre a exposição crónica ao ruído e as capacidades de leitura durante o processo de aprendizagem destas crianças. As medições no primeiro ano do estudo foram realizadas em ambiente considerado ruidoso e no segundo ano, após a instalação de painéis insonorizantes nos tetos das salas de aula.

Os testes eram individuais, com uma duração de cerca de quarenta minutos distribuídos por 2 dias de modo a evitar que a fadiga interferisse nos resultados obtidos, testando três aspetos principais: reconhecimento de números e letras, correspondência sonora das letras e rimas. Foi ainda avaliado o nível de linguagem das crianças segundo a capacidade de compreensão quando a palavra era dirigida, a linguagem apropriada para a idade, o uso de frases e a habilidade de se expressar [32].

Verificou-se que em condições menos ruidosas, as crianças obtiveram um melhor desempenho no que diz respeito ao reconhecimento de números letras e pequenas palavras. Além mais, estas crianças utilizavam uma linguagem melhor quando comparadas com o grupo em ambiente menos silencioso [32].

Um estudo londrino realizado em 2008 com crianças com idades compreendidas entre os 7 e os 11 anos relata medições do nível sonoro que variam entre os 65 e os 72 dB(A) para creches e ensino básico, respetivamente. Conclui-se neste documento que as fontes de ruído pontuais são mais passíveis de provocar distrações nas crianças, sendo a capacidade de leitura a mais afetada em comparação com a escrita e cálculo [33].

Um outro estudo levado a cabo na Alemanha em 2006 foi realizado de modo a estudar os efeitos na perceção de discurso e desempenho cognitivo, de adversas condições acústicas em salas de aula, numa amostra de 487 crianças de 21 diferentes escolas da cidade de Estugarda [34].

O teste consistiu em adaptar uma sala para um tempo de reverberação de cerca de 0,5 segundos para posteriormente se avaliar dois grupos distintos. Um primeiro grupo (G1) que estava acostumado a ter aulas na sala adaptada e um segundo grupo (G2) que tinha aulas numa sala com elevado tempo de reverberação. Conclui-se através de um teste de discriminação de fonemas, que os elementos do G2 exibiram uma melhoria de cerca de 10% no desempenho para o teste realizado na sala com o tempo de reverberação favorável (sala adaptada) [34].

Realizou-se em 2003 em 16 escolas italianas, um questionário cuja vertente acústica continha perguntas acerca da intensidade das fontes de ruído, incomodidade do ruído da sala, as suas consequências e ainda

a claridade da voz e compressão do discurso do professor. Este estudo demonstra que o ruído mais intenso tinha origem em salas adjacentes, corredores e outros espaços do edifício. Retirou-se ainda que, apesar da intensidade do ruído, o incómodo para os alunos não era tão grande quanto o expectável devido ao esforço vocal constante que os docentes praticam de modo a manter os níveis sonoros do discurso acima dos níveis do ruído de fundo [35].

O tempo de reverberação é também um importante fator, comum a todos os espaços fechados, sendo uma característica de grande importância quando o objeto de estudo é a palavra e a percepção desta. Este é um tema especialmente sensível para crianças mais pequenas, que não possuem um campo lexical bem desenvolvido [36].

Em 2005 realizou-se um estudo em oito escolas primárias na Alemanha com o intuito de correlacionar as propriedades acústicas de algumas salas com o seu efeito na aprendizagem em alunos do segundo ano [37]. O tempo de reverberação médio era cerca de 0,7 segundos tendo-se registado valores num intervalo de 0,4 a 1,1 segundos, onde apenas três salas excediam extensamente o valor máximo admitido. Os níveis de pressão sonora encontravam-se entre 20 e 39 dB(A) nas medições realizadas com as janelas fechadas, aumentado de 28 a 58 dB(A) para o caso das janelas abertas. Foi possível observar que as crianças expostas ao ruído, apresentavam maior dificuldade em relembrarem memórias de curto prazo e em soletrar.

Em duas escolas primárias da Polónia, foi levado a cabo um estudo sobre a otimização do desempenho acústico de salas de aulas. O estudo consistiu na diferente disposição de material absorvente nas salas, de forma a controlar o ruído de fundo, o nível sonoro do discurso e a relação sinal/ruído, tendo em conta o fator custo [38]. Chegou-se à conclusão de que a colocação de material absorvente sonoro em duas paredes não opostas, é a solução mais economicamente eficaz

Em Portugal, no âmbito da modernização e remodelação do parque escolar existente, realizou-se um estudo sobre o desempenho acústico das escolas secundárias. Sendo que o grupo de escolas consegue ser bastante distinto, este foi dividido em três conjuntos diferentes, segundo o seu período de construção. No primeiro grupo constam pelos edifícios mais antigos e históricos contruídos até finais de 1930, o segundo conjunto constitui-se pelos edifícios erguidos durante o período do Estado Novo e o terceiro e último conjunto engloba os edifícios mais recentes contruídos entre os 1970 e 1980 com a tipologia de “pavilhões” [39].

Foi possível concluir que escolas pertencentes ao primeiro conjunto apresentavam um índice de isolamento a ruídos de condução aérea na ordem dos 45 dB, valor bem superior aos 40 dB registado nos dois outros grupos. Este acontecimento pode ser explicado pela utilização de materiais mais densos em construções mais antigas. Os edifícios pertencentes ao primeiro conjunto erguido, contrariamente aos restantes, acabam por cumprir os valores regulamentares atuais.

Os valores para o índice de isolamento sonoro das fachadas apresentam a mesma propensão, tendo-se registado valores superiores para edifícios pertencentes à categoria dos mais antigos (30 dB para o primeiro conjunto, 28 dB para o segundo conjunto e 26 dB para o terceiro conjunto).

Avaliou-se ainda o tempo de reverberação que apresentou uma diminuição tendencial com o passar dos anos. Obteve-se assim valores para o tempo de reverberação médio na ordem dos 2,4 s para o primeiro conjunto, 1,8 s para o segundo conjunto e 1,5 s para os edifícios mais recentes. Os valores indicam assim uma adaptação gradual das características acústicas dos espaços, mas posicionando-se ainda longe de valores indicados.

3.4. ENQUADRAMENTO LEGAL

3.4.1. NÍVEL NACIONAL

O principal objetivo da implementação de regulamentação acústica é, em regra geral, a proteção da saúde dos cidadãos quer seja no trabalho, em ambiente urbano, espaços de lazer, nas suas próprias habitações ou em situações de aprendizagem.

Em escolas, o objetivo vai além da proteção ao ruído, passando essencialmente pela otimização das qualidades auditivas dos espaços afetos à atividade com objetivo primordial a melhoria de condições de trabalho e aprendizagem em ambiente educacional.

O panorama nacional, no que concerne este tema, tem vindo a evoluir nas últimas décadas, onde é perceptível que a qualidade acústica dos espaços tem ganho significado, fazendo com que o conforto acústico seja, cada vez mais, uma prioridade para a sociedade.

Na década de 1980, começa a nascer a primeira regulamentação na área. De entre as leis, decretos-lei e portarias, destacou-se o Regulamento Geral sobre o Ruído aprovado pelo Decreto-Lei (DL) n° 251/87, entrando em vigor em 1988. As disposições contidas neste regulamento abrangiam várias áreas em que o ruído era considerado um fator relevante como são exemplo assuntos no âmbito do mapeamento acústico para efeitos de integração urbanística, limites de exposição ao ruído em locais de trabalho e conforto habitacional em termos acústicos [40].

Rapidamente se sentiu necessidade de expandir e aprofundar os assuntos desta matéria e apenas dois anos depois de o Regulamento Geral sobre o Ruído entrar em vigor, em 2000, foi implementado pelo DL 292/2000, o Regime Legal sobre a Poluição Sonora (RLPS) [40].

Este regulamento, revogou o documento suprarreferido que entrou em vigor em 1988 e deu início a uma nova abordagem ao problema acústico. Ele era aplicável a: edifícios, sua implantação e compartimentação; indústria, comércio e serviços; equipamentos e sua instalação; espetáculos e diversões; tráfego; sinalização sonora e atividades geradoras de ruído, em geral, que pudessem causar incomodidade [41].

Em 2002 é lançado o DL n° 129/2002 que aprova o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) com o intuito de controlar as exigências em questões de isolamento sonoro, tempos de reverberação específicos a diferentes espaços e ruído de equipamentos [41].

Em 2008, o RRAE sofre a primeira revisão com o DL n° 96/2008, que introduz alterações no sentido de atualizar parâmetros de desempenho acústico dos edifícios e indicadores de ruído de equipamentos e instalações. São também estabelecidos procedimentos para verificação da conformidade com os requerimentos do regulamento [41].

Os tipos de edifícios incluídos neste regulamento são:

- Edifícios habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras;
- Edifícios comerciais e de serviços, e partes similares em edifícios industriais;
- Edifícios escolares e similares, e de investigação;
- Edifícios hospitalares e similares;
- Edifícios desportivos;
- Estações de transporte de passageiros;
- Auditórios e salas.

Recentemente foi publicada a Portaria n° 305/2019 que fixa as normas técnicas dos requisitos acústicos em edifícios habitacionais existentes [41].

As principais normas portuguesas com interesse na acústica ambiental e de edifícios e na aplicação prática do RGR e RRAE são as normas: NP ISO 1996-1, NP EN ISO 140, NP EN ISO 717, NP EN ISO 3382-2 e NP EN ISO 16032.

Para o presente trabalho, é de interesse maior destacar o artigo 7º (Edifícios escolares e similares e de investigação) do RRAE que define alguns requisitos acústicos nesta vertente.

Os requisitos face ao tempo de reverberação, índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea e índice de isolamento sonoro a sons de percussão, o RRAE estabelece o seguinte [42]:

1. O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{2m,nT,w}$, entre o exterior dos edifícios e os compartimentos interiores identificados no Quadro 3.1, deve satisfazer o seguinte:
 - i. $D_{2m,nT,w} \geq 33$ dB, em zonas mistas ou em zonas sensíveis onde está prevista a construção de uma grande infraestrutura de transporte;
 - ii. $D_{2m,nT,w} \geq 28$ dB, em zonas sensíveis;
 - iii. Quando a área translúcida for superior a 60% do elemento de fachada em análise, deve ser adicionado ao índice $D_{2m,nT,w}$ o termo de adaptação apropriado, C ou C_{tr} conforme o tipo de ruído dominante na emissão, mantendo-se os limites das subalíneas i) e ii).
2. O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nT,w}$, entre locais do edifício, deve satisfazer as condições indicadas no Quadro 3.1;

Quadro 3.1. – Limites para valores de $D_{nT,w}$ entre locais do edifício, estabelecidos por RRAE [42].

Receção – Emissão	Salas de aula (*), de professores, administrativas	Bibliotecas e gabinetes médicos	Salas polivalentes e berçários
Salas de aula, de professores, administrativas	≥ 45	≥ 45	≥ 45
Salas de aula musical, polivalentes refeitórios, ginásios e oficinas	≥ 55	≥ 58	≥ 50
Berçários	≥ 53	≥ 55	≥ 48
Corredores de grande circulação (**)	≥ 30	≥ 35	≥ 30

(*) Incluindo salas de aula musical. (**) Considerando que haverá porta de comunicação com os locais recetores; se tal for caso, os valores indicados serão acrescidos de 15 dB.

3. No interior dos locais de receção definidos no Quadro 3.1, o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nT,w}$, provenientes de percussão normalizada sobre pavimentos de outros locais de edifício, como locais emissores, deve satisfazer o seguinte:
 - i. $L'_{nT,w} \leq 60$ dB, se o local emissor for de grande circulação, ginásio, refeitório ou oficina;
 - ii. $L'_{nT,w} \leq 65$ dB, se o local for salas de aulas, berçário ou salas polivalentes;
4. No interior dos locais que constem no Quadro 3.2, considerados mobilados normalmente e sem ocupação, o tempo de reverberação, TR , correspondente à média aritmética dos valores

obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, deve satisfazer as condições indicadas no referido quadro;

Quadro 3.2. – Cálculo para tempo de reverberação máximo estabelecido por RRAE [42].

Locais	Tempo de reverberação (500 Hz – 2000 Hz)
Salas de aula, bibliotecas, salas polivalentes e refeitórios	$T \leq 0,15 V^{1/3}$ [s]
Ginásios	

V = volume interior do recinto em causa

- O paramento interior da envolvente dos átrios e corredores de grande circulação deve ser dotado de revestimentos absorventes sonoros, cuja área de absorção sonora equivalente, A (m²), correspondente média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, seja maior ou igual a 25% da superfície de pavimento dos locais considerados;
- No interior dos locais de receção indicados no Quadro 3.1 o nível de avaliação $L_{Ar,nT}$, do ruído particular de equipamentos do edifício deve satisfazer as condições indicadas no Quadro 3.3..

Quadro 3.3. – Limites para níveis de $L_{Ar,nT}$, estabelecidos por RRAE [42].

Locais	Níveis de avaliação, $L_{Ar,nT}$
Biblioteca	$L_{Ar,nT} \leq 35$ dB(A) (se i funcionamento do equipamento for intermitente).
	$L_{Ar,nT} \leq 30$ dB(A) (se o funcionamento do equipamento for contínuo).
Restantes locais de receção indicados no quadro II	$L_{Ar,nT} \leq 40$ dB(A) (se i funcionamento do equipamento for intermitente).
	$L_{Ar,nT} \leq 35$ dB(A) (se o funcionamento do equipamento for contínuo).

A conformidade para com o regulamento é verificada quando conjuntamente:

- O valor obtido de $D_{2m, nT, w}$ ou $D_{nT, w}$ acrescido de 3 dB, satisfaça o limite regulamentar;
- O valor obtido de $L_{Ar, nT}$ diminuído de 3 dB, satisfaça o limite regulamentar;
- O valor obtido de TR diminuído de 25% do limite regulamentar, satisfaça o limite regulamentar.

3.4.2. NÍVEL INTERNACIONAL

Passando agora para uma análise global, irá ser apresentada a legislação aplicável no que diz respeito requisitos acústicos de alguns países.

3.4.2.1. Estados Unidos da América

Nos EUA, a *Acoustical Society of America* (ASA) em conjunto com o *American National Standard Institute* (ANSI) foram responsáveis pelo desenvolvimento da ANSI/ASN S12-60, uma norma dedicada especialmente às necessidades acústicas das escolas.

Para além dos critérios de desempenho acústico, esta norma contempla ainda informação sobre boas práticas para a construção e conceção deste tipo de edifícios. A norma encontra-se dividida em duas partes sendo que a primeira diz respeito a escolas permanentes e a segunda a fatores para salas amovíveis [43].

A norma estabelece, em função do volume, funções do espaço e condições de funcionamento de equipamentos (AVAC), valores máximos para a exposição ao ruído de fundo, num período de uma hora ($L_{Aeq,60min}$) e para o tempo de reverberação (T), para níveis de pressão sonora medidos nas oitavas de banda de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz tal como representam os quadros 3.4 e 3.5:

Quadro 3.4. – EUA: Valores máximos de $L_{Aeq,60min}$ e tempo de reverberação (T) em função do volume [44].

Volume (m ³)	$L_{Aeq,60min}$ (dB)	T (s)
$V \leq 283 \text{ m}^3$	35	0,6
$283 < V \leq 566 \text{ m}^3$	35	0,7
$V > 566 \text{ m}^3$	40	–

Quadro 3.5. – EUA: Valores máximos para o ruído de fundo com origem em AVAC [44].

Tipos de espaço	Condições de funcionamento do AVAC	$L_{Aeq,60min}$ (dB)	
		Equipamentos AVAC simples	Equipamentos AVAC múltiplos
Principais	Capacidade máxima	35	37
	Capacidade reduzida	–	34
Auxiliares	Capacidade máxima	40	42
	Capacidade reduzida	–	39

Na norma, são ainda mencionados requisitos no que diz respeito ao isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, mas caracterizados pelo parâmetro americano STC – *Sound Transmission Class* (Quadro 3.6 e 3.7)

Quadro 3.6. – EUA: Valores mínimos para STC entre espaços principais e os espaços adjacentes [44].

Espaços principais		Espaços adjacentes	
Salas de aula, enfermaria, salas acústicas	Uso comum e público, WC ou balneários	Corredores, escadas, gabinetes ou auditórios	Sala de música, sala de máquinas, bares, refeitórios e ginásios
50	53	45	60

Quadro 3.7. – EUA: Valores mínimos para STC entre espaços auxiliares e outros espaços adjacentes [44].

Espaços auxiliares	Corredor, caixa de escadas, WC	Salas de música	Gabinetes, salas de reuniões	Ginásios, bares e refeitórios
Corredor	45	60	45	55
Sala de música	60	60	60	60
Gabinetes e salas de reuniões	45	60	45	60

3.4.2.2. Reino Unido

O Reino Unido possui um documento semelhante ao analisado acima, o *Building Bulletin 93* [BB93]. Este documento estabelece padrões mínimos de desempenho para a acústica de escolas, descrevendo procedimentos para verificação de conformidade, fornecendo ainda orientações para apoio aos regulamentos escolares.

Quadro 3.8. – Reino Unido: Valores mínimos para $D_{nT,w}$ [45].

$D_{nT,w}$ (dB)		Ruído de sala adjacente			
		Baixo	Médio	Alto	Muito alto
Tolerância de ruído para espaços	Alta	–	35	45	50
	Média	40	45	50	55
	Baixa	45	50	55	55

Quadro 3.9. – Reino Unido: Valores máximos para tempos de reverberação (média 500/1k/2k Hz) consoante a tipologia do espaço [45].

Espaço	T (s)
Sala de aula (Escola primária)	0,6
Sala de aula (Escola secundária)	0,8
Salas de estudo	0,8
Laboratórios	0,8
Sala de música	1,0
Sala de leitura pequena (≤ 50 pessoas)	0,8
Biblioteca	1,0
Zonas de circulação comum	1,5
Ginásio	1,5

Além disso, o BB93 apresenta ainda valores regulamentares de *Speech Transmission Index* (STI):

Os seis primeiros capítulos definem valores recomendados para parâmetros acústicos como são exemplo o tempo de reverberação e isolamento sonoro à transmissão de ruídos aéreos e de percussão, sendo o sexto dedicado a espaços com funções especiais como é o caso de salas dedicadas à aprendizagem por parte de crianças com problemas auditivos. No último capítulo são apresentados alguns casos tornados exemplo de forma a salientar alguns dos pontos mais importantes em conceções semelhantes.

O quadro 3.8 apresenta valores mínimos requeridos para o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ($D_{nT,w}$) para diferentes atividades. O quadro 3.9 apresenta valores máximos para o tempo de reverberação médios para diferentes zonas da escola para uma média aritmética para as oitavas de banda de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz.

Quadro 3.10. – Reino Unido: Valor mínimo de STI para salas de aula [45].

Condição	STI
Sala de aula	0,6

3.4.2.3. Espanha

No nosso país vizinho, vigora o documento básico (DB-HR *Protección frente al ruido*) atualizado em 2019. O documento inicial criado em 2007 apenas apresentava diretrizes quanto ao tempo de reverberação de vários espaços e estabelecia critérios para materiais, regras a seguir e procedimentos para verificar a conformidade com as últimas. O documento mais recente estabelece ainda diretrizes acerca do isolamento a ruídos de condução aérea, do isolamento a ruídos de percussão e do ruído e vibrações das instalações.

A legislação apenas contempla regulamentação para casos em que o volume da sala seja inferior a 350 m³ (Quadro 3.11). Para volumes acima do referido, deve existir um estudo mais pormenorizado.

Quadro 3.11 – Espanha: Valores máximos para o tempo de reverberação (média 500 – 2k Hz) [46].

Local	T (s) (500 Hz – 2 kHz)
Sala de aula e de conferência, sem ocupação nem mobiliário (Volume ≤ 350 m ³)	0,7
Sala de aula e de conferência, sem ocupação, mas com mobiliário (Volume ≤ 350 m ³)	0,5
Restaurantes e refeitórios vazios	0,9

No que diz respeito a “recintos protegidos” (espaços de um edifício, limitados por elementos separadores, onde é necessário garantir condições acústicas acima das consideradas em espaços correntes), o regulamento espanhol [46] define para o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea que:

1. Para ruído gerado em espaços pertencentes à mesma unidade de uso, o índice global de redução acústica, ponderado A, R_A , da partição não será menor que 33 dB(A);

2. Para ruído gerado em espaços não pertencentes à mesma unidade de uso, o isolamento acústico a ruídos de condução aérea, $D_{nT,A}$, entre um espaço protegido e outro, que não seja recinto de instalações ou atividades, vertical ou horizontalmente adjacente, não deve ser inferior a 50 dB(A) desde que não compartilhem portas ou janelas.
Quando compartilham portas ou janelas, o índice de redução de ruído ponderado A, R_A , não deve ser inferior a 30 dB(A);
3. Para ruído gerado em recintos de instalações ou atividades colinear vertical ou horizontalmente com um recinto protegido, o isolamento acústico a ruídos de condução aérea, $D_{nT,A}$, não deve ser menor que 55 dB(A);
4. Para ruído proveniente do exterior o Quadro 3.12 apresenta valores para o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea em função do índice de ruído durante o período diurno.

Quadro 3.12 – Espanha: Valores de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, $D_{2m,nT,Atr}$ em dB(A), entre um espaço protegido e o exterior, em função do índice de ruído durante o período diurno, L_d , adaptado de [46].

L_d dB(A)	$D_{2m,nT,Atr}$ Salas de aula dB
$L_d \leq 60$	30
$60 < L_d \leq 65$	30
$65 < L_d \leq 70$	32
$70 < L_d \leq 75$	37
$L_d > 75$	42

Quanto ao isolamento sonoro a ruídos de percussão a “recintos protegidos”, o documento estabelece que:

1. Para ruído gerado em recintos não pertencentes à mesma unidade de uso, o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão, $L'_{nT,w}$, entre um espaço protegido colinear vertical, horizontalmente ou que possua uma aresta horizontal comum com outro recinto protegido, que não seja um recinto de atividades ou instalações, não deverá ser superior a 65 dB;
2. Para ruído gerado em recintos para outras atividades ou para instalações, o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão, $L'_{nT,w}$, num espaço protegido colinear vertical, horizontalmente ou que tenha uma aresta horizontal em comum com o recinto onde o ruído é gerado, não deverá ser superior a 60 dB.

3.4.2.4. França

Em França vigora o decreto de 25 de abril de 2003 [47], que estabelece “limites para o ruído dentro de estabelecimentos de ensino”. Este documento limita o tempo de reverberação (Quadro 3.13) e os valores para isolamento sonoro a ruídos de transmissão aérea (Quadro 3.14) e por percussão, para diferentes espaços, aplicando-se valores mais exigentes para jardins de infância e outras exceções.

Quanto ao nível de pressão de ruídos de percussão ($L'_{nT,W}$) o regulamento estabelece um limite superior de 60 dB para ruídos produzidos pela máquina de impacto.

Quadro 3.13 – França: Valores máximos para tempo de reverberação [47].

Locais s/ ocupação	Tempo de reverberação (500 – 2000 Hz) [s]
Locais de ensino, atividades, música, administrativos, refeitórios, bibliotecas;	$0,4 \leq Tr \leq 0,8$
Locais de ensino, de música, atividades c/ volume > 250 m ³ ;	$0,6 \leq Tr \leq 1,2$
Salas polivalentes c/ volume > 250 m ³ (1);	$0,6 \leq Tr \leq 1,2$ (2)
Outros locais de circulação e acessos c/ volume > 250 m ³	$Tr \leq 1,2$ se $250 \text{ m}^3 < V < 512 \text{ m}^3$
	$Tr \leq 0,15 \sqrt[3]{V}$ se $V > 512 \text{ m}^3$

(1) No caso de se utilizar o refeitório como sala polivalente, consideram-se os valores p/ refeitórios.

(2) É necessário um estudo particular para atingir boa inteligibilidade da sala

Quadro 3.14 – França: Valores mínimos para isolamento sonoro a ruídos de condução aérea em estabelecimentos de ensino que não cresces e jardins de infância, adaptado de [47].

Emissor – Recetor	Salas de aula, atividades e administrativas	Locais de circulação	Salas de música, polivalentes e desporto
Sala de aula, de atividades administrativas, biblioteca, sala de música, de reunião, de professores e oficinas	43 ⁽¹⁾	30	53
Salas polivalentes	40	30	50

(1) Um isolamento de 40 dB é admitido na presença de uma ou mais portas de comunicação

3.4.2.5. Austrália

A Austrália e a Nova Zelândia partilham a mesma norma, a AS/NZS 2017 [48] onde estão definidos os valores desejáveis no que diz respeito ao tempo de reverberação e níveis de ruído de fundo (Quadro 3.15).

Através da observação do Quadro 3.15 é possível perceber a exigente recomendação, no que diz respeito ao tempo de reverberação, em vigor nestes dois países.

O Quadro 3.16 apresenta valores mínimos recomendados para o índice de redução sonora (R_w), preconizados na norma.

Quadro 3.15 – Austrália: Valores máximos para o tempo de reverberação, adaptado de [48].

Local	Ruído de fundo (dB)	Tempo de reverberação (500 – 2000 Hz) [s]
Salas de aula – primária	35	0,4
Salas de aula - secundária		0,5
Salas de aula <i>open space</i>	40	0,4
Salas de aula para alunos c/ problemas auditivos	30	0,4
Laboratórios	35 – 40	0,5 – 0,6
Bibliotecas		0,5 – 0,8
Salas de música	35	0,3 – 1,4 ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Depende da função, do volume e do pé direito.

Quadro 3.16 – Austrália: Valores mínimos recomendados para o índice de redução sonora (R_w), adaptado de [48].

Emissor – Recetor	Biblioteca sala de estudo	Sala de aula	Sala polivalente	Oficinas	Ginásio	Sala de música
Oficina	60	60	60	55	55	60
Ginásio	60	60	60	55	55	60
Sala de aula	50	50	60	60	60	60
Sala polivalente	60	60	60	60	60	60
Biblioteca sala de estudo	45	50	60	60	60	60
Sala de música	60	60	60	60	60	60

3.4.2.6. OMS

Em 1999, a Organização Mundial de Saúde (OMS) publicou as “Diretrizes para Ruído da Comunidade”. Este documento tem como objetivo consolidar o conhecimento científico no que diz respeito ao impacto do ruído na comunidade, fornecendo orientações para autoridades de saúde ambiental e profissionais com o objetivo de proteger as pessoas de efeitos nocivos do ruído em ambiente não industrial [49].

Para além de expor alguns dos problemas de saúde com causa na poluição sonora, o documento fornece também conjuntos de valores recomendados para alguns ambientes específicos (moradias, escolas e pré-escolas, hospitais, etc.)

O Quadro 3.17 apresenta os valores recomendados em escolas e pré-escolas relativos a cada parâmetro.

Quadro 3.17 – Valores máximos recomendados pela OMS para recintos escolares [49]

Local	Tempo de reverberação (s)	Ruído ambiente (LAeq)
Sala de Aula	0,6 ⁽¹⁾	35 dB ⁽¹⁾
Recreio	–	55 dB
Corredores e Bares	1,0	

⁽¹⁾ Valores menores podem ser necessários para crianças com problemas auditivos

4

MEDIÇÕES ACÚSTICAS

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ESCOLA SECUNDÁRIA DE GONDOMAR

O atual edifício em que opera Escola Secundária de Gondomar (ESG) foi inaugurado em 1963. A então Escola Industrial e Comercial de Gondomar foi-se adaptando ao longo dos tempos às necessidades laborais da cidade, tendo recebido o seu atual nome em 1978 (Figura 4.1).

Durante estes quase os seus 60 anos, o edifício sofreu já duas grandes intervenções a nível estrutural. A primeira durante o ano letivo de 2004/2005, que comportou a construção de um novo pavilhão desportivo e a expansão do bloco central aumentando o número de salas de aulas. A segunda, já realizada pela Parque Escolar em 2009/2010, onde para além de toda a renovação do espaço afeto à escola, construção de novas estruturas e a ligação entre o corpo de aulas e o corpo dos ginásios preexistentes, contou também com um projeto de acústica.



Figura 4.1 – Fachada principal da Escola Secundária de Gondomar [50].

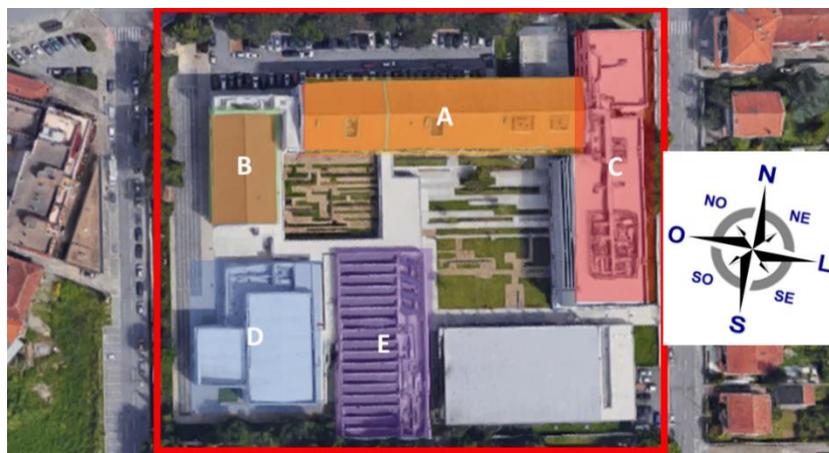


Figura 4.2 – Vista aérea da Escola Secundária de Gondomar [51].

O corpo escolar é constituído por cinco edifícios distintos (A, B, C, D e E), representados na Figura 4.2), sendo a fachada principal orientada ligeiramente a noroeste. Todos os edifícios estão interligados por um conjunto de corredores fechados relativamente ao espaço exterior. Destas cinco construções apenas duas (A e B) já existiam antes da última intervenção, todos os restantes foram construídos de raiz.

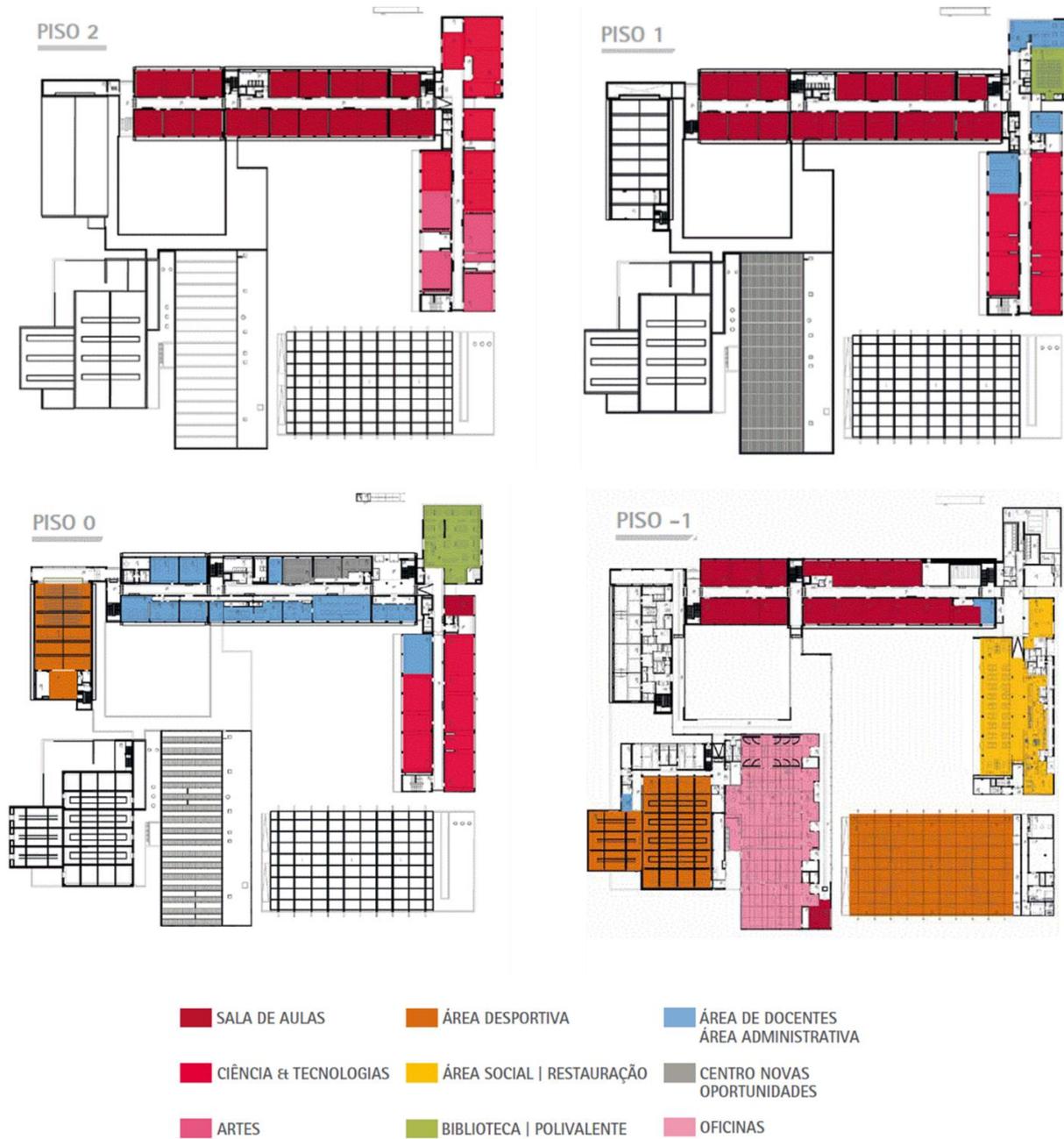


Figura 4.3 – Organização funcional, por piso, da Escola Secundária de Gondomar [52]

O bloco “A” é o mais antigo de todos possuindo quatro pisos sendo três acima do nível do átrio principal e um abaixo. Neste bloco encontram-se para além da receção, contém também os serviços académicos, serviços administrativos e as principais salas de aula teóricas. É neste bloco que se encontra a sala a1.10 (Figura 4.4), a1.09 e a sala de formações que entrarão de seguida no estudo deste trabalho.

A volumetria da sala a1.10 em estudo é caracterizada pelas dimensões apresentadas no Quadro 4.1.

Nestas salas podemos salientar alguns pormenores que desempenham uma função fundamental no papel acústico das mesmas (Figura 4.5).



Figura 4.4 – Sala a1.10 da Escola Secundária de Gondomar [foto do autor].

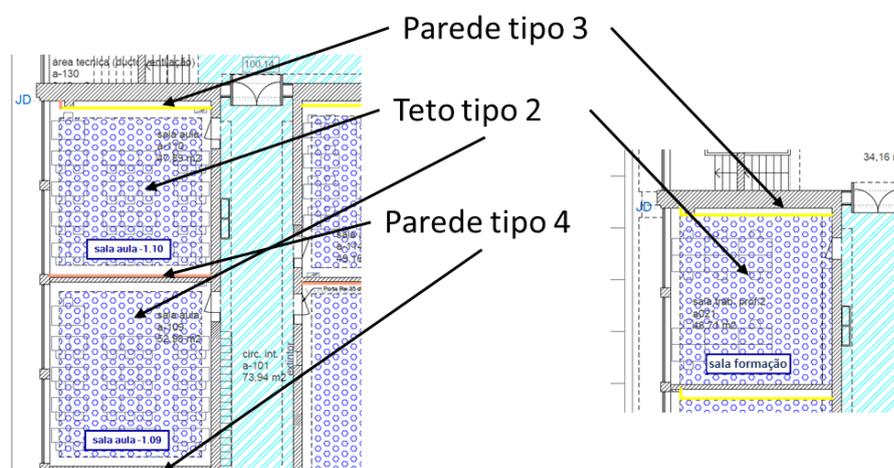


Figura 4.5 – Planta das salas a1.10 e a1.09 com alterações do projeto de acústica [53].

O reforço nas paredes é obtido não só com o aumento da espessura deste elemento separador das duas divisórias, mas também pela colocação de lã de rocha entre este. No caso da parede do tipo 3, é adicionada uma membrana acústica entre as placas de gesso cartonado em zonas mais desfavoráveis e/ou exigentes como é o caso da sala de aula em contacto com a caixa de escadas, de forma a aumentar a rigidez do elemento e consecutivamente a sua absorção de vibrações.

As Figuras 4.6 e 4.7 representam os cortes construtivos do tipo de parede 3 e 4.

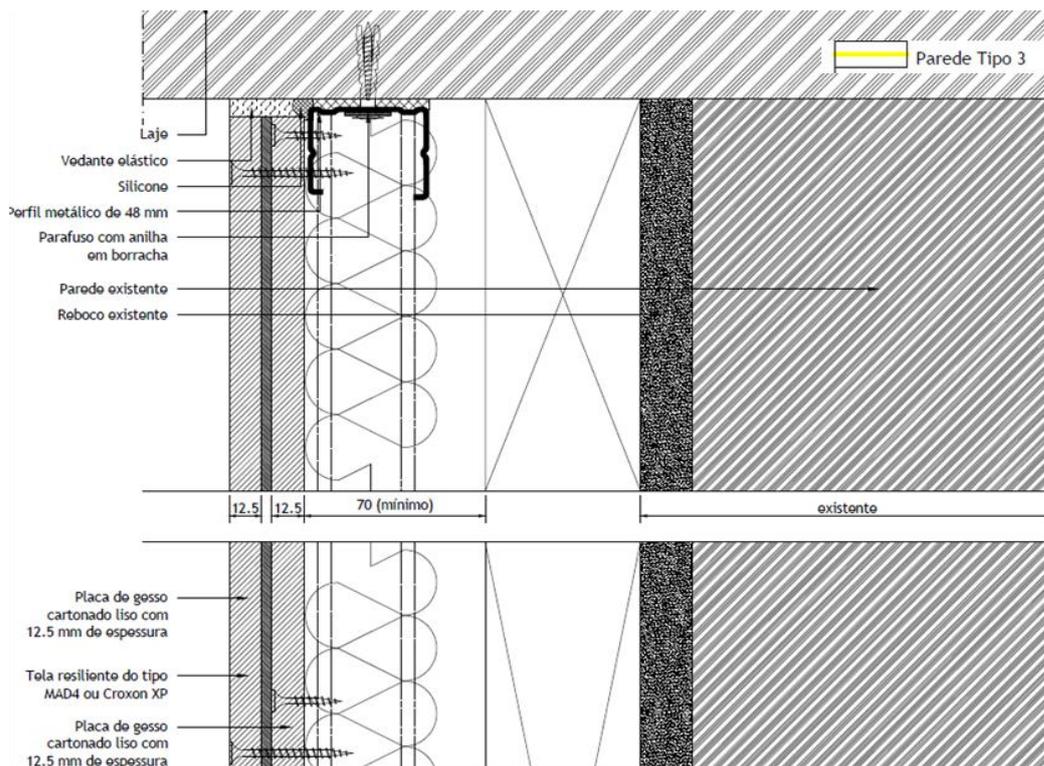


Figura 4.6 – Corte construtivo da parede tipo 3 da Escola Secundária de Gondomar [53].

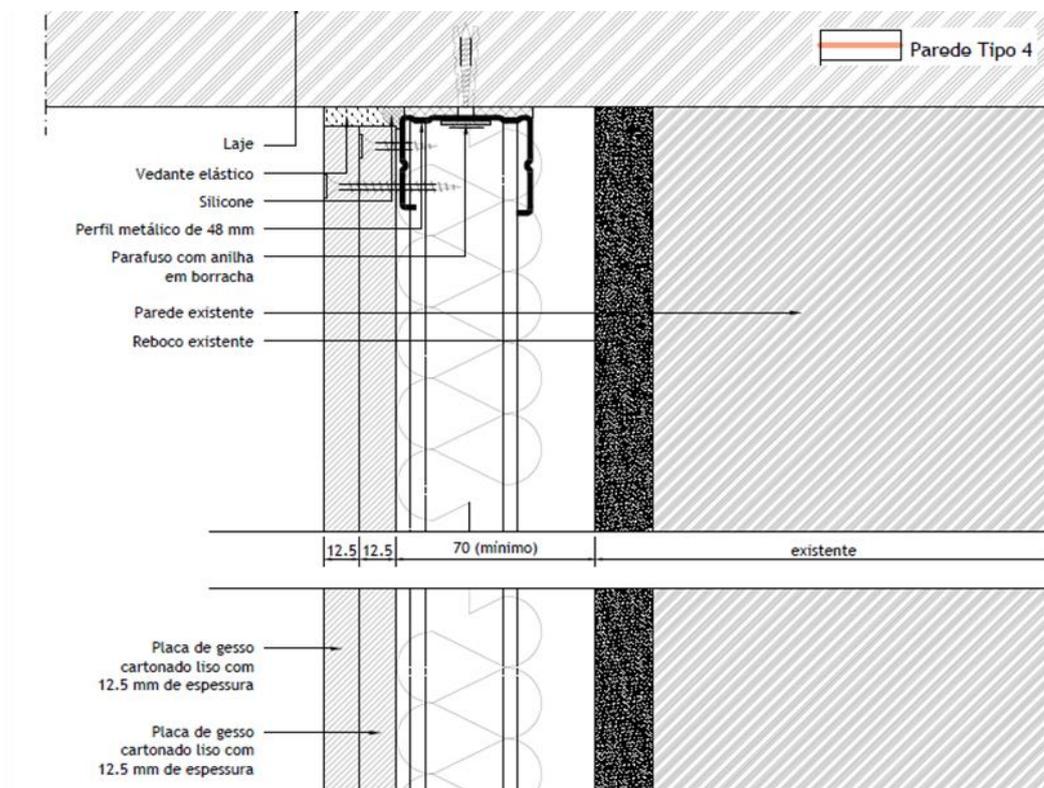


Figura 4.7 – Corte construtivo da parede tipo 4 da Escola Secundária de Gondomar [53].

A colmatação das frinchas laterais e superior é feita recorrendo a uma borracha, funcionando também como batente. De outra forma, a colmatação da frincha inferior (Figura 4.8) é feita por um elemento enclausurado no inferior da porta, que com o auxílio de um sistema mecânico, apenas entra em funcionamento quando a porta está fechada. É um sistema deveras importante pois permite isolar uma das “pontes acústicas” mais frágeis.

Também visível na Figura 4.8 (direita), o recobrimento do pavimento que ajuda a atenuar ruídos provocados por impacto direto.

Um outro pormenor importante de referir é o rebaixamento do pé direito das salas, que passou de 3,90 a 2,70 m recorrendo placas de gesso cartonado perfuradas com lã de rocha na zona posterior (Figura 4.9 e 4.10) o que confere ao teto um comportamento de “ressoadores agrupados”.



Figura 4.8 – Sistema de colmatação de frinchas laterais e superior (esquerda) e frincha inferior (direita) [foto do autor].



Figura 4.9 – Pormenor do teto em gesso cartonado perfurado com lã de rocha na zona posterior [Foto do autor].

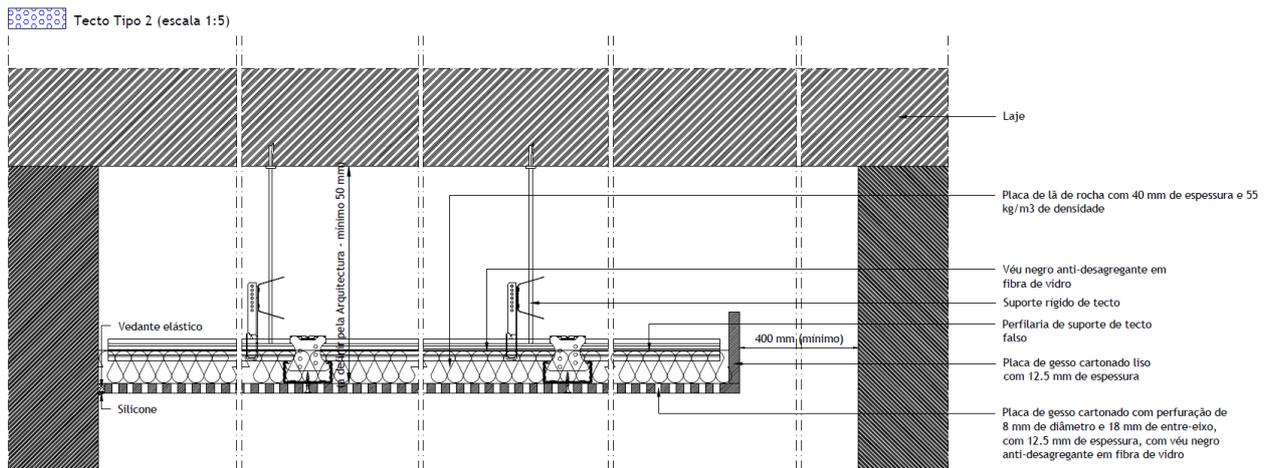


Figura 4.10 – Pormenor construtivo de teto tipo 2 da Escola Secundária de Gondomar [53].

O bloco C possui três pisos constituídos principalmente por salas de aula mais orientadas a aulas práticas e experimentais, em particular a sala b0.11 localizada no piso 0 (Figura 4.11) e o refeitório localizado no piso -1 (Figura 4.12).



Figura 4.11 – Sala b0.11 de Escola Secundária de Gondomar [foto do autor].



Figura 4.12 – Refeitório de Escola Secundária de Gondomar [foto do autor].

A volumetria destes espaços caracteriza-se pelas dimensões apresentadas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Dimensões dos locais em estudo da Escola Secundária de Gondomar.

Local	Comprimento (m)	Largura (m)	Pé Direito (m)	Volume (m ³)
Sala a1.10	7,00	6,80	2,70	128
Sala b0.11	10,10	7,40	2,80	209
Refeitório	37,30/28,20	8,25/3,00	3,00/2,70	1152

Neste bloco C, existe entre todas as salas uma divisão com a função de realizar uma eventual preparação para as aulas laboratoriais com acesso restrito. Este compartimento entre salas trabalha também no sentido de redução de transmissão do ruído criando um enorme espaço de ar entre salas (Figura 4.13).

A existência destes compartimentos permite que as paredes de separação sejam construídas de forma mais simples, sem recorrer à utilização de tijolos ou blocos de betão, tal como se pode verificar pela Figura 4.14.

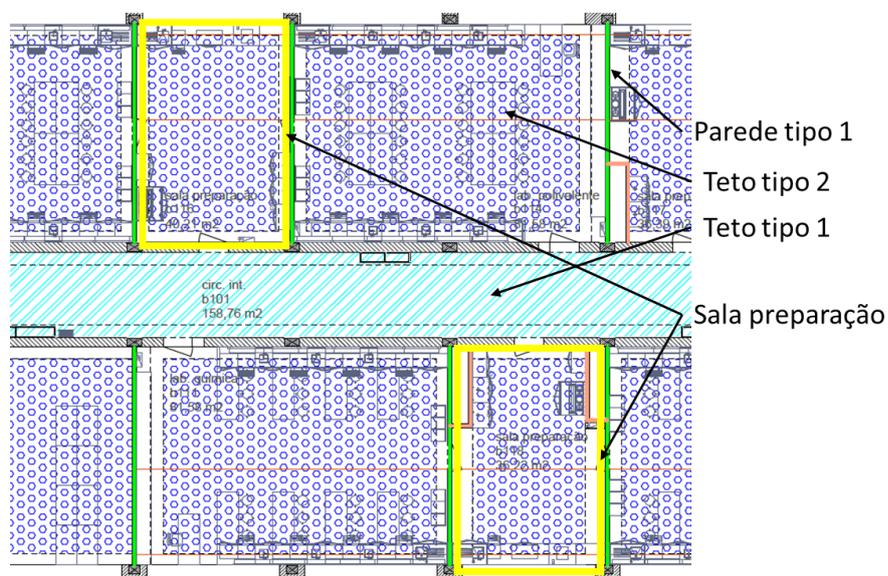


Figura 4.13 – Planta genérica de projeto de acústica para o edifício B [53].

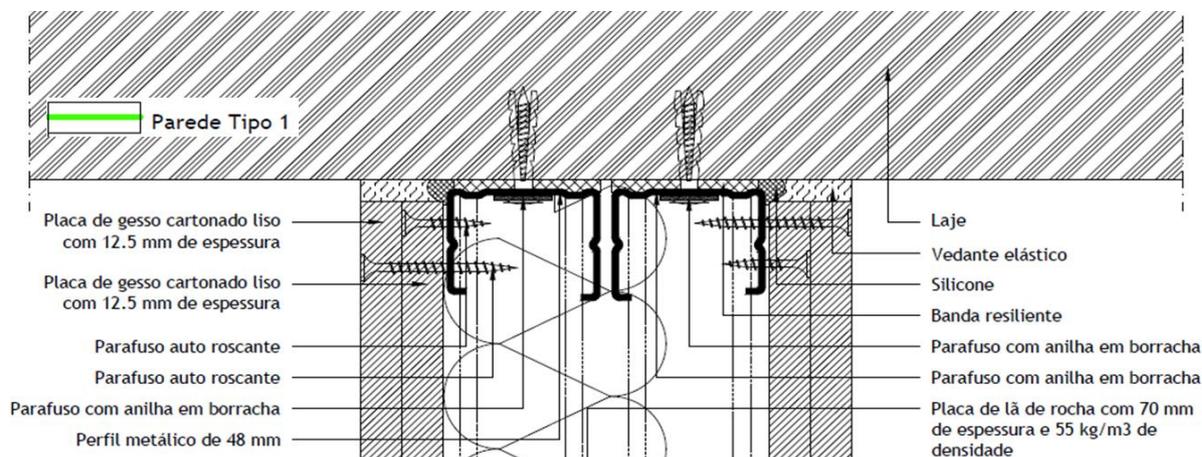


Figura 4.14 – Pormenor construtivo da parede tipo 1 da Escola Secundária de Gondomar [53].

Apesar de o revestimento cerâmico do pavimento neste edifício (visível na Figura 4.11) que previsivelmente terá um pior comportamento a solicitações com origem em impactos diretos, o edifício C foi projetado de forma a incluir uma tela resiliente para controlo de ruídos de percussão (Figura 4.15).

O teto dos corredores é semelhante ao das salas de aula e refeitório, sendo a maior particularidade o facto de se utilizar placas de gesso lisas ao invés de perfuradas, sendo a lâ de rocha colocada, neste caso, na laje (Figura 4.16).

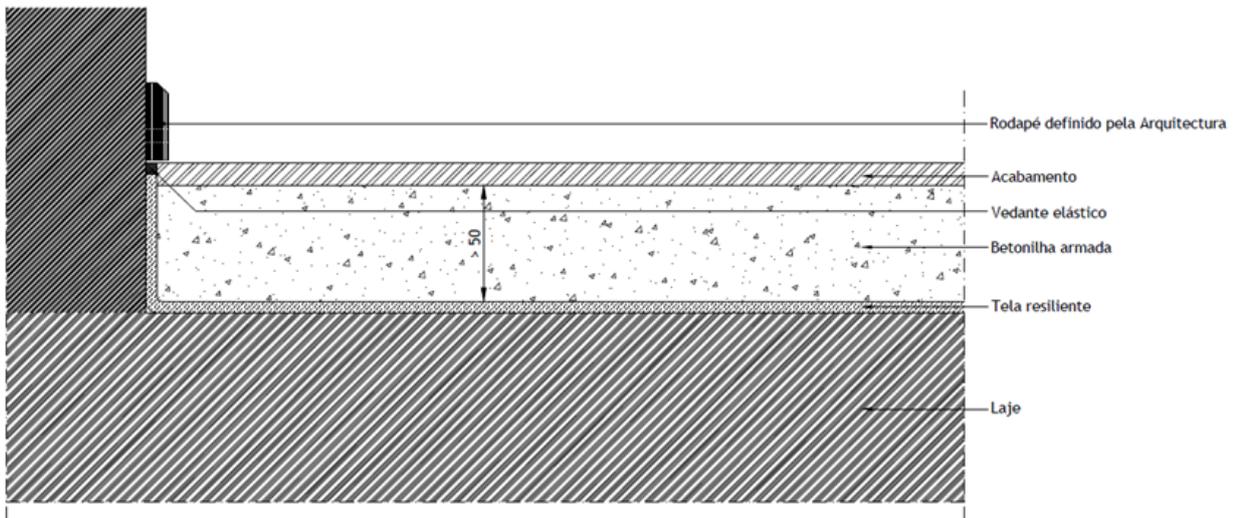


Figura 4.15 – Pormenor construtivo do pavimento do bloco C da Escola Secundária de Gondomar [53].

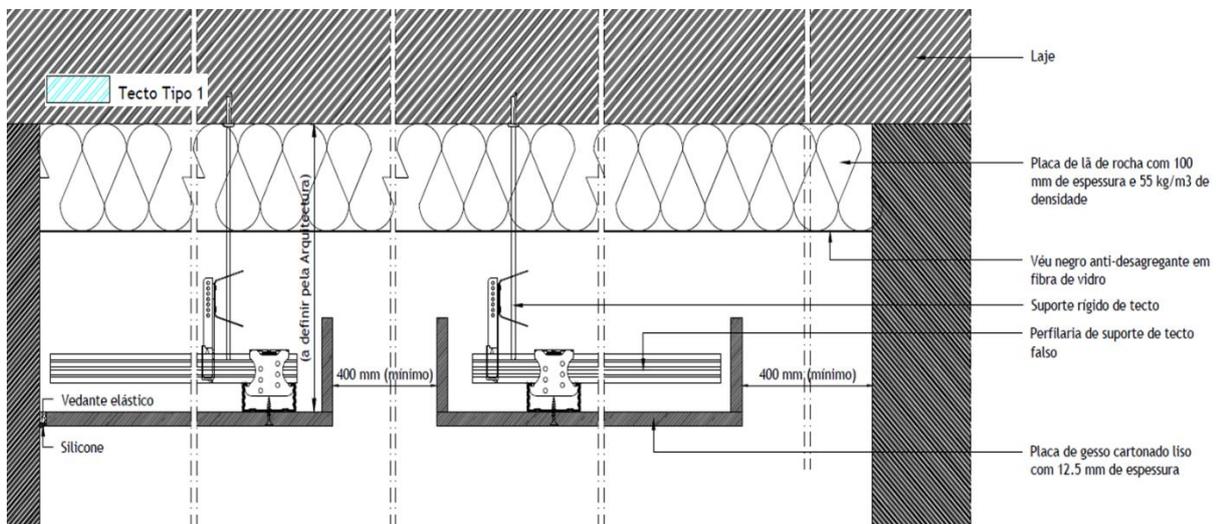


Figura 4.16 – Pormenor construtivo do teto aplicado em corredores da Escola Secundária de Gondomar [53].

Os blocos B e D albergam os dois pavilhões gimnodesportivos (pavilhão do bloco B e pavilhão do bloco D, PB e PD, respetivamente) e uma sala de ginástica. O bloco B (Figura 4.17) é o segundo bloco mais antigo do conjunto e como tal apenas foi renovado e adaptado. Por outro lado, o bloco D foi erguido integralmente durante a intervenção em 2009/2010 gerida pela “Parque Escolar”, o que permitiu desenvolver melhor a componente acústica do mesmo.



Figura 4.17 – Pavilhão gimnodesportivo no bloco B, PB da Escola Secundária de Gondomar [foto do autor].

Neste pavilhão, que se situa a uma cota elevada, é interessante salientar o revestimento do teto com um material acústico e térmico, do tipo *celenit*, constituído maioritariamente por fibras de madeira.

A volumetria dos pavilhões gimnodesportivos é caracterizada pelas dimensões apresentadas no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Dimensões dos pavilhões gimnodesportivos da Escola Secundária de Gondomar.

Pavilhão	Comprimento (m)	Largura (m)	Pé Direito (m)	Volume (m ³)
PB	23,55	15,55	7,00	2563
PD	30,10	17,65	8,38	4452

O pavilhão do bloco D, sendo o mais recentemente construído, é o pavilhão que mais otimizado se encontra a nível acústico. As soluções construtivas passam pela utilização de blocos de betão do tipo *soundblocks* para a revestimento de paredes e celulose projetada do tipo *SonaSpray K13* no teto, visíveis na Figura 4.18.

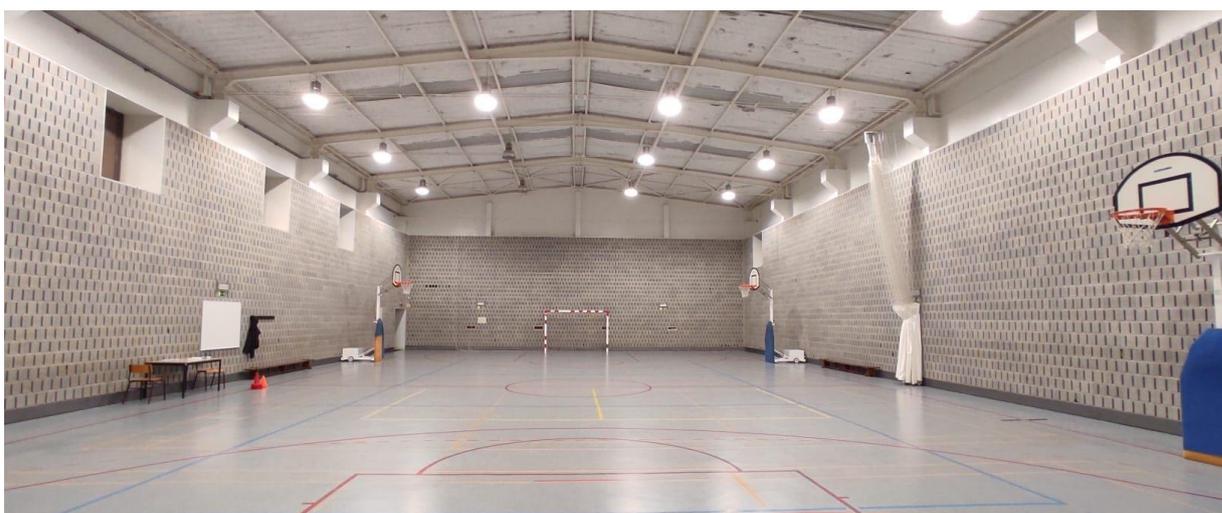


Figura 4.18 – Pavilhão gimnodesportivo no bloco D, PD.

O bloco E acolhe as oficinas destinadas à componente prática do ensino profissional.

Para além de todos os pormenores construtivos suprarreferidos, é importante referir que existiu todo um enorme diálogo entre a acústica e as outras especialidades, de forma a sensibilizar a necessidade de se optar por soluções menos ruidosas, tanto para sistemas de ventilação mecânica como para elementos de ligação.

Segundo um artigo de 8 de março de 2012 do Expresso [54], o custo unitário médio de construção por m² era, naquela data, 815 €/m². Assim sendo, a Escola Secundária de Gondomar com uma área bruta de construção de 19.667 m² [55], a sua intervenção gerida pela Parque Escolar, teve um custo que previsivelmente terá rondado os 16 milhões de euros.

Segundo o contrato do programa celebrado entre o Estado Português e a Parque Escolar, E.P.E. [56], estando fixado um valor de 1,10 €/m²/mês de remuneração pela componente de serviços de manutenção e conservação, a ESG deveria pagar anualmente, cerca de 92 mil euros à Parque Escolar.

4.2. OS DOCENTES

Os docentes são sem dúvida o mecanismo central de toda a estrutura de ensino no desenvolvimento de uma comunidade. Como tal, cada escola deve proporcionar as melhores condições possíveis para que estes consigam desempenhar sua função da melhor forma possível.

De forma a melhor entender o impacto da remodelação acústica na ESG, realizou-se um conjunto de questões de foram a dar “voz” aos docentes. Os professores inquiridos faziam parte do corpo docente das instalações pré-intervenção, sendo este um requisito obrigatório de forma a perceber o efeito da intervenção realizada pela Parque Escolar.

As questões colocadas centraram-se em dois parâmetros distintos. A primeira questão pretendeu realçar os principais efeitos sentidos na qualidade das aulas dentro da sala (alteração no nível de projeção de voz, fadiga das cordas vocais, alteração no comportamento dos alunos, etc.). A segunda abrangia a problemática do isolamento sonoro (alterações no nível de ruídos sentidos na sala, provenientes da rua, corredores, salas de aula, etc.)

Segundo as opiniões dos docentes inquiridos, a reabilitação da escola trouxe melhorias na insonorização das salas, a qualidade da aula melhorou substancialmente e conseqüentemente notou-se um aumento da atenção dos alunos. A qualidade do diálogo professor-aluno também aumentou tornando-se mais agradável pela redução do nível de ruído sentido na sala.

No panorama do isolamento a ruídos vindos do exterior constatou-se uma apreciação unânime na melhoria do comportamento acústico das salas. Foi notório um decréscimo dos ruídos sentidos durante a aulas o que por sua vez fomentou a sua qualidade. Contudo, apesar da sua melhoria, para atividades mais entusiastas que necessitem de uma maior participação dos alunos, o ruído produzido faz-se sentir em salas contíguas.

4.3. PARÂMETROS ACÚSTICOS

Para caracterizar acusticamente a escola foram escolhidos alguns locais distintos para que rapidamente se criasse uma visão acústica geral do edifício. Assim foram selecionadas duas salas de aula distintas (a sala a1.10 no bloco A e a sala b0.11 no bloco C), o refeitório e ambos os pavilhões gimnodesportivos.

De modo a caracterizar os diferentes espaços, foram realizadas medições para os tempos de reverberação em todos locais, medindo-se ainda nas salas, o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ($D_{nT,w}$), o isolamento sonoro a ruídos de percussão ($L_{nT,w}$) e RASTI.

A sala a.1.10 e a sala b0.11 consideraram-se como salas modelo, onde se mediram o TR, RASTI, D_{nT} e L_{nT} , tendo servido para auxílio de cálculo de D_{nT} e L_{nT} a sala a.1.09 (sala adjacente à sala em estudo) e a sala de formações (situada acima da sala modelo).

Todas as dimensões foram obtidas com recurso a um medidor digital *DLE50 Professional* da *Bosch*

4.4. METODOLOGIA

4.4.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

As medições dos tempos de reverberação realizam-se, segundo a norma portuguesa EN ISO 3382.

Os instrumentos necessários para a realização dos ensaios de medição do tempo de reverberação foram:

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

Colocou-se a fonte sonora (F) (Figura 4.20) a meio da parede em frente aos quadros (no caso das salas), de forma a simular a posição do professor na sala e num ponto idêntico nos restantes espaços (Figura 4.19).



Figura 4.19 – Medição do TR no refeitório [foto do autor].

O microfone do sonómetro em três posições distintas, não colineares (A, B e C), considerando 1/4, 1/2 e 3/4 do comprimento total para cada um dos espaços (Figura 4.20), realizando-se para cada ponto duas leituras com o sonómetro a um ângulo de 30° e -30°, respetivamente, em relação ao eixo longitudinal, sendo o resultado obtido, a média dos dois valores calculados em cada posição aumentando a fiabilidade nos dados apresentados.



Figura 4.20 – Fonte sonora Brüel & Kjaer 4224 à esquerda e sonómetro Brüel & Kjaer 2260 à direita [foto do autor].

Utilizam ruído com energia suficientemente potente em todo o espectro de frequências, isto é, um ruído branco, e com um nível de pressão sonora elevado de modo a assegurar um decaimento quantificável acima do ruído de fundo.

O sonómetro regista o tempo para o decaimento de 30 dB fazendo, posteriormente, a extrapolação para os 60 dB, nas bandas de frequência de 1/1 oitava compreendida entre os 63 e os 8000 Hz (Figura 4.21).

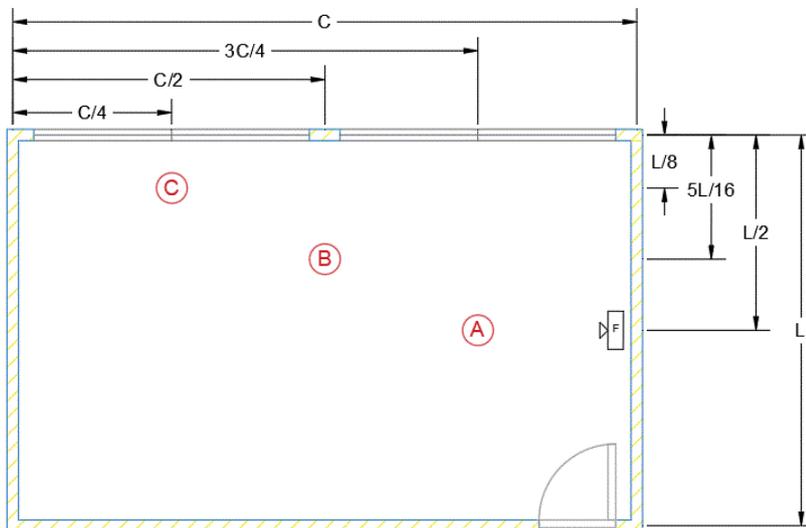


Figura 4.21 – Esquema genérico de posicionamento para medição do TR na Escola Secundária de Gondomar.

4.4.2. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE CONDUÇÃO AÉREA PADRONIZADO

Após a medição do tempo de reverberação e do ruído de fundo do compartimento recetor, coloca-se a fonte sonora na sala emissora em duas posições distintas com direcionalidade distinta, fazendo-se medir

os valores dos níveis de pressão sonora em cinco posições diferentes (A, B, C, D e E) para cada orientação da fonte obtendo-se assim dez medições (Figura 4.22).

Seguidamente, no piso recetor, realiza-se novamente cinco medições para cada uma das posições da fonte. Estes valores permitem então calcular o valor do isolamento sonoro bruto (D), fazendo a diferença entre os níveis de pressão sonora do piso emissor e o piso recetor (Figura 4.23).



Figura 4.22 – Medição do nível sonoro na sala emissora (sala de formações) na Escola Secundária de Gondomar [foto do autor].

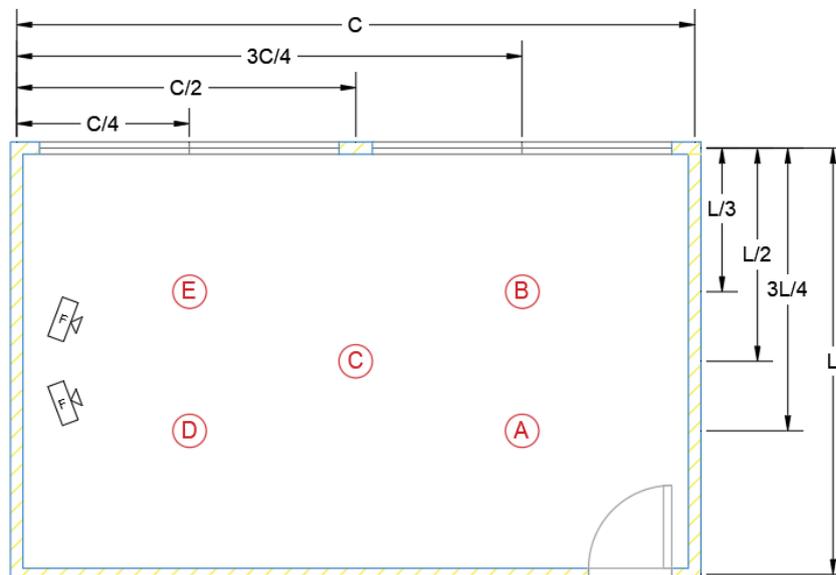


Figura 4.23 – Esquema genérico do posicionamento do equipamento para medição dos níveis de pressão sonora nas salas emissora e recetora na Escola Secundária de Gondomar.

Corrigindo o valor do isolamento sonoro bruto para o tempo de reverberação no recetor de referência ($TR = 0,5$ s), obtém-se o isolamento sonoro a ruídos aéreos padronizado (D_{nT}).

Por fim, a este valor é aplicada a curva de referência da norma NP 717-1 chegando-se ao índice regulamentar $D_{nT,w}$.

4.4.3. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO PADRONIZADO

A medição do isolamento a ruídos de percussão realizou-se com o auxílio de uma máquina de martelos *Brüel & Kjaer 3204* (Figura 4.24) e o sonómetro *Brüel & Kjaer 2260* já apresentado anteriormente, seguindo as exigências da norma NP EN ISO 140-7.



Figura 4.24 – Máquina de impactos normalizado *Brüel & Kjaer 3204* [foto do autor].

Começou-se por medir o tempo de reverberação do espaço recetor e o ruído de fundo.

De seguida, a máquina de martelos é colocada em quatro posições diferentes do piso emissor (1,2,3 e 4) e o sonómetro colocado em posições semelhantes (A, B, C e D), mas no piso recetor (Figura 4.25). Entre as combinações possíveis com a disposição do sonómetro e da máquina de impactos, mediu-se 16 valores dos níveis de pressão sonora (em bandas de 1/3 de oitava) e fez-se uma média energética (L_{med}) desses mesmos valores.

O valor padronizado é obtido utilizando o valor do tempo de reverberação. Por fim realiza-se um ajuste à curva de referência da norma NP EN ISO 717-2.

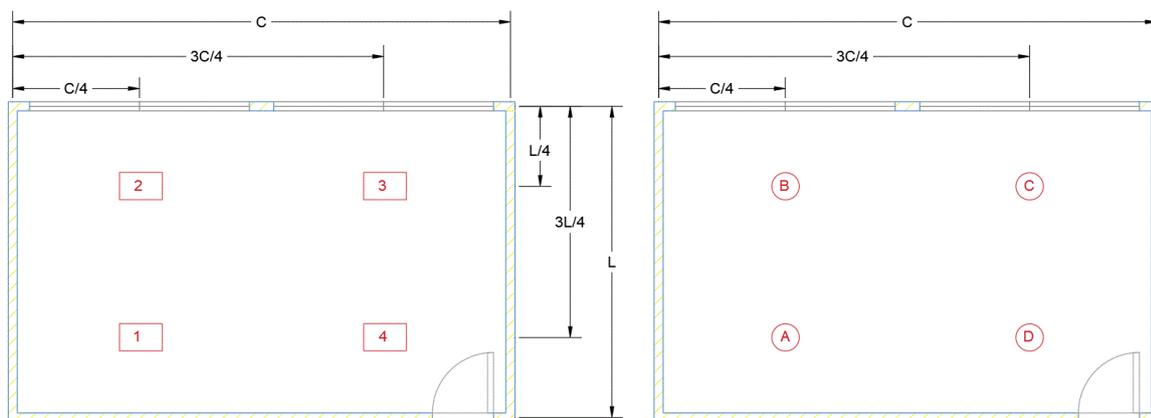


Figura 4.25 - Esquema genérico do posicionamento da máquina de impactos normalizada no piso superior (esquerda) e posicionamento do sonómetro no espaço inferior (direita), para medição dos níveis de pressão sonora na Escola Secundária de Gondomar.

4.4.4. RAPID SPEECH TRANSMISSION INDEX (RASTI)

Para a avaliação do RASTI, colocou-se novamente a fonte (F) em frente aos quadros, no eixo longitudinal da sala, emitindo um sinal característico, modulado nas frequências de 500 e 2000 Hz, tendo por base um nível de intensidade de referência acrescido de 10 dB (Figura 4.26).

O aparelho recetor é a unidade móvel *Brüel & Kjaer 4225*, operada pelo Eng. Eduardo Costa e o emissor a unidade *Brüel & Kjaer 4419* (Figura 4.27).



Figura 4.26 – Medição do RASTI na sala a1.10 da Escola Secundária de Gondomar [foto do autor].



Figura 4.27 – Recetor móvel *Brüel & Kjaer 4225* (esquerda) e emissor *Brüel & Kjaer 4419* (direita) [foto do autor].

Realizaram-se leituras em seis pontos diferentes (A, B, C, D, E e F) (Figura 4.28) com uma duração de 8 segundos tendo sido feitas quatro medições para cada ponto, em posições que procuram simular os locais onde se encontram os ouvidos dos alunos.

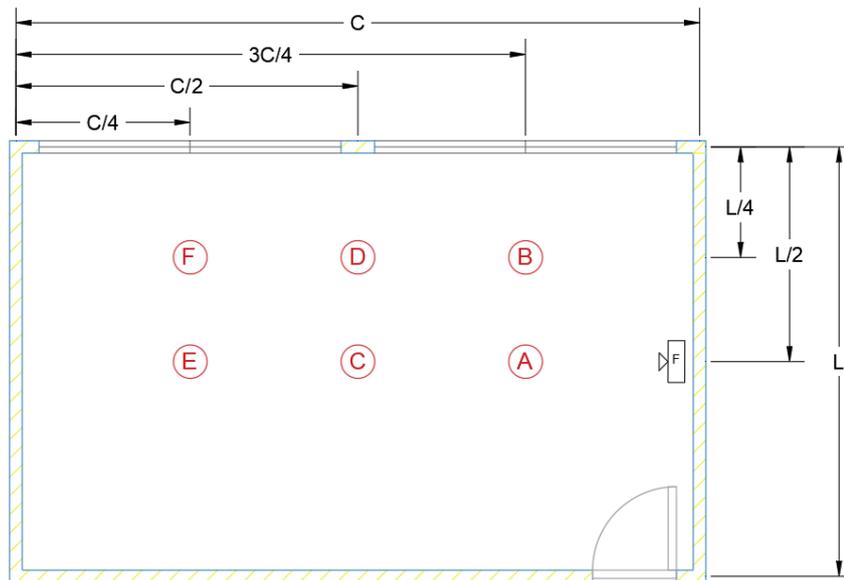


Figura 4.28 Posicionamento genérico dos aparelhos para medição do RASTI na Escola Secundária de Gondomar

O sinal é recebido pelo aparelho recetor que “conhece” o sinal original e compara o sinal recebido com o emitido, apresentando a percentagem deste, captada sem interferências.

4.5. RESULTADOS

4.5.1. SALA A1.10

4.5.1.1. Tempo de Reverberação

A medição do tempo de reverberação foi realizada com apenas duas pessoas presentes na sala. O TR foi medido em bandas de frequência de 1/3 de oitava, para um decaimento de 30 dB sendo extrapolado automaticamente pelo aparelho para o decaimento de 60 dB.

Os valores calculados encontram-se representados no Quadro 4.3.

Os dados foram convertidos para bandas de 1/1 oitava (Quadro 4.4) de forma a facilitar a leitura dos mesmos. Acrescentou-se ainda uma coluna com o desvio padrão de forma a indicar a variabilidade dos valores.

No Quadro 4.4 estão ainda descritos os valores do tempo de reverberação médio nas frequências de 500 a 2000 Hz e do tempo de reverberação de verificação legislativo descontando a incerteza (I).

Quadro 4.3 – Valores do tempo de reverberação medidos na sala a1.10 em bandas de 1/3 de oitava da Escola Secundária de Gondomar.

Bandas de Frequência (Hz)	Ponto A (s)	Ponto B (s)	Ponto C (s)	Desvio Padrão	Média (s)
80	0,79		0,82	0,02	0,81
100	0,89	0,82	0,59	0,13	0,77
125	0,61	0,73	0,84	0,09	0,73
160	0,58	0,78	0,66	0,08	0,67
200	0,62	0,51	0,60	0,05	0,58
250	0,46	0,36	0,48	0,05	0,43
315	0,40	0,48	0,42	0,03	0,43
400	0,50	0,45	0,41	0,04	0,45
500	0,48	0,43	0,45	0,02	0,45
630	0,45	0,41	0,51	0,04	0,46
800	0,49	0,49	0,44	0,02	0,47
1000	0,54	0,48	0,46	0,03	0,49
1250	0,50	0,50	0,50	0,00	0,50
1600	0,52	0,54	0,51	0,01	0,52
2000	0,51	0,55	0,54	0,02	0,53
2500	0,58	0,56	0,53	0,02	0,56
3150	0,55	0,61	0,58	0,02	0,58
4000	0,50	0,51	0,53	0,01	0,51
5000	0,51	0,51	0,53	0,01	0,52
6300	0,47	0,49	0,50	0,01	0,49
8000	0,44	0,45	0,48	0,02	0,46

Quadro 4.4 – Valores do tempo de reverberação medidos na sala a1.10 da Escola Secundária de Gondomar em bandas de 1/1 oitava.

Frequência (Hz)	Ponto A (s)	Ponto B (s)	Ponto C (s)	Desvio Padrão	$T_{r\text{médio}}$ [500, 1k, 2k] (s)	$T_{r\text{médio}} - I$
63	0,79		0,82	0,02	0,49	0,30
125	0,69	0,78	0,70	0,04		
250	0,49	0,45	0,50	0,02		
500	0,48	0,43	0,46	0,02		
1000	0,51	0,49	0,47	0,02		
2000	0,54	0,55	0,53	0,01		
4000	0,52	0,54	0,55	0,01		
80000	0,46	0,47	0,49	0,01		

Para uma sala com um volume de aproximadamente 128 m³, obtém-se os seguintes valores de tempo de reverberação estabelecidos no RRAE (Quadro 3.2):

- TR_{RRAE Máximo} [500, 1k e 2k Hz] = 0,76 segundos;
- TR de verificação = 0,30 segundos (TR_{Médio} - Incerteza 25%).

A Figura 4.29 resulta da disposição dos resultados dos pontos testados bem como os valores máximos estabelecidos pelo Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios.

Os tempos de reverberação médio encontram-se à volta dos 0,5 segundos, dentro dos valores para um TR ideal e muito abaixo do TR regulamentar do RRAE.

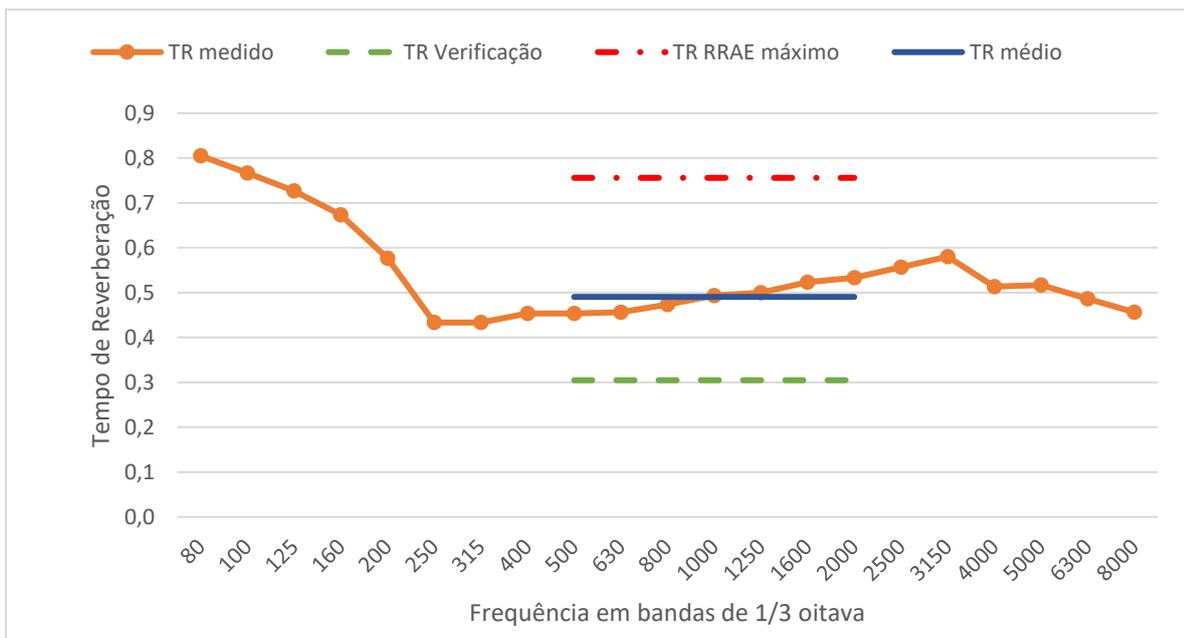


Figura 4.29 – Valores médios do tempo de reverberação por bandas de 1/3 oitava obtidos na sala a1.10 da Escola Secundária de Gondomar.

4.5.1.2. Isolamento Sonoro a Ruídos de Condução Aérea

O índice de isolamento a ruídos de condução aérea foi medido em dois sentidos, vertical e horizontalmente. Para tal foram necessárias duas salas auxiliares que serviram de base para o emissor. Ambas as salas auxiliares possuíam uma geometria semelhante à sala recetora. A sala utilizada na medição vertical foi a sala de formações localizada no piso 0, imediatamente acima da sala recetora a1.10 no piso -1.

Tal como descrito, realizou-se um conjunto de cinco medições para cada uma das duas posições da fonte sonora (P_1 a P_{10}). Os Quadros 4.5 e 4.6 apresentam os valores de nível sonoro (L_{eq}) obtidos nas dez medições na sala emissora (sala de formação – piso 0) e na sala recetora (sala a1.10), respetivamente.

Os valores dos quadros 4.5 e 4.6 permitem calcular o isolamento sonoro bruto (D) por bandas de frequência, através da diferença entre os mesmos.

A Figura 4.30 apresenta os níveis sonoros médios registados na sala de formações ($L_{eq E}$) e na sala a1.10 ($L_{eq R}$) e serve assim para representar a linha de isolamento sonoro bruto (D). Tal como seria previsível, os valores de D apresentam uma tendência crescente à medida que se percorre as bandas de frequências.

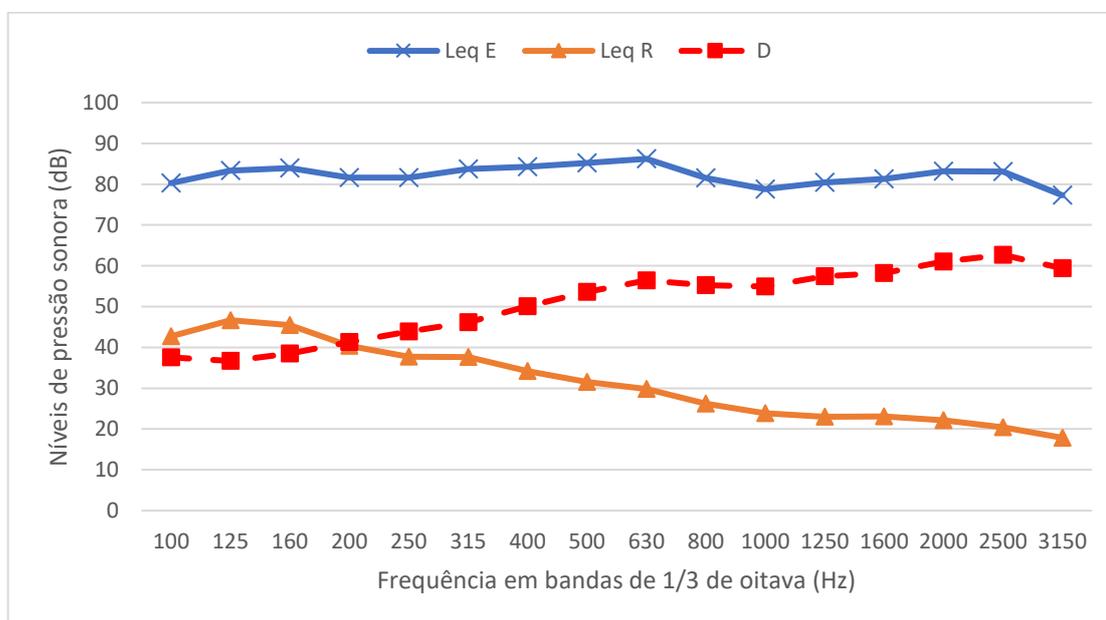


Figura 4.30 – Níveis sonoros (L_{eq}) na sala de formação (emissora, $L_{eq E}$) e a1.10 (recetora, $L_{eq R}$) e isolamento sonoro bruto (D) na Escola Secundária de Gondomar.

Chega-se assim a um valor de 55 dB para índice de isolamento com uma laje como elemento separador entre a sala de formações e a sala a1.10. Um valor bem superior aos 45 dB, mínimo exigido para o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado ($D_{nT,w}$) tendo como local emissor e recetor uma sala de aula.

Quadro 4.5 – Níveis de pressão sonora (P_i) e nível de pressão médio (L_{eq}) por bandas de frequência, medidos na sala de formação (emissora) – Piso 0 da Escola Secundária de Gondomar.

Freq. (Hz)	P_A (dB)	P_B (dB)	P_C (dB)	P_D (dB)	P_E (dB)	$P_{A'}$ (dB)	$P_{B'}$ (dB)	$P_{C'}$ (dB)	$P_{D'}$ (dB)	$P_{E'}$ (dB)	Desvio Pa-drão	L_{eq} méd.(dB)
25	40,7	45,8	34,9	41,3	38,1	39,5	39,4	33,2	46,7	40,4	4,0	41,8
31,5	38,2	39,4		33,3	35,8	34,7	34,3	35,0	38,1	42,3	2,7	37,3
40	45,0	42,1	49,9	48,0	47,1	47,2	48,0	50,5	42,7	36,7	4,0	47,1
50	61,0	57,6	65,0	62,6	61,3	61,9	63,1	65,9	60,0	45,8	5,4	62,2
63	64,7	65,2	66,6	69,7	65,0	68,0	67,7	68,6	66,9	63,6	1,8	67,0
80	74,1	71,8	75,9	76,5	77,2	76,5	76,5	76,1	68,4	69,7	3,0	75,1
100	79,2	79,6	82,9	80,1	81,8	81,2	81,2	80,8	76,0	72,9	2,8	80,3
125	84,0	82,6	81,3	80,2	84,9	84,0	84,1	83,0	83,7	83,7	1,4	83,3
160	80,5	85,7	83,5	83,2	83,9	84,1	84,6	85,0	84,1	83,0	1,3	83,9
200	78,1	82,8	82,8	81,1	79,3	80,8	81,9	84,0	82,9	79,0	1,9	81,6
250	80,7	80,7	80,2	81,4	84,7	83,1	82,9	79,9	79,5	79,6	1,7	81,6
315	81,5	83,8	81,3	85,0	85,6	85,0	84,4	82,1	81,8	84,1	1,5	83,7
400	83,6	83,7	84,8	84,9	83,7	84,6	84,3	85,4	83,3	83,7	0,7	84,3
500	84,1	84,8	84,3	82,8	87,3	86,2	86,0	84,4	83,0	86,6	1,4	85,2
630	82,9	88,0	86,2	87,8	87,1	87,1	87,1	86,0	82,9	83,2	1,9	86,2
800	78,9	79,6	84,1	81,3	82,0	82,3	81,5	82,8	79,5	80,2	1,6	81,5
1000	77,3	77,1	78,9	78,0	79,8	79,9	80,8	79,1	76,6	78,5	1,3	78,8
1250	79,2	79,3	81,2	81,0	79,2	80,9	81,4	82,4	77,5	80,4	1,4	80,5
1600	81,7	81,5	81,6	82,2	80,3	81,5	80,8	82,9	79,7	79,8	1,0	81,3
2000	81,8	81,5	84,2	82,9	82,7	83,7	83,8	84,9	81,5	83,2	1,1	83,2
2500	82,5	80,8	83,5	84,3	82,0	83,5	83,9	83,2	80,3	84,6	1,4	83,1
3150	77,6	74,5	78,0	79,0	76,2	76,9	77,2	77,3	77,3	77,5	1,1	77,3
4000	79,3	77,8	79,0	77,0	77,3	78,1	78,0	79,5	78,0	78,0	0,8	78,3
5000	68,8	68,9	70,0	69,4	69,4	69,5	69,9	69,7	69,3	69,0	0,4	69,4
6300	60,4	60,2	62,8	62,3	60,7	62,4	62,8	63,2	62,0	61,2	1,0	61,9
8000	58,3	57,5	62,4	62,0	57,3	59,8	59,4	61,9	59,0	59,7	1,7	60,1
10000	51,4	50,0	52,0	52,1	50,5	52,7	52,7	52,8	50,7	50,7	1,0	51,7

Quadro 4.6 – Níveis de pressão sonora (P_i) e nível de pressão médio (L_{eq}) por bandas de frequência, medidos na sala a1.10 (recetora) – Piso -1 da Escola Secundária de Gondomar.

Freq. (Hz)	P_A (dB)	P_B (dB)	P_C (dB)	P_D (dB)	P_E (dB)	$P_{A'}$ (dB)	$P_{B'}$ (dB)	$P_{C'}$ (dB)	$P_{D'}$ (dB)	$P_{E'}$ (dB)	Desvio Pa- drão	L_{eq} méd.(dB)
25	57,6	56,4	55,7	39,2	39,5	42,3	34,9	42,5	40,3	40,9	7,9	51,6
31,5	41,8	40,8	40,1	35,4	33,8	36,7	33,0	35,7	31,2	32,9	3,5	37,6
40	37,5	36,5	35,9	36,9	34,0	34,7	37,4	40,1	30,7	32,1	2,6	36,3
50	47,1	46,0	45,3	39,9	37,2	38,9	42,0	45,7	38,4	38,7	3,6	43,3
63	41,5	40,5	39,9	34,2	31,4	33,2	35,9	35,5	37,7	36,9	3,1	37,7
80	40,0	39,2	38,6	36,6	34,1	38,3	39,2	38,3	39,7	39,3	1,7	38,6
100	43,4	42,6	42,2	41,0	42,5	43,5	41,1	42,9	44,1	43,2	1,0	42,8
125	46,7	46,7	46,6	48,0	45,0	44,1	47,4	47,5	47,2	46,1	1,1	46,7
160	46,3	46,3	46,3	44,4	45,5	44,1	42,6	47,3	45,1	44,8	1,3	45,5
200	40,3	40,3	40,6	38,3	42,4	41,6	38,9	39,3	39,9	40,4	1,1	40,4
250	38,8	38,0	37,8	33,8	39,8	38,2	34,6	36,2	38,4	38,3	1,8	37,7
315	38,4	37,8	37,8	34,9	37,5	38,3	38,5	37,3	37,5	37,0	1,0	37,6
400	35,8	35,4	35,3	34,0	33,4	33,8	33,4	32,5	33,6	33,6	1,0	34,2
500	32,4	31,9	31,8	30,6	33,1	32,6	30,0	30,0	30,8	31,2	1,0	31,6
630	29,2	29,1	29,1	31,8	31,3	30,1	28,8	29,9	28,5	28,9	1,0	29,8
800	23,8	24,2	24,2	28,5	27,9	26,9	24,6	29,0	24,3	24,5	1,9	26,2
1000	22,7	22,8	22,6	25,3	24,3	23,8	23,4	27,1	21,5	21,6	1,6	23,8
1250	22,1	22,0	22,0	23,9	23,7	23,5	22,6	25,2	21,8	22,1	1,1	23,0
1600	22,5	22,4	22,3	22,7	24,5	23,5	21,7	25,4	22,1	22,0	1,1	23,1
2000	20,0	19,8	19,7	21,2	24,3	22,8	22,2	25,2	21,3	20,8	1,8	22,1
2500	17,5	17,3	17,0	19,0	22,0	20,6	20,3	24,4	20,3	19,6	2,2	20,4
3150	14,1	13,8	13,4	15,6	18,4	17,5	18,6	22,8	18,0	17,1	2,7	17,9
4000	14,2	13,6	13,2	14,5	20,0	18,4	19,5	22,5	17,7	16,8	3,0	18,1
5000	13,8	13,2	12,7	13,2	19,3	17,8	19,9	22,9	19,0	17,9	3,3	18,2
6300	11,7	11,6	11,2	11,9	17,6	16,4	17,9	21,6	15,8	15,1	3,3	16,4
8000	11,1	11,1	10,8	10,9	16,0	15,1	13,3	19,2	13,2	13,0	2,6	14,3
10000	10,3	10,9	10,7	11,3	15,0	15,2	12,5	17,6	12,5	13,1	2,2	13,6

A medição do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea horizontal foi realizada entre as salas a1.09 (sala emissora) e a sala a1.10 (sala recetora) ambas localizadas no piso -1. Novamente realizaram-se dez medições em cada sala, cinco para cada posição da fonte sonora no compartimento emissor.

Os valores foram registados igualmente em dois quadros separados. O Quadro 4.7 contém as dez medições realizadas na sala emissora e o Quadro 4.8 as dez medições realizadas na sala recetora. Ambos os quadros apresentam o nível sonoro médio.

A Figura 4.31 apresenta os níveis sonoros médios registados na sala a1.09 ($L_{eq} E$) e na sala a1.10 ($L_{eq} R$) bem como a linha de isolamento sonoro bruto (D). Tal como seria previsível, os valores de D apresentam uma tendência crescente à medida que se percorre as bandas de frequências.

Após cálculo, chega-se a um índice de isolamento sonoro ($D_{nT, w}$) com uma parede como elemento separador entre a sala a1.09 e a sala 1.10 de 51 dB, um pouco mais baixo que o valor obtido para o isolamento vertical, conforme era esperado, mas igualmente superior aos 45 dB exigidos no RRAE.

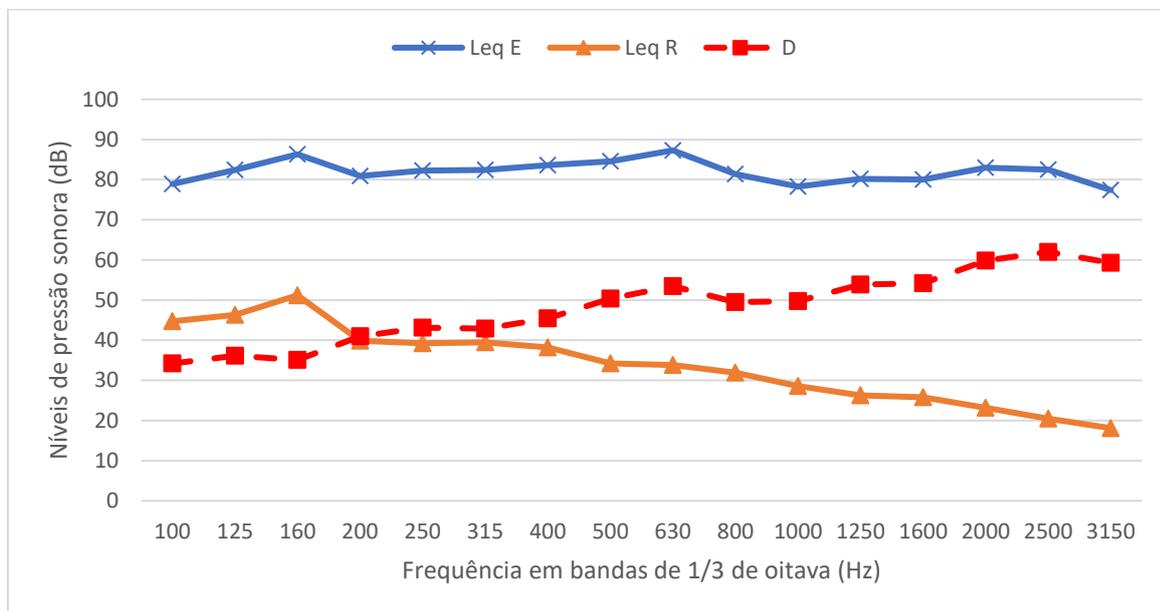


Figura 4.31 - Níveis sonoros nas salas a1.09 ($L_{eq} E$) e a1.10 ($L_{eq} R$) da Escola Secundária de Gondomar e isolamento sonoro bruto (D).

Quadro 4.7 – Níveis de pressão sonora (P_i) e nível de pressão médio (L_{eq}) por bandas de frequência, medidos na sala a1.09 (emissora) – Piso -1 da Escola Secundária de Gondomar.

Freq. (Hz)	P_A (dB)	P_B (dB)	P_C (dB)	P_D (dB)	P_E (dB)	$P_{A'}$ (dB)	$P_{B'}$ (dB)	$P_{C'}$ (dB)	$P_{D'}$ (dB)	$P_{E'}$ (dB)	Desvio Padrão	L_{eq} méd.(dB)
25	40,9	40,8	35,3	43,3	46,2	49,9	44,7	36,7	42,8	42,0	4,1	44,1
31,5	36,6	35,7	36,8	41,2	44,7	48,8	41,7	35,6	37,6	37,5	4,2	42,1
40	50,5	49,9	52,5	52,7	51,7	48,6	49,9	53,4	52,2	51,9	1,4	51,6
50	64,4	66,7	68,3	66,9	64,5	55,2	62,9	67,7	65,5	67,2	3,6	65,9
63	65,1	68,8	66,3	68,3	69,0	69,8	67,2	67,1	68,2	69,5	1,4	68,1
80	76,6	76,1	77,3	75,9	75,0	74,0	71,8	76,4	75,1	75,0	1,5	75,5
100	80,3	78,6	79,8	79,2	78,3	72,6	80,1	80,1	78,9	79,2	2,1	79,1
125	84,4	83,1	83,8	84,6	82,9	79,6	81,0	81,4	82,4	83,6	1,5	82,9
160	82,7	81,9	82,7	83,5	83,2	81,4	80,2	86,8	86,3	86,1	2,1	84,0
200	81,7	82,9	81,4	81,1	79,6	80,9	79,5	81,2	80,9	81,2	0,9	81,1
250	81,4	81,2	80,4	82,2	81,9	80,3	80,1	82,8	82,3	82,0	0,9	81,5
315	81,2	82,6	83,2	82,6	82,8	81,1	81,9	81,5	82,4	82,8	0,7	82,3
400	82,8	84,0	84,4	84,1	83,1	82,6	84,4	83,3	83,6	84,4	0,7	83,7
500	82,7	82,6	84,6	84,6	85,0	85,7	83,7	84,9	84,6	85,5	1,0	84,5
630	83,6	83,3	86,2	86,8	85,4	84,8	84,3	87,5	87,3	89,0	1,8	86,2
800	80,9	80,7	85,1	83,9	82,8	83,0	82,8	81,6	81,4	83,3	1,3	82,8
1000	80,2	78,8	80,4	79,8	78,9	78,3	78,0	77,8	78,3	79,9	0,9	79,1
1250	79,3	79,1	83,5	82,4	81,0	78,3	79,2	80,2	80,2	80,9	1,5	80,7
1600	79,5	79,9	82,7	82,7	81,4	80,0	80,3	80,3	80,0	80,6	1,1	80,9
2000	82,4	82,3	82,5	82,3	81,4	81,7	82,6	83,9	83,0	83,4	0,7	82,6
2500	82,2	82,4	82,1	81,8	82,0	81,4	82,9	83,3	82,5	82,4	0,5	82,3
3150	76,9	76,8	77,8	77,0	76,0	74,7	74,8	78,4	77,4	77,1	1,1	76,8
4000	78,8	77,8	78,6	78,1	77,3	77,5	75,6	78,3	78,2	78,0	0,9	77,9
5000	69,1	69,0	69,4	69,3	69,0	67,9	66,9	69,1	69,1	69,2	0,7	68,9
6300	60,1	61,2	62,5	62,0	61,2	59,9	59,6	60,7	60,7	60,7	0,9	60,9
8000	58,1	60,0	61,4	60,7	59,8	57,1	58,5	59,0	58,1	58,4	1,3	59,3
10000	52,3	53,2	52,4	52,4	51,3	50,2	50,3	52,7	52,3	52,3	1,0	52,0

Quadro 4.8 – Níveis de sonora (P_i) e nível de pressão médio (L_{eq}) por bandas de frequência, medidos na sala a1.10 (recetora) – Piso -1 da Escola Secundária de Gondomar.

Freq. (Hz)	P_A (dB)	P_B (dB)	P_C (dB)	P_D (dB)	P_E (dB)	$P_{A'}$ (dB)	$P_{B'}$ (dB)	$P_{C'}$ (dB)	$P_{D'}$ (dB)	$P_{E'}$ (dB)	Desvio Padrão	L_{eq} méd.(dB)
25	39,8	40,1	37,7	43,1	35,4	39,4	38,2	36,6	37,0	37,5	2,1	39,0
31,5	36,9	37,5	33,5	32,4	31,6	32,1	37,1	33,3	31,8	30,5	2,4	34,4
40	31,4	35,0	35,2	30,0	31,5	31,6	33,6	35,5	33,4	31,1	1,9	33,2
50	44,1	43,4	43,4	46,8	47,5	44,4	43,7	43,7	48,2	46,8	1,8	45,6
63	42,7	42,2	41,8	41,4	41,6	42,4	43,0	43,3	43,2	41,0	0,8	42,3
80	44,2	45,1	42,3	44,7	45,0	43,1	41,8	38,4	40,7	40,3	2,2	43,0
100	46,0	46,9	47,8	47,3	48,0	43,6	46,3	46,6	44,7	44,0	1,5	46,4
125	49,5	48,9	49,7	49,7	51,6	48,8	49,9	48,8	46,3	49,1	1,3	49,4
160	45,5	46,6	45,3	49,4	46,9	51,0	50,8	49,2	51,2	48,0	2,1	48,9
200	39,6	41,8	40,4	41,2	40,7	40,1	40,8	40,1	39,9	40,0	0,6	40,5
250	38,8	40,0	38,1	39,5	39,5	40,9	40,3	39,3	39,2	38,0	0,9	39,4
315	41,2	40,8	39,7	42,4	40,1	43,2	41,8	39,7	39,5	37,8	1,5	40,9
400	39,6	38,9	38,6	38,7	36,1	38,9	39,0	39,2	38,2	36,9	1,0	38,5
500	36,5	36,4	36,9	37,2	35,2	36,2	36,6	37,0	34,2	36,1	0,9	36,3
630	35,2	34,7	35,2	33,5	34,6	34,6	34,7	34,8	33,8	32,1	0,9	34,4
800	27,8	28,5	29,1	27,4	30,5	28,3	28,6	28,6	31,9	29,9	1,3	29,3
1000	26,7	26,9	27,4	24,2	28,3	27,1	27,1	28,4	28,6	28,3	1,2	27,5
1250	27,5	27,7	25,8	23,9	29,0	26,9	26,7	28,6	26,3	27,3	1,4	27,2
1600	27,0	27,4	25,4	24,9	28,6	26,9	27,2	27,2	25,8	28,9	1,2	27,1
2000	24,0	24,0	23,3	22,3	26,6	24,3	24,5	23,8	23,2	25,1	1,1	24,3
2500	19,7	19,8	21,1	19,4	22,7	22,0	21,3	20,6	20,5	21,6	1,0	21,0
3150	15,4	14,7	19,0	16,2	20,7	19,3	18,5	17,7	18,1	19,2	1,8	18,2
4000	14,3	13,6	17,6	15,6	20,2	19,0	18,1	17,2	18,4	18,4	2,0	17,7
5000	12,3	11,5	17,8	14,7	19,5	18,5	17,2	15,5	18,4	17,6	2,6	17,0
6300	11,9	10,9	17,1	13,9	18,1	17,2	16,0	14,6	15,7	16,2	2,2	15,7
8000	10,7	10,1	15,7	12,8	15,9	14,9	14,0	14,5	13,7	14,2	1,8	14,0
10000	10,2	9,8	15,3	11,8	14,8	13,7	13,0	16,6	14,8	13,4	2,1	13,8

4.5.1.3. Isolamento Sonoro a Ruídos de Percussão

Sendo o isolamento sonoro a ruídos de percussão (L'_{nT}) apenas, medido do piso superior para o inferior, as salas intervenientes foram a sala de formações e a sala a1.10 (recetora).

Quadro 4.9 a) – Níveis de pressão sonora (P_i) medidos na sala a1.10 da Escola Secundária de Gondomar.

Freq (Hz)	P_{A1} (dB)	P_{A2} (dB)	P_{A3} (dB)	P_{A4} (dB)	P_{B1} (dB)	P_{B2} (dB)	P_{B3} (dB)	P_{B4} (dB)	P_{C1} (dB)	P_{C2} (dB)
20	56,6	52,7	49,0	52,2	53,4	51,2	47,1	50,1	54,0	53,0
25	63,1	57,6	59,9	60,1	65,9	60,5	58,5	61,5	63,9	60,2
31,5	60,7	59,1	59,3	58,1	57,9	59,1	55,3	53,5	55,1	55,8
40	56,3	53,0	52,0	55,4	56,5	51,6	53,2	51,2	60,8	56,8
50	54,7	54,3	51,9	55,8	56,8	53,5	54,8	53,5	62,8	57,2
63	50,5	52,4	48,2	52,3	52,7	49,9	49,0	56,0	52,3	56,4
80	53,4	58,1	53,3	57,7	56,4	52,2	56,5	56,9	54,8	58,9
100	56,0	48,2	52,3	54,4	53,6	52,7	52,3	54,5	57,6	56,6
125	61,6	54,6	56,4	60,3	57,0	57,4	52,8	55,0	59,7	54,9
160	63,5	58,3	60,7	62,2	61,1	58,6	56,6	56,7	61,5	58,7
200	60,7	59,7	55,1	59,5	62,7	61,5	59,1	58,1	60,5	54,4
250	53,7	55,4	54,1	53,4	56,6	58,2	56,1	53,7	56,2	57,3
315	56,9	59,1	57,2	57,1	56,5	60,1	58,2	59,3	55,4	55,8
400	54,4	55,8	56,8	55,1	55,6	53,5	54,2	53,9	54,7	54,2
500	55,2	54,6	51,5	53,9	58,0	58,0	54,4	57,7	52,7	48,6
630	54,9	55,6	52,4	53,5	55,6	57,1	56,4	55,6	52,2	51,9
800	54,1	52,7	52,3	51,5	54,4	53,4	51,3	53,6	50,1	51,0
1000	55,2	52,8	53,2	54,0	55,8	55,1	56,5	55,8	53,2	52,4
1250	56,1	53,5	52,3	53,0	58,1	55,8	54,4	54,4	53,5	49,4
1600	52,5	51,3	50,5	50,8	54,2	53,6	52,5	53,3	51,7	49,3
2000	50,9	50,2	48,8	49,0	52,2	51,7	50,9	50,6	49,2	47,4
2500	48,0	47,0	46,9	47,4	51,0	50,4	49,5	48,6	45,8	43,8
3150	47,3	46,5	44,8	45,5	48,7	47,4	47,0	46,2	43,7	42,8
4000	41,1	40,1	39,2	39,4	42,9	42,3	41,0	40,9	38,2	36,0
5000	33,1	32,2	31,4	32,7	34,9	35,4	34,1	33,6	29,7	27,7
6300	22,0	22,4	22,5	24,7	23,7	24,0	23,2	22,0	19,0	16,5
8000	17,4	19,1	20,2	21,4	18,3	18,2	16,2	16,1	13,3	11,1
10000	14,0	17,4	17,0	19,1	15,0	14,8	12,5	10,9		11,2

Quadro 4.9 b) – Níveis de pressão sonora (P_i) medidos na sala a1.10 da Escola Secundária de Gondomar.

Freq. (Hz)	P_{C3} (dB)	P_{C4} (dB)	P_{D1} (dB)	P_{D2} (dB)	P_{D3} (dB)	P_{D4} (dB)	Desvio Padrão	L_{eq} méd.(dB)
20	49,2	52,6	57,9	53,2	47,8	50,3	2,9	52,9
25	58,8	62,2	64,9	57,4	58,4	59,3	2,5	61,5
31,5	57,5	55,5	57,8	57,0	55,5	54,4	2,0	57,4
40	60,8	58,3	57,7	52,6	52,6	55,0	3,0	56,3
50	60,9	57,4	56,8	56,6	56,0	57,9	2,7	57,2
63	52,1	49,7	52,4	54,6	50,2	54,6	2,4	52,7
80	55,0	58,1	54,7	60,0	54,9	59,7	2,3	56,9
100	60,3	58,3	58,0	52,4	54,5	56,2	2,9	55,8
125	57,8	59,1	62,9	57,6	53,1	60,1	2,9	58,5
160	61,1	67,4	64,4	59,5	62,7	62,6	2,8	61,9
200	58,8	60,0	61,0	57,8	57,4	59,5	2,1	59,6
250	54,4	55,4	55,9	56,5	53,0	52,2	1,6	55,4
315	55,4	55,6	54,8	57,0	53,7	54,1	1,8	57,0
400	54,3	56,7	50,8	54,8	52,1	54,9	1,5	54,7
500	49,8	50,3	55,6	52,2	50,6	53,7	2,9	54,5
630	50,7	51,3	56,7	53,8	52,3	54,8	2,0	54,5
800	51,3	50,3	53,7	53,1	52,1	52,1	1,3	52,5
1000	51,9	49,9	55,4	53,6	54,5	53,3	1,7	54,2
1250	50,6	49,8	55,0	53,0	52,4	53,3	2,2	54,0
1600	47,9	48,9	52,9	51,5	51,0	50,0	1,7	51,7
2000	47,7	47,8	50,4	47,4	47,7	49,2	1,5	49,7
2500	43,8	43,7	48,2	46,6	46,4	46,5	2,1	47,6
3150	42,5	42,5	45,7	45,6	45,2	44,7	1,8	45,7
4000	35,2	36,1	40,7	38,9	38,6	39,0	2,1	39,8
5000	27,6	28,5	32,6	31,8	31,4	32,9	2,3	32,4
6300	18,2	17,9	22,4	21,2	22,6	25,4	2,5	22,3
8000	13,8	10,8	16,6	13,3	18,5	21,1	3,2	17,7
10000	13,5	11,2	13,3		16,0	19,2	2,7	

Conforme esquematizado na Figura 4.26, colocou-se a máquina de percussão em quatro posições sobre a laje na sala emissora e o sonómetro em quatro posições idênticas no piso inferior. Para cada posição da máquina de impactos no piso superior, recolheram-se os valores dos níveis de pressão sonora nos quatro pontos da sala recetora, totalizando assim uma amostra de 16 pontos (L_i).

No Quadro 4.9 a) e b), estão apresentados os valores brutos obtidos na medição.

O valor de $L'_{nT,w}$ obtido é 56 dB, valor que após admissão de uma incerteza de -3 dB (prevista no RRAE) passa a cumprir os 65 dB estabelecidos pelo RRAE por 9 dB que representa uma redução cerca de três vezes superior à mínima exigida.

4.5.1.4. RASTI

Tal como já referido, para o ensaio de *Rapid Speech Transmission Index* realizaram-se quatro medições (M_i) para cada um dos seis pontos (A, B, C, D, E e F) conforme o esquema da Figura 4.28, tendo-se calculado a média aritmética das leituras. Os resultados encontram-se expressos no Quadro 4.10.

Observando o quadro anterior é notável a consistência dos valores independentemente da localização. Obtemos assim um valor médio para o índice de RASTI de 76%, pertencente à melhor categoria deste parâmetro. É possível assim afirmar que a inteligibilidade média da sala é ótima.

Quadro 4.10 – Resultados para a medição de RASTI na sala a1.10 da Escola Secundária de Gondomar.

Pontos	M_1	M_2	M_3	M_4	Média Pontos	Média Sala
A	0,82	0,83	0,82	0,82	0,82	0,76
B	0,77	0,75	0,77	0,76	0,76	
C	0,78	0,79	0,79	0,78	0,79	
D	0,75	0,74	0,75	0,75	0,75	
E	0,74	0,73	0,74	0,73	0,74	
F	0,72	0,73	0,73	0,73	0,73	

4.5.2. SALA B0.11

4.5.2.1. Tempo de Reverberação

Tal como no caso da sala a1.10, a medição do tempo de reverberação na sala b0.11 foi realizada com apenas duas pessoas presentes na sala. O TR foi medido em bandas de frequência de 1/3 de oitava, para um decaimento de 30 dB sendo extrapolado automaticamente pelo aparelho o TR para o decaimento de 60 dB no qual se registou os valores do Quadro 4.11.

Os dados foram convertidos para bandas de 1/1 oitava (Quadro 4.12) de forma a facilitar a leitura dos mesmos. Acrescentou-se ainda uma coluna com o desvio padrão de forma a sensibilizar a certeza dos valores. No Quadro 4.12 estão ainda descritos os valores do tempo de reverberação médio nas frequências de 500 a 2000 Hz e do tempo de reverberação de verificação legislativo descontando a incerteza (I).

Quadro 4.11 – Valores do tempo de reverberação medidos na sala b0.11 da Escola Secundária de Gondomar em banda de 1/3 de oitava.

Frequência (Hz)	Ponto A (s)	Ponto B (s)	Ponto C (s)	Desvio Padrão	Média (s)
80	1,28		0,75	0,27	1,02
100	0,64	0,67	0,50	0,07	0,75
125	0,44	0,44	0,41	0,01	0,48
160	0,52	0,50	0,51	0,01	0,54
200	0,47	0,48	0,45	0,01	0,48
250	0,64	0,64	0,64	0,00	0,64
315	0,63	0,54	0,66	0,05	0,69
400	0,61	0,60	0,60	0,00	0,62
500	0,63	0,65	0,59	0,02	0,64
630	0,57	0,59	0,52	0,03	0,60
800	0,60	0,64	0,59	0,02	0,56
1000	0,60	0,59	0,58	0,01	0,63
1250	0,58	0,54	0,59	0,02	0,61
1600	0,62	0,65	0,61	0,02	0,60
2000	0,64	0,63	0,63	0,00	0,67
2500	0,66	0,65	0,67	0,01	0,66
3150	0,66	0,66	0,63	0,01	0,68
4000	0,60	0,59	0,61	0,01	0,59
5000	0,59	0,59	0,58	0,00	0,60
6300	0,54	0,54	0,54	0,00	0,54
8000	0,51	0,50	0,52	0,01	0,50
10000	0,55	0,47	0,70	0,10	0,48

Quadro 4.12 – Valores do tempo de reverberação medidos na sala b0.11 da Escola Secundária de Gondomar em banda de 1/1 oitava.

Frequência (Hz)	Ponto A (s)	Ponto B (s)	Ponto C (s)	Desvio Padrão	$T_{r\text{médio}}$ [500, 1k, 2k] (s)	$T_{r\text{médio}} - I$ (s)
125	0,53	0,54	0,47	0,03		
250	0,58	0,55	0,58	0,01		
500	0,60	0,61	0,57	0,02		
1000	0,59	0,59	0,59	0,00	0,62	0,40
2000	0,64	0,64	0,64	0,00		
4000	0,62	0,61	0,61	0,00		
8000	0,54	0,54	0,54	0,00		

Para uma sala com um volume de aproximadamente 209 m³, obtém-se os seguintes valores de tempo de reverberação estabelecidos no RRAE (Quadro 3.2):

- TR_{RRAE} [500, 1k e 2k Hz] = 0,89 segundos;
- TR de verificação = 0,40 segundos ($T_{\text{Médio}} - \text{Incerteza } 25\%$).

A Figura 4.32 resulta da disposição dos resultados dos pontos testados, bem como os valores máximos estabelecidos pelo Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios.

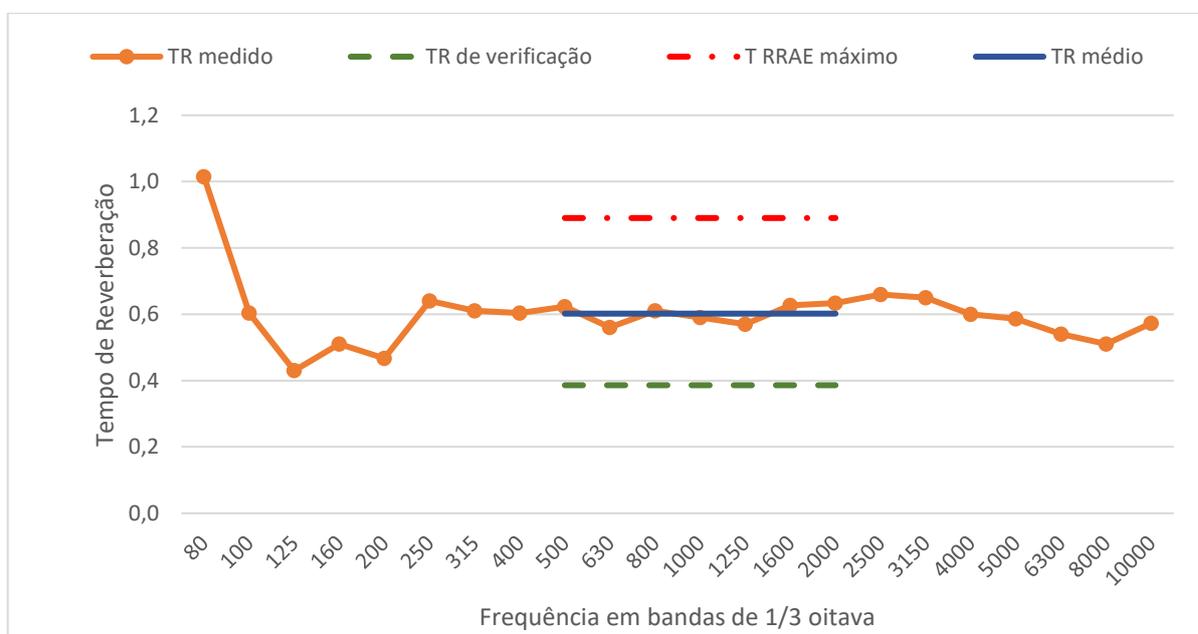


Figura 4.32 – Valores médios do tempo de reverberação por banda de 1/3 oitava obtidos na sala b0.11 da Escola Secundária de Gondomar.

4.5.2.2. Isolamento Sonoro a Ruídos de Condução Aérea

A realização do ensaio na sala b0.11 foi muito semelhante ao ensaio realizado na sala a1.10.

Quadro 4.13 – Níveis de pressão sonora (P_i) e nível de pressão médio (L_{eq}) por bandas de frequência, medidos na sala b1.13 (emissora) – Piso 1 da Escola Secundária de Gondomar.

Freq. (Hz)	P_A (dB)	P_B (dB)	P_C (dB)	P_D (dB)	P_E (dB)	$P_{A'}$ (dB)	$P_{B'}$ (dB)	$P_{C'}$ (dB)	$P_{D'}$ (dB)	$P_{E'}$ (dB)	Desvio Padrão	L_{eq} méd.(dB)
25				45,0			43,1	41,6			1,4	43,5
31,5				46,6		41,6	42,4	40,9			2,2	43,5
40	47,0	44,3	43,0	47,1	40,9	54,6	51,9	51,5	50,7	50,3	4,2	49,9
50	62,0	60,5	51,4	58,3	53,4	63,8	63,4	62,8	61,9	60,9	4,0	61,1
63	63,7	67,6	61,3	61,9	65,1	70,5	66,5	66,6	66,8	65,6	2,6	66,3
80	72,5	71,8	67,7	71,1	71,0	72,7	70,7	70,7	71,4	70,9	1,3	71,2
100	75,5	77,3	75,7	76,3	76,1	77,7	75,6	76,1	75,9	76,6	0,7	76,3
125	80,4	82,9	79,6	79,7	80,0	85,3	81,4	81,1	80,8	81,7	1,6	81,7
160	83,8	84,0	80,6	82,1	81,9	84,6	83,5	82,9	83,1	82,1	1,1	83,0
200	79,2	78,1	76,8	77,4	79,3	78,4	80,2	79,4	79,1	78,7	1,0	78,8
250	82,0	81,1	82,0	78,6	79,2	82,4	81,0	81,6	81,6	81,3	1,2	81,2
315	81,4	82,1	80,7	81,3	79,6	82,4	80,9	80,6	80,4	80,3	0,8	81,0
400	82,8	81,7	81,6	83,1	81,9	81,7	81,5	81,7	82,1	81,7	0,5	82,0
500	83,7	85,0	80,6	81,6	78,3	84,7	83,1	83,4	82,6	81,9	1,9	82,9
630	86,4	86,6	82,6	82,6	80,3	87,6	83,4	83,6	83,3	83,5	2,1	84,5
800	79,0	82,6	80,6	77,8	76,6	81,7	80,4	80,0	79,9	79,3	1,7	80,1
1000	76,2	79,2	77,0	76,4	75,9	80,7	78,4	78,0	77,7	77,0	1,4	77,9
1250	79,4	81,0	77,8	78,0	76,1	81,0	79,6	79,0	78,7	78,0	1,4	79,1
1600	79,6	80,8	78,7	78,0	79,7	80,1	79,6	79,0	78,5	79,1	0,8	79,4
2000	81,0	82,0	80,4	79,9	79,4	82,6	80,9	80,6	80,4	80,1	0,9	80,8
2500	82,0	80,8	79,9	80,0	79,5	79,9	81,5	82,0	81,8	81,1	0,9	80,9
3150	76,3	75,4	74,3	74,4	74,5	74,7	75,6	75,6	75,2	74,6	0,6	75,1
4000	76,2	76,5	75,4	75,0	74,5	76,5	76,8	76,5	76,0	75,6	0,7	76,0
5000	68,2	66,7	67,7	66,8	67,0	67,9	68,1	68,2	67,7	67,2	0,6	67,6
6300	60,9	60,6	59,2	58,7	59,7	60,9	60,8	60,5	60,0	60,0	0,7	60,2
8000	58,9	57,7	57,0	55,4	55,9	56,5	58,1	57,7	57,3	57,0	1,0	57,3
10000	51,5	50,2	48,9	47,9	48,3	49,3	51,1	50,7	50,2	49,5	1,1	49,9

Quadro 4.14 – Níveis de pressão sonora (P_i) e nível de pressão médio (L_{eq}) por bandas de frequência, medidos na sala b0.11 (recetora) – Piso 0 da Escola Secundária de Gondomar.

Freq. (Hz)	P_A (dB)	P_B (dB)	P_C (dB)	P_D (dB)	P_E (dB)	$P_{A'}$ (dB)	$P_{B'}$ (dB)	$P_{C'}$ (dB)	$P_{D'}$ (dB)	$P_{E'}$ (dB)	Desvio Padrão	L_{eq} méd.(dB)
25	31,5	38,6	39,4	38,5	38,3	34,1	33,9	44,8	43,8	31,5	4,4	39,6
31,5	35,8	49,5	47,9	47,0	46,6	36,4	36,0	48,1	46,9	39,5	5,4	45,8
40	32,3	37,0	36,9	36,3	36,1	35,6	35,1	35,1	34,8	40,9	2,1	36,6
50	32,8	38,3	40,0	39,8	39,9	34,1	33,6	35,7	36,0	39,1	2,7	37,7
63	30,2	36,1	35,6	35,4	35,2	34,5	34,0	34,3	35,2	34,8	1,6	34,8
80	30,7	35,1	34,6	35,5	35,9	36,3	36,2	36,2	36,3	34,7	1,6	35,4
100	34,3	38,9	38,6	39,0	39,2	41,3	41,2	41,5	41,7	37,0	2,2	39,8
125	37,2	44,7	43,5	43,1	43,1	43,9	43,8	43,8	44,1	39,7	2,2	43,1
160	40,3	41,8	42,6	43,7	44,0	40,2	40,2	40,4	41,3	40,9	1,4	41,8
200	37,9	37,7	38,2	38,5	39,0	42,2	42,1	42,4	41,8	37,9	2,0	40,2
250	41,1	40,4	39,8	39,4	39,2	36,2	36,2	36,9	36,6	35,2	2,0	38,5
315	36,3	36,7	37,1	37,4	37,5	35,9	35,9	36,0	36,2	35,2	0,7	36,5
400	34,4	34,0	35,1	35,9	36,4	33,9	33,9	34,4	35,1	34,0	0,8	34,8
500	31,2	32,0	32,0	32,4	33,0	33,3	33,4	33,5	33,2	32,2	0,7	32,7
630	28,1	28,6	31,6	31,8	32,5	29,6	29,4	29,9	29,4	26,5	1,7	30,1
800	24,2	24,4	29,9	29,2	29,4	25,4	25,0	27,4	26,8	25,3	2,1	27,2
1000	26,4	25,9	31,2	30,8	30,9	27,2	26,9	28,5	27,9	27,5	1,9	28,7
1250	23,4	23,1	28,5	27,9	28,3	23,8	24,0	26,3	25,6	24,3	2,0	26,0
1600	20,6	21,8	25,0	24,6	25,7	25,4	24,8	26,8	25,8	22,4	1,9	24,7
2000	18,9	20,4	21,7	22,1	23,9	24,2	23,5	25,2	24,2	19,6	2,1	22,8
2500	17,5	20,0	19,3	20,7	23,0	24,3	23,6	25,9	24,8	17,3	2,9	22,6
3150	16,6	18,7	18,0	18,7	20,7	19,9	19,3	21,2	20,1	15,6	1,7	19,2
4000	16,1	17,3	16,5	17,6	19,0	17,6	17,1	19,2	18,2	14,6	1,3	17,5
5000	15,5	16,9	15,8	17,0	17,6	17,0	16,5	17,8	16,8	13,8	1,1	16,6
6300	14,8	16,3	15,6	15,9	16,0	14,7	14,4	15,9	15,0	12,8	1,0	15,2
8000	14,1	14,7	14,3	14,2	14,2	13,8	13,5	14,5	13,7	11,6	0,8	13,9
10000	14,8	14,4	15,1	14,8	14,7	13,0	13,0	14,2	13,4	11,2	1,1	14,0

Nesta situação, o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea apenas foi ensaiado verticalmente, tendo como elemento separador dos dois compartimentos a laje, dada a existência de compartimentos menores

e de acesso restrito entre as salas de aula deste bloco. Tal como descrito, realizou-se um conjunto de cinco medições para cada uma das duas posições da fonte sonora (P_1 a P_{10}). O Quadro 4.13 e o Quadro 4.14 apresentam os valores de nível sonoro (L_{eq}) obtidos nas dez medições na sala emissora (sala b1.13 – piso 1) e na sala recetora (sala b0.11 – piso 0), respetivamente.

Os valores dos quadros 4.13 e 4.14 permitem calcular o isolamento sonoro bruto (D) por banda de frequência, através da diferença entre os mesmos.

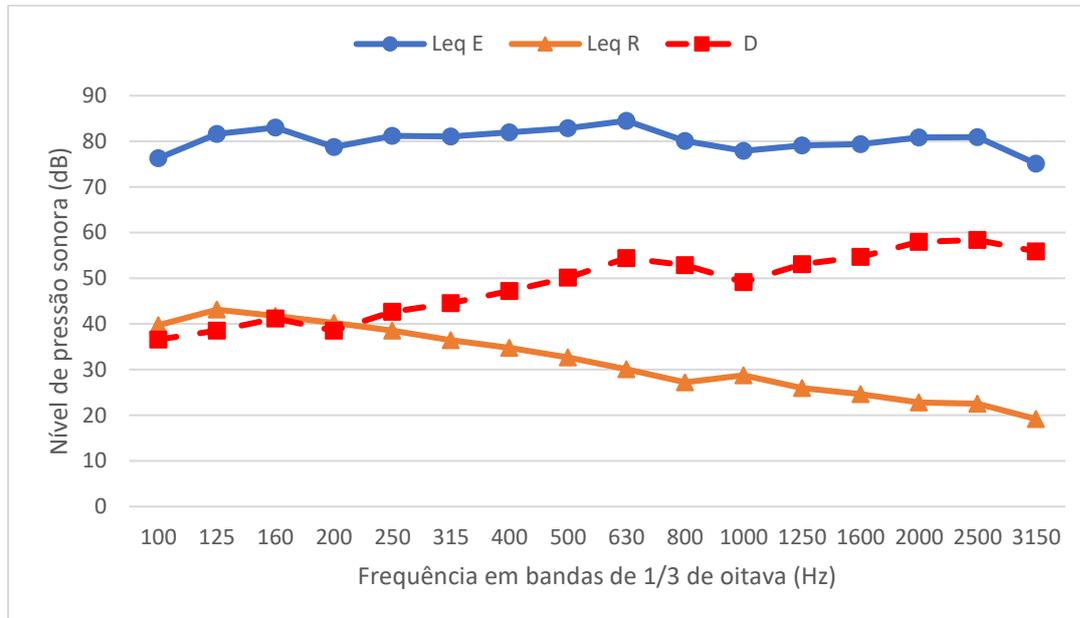


Figura 4.33 – Níveis de pressão sonora nas salas b1.13 (Leq E) e b0.11 (Leq R) da Escola Secundária de Gondomar e isolamento sonoro bruto (D).

A Figura 4.33 apresenta os níveis de pressão sonora médios registados na sala de formações (L_{eq} E) e na sala a1.10 (L_{eq} R) bem como a linha de isolamento sonoro bruto (D). Tal como seria previsível, os valores de D apresentam uma tendência crescente à medida que percorremos as bandas de frequências.

Chega-se assim a um índice de isolamento sonoro ($D_{nT, w}$) de 53 dB (+I=56 dB), valor bastante superior ao mínimo de 45 dB exigidos no RRAE.

4.5.2.3. Isolamento Sonoro a Ruídos de Percussão

Sendo o isolamento sonoro de ruídos de percussão apenas, medido do piso superior para o inferior, as salas intervenientes foram a sala de formações e a sala a1.10 (recetora).

Colocou-se a máquina de percussão em quatro posições sobre a laje na sala emissora e o sonómetro em quatro posições idênticas no piso inferior. Para cada posição da máquina de impactos no piso superior, recolheram-se os valores dos níveis de pressão sonora nos quatro pontos da sala recetora, totalizando assim uma amostra de 16 pontos (L_i).

No Quadro 4.15 a) e b), estão apresentados os valores brutos obtidos na medição.

Após cálculo, chega-se a um valor de $L'_{nT, w}$ igual a 50 dB (-I = 47 dB), muitíssimo abaixo do máximo de 65 dB estabelecido pelo RRAE.

Quadro 4.15 a) – Níveis de pressão sonora (L_i) medidos na sala b0.11 da Escola Secundária de Gondomar.

Freq. (Hz)	P_{A1} (dB)	P_{A2} (dB)	P_{A3} (dB)	P_{A4} (dB)	P_{B1} (dB)	P_{B2} (dB)	P_{B3} (dB)	P_{B4} (dB)	P_{C1} (dB)	P_{C2} (dB)
31,5	48,7	49,1	44,3	46,4	45,0	40,8	40,8	39,5	47,6	46,8
40	51,9	52,8	49,5	46,1	50,5	45,4	45,4	52,6	48,7	52,0
50	51,4	51,4	49,8	35,7	42,5	47,6	47,6	46,4	44,9	46,9
63	43,0	45,1	43,0	39,6	40,1	39,0	39,0	43,3	39,4	42,4
80	44,9	46,1	49,4	41,8	39,2	40,2	40,2	43,6	41,0	51,1
100	48,2	49,6	54,4	45,5	43,3	40,9	40,9	41,0	50,3	52,4
125	51,2	51,3	53,2	42,7	44,7	43,0	43,0	43,3	56,2	55,3
160	50,8	51,6	48,6	42,3	41,7	42,5	42,5	41,0	50,9	48,8
200	50,5	50,6	48,4	41,7	42,2	40,7	40,7	39,9	47,4	46,9
250	49,5	50,2	50,9	46,4	48,5	48,5	48,5	45,0	46,4	46,7
315	50,4	50,7	53,4	49,4	51,9	48,1	48,1	47,6	47,7	48,6
400	48,8	49,9	50,8	51,2	52,5	53,6	53,6	49,0	50,0	47,9
500	46,2	46,1	47,3	46,5	51,4	48,3	48,3	48,1	45,5	46,8
630	44,5	44,5	45,5	46,9	48,0	48,9	48,9	46,1	41,5	42,0
800	46,1	45,9	45,5	48,4	47,8	48,9	48,9	47,7	43,5	43,0
1000	45,3	45,2	44,3	45,6	47,3	47,2	47,2	46,9	41,7	43,3
1250	45,2	45,1	44,5	48,9	49,2	48,2	48,2	47,9	42,0	43,0
1600	42,8	42,9	43,1	48,1	48,3	47,8	47,8	47,0	41,6	41,7
2000	42,9	42,8	42,6	46,1	45,9	45,1	45,1	45,0	40,6	41,8
2500	42,4	42,3	41,2	45,5	46,4	44,2	44,2	43,2	41,5	40,2
3150	40,4	40,2	39,0	43,6	43,9	42,3	42,3	41,8	38,2	37,5
4000	36,6	36,4	34,2	38,4	39,0	36,7	36,7	36,4	31,4	31,6
5000	31,8	31,7	29,2	34,0	35,4	32,9	32,9	32,7	25,4	26,0
6300	26,7	26,7	23,3	34,3	35,9	32,2	32,2	32,4	19,6	21,9
8000	13,8	14,7	13,9	19,7	20,8	18,6	18,6	21,0	9,9	13,6
10000	12,1	14,5	14,1	18,1	19,4	16,1	16,1	18,9	9,4	12,4

Quadro 4.15 b) – Níveis de pressão sonora (L_i) medidos na sala b0.11 da Escola Secundária de Gondomar.

Freq. (Hz)	P_{C3} (dB)	P_{C4} (dB)	P_{D1} (dB)	P_{D2} (dB)	P_{D3} (dB)	P_{D4} (dB)	Desvio Padrão	L_{eq} méd.(dB)
31,5	46,2	43,7	48,5	46,2	47,3	39,7	3,1	46,0
40	50,4	50,7	45,5	52,2	50,2	50,0	2,6	50,3
50	51,6	53,5	40,0	47,0	53,0	48,0	4,7	49,2
63	44,6	45,1	37,8	42,0	40,2	43,2	2,3	42,3
80	49,3	50,9	41,5	43,2	42,1	43,9	3,8	46,1
100	53,0	49,5	44,4	44,8	42,1	47,2	4,4	48,8
125	59,8	55,6	49,8	54,1	46,2	49,8	5,4	52,9
160	53,3	50,4	48,8	48,4	51,8	50,4	4,1	49,2
200	48,6	49,0	46,5	46,3	52,2	50,7	4,0	47,9
250	47,4	45,8	48,8	45,2	45,9	47,0	1,7	47,9
315	49,6	49,4	49,1	47,8	47,7	49,4	1,6	49,6
400	49,6	48,1	51,3	48,9	46,9	47,2	2,0	50,4
500	47,2	45,2	47,2	46,0	44,2	45,4	1,6	47,2
630	44,2	42,1	46,4	44,3	46,0	45,6	2,2	45,9
800	42,8	42,9	45,3	44,4	45,1	45,5	2,0	46,2
1000	44,3	43,0	44,1	44,5	43,6	44,7	1,6	45,2
1250	43,8	42,3	44,5	44,6	44,2	44,5	2,3	46,0
1600	41,8	41,1	43,5	43,5	43,8	44,0	2,5	45,1
2000	41,8	41,7	43,0	43,5	44,0	46,4	1,7	44,0
2500	40,7	40,6	45,9	44,2	43,3	45,8	2,0	43,7
3150	38,1	38,2	39,6	38,4	38,6	39,4	2,0	40,6
4000	32,5	31,7	33,2	32,7	32,1	34,6	2,5	35,3
5000	27,7	26,5	27,5	27,9	26,9	31,0	3,1	31,0
6300	23,6	22,3	25,1	25,2	23,9	28,3	4,8	29,7
8000	18,5	14,9	13,7	19,6	14,3	21,0	3,3	17,8
10000	17,2	13,0	11,6	17,7	12,1	18,1	3,0	16,0

4.5.2.4. RASTI

Tal como já referido, no ensaio de *Rapid Speech Transmission Index* realizaram-se quatro medições (M_i) para cada um dos seis pontos (A, B, C, D, E e F) conforme o esquema da Figura 4.28, tendo-se calculado a média aritmética das leituras. Os resultados encontram-se expressos no Quadro 4.16.

Observando o quadro 4.16, é notável a consistência dos valores independentemente da localização. Obtém-se assim um valor médio para o índice de RASTI de 73%, pertencente à segunda melhor categoria deste parâmetro. É possível assim afirmar que a inteligibilidade da sala é muito boa na sua generalidade.

Quadro 4.16 – Resultados para a medição de RASTI na sala a1.10 da Escola Secundária de Gondomar.

Pontos	M_1	M_2	M_3	M_4	Média Pontos	Média Sala
A	0,79	0,80	0,79	0,80	0,80	0,73
B	0,77	0,76	0,78	0,78	0,77	
C	0,74	0,75	0,76	0,76	0,75	
D	0,70	0,72	0,72	0,73	0,72	
E	0,67	0,68	0,67	0,67	0,67	
F	0,68	0,69	0,70	0,70	0,69	

4.5.3. REFEITÓRIO

A medição do tempo de reverberação do refeitório foi realizada estando presentes só duas pessoas no local. O Quadro 4.17. apresenta os valores obtidos no ensaio. Embora este espaço possua um grande volume (1152 m³), é possível constatar que os valores médios se encontram relativamente próximos em todas as frequências. Este resultado é conseguido essencialmente pela utilização do mesmo tipo de teto utilizado nas salas (teto gesso cartonado perfurado com lã de rocha na face posterior).

Contudo, existem algumas frequências de alguns pontos que apresentam valores para o TR muito díspares das restantes medições. Uma possível explicação para os dois valores descabidos no ponto B poderá ser o facto de se tratar de um refeitório com a área de serviço no lado oposto. Uma vez que a área de serviço se encontra equipada com os mais diversos equipamentos que se mantêm ligados durante as 24 horas (como é o caso dos frigoríficos e vitrinas) e o seu funcionamento intermitente produz ruídos, geralmente de baixas frequências, estes poderão estar na origem de alguns picos nos valores.

O Quadro 4.18 converte os dados para bandas de frequência de 1/1 oitava de forma a facilitar a leitura dos mesmos. No Quadro 4.18 estão ainda descritos os valores do tempo de reverberação médio nas frequências de 500 a 2000 Hz e do tempo de reverberação de verificação legislativo descontando a incerteza (I).

A Figura 4.34 representa os restantes valores do tempo de reverberação para bandas de frequência de 1/1 oitava nos diversos pontos, bem como os valores máximos regulamentares para este espaço.

Quadro 4.17 – Valores do tempo de reverberação medidos no refeitório da Escola Secundária de Gondomar em banda de 1/3 de oitava.

Frequência (Hz)	Ponto A (s)	Ponto B (s)	Ponto C (s)	Desvio Padrão	Média (s)
100	1,62	1,09	1,34	0,22	1,35
125	0,66		0,86	0,10	1,17
160	0,75	0,76	1,08	0,15	0,86
200	0,96	1,17	0,87	0,13	1,00
250	1,06	1,11	1,14	0,03	1,10
315	1,16	1,27	1,39	0,09	1,27
400	1,33	1,29	1,31	0,02	1,31
500	1,20	1,19	1,30	0,05	1,23
630	1,10	1,21	1,09	0,05	1,13
800	1,16	1,17	1,26	0,04	1,20
1000	1,19	1,20	1,48	0,13	1,29
1250	1,18	1,19	1,55	0,17	1,31
1600	1,29	1,34	1,30	0,02	1,31
2000	1,24	1,28	1,30	0,02	1,27
2500	1,12	1,15	1,32	0,09	1,20
3150	1,11	1,18	1,32	0,09	1,20
4000	1,10	1,09	1,24	0,07	1,14
5000	0,97	1,03		0,03	1,00
6300	0,85	0,89	0,90	0,02	0,88
8000	0,76	0,90	0,82	0,06	0,83
10000	0,66	0,64	0,76	0,05	0,69

Para uma sala com um volume de aproximadamente 1152 m³, obtém-se os seguintes valores de tempo de reverberação estabelecidos no RRAE (Quadro 3.2):

- TR_{RRAE} [500, 1k e 2k Hz] = 1,57 segundos;
- TR de verificação = 0,85 segundos (T_{Médio} - Incerteza 25%).

Quadro 4.18 – Valores médios do tempo de reverberação por banda de 1/1 oitava obtidos no refeitório da Escola Secundária de Gondomar.

Banda de Frequência (Hz)	Ponto A (s)	Ponto B (s)	Ponto C (s)	Desvio Padrão	$T_{r\text{médio}}$ [500, 1k, 2k] (s)	$T_{r\text{médio}} - I$ (s)
125	1,01	1,40	1,09	0,17		
250	1,06	1,18	1,13	0,05		
500	1,21	1,23	1,23	0,01		
1000	1,18	1,19	1,43	0,12	1,24	0,85
2000	1,22	1,26	1,31	0,04		
4000	1,06	1,10	1,28	0,10		
8000	0,76	0,81	0,83	0,03		

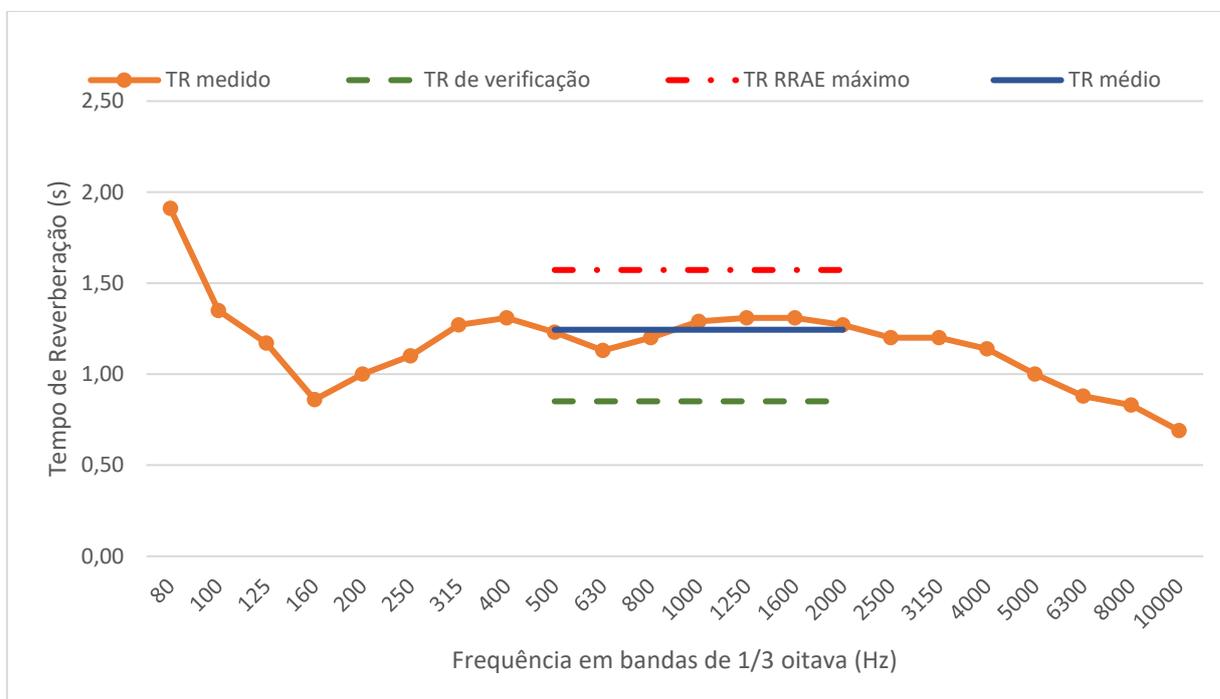


Figura 4.34- Valores médios do tempo de reverberação por banda de 1/3 oitava obtidos no refeitório da Escola Secundária de Gondomar.

4.5.4. PAVILHÃO GIMNODESPORTIVO BLOCO B

A medição do tempo de reverberação no pavilhão gimnodesportivo do bloco B foi realizada com apenas duas pessoas presentes na sala. O TR foi medido em bandas de frequência de 1/3 de oitava, para um decaimento de 30 dB sendo extrapolado automaticamente pelo aparelho para o decaimento de 60 dB.

Os valores obtidos no ensaio encontram-se registados no Quadro 4.19. Por fim a facilitar a leitura dos dados, o Quadro 4.20 apresenta os valores obtidos no ensaio por banda de 1/1 oitava. No Quadro 4.20 estão ainda descritos os valores do tempo de reverberação médio nas frequências de 500 a 2000 Hz e o tempo de reverberação de verificação legislativo descontando a incerteza (I).

Quadro 4.19 – Valores do tempo de reverberação por banda de 1/3 de oitava obtidos no pavilhão gimnodesportivo B da Escola Secundária de Gondomar.

Frequência (Hz)	Ponto A (s)	Ponto B (s)	Ponto C (s)	Desvio Padrão	Média (s)
100	1,91	2,31	2,89	0,40	2,37
125	1,42	1,73	1,43	0,14	1,53
160	1,52	1,60	1,53	0,04	1,55
200	1,80	2,08	1,81	0,13	1,90
250	1,68	1,99	2,04	0,16	1,90
315	2,19	2,37	1,95	0,17	2,17
400	2,18	2,06	1,98	0,08	2,07
500	2,27	2,28	2,10	0,08	2,22
630	1,95	2,14	2,03	0,08	2,04
800	2,16	2,14	2,10	0,02	2,13
1000	2,33	2,52	2,46	0,08	2,44
1250	2,49	2,59	2,39	0,08	2,49
1600	2,29	2,29	2,36	0,03	2,31
2000	1,97	2,01	2,05	0,03	2,01
2500	1,63	1,89	1,83	0,11	1,78
3150	1,66	1,73	1,80	0,06	1,73
4000	1,61	1,62	1,70	0,04	1,64
5000	1,40	1,50	1,53	0,06	1,48
6300	1,17	1,27	1,31	0,06	1,25
8000	0,94	0,99	1,10	0,07	1,01

Quadro 4.20 - Valores do tempo de reverberação medidos em banda de 1/1 oitava no pavilhão gimnodesportivo B da Escola Secundária de Gondomar.

Banda de Frequência (Hz)	Ponto A (s)	Ponto B (s)	Ponto C (s)	Desvio Padrão	$T_{\text{médio}}$	
					[500, 1k, 2k] (s)	$T_{\text{médio}} - I$ (s)
125	1,62	1,88	1,95	0,14	2,17	1,66
250	1,89	2,15	1,93	0,11		
500	2,13	2,16	2,04	0,05		
1000	2,33	2,42	2,32	0,04		
2000	1,96	2,06	2,08	0,05		
4000	1,56	1,62	1,68	0,05		
8000	1,06	1,13	1,21	0,06		

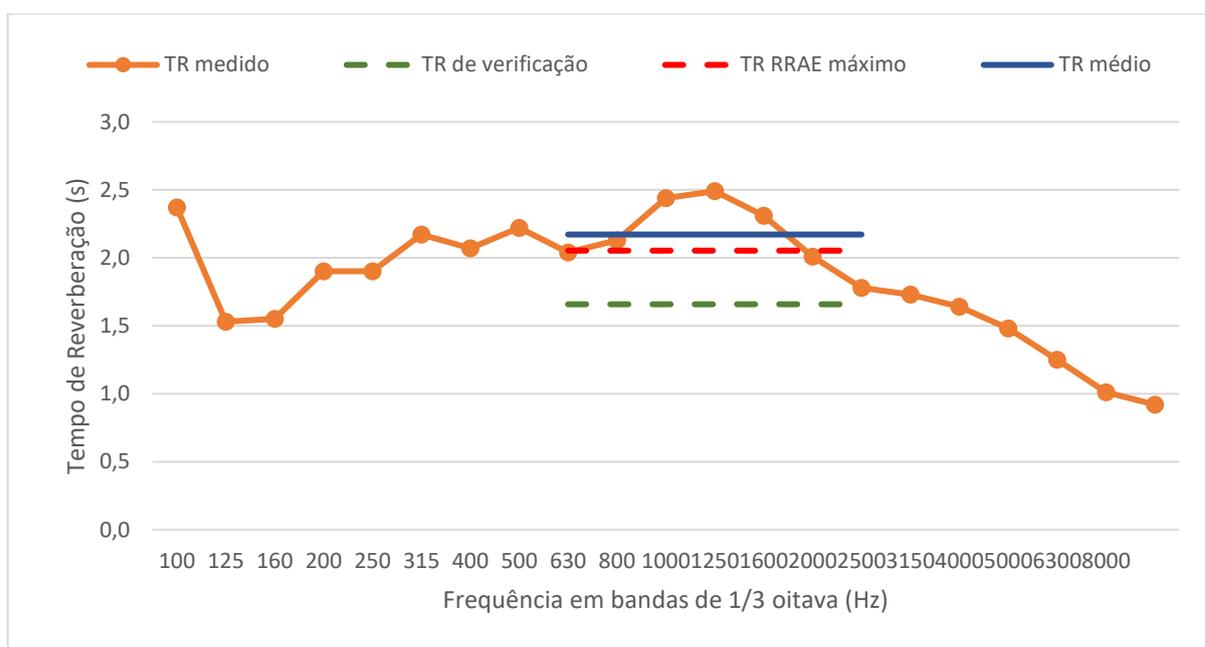


Figura 4.35 – Valores médios do tempo de reverberação por banda de 1/3 oitava obtidos no pavilhão gimnodesportivo B da Escola Secundária de Gondomar.

A Figura 4.35 resulta da representação gráfica dos valores médios do tempo de reverberação do espaço por bandas de frequência de 1/3 oitava, bem como o valor máximo regulamentar e o valor de verificação legislativa. É possível assim constatar que o espaço se encontra não só em cumprimento com o regulamento português, mas também com um valor muito aceitável.

Para uma sala com um volume de aproximadamente 2563 m³, obtém-se os seguintes valores de tempo de reverberação estabelecidos no RRAE (Quadro 3.2):

- TR_{RRAE} [500, 1k e 2k Hz] = 2,05 segundos;
- TR de verificação = 1,66 segundos ($T_{\text{Médio}} - \text{Incerteza } 25\%$).

4.5.5. PAVILHÃO GIMNODESPORTIVO BLOCO D

O ensaio do tempo de reverberação no pavilhão gimnodesportivo D foi realizado igualmente com apenas duas pessoas presentes no local. A disposição do equipamento seguiu o esquema apresentado na Figura 4.22, com a fonte sonora colocada num dos extremos do pavilhão, no eixo longitudinal do mesmo.

Os valores obtidos no ensaio encontram-se expressos por banda de 1/3 de oitava no Quadro 4.21. Com vista a facilitar a leitura dos dados, o Quadro 4.22 apresenta os valores obtidos em banda de 1/1 oitava. No Quadro 4.22 estão ainda descritos os valores do tempo de reverberação médio nas frequências de 500 a 2000 Hz e o tempo de reverberação de verificação legislativo descontando a incerteza (I).

Quadro 4.21 – Valores do tempo de reverberação em banda de 1/3 de oitava obtidos no pavilhão gimnodesportivo D da Escola Secundária de Gondomar.

Frequência (Hz)	Ponto A (s)	Ponto B (s)	Ponto C (s)	Desvio Padrão	Média (s)
100	1,83	1,26	1,13	0,30	1,41
125	1,47	1,14	1,21	0,14	1,27
160	1,34	1,53	1,09	0,18	1,32
200	1,49	1,23	1,12	0,16	1,28
250	1,18	1,11	1,03	0,06	1,11
315	1,04	1,92	1,16	0,39	1,37
400	1,05	1,26	1,13	0,09	1,15
500	0,99	2,05	0,95	0,51	1,33
630	0,94		0,95	0,01	0,95
800	1,36	1,65	1,71	0,15	1,57
1000	1,16		1,47	0,16	1,32
1250	1,23		1,48	0,13	1,36
1600	1,07		1,40	0,17	1,24
2000	1,07	1,59	1,36	0,21	1,34
2500	1,26	1,83	1,13	0,30	1,41
3150	1,03	1,45	1,18	0,17	1,22
4000	1,06	1,13	1,27	0,09	1,15
5000	0,92	1,32	1,18	0,17	1,14
6300	0,91	0,96	0,96	0,02	0,94
8000	0,82	0,77	0,78	0,02	0,79

Quadro 4.22 – Valores do tempo de reverberação medidos no pavilhão D em banda de 1/1 oitava.

Bandas de Frequência (Hz)	Ponto A (s)	Ponto B (s)	Ponto C (s)	Desvio Padrão	$T_{r\text{médio}}$ [500, 1k, 2k] (s)	$T_{r\text{médio}} - I$ (s)
63	1,71	1,58	1,36	0,14	1,29	0,68
125	1,55	1,31	1,14	0,17		
250	1,24	1,42	1,10	0,13		
500	0,99	1,66	1,01	0,31		
1000	1,25	1,65	1,55	0,17		
2000	1,13	1,71	1,30	0,24		
4000	1,00	1,30	1,21	0,12		
8000	0,99	0,87	0,81	0,07		

Para uma sala com um volume de aproximadamente 4452 m³, obtém-se os seguintes valores de tempo de reverberação estabelecidos no RRAE (Quadro 3.2):

- TR_{RRAE} [500, 1k e 2k Hz] = 2,47 segundos;
- TR de verificação = 0,68 segundos ($T_{\text{Médio}}$ - Incerteza 25%).

A Figura 4.36 exibe a representação gráfica dos valores médios do tempo de reverberação medido no PD em bandas de frequência de 1/3 de oitava, representando ainda o valor máximo regulamentar e o valor de verificação do TR.

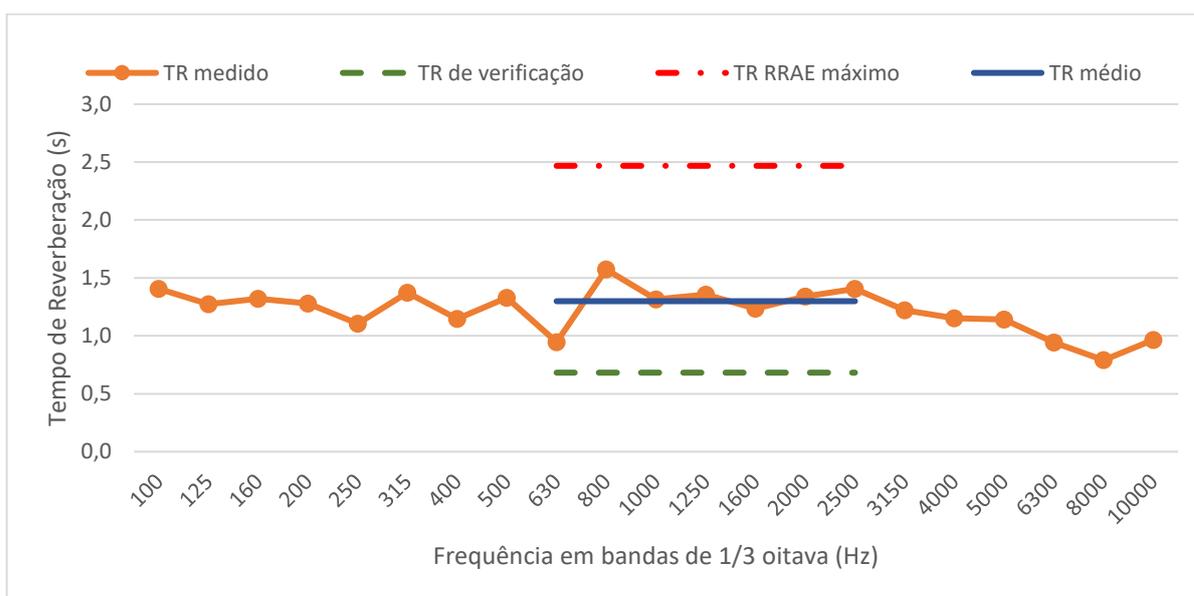


Figura 4.36 - Valores médios do tempo de reverberação por banda de frequências de 1/3 oitava obtidos no pavilhão ginodesportivo D da Escola Secundária de Gondomar.

4.6. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM RRAE

Os Quadros 4.23, 4.24 e 4.25, procuram sumarizar o comportamento acústico do edifício escolar em relação aos valores estabelecidos no Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios.

Quadro 4.23 – Verificação do cumprimento do tempo de reverberação dos espaços ensaiados da Escola Secundária de Gondomar com o RRAE.

Local	TR [500-2k] (s)	TR – I (s)	RRAE Máximo (s)	Resultados
Sala a1.10	0,49	0,30	0,76	Cumpre
Sala b0.11	0,62	0,40	0,89	Cumpre
Refeitório	1,24	0,85	1,57	Cumpre
Pavilhão B	2,17	1,66	2,05	Cumpre
Pavilhão D	1,41	0,79	2,47	Cumpre

Quadro 4.24 – Verificação do cumprimento dos índices de isolamento sonoro dos elementos ensaiados nas salas a1.10 e b0.11 da Escola Secundária de Gondomar com o RRAE.

Índice de Isolamento Sonoro	Local	Elemento Separador	Valor Obtido (dB)	Valor Afetado da Incerteza (dB)	Valor Regulamentar RRAE (dB)	Resultados
Ruídos de Condução Aérea ($D_{nT,w}$)	Sala a1.10	Parede	51	54	≥ 45	Cumpre
			55	58		Cumpre
	Sala b0.11		53	56	Cumpre	
Ruídos de Percussão ($L'_{nT,w}$)	Sala a1.10	Laje	56	53	≤ 65	Cumpre
	Sala b0.11		50	47		Cumpre

Quadro 4.25 – Classificação do RASTI medido nas salas a1.10 e b0.11 da Escola Secundária de Gondomar.

Local	RASTI	Inteligibilidade
Sala a1.10	0,76	Ótima
Sala b0.11	0,73	Boa

4.7. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM ESCOLA SECUNDÁRIA DR. SERAFIM LEITE

O Quadro 4.26 é faz a comparação dos resultados obtidos na Escola Secundária de Gondomar e a Escola Secundária Dr. Serafim Leite que não foi alvo de intervenção acústica.

Quadro 4.26 – Comparação de resultados entre Escola Secundária de Gondomar e Escola Secundária Dr. Serafim Leite

ESG C/ Tratamento Acústico		ESSL S/ Tratamento Acústico		RRAE
Tempo de Reverberação TR (s)				
Sala a1.10 [V=128 m ³]	0,49 s	Sala 9 [V=170 m ³]	1,13s	Sala a1.10 ≤ 0,76 s Sala 9 ≤ 0,83 s
Sala b0.11 [V=209 m ³]	0,62 s			Sala b0.11 ≤ 0,89 s
Refeitório [V=1152 m ³]	1,24 s	Refeitório [V=532 m ³]	2,60 s	ESG ≤ 1,57 s ESSL ≤ 1,22 s
Ginásio B [V=2563 m ³] 2,17 s		Ginásio [V=4630 m ³]	4,43 s	Ginásio B ≤ 2,05 s Ginásio ESSL ≤ 2,50 s
Ginásio D [V=4452 m ³] 1,40 s				Ginásio D ≤ 2,47 s
RASTI				
Sala a1.10 [V=128 m ³]	0,76	Sala 9 [V=170 m ³]	0,58	(recomendável) ≥ 0,60
Sala b0.11 [V=209 m ³]	0,73			
Índice de Isolamento Sonoro a Ruídos de Condução Aérea D _{nT,w}				
Parede entre Sala a1.09/a1.10		Parede entre Sala 8/Sala 9		≥ 45 dB
	51 dB		44 dB	
Índice de Isolamento Sonoro a Ruídos de Percussão L' _{nT,w}				
Laje s/ isola- mento	56 dB	Laje entre Sala 16/Sala 9	64 dB	≤ 65 dB
Laje c/ isola- mento	50 dB			

Analisando este caso em específico, é possível observar que na Escola Secundária de Gondomar, o tempo de reverberação é substancialmente inferior em todos os espaços, existindo uma variação do TR desde 0,5 segundos, nas salas-tipo, até 3,0 segundos nos pavilhões gimnodesportivos de maior volumetria. Do mesmo modo, os valores do RASTI nas salas modelo demonstram uma qualidade acústica distinta entre as duas escolas. A adequação destes valores pode ser traduzida como a diminuição do esforço vocal de um professor e uma compreensão mais rápida por parte dos alunos, por exemplo.

É notável também, um desempenho bastante superior no que diz respeito ao isolamento a ruídos de condução aérea na ESG. Não só nas paredes, mas também o isolamento conseguido em elementos como portas e janelas é fundamental neste aspeto.

O isolamento sonoro a ruídos de percussão é sem dúvida o parâmetro mais difícil de controlar uma vez que as ligações numa estrutura são de caráter rígido. Contudo a dificuldade na mitigação de propagação destas ondas na estrutura demonstra ter sido bem contornada com aplicação do material absorvente no teto falso e da uma tela resiliente sob a lajeta no edifício do bloco C que apresentam um desempenho extremamente positivo. É possível ainda perceber que a aplicação do material sob a lajeta diminui em 6 dB o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão.

O Quadro 4.26 evidencia o enorme impacto que a correção acústica e isolamento sonoro têm no comportamento acústico de um edifício, que por sua vez, se refletirá no bem-estar e desempenho dos seus utentes.

5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo criar uma visão acústica completa e geral da Escola Secundária de Gondomar, fazendo posteriormente uma comparação com a caracterização acústica da Escola Secundária Dr. Serafim Leite (São João da Madeira) que não foi alvo de intervenção acústica.

De forma a obter uma caracterização ampla, foram selecionados cinco espaços distintos que se decompõem em duas salas de aula (uma convencional e uma preparada para trabalhos experimentais), onde foram medidos os respetivos tempos de reverberação, índices de ruídos de condução aérea, percussão e RASTI, dois pavilhões gimnodesportivos e o refeitório onde se mediu unicamente o tempo de reverberação.

Os tempos de reverberação médios obtidos (na banda de frequências dos 500 aos 2000 Hz), de 0,5 e 0,6 s para a sala convencional e a sala preparada para trabalhos experimentais, respetivamente, situa-se dentro dos valores ideais para salas do ensino secundário (0,6 s). Nos pavilhões obteve-se um TR médio de 1,4 e 2,2 s, correspondendo o valor mais baixo ao pavilhão com maior tratamento acústico. No refeitório obteve-se um TR de 1,2 s. Verifica-se que todos os valores obtidos se encontram muito abaixo dos limites máximos estabelecidos na legislação portuguesa pelo RRAE.

Os valores médios de RASTI obtidos nas salas (0,73 e 0,76) representam a ótima qualidade acústica das salas resultante da atuação dos inúmeros pormenores abordados neste trabalho que visam a correção sonora do espaço, conferindo às salas de aula uma inteligibilidade classificada entre “boa” e “ótima”.

Da avaliação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea resultaram valores igualmente muito interessantes, tendo-se obtido um índice isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ($D_{nT,w}$) de 55 e 53 dB para transmissão vertical entre salas localizadas imediatamente acima das salas a1.10 e b0.11 respetivamente. Entre a sala a1.10 e uma sala adjacente, obteve-se um $D_{nT,w}$ horizontal de 51 dB. Estes valores cumprem por uma larga margem os valores mínimos requeridos pelo RRAE, satisfazendo ainda o estabelecido pela regulamentação americana, britânica e francesa.

Por fim, avaliou-se o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão ($L'_{nT,w}$) na sala a1.10 (acabamento mais absorvente, mas laje sem isolamento) e na sala b0.11 (acabamento menos absorvente, mas com tela resiliente sob a betonilha), pelo que se verificou um índice de 56 dB na sala a1.10 e 50 dB na sala b0.11, valores estes que apresentam uma resposta muito boa do edifício a este tipo de solicitações.

É importante salientar o efeito da tela resiliente, aplicada no edifício da sala b0.11, na atenuação de transmissão de ruídos de percussão. Quando comparada com a laje simples da sala a1.10, a configuração da laje da sala b0.11 permite reduzir 6 dB. Por outro lado, durante a realização dos ensaios de isolamento sonoro entre pisos distintos, foi notória a transmissão de ruído através das condutas de ventilação.

A comparação dos valores obtidos com os resultados dos ensaios da Escola Secundária Dr. Serafim Leite revela a agreste dissimilitude que a correção acústica e o isolamento sonoro podem promover em espaços fechados de qualquer volumetria. O Quadro 5.1 compreende a variação de valores obtidos na Escola Secundária de Gondomar, para cada parâmetro analisado, em relação à Escola Secundária Dr. Serafim Leite.

Quadro 5.1 – Variação de valores nos parâmetros entre Escola Secundária de Gondomar e Escola Secundária Dr. Serafim Leite.

Parâmetros	Local	Δ (ESG – ESSL)
Tempo de Reverberação (s) Médio (500 – 2000 Hz)	Sala-tipo	- [0,5 a 0,6]
	Refeitório	-1,4
	Gimnodesportivos	- [2,3 a 3,0]
RASTI	Sala-tipo	[0,15 a 0,18]
Índice de Isolamento Sonoro a Ruídos de Condução Aérea ($D_{nT,w}$) (dB)	Salas adjacentes	7
Índice de Isolamento Sonoro a Ruídos de Percussão ($L'_{nT,w}$) (dB)	Lajes de salas sobrepostas	-8 a -14

É assim possível afirmar que as alterações realizadas na Escola Secundária de Gondomar conferiram um desempenho acústico ótimo e exemplar a nível geral, que fomentou a qualidade de ensino no estabelecimento.

Contudo, o subcapítulo 4.2 – Os Docentes – é a prova de que, apesar da prestação acústica do edifício de Gondomar ser bem melhor que a prestação do edifício de São João da Madeira e cumprir os limites impostos para cada parâmetro pelo RRAE com uma alargada margem na sua generalidade, existem momentos para os quais os valores atingidos deixam de se sentir eficazmente e o isolamento se demonstra insuficiente.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Por fim a complementar e dar continuidade a este trabalho, entende-se que seria pertinente desenvolver os seguintes tópicos:

- Alargar o estudo a um maior número de salas de aula de forma a atingir uma caracterização mais assertiva;
- Alargar o estudo à biblioteca e salas de professores;
- Aumentar o número de pontos para o ensaio do tempo de reverberação nos espaços de grande volumetria;

- Avaliar o tempo de reverberação dos corredores;
- Avaliar o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea do elemento separador entre corredor e salas de aula;
- Avaliar o tempo de reverberação das oficinas dedicadas ao ensino profissional;
- Avaliar o tempo de reverberação da sala de ginástica;
- Estudar a variação do acabamento da laje no isolamento sonoro a ruídos de percussão para soluções com tela resiliente sob e sobre a laje;
- Elaborar um plano de *Life Cycle Cost* acompanhado de um documento com regras e boas práticas destinado à realização das tarefas de manutenção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, A.P.O. – Acústica Ambiental e de Edifícios, FEUP, Porto, 2019.
- [2] CCOHS – *Noise, Basic Information* [https://www.ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/noise_ba-sic.html - figure1](https://www.ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/noise_ba-sic.html-figure1) acessado em 15/10/2020.
- [3] López, M.R. – *Acústica Arquitectónica Aplicada*, Paninfo, Madrid, 1999.
- [4] *The Dilettantes – Sound Pressure* <http://www.dilettantesdictionary.org/index.php?search=1&searchtxt=sound%20pressure%20level>, acessado em 15/10/2020.
- [5] *167th Acoustical Society of America Meeting* https://acoustics.org/press-room/httpdocs/167th/2pAAa7_Kocyigit.html acessado em 15/10/2020.
- [6] Nexer, P.G.G. – *Infrasound and ultrasound – Risks and means of protection*, HearingProtech, 2015.
- [7] Barron, M. – *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Spon Press, Londres. 2010.
- [8] Portal Acústica <http://portalacustica.info/conceitos-basicos-da-acustica-parte-ii/> acessado em 16/10/2020.
- [9] Cox, T. J., e D'antonio, P. – *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*, Spon Press, Londres e Nova Iorque, 2009.
- [10] Duarte, D.I.S. – *O Desempenho Acústico dos Edifícios e os Pormenores Construtivos*, FCTUC, Coimbra, 2015.
- [11] Schoenwald, S.; Nightingale, T.R.T.; Zeitler, B. e King, F. – *Approaches for estimating flanking transmission for heavy impact sources*, NRCC, Canadá, 2010.
- [12] Direcional Condomínios – Origem de ruídos <https://www.direcionalcondominios.com.br/sindicos/kelly-ramos-de-lima/item/3444-sobre-a-origem-dos-sons-e-ruídos-a-situacao-dos-condominios-verticais.html> acessado dia 21/10/2020.
- [13] *Engineering Toolbox – Noise Criterion and Noise Rating* https://www.engineeringtoolbox.com/nc-noise-criterion-d_725.html acessado dia 21/10/2020.
- [14] Kuttruff, H. – *Room Acoustics*, Spon Press, Alemanha, 2000.
- [15] Carvalho, A.P.O. – *Influence of Architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches*, UMI, California, 1994.
- [16] *The Music Telegraph – Reverberation* <https://m.themusictelegraph.com/148> acessado dia 22/10/2020.
- [17] Cinemma – Difusor acústico <https://www.cinemma.com.br/conforto/difusor-acustico-9k-hi-fi-experience/> Consultado dia 22/10/2020.
- [18] Henrique, L.L. – *Acústica Musical*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2002.
- [19] Parque Escolar – Enquadramento histórico <https://www.parque-escolar.pt/pt/programa/enquadramento-historico.aspx> acessado dia 03/11/2020.
- [20] Marczinske, K. – *Classroom Acoustics – An Academic Playground or a Major Subject for Qualified Education?*, Euronoise, Alemanha, 2001.
- [21] Bradley, J.S. e Sato, H. - *The intelligibility of speech in elementary school classrooms*, JASA, 2008.

- [22] Maffei, L. *et al.* – *A Methodological Approach to Large Scale Action Plan for Noise Control in School Buildings*. Euronoise 2003, Itália, 2003.
- [23] Sutherland, L.C. e Lubman, D, *17th Meeting of the International Commission for Acoustics - The Impact of Classroom Acoustics on Scholastic Achievement*. Euronoise 2001, Roma, 2001.
- [24] Bradley, J.S. – *Speech Intelligibility Studies in Classrooms*, JASA, 1986.
- [25] Karabiber, Z. e Vallet, M. – *Classroom Acoustics Policies – An Overview*, Euronoise 2003, Itália, 2003.
- [26] Brooks, B.M. – *Eliminating Acoustical Barriers to Learning in Classrooms-Case Study of Reverberation Reduction in Elementary School Gymnasiums*, Acoustical Society of America, Georgia, 2000.
- [27] Woolworth, D. e Phinney, P. – *Classroom Acoustics for Architects*, Acoustical Society of America, Oxford e Califórnia, 2006.
- [28] Iannace, G. *et al.* – *Noise Problems Inside Schools in a Densely Built and Temperate Climate Urban Area*, Proceedings of Internoise 2002, Michigan, 2002.
- [29] Evans, G.W. *et al.* – *Community Noise Exposure and Stress in Children*, Acoustical Society of America, 2001.
- [30] Efentakis, A. *et al.* - *Noise and Acoustic Surveys of London Primary Schools*. Euronoise 2003, Itália, 2003.
- [31] Sobreira, M.A. – *On the Design of Classroom and Conference rooms*, Universidade de Vigo, 2004.
- [32] Maxwell, L. *et al.* – *The Effects of Noise on Pre-school Children's Pre-reading Skills*, Journal of Environmental Psychology, 2000.
- [33] Shield, B.M. e Dockrell, J.E. - *The effects of environmental and classroom noise on the academic attainments of primary school children*, Acoustical Society of America, Londres, 2008.
- [34] Klätte, M., *et al.* – *Effects of Classroom Reverberation Time on Speech Perception and Noise Rating in Elementary School Children: A Field Study*, Euronoise, Alemanha, 2006.
- [35] Astolfi, A., Corrado, V., Filippi, M. e Viazzo, S. - *Classroom Acoustic Assessment: Analysis of Subjective Answers and Measured Indices*, Euronoise, Itália, 2003.
- [36] Lukas, S. J. *et al.* – *Effects of Noise on Academic Achievement and Classroom Behavior*, California Department of Transportation, 1981.
- [37] Seidel *et al.* – *Acoustic Properties in German Classrooms and Their Effect on The Cognitive Performance of Primary School Pupils*. ForumAcusticum 2005, Budapeste, Hungria 2005.
- [38] Smyrnova, Y. – *A Procedure to Improve Acoustical Conditions in Classrooms*, Euronoise 2006, Tampere, Finlândia, 2006.
- [39] Alarcão, D. *et al.* Acústica de salas de aula, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2008.
- [40] Queirós, D.M.D. – *Caracterização do Comportamento Acústico de Edifícios Reabilitados*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP, Porto, 2010.
- [41] OERN – Legislação – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios <http://www.oern.pt/legislacao/71/regulamento-dos-requisitos-acusticos-dos-edificios> acedido dia 05/11/2020.
- [42] DL 96/2008 (09/06/2008), Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios, Diário da República.

- [43] Acoustical Society of America – Classroom acoustics booklets <https://acousticalsociety.org/classroom-acoustics-booklets-and-standards/> acedido dia 6/11/2020.
- [44] ANSI S12.60 – *Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools*, Acoustical Society of America, 2010.
- [45] Building Bulletin 93, *Acoustic Design of Schools: Performance Standards*, Department for Education (Reino Unido), 2015.
- [46] Documento Básico, DB-HR *Protección frente al ruido, Código Técnico de la Edificación*, Real Decreto 732/2019 (20/12/2019), 2019.
- [47] *Arrêté du 25 avril 2003 relatif à la limitation du bruit dans les établissements d'enseignement* - <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000595319/?isSuggest=true>, acedido dia 07/12/2020;
- [48] AS/NZS 2107:2000. *Acoustics – Recommended Design Sound Levels and Reverberation Times for Building Interiors*;
- [49] Berglund, B. *et al.* – *Guidelines for Community Noise*, World Health Organization, Genebra, 1999.
- [50] Google Maps – Escola Secundária de Gondomar <https://www.google.pt/maps/@41.1402891,-8.5348531,77a,35y,158.24h,45.03t/data=!3m1!1e3> acedido dia 07/12/2020
- [51] Google Maps – Escola Secundária de Gondomar <https://www.google.pt/maps/@41.1380306,-8.5339379,495a,35y,340.78h,19.18t/data=!3m1!1e3> acedido dia 01/12/2020.
- [52] Parque Escolar <https://www.parque-escolar.pt/docs/escolas/caracteristicas/125-3010.pdf> acedido dia 10/12/2020
- [53] Documento privado fornecido em entrevista via Skype com o Engenheiro Octávio Inácio e Engenheira Sílvia Vilela, no dia 9 de dezembro de 2020.
- [54] Expresso - Contas furadas na Parque Escolar <https://expresso.pt/actualidade/contas-furadas-na-parque-escolar=f710077> acedido dia 15/01/2021.
- [55] Diário da República n.º 196/2015, Série II de 2015/10/07, Despacho nº11184/2015 <https://dre.pt/application/conteudo/70471199> acedido dia 15/01/2021.
- [56] Contrato do Programa Celebrado entre o Estado Português e a Parque Escolar, E.P.E., <https://www.parque-escolar.pt/docs/site/pt/programa/versao-consolidada-do-contrato-programa.pdf> acedido dia 15/01/2021.