

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DO AUDITÓRIO DO CONSERVATÓRIO DE MÚSICA DO PORTO

JOÃO NUNO MOREIRA BALDAIA MENDES PINTO

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

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2024

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2023/2024

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ mec@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 em Engenharia Civil - 2023/2024 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2024*.

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 mãe

Não tenhamos pressa, mas não percamos tempo

José Saramago

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, pela exigência, profissionalismo, disponibilidade, acompanhamento e simpatia demonstrados durante todo este período.

Ao Engenheiro António Eduardo Costa, pela sua contribuição na realização dos ensaios e no processamento de dados, assim como pelo interesse, disponibilidade e boa disposição demonstrados ao longo da realização deste trabalho.

Ao Técnico do Auditório do Conservatório de Música do Porto, João Rupio, pela atenção com que nos recebeu no dia da realização dos ensaios, bem como pela disponibilidade para esclarecer qualquer dúvida.

A todas as minhas amigas, com quem me fui cruzando dentro e fora da faculdade, por todas as experiências que me proporcionaram e que, mesmo não sabendo, contribuíram para o meu crescimento enquanto pessoa.

À minha família, pelo carinho, apoio e motivação incondicionais, não só durante esta etapa, mas como ao longo de toda a minha vida. Em especial aos meus tios, que sempre me trataram como um filho, e à minha avó, por ter cuidado e por ainda cuidar de mim.

Por último, mas sem dúvida não menos importante, agradeço à minha mãe, que sempre viveu para mim, a quem devo tudo o que tenho e o que sou.

RESUMO

Este estudo foca-se na acústica das salas de espetáculo, mais concretamente nos principais fatores acústicos relativos aos diferentes eventos, bem como aspetos construtivos, visando a conformidade e qualidade acústica e não desiludir a expectativa do público, mantendo o bom nome do espaço em questão. A presente dissertação tem como objetivo a caracterização acústica do auditório do Conservatório de Música do Porto. Situado no centro do Porto, o Conservatório distingue-se pelo seu impacto significativo na cidade, assim como nos concelhos vizinhos, através da realização de inúmeras atividades. Fundado em 1917, é uma das escolas mais prestigiadas na área do ensino artístico especializado em música a nível nacional e uma instituição com grande valor histórico, cultural e didático para a cidade nortenha.

A dissertação principia com a explicação de conceitos teóricos fundamentais para a compreensão da temática, seguida de uma contextualização histórica das salas de espetáculo, apresentação de sistemas relevantes para a acústica e das exigências funcionais relativamente aos diversos eventos que nestas se possam potenciar.

A caracterização acústica foi realizada por meio de medições *in situ* incidentes sobre o Tempo de Reverberação (TR), a inteligibilidade da palavra medida através dos parâmetros STI (*Speech Transmission Index*) e AI (Índice de Articulação), o nível de pressão sonora e nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo (L_{eq} e L_{Aeq} respetivamente), as curvas de incomodidade NC e NR (*Noise Criterion* e *Noise Rating*, respetivamente), e os parâmetros acústicos energéticos Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}), Tempo Central (TS) e Rácio de Baixos baseado no Tempo de Reverberação (BR). Posteriormente, procedeu-se a uma análise dos resultados obtidos, comparando-os com os valores recomendados e regulamentares nacionais, a fim de verificar se o espaço em questão possui as condições necessárias para servir o seu possível propósito multifuncional. Grande parte dos parâmetros mencionados foram analisados sem e com o funcionamento do sistema AVAC.

Na ausência do funcionamento do sistema AVAC, o valor médio para o TR (500, 1000 e 2000 Hz) foi de 1,27 segundos, alcançando-se um BR de 0,9. Os índices NC e NR, associados ao funcionamento do sistema de ventilação, foram de 15 e 16, respetivamente. Relativamente aos restantes parâmetros, os valores médios, sem e com o sistema AVAC ligado, foram os seguintes: STI de 0,62/0,58; L_{Aeq} de 22/28 dB; C_{80} de 4,7/4,8 dB; D_{50} de 0,63; TS de 60/59 milissegundos e AI de 1,00.

Com base nos resultados obtidos, procedeu-se a uma análise comparativa com outras salas de espetáculo portuguesas que foram alvo de estudos acústicos semelhantes. O Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto possui um ótimo desempenho ao nível da emissão sonora do sistema AVAC, no entanto não se revela tão adequado para certos eventos que pode acolher, como por exemplo alguns espetáculos de música sinfónica.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Salas de Espetáculos, Absorção Sonora, Reverberação, STI.

ABSTRACT

This study focuses on the acoustics of concert halls, specifically on the main acoustic factors relating to different events, as well as construction aspects, aiming compliance and acoustic quality and not disappointing the public's expectations, while maintaining the good name of the venue in question. The following dissertation aims at the acoustic characterization of the auditorium of Conservatório de Música do Porto. Located in the centre of Porto, the conservatory stands out by its significant impact on the city, as well as on neighbouring municipalities, through its numerous activities. Founded in 1917, it is one of the most prestigious schools in the field of specialized artistic teaching in music at a national level and an institution with great historical, cultural and educational value for the northern city.

The dissertation begins with an explanation of fundamental theoretical concepts for the understanding of the topic, followed by a historical contextualization of concert halls, a presentation of relevant acoustical systems and functional requirements for the various events that can take place in it.

The acoustic characterization was carried out by *in situ* measurements of Reverberation Time (TR), speech intelligibility measured using the STI (Speech Transmission Index) and AI (Articulation Index) parameters, the sound pressure level and sound level of background noise (L_{eq} and L_{Aeq} respectively), the discomfort curves NC and NR (Noise Criterion and Noise Rating, respectively) and the acoustic energy parameters Clarity (C_{80}), Definition (D_{50}), Central Time (TS) and Bass Ratio based on Reverberation Time (BR). Subsequently, the obtained results were analyzed and compared with recommended values and national standards in order to verify whether the case study has the necessary conditions to serve its possible multifunctional purpose. The majority of the mentioned parameters were analyzed without and with the operation of the HVAC system.

In the absence of the HVAC system, the average value for TR (500, 1000 and 2000 Hz) was 1,27 seconds, resulting in a BR of 0,9. The NC and NR indices associated with the operation of the ventilation system were 15 and 16 respectively. In regard to the remaining parameters, the average values, without and with the HVAC system on, were as follows: STI of 0,62/0,58; L_{Aeq} of 22/28 dB; C_{80} of 4,7/4,8 dB; D_{50} of 0,63; TS of 60/59 milliseconds and AI of 1,00.

Based on the obtained results, a comparative analysis with other Portuguese venues subjected to similar acoustic studies was conducted. The Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto performs very well in terms of sound insulation regarding the HVAC system, but it proves to be not as suitable for certain events that can welcome, such as some symphonic music shows.

KEYWORDS: Acoustics, Concert Halls, Sound Absorption, Reverberation, STI.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE QUADROS	xv
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS	1
1.2. ESTRUTURA DA TESE	2
2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES	3
2.1. INTRODUÇÃO.....	3
2.1.1. SOM.....	3
2.1.2. OUVIDO HUMANO	3
2.2. PROPRIEDADES DO SOM	4
2.2.1. PROPAGAÇÃO DO SOM NO AR	4
2.2.2. CELERIDADE	5
2.2.3. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA	5
2.2.4. NÍVEIS DE PRESSÃO SONORA	7
2.2.5. FREQUÊNCIA.....	8
2.2.5.1. DEFINIÇÃO.....	8
2.2.5.2. BANDAS DE FREQUÊNCIA	9
2.2.5.3. CURVAS DE PONDERAÇÃO.....	9

2.2.5.4. COMPRIMENTO DE ONDA.....	11
2.2.6. TEMPO	12
2.3. ABSORÇÃO SONORA	12
2.3.1. GENERALIDADES	12
2.3.2. MATERIAIS E SISTEMAS DE ABSORÇÃO SONORA.....	14
2.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	15
2.5. RUÍDO DE FUNDO E INCOMODIDADE.....	17
2.6. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	20
2.6.1. CONCEITOS	20
2.6.2. PARÂMETROS DE MEDIDA.....	21
2.7. ACÚSTICA ARQUITETÓNICA	23
2.7.1. REFLEXÕES	23
2.7.2. ECOS	24
2.7.3. DIFUSÃO	26
2.8. PARÂMETROS ACÚSTICOS ENERGÉTICOS	27
2.8.1. CLARIDADE	27
2.8.2. DEFINIÇÃO	27
2.8.3. TEMPO CENTRAL.....	27
2.8.4. RÁCIO DE BAIXOS.....	27
 3. ACÚSTICA DE SALAS DE ESPETÁCULOS	 29
3.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	29
3.2. SISTEMAS RELEVANTES PARA A ACÚSTICA.....	35
3.2.1. ACÚSTICA VARIÁVEL	35
3.2.1.1. INTRODUÇÃO.....	35
3.2.1.1. VARIAÇÃO NA ABSORÇÃO	36

3.2.1.2. VARIAÇÃO NO VOLUME.....	38
3.2.2. CONCHAS ACÚSTICAS E CANÓPIAS	39
3.3. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS	41
3.3.1. EXIGÊNCIAS PARA A PALAVRA.....	41
3.3.2. EXIGÊNCIAS PARA A MÚSICA.....	42
3.3.3. EXIGÊNCIAS PARA MÚLTIPLOS FINS.....	44
3.4. LEGISLAÇÃO PORTUGUESA	45
4. CASO DE ESTUDO	49
4.1. AUDITÓRIO DO CONSERVATÓRIO DE MÚSICA DO PORTO	49
4.1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	49
4.1.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E ARQUITETÓNICA	51
4.2. METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS	55
4.2.1. PARÂMETROS MEDIDOS	55
4.2.2. EQUIPAMENTO UTILIZADO.....	55
4.2.3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	56
4.2.3.1. RUÍDO DE FUNDO	56
4.2.3.2. STI/TEMPO DE REVERBERAÇÃO/CLARIDADE/DEFINIÇÃO/TEMPO CENTRAL.....	57
5. RESULTADOS.....	59
5.1. RUÍDO DE FUNDO	59
5.2. CURVAS DE INCOMODIDADE.....	65
5.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	67
5.3.1. SALA VAZIA	67
5.3.2. SALA OCUPADA	70
5.4. STI	72

5.5. ÍNDICE DE ARTICULAÇÃO.....	74
5.6. CLARIDADE.....	75
5.7. DEFINIÇÃO.....	78
5.8. TEMPO CENTRAL.....	81
5.9. RÁCIO DE BAIXOS	84
6. ANÁLISE COMPARATIVA COM OUTRAS SALAS.....	85
6.1. INTRODUÇÃO.....	85
6.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	85
6.3. RUÍDO DE FUNDO E CURVAS DE INCOMODIDADE	89
6.4. RASTI/STI	91
7. CONCLUSÃO	95
7.1. CONCLUSÕES	95
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Esquema do ouvido humano [4]	4
Fig. 2.2 - Propagação de uma onda sonora: alternância entre zonas de compressão e rarefação [8].....	5
Fig. 2.3 - Propagação do som no ar (a energia é distribuída ao longo de superfícies esféricas. A intensidade sonora é inversamente proporcional ao quadrado da distância à fonte) [9]	6
Fig. 2.4 - Curvas de igual nível de audibilidade humana [6]	8
Fig. 2.5 - Curvas de igual sensibilidade auditiva (em fone) [9]	10
Fig. 2.6 - Descrição das curvas de ponderação (filtros) A, B, C e D [1]	10
Fig. 2.7 - Comportamento em frequência dos três tipos de materiais e sistemas absorventes [1]	14
Fig. 2.8 - Ondas sonoras diretas e refletidas [9]	16
Fig. 2.9 - Definição do Tempo de Reverberação: valor teórico (esquerda) e valor obtido por extrapolação do declive (direita) [9]	16
Fig. 2.10 - Tempos de reverberação ideais de para bandas de frequência compreendidas entre 500 e 1000 Hz em função do tipo de utilização [1]	17
Fig. 2.11 - Descrição das curvas NC (Noise Criterion) e NR (Noise Rating) [12].....	18
Fig. 2.12 - Contornos da emissão da palavra nos planos horizontal e vertical [9]	21
Fig. 2.13 - Reflectograma de uma sala de espetáculos [13].....	24
Fig. 2.14 - Exemplo de reflectograma com eco [13]	24
Fig. 2.15 - Eco da parede traseira e do teto de um auditório. (a) A parede e o teto devolvem a reflexão de volta para a fonte (enviam os ecos para o palco). (b) Uma ligeira inclinação da parede elimina os ecos indesejados. (c) Um excesso de inclinação da parede envia os ecos para a plateia [13].....	25
Fig. 2.16 - Focalização sonora devido ao efeito de uma superfície côncava [19]	25
Fig. 2.17 - Eco repetido (flutter echo) entre paredes paralelas [13].....	26
Fig. 2.18 - Efeito de difusão numa superfície irregular [13]	26
Fig. 2.19 - Difusores comerciais <i>Quadratic Residue Diffuser</i> (QRD) e <i>Art Diffuser</i> [20], [21].....	26
Fig. 3.1 - Estrutura característica de um teatro grego clássico em planta. Neste caso o Teatro Dionísio, em Atenas, considerado um dos teatros mais importantes da Grécia Antiga [24].....	30
Fig. 3.2 - Propagação do som durante a evolução do teatro grego. Som direto (linha preenchida) e do som refletido (tracejado) dependendo da posição do intérprete: (a) próximo da <i>koilon</i> ; (b) longe da <i>koilon</i> ; (c) próximo da <i>skene</i> ; (d) no <i>proskenion</i> [29]	31
Fig. 3.3 - Representação em planta e em secção das diferenças entre o teatro grego e romano [27].....	32
Fig. 3.4 - Representação axonométrica Teatro Olímpico, Vicenza, Itália [13].....	32
Fig. 3.5 - Planta típica de um teatro barroco [25].....	33

Fig. 3.6 - <i>Bayreuth Festspielhaus</i> , Bayreuth, Alemanha [27].....	34
Fig. 3.7 - Corte e planta do <i>Stadt Casino</i> , Suíça [25]	35
Fig. 3.8 - Painéis móveis. a) posição com absorção mínima. b) posição com absorção máxima [31], [32].....	36
Fig. 3.9 - Painéis giratórios na configuração de 90° [31], [32]	37
Fig. 3.10 - Painéis giratórios na configuração de 180°. a) posição com absorção máxima. b) posição com absorção mínima [31], [32]	37
Fig. 3.11 - Painéis giratórios na configuração de 360° [32]	37
Fig. 3.12 - Variação na absorção sonora na <i>Hong Kong Academy for Performing Arts</i> . Os três arranjos das abas permitem três graus de absorção diferentes. (a) Abas - fechadas, poucas reflexões iniciais, tempo de reverberação longo. (b) Abas - semiabertas, muitas reflexões iniciais, tempo de reverberação médio. (c) Abas - abertas, poucas reflexões iniciais, tempo de reverberação curto [13]	38
Fig. 3.13 - Secção longitudinal do <i>Milton Keynes Theatre</i> , Buckinghamshire, Reino Unido, evidenciando as diferentes alturas do teto [13].....	38
Fig. 3.14 - Secção longitudinal do <i>Bruce Mason Theatre</i> , Auckland, Nova Zelândia, evidenciando a utilização de painéis móveis [13]	39
Fig. 3.15 - <i>Hollywood Bowl</i> , Los Angeles, Califórnia [34]	40
Fig. 3.16 - Representação de canópias como prolongamento das conchas acústicas [17].....	40
Fig. 3.17 - Púlpito com canópia (Igreja de São Sulpício, Paris) [35].....	41
Fig. 3.18 - Configurações populares para salas dedicadas à música nos seus formatos padrão e surround [25]	43
Fig. 4.1 - Localização do Conservatório de Música do Porto [41]	50
Fig. 4.2 - Edifício Novo do Conservatório de Música do Porto [42]	50
Fig. 4.3 - Grande auditório do Conservatório de Música do Porto [42].....	51
Fig. 4.4 - Planta do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto [44]	52
Fig. 4.5 - Corte longitudinal do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto [44]	52
Fig. 4.6 - Painéis de madeira nas paredes circundantes da zona do palco: parede de fundo e lateral, respetivamente [fotos do autor]	53
Fig. 4.7 - Canópias do auditório [fotos do autor]	54
Fig. 4.8 - Cadeiras do auditório [foto do autor].....	54
Fig. 4.9 - Fonte sonora Brüel & Kjaer (<i>Echo Speech Source</i>), modelo 4720; Tripé portátil Brüel & Kjaer, modelo UA0049 e Sonómetro Brüel & Kjaer, modelo 2260 [fotos do autor]	56
Fig. 4.10 - Planta do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto com a localização dos três pontos para a avaliação do ruído de fundo com o sistema AVAC ligado e desligado [adaptado de 44]	57

Fig. 4.11 - Planta do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto com a localização da fonte sonora (FS) e dos três pontos para a avaliação dos parâmetros STI, TR, C_{80} , D_{50} e TS com o sistema AVAC ligado e desligado [adaptado de 44]	58
Fig. 5.1 - Níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), com sistema AVAC desligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/3 de oitava	62
Fig. 5.2 - Níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), com sistema AVAC ligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/3 de oitava	62
Fig. 5.3 - Valores médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) com e sem o sistema AVAC em funcionamento e a diferença entre ambos para bandas de frequência de 1/3 de oitava	63
Fig. 5.4 - Valores médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) com a ponderação do filtro A com e sem o sistema AVAC em funcionamento e a diferença entre ambos para bandas de frequência de 1/3 de oitava	64
Fig. 5.5 - Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo com o sistema AVAC em funcionamento com as curvas NC	65
Fig. 5.6 - Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo com o sistema AVAC em funcionamento com as curvas NR	66
Fig. 5.7 - Resultados do Tempo de Reverberação (TR), em cada ponto de medição, por bandas de frequência de 1/3 de oitava e respetiva média	68
Fig. 5.8 - Resultados do Tempo de Reverberação (TR), em cada ponto de medição, por bandas de frequência de 1/1 de oitava compreendidas num intervalo de 125 a 4000 Hz e respetiva média	69
Fig. 5.9 - Tempo de Reverberação (TR) em condições de sala vazia e 100% ocupada (valor previsto) para bandas de frequência de 1/1 de oitava compreendidas entre os 125 e os 4000 Hz	71
Fig. 5.10 - Resultados do STI, em cada ponto de medição, com e sem o sistema AVAC em funcionamento e diferença entre ambos	73
Fig. 5.11- Resultados da Claridade (C_{80}), com o sistema AVAC desligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava	76
Fig. 5.12 - Resultados da Claridade (C_{80}), com o sistema AVAC ligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava	77
Fig. 5.13 - Valores médios da Claridade (C_{80}), com e sem o sistema AVAC em funcionamento e diferença entre ambos para bandas de frequência de 1/1 de oitava	77
Fig. 5.14 - Resultados da Definição (D_{50}), com o sistema AVAC desligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava	80
Fig. 5.15 - Resultados da Definição (D_{50}), com o sistema AVAC ligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava	80
Fig. 5.16 - Valores médios da Definição (D_{50}), com e sem o sistema AVAC em funcionamento e diferença entre ambos para bandas de frequência de 1/1 de oitava	81
Fig. 5.17 - Resultados do Tempo Central (TS), com o sistema AVAC desligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava	82

Fig. 5.18 - Resultados do Tempo Central (TS), com o sistema AVAC desligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava	83
Fig. 5.19 - Valores médios do Tempo Central (TS) com e sem o sistema AVAC em funcionamento e diferença entre ambos para bandas de frequência de 1/1 de oitava	83
Fig. 6.1 - Valores do Tempo de Reverberação médio de 500 e 1000 Hz em função do volume com linha de tendência linear	87
Fig. 6.2 - Valores do Tempo de Reverberação médio de 500 a 2000 Hz conforme o RRAE em função do volume com linha de tendência linear	89
Fig. 6.3 - Valores do RASTI/STI médio face ao Tempo de Reverberação médio de 500 a 2000 Hz (conforme o RRAE), com linha de tendência logarítmica.....	93
Fig. 6.4 - Valores do RASTI/STI médio face ao Volume, com linha de tendência logarítmica...	93

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Fórmulas de conversão [1]	7
Quadro 2.2 - Valores numéricos (dB) das ponderações da curva A para bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava na gama do audível [3]	11
Quadro 2.3 - Classes de absorção sonora α_w [1]	13
Quadro 2.4 - Valores limite máximos de NC para algumas situações [1].....	19
Quadro 2.5 - Valores limite máximos de NR para algumas situações [13].....	19
Quadro 2.6 - Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes [1]	20
Quadro 2.7 - Método de obtenção do parâmetro AI [1], [14]	22
Quadro 2.8 - Perceção subjetiva para a privacidade e inteligibilidade da palavra em função dos valores de AI [1].....	23
Quadro 2.9 - Relação qualificada dos valores do parâmetro STI [15]	23
Quadro 3.1 - Valores ideais e máximos para certos parâmetros em função do tipo de utilização [1], [13].....	44
Quadro 5.1 - Níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), sem o sistema AVAC ligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/3 de oitava e nível de pressão sonora contínuo equivalente, sem e com a ponderação do filtro A (L_{eq} e L_{Aeq}).....	60
Quadro 5.2 - Níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), com o sistema AVAC ligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/3 de oitava e nível de pressão sonora contínuo equivalente, sem e com a ponderação do filtro A (L_{eq} e L_{Aeq}).....	61
Quadro 5.3 - Análise do cumprimento do pelo RRAE [35]	64
Quadro 5.4 - Valores máximos recomendados para o NC e análise ao seu cumprimento [1]...	66
Quadro 5.5 - Valores máximos recomendados para NR e análise ao seu cumprimento [13], [45]	66
Quadro 5.6 - Resultados do Tempo de Reverberação (T_{30}), em cada ponto de medição, por bandas de frequência de 1/3 de oitava, incluindo os respetivos desvio-padrão e média.....	67
Quadro 5.7 - Resultados do Tempo de Reverberação (T_{30}), em cada ponto de medição, por bandas de frequência de 1/1 de oitava compreendidas num intervalo de 125 a 4000 Hz, incluindo os respetivos desvio-padrão e média	68
Quadro 5.8 - Verificação do cumprimento do RRAE para o Tempo de Reverberação (TR) para espaços com função assente na “oratória”	70
Quadro 5.9 - Parâmetros utilizados para o cálculo do Tempo de Reverberação (TR) com a sala totalmente ocupada.....	70
Quadro 5.10 - Cálculo do novo Tempo de Reverberação (TR) com a sala totalmente ocupada para bandas de frequência de 1/1 de oitava entre os 125 e os 4000 Hz	71
Quadro 5.11 - Comparação entre valores médios do tempo de reverberação médio (500 e 1000 Hz) em condições de sala vazia e ocupada com os valores recomendados em função do tipo de utilização.....	72

Quadro 5.12 - Resultados do STI, em cada ponto de medição, com e sem o sistema AVAC em funcionamento, incluindo os respetivos desvio-padrão e média	72
Quadro 5.13 - Diferença entre os valores médios do STI com e sem o sistema AVAC em funcionamento para cada ponto de medição ($\Delta STI = \text{com} - \text{sem AVAC}$)	73
Quadro 5.14 - Resultados do AI sem o sistema AVAC ligado para bandas de frequência de 1/3 de oitava compreendidas num intervalo de 200 a 5000 Hz	74
Quadro 5.15 - Resultados do AI com o sistema AVAC ligado para bandas de frequência de 1/3 de oitava compreendidas num intervalo de 200 a 5000 Hz	75
Quadro 5.16 - Resultados da Claridade (C_{80}), em cada ponto de medição, sem o sistema AVAC ligado, incluindo os respetivos desvio-padrão e média	75
Quadro 5.17 - Resultados da Claridade (C_{80}), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC ligado, incluindo os respetivos desvio-padrão e média	76
Quadro 5.18 - Diferença entre os valores médios da Claridade (C_{80}) com e sem o sistema AVAC em funcionamento para cada ponto de medição ($\Delta C_{80} = \text{com} - \text{sem AVAC}$)	76
Quadro 5.19 – Comparação entre os valores médios da Claridade (C_{80}) dos 500 e 1000 Hz, com e sem o sistema AVAC em funcionamento, com os valores recomendados em função do tipo de utilização	78
Quadro 5.20 - Resultados da Definição (D_{50}), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC desligado, incluindo os respetivos desvio-padrão e média	79
Quadro 5.21 - Resultados da Definição (D_{50}), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC ligado, incluindo os respetivos desvio-padrão e média	79
Quadro 5.22 - Diferença entre os valores médios da Definição (D_{50}) com e sem o sistema AVAC em funcionamento para cada ponto de medição ($\Delta D_{50} = \text{com} - \text{sem AVAC}$)	79
Quadro 5.23 - Resultados do Tempo Central (TS), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC desligado, incluindo os respetivos desvio-padrão e média	81
Quadro 5.24 - Resultados do Tempo Central (TS), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC ligado, incluindo os respetivos desvio-padrão e média	82
Quadro 5.25 - Diferença entre os valores médios do Tempo Central (TS) com e sem o sistema AVAC em funcionamento para cada ponto de medição ($\Delta TS = \text{com} - \text{sem AVAC}$)	82
Quadro 5.26 - Resultados dos Rádios de Baixos baseados no Tempo de Reverberação (BR) para cada ponto de medição e respetiva média	84
Quadro 6.1 - Valores do Tempo de Reverberação médio para as bandas de frequência de 1/1 de oitava de 500 e 1000 Hz com salas desocupadas e sem AVAC e os respetivos volumes ...	86
Quadro 6.2 - Verificação do cumprimento do RRAE para o Tempo de Reverberação (TR) para espaços com função assente na “oratória” face às diferentes salas de espetáculo consideradas	88
Quadro 6.3 - Valores do nível sonoro contínuo equivalente (L_{Aeq}) com e sem o AVAC, diferença entre ambos e valores das curvas de incomodidade NC e NR associadas ao funcionamento do sistema de ventilação face às diferentes salas de espetáculo consideradas	90

Quadro 6.4 - Valores do RASTI/STI médio com e sem o sistema AVAC em funcionamento, diferença entre ambos e posterior classificação da inteligibilidade da palavra para cada cenário face às diferentes salas de espetáculo consideradas 92

Quadro 7.1 - Resumo dos principais parâmetros acústicos medidos no Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto 97

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α - Coeficiente de absorção sonora

α_w - Coeficiente de absorção sonora média padronizada de um material

λ - Comprimento de onda (m)

θ - Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)

ρ - Massa volúmica (kg/m^3)

A - Absorção sonora equivalente (m^2)

AI - Índice de Articulação

AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado

B - Largura de Banda (Hz)

BR - Rácio de Baixos baseado no Tempo de Reverberação (*Bass Ratio based on Reverberation Time*)

BR_L - Rácio de Baixos baseado na Intensidade Sonora (*Bass Ratio based on Sound Level*)

c - Celeridade (m/s)

CMUSP - Conservatório de Música do Porto

C_{80} - Claridade (dB)

C_{80} [500-1k Hz] - Claridade média nas frequências de 500 e 1000 Hz (dB)

D_{50} - Definição

D_{50} [500-1k Hz] - Definição média nas frequências de 500 e 1000 Hz

EAEM - Ensino Artístico Especializado da Música

EDT - Tempo de Decaimento Curto (*Early Decay Time*) (s)

f - Frequência (Hz)

f_0 - Frequência Central (Hz)

FS - Fonte Sonora

I - Intensidade Sonora (W/m^2)

I_0 - Intensidade Sonora de referência [10^{-12} W/m^2]

ITDG - Tempo de atraso inicial (*initial time delay gap*)

L_{Aeq} - Nível sonoro contínuo equivalente (dB)

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

L_I - Nível de intensidade sonora (dB)

L_N - Nível de pressão sonora estatístico (dB)

L_P - Nível de pressão sonora (dB)

L_W - Nível de potência sonora (dB)

MTF - Função de transferência de modulação (*Modulation Transfer Function*)

NC - *Noise Criterion*

NR - *Noise Rating*

NRC - *Noise Reduction Coefficient*

p - Pressão Sonora (Pa)

p_0 - Pressão Sonora de Referência [2×10^{-5} Pa]

r - Distância (m)

RASTI - *Rapid Speech Transmission Index*

RRAE - Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

S - Superfície real do material (m^2)

SIL - Nível de interferência na conversação (*Speech Interference Level*) (dB)

STI - *Speech Transmission Index*

T - Período (s)

TR - Tempo de Reverberação (s)

TR [500-1k Hz] - Tempo de Reverberação médio nas frequências de 500 e 1000 Hz (s)

TR [500-2k Hz] - Tempo de Reverberação médio nas frequências de 500 a 2000 Hz (s)

TS - Tempo Central (ms)

TS [500-1k Hz] - Tempo Central médio nas frequências de 500 e 1000 Hz (s)

T_{20} - Tempo de Reverberação com decaimento de 20 dB (s)

T_{30} - Tempo de Reverberação com decaimento de 30 dB (s)

V - Volume (m^3)

W - Potência Sonora (W)

W_0 - Potência Sonora de referência [10^{-12} W]

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

A comunicação é uma característica intrínseca à espécie humana desde o primórdio da sua existência, evoluindo e estabelecendo-se nas variações de pressão que se propagam no ar, captadas pelo sistema auditivo, às quais tipicamente se designam por som, o principal meio de comunicação adotado entre as populações.

A evolução da comunicação foi naturalmente acompanhada pela criação e desenvolvimento de espaços próprios para o efeito. No entanto, o desempenho acústico dos mesmos era tipicamente negligenciado ou desprezado na elaboração do projeto, no qual se privilegiava a estética em detrimento da acústica, resultando, por vezes, em soluções inadequadas face ao pretendido.

No sentido de se reter o maior proveito possível do som, as salas de espetáculo, sejam estas dedicadas à realização de espetáculos de música, peças de teatro, congressos, entre outros, devem adequar-se à sua funcionalidade acústica específica. Para tal, é necessário recorrer à caracterização acústica objetiva do espaço em questão de forma a eliminar ruídos indesejados, garantir um ambiente sonoro adequado, assim como proporcionar uma experiência agradável ao espectador. Nos últimos anos observou-se um progresso significativo da intervenção acústica, uma vez que foi crescendo também a consciencialização de que o mais importante em qualquer sala de espetáculos é o som.

Isto posto, o objetivo desta dissertação passa pela caracterização acústica de salas de espetáculo tendo como caso de estudo o auditório do Conservatório de Música do Porto, a fim analisar a qualidade acústica do espaço e verificar se os parâmetros acústicos cumprem com valores regulamentares e/ou desejáveis, complementada por uma análise comparativa com outras salas de espetáculo portuguesas. No historial desta escola estão inscritos professores e alunos que foram importantes figuras da música portuguesa, nomeadamente intérpretes, compositores, diretores de orquestra, investigadores, entre outras funções relevantes da área. O Conservatório revela-se uma instituição de grande interesse dada a sua importante contribuição sobre figuras da cultura e da vida musical da cidade do Porto.

Este estudo é suportado por meio de medições *in situ* e análises incidentes sobre os seguintes parâmetros:

- Nível de pressão sonora e nível sonoro do Ruído de Fundo (L_{eq} e L_{Aeq});
- Tempo de Reverberação (TR);
- *Speech Transmission Index* (STI);
- Índice de Articulação (AI);
- Claridade (C_{80});
- Definição (D_{50});
- Tempo Central (TS);
- Rácio de Baixos baseado no Tempo de Reverberação (BR).

1.2. ESTRUTURA DA TESE

Esta tese desenvolve-se em sete capítulos.

O Capítulo 1, “Introdução”, corresponde a um breve enquadramento do tema, indicam-se os objetivos e apresenta-se a estrutura da tese.

No Capítulo 2, “Conceitos e Definições”, são abordados conceitos teóricos fundamentais para a compreensão da temática do trabalho realizado.

O Capítulo 3, “Acústica de Salas de Espetáculos”, centra-se na contextualização histórica das salas de espetáculos, apresentação de diferentes sistemas relevantes para a acústica e exigências funcionais.

No Capítulo 4, “Caso de Estudo”, inicia-se a abordagem experimental deste trabalho. Apresenta-se o caso de estudo, o auditório do Conservatório de Música do Porto, sendo feito um enquadramento geral, contando ainda com a sua caracterização geométrica e arquitetónica. Adicionalmente, são descritos todos os parâmetros medidos, os equipamentos utilizados e a metodologia de trabalho.

No Capítulo 5, “Resultados”, finaliza-se a abordagem experimental, onde são apresentados os resultados das medições *in situ*, procedendo-se à análise do espaço em questão, acompanhada por uma verificação regulamentar.

O Capítulo 6, “Análise comparativa com outras salas”, consiste na comparação dos resultados obtidos com salas de espetáculo analisadas em outros trabalhos.

No Capítulo 7, “Conclusão”, é feita uma exposição das conclusões derivadas da realização deste trabalho e são propostos estudos futuros, de modo a dar desenvolvimento ou a completar o tema desenvolvido.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. INTRODUÇÃO

2.1.1. SOM

A Acústica é o ramo da Física que se dedica ao estudo e análise das ondas sonoras, podendo ser efetuado segundo três domínios distintos, mas complementares: Pressão, Frequência e Tempo. As ondas sonoras consistem em perturbações de pressão que se propagam em meios elásticos, e as suas inter-relações com o ser humano, podendo estas ser classificadas como som ou ruído. Esta distinção assenta na atribuição de um carácter meramente subjetivo para o mesmo fenómeno físico, uma vez que depende da perceção individual e da forma como são experienciadas pelos diferentes recetores. Essencialmente, enquanto o som pode ser visto como uma sensação auditiva útil ou agradável, o ruído corresponde a uma sensação auditiva imprevisível, indesejável ou até mesmo prejudicial ao bem estar [1], [2], [3].

2.1.2. OUVIDO HUMANO

O ouvido é o órgão que detém a capacidade de captar ondas sonoras provenientes dos diferentes meios, de as transformar em sinais elétricos e transmitir essa informação ao córtex cerebral, possibilitando assim o processo de audição. Deste modo, para que se consiga perceber acústica torna-se imprescindível conhecer e compreender o sistema auditivo, uma vez que sem este os conceitos associados a esta ciência não teriam finalidade prática significativa [1],[5].

O ouvido humano, cuja representação se encontra na Figura 2.1, divide-se em três partes principais [1]:

- Ouvido externo (pavilhão da orelha, canal auditivo e tímpano);
- Ouvido médio (ossículos: martelo, bigorna e estribo);
- Ouvido interno (cóclea).

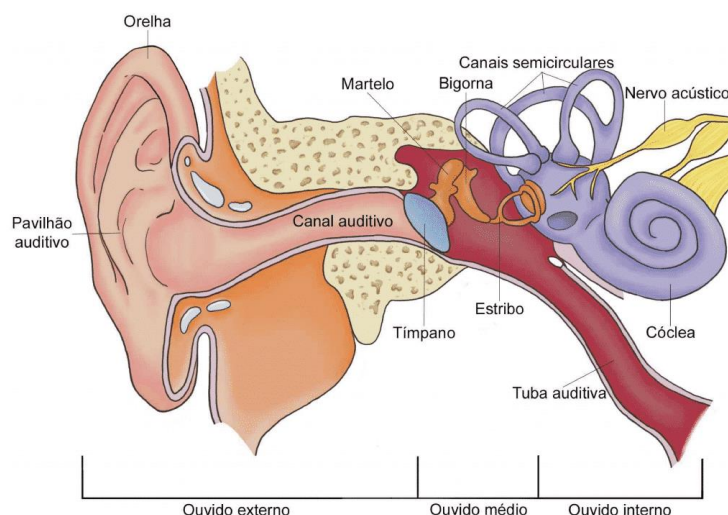


Fig. 2.1 - Esquema do ouvido humano [4]

Numa fase inicial as ondas sonoras são captadas pelo ouvido externo e encaminhadas pelo canal auditivo até ao tímpano, transformando-as em energia mecânica que, por sua vez, é transmitida aos ossículos presentes no ouvido médio e amplificada até ao ouvido interno. Esta última região é constituída pela cóclea, uma espiral cónica preenchida com um líquido denominado por perilinfa. A energia incidente provoca o movimento da perilinfa e, consequentemente, estimula o movimento dos cílios, convertendo as variações de pressão em impulsos elétricos que são transmitidos ao cérebro, resultando em sensações auditivas [1], [5].

2.2. PROPRIEDADES DO SOM

2.2.1. PROPAGAÇÃO DO SOM NO AR

Primeiramente, de forma a assegurar a transmissão acústica, é necessário ter em consideração três fatores fundamentais: uma fonte sonora, um recetor e um meio de propagação. O som resulta de variações de pressão provocadas por uma fonte emissora passíveis de serem identificadas por um recetor, através da sua propagação num determinado meio elástico. De um ponto de vista físico, o som representa uma onda mecânica longitudinal, isto é, uma onda que necessita de um meio elástico para se propagar (mecânica) e que se desloca paralelamente à direção da perturbação (longitudinal) [6].

Para o caso de estudo apresentado, o ar é meio de propagação mais representativo, pelo que, neste trabalho, a análise será limitada a este meio. No ar, o som propaga-se sob a forma de ondas esféricas concêntricas, cuja fonte sonora é o seu centro. Quando a fonte é estimulada, as partículas constituintes do meio chocam umas contra as outras, o que leva a variações da velocidade e, consequentemente, flutuações da pressão da existente. Geram-se, assim, em torno da fonte sonora, sucessivas zonas de compressão e de rarefação, correspondendo estas a zonas de altas e baixas pressões, respetivamente (Fig. 2.2) [1], [7].

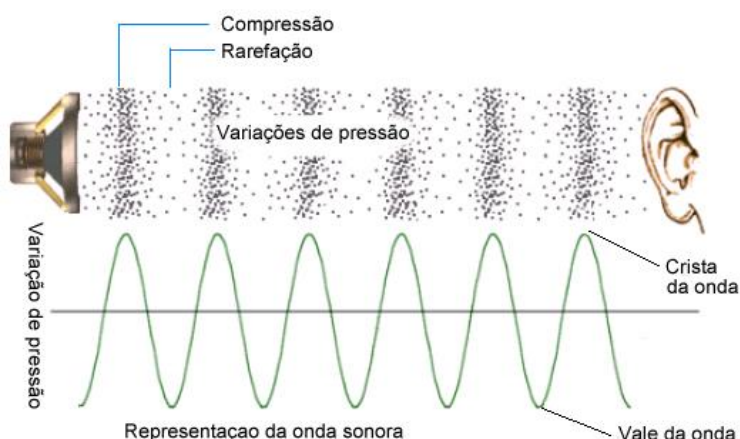


Fig. 2.2 - Propagação de uma onda sonora: alternância entre zonas de compressão e rarefação [8]

Os movimentos de um corpo vibrante dão lugar a perturbações na atmosfera envolvente, que se traduzem por contrações e dilatações de volumes de ar elementares, às quais correspondem, respetivamente, uma alteração da pressão atmosférica (P_{at}) e a um movimento vibratório das partículas de ar. Assim, é de referir que o elemento mais importante a ser medido é a variação de pressão provocada pelas ondas sonoras, devendo-se ter sempre como referência a pressão atmosférica normal (P_{at}), cujo valor é de aproximadamente 101.400 Pa ($\approx 10^5$ Pa) [3], [7].

2.2.2. CELERIDADE

A celeridade corresponde à velocidade de propagação da frente de onda, isto é, a velocidade de propagação das ondas sonoras num determinado meio. Considerando o ar como meio de propagação, esta velocidade varia em função da temperatura de acordo com a expressão (2.1), válida para ar seco e ao nível do mar [1].

$$c = 20,045\sqrt{T} \quad \text{com } T = 273,15 + \theta(^{\circ}\text{C}) \quad (2.1)$$

Sendo:

- c - Celeridade (m/s);
- T - Temperatura em graus kelvin (K);
- θ - Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

2.2.3. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA

Designa-se por intensidade sonora (I) a quantidade média de energia que, numa dada direção, percorre uma unidade de área por unidade de tempo perpendicularmente a essa direção, quantificando-se em W/m^2 . Esta grandeza permite avaliar a componente direcional

do som, passando este a ser representado por uma grandeza vetorial e não escalar como no caso da pressão sonora; pelo que um campo de intensidade sonora se pode exprimir como um campo vetorial. Adicionalmente, é de referir que a intensidade sonora depende da distância à fonte sonora, diminuindo à medida que a distância aumenta [1].

A potência sonora (W) consiste na energia total que atravessa uma esfera fictícia de raio qualquer centrada na fonte sonora por unidade de tempo e quantifica-se em watt (W). Ao contrário de outras grandezas como a pressão e da intensidade, esta grandeza é uma característica da fonte sonora e não do estímulo criado por essa fonte, pelo que não varia com a distância [1].

Estas grandezas relacionam-se juntamente com a pressão sonora (p) através da expressão (2.2) [1].

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

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) $\approx 340 \text{ m/s}$.

Segundo a expressão apresentada, verifica-se que a intensidade sonora (I) é proporcional à potência sonora (W), bem como ao quadrado da pressão sonora (p), e inversamente proporcional ao quadrado da distância (r). A título de exemplo, se a distância aumentar para o dobro irá ocorrer um decaimento da intensidade de I para $I/4$, uma vez que o som passará a abranger uma área quatro vezes superior à anterior (Fig. 2.3). Assim, conclui-se que a intensidade sonora diminui com o aumento da distância, tal como anteriormente mencionado. Do mesmo modo, por cada duplicação da distância à fonte sonora, a pressão sonora diminui para metade, verificando-se um decaimento de 6 dB [9].

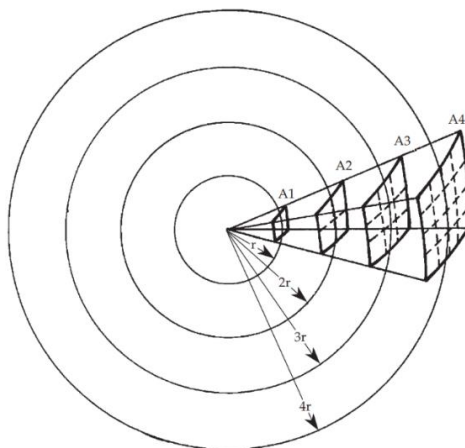


Fig. 2.3 - Propagação do som no ar (a energia é distribuída ao longo de superfícies esféricas. A intensidade sonora é inversamente proporcional ao quadrado da distância à fonte) [9]

2.2.4. NÍVEIS DE PRESSÃO SONORA

A gama de audibilidade humana no domínio da pressão situa-se num intervalo com dimensão de 10^7 Pa. O limite mínimo da variação de pressão audível designa-se por limiar da audição, com valor de aproximadamente 10^{-5} Pa. Em contrapartida, o limiar da dor representa o valor máximo a partir do qual a sensação auditiva passa de ruído a dor, com valor cerca de 10^2 Pa. [1]

A unidade utilizada para avaliar os níveis de pressão sonora é o decibel (dB), em escala logarítmica, correspondendo a 1/10 do bel. A adoção desta unidade sugere pelo facto de o ouvido humano não responder de forma linear aos estímulos, mas sim de um modo quase logarítmico; possibilitando assim a obtenção de valores mais práticos comparativamente com os que se obteriam recorrendo a uma escala linear. [1]

Deste modo, as pressões sonoras podem ser convertidas para níveis de pressão sonora (L_p) conforme a expressão (2.3), que representa o efeito das variações de pressão induzidas pelas ondas sonoras no ouvido humano, tendo como pressão sonora de referência (p_0) o valor 2×10^{-5} Pa [1].

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (2.3)$$

De forma similar, é possível caracterizar um fenómeno sonoro através de outras grandezas medidas na escala decibel, tal como acontece com os níveis de intensidade sonora (L_I) e níveis de potência sonora (L_W) [1]. Para uma melhor compreensão, o quadro 2.1 apresenta-se como um quadro síntese das fórmulas adotadas para a conversão em decibel das diferentes grandezas, tendo em conta os respetivos valores de referência.

Quadro 2.1 - Fórmulas de conversão [1]

Nível de	Valor de Referência	Fórmula de Conversão (dB)
Pressão	$p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa	$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}$
Intensidade	$I_0 = 10^{-12}$ W/m ²	$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$
Potência	$W_0 = 10^{-12}$ W	$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0}$

A adição de níveis, efetuada no caso em que se pretenda conhecer o efeito de um conjunto de duas ou mais fontes sonoras independentes, é realizada seguindo a expressão (2.4) [1].

$$L_{SOMA} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (2.4)$$

2.2.5. FREQUÊNCIA

2.2.5.1. DEFINIÇÃO

A frequência é uma característica fundamental para descrever um sinal sonoro e desempenha um papel crucial na perceção e análise do mesmo, uma vez que grande parte dos sons (ou ruídos) possuem frequências próprias, o que faz com que seja possível identificar fontes sonoras distintas através das diferentes frequências que emitem. Esta grandeza traduz o número de flutuações completas de pressão por unidade de tempo, ou seja, o número de ciclos completos por unidade de tempo; cuja unidade de medida é o hertz (H). O período (T) pode ser entendido como o tempo necessário para que um ciclo seja completo, medido em segundos (s). Esta relação define-se pela expressão (2.5) [1], [9], [10].

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.5)$$

Em Acústica de Edifícios é usual proceder à distinção entre três grandes zonas de frequências [1]:

- Frequências graves: 20 a 355 Hz;
- Frequências médias: 355 a 1.410 Hz;
- Frequências agudas: 1.410 a 20.000 Hz.

A gama de frequências audível ao ouvido humano situa-se no intervalo de 20 a 20 kHz (Fig. 2.4), decrescendo o valor máximo com a idade. Os sons cujas frequências sejam inferiores ou superiores a estes limites designam-se por infrassons e ultrassons, respetivamente [1], [9], [10].

Pode ser também efetuada uma distinção entre sons puros e sons complexos. Quando a energia está associada a uma única frequência estamos perante um som puro. No entanto, grande parte dos sons que ouvimos, tais como a palavra e a música, são sons complexos, resultantes da sobreposição de dois ou mais sons puros. [1], [9], [10].

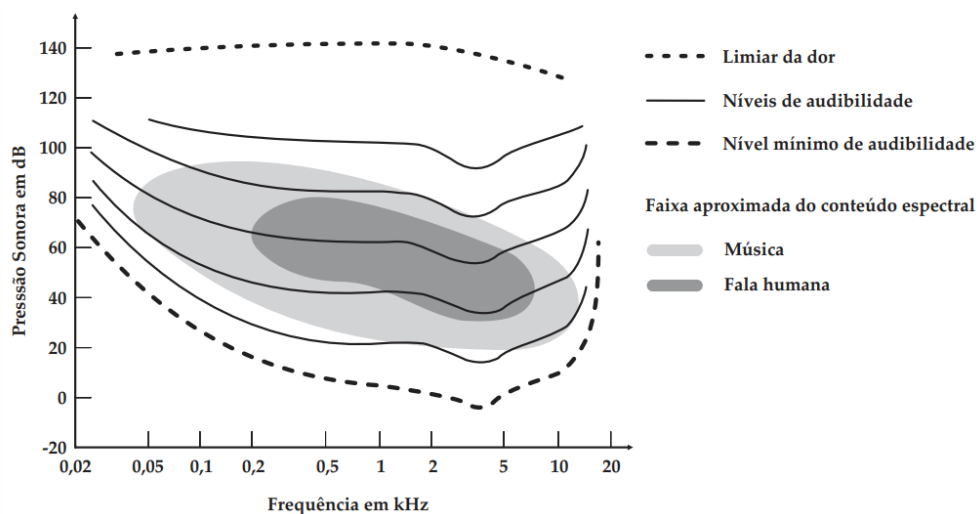


Fig. 2.4 - Curvas de igual nível de audibilidade humana [6]

2.2.5.2. BANDAS DE FREQUÊNCIA

Dado que a maioria dos sons (ou ruídos) contêm energia sobre uma ampla gama de frequências, realizar uma análise individual de cada frequência seria extremamente exaustivo e desnecessário para entender as características gerais do som. Isto posto, no sentido de efetuar uma análise mais prática e eficiente, procede-se à divisão do espectro audível em grupos de frequências denominados “bandas de frequência”, correspondendo estes a intervalos de frequência de certa dimensão normalizada. Define-se por “banda” um agrupamento com um limite inferior (f_1) e um limite superior (f_2); sendo valor médio, a frequência central (f_0), obtido de acordo com a expressão (2.6) [1].

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \quad (2.6)$$

A largura de banda (B) corresponde ao tamanho do intervalo e é obtida pela diferença entre o limite superior e o limite inferior, conforme a expressão (2.7). Existem bandas de frequências com diversas larguras, no entanto em Acústica de Edifícios são somente utilizadas as bandas de 1/1 oitava e 1/3 oitava [1].

$$B = f_2 - f_1 = \frac{2^k - 1}{\sqrt{2^k}} f_0 \quad (2.7)$$

Sendo:

- Bandas de 1/1 oitava: $K = 1$;
- Bandas de 1/3 oitava: $K = 1/3$.

2.2.5.3. CURVAS DE PONDERAÇÃO

Os instrumentos de medição acústica registam as pressões sonoras com total precisão independentemente da frequência emitida pelo som. Contudo, o mesmo não acontece com o ouvido humano. Apesar de possuir a capacidade de detetar sons com frequências numa escala muito extensa, a sua sensibilidade é variável em frequência, o que faz com que não sinta todas as frequências da mesma forma. Para as mesmas intensidades sonoras, o ouvido é mais sensível para frequências situadas entre os 3000 e os 3500 Hz e bastante menos sensível para frequências inferiores a 125 Hz. Assim, verifica-se que a perceção da intensidade sonora varia conforme a frequência e não corresponde à variação real da intensidade sonora em determinado local [1].

Deste modo, a natureza subjetiva do aparelho auditivo é ilustrada por um diagrama de curvas de igual perceção subjetiva da intensidade sonora, expressas em *fone*. Na Fig. 2.5 verifica-se um elevado encurvamento nas baixas frequências que evidencia a profunda perda de sensibilidade do ouvido humano para essas frequências [1].

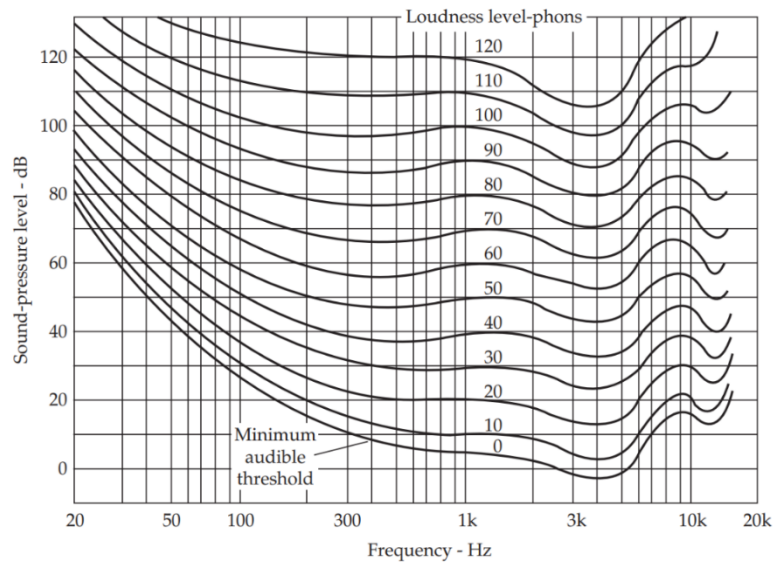


Fig. 2.5 - Curvas de igual sensibilidade auditiva (em fone) [9]

Dado o exposto, torna-se necessário proceder à correção da sensibilidade dos equipamentos de medição através da introdução de filtros eletrónicos a fim de se assemelhar à do ouvido humano. Como consequência dessa introdução obtêm-se as curvas de ponderação - curvas que caracterizam as correções efetuadas em função das frequências do som captado, designadas por curvas ou filtros A, B, C e D [1], [9].

O filtro A é o mais usado em Acústica de Edifícios, tendo sido inicialmente pensado para aproximar ruídos de fraca intensidade à resposta auditiva humana. Os filtros B e C, análogos ao filtro A, foram estabelecidos para ruídos de maior intensidade, tendo o primeiro caído em desuso. Por último, o filtro D apresenta um carácter especial, uma vez que é utilizado apenas com ruídos de aviões. Na Fig. 2.6 encontram-se representadas as curvas de ponderação (filtros) mencionadas [1], [9].

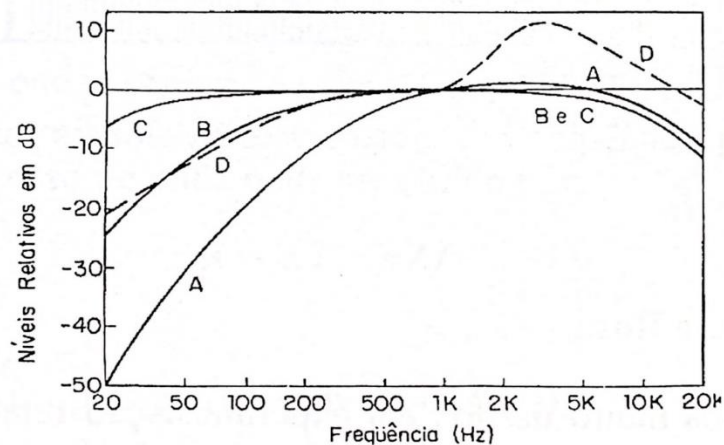


Fig. 2.6 - Descrição das curvas de ponderação (filtros) A, B, C e D [1]

O nível sonoro em dB(A) é um valor global e representa, em valor único, a energia acústica de um ruído (ou som) filtrado pela curva de ponderação do tipo A. Para determinar o nível

sonoro em dB(A), adicionam-se aritmeticamente os valores corretivos aos níveis de pressão sonora em dB, conforme a frequência, presentes no quadro 2.2, seguindo-se da soma logarítmica a cada um dos valores finais obtidos.

Quadro 2.2 - Valores numéricos (dB) das ponderações da curva A para bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava na gama do audível [3]

Banda de frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 oitava	Ponderação A para 1/1 oitava	Banda de frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 oitava	Ponderação A para 1/1 oitava
12,5	-63,4	-57	800	-0,8	0
16	-56,7		1.000	0	
20	50,5		1.250	0,6	
25	-44,7	-40	1.600	1,0	+1
31,5	-39,4		2.000	1,2	
40	-34,6		2.500	1,3	
50	-30,2	-26	3.150	1,2	+1
63	-26,2		4.000	1,0	
80	-22,5		5.000	0,5	
100	-19,1	-15,5	6.300	-0,1	-1
125	-16,1		8.000	-1,1	
160	-13,4		10.000	2,5	
200	-10,9	-8,5	12.500	-4,3	-7
250	-8,6		16.000	-6,6	
315	-6,6		20.000	-9,3	
400	-4,8	-3			
500	-3,2				
630	-1,9				

2.2.5.4. COMPRIMENTO DE ONDA

O comprimento de onda (λ) é uma das principais características associadas a uma onda sonora e define-se como a distância entre dois pontos idênticos sucessivos de uma onda periódica. O seu valor exprime-se em metros (m) e pode ser obtido segundo a expressão (2.8) [1].

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (2.8)$$

Onde:

- λ - Comprimento de onda (m);
- c - Celeridade (m/s);
- T - Período (s);
- f - Frequência (Hz).

2.2.6. TEMPO

O último domínio de análise a abordar para descrever um sinal sonoro passa pela duração do mesmo. Existem ruídos praticamente instantâneos e outros com duração quase infinita, aos quais estão associados intervalos de tempo caracterizados por variações de pressão muito amplas, oscilando entre valores mínimos e máximos. Posto isto, torna-se necessário recorrer a descritores estatísticos e/ou energéticos que permitam avaliar, para um dado intervalo de tempo, um episódio acústico segundo um único valor. [1]

Os dois parâmetros mais usados no domínio do tempo para a medição do ruído são:

- L_{eq} – Nível de pressão sonora contínua equivalente;
- L_N – Níveis de pressão sonora estatísticos (L_{50} , L_{95} , etc).

O nível de pressão sonora contínuo equivalente (L_{eq}) é um parâmetro energético que determina o valor de pressão que se iria obter no caso de a fonte sonora produzir energia constante num dado intervalo de tempo. Por outras palavras, este parâmetro consiste na média da variação da pressão sonora num intervalo de tempo de medição [1].

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \right] \quad (2.9)$$

Sendo:

- T - Intervalo de tempo de medição;
- $p(t)$ - Pressão sonora instantânea (Pa);
- p_0 - Pressão sonora de referência (2×10^{-5} Pa).

Define-se por nível de pressão sonora estatístico (L_N) o valor do nível que é excedido em N% do intervalo de tempo de medição. No caso do valor L_{50} , este corresponde à mediana do intervalo de tempo, não devendo ser confundido com o L_{eq} (média) [1].

2.3. ABSORÇÃO SONORA

2.3.1. GENERALIDADES

Em Acústica de Edifícios existem duas perspetivas de análise distintas, nomeadamente a correção acústica e o isolamento sonoro, cuja seleção depende da natureza do espaço. A primeira refere-se a uma correção de um determinado compartimento para o som nele emitido, estando associada a espaços como salas de aula, auditórios e cinemas, nos quais o principal objetivo é garantir um desempenho acústico específico, adequado ao seu uso ou finalidade pretendida. Por outro lado, a segunda perspetiva destina-se a tratar compartimentos para sons de/para zonas adjacentes, relacionando-se com espaços como discotecas, nos quais o som/ruído aí produzido não pode ser audível nos locais vizinhos [1].

A absorção sonora refere-se à capacidade de um material ou superfície de transformarem parte da energia sobre eles incidente em qualquer outra modalidade de energia, geralmente energia térmica, sendo a restante parte refletida no meio. O coeficiente de absorção sonora

(α) quantifica um material quanto à sua absorção, exprimindo a razão entre a quantidade de energia sonora por este absorvida e a quantidade de energia sobre ele incidente (2.10).

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.10)$$

Os valores deste coeficiente variam entre 0 e 1. A título de exemplo, um material que possua um α de 0,20 absorve 20% da energia que sobre ele incide. Deste modo, quanto maior o valor do coeficiente de absorção sonora, mais absorvente é o material. Os materiais ditos absorventes apresentam valores de α superiores a 0,5 sendo, portanto, capazes de absorver pelo menos 50% da energia incidente. Em contrapartida, um material com baixa capacidade absorção designa-se por refletor. Importa ainda referir que, para além das características do material ou superfície, o valor do coeficiente de absorção sonora depende também da frequência e do ângulo de incidência com que o som é emitido [1].

A absorção sonora dos materiais pode ser caracterizada recorrendo a outros parâmetros, tais como o NRC (*noise reduction coefficient*). De acordo com a norma ASTM C423 [1], este parâmetro define-se como a média aritmética dos valores de α nas bandas de frequência de 1/1 oitava entre os 250 e os 2000 Hz (expressão (2.11)), apresentando-se com arredondamento para o múltiplo mais próximo de 0,05.

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad (2.11)$$

Um outro parâmetro admissível corresponde ao α_w , cujo valor, segundo a norma NP EN ISO 11654 [1], é obtido por ajuste ponderado de uma de referência usando bandas de frequência de 1/1 oitava entre os 250 aos 4000 Hz. Traça-se a curva dos valores de α por banda e determina-se a soma dos desvios positivos entre uma curva de referência móvel e os valores reais. O valor de α_w é o valor determinado para os 500 Hz na curva ajustada de forma que a soma dos desvios positivos seja mais maximizada sem ultrapassar os 0,10 (em múltiplos de 0,05). A norma define ainda classes de absorção sonora, presentes no quadro 2.3 [1].

Quadro 2.3 - Classes de absorção sonora α_w [1]

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

Existem dois métodos normalizados para determinar o coeficiente de absorção sonora:

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

O princípio do **tubo de ondas estacionárias** consiste na propagação de ondas sonoras através de um tubo. A um longo tubo metálico com 10 cm de diâmetro, coloca-se numa das extremidades uma amostra circular com 5 cm de raio do material em estudo, enquanto na extremidade oposta é colocado um altifalante com um orifício por onde passa uma vareta metálica ligada a um microfone que desliza sobre rodas num recipiente. Ao ligar o altifalante, a sobreposição das ondas sonoras por este emitidas com as ondas refletidas na amostra em estudo resulta na propagação de ondas estacionárias no interior do tubo, sendo estas posteriormente registadas pelo microfone. É a forma das ondas estacionárias que dá a informação necessária para determinar a absorção sonora do material.

Este método tem a vantagem de apresentar exigências modestas ao nível dos equipamentos de apoio e de requer apenas uma pequena amostra, no entanto o coeficiente de absorção sonora obtido por este método é exato unicamente para a incidência perpendicular das ondas sonoras [1], [9].

A **câmara reverberante** corresponde a uma sala de grandes dimensões com superfícies (paredes, pavimento e teto) altamente refletoras (α quase nulo), cujo tempo de reverberação é bastante longo, especialmente nas baixas frequências. Este método é mais eficaz do que o método anterior, uma vez que na câmara reverberante o som incide sobre a amostra em todas as direções, sendo por isso mais representativo da realidade. O valor de α do material em estudo é obtido para cada banda de frequência, com auxílio da fórmula de Sabine, pela diferença entre o tempo de reverberação com a sala vazia e o tempo de reverberação com amostra (10 a 12 m²) na sala [1], [9].

2.3.2. MATERIAIS E SISTEMAS DE ABSORÇÃO SONORA

Os materiais e sistemas absorventes sonoros podem agrupar-se em três categorias em função das suas propriedades básicas, diferenciando-se igualmente pela sua forma de atuação em gamas de frequências distintas (Fig. 2.7) [3]:

- Porosos e fibrosos - mais eficientes nas altas frequências;
- Ressonadores - mais eficientes nas médias frequências;
- Membranas - mais eficientes nas baixas frequências.

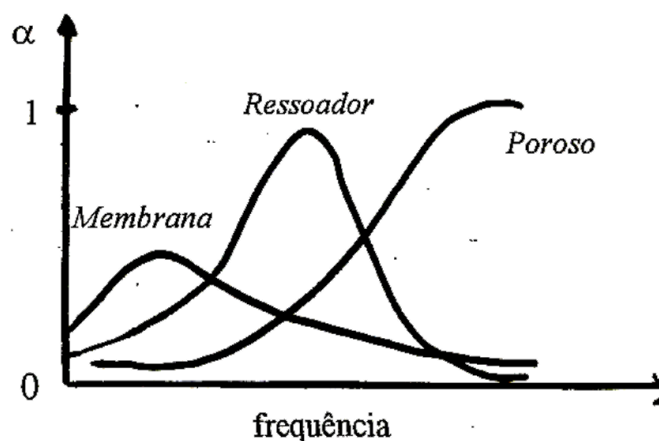


Fig. 2.7 - Comportamento em frequência dos três tipos de materiais e sistemas absorventes [1]

Os materiais **porosos e fibrosos** caracterizam-se por possuírem parte do seu volume preenchido por material sólido, enquanto a restante parte é composta por poros e interstícios. Quando uma onda sonora incide sobre este tipo de materiais, parte da sua energia fica submetida ao movimento das fibras, gerando fricção e, conseqüentemente, a energia sonora transforma-se em calor. A eficácia destes materiais depende essencialmente da sua densidade e espessura, sendo que um bom material absorvente será aquele que contiver um espaçamento entre as fibras que conduza a consideráveis perdas de energia.

Em função das suas características físicas, os materiais porosos e fibrosos podem-se agrupar em [1]:

- Tecidos e alcatifas;
- Massas porosas para projeção;
- Aglomerados de fibras de madeira;
- Fibras minerais (mantas e painéis);
- Materiais plásticos (poliuretano expandido, polistireno expandido e espumas flexíveis de poliuretano);
- Aglomerados de cortiça (negro e composto).

A segunda categoria diz respeito aos **ressoadores**, podendo estes ser isolados ou agrupados. Os ressoadores isolados, também conhecidos como ressoadores de cavidade ou ressoadores de Helmholtz, são sistemas compostos por uma cavidade de paredes rígidas com uma única abertura estreita (gargalo), cuja forma é normalmente assemelhada a uma garrafa vazia. Quando o som incide sobre o gargalo ocorre um movimento do ar entre o interior e o exterior do sistema, fazendo com o ar existente no interior do gargalo entre em ressonância, ocorrendo a transformação de energia sonora em energia mecânica. Em edifícios correntes, a solução normalmente adotada corresponde a um sistema de ressoadores agrupados, como é o caso de painéis perfurados metálicos ou de madeira para tetos falsos [1].

Por último, as **membranas**, também conhecidas como membranas ressonantes ou painéis vibrantes, são sistemas constituídos por painéis de pequena espessura, mas com grande área. Estes sistemas absorvem a energia sonora através da vibração de toda a sua estrutura e pelas perdas de calor devido à fricção das suas fibras quando o material entra em flexão [1].

2.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

As ondas sonoras que se criam num ambiente fechado onde existe uma fonte sonora em funcionamento podem ser de origem direta ou refletida. As ondas diretas atingem o recetor após um percurso em linha reta desde a fonte sonora sem sofrerem qualquer alteração. No caso das ondas refletidas, estas atingem o recetor após múltiplas reflexões sobre as superfícies da envolvente, assim como sobre elementos/objetos dispostos no interior de um determinado espaço (Fig. 2.8). À medida que se propagam, as ondas terão uma intensidade cada vez menor em consequência de uma dissipação de energia sonora cada vez maior, não só pelas sucessivas absorções que sofrem em cada reflexão, mas também pelo efeito da absorção do ar.

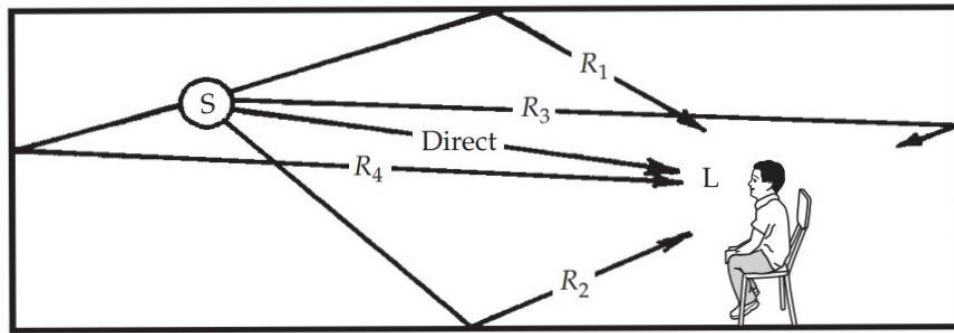


Fig. 2.8 - Ondas sonoras diretas e refletidas [9]

Denomina-se por tempo de reverberação (TR) o intervalo de tempo, medido em segundos, para que uma onda sonora se dissipe por completo após múltiplas reflexões em ambiente fechado. De um ponto de vista físico, define-se como o intervalo de tempo necessário para que ocorra um decaimento do nível de pressão sonora de 60 dB a partir do momento em que a fonte sonora interrompe a sua emissão; ou, de um ponto de vista energético, o tempo necessário para que a pressão sonora diminua para 1 milionésimo ($10 \log 1.000.000 = 60$ dB), muitas vezes escrito como T_{60} . Neste sentido, é fundamental que o ruído de fundo existente num certo espaço assuma um valor relativamente baixo de forma que não se sobreponha ao som emitido. Devido ao facto de ser difícil obter tais condições, o mais habitual é tentar obter o valor do tempo de reverberação por extrapolação a partir do decaimento de 20 ou 30 dB, designando-se nestes casos por T_{20} ou T_{30} , respetivamente (Fig. 2.9) [1], [7], [9].

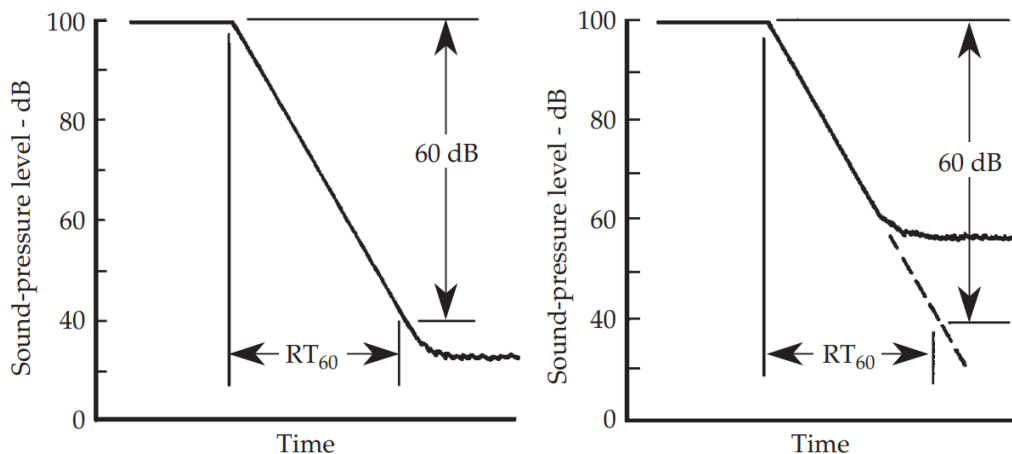


Fig. 2.9 - Definição do Tempo de Reverberação: valor teórico (esquerda) e valor obtido por extrapolação do declive (direita) [9]

O primeiro modelo de cálculo surgiu em 1898 após um estudo conduzido por Wallace Clement Sabine que visava melhorar as condições acústicas do *Fogg Museum*, assim como de outros edifícios que integravam a Universidade de Harvard. Sabine foi o responsável pelo conceito de tempo de reverberação de um espaço. Aquela que viria a ser conhecida como a *Fórmula de Sabine* estabelece a relação entre a absorção sonora, o volume do espaço e o tempo de reverberação (2.12) [1], [10].

$$TR = \frac{0,16 \cdot V}{A} \quad (2.12)$$

Com:

- TR - Tempo de reverberação (s);
- V - Volume do espaço (m^3);
- A - Absorção sonora equivalente (m^2),

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i \quad (2.13)$$
- α - Coeficiente de absorção sonora do material;
- S - Superfície real do material (m^2).

O tempo de reverberação apresenta-se assim como um fator de elevada importância na caracterização acústica de um ambiente fechado, possuindo um duplo e antagónico efeito: pode-se apresentar como um efeito favorável, uma vez que aumenta o nível sonoro, como também pode ser prejudicial caso o som refletido se sobrepuser. Na Fig. 2.10 apresentam-se os valores do tempo de reverberação aconselhados em função do tipo de utilização para bandas de frequência compreendidas entre 500 e 1000 Hz.

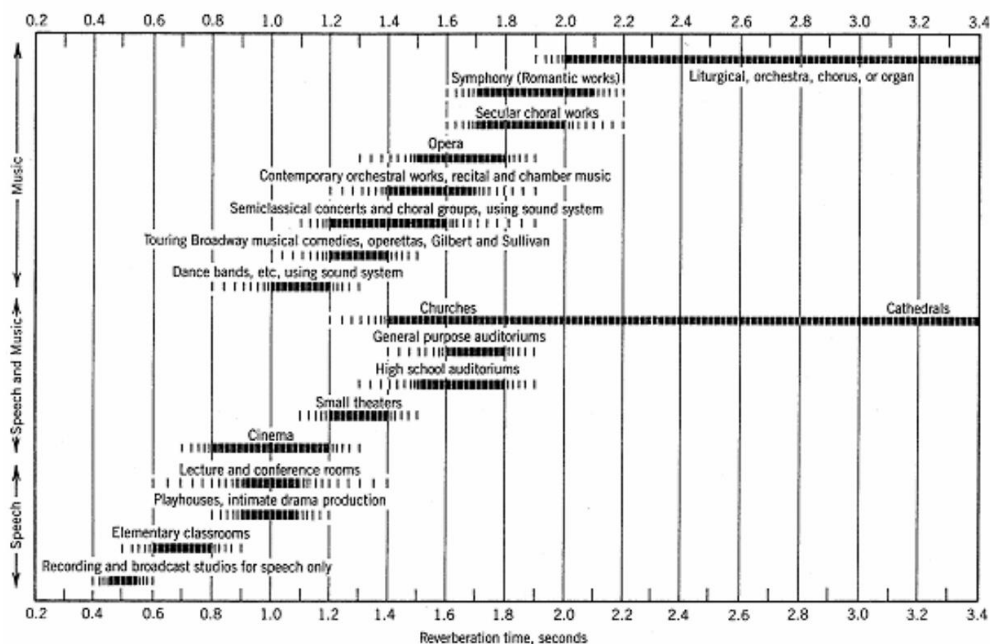


Fig. 2.10 - Tempos de reverberação ideais de para bandas de frequência compreendidas entre 500 e 1000 Hz em função do tipo de utilização [1]

2.5. RUÍDO DE FUNDO E INCOMODIDADE

Em Acústica de Edifícios, o ruído de fundo corresponde ao nível de ruído ambiente ou sons indesejados que persistem num local provenientes de fontes sonoras não específicas. Deste modo, o ruído de fundo pode estar associado a fontes sonoras externas a determinado espaço, tais como tráfego rodoviário e aéreo, bem como a fontes internas, por exemplo canalizações, instalações elétricas, elevadores e sistemas de aquecimento, ventilação

mecânica e ar condicionado (AVAC), ou até mesmo devido à atividade humana inerente [1].

Verifica-se, então, a necessidade de considerar este fator numa caracterização acústica, uma vez que é um elemento que pode influenciar significativamente a qualidade acústica de um espaço, em especial quando se trata de salas destinadas à palavra ou a momentos musicais, nas quais é considerado ruído de fundo tudo o que não é produzido pelos artistas. Neste sentido, torna-se imprescindível manter o controlo sob a incomodidade proveniente do ruído de fundo, sendo este um aspeto fundamental a considerar em projetos acústicos para que seja possível assegurar boas condições de clareza e inteligibilidade, proporcionar uma experiência agradável aos espectadores e garantir que o espaço servia o seu propósito.

A avaliação da incomodidade de um espaço interior face ao ruído de fundo por ser avaliada por meio de “curvas de incomodidade”, cujo procedimento se baseia na medição dos níveis de pressão sonora nos locais mais ruidosos de cada sala, preferencialmente à altura média dos ouvidos de um espectador. A utilização destas curvas destina-se à caracterização de ruídos de fundo estáveis e contínuos associados aos equipamentos integrantes do espaço, destacando-se o sistema AVAC; pelo que se devem excluir os ruídos provenientes da atividade dos ocupantes do local [1].

Na Fig. 2.11 encontram-se respetivamente representadas as curvas NC e NR. Nos quadros 2.4 e 2.5 observam-se os valores máximos recomendados para estes parâmetros face ao tipo de espaço.

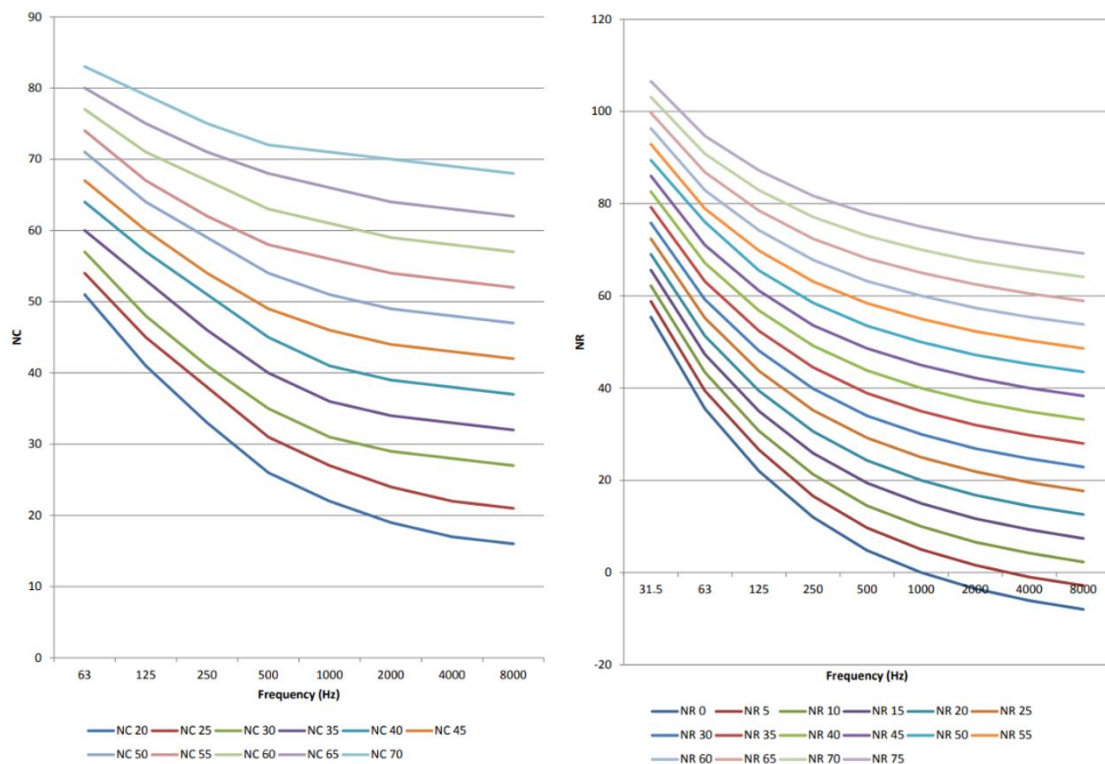


Fig. 2.11 - Descrição das curvas NC (Noise Criterion) e NR (Noise Rating) [12]

Em 1957, nos Estados Unidos da América, Leo Beranek desenvolveu a curva NC (*Noise Criterion*), definida pelos seus níveis de pressão sonora para oito bandas de frequência 1/1 oitava para um intervalo entre os 63 e os 8000 Hz. Em 1962, Kosten e Van Os estabeleceram um novo conjunto de curvas, as curvas NR (*Noise Rating*), bastante idênticas às NC, abrangendo as bandas de frequências de 32 a 8000 Hz, sendo estas as mais utilizadas na Europa [1].

A determinação das curvas NC e NR segue o “método da tangente”. Para um dado espectro sonoro, os valores do ruído de fundo são sobrepostos a um gráfico que contém as curvas NC (ou NR dependendo do parâmetro a calcular). O valor medido que seja máximo no gráfico corresponde ao valor NC (ou NR) do parâmetro [11].

Quadro 2.4 - Valores limite máximos de NC para algumas situações [1]

Tipo de espaço	Valor limite máximo de NC
Salas de concerto, salas de ópera, estúdios de gravação, grandes auditórios, grandes igrejas	< 20
Pequenos auditórios, teatros, salas de música, grandes salas de reuniões, salas de teleconferência, salas audiovisuais, grandes salas de conferências, pequenas igrejas, tribunais	[20 - 30]
Hospitais, residências, apartamentos, hotéis	[25 - 35]
Escritórios, pequenas salas de conferência, salas de aula, livrarias	[30 - 35]
Grandes escritórios, receções, lojas, cafés, restaurantes, ginásios	[35 - 40]
Lobbies, laboratórios, salas de engenharia, áreas de secretaria, lojas de manutenção	[40 - 45]
Cozinhas, lavandarias, lojas industriais, salas de computador	[45 - 55]

Quadro 2.5 - Valores limite máximos de NR para algumas situações [13]

Tipo de espaço	Valor limite máximo de NR
Grandes salas de concerto	15
Casas de Ópera e Teatros de drama	20
Auditórios Pequenos (menos de 500 lugares)	25

2.6. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

2.6.1. CONCEITOS

A inteligibilidade da palavra refere-se à capacidade de compreender e distinguir as palavras aquando de um determinado evento, isto é, indica o quão perceptível é a comunicação num espaço, sendo a principal prioridade na conceção de qualquer sala destinada à transmissão da palavra.

Este critério é influenciado pelo ruído de fundo e pelo tempo de reverberação do local. Por um lado, tal como anteriormente mencionado, elevados níveis de pressão sonora associados ao ruído de fundo podem comprometer a funcionalidade do espaço e prejudicar a experiência do espectador ao sobrepor-se aos sons que se desejam ouvir. Por outro lado, um tempo de reverberação excessivo pode levar à redução da inteligibilidade da palavra, devido ao facto do som das consoantes poder ser vencido pelo “rasto sonoro” das vogais imediatamente antecedentes, o que fará com que o expectador tenha de fazer um esforço de atenção adicional para entender a mensagem transmitida [1], [7].

A variabilidade da emissão da voz pode ser analisada mediante quatro domínios:

- **Frequência** - Os sons utilizados nas palavras apresentam uma gama de frequências muito vasta que compreende valores entre os 150 e os 7000 Hz, estando as vogais associadas às baixas frequências e as consoantes às altas frequências;
- **Intensidade** - O nível de pressão sonora associado às vogais é cerca de 21 a 28 dB superior ao das consoantes;
- **Duração** - Em média, as vogais são emitidas com uma duração de 90 milissegundos, enquanto as consoantes apresentam uma duração consideravelmente mais curta, na ordem dos 20 milissegundos;
- **Direcionalidade** - A voz humana emite ondas sonoras preferencialmente para o orador, apresentando variabilidade direcional em função da frequência. As baixas frequências (vogais) não apresentam grande variabilidade em relação à forma como são emitidas, contudo as altas frequências (consoantes) perdem quase 25 dB com a direcção de escuta (Fig. 2.12).

Em resumo, o quadro 2.6 apresenta a variabilidade da emissão da voz diferenciado as vogais das consoantes.

Quadro 2.6 - Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes [1]

Tipo	Frequência	Intensidade	Duração	Direcionalidade
Vogais	Baixas (150 - 300 Hz)	Elevado	≈ 90 ms	-5 dB por -180°
Consoantes	Altas (3500 - 7000 Hz)	Baixo	≈ 20 ms	-20 dB por -180°

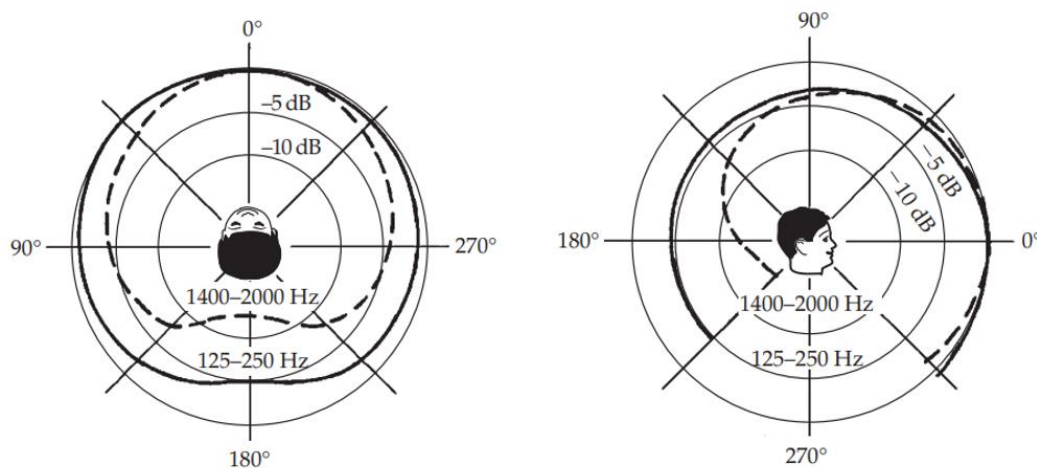


Fig. 2.12 - Contornos da emissão da palavra nos planos horizontal e vertical [9]

2.6.2. PARÂMETROS DE MEDIDA

Existem diversos parâmetros para avaliar a inteligibilidade da palavra que se podem distinguir em dois grupos principais: objetivos e subjetivos. Os métodos subjetivos envolvem a leitura de frases ou palavras para uma audiência que as escreve e quanto maior o número de palavras reconhecidas pelo ouvinte, maior será a inteligibilidade do local. Por outro lado, os objetivos são conduzidos por aparelhos, pelo que dispensam a intervenção subjetiva humana. Entre os parâmetros objetivos, destacam-se:

- AI – Índice de Articulação (*Articulation Index*): este parâmetro é obtido a partir da diferença entre o nível de conversão de referência (nc) e o ruído de fundo (rf) do local, seguidamente ponderada pela importância relativa de cada banda de frequência (p) de 1/1 de oitava entre 200 e 5000 Hz. Realiza-se o somatório dos resultados obtidos e divide-se por 10.000, resultando assim no valor de AI (quadro 2.7) [14]. Segundo o quadro 2.8, o valor deste índice pode ser classificado de forma subjetiva quanto aos seus graus de privacidade e inteligibilidade [1];
- SIL – Nível de interferência na conversação (*Speech Interference Level*): define-se como a média aritmética dos níveis de pressão sonora dos ruídos de fundo para cada banda de frequências de 1/1 de oitava entre os 500 e os 2000 Hz [1];
- STI – *Speech Transmission Index*: este parâmetro parte do princípio de que a palavra é um sinal sonoro modelado em amplitude, o qual, para ser inteligível, deverá ser entendido com o mínimo de deformação possível.

Devido ao facto de qualquer impulso pode ser expresso sob uma relação sinal-ruído, o STI utiliza uma função de transferência de modulação (MTF – *Modulation Transfer Function*) para caracterizar a inteligibilidade. Esta função é calculada a partir de um sinal com conteúdo espectral idêntico ao da palavra, modulado em amplitude por um sinal sinusoidal de frequência f . Deste modo, define-se a função da modulação $m(f)$ como [7]:

$$m(f) = \frac{m_o(f)}{m_i(f)} \quad \text{com } 0 \leq m(f) \leq 1 \quad (2.14)$$

Sendo:

- m_i : fator de modulação do sinal emitido;
- m_o : fator de modulação do sinal recebido.

O teste é realizado com um altifalante no local do orador e um microfone na posição do ouvinte, sendo a redução da modulação do sinal detetada comparando o sinal transmitido e recebido. Os resultados obtidos situam-se entre 0 e 1, correspondendo estes valores a uma inteligibilidade nula e ótima, respetivamente (Quadro 2.7). No cálculo do STI, a MTF é avaliada em sete bandas de 1/1 de oitava, abrangendo frequências de 125 a 8000 Hz, com 14 frequências de modulação em bandas de 1/3 de oitava, entre 0,63 e 12,5 Hz. No fim, são obtidos 98 fatores de redução da modulação. Este método requer uma grande quantidade de medições para cada situação, pelo que a sua complexidade assume-se como a sua maior desvantagem [1], [15].

Dado o exposto, surgiu a necessidade de desenvolver um método simplificado para o cálculo deste parâmetro, designado por RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*). Para o cálculo do RASTI são apenas consideradas as bandas de frequência de 500 e 2000 Hz, com 4 e 5 frequências de modulação, respetivamente. Por fim, é obtido um único valor resultante da média dos nove valores obtidos. É essencial que o ruído de fundo e a reverberação da sala não variem significativamente com a frequência, dado que este método conta apenas com duas bandas de frequência [15], [16].

Quadro 2.7 - Método de obtenção do parâmetro AI [1], [14]

Frequência (Hz)	Nível de conversação (nc)	Peso (p)	Ruído de fundo (rf) em dB	$nc-rf$ (máx. 30)	$(nc-rf)*p$
200	67	4			
250	68	10			
315	69	10			
400	70	14			
500	68	14			
630	66	20			
800	65	20			
1000	64	24			
1250	62	30			
1600	60	37			
2000	59	37			
2500	57	34			
3150	55	34			
4000	53	24			
5000	51	20			
				$\Sigma =$	
				$AI = \Sigma/10000 =$	

Quadro 2.8 - Percepção subjetiva para a privacidade e inteligibilidade da palavra em função dos valores de AI [1]

AI (Índice de Articulação)	Grau de Privacidade	Grau de Inteligibilidade
< 0,05	Confidencial	Nula
[0,05 - 0,20[	Normal privacidade	Muito fraca
[0,20 - 0,35[	Marginal	Fraca
[0,35 - 0,40[	Pobre	Sofrível
[0,40 - 0,65[	Em geral, sem privacidade	Boa
$\geq 0,65$	Privacidade totalmente inexistente	Excelente comunicação

Quadro 2.9 - Relação qualificada dos valores do parâmetro STI [15]

STI	Inteligibilidade da palavra
[0,00 – 0,30[	Má
[0,30 – 0,45[	Pobre
[0,45 – 0,60[	Razoável
[0,60 – 0,75[	Boa
[0,75 – 1,00]	Excelente

2.7. ACÚSTICA ARQUITETÓNICA

2.7.1. REFLEXÕES

O principal fator a considerar para a acústica de uma determinada sala é a sua envolvente, ou seja, a sua forma e materiais constituintes são elementos preponderantes ao comportamento acústico da mesma, estando este inteiramente relacionado com o fenómeno de reflexão das ondas sonoras. Numa grande sala de espetáculos um ouvinte recebe cerca de 8.000 reflexões por segundo. Tal como referido em 2.4, um recetor é primeiramente atingido pelo som direto, imediatamente seguido por uma série de ondas sonoras refletidas nas superfícies da envolvente. Denomina-se por som inicial o conjunto de reflexões que chegam nos primeiros 80 milissegundos. Todas as restantes reflexões que chegam após esse intervalo designam-se por som tardio. O intervalo de tempo entre a chegada do som direto e o da primeira reflexão corresponde ao tempo de atraso inicial (*initial time delay gap* - ITDG) (Fig. 2.13) [1], [13], [17].

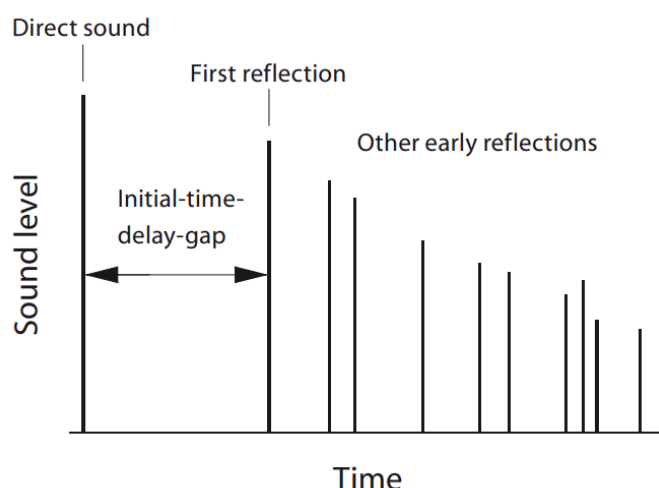


Fig. 2.13 - Reflectograma de uma sala de espetáculos [13]

2.7.2. Ecos

Nem todos os tipos de reflexões são favoráveis para a criação de um espaço acusticamente agradável. Certos fenómenos são sempre inconvenientes e desagradáveis, como é o caso dos ecos. Os ecos consistem em reflexões que chegam desfasadas do som direto e suficientemente fortes ao ponto de serem claramente distinguíveis pelo ouvido humano (Fig. 2.14). Este fenómeno ocorre sempre que as reflexões tenham uma diferença temporal superior a 50 milissegundos em relação ao som direto [1], [13], [17], [18].

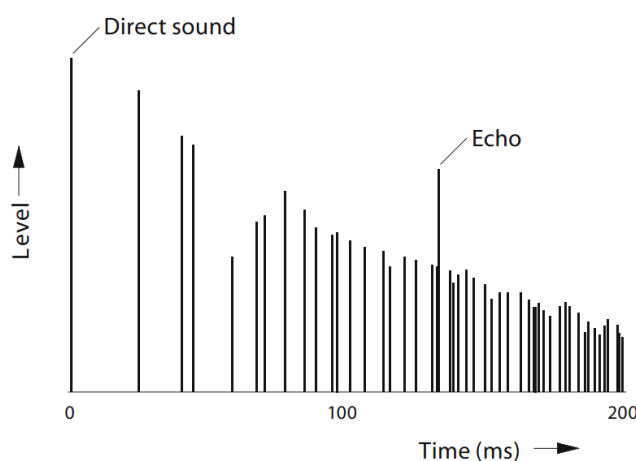


Fig. 2.14 - Exemplo de reflectograma com eco [13]

Os ecos podem ser evitados através do tratamento de absorção ou de dispersão de uma superfície refletora ou por modificação do ângulo das superfícies mais distantes à fonte sonora, reenviando a reflexão para uma zona não prejudicial (Fig. 2.15). Na maioria dos auditórios devem ser evitadas grandes áreas de absorvente sonoro, uma vez que podem conduzir a um som menos intenso ou a falhas na distribuição direcional das ondas sonoras. Em geral, as superfícies côncavas ou circulares não são aconselháveis, visto que promovem

outros defeitos acústicos, tais como o fenómeno de focalização sonora (Fig. 2.16), ou seja, a concentração de energia sonora em determinados pontos do espaço, prejudicando a uniformidade do campo sonoro interior. É de mencionar ainda que uma focalização exigiria um tratamento de dispersão substancial que pode ser visualmente intrusivo, pelo que se deve evitar a escolha destas formas geométricas [1], [13], [17], [18].

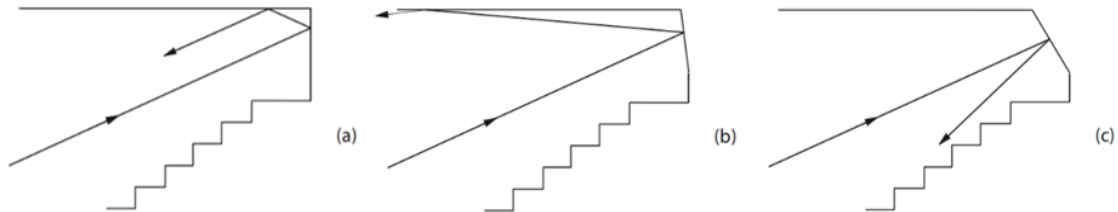


Fig. 2.15 - Eco da parede traseira e do teto de um auditório. (a) A parede e o teto devolvem a reflexão de volta para a fonte (enviam os ecos para o palco). (b) Uma ligeira inclinação da parede elimina os ecos indesejados. (c) Um excesso de inclinação da parede envia os ecos para a plateia [13]

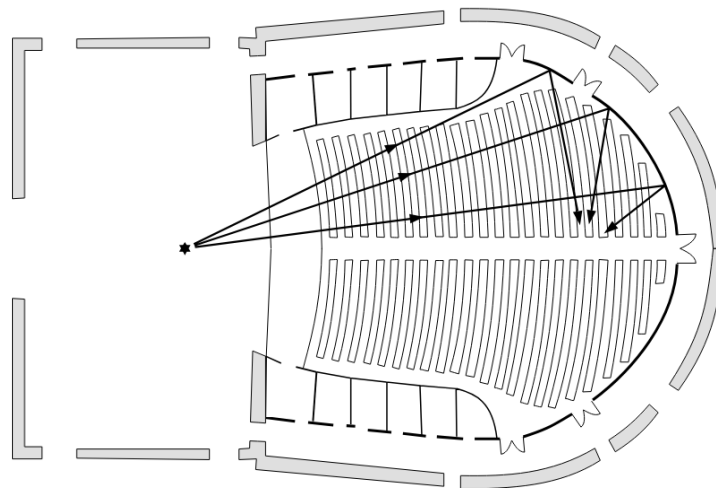


Fig. 2.16 - Focalização sonora devido ao efeito de uma superfície côncava [19]

Outro exemplo de um defeito acústico é o chamado eco repetido (*flutter echo*), um tipo de eco que percorre pequenas distâncias, mas em múltiplas iterações. Este fenómeno surge quando a emissão sonora ocorre entre duas paredes paralelas não muito afastadas que refletem consecutivamente o som original, tal como representado na Fig. 2.17. A correção deste tipo de eco passa pela reorientação das paredes em cerca de 5° ou pela colocação de material absorvente ou difusor em pelo menos um dos lados [1], [13], [17].

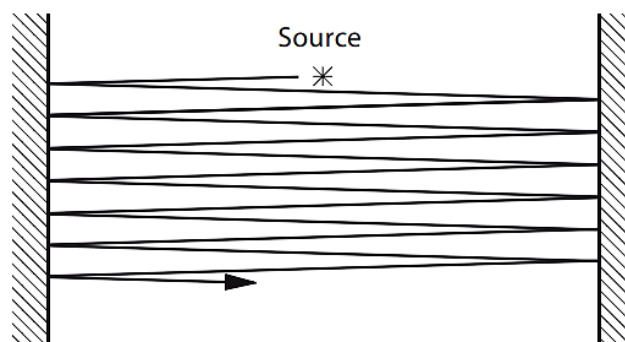


Fig. 2.17 - Eco repetido (flutter echo) entre paredes paralelas [13]

2.7.3. DIFUSÃO

O desempenho acústico de um espaço está igualmente relacionado com o quão difusor é o seu campo sonoro, isto é, se as superfícies que constituem a sua envolvente são capazes de refletir o som em todas as direções e o mais uniformemente possível. Uma condição necessária para uma superfície ser considerada como acusticamente difusora é possuir irregularidades, cujo tamanho ditará que frequências de onda é que serão refletidas. Quanto mais irregular for a superfície, maior será o efeito de difusão (Fig. 2.18) [1]. Na Fig. 2.1 seguem-se exemplos de dispositivos comerciais.

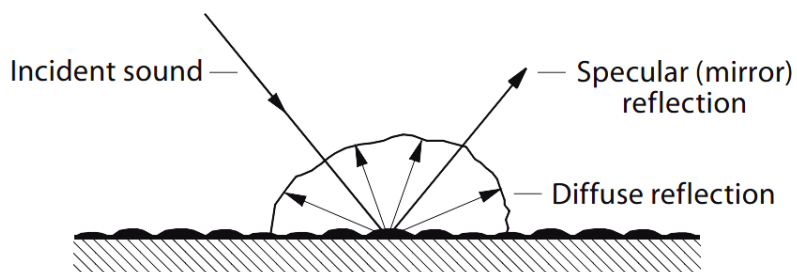
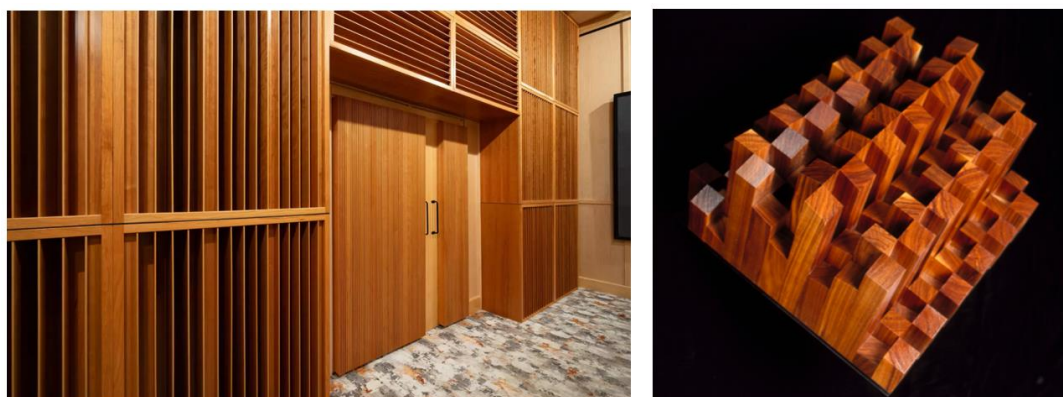


Fig. 2.18 - Efeito de difusão numa superfície irregular [13]

Fig. 2.19 - Difusores comerciais *Quadratic Residue Diffuser* (QRD) e *Art Diffuser* [20], [21]

2.8. PARÂMETROS ACÚSTICOS ENERGÉTICOS

2.8.1. CLARIDADE

A Claridade (C_{80}) corresponde à razão, expressa em dB, entre a energia sonora recebida pelo recetor nos primeiros 80 milissegundos (ms) e a energia recebida após esse intervalo de tempo. Proposto por Reichardt em 1975, este parâmetro obtém-se segundo a expressão (2.15), correspondendo 80 ao valor inicialmente considerado para o limite de percetibilidade para a música e $p(t)$ à resposta do espaço ao impulso sonoro [1], [7].

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.15)$$

2.8.2. DEFINIÇÃO

Estabelecido em 1953 por Thiele, a Definição (D_{50}) é um parâmetro adimensional que se define pela razão entre a energia recebida pelo recetor nos primeiros 50 milissegundos e a energia total recebida. É possível determinar o seu valor conforme a expressão (2.16), na qual 50 corresponde ao limite de percetibilidade considerado para a palavra e $p(t)$ a resposta do espaço ao impulso sonoro [1], [7].

$$D_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.16)$$

2.8.3. TEMPO CENTRAL

O Tempo Central (TS) é o ponto no tempo onde a energia recebida antes deste ponto é igual à energia recebida após esse ponto, expresso em milissegundos. Este parâmetro foi proposto por Cremer e Müller em 1978, no qual é usual ter uma posição entre 140 e 180 milissegundos em salas de concerto. É possível determinar o seu valor seguindo a expressão (2.17), na qual $p(t)$ corresponde à resposta do espaço ao impulso sonoro [1].

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.17)$$

2.8.4. RÁCIO DE BAIXOS

Proposto por Beranek em 1962, o Rácio de Baixos (*Bass Ratio* - BR) é um parâmetro utilizado para avaliar o balanço tonal por comparação entre os tempos de reverberação para as baixas frequências com os valores das altas frequências, expresso em segundos. O valor de BR é obtido conforme a expressão (2.18) [1], [9].

$$BR = \frac{TR_{125} + TR_{250}}{TR_{500} + TR_{1000}} \quad (2.18)$$

3

ACÚSTICA DAS SALAS DE
ESPETÁCULO

3.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

A palavra “espetáculo” deriva do latim “*spectaculum*”, remetendo para algo que impressiona e pretende a atenção, estando normalmente associada a uma atividade de carácter artístico que é executada perante um público, tal como uma apresentação teatral, musical, cinematográfica, entre outros [22]. A evolução dos espetáculos foi naturalmente acompanhada pela criação e desenvolvimento de espaços próprios para a sua realização e que permitissem a sua observação por parte de uma audiência - os auditórios.

É na Grécia Antiga, século V a.C., que se começam a construir espaços específicos para o efeito do ato teatral. O teatro, palavra derivada do grego “*theatron*” que significa “local onde se vê”, surgiu a partir da evolução das cerimónias em honra de Dionísio, deus das festas, fertilidade, vegetação e vinho. As cerimónias duravam aproximadamente uma semana e incluíam procissões durante as quais os gregos vestiam fantasias e máscaras, dançavam e entoavam cantos líricos dentro do templo de Dionísio, oferecendo-lhe vinho [23].

Os primeiros espaços, inicialmente construídos em madeira e, mais tarde, materializados em pedra, consistiam em áreas abertas dispostas em encostas de zonas montanhosas que eram aproveitadas para servir de suporte às arquibancadas, permitindo assim a alocação de uma plateia. Grande parte destes teatros situavam-se em zonas não urbanas e de pouco movimento, sendo que, quando próximos destas, eram separados por muros. Com o aumento da necessidade de acomodar um público maior para diferentes fins, tornou-se evidente que a disposição da plateia em círculos concêntricos fazia com que um maior número de pessoas ficasse perto da área central. Adicionalmente, devido ao facto de a voz humana ser direcional e da inteligibilidade diminuir à medida que o recetor se afasta do emissor, os assentos foram definidos segundo o padrão de voz central resultando numa organização circular (superior a 180°), proporcionando à audiência uma maior proximidade do palco e uma redução da perda de intensidade sonora [13], [25], [26].

Estes teatros foram alvo de constantes transformações ao longo do tempo, quer por inovação de materiais, mudança de estilo do evento ou necessidade de acomodar maiores audiências, acabando por contar os com os seguintes elementos de forma permanente (Fig. 3.1) [24], [27]:

- *Theatron/Auditorium/Koilon/Cavea*: área constituída pelas arquibancadas nas quais o público assistia a determinado evento;
- *Orchestra*: espaço circular ao nível do solo destinada ao coro;
- *Skene*: estrutura de suporte às trocas de figurinos que servia também como pano de fundo do espetáculo. Inicialmente funcionando como uma estrutura de madeira provisória, foi alvo de aperfeiçoamentos graduais e intervenções artísticas, acabando por assumir uma posição de permanência materializada em pedra, representando edifícios importantes como templos e palácios;
- *Parodos*: passagens laterais anexas à *orchestra* utilizadas por elementos do coro;
- *Proskenion*: estrutura entre o *skene* e a *orchestra*, equivalente a um segundo piso da estrutura cenográfica (palco elevado), onde os atores desempenhavam os seus papéis.

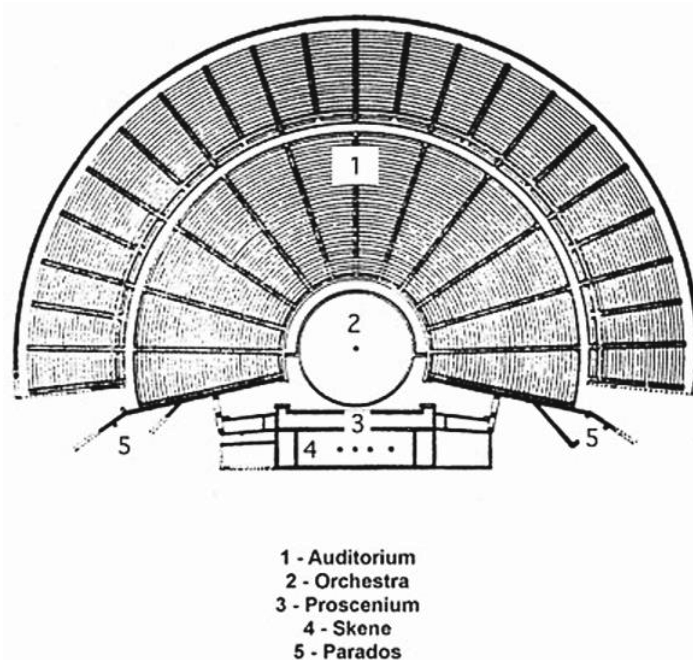


Fig. 3.1 - Estrutura característica de um teatro grego clássico em planta. Neste caso o Teatro Dionísio, em Atenas, considerado um dos teatros mais importantes da Grécia Antiga [24]

As características arquitetónicas inerentes dos teatros gregos constituíam um sistema próprio de amplificação acústica que proporcionava uma difusão sonora eficaz para toda a plateia e uma perceção adequada da expressão artística. Uma característica distintiva que contribuiu para uma boa audibilidade é a forte inclinação do *theatron* (tipicamente entre os 20° e os 34°). Em ambientes fechados existem numerosas reflexões nas superfícies circundantes que refletem uma parte significativa da energia sonora de volta para a audiência. Por outro lado, em espaços ao ar livre a inclinação desempenha um papel crucial na absorção, visto que quanto maior a inclinação (até certo limite) maior será a capacidade

de absorção. A existência da *skene* e do *proskenion*, introduzidos com o crescimento da importância dos atores em detrimento da do coro (período helenístico), era um outro fator decisivo para a qualidade acústica do espaço, uma vez que funcionavam como elementos refletoras, permitindo assim um aumento do nível sonoro (Fig. 3.2) [13].

É de realçar que dependendo da posição do espectador, tanto o campo de visão como o acústico poderiam ser comprometidos. Acredita-se que os Antigos tenham resolvido este problema através do uso de máscaras que não só facilitavam o reconhecimento dos diversos atores, como também funcionavam como megafones internos, permitindo a amplificação da voz dos atores [13].

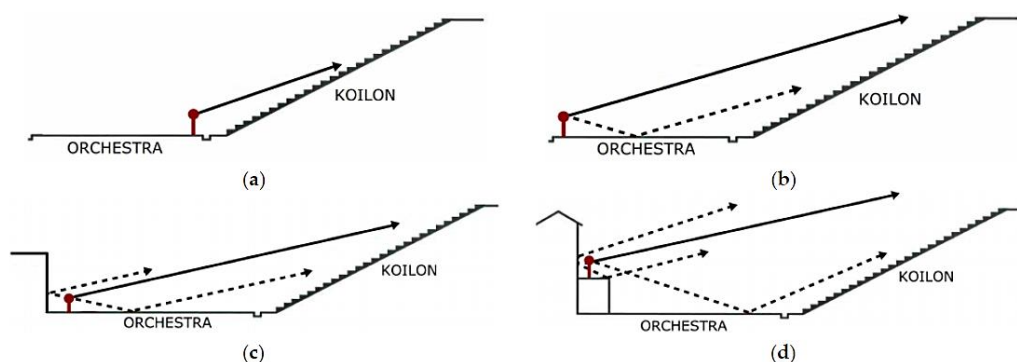
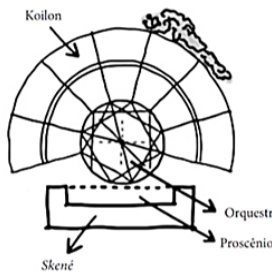


Fig. 3.2 - Propagação do som durante a evolução do teatro grego. Som direto (linha preenchida) e do som refletido (tracejado) dependendo da posição do intérprete: (a) próximo da *koilon*; (b) longe da *koilon*; (c) próximo da *skene*; (d) no *proskenion* [29]

Os teatros romanos surgiram em seguimento dos teatros gregos. Apesar de seguirem o mesmo modelo, os teatros romanos diferiam em vários aspetos em relação aos da Grécia Antiga, tal como representado na Fig. 3.3. O conhecimento e aperfeiçoamento das técnicas do arco e da abóbada, facilitada pelo uso de betão, permitiu que estes teatros fossem construídos em plano horizontal como estruturas independentes na cidade, fugindo à vinculação grega existente entre a topografia e a forma dos teatros.

O teatro romano foi idealizado como uma estrutura única e fechada, em que a área da plateia, semicircular limitada a 180°, era unida ao edifício do palco e que permitia alocar um público maior devido a uma pendente superior (tipicamente entre os 30° e os 34°). Esta unificação de elementos em terreno plano possibilitou o acesso do público diretamente à área de plateia por meio de corredores estruturais localizados abaixo das arquibancadas, designados por vomitórios. O facto destes teatros terem uma altura de palco menor comparativamente com os teatros gregos permitia-lhes a ocorrência de reflexões acusticamente maiores na *orquestra* [13], [25], [27], [29].

Teatro Grego



Teatro Romano

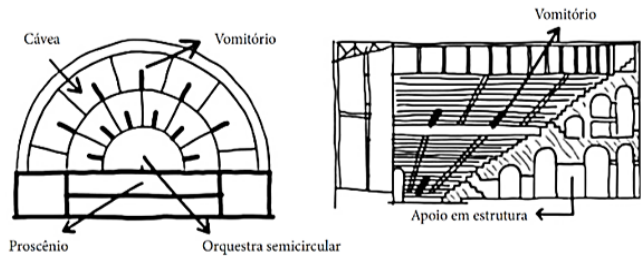


Fig. 3.3 - Representação em planta e em secção das diferenças entre o teatro grego e romano [27]

Com a queda do Império Romano, durante os séculos III e IV d.C., o teatro, altamente condenado pela Igreja Católica, entra em decadência e por fim em desuso na Europa Ocidental. O período compreendido entre a Idade Média e o Renascimento foi marcado pela ausência do edifício teatral como elemento arquitetónico específico, predominando a construção de edifícios ou templos religiosos. Os teatros reaparecem em Itália, século XIV, caracterizados por uma tendência de construção que revalorizava intensamente as referências do Antiquidade Clássica, tentando-se afastar dos ideais da Era Medieval.

Desenvolvidos em espaços fechados, os teatros renascentistas preservaram os princípios de proporção e simetria observados nos teatros clássicos greco-romanos, contando com um plano da plateia semielíptico circundado por galerias e praticamente a mesma configuração da *orchestra* e do *proskenion* na zona do palco. Nestes teatros a acústica é principalmente fornecida pelo som direto, havendo pouca amplificação através das reflexões do ambiente interno. Na Fig. 3.4 encontra-se representado o Teatro Olímpico, um dos primeiros e mais emblemáticos teatros a ser concretizado durante o período renascentista [25], [27], [29].

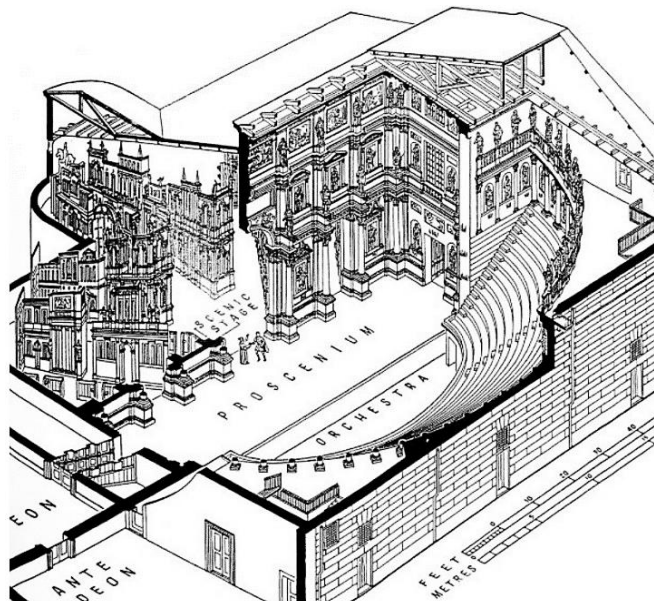


Fig. 3.4 - Representação axonométrica Teatro Olímpico, Vicenza, Itália [13]

O Período Barroco (séculos XVI-XVIII) pode ser visto como uma continuação do Renascimento, uma vez que ambos os movimentos partilhavam um interesse pela Antiguidade Clássica. Esta época caracteriza-se pelo desenvolvimento do cântico e da música, arquitetura exuberante, ornamentada e detalhada, assim como por um crescimento do interesse por parte da população pelas artes. Este crescimento levou ao aumento da procura por eventos artísticos e, consequentemente, à necessidade de criar espaços que permitissem acolher um público maior. O teatro barroco era projetado para proporcionar uma experiência totalmente imersiva com boa visibilidade e acústica, procurando uma sensação de proximidade entre os intérpretes e o público, de modo a intensificar o efeito dramático. Este tipo de teatro destaca-se ainda por uma área de audiência em formato de U ou de ferradura, sendo extremamente adequada para espetáculos de ópera (Fig. 3.5) [13], [25].

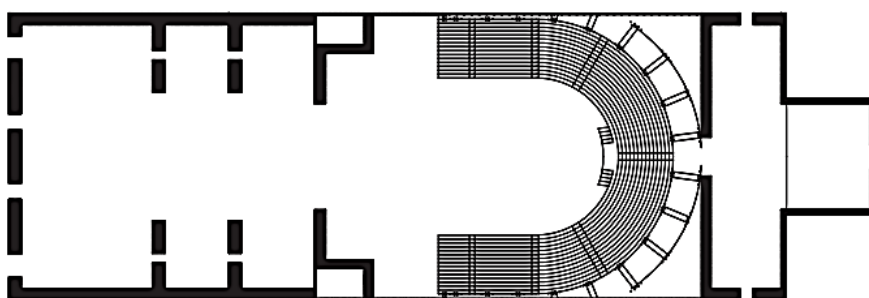


Fig. 3.5 - Planta típica de um teatro barroco [25]

O período que se sucedeu, conhecido por Neoclássico (século XVIII-XIX), foi marcado por uma Europa cosmopolita movida pelo Iluminismo, um movimento cultural e intelectual caracterizado pela crença na evolução do conhecimento a partir da observação e da razão. Neste período os detalhes e ornamentos excessivos provenientes do Barroco perderam força, dando lugar aos ideais de simetria, ordem e proporção, observando-se um retorno dos princípios da arquitetura grega e romana (daí a designação “neoclássico”). O período referido como Clássico na música ocorreu durante esta época, na qual as obras foram compostas pela primeira vez tendo em atenção as diversas formas musicais e as características específicas do espaço de execução durante o processo de composição, isto é, os autores compunham para a sala que achavam que lhes iria permitir obter o tipo de música e o ambiente acústico que pretendiam. Anteriormente, os espaços utilizados para eventos musicais eram raramente concebidos especificamente para esse único propósito [13], [25].

O aumento contínuo da complexidade dos instrumentos musicais fez com que estes pudessem ser ouvidos por públicos maiores, impulsionando a procura por salas de espetáculo com maior capacidade. O crescimento destes espaços era acompanhado por um aumento da preocupação sobre o seu comportamento acústico, apesar do conhecimento diminuto sobre essa temática. Essa preocupação levou, por sua vez, a uma necessidade de colaboração entre os compositores e os arquitetos, com o intuito de não prejudicar o espetáculo. Cria-se aqui a dualidade acústica-arquitetura, na qual grande parte dos arquitetos sobrepunha a estética à acústica. Todas as grandes salas de espetáculo devem basear-se simultaneamente no campo visual e no acústico, no entanto não é razoável sugerir que o primeiro se sobreponha ao segundo, uma vez que o som é o fator mais importante de um

espetáculo e a falta de qualidade acústica pode destruir por completo a essência do evento, ao contrário do aspeto estético da sala, que em nada o pode comprometer [1], [25].

Na Fig. 3.6 é possível observar uma representação perspectivada do *Bayreuth Festspielhaus*, uma casa de ópera situada na cidade de Bayreuth, na Alemanha, resultante da colaboração entre o compositor Richard Wagner e o arquiteto Otto Brückwald. A disposição dos assentos foi por si só uma inovação, visto que foi a primeira sala de ópera onde não existia diferenciação por classe entre os camarotes e a orquestra, assumindo também uma configuração mais igualitária, abandonando a antiga forma em ferradura. Uma característica única da sala é a ocultação da orquestra perante o público de forma a não criar distrações. Wagner procurou priorizar, através da arquitetura, uma relação de proximidade e foco completo entre o espectador e o espetáculo, dirigindo toda e qualquer atenção para o palco [24], [27].

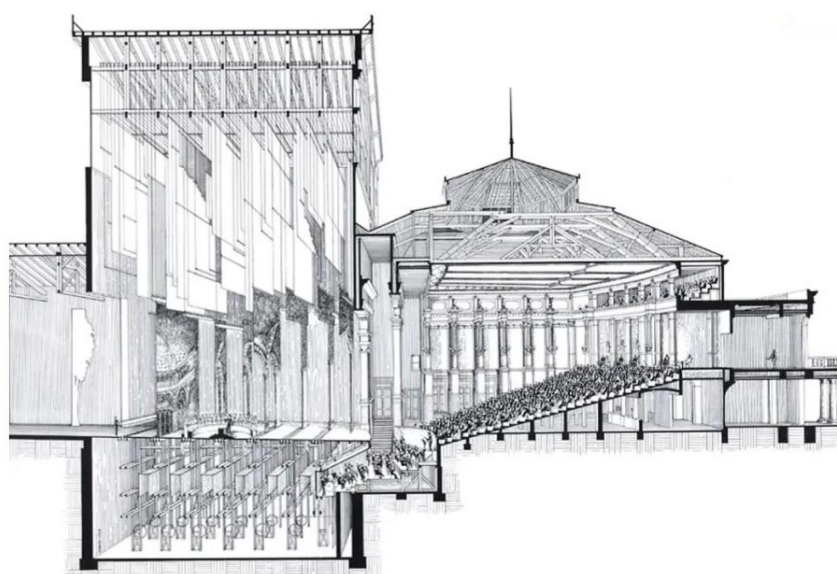
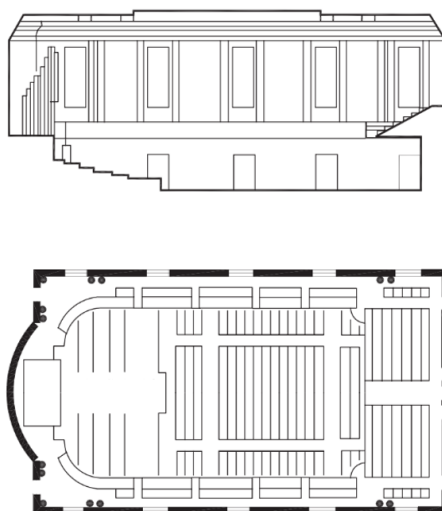


Fig. 3.6 - *Bayreuth Festspielhaus*, Bayreuth, Alemanha [27]

Embora bastantes projetos para salas de espetáculos tenham sido tentados, os espaços com formato retangular ou *shoebox* tornaram-se particularmente populares no fim do século XVIII e no início do século XIX. Esta disposição facilita a organização dos lugares e proporciona uma distribuição uniforme da plateia em relação ao palco, permitindo uma visão clara e uma boa acústica. A sua popularidade advém sobretudo do facto de serem bastante versáteis, funcionando como espaços adaptáveis para diferentes fins. Um exemplo deste tipo de salas é o *Stadt Casino* situado na cidade de Basel, na Suíça, um espaço com tetos altos, múltiplas superfícies difusoras e destinado a um público relativamente reduzido, representado em secção e em planta pela Fig. 3.7 [13], [25].

Fig. 3.7 - Corte e planta do *Stadt Casino*, Suíça [25]

Foi na transição do século XIX para o século XX que o estudo teórico da acústica arquitetónica foi iniciado pelo físico Wallace Clement Sabine. O pioneiro da integração da ciência da acústica na arquitetura destacou a importância entre esses dois campos para assegurar uma boa percepção sonora em salas de espetáculo. Sabine defendia que a procura por uma solução que garanta boa qualidade acústica deve começar antes da construção do edifício, sendo necessário que o som seja suficientemente forte, que as componentes do som complexo mantenham as suas intensidades relativas e que os sons sucessivos sejam claros e diferenciados, sem ruídos alheios. O trabalho de Sabine através da correlação do volume do espaço, a absorção dos materiais e o tempo de reverberação foi essencial para o desenvolvimento dos princípios acústicos e as suas contribuições tiveram um impacto significativo na conceção de auditórios e salas de concertos ao longo do século XX. Neste século a acústica arquitetónica passa a ser igualmente reconhecida como uma ciência e uma arte, ficando marcado também o desenvolvimento da área da eletroacústica [25], [30].

3.2. SISTEMAS RELEVANTES PARA A ACÚSTICA

3.2.1. ACÚSTICA VARIÁVEL

3.2.1.1. INTRODUÇÃO

A acústica variável refere-se à capacidade de ajustar as características acústicas de um determinado ambiente interior com o intuito de atender às necessidades específicas dos diversos eventos que neste se possam realizar. As técnicas de adaptação acústica predem-se pela modificação do tempo de reverberação e, tendo em conta a fórmula de Sabine (2.12), podem passar pela variação do volume e/ou da capacidade de absorção sonora da sala. Adicionalmente, as condições acústicas podem ser igualmente alteradas recorrendo a sistemas eletroacústicos [1], [31], [32].

3.2.1.2. VARIAÇÃO NA ABSORÇÃO

A alteração das condições acústicas de uma sala de espetáculos destinada a múltiplos fins pode ser obtida através da variação da sua absorção sonora global por meio de introdução de dispositivos mecânicos ou manuais, os quais podem conduzir à alteração das características acústicas das superfícies da envolvente e, conseqüentemente, transformar zonas de reflexão em zonas absorventes ou vice-versa. São exemplos deste tipo de dispositivos as cortinas retráteis, os painéis móveis e painéis giratórios.

As cortinas utilizadas para o efeito devem possuir elevada densidade, proporcionando uma maior eficiência nas médias e sobretudo nas altas frequências. Por se tratar de um material fibroso, apresentam uma baixa capacidade de absorção em relação às baixas frequências, no entanto esta limitação pode ser minimizada ao incluir uma distância variável entre as cortinas e as paredes [32].

O princípio do funcionamento dos painéis móveis baseia-se no deslocamento reversível de um conjunto de painéis simultaneamente absorvente e refletor em relação à sua posição original, conforme o necessário para que se atinja o tempo de reverberação pretendido. Deste modo, nas situações em que se requeira uma diminuição do tempo de reverberação deve-se expor a face absorvente dos painéis. Em caso contrário, os painéis deverão apresentar a face refletora para que se consiga alcançar um aumento do tempo de reverberação (Fig. 3.8) [17], [31], [32].

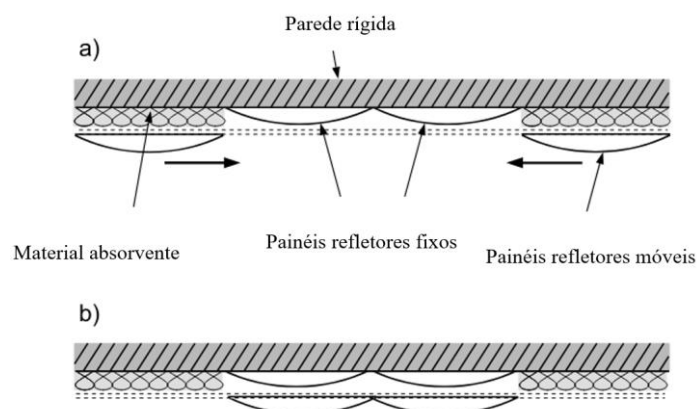


Fig. 3.8 - Painéis móveis. a) posição com absorção mínima. b) posição com absorção máxima [31], [32]

Relativamente aos painéis giratórios, estes podem apresentar configurações com rotações de 90°, 180° ou 360°. Os dois primeiros casos operam com base na mesma lógica, isto é, quando se pretende uma diminuição da absorção, fecham-se os painéis, ficando a face refletora exposta. Já quando os painéis são abertos, a face absorvente fica exposta, aumentando a capacidade de absorção (Fig. 3.9 e 3.10). Na configuração de 360°, os elementos rotativos permitem uma tripla função dada a sua forma de prisma triangular. Além das superfícies absorvente e refletora, conta ainda com a presença de uma superfície difusora, aumentando os benefícios e a versatilidade da configuração no ambiente interior (Fig. 3.11) [17], [31], [32].

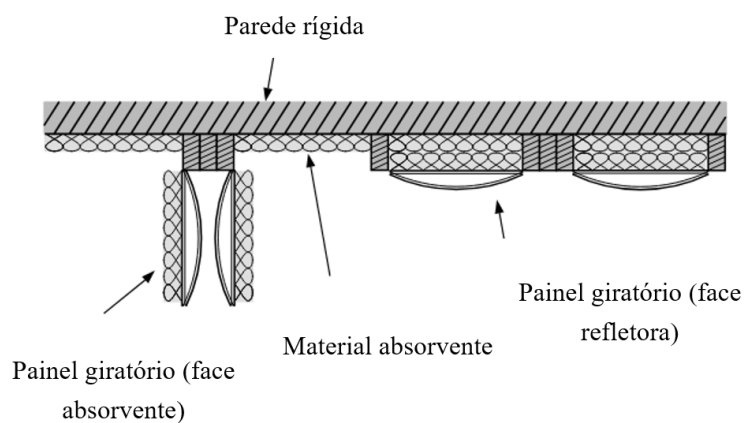


Fig. 3.9 - Painéis giratórios na configuração de 90° [31], [32]

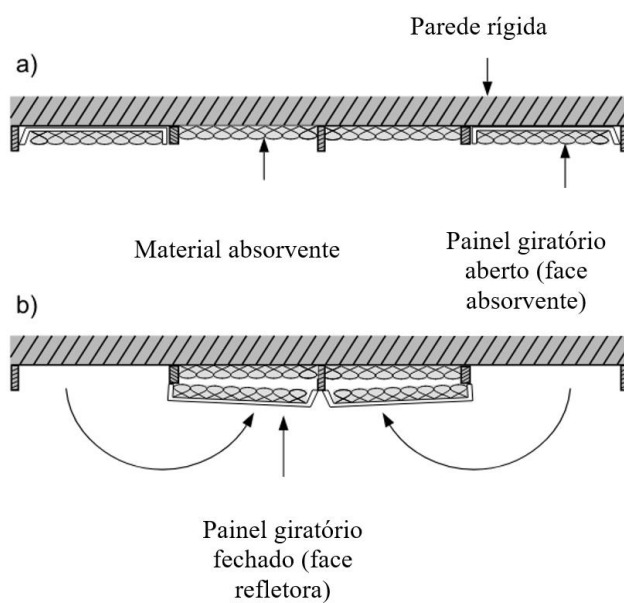


Fig. 3.10 - Painéis giratórios na configuração de 180°. a) posição com absorção máxima. b) posição com absorção mínima [31], [32]

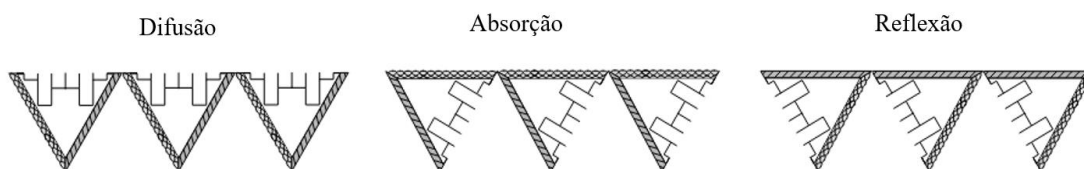


Fig. 3.11 - Painéis giratórios na configuração de 360° [32]

A Fig. 3.12 apresenta o exemplo prático da *Hong Kong Academy for Performing Arts* na qual existem três tipos de soluções de absorção variável.

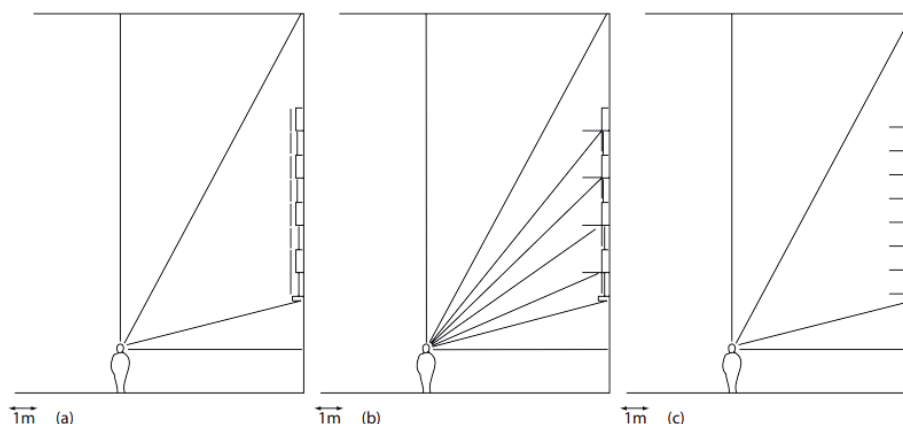


Fig. 3.12 - Variação na absorção sonora na *Hong Kong Academy for Performing Arts*. Os três arranjos das abas permitem três graus de absorção diferentes. (a) Abas - fechadas, poucas reflexões iniciais, tempo de reverberação longo. (b) Abas - semiabertas, muitas reflexões iniciais, tempo de reverberação médio. (c) Abas - abertas, poucas reflexões iniciais, tempo de reverberação curto [13]

3.2.1.3. VARIAÇÃO NO VOLUME

A instalação de tetos móveis é uma das soluções possíveis quando se pretende alterar significativamente o volume de uma sala. Na Fig. 3.13 encontra-se representada uma secção longitudinal do *Milton Keynes Theatre* (Buckinghamshire, Reino Unido), um espaço concebido prioritariamente para o teatro e igualmente apropriado para a realização de espetáculos de música, ópera, ballet, concertos de orquestras, entre outros. Na sua posição mais alta, o teto fornece um volume adicional capaz de proporcionar um tempo de reverberação mais elevado adequado para a música orquestral. A capacidade da sala varia entre 900 e 1400 lugares conforme a configuração escolhida entre a altura mínima e a altura média, fornecendo diferentes condições acústicas para o teatro dramático. Entre estes dois limites, o tempo de reverberação varia de 1,1 a 1,5 segundos [13].

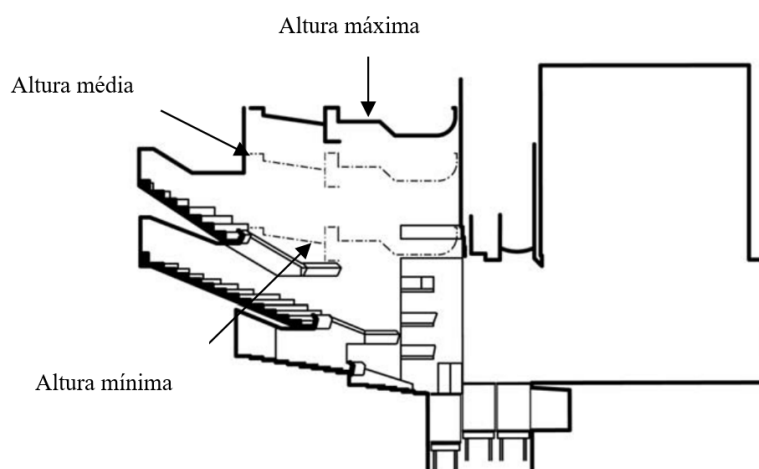


Fig. 3.13 - Secção longitudinal do *Milton Keynes Theatre*, Buckinghamshire, Reino Unido, evidenciando as diferentes alturas do teto [13]

A variação do volume de uma sala de espetáculos pode ser também alcançada por meio implementação de painéis móveis que oferecem a capacidade de abrir ou fechar volumes adicionais. Um exemplo deste tipo de situações é o caso do *Bruce Mason Theatre*, inaugurado em 1996 na cidade de Auckland, Nova Zelândia (Fig. 3.14). O teto da sala é constituído por painéis articulados na sua extremidade inferior, a maioria dos quais podem ser abertos de modo a aumentar o volume acústico. Em espetáculos musicais uma parte dos painéis é elevada entre 30 a 40°, já em espetáculos de teatro, estes são rebaixados para proporcionar reflexões adequadas à inteligibilidade da palavra [13].

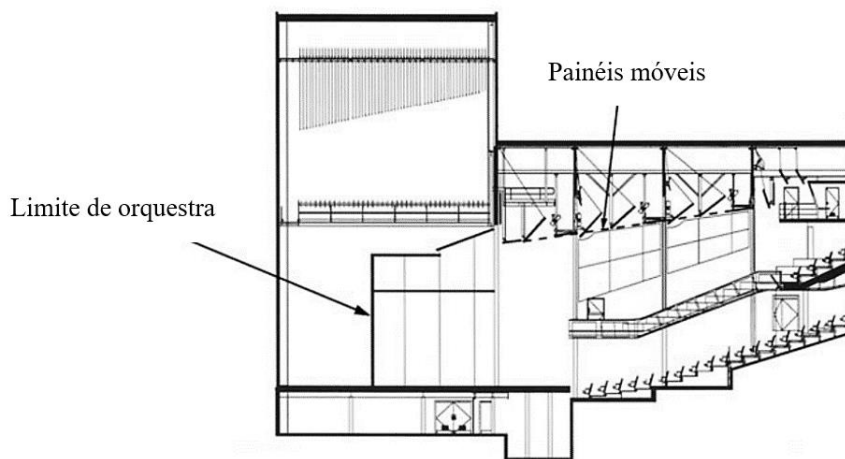


Fig. 3.14 - Secção longitudinal do *Bruce Mason Theatre*, Auckland, Nova Zelândia, evidenciando a utilização de painéis móveis [13]

3.2.2. CONCHAS ACÚSTICAS E CANÓPIAS

As conchas acústicas são elementos arquitetónicos projetados para melhorar a qualidade acústica de um determinado espaço cénico, quer seja este um edifício ou uma estrutura ao ar livre. Estes elementos, providos de materiais refletores e difusores, têm como principal função evitar a perda ou a dissipação do som produzido pelos instrumentos e pelas vozes dos intérpretes, orientando-o de forma uniforme na direção da plateia. Para além disso, as conchas acústicas visam também facilitar o desempenho dos artistas, uma vez que o seu efeito deverá ser igualmente exercido sobre o palco, promovendo uma melhor audibilidade e harmonia entre os elementos em atuação [33]. Na Fig. 3.15 segue-se o exemplo da *Hollywood Bowl*, (Los Angeles, Califórnia) uma concha acústica ao ar livre.

Devido ao facto de se integrarem no palco ou no cenário no qual os artistas realizam os seus espetáculos, além das considerações acústicas, devem ser tidos em conta cuidados arquitetónicos ou de conceção de integração desse elemento no recinto aquando da fase de projeto [33].



Fig. 3.15 - *Hollywood Bowl*, Los Angeles, Califórnia [34]

As canópias são dispositivos com propriedades refletoras colocados sobre a zona do palco de salas de espetáculos e suspensas em frente do prosaénio, permitindo a reflexão de ondas sonoras provenientes do palco para toda a audiência e a diminuição do intervalo de tempo entre a chegada do som direto e o da primeira reflexão, melhorando assim o comportamento acústico do local [17], [25]. Quando presentes num mesmo espaço, as canópias podem ser entendidas como um prolongamento das conchas acústicas (Fig. 3.16).

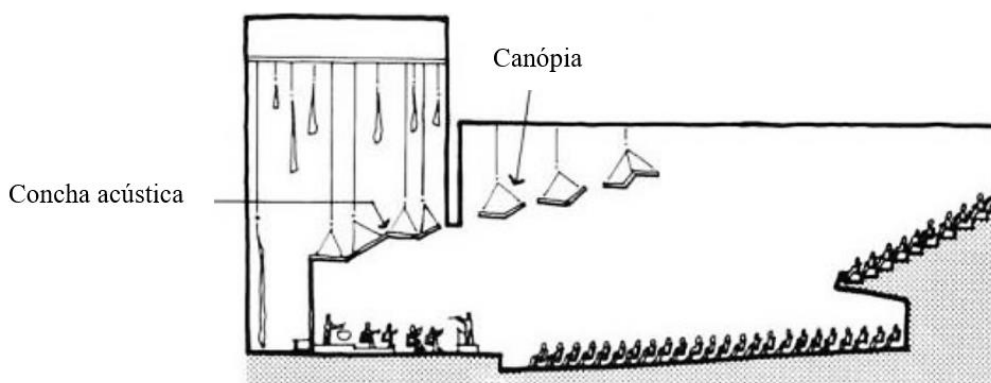


Fig. 3.16 - Representação de canópias como prolongamento das conchas acústicas [17]

Estes dispositivos são também utilizados em locais de culto, tais como igrejas, colocados acima dos púlpitos (Fig. 3.17). A presença da canópia proporciona uma melhoria acústica significativa, permitindo tirar maior partido da posição mais elevada, onde normalmente se situam os púlpitos, visto que reduzem as emissões sonoras que se perderiam verticalmente, refletindo-as para a zona inferior onde se encontram os ouvintes [25], [33].



Fig. 3.17 - Púlpito com canópia (Igreja de São Sulpício, Paris) [35]

3.3. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS

3.3.1. EXIGÊNCIAS PARA A PALAVRA

Um correto dimensionamento acústico de espaços dedicados à palavra está associado à sua clara percepção independentemente da localização do espectador. A inteligibilidade da palavra depende de diferentes fatores físicos, destacando-se sobretudo o tempo de reverberação, assim como dos componentes arquitetónicos da sala, entre estes o tamanho, forma, orientação das superfícies, materiais, bem como o nível de ruído de fundo. Com efeito, há que ter em consideração diferentes requisitos aquando da elaboração do projeto da sala, passando por garantir [25]:

- Nível de intensidade sonora adequado;
- Uniformidade do nível sonoro;
- Características de reverberação adequadas;
- Elevada razão sinal/ruído;
- Baixos níveis de ruído de fundo;
- Ausência de defeitos acústicos tais como reflexões tardias, ecos repetidos (*flutter echoes*), focalização e ressonância.

Em espaços fechados um perfil acústico tem de ter em conta a forma com que o som se comporta, incluindo o seu tempo de reverberação. Em geral, locais com um tempo de reverberação próximo de 1,0 segundos são considerados ótimos para a palavra. Carvalho [1] enfatiza esta afirmação sugerindo valores de tempo de reverberação compreendidos entre 0,7 e 0,8 segundos, numa gama de frequências de 500 a 1000 Hz, para auditórios dedicados à palavra. O controlo do ruído de fundo passa por limitar os valores dos parâmetros NC e NR apresentados nos quadros 2.4 e 2.5, respetivamente.

Para garantir uma boa inteligibilidade, é essencial ter uma quantidade de energia sonora inicial considerável, sendo esta composta pelo som direto e pelas reflexões iniciais, e uma reduzida quantidade de energia sonora tardia, relacionada com reverberação indesejada. Se as superfícies da envolvente estiverem orientadas de forma a refletir o som em direção à plateia, será possível obter não só um aumento da energia inicial, como também uma redução da energia mais tardia, o que torna esta abordagem duplamente benéfica [13].

Relativamente à dimensão, para alcançar uma boa inteligibilidade da palavra em espaços de grandes dimensões são desejáveis tempos de reverberação curtos, associados a um grande número de reflexões iniciais. No que toca a ambientes pequenos, a situação é relativamente mais simples, visto que um tempo de reverberação adequado pode ser uma condição suficiente para que se consiga atingir o objetivo pretendido [13].

3.3.2. EXIGÊNCIAS PARA A MÚSICA

A qualidade acústica para salas destinadas para a palavra e para a música são por norma incompatíveis, uma vez que a variabilidade sonora da música é bastante superior à da voz humana. É necessário que o projeto de espaços dedicados à música seja alvo de uma análise multicritério, na qual se consideram fatores não tão significativos para salas que servem outros fins. Em salas projetadas para a música, para além da aplicação de conceitos e técnicas da ciência da acústica, não se pode abdicar de uma abordagem a um nível artístico, pelo que estes constituem o tipo de espaço com maior interesse ao nível da acústica arquitetónica. A arquitetura deve ser moldada em torno dos objetivos específicos da sala, estando neste caso associados ao tipo de música que se pretender produzir.

Embora o ambiente acústico ideal para assistir a música ao vivo esteja habitualmente dependente do estilo musical, existe uma série de fatores que são consensuais entre os diferentes estilos [25]:

- O som deve envolver o público;
- O espaço deve favorecer o som instrumental, fornecendo um campo reverberante, cuja duração varia de acordo com o tipo de música que está a ser tocada. O tempo de reverberação deverá aumentar à medida que a frequência diminui abaixo dos 500 Hz para produzir uma sensação benéfica;
- Deve existir clareza e definição nas transições musicais rápidas de modo que estas possam ser apreciadas. Para que tal aconteça, o tempo de atraso inicial (intervalo de tempo entre a chegada do som direto e o da primeira reflexão) deve ser curto;
- O som deve ter um “volume” adequado e distribuir-se uniformemente por toda a sala. Nos casos em que o número de lugares é excessivo (acima de 2600), o “volume” e a definição são reduzidos;
- Deve ser possível suportar uma ampla gama de frequências. Os instrumentos geram frequências compreendidas num intervalo de 30 a 12.000 Hz, sendo este muito mais amplo do que o espectro da palavra. A sala não deve danificar o equilíbrio natural do espectro musical;
- O ruído proveniente de fontes sonoras exteriores e/ou equipamentos mecânicos deve ser controlado de forma que o instrumento musical menos intenso possa ser ouvido;

- As características específicas de reverberação do espaço devem ser bem regularizadas com uma cauda reverberante suave e sem ecos ou qualquer outro tipo de defeitos acústicos;
- Os intérpretes devem ter a capacidade de se ouvirem claramente uns aos outros e receber do espaço uma reverberação próxima daquela experienciada pelo público.

Relativamente à geometria da sala, na Fig. 3.18 encontram-se representadas as configurações mais populares para salas de música nos seus formatos padrão e *surround*. A configuração retangular ou *shoebox* é a mais utilizada, uma vez que, para além das características mencionadas em 3.1., proporciona fortes reflexões laterais necessárias para o envolvimento do público. Acrescenta-se ainda o facto de salas mais estreitas oferecem igualmente tempos de atraso reduzidos para as reflexões sonoras iniciais.

As salas do tipo *surround*, isto é, salas cujos palcos estão envolvidos pela audiência, são bastante populares entre arquitetos devido à sua aparência dramática e por lhes poder conferir uma maior liberdade de expressão. Contudo, este formato não é favorável em termos físicos, visto que compromete a consistência acústica da sala devido à direcionalidade do som de grande parte dos instrumentos [25].

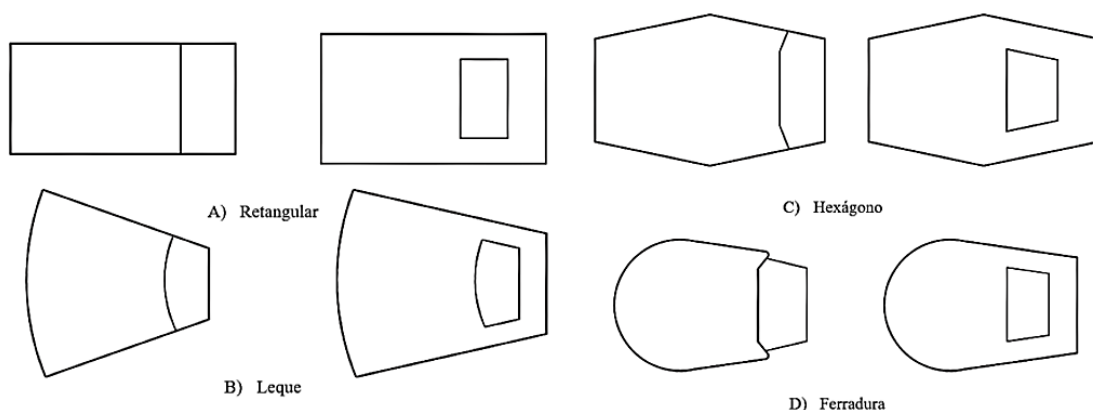


Fig. 3.18 - Configurações populares para salas dedicadas à música nos seus formatos padrão e surround [25]

Em auditórios de grandes dimensões, o elemento com maior capacidade de absorção sonora é a audiência sentada. Para que se consiga manter uma qualidade acústica consistente, independentemente da presença de público, é crucial a utilização de assentos que possuam características semelhantes aos assentos ocupados. No caso de salas de concerto ou de ópera, estes devem ser estofados de forma a minimizar as variações acústicas entre os ensaios e o espetáculo ao vivo [25].

O tempo de reverberação é um fator de elevada importância para caracterização acústica de qualquer sala, sendo que, para salas dedicadas à música, o seu valor ideal varia em função do estilo musical para o qual estas se destinam. No entanto, tal como anteriormente referido, em espaços dedicados à música é necessário recorrer a uma análise multicritério, pelo que um tempo de reverberação adequado constitui apenas uma aproximação de qualidade, não é considerado uma condição suficiente. Deste modo, o quadro 3.1 apresenta valores ideais e

valores máximos para certos parâmetros acústicos, segundo Carvalho [1] e Barron [13]. Relativamente à incomodidade gerada por ruídos alheios ao espetáculo, os valores máximos de NC e NR presentes nos quadros 2.4 e 2.5 devem ser respeitados.

Quadro 3.1 - Valores ideais e máximos para certos parâmetros em função do tipo de utilização [1], [13]

Função		Tempo de Reverberação ideal (s) (500-1000 Hz)	C_{80} ideal (dB)	Capacidade ideal máxima de lugares	Distância ideal máxima entre a audiência e o palco (m)
Ópera	Não wagneriana	1,3-1,7	3 a 4	2300	30
	Wagner	1,8-1,9	1 a 2	2300	30
Música de câmara		1,4-1,7	-1 a 1	1200	30
Música sinfónica	Barroca	1,4-1,6	0 a 2	3000	40
	Clássica	1,6-1,8	-1 a 0	3000	40
	Romântica	1,9-2,2	-2 a -1	3000	40
	Moderna	1,4-1,9	-1 a 0	3000	40
Música popular		0,8-1,0	> 6	-	-
Música de órgão		2,5-3,5	< -2	-	-
Coros gregorianos		3 – 4	-3 a -1	-	-

3.3.3. EXIGÊNCIAS PARA A MÚLTIPLOS FINS

A funcionalidade de um espaço é o principal fator a ter em conta aquando da elaboração do seu projeto. Devido à falta de recursos, tornou-se cada vez mais evidente que a construção de salas dedicadas exclusivamente a uma única finalidade é frequentemente impraticável, com exceção das grandes cidades. É comum proceder-se ao dimensionamento de um espaço idealizando-o para um determinado fim, acabando por o reaproveitar para a realização de outro tipo de atividades. Consequentemente, a qualidade acústica é ocasionalmente comprometida, dado que a resposta à procura por um espaço apropriado para todo o tipo de eventos é, em geral, um espaço desadequado para quase todo o tipo de eventos. Locais utilizados para múltiplos fins, tais como auditórios, teatros e igrejas, exigem um compromisso criterioso entre as necessidades da música e da palavras, estando entre os mais arquitetonicamente diversificados e mais difíceis de projetar [13], [25].

No decorrer da dissertação foi-se destacando a importância que o tempo de reverberação possui na inteligibilidade da palavra e na qualidade musical, sendo que a procura por métodos eficazes para modificar este fator é o principal desafio na variação acústica de um espaço. Deste modo, para que uma sala se possa comportar como uma sala multiusos é necessário recorrer aos princípios e técnicas da acústica arquitetónica, em especial à acústica variável, por meio de modificação do seu volume e/ou das características de absorção das superfícies envolventes, tal como anteriormente mencionado em 3.2.

O aumento da absorção é a abordagem mais simples, no entanto esta modificação conduz a uma redução do nível sonoro, o que pode ser inadequado para configurações que requeiram tempos de reverberação mais baixos. A variação do volume permite uma alteração significativa do tempo de reverberação, contudo exige técnicas de grande complexidade e difíceis de incorporar no espaço já existente; verificando-se assim a necessidade de pensar na incorporação deste tipo de mecanismos durante a fase de projeto.

Apesar das características exclusivas de cada tipo de sala, existem diretrizes gerais que se podem aplicar a espaços multiusos [25]:

- A fonte deve ser elevada acima da plateia sentada, de modo que a linha de visão do público se encontre livre de obstrução;
- Na fase de projeto deve ser incorporado um sistema de reforço eletroacústico capaz de reproduzir rigorosamente toda a gama de frequências necessária. A disposição dos altifalantes deve ser tal que garanta que o interlocutor seja percebido como o ponto de origem;
- Nos casos em que exista música não amplificada, os cantores e/ou músicos devem ser auxiliados por superfícies refletoras, tanto no teto como lateralmente, podendo estas superfícies ser incorporadas no projeto, suspensas por cima dos intérpretes ou integradas numa estrutura móvel;
- O pavimento deve ser inclinado para fornecer linhas de visão a cada duas fileiras do ponto de visão de chegada, sendo que a inclinação deve variar conforme a configuração da sala;
- O volume e absorção sonora do espaço devem ser controlados para que se consiga atingir um tempo de reverberação consistente com os usos. Devem ser utilizados assentos almofadados para minimizar as diferenças entre as condições de vazio e de ocupação. A reverberação do espaço deve ser controlada para limitar o ruído gerado por grandes grupos;
- Os níveis de ruído de fundo devem ser limitados a NC 25 em auditórios pequenos (< 500 lugares) e NC 20 salas de ópera e teatros. Em grandes salas de concerto este fator deverá ser limitado a NC 15.

3.4. LEGISLAÇÃO EM PORTUGAL

Em Portugal, os requisitos acústicos em edifícios são atualmente estabelecidos pelo Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), instituído pelo Decreto-Lei n.º 129/2002 e posteriormente modificado pelo Decreto-Lei nº 96/2008. O RRAE regula a vertente do conforto acústico dentro do contexto da edificação, visando melhorar a qualidade do ambiente acústico e promover o bem-estar e a saúde da população, em coordenação com o regime jurídico relativo ao ruído ambiental. As normas do presente Regulamento aplicam-se à construção, reconstrução, ampliação ou modificação dos seguintes tipos de edifícios, conforme a sua finalidade de uso [36]:

- 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;
- Recintos desportivos;
- Estações de transporte de passageiros;
- Auditórios e salas.

Relativamente às salas de espetáculo, o RRAE estabelece, segundo o Artigo 10.º - A (Auditórios e Salas), que os recintos cuja função principal seja a realização de atividades assentes na “oratória”, nomeadamente de auditórios, salas de conferência/polivalentes e salas de cinema, devem satisfazer os seguintes requisitos [36]:

- O tempo de reverberação médio, T , nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz, a considerar para estes espaços, quando mobilados normalmente e sem ocupação, deve atender ao seguinte:
 - i) $T \leq 0,12 V^{1/3}$, se $V < 250 \text{ m}^3$;
 - ii) $T \leq 0,32 + 0,17 \log V$, se $250 \leq V < 9000 \text{ m}^3$;
 - iii) $T \leq 0,05 V^{1/3}$, se $V \geq 9000 \text{ m}^3$.

Onde V corresponde ao volume interior do recinto, em metros cúbicos.

- Nas avaliações no local destinadas a verificar o cumprimento dos requisitos acústicos dos edifícios deve ser tido em conta um fator de incerteza, I , associado à determinação das grandezas em causa. Os valores obtidos para o tempo de reverberação médio, T , deverão ser ajustados pela subtração do fator I , em relação ao limite regulamentar em percentagem, de acordo com o seguinte:
 - i) 25 %, se $V < 250 \text{ m}^3$;
 - ii) 35 %, se $250 \leq V < 9000 \text{ m}^3$;
 - iii) 40 %, se $V \geq 9000 \text{ m}^3$.

O RRAE define que projeto de condicionamento acústico destes espaços deve incluir um estudo específico destinado a assegurar uma característica de reverberação adequada no restante espectro de frequências e uma boa inteligibilidade da palavra nos diversos locais do recinto.

Os edifícios cuja função principal não esteja assente na “oratória” deve ser alvo de um estudo específico destinado a assegurar a conformação acústica adequada à sua utilização funcional. Tanto estes como os anteriormente mencionados devem assegurar um isolamento aéreo tal que o nível sonoro contínuo equivalente do ruído ambiente no interior do recinto, aquando da ausência de funcionamento das instalações técnicas do edifício, L_{Aeq} , satisfaça a seguinte condição (3.1) [36]:

$$L_{Aeq} \leq 30 \text{ dB} \quad (3.1)$$

Relativamente ao interior dos edifícios, o nível sonoro contínuo equivalente do ruído particular, L_{Aeq} , associado ao funcionamento de sistemas AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado), deve, com a sala desocupada, satisfazer o seguinte:

- i) $L_{Aeq} \leq 38 \text{ dB}$, no caso de cinemas;
- ii) $L_{Aeq} \leq 30 \text{ dB}$, nos restantes recintos.

O caso de estudo, apesar de também realizar atividades assentes na “oratória”, é um espaço prioritariamente destinado para a música (este tópico será abordado com maior pormenor no capítulo 4), não sendo, portanto, obrigado a cumprir com os requisitos relativos ao tempo de reverberação.

4

CASO DE ESTUDO

4.1. AUDITÓRIO DO CONSERVATÓRIO DE MÚSICA DO PORTO

4.1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Fundado em 1917, o Conservatório de Música do Porto (CMUSP), escola pública do Ensino Artístico Especializado da Música (EAEM), é uma das sete escolas de referência nesta área de ensino em Portugal. Atualmente, é frequentado por mais de 1000 alunos, conta com um corpo docente que ronda os 180 professores e duas dezenas de funcionários, oferecendo todos os níveis e ciclos de ensino, incluindo o 1º Ciclo/Iniciação Musical, o Curso Básico de Música/Canto Gregoriano e o Curso Secundário de Música/Canto. A oferta educativa inclui ainda uma variante de Jazz mais recente introduzida no ensino secundário, para além de uma disciplina opcional direcionada para a vertente de produção e gravação – Introdução à Produção e Tecnologias da Música [37], [39], [40].

Ao longo da sua existência, o Conservatório tem sido escolhido como fiel depositário dos espólios de diversas personalidades musicais de relevo, tais como da violoncelista Guilhermina Suggia e do compositor e violinista Nicolau Medina Ribas. Por esta escola passaram alguns dos grandes nomes da música nacional, como Pedro Burmester, Pedro Abrunhosa e António Pinho Vargas, tendo também acolhido nomes mais recentes que conquistaram reconhecimento internacional, como os pianistas Vasco Dantas Rocha, Pedro Gomes e Nuno Ventura de Sousa. É de destacar ainda que a Orquestra Sinfónica do Porto, atualmente associada à Casa da Música, teve origem na Orquestra Sinfónica do Conservatório de Música do Porto e que esta instituição foi agradecida com a Medalha de Mérito Cultural Grau Ouro do Porto em 1992 [38], [39], [40].

Inicialmente instalada no Palácio dos Viscondes de Vilarinho de São Romão, a escola mudou-se para o Palacete Pinto Leite em 1975, onde viria a passar mais de 30 anos. Em 2008, impulsionada pelo Programa de Requalificação e Modernização das Escolas, mais conhecido por “Parque Escolar”, mudou de instalações, passando a ocupar a ala poente da Escola Secundária Rodrigues de Freitas (Fig. 4.1), na praça Pedro Nunes (Porto), e um novo edifício construído para o efeito (Fig. 4.2), no qual se situam os auditórios, a biblioteca, um estúdio de gravação, uma sala de orquestra e outros equipamentos de apoio imprescindíveis a este tipo de ensino [37], [39], [40].

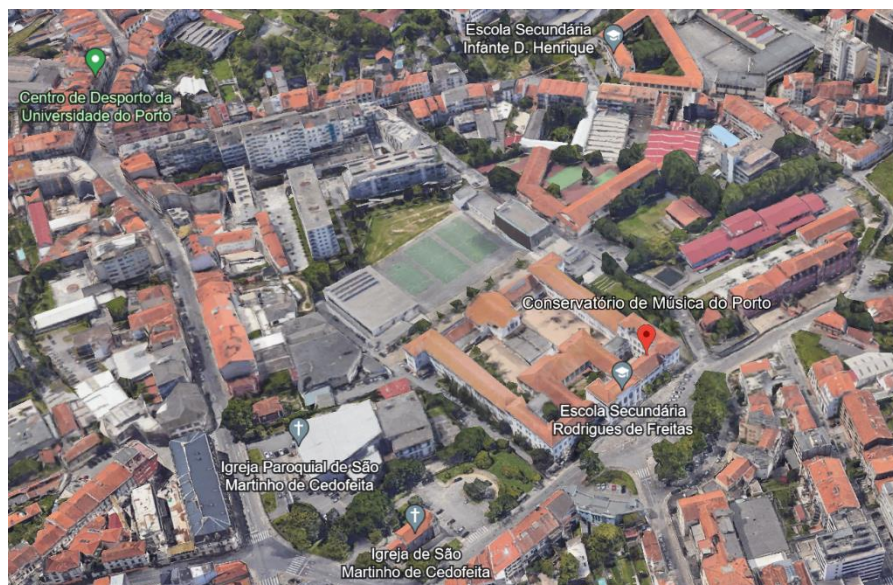


Fig. 4.1 - Localização do Conservatório de Música do Porto [41]



Fig. 4.2 - Edifício Novo do Conservatório de Música do Porto [42]

Na presente dissertação apenas será analisado o comportamento acústico do Grande Auditório, apresentado na Fig. 4.3. Este auditório é um espaço prioritariamente destinado para a música, no entanto a inteligibilidade da palavra também é um fator a ter em conta, uma vez que funciona igualmente como uma sala de aula para servir fins institucionais. O local encontra-se equipado com sistemas de captação sonora, meios de comunicação e apresentação e iluminação cénica. Deste modo, é possível afirmar que o Grande Auditório do CMUSP funciona como um espaço multiusos, contando com características que permitem a realização de diversos tipos de eventos, tais como concertos, ciclos de recitais,

orquestras, coros ou bandas, *masterclasses*, festivais, conferências, exposições e espetáculos de dança.

Este auditório foi alvo de um projeto de condicionamento acústico da autoria da *InAcoustics*, uma empresa multidisciplinar dedicada especificamente às áreas de acústica e vibrações, prestando serviços de projeto, consultoria, ensaio, investigação e desenvolvimento tecnológico, abrangendo os setores da construção, artes e media, indústria, transportes e tecnologia. A empresa conta com uma diversidade de projetos desenvolvidos ao nível de salas de concerto e teatros, hospitais, museus, escolas e indústrias, assim como no apoio ao desenvolvimento de produtos para empresas especializadas. Fundada em 2004 com origem na Maia, a *InAcoustics* foi expandindo a sua área de atuação, possuindo atualmente uma presença permanente também em Lisboa e em São Paulo. O seu percurso conta com o desenvolvimento de estudos, consultoria e projetos não só em Portugal, mas também em diversas partes do globo, nomeadamente Espanha, França, Itália, Grécia, Alemanha, Suíça, Noruega, Egito, Qatar, Angola, Moçambique, Camarões, Brasil e Canadá. [43].

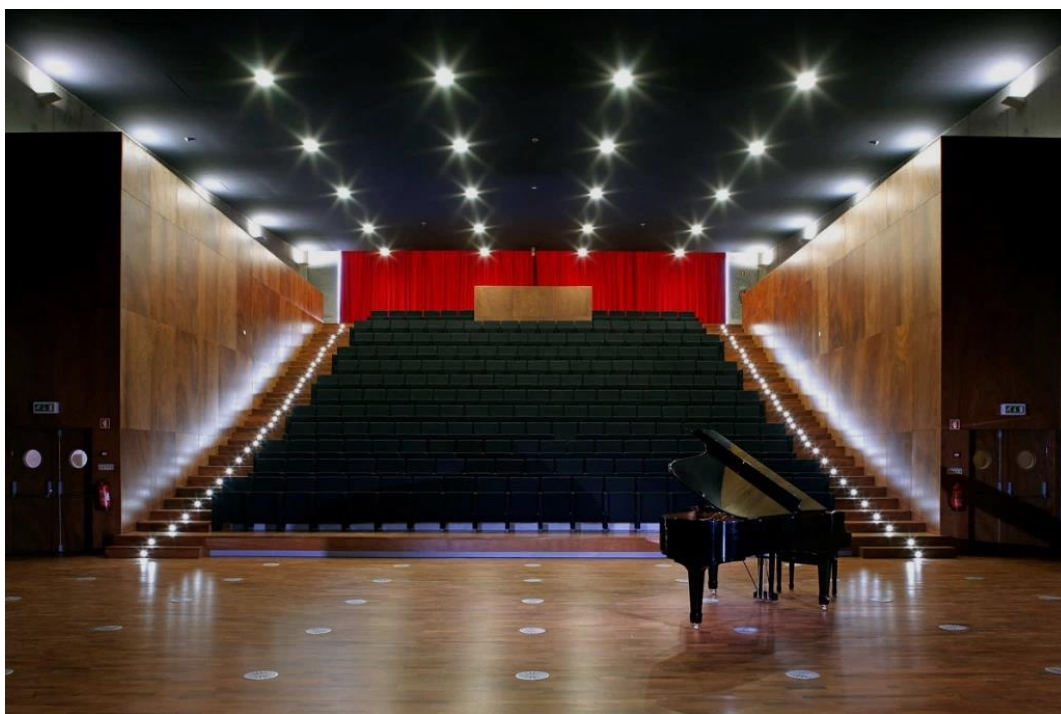


Fig. 4.3 - Grande auditório do Conservatório de Música do Porto [42]

4.1.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E ARQUITETÓNICA

A caracterização geométrica prendeu-se sobretudo pela interpretação das peças desenhadas do projeto de arquitetura do Edifício Novo (Fig. 4.4 e Fig. 4.5, respetivamente) fornecidas pela *InAcoustics*. As dimensões apresentadas foram obtidas com recurso às ferramentas de medição do AutoCAD.

A plateia possui aproximadamente uma área útil de 153 m² e uma capacidade máxima de 233 lugares distribuídos por 12 filas seguindo o mesmo padrão, isto é, disposições

elemento, para além de fortalecer a estética do auditório, proporciona uma qualidade acústica difusora apropriada. A parede de fundo diferencia-se das paredes laterais por ser revestida por painéis móveis, possibilitando assim a alteração das características acústicas do espaço em função do tipo de evento. Igualmente ao nível do palco, a sala conta com a presença de canópias de madeira fixas no teto, tal como observado pela Fig. 4.7, permitindo a reflexão das ondas sonoras provenientes do palco para toda a plateia e a diminuição do tempo de atraso inicial. A capacidade de absorção sonora do auditório reflete-se no facto das cadeiras serem totalmente estofadas (Fig. 4.8), podendo esta também estar associada em parte, porém diminuta, aos cortinados de veludo presentes no fundo da sala, cuja função passa por escurecer a sala e atenuar as reflexões provenientes do vidro (Fig. 4.3). Um outro aspeto positivo é o facto de o auditório não apresentar coxia central, permitindo um melhor aproveitamento acústico e visual.

Deste modo, observar-se que, em geral, o Grande Auditório apresenta características acústicas cuidadas. No entanto, à parte das superfícies envolventes do palco, todas as restantes são lisas, o que pode dificultar a difusão e originar reflexões indesejáveis dependendo do ângulo de incidência. É de notar que as paredes laterais paralelas da plateia (Fig. 4.3), também lisas, podem aparentemente constituir um cenário favorável para a possível ocorrência de *flutter echos*. Contudo, onde este fenómeno poderá ocorrer é nos balcões de cima, cujas paredes são de betão.

De acordo com o corte apresentado na Fig. 4.5, existe um espaçamento entre o pavimento do auditório e do teto do piso inferior. Nesse espaçamento encontra-se instalado o sistema AVAC, pelo qual se efetua a insuflação do ar e a ligação de cabos com a *régie* para que estes não fiquem à vista do público. A extração é feita por um sistema fixo no teto e escondido pelas canópias na zona do palco.

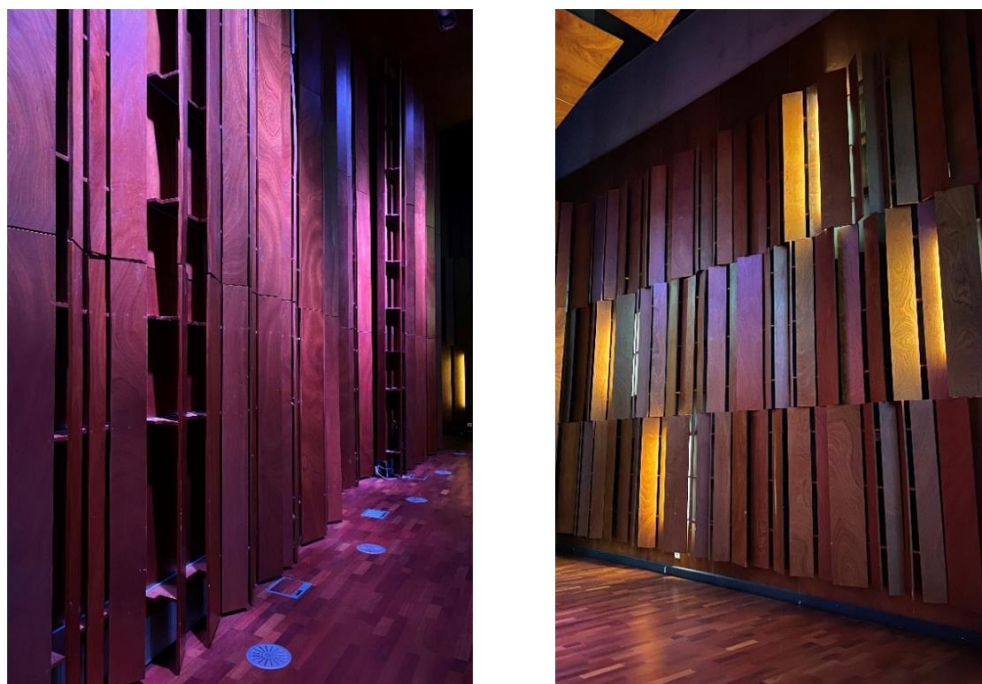


Fig. 4.6 - Painéis de madeira nas paredes circundantes da zona do palco: parede de fundo e lateral, respetivamente [fotos do autor]

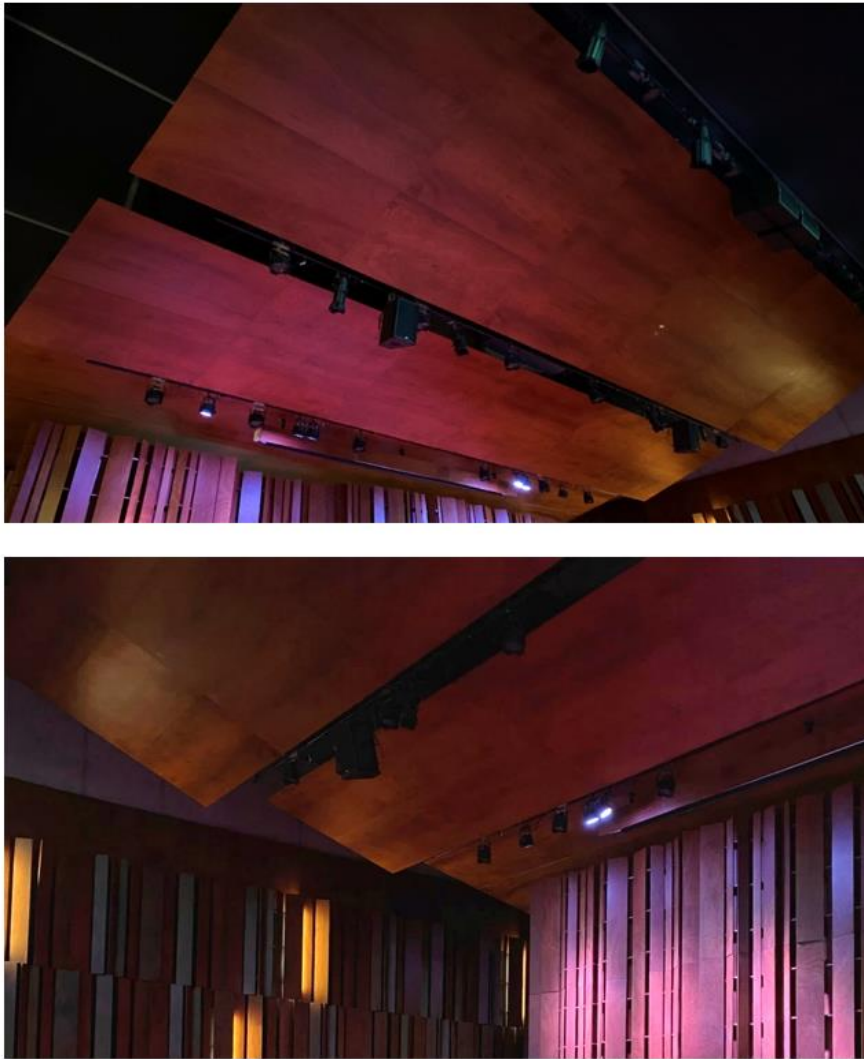


Fig. 4.7 - Canópias do auditório [fotos do autor]

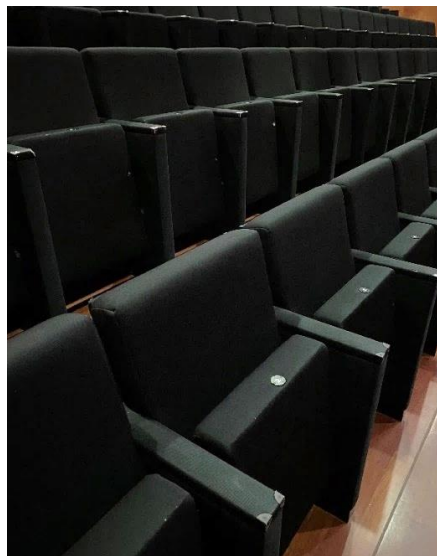


Fig. 4.8 - Cadeiras do auditório [foto do autor]

4.2. METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS

4.2.1. PARÂMETROS MEDIDOS

No seguimento da caracterização acústica do auditório em estudo, no dia 25 de março foram realizadas medições *in situ* com o intuito de interpretar certos parâmetros acústicos objetivos. Neste sentido, com recurso a equipamentos específicos para cada situação fornecidos pelo Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, procedeu-se à medição dos seguintes parâmetros acústicos:

- Tempo de Reverberação (TR);
- Nível de pressão sonora do ruído de fundo (L_P);
- STI (*Speech Transmission Index*);
- Claridade (C_{80});
- Definição (D_{50});
- Tempo Central (TS).

Os equipamentos de medição foram operados pelo Engenheiro António Eduardo Costa, sendo que, excetuando a sua presença, a do autor e a do Técnico João Rupio, a sala foi testada com total desocupação e sem qualquer tipo de reforço eletroacústico. Pelo facto de se inserir numa escola, não foi possível controlar por completo certos ruídos exteriores, levando à interrupção e repetição das medições sempre que estes se demonstrassem particularmente elevados. Devido às propriedades simétricas do auditório, os pontos de estudo foram estabelecidos numa metade da plateia, presumindo-se, à partida, que os resultados obtidos nessa metade serão representativos da outra.

É importante salientar que, assim como anteriormente descrito em 4.1, a parede de fundo do palco é revestida com painéis móveis e que as medições foram efetuadas na configuração apresentada na Fig. 4.6. Pelo exposto, supõe-se que noutra disposição os resultados seriam diferentes, quer seja para acústica da plateia ou mesmo para a do palco (que também é importante para os músicos).

4.2.2. EQUIPAMENTO UTILIZADO

Os equipamentos de medição utilizados para a realização dos ensaios acústicos foram:

- Fonte sonora Brüel & Kjaer (*Echo Speech Source*), modelo 4720 (Fig. 4.9);
- Sonómetro Brüel & Kjaer, modelo 2260 (Fig. 4.9);
- Calibrador de microfone Brüel & Kjaer, modelo 4231;
- Microfone de 13 mm Brüel & Kjaer, modelo 4189;
- Tripé portátil Brüel & Kjaer, modelo UA0049 (Fig. 4.9);
- *Software* DIRAC.



Fig. 4.9 - Fonte sonora Brüel & Kjær (*Echo Speech Source*), modelo 4720; Tripé portátil Brüel & Kjær, modelo UA0049 e Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260 [fotos do autor]

4.2.3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

4.2.3.1 RUÍDO DE FUNDO

Tal como anteriormente referido no capítulo 2, o ruído de fundo corresponde ao nível de ruído ambiente ou sons indesejados que persistem num local provenientes de fontes sonoras não específicas, podendo este fator estar associado a fontes sonoras externas a determinado espaço, tais como tráfego rodoviário e aéreo, bem como a fontes internas, por exemplo canalizações, instalações elétricas, elevadores e sistemas de aquecimento, ventilação mecânica e ar condicionado (AVAC), ou até mesmo devido à atividade humana inerente.

Com efeito, neste ensaio efetuaram-se medições com e sem o sistema AVAC utilizando o sonómetro a fim de obter os valores do nível de pressão sonora, nível sonoro e curvas de incomodidade NC e NR. A comparação entre os resultados obtidos permitirá averiguar se o ruído exterior, assim como o ruído associado à atividade do sistema de ventilação, são, por si só, incómodos e dará uma perspetiva sobre a eficácia das soluções construtivas adotadas.

Primeiramente, foram definidos três pontos de estudo designados por RF1, RF2 e RF3 (Fig. 4.10), correspondendo respetivamente aos lugares A10, G5 e L1 do auditório, cuja medição foi efetuada com o sistema AVAC em funcionamento. Posteriormente, o mesmo foi realizado com o sistema desligado.

Em ambas as situações, o sonómetro foi colocado a uma altura de aproximadamente 1,20 metros (altura típica considerada, simulando a posição média da cabeça de um espectador) com auxílio do tripé portátil. Para cada ponto foram efetuadas medições dos níveis de pressão sonora e registados valores para bandas de frequência de 1/3 de oitava, num intervalo de 63 a 8000 Hz.

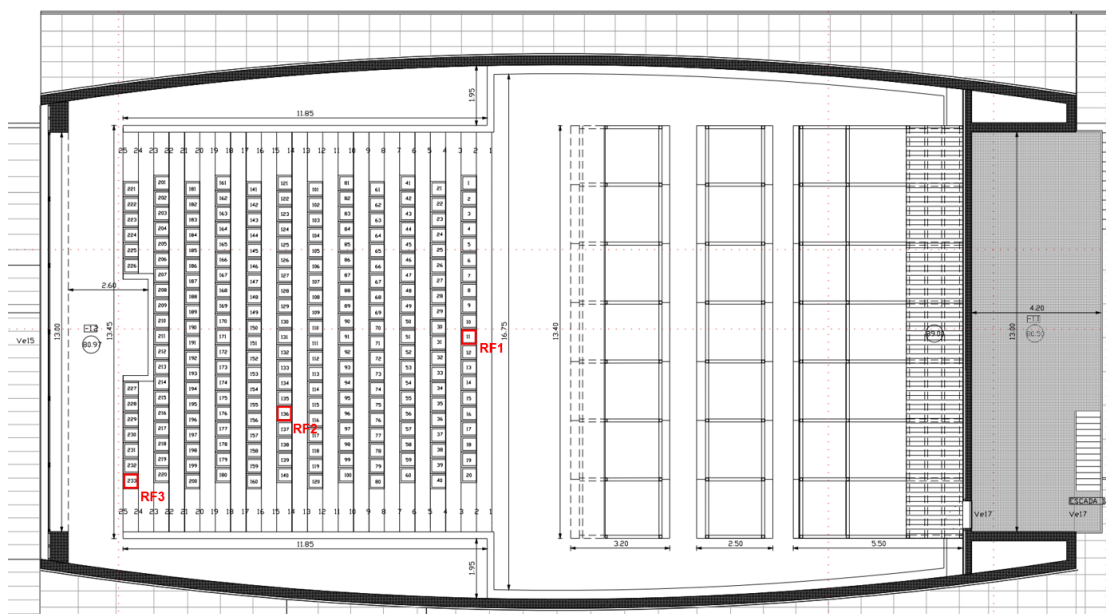


Fig. 4.10 - Planta do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto com a localização dos três pontos para a avaliação do ruído de fundo com o sistema AVAC ligado e desligado [adaptado de 44]

4.2.3.2. STI / TEMPO DE REVERBERAÇÃO / CLARIDADE / DEFINIÇÃO / TEMPO CENTRAL

A partir de um mesmo ensaio foram medidos com e sem o sistema AVAC os valores dos parâmetros STI, Tempo de Reverberação, Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}) e Tempo Central (TS), com recurso à fonte sonora, ao sonómetro e ao *software* DIRAC. A fonte sonora foi posicionada no eixo central do palco, emitindo ruído branco por 10 segundos em cada medição. O sonómetro, funcionando como recetor, operou da mesma forma que no ensaio anterior. Por fim, o tratamento de dados foi efetuado pelo DIRAC.

O tempo de reverberação é obtido por extrapolação a partir do decaimento de 20 ou de 30 dB, designando-se por T_{20} ou T_{30} , respetivamente. Deste modo, o sonómetro regista o tempo de decaimento de 20 ou 30 dB e o tempo de reverberação corresponde ao valor resultante da extrapolação para 60 dB.

Relativamente à localização dos pontos de estudo, o processo foi análogo ao ensaio anterior. As medições foram efetuadas com o sistema AVAC ligado e posteriormente desligado, correspondendo os lugares A10, G5 e L1 respetivamente às posições designadas por P1, P2 e P3 (Fig. 4.11).

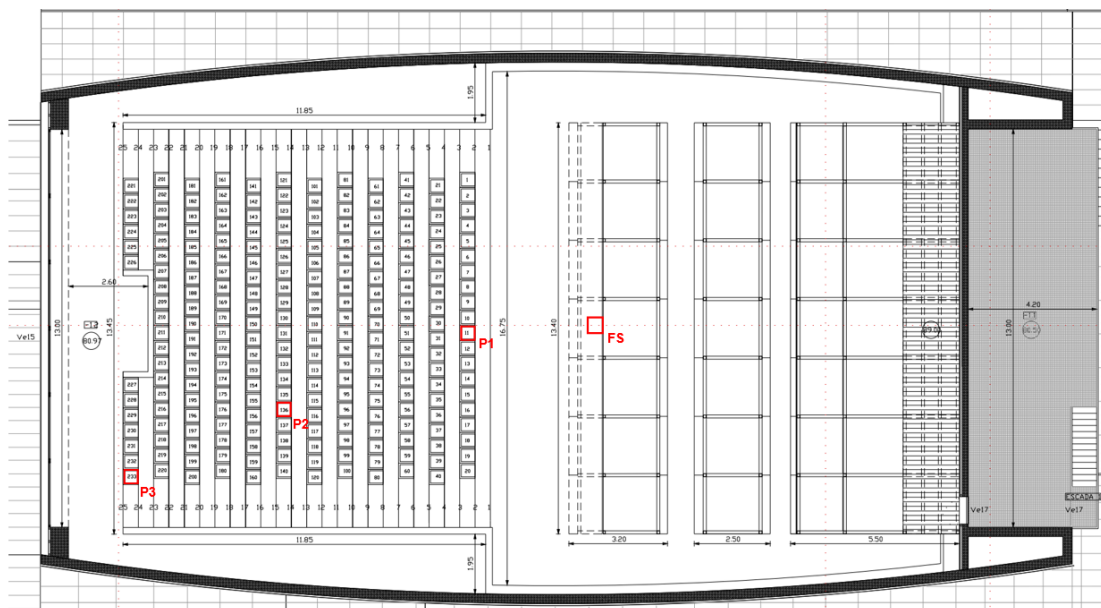


Fig. 4.11 - Planta do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto com a localização da fonte sonora (FS) e dos três pontos para a avaliação dos parâmetros STI, TR, C_{80} , D50 e TS com o sistema AVAC ligado e desligado [adaptado de 44]

5

RESULTADOS

5.1. RUÍDO DE FUNDO

Assim como anteriormente referido, neste caso de estudo a avaliação do ruído de fundo passa pela análise dos parâmetros acústicos nível de pressão sonora e nível sonoro. Os quadros 5.1 e 5.2 apresentam os resultados das medições por bandas de frequência de 1/3 de oitava para os diferentes pontos de medição sem e com o sistema AVAC em funcionamento, respetivamente. Nestes quadros constam ainda os valores do nível de pressão sonora contínuo equivalente sem e com a ponderação do filtro A (L_{eq} e L_{Aeq}). Para ambos os casos, as medições tiveram uma duração aproximada de 10 minutos.

Nas Fig. 5.1 e 5.2 encontram-se representados graficamente os valores dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo, respetivamente, sem e com o sistema AVAC ligado.

Na ausência da atividade do sistema AVAC (Fig. 5.1) observa-se um comportamento decrescente e semelhante entre os três pontos de medição com o aumento da frequência, sendo que as variações de RF2 (fila do meio) e RF3 (última fila) são coincidentes na maior parte dos casos, diferenciando-se de RF1 (primeira fila). Para este cenário, verifica-se ainda um comportamento crescente de todos os pontos no limite das altas frequências.

Pela análise da Fig. 5.2, verifica-se que o ruído de fundo pontos de medição RF1 e RF2 apresenta um comportamento equivalente, contando com um crescimento diminuto nas primeiras bandas de frequências (até 31 Hz) e decrescendo ao longo das restantes. Em oposição, os resultados do ponto RF3 apresentam um comportamento decrescente ao longo de toda a gama do audível, com especial destaque para as primeiras bandas de frequência, nas quais as anteriores exibem um crescimento. A partir dos 50 Hz, a variação dos valores para os três pontos torna-se praticamente idêntica.

Assim, é possível concluir que para ambas as situações o nível de ruído e fundo não varia significativamente conforme a posição do espectador, excetuando no caso das frequências mais graves e com o sistema AVAC em funcionamento, nas quais este é mais sentido tanto na zona fronteira como na zona intermédia da plateia.

Quadro 5.1 - Níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), sem o sistema AVAC ligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/3 de oitava e nível de pressão sonora contínuo equivalente, sem e com a ponderação do filtro A (L_{eq} e L_{Aeq}).

Lruído de fundo (dB) sem AVAC								
Frequência (Hz)	Sem filtro A				Com filtro A			
	Posição			Média Energética	Posição			Média Energética
	RF1	RF2	RF3		RF1	RF2	RF3	
20	34,2	35,1	35,1	34,8	-16,3	-15,4	-15,4	-15,7
25	39,2	37,9	37,5	38,2	-5,5	-6,8	-7,2	-6,5
31	35,4	34,6	34,1	34,7	-4,0	-4,8	-5,3	-4,7
40	37,8	37,1	36,5	37,1	3,2	2,5	1,9	2,5
50	32,8	32,3	32,7	32,6	2,6	2,1	2,5	2,4
63	29,6	30,7	30,8	30,4	3,4	4,5	4,6	4,2
80	24,8	25,4	25,8	25,3	2,3	2,9	3,3	2,8
100	24,1	23,7	23,7	23,8	5,0	4,6	4,6	4,7
125	23,6	23,0	23,6	23,4	7,5	6,9	7,5	7,3
160	20,3	20,1	20,2	20,2	6,9	6,7	6,8	6,8
200	16,8	17,7	18,1	17,5	5,9	6,8	7,2	6,6
250	16,9	18,0	19,8	18,2	8,3	9,4	11,2	9,6
315	14,9	14,7	15,2	14,9	8,3	8,1	8,6	8,3
400	13,7	14,0	14,6	14,1	8,9	9,2	9,8	9,3
500	14,7	14,5	14,7	14,6	11,5	11,3	11,5	11,4
630	9,4	10,5	11,0	10,3	7,5	8,6	9,1	8,4
800	9,9	11,2	11,5	10,9	10,7	12,0	12,3	11,7
1.000	8,5	8,5	8,9	8,6	8,5	8,5	8,9	8,6
1.250	8,3	8,6	9,0	8,6	8,9	9,2	9,6	9,2
1.600	7,0	7,1	7,6	7,2	8,0	8,1	8,6	8,2
2.000	6,6	6,7	7,7	7,0	7,8	7,9	8,9	8,2
2.500	9,6	8,9	9,7	9,4	10,9	10,2	11,0	10,7
3.150	7,5	7,4	7,8	7,6	8,7	8,6	9,0	8,8
4.000	8,0	7,8	8,1	8,0	9,0	8,8	9,1	9,0
5.000	8,2	8,0	8,1	8,1	8,7	8,5	8,6	8,6
6.300	8,0	8,4	8,5	8,3	7,9	8,3	8,4	8,2
8.000	8,7	8,1	8,7	8,5	7,6	7,0	7,6	7,4
10.000	9,8	9,2	8,0	9,0	7,3	6,7	5,5	6,5
12.500	9,5	9,1	9,0	9,2	5,2	4,8	4,7	4,9
16.000	9,9	14,1	13,5	12,5	3,3	7,5	6,9	5,9
20.000	11,0	14,0	13,8	12,9	1,7	4,7	4,5	3,6
L_{eq} (dB)	47,5	48,4	49,2	48,4	/	/	/	/
L_{Aeq} (dB)	/	/	/	/	22,1	22,2	22,6	22,3

Quadro 5.2 - Níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), com o sistema AVAC ligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/3 de oitava e nível de pressão sonora contínuo equivalente, sem e com a ponderação do filtro A (L_{eq} e L_{Aeq})

Lruído de fundo (dB) com AVAC									
Frequência (Hz)	Sem filtro A				Com filtro A				ΔL (= com – sem AVAC)
	Posição			Média Energética	Posição			Média Energética	
	RF1	RF2	RF3		RF1	RF2	RF3		
20	49,0	47,6	49,4	48,7	-1,5	-2,9	-1,1	-1,8	13,9
25	52,6	50,6	47,1	50,1	7,9	5,9	2,4	5,4	11,9
31	55,7	53,3	46,8	51,9	16,3	13,9	7,4	12,5	17,2
40	46,7	45,7	41,4	44,6	12,1	11,1	6,8	10,0	7,5
50	44,8	45,4	45,6	45,3	14,6	15,2	15,4	15,1	12,7
63	45,7	46,3	44,8	45,6	19,5	20,1	18,6	19,4	15,2
80	38,7	38,2	39,5	38,8	16,2	15,7	17,0	16,3	13,5
100	34,6	34,1	32,3	33,7	15,5	15,0	13,2	14,6	9,8
125	28,1	28,0	28,5	28,2	12,0	11,9	12,4	12,1	4,8
160	25,6	25,1	24,8	25,2	12,2	11,7	11,4	11,8	5,0
200	25,7	25,1	26,1	25,6	14,8	14,2	15,2	14,7	8,1
250	24,2	23,9	25,6	24,6	15,6	15,3	17,0	16,0	6,3
315	21,0	20,1	21,2	20,8	14,4	13,5	14,6	14,2	5,8
400	19,8	19,3	19,6	19,6	15,0	14,5	14,8	14,8	5,5
500	19,4	19,1	18,8	19,1	16,2	15,9	15,6	15,9	4,5
630	17,9	17,7	17,6	17,7	16,0	15,8	15,7	15,8	7,4
800	17,5	17,5	17,1	17,4	16,7	16,7	16,3	16,6	4,9
1.000	16,3	16,1	15,2	15,9	16,3	16,1	15,2	15,9	7,2
1.250	16,4	16,2	15,3	16,0	17,0	16,8	15,9	16,6	7,3
1.600	13,4	13,1	12,2	12,9	14,4	14,1	13,2	13,9	5,7
2.000	11,1	10,9	10,2	10,7	12,3	12,1	11,4	11,9	3,7
2.500	10,7	10,7	11,1	10,8	12,0	12,0	12,4	12,1	1,4
3.150	9,1	9,3	8,3	8,9	10,3	10,5	9,5	10,1	1,3
4.000	9,0	10,0	10,0	9,7	10,0	11,0	11,0	10,7	1,7
5.000	8,2	8,3	9,0	8,5	8,7	8,8	9,5	9,0	0,4
6.300	8,5	8,3	8,5	8,4	8,4	8,2	8,4	8,3	0,1
8.000	8,4	8,5	8,5	8,5	7,3	7,4	7,4	7,4	0,0
10.000	9,0	9,0	9,1	9,0	6,5	6,5	6,6	6,5	0,0
12.500	9,2	9,4	9,6	9,4	4,9	5,1	5,3	5,1	0,2
16.000	13,1	14,6	10,5	12,7	6,5	8,0	3,9	6,1	0,2
20.000	13,4	14,3	11,9	13,2	4,1	5,0	2,6	3,9	0,3
Leq (dB)	65,2	66,4	68,4	66,7	/	/	/	/	18,3
LAeq (dB)	/	/	/	/	28,5	28,3	28,0	28,3	6,0

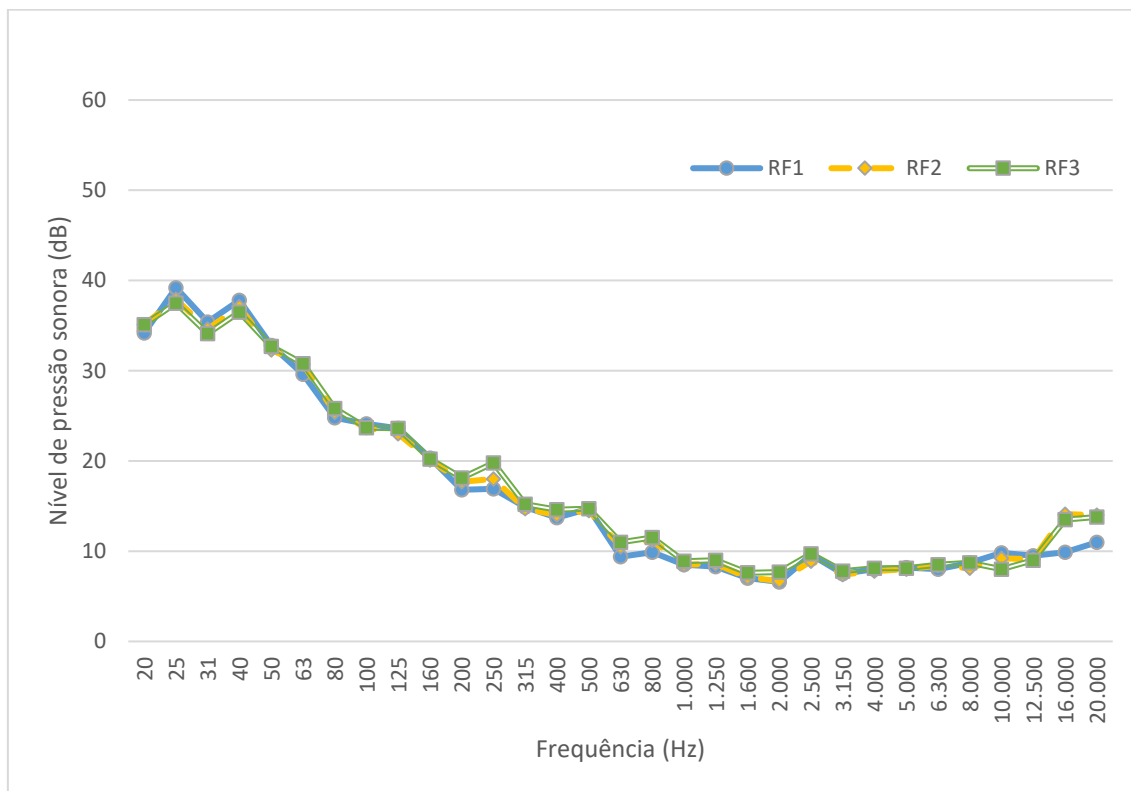


Fig. 5.1 - Níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), com sistema AVAC desligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/3 de oitava

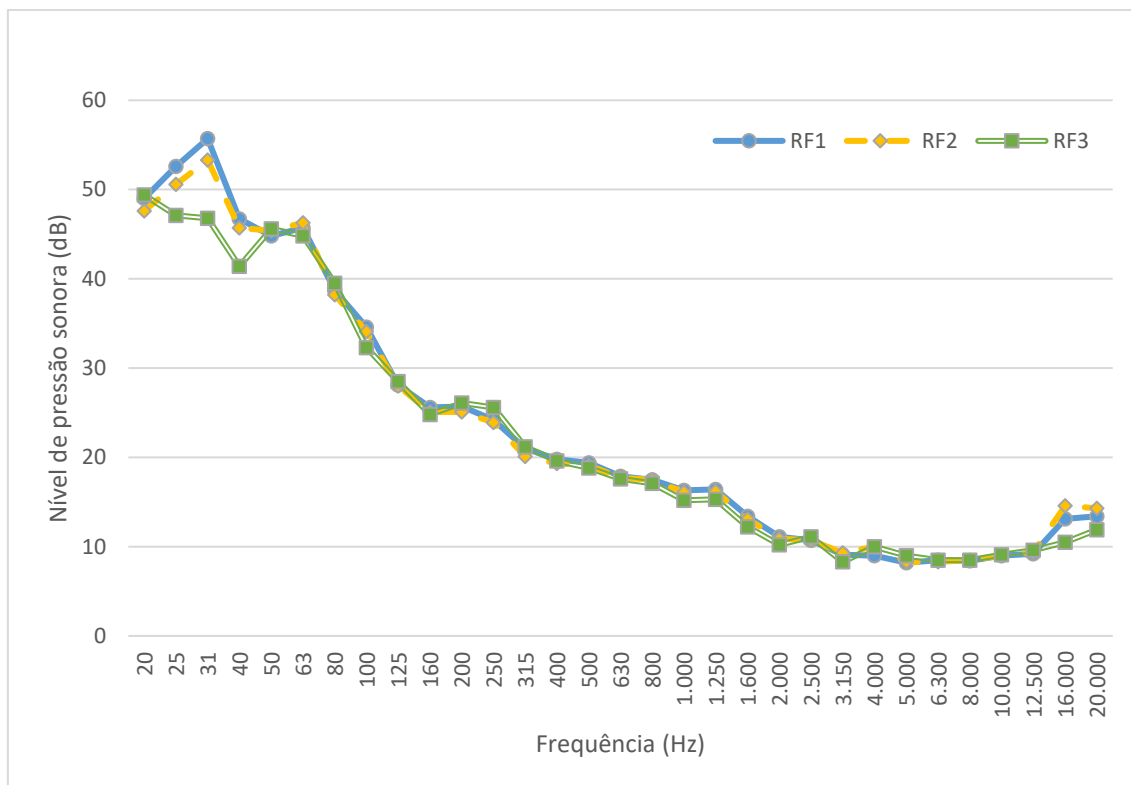


Fig. 5.2 - Níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), com sistema AVAC ligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/3 de oitava

Comparando os gráficos, é notória a disparidade entre o valor máximo do primeiro gráfico e o valor máximo do segundo, indicando que o cenário no qual o sistema AVAC se encontra ligado é consideravelmente mais prejudicial para a qualidade acústica do Grande Auditório. Face ao exposto e de modo a facilitar a análise comparativa, no gráfico da Fig. 5.3 encontram-se representados os valores médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo para ambos os cenários, bem como a diferença entre estes.

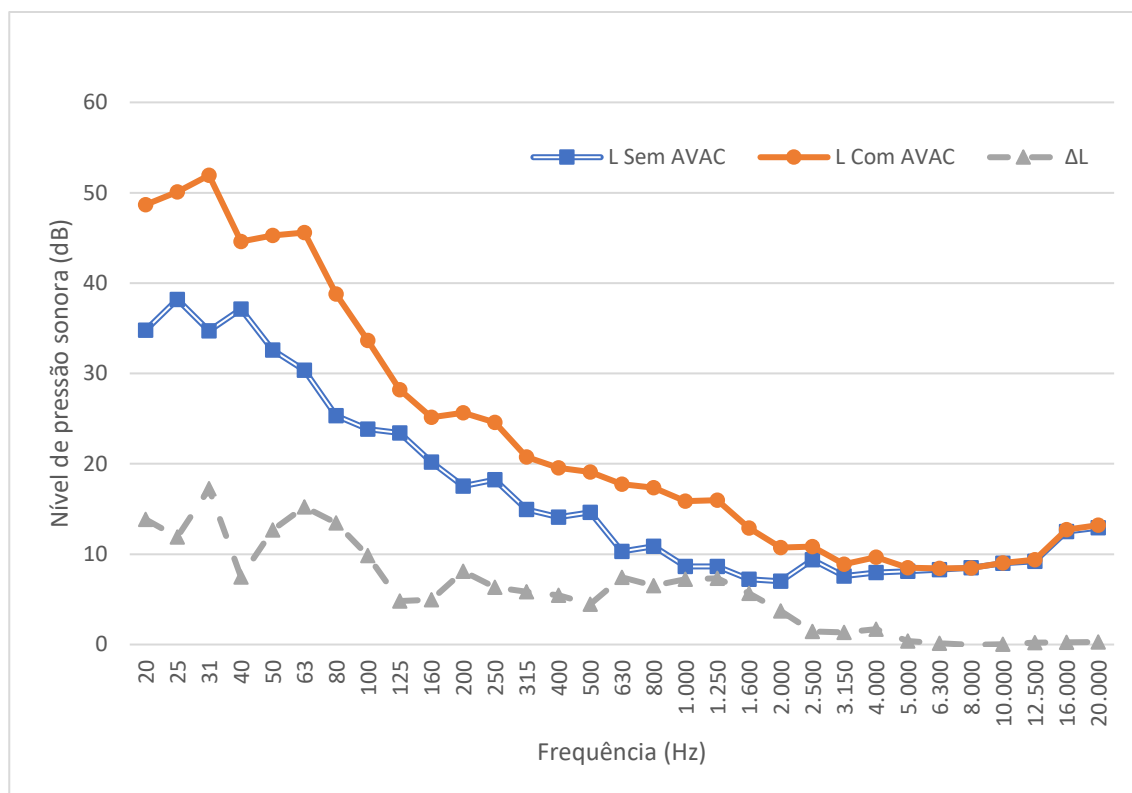


Fig. 5.3 - Valores médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) com e sem o sistema AVAC em funcionamento e a diferença entre ambos para bandas de frequência de 1/3 de oitava

Observando a Fig. 5.3, verifica-se uma diferença considerável entre os valores apresentados nas baixas frequências e com tendência a estabilizar a partir dos 2500 Hz. Em ambas as situações, o ruído de fundo apresenta um comportamento decrescente em grande parte da gama do audível, sendo que nas altas frequências assume um comportamento crescente, porém não muito significativo.

Adicionalmente, e recorrendo novamente aos quadros 5.1 e 5.2, verifica-se que o valor da média energética de L_{Aeq} com sistema AVAC em funcionamento é energeticamente cerca de 4 vezes superior (6 dB) ao valor do mesmo parâmetro com o sistema desligado. Este parâmetro é naturalmente menor que o L_{eq} sem a ponderação (18 dB), uma vez que o filtro A visa aproximar os ruídos à resposta auditiva humana, associada a uma perda acentuada da sensibilidade às baixas frequências.

Na Fig. 5.4 encontram-se graficamente representados os valores médios do parâmetro L_{Aeq} sem e com o AVAC em funcionamento, bem como a diferença entre estas situações. Com base na observação do gráfico, verifica-se uma diferença abrupta entre os valores para as baixas frequências (até 15 dB), sendo estas algumas das mais prejudiciais para o conforto acústico do público aquando da atividade do sistema de ventilação. A partir dos 125 Hz, o ruído de fundo passa a assumir um comportamento semelhante para ambas as situações, tendendo a diminuir e a estabilizar-se nas altas frequências desde os 2500 Hz.

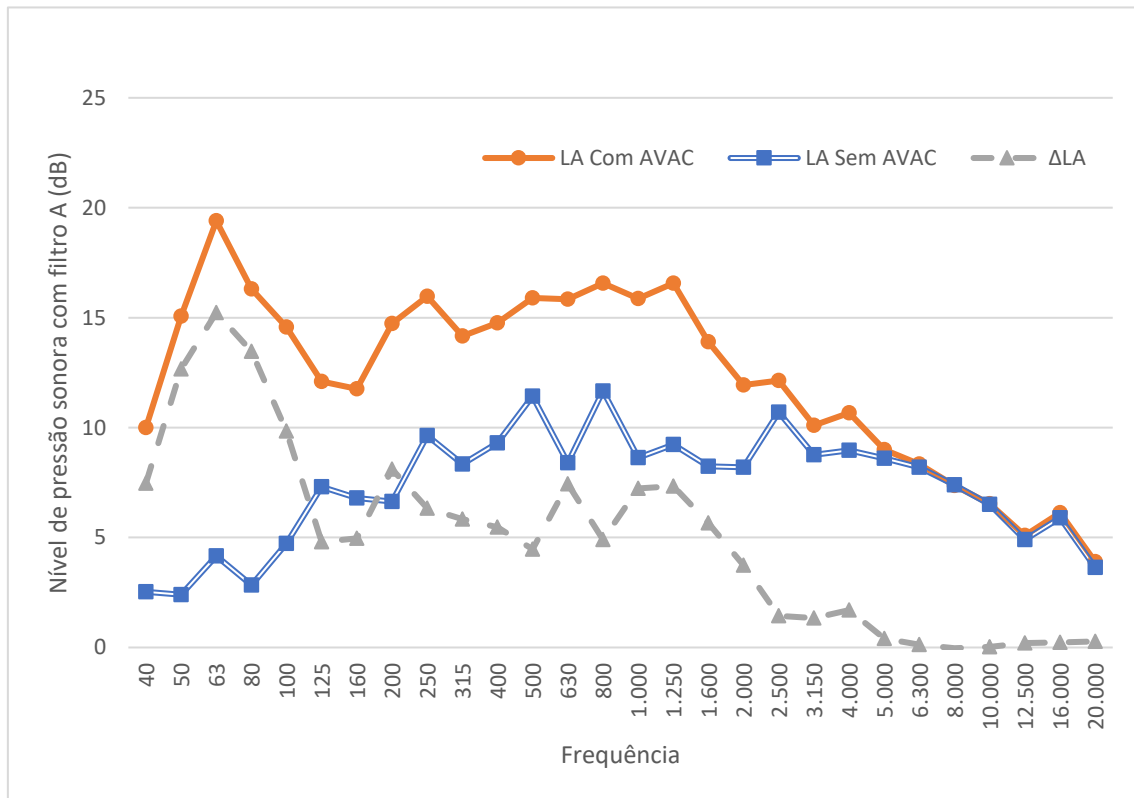


Fig. 5.4 - Valores médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) com a ponderação do filtro A com e sem o sistema AVAC em funcionamento e a diferença entre ambos para bandas de frequência de 1/3 de oitava

A legislação RRAE define limites máximos para o nível sonoro contínuo equivalente do ruído ambiente no interior do recinto e do ruído particular associado ao funcionamento de sistemas AVAC, com os quais o Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto se encontra em conformidade (quadro 5.3).

Quadro 5.3 - Análise do cumprimento do pelo RRAE [35]

	L_{Aeq} (dB) Limite RRAE	L_{Aeq} (dB) CMUSP	Verificação
Ruído ambiente interior sem AVAC	≤ 30	22	Cumpre
Ruído particular com AVAC	≤ 30	28	Cumpre

5.2. CURVAS DE INCOMODIDADE

As curvas NC e NR (*Noise Criterion* e *Noise Rating*), introduzidas no subcapítulo 2.5, são critérios acústicos que permitem avaliar a incomodidade associada ao ruído de fundo proveniente dos equipamentos integrantes de um determinado espaço. As curvas NC são definidas para bandas de frequência entre os 63 e os 8.000 Hz, enquanto as curvas NR, para além dessas, abrangem também a banda dos 31,5 Hz.

A sobreposição das curvas de incomodidade com a curva dos valores médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo com o sistema AVAC em funcionamento permitiu aferir os respetivos valores dos parâmetros e proceder à sua comparação com os valores recomendados. Nas Fig. 5.5 e 5.6 apresentam-se as sobreposições com as curvas NC e NR, respetivamente. Por fim, de forma a facilitar análise comparativa, os resultados obtidos foram organizados nos quadros 5.4 e 5.5.

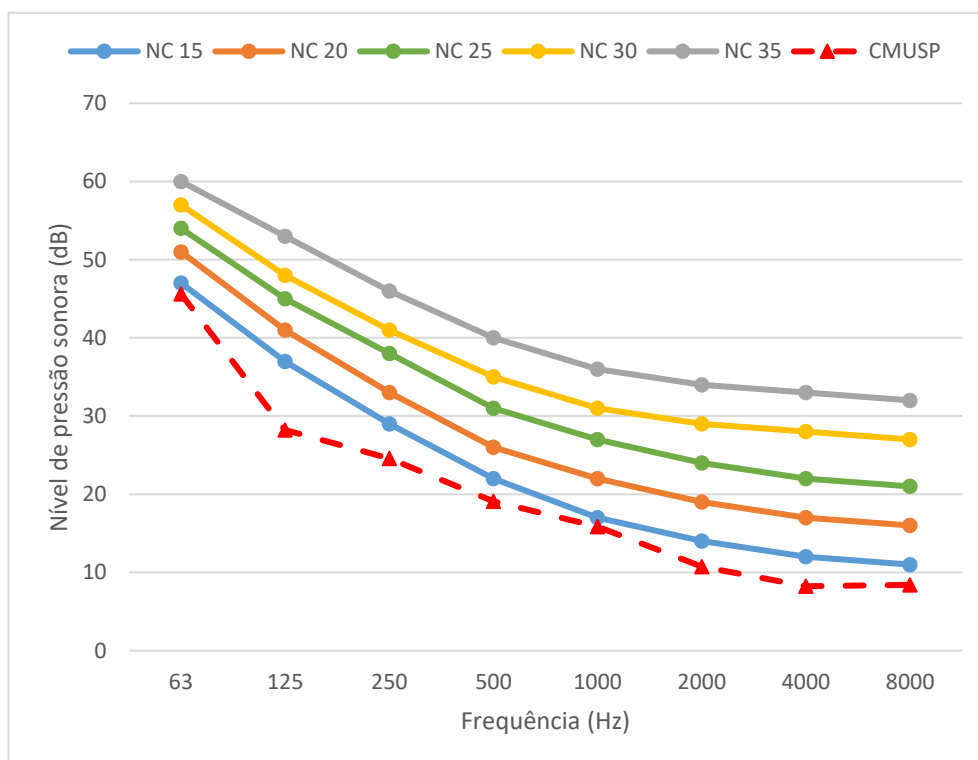


Fig. 5.5 - Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo com o sistema AVAC em funcionamento com as curvas NC

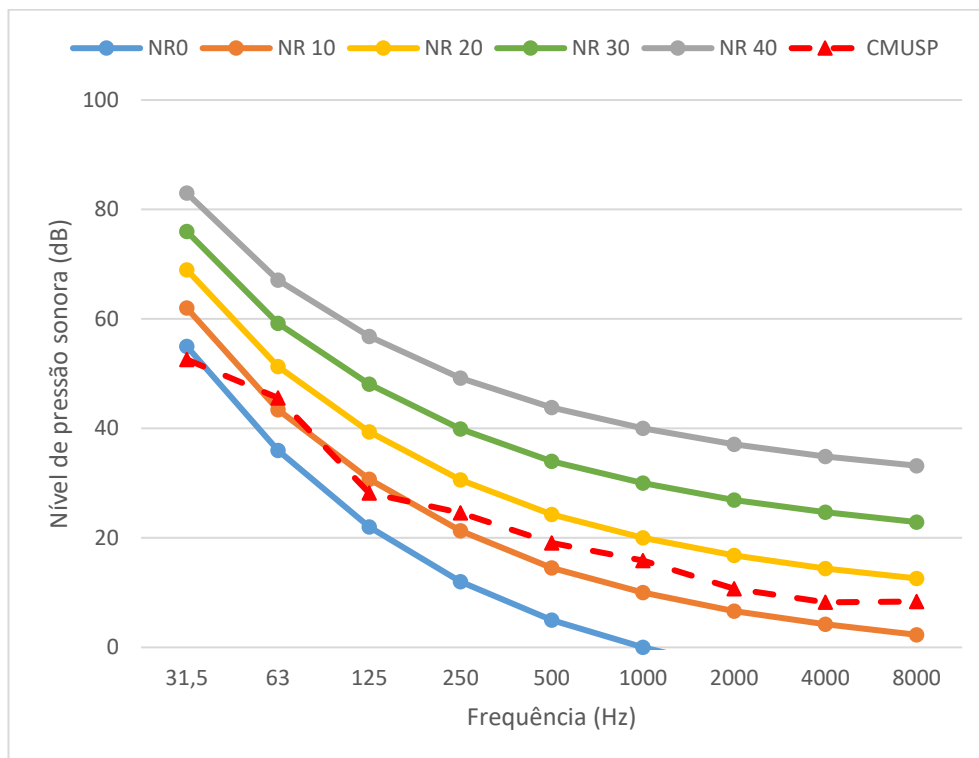


Fig. 5.6 - Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo com o sistema AVAC em funcionamento com as curvas NR

Quadro 5.4 - Valores máximos recomendados para o NC e análise ao seu cumprimento [1]

Utilização	Valor limite máximo de NC	NC Grande Auditório	Verificação
Salas de concerto	20	15	Cumpre
Pequenos auditórios	[20-30]		Cumpre
Pequenas salas de conferência	[30-35]		Cumpre

Quadro 5.5 - Valores máximos recomendados para NR e análise ao seu cumprimento [13], [45]

Utilização	Valor limite máximo de NR	NR Grande Auditório	Verificação
Salas de concerto	25	16	Cumpre
Pequenos auditórios (menos de 500 lugares)	25		Cumpre
Salas de conferência	30		Cumpre

5.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

5.3.1. SALA VAZIA

O quadro 5.6 apresenta os resultados das medições do Tempo de Reverberação (T_{30}) por bandas de frequência de 1/3 de oitava compreendidas num intervalo de 100 a 5000 Hz e as respetivas médias para os diferentes pontos de medição, encontrando-se a informação graficamente representa na Fig. 5.7. Posteriormente, os resultados foram adaptados para bandas de frequência de 1/1 de oitava, restringindo-se a um intervalo de 125 a 4000 Hz (quadro 5.7), sendo também alvo de representação gráfica (Fig. 5.8). Para a análise deste parâmetro acústico foi apenas considerado o cenário com o sistema AVAC desligado.

Quadro 5.6 - Resultados do Tempo de Reverberação (T_{30}), em cada ponto de medição, por bandas de frequência de 1/3 de oitava, incluindo os respetivos desvio-padrão e média

T_{30} (s)					
Frequência (Hz)	Posições			Desvio-padrão	Média
	P1	P2	P3		
100	1,39	1,41	1,25	0,07	1,35
125	1,21	1,39	1,20	0,09	1,26
160	1,08	1,30	0,99	0,13	1,13
200	1,08	0,98	1,02	0,04	1,03
250	0,97	1,05	1,01	0,03	1,01
315	0,97	1,21	0,97	0,11	1,05
400	1,15	1,09	0,98	0,07	1,08
500	1,12	1,25	1,07	0,08	1,15
630	1,32	1,37	1,30	0,03	1,33
800	1,34	1,41	1,38	0,03	1,38
1000	1,37	1,42	1,33	0,04	1,37
1250	1,37	1,40	1,30	0,04	1,36
1600	1,28	1,34	1,32	0,03	1,31
2000	1,26	1,23	1,22	0,02	1,24
2500	1,15	1,18	1,21	0,02	1,18
3150	1,25	1,04	1,02	0,10	1,10
4000	1,13	1,05	0,91	0,09	1,03
5000	1,06	0,95	0,86	0,08	0,95

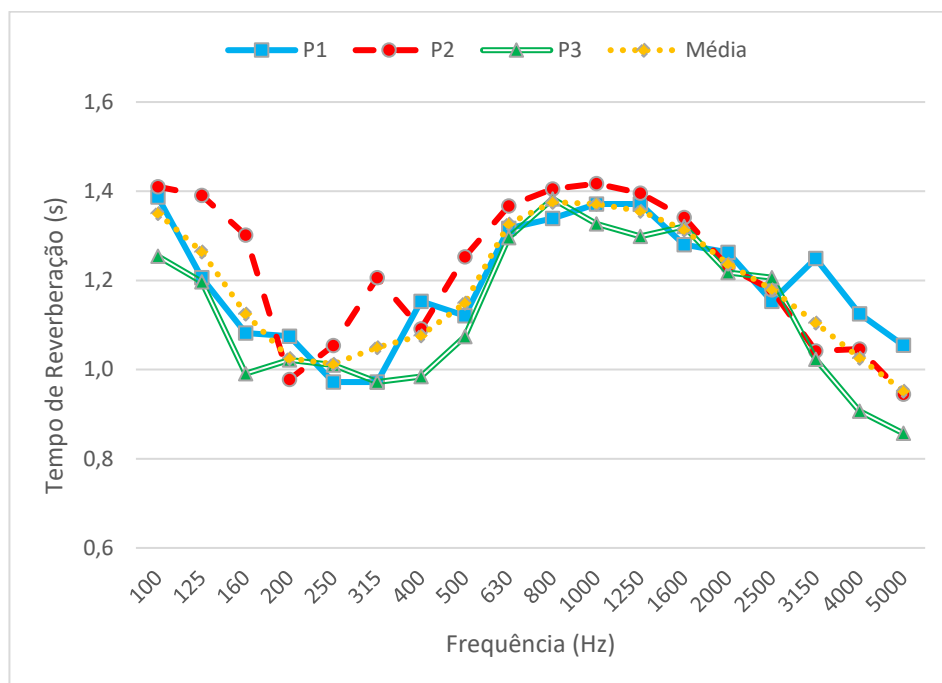


Fig. 5.7 - Resultados do Tempo de Reverberação (TR), em cada ponto de medição, por bandas de frequência de 1/3 de oitava e respetiva média

Quadro 5.7 - Resultados do Tempo de Reverberação (T_{30}), em cada ponto de medição, por bandas de frequência de 1/1 de oitava compreendidas num intervalo de 125 a 4000 Hz, incluindo os respetivos desvio-padrão e média

T_{30} (s)					
Frequência (Hz)	Posições			Desvio-padrão	Média
	P1	P2	P3		
125	1,23	1,37	1,15	0,09	1,25
250	1,01	1,08	1,00	0,04	1,03
500	1,20	1,24	1,12	0,05	1,18
1000	1,36	1,41	1,34	0,03	1,37
2000	1,23	1,25	1,25	0,01	1,24
4000	1,14	1,01	0,93	0,09	1,03
				TR [500 - 1000 Hz] (s)	1,28
				TR [500 - 2000 Hz] (s)	1,27

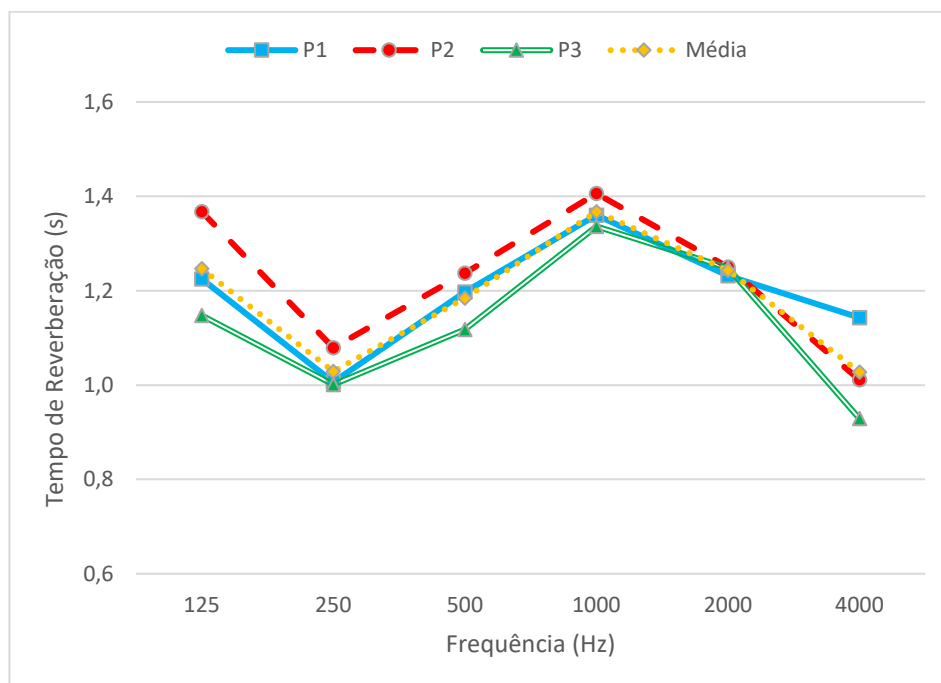


Fig. 5.8 - Resultados do Tempo de Reverberação (TR), em cada ponto de medição, por bandas de frequência de 1/1 de oitava compreendidas num intervalo de 125 a 4000 Hz e respetiva média

Observando a Fig. 5.7, verifica-se um comportamento oscilante, porém semelhante, entre os três pontos de medição ao longo da gama do audível, assumindo o ponto P2 (fila do meio) os valores mais elevados do tempo de reverberação para a maior parte dos casos, passando o ponto P1 (primeira fila) a ocupar essa posição nas altas frequências. Adicionalmente, destaca-se uma variação praticamente idêntica entre os três pontos no intervalo de 630 a 2500 Hz, sendo os valores mais elevados alcançados para a banda de 1000 Hz. O comportamento semelhante dos pontos de medição é enfatizado pela sua representação gráfica para bandas de frequência 1/1 de oitava, presente na Fig. 5.8.

O RRAE estabelece requisitos em relação ao tempo de reverberação máximo em função do volume para espaços cuja principal função seja a realização de atividades assentes na “oratória”. O Grande Auditório do CMUSP apresenta um volume de aproximadamente 3192 m³. Aplicando este valor à fórmula definida para o cálculo do tempo de reverberação para espaços com volumes compreendidos entre os 250 e os 9000 m³, obtém-se um tempo de reverberação médio máximo de 0,91 segundos para bandas de 1/1 de oitava centradas nas frequências de 500 a 2000 Hz.

Para o caso em estudo, o valor do tempo de reverberação obtido para a gama de frequências anteriormente mencionada é de 1,27 segundos. Relativamente a avaliações *in situ*, o RRAE refere que os valores obtidos para o tempo de reverberação devem ser alvo da subtração de um fator de incerteza I, o qual para o volume em questão corresponde a 35%. Assim, após a aplicação da incerteza, obtém-se um resultado de 0,95 segundos, pelo que o Grande Auditório não se encontra em conformidade com os requisitos estabelecidos. A informação referida encontra-se esquematizada no quadro 5.8.

De realçar novamente que o caso em estudo, apesar de também realizar atividades assentes na “oratória”, é um espaço prioritariamente destinado para a música, pelo que não é obrigado a cumprir com este requisito legislativo.

Quadro 5.8 - Verificação do cumprimento do RRAE para o Tempo de Reverberação (TR) para espaços com função assente na “oratória”

Frequência em bandas de 1/1 de oitava (Hz)	Tempo de Reverberação médio medido (s)	Tempo de Reverberação medido com a Incerteza de 35% (s)	Tempo de Reverberação máximo do RRAE (s)	Verificação para a “oratória”
500	1,27	0,95	0,91	Não cumpre
1000				
2000				

5.3.2. SALA OCUPADA

A verificação de conformidade com o RRAE é feita com a sala vazia, no entanto é de interesse prático compreender qual será o comportamento dos valores do tempo de reverberação quando esta se encontre totalmente ocupada, uma vez que se prevê que essa seja a realidade na maior parte dos espetáculos.

Deste modo, utilizando os valores apresentados do TR medidos para bandas de frequência de 1/1 de oitava e conhecendo o volume da sala, procedeu-se ao cálculo da absorção sonora equivalente com a sala vazia através da fórmula de Sabine (2.12). No caso em que o auditório se encontra ocupado, pode-se afirmar que a absorção sonora será maior, pelo que a área da plateia foi aproximada assumindo uma faixa absorvente de 0,5 metros em todo o perímetro de cadeiras, obtendo-se o novo valor de 180 m².

Assim, recorrendo aos parâmetros apresentados no quadro 5.9 e novamente à fórmula de Sabine, foi possível calcular os valores da absorção sonora equivalente e do TR com a sala totalmente ocupada (quadro 5.10). É de referir que os valores utilizados para o coeficiente de absorção sonora (α) para as cadeiras vazias e ocupadas são os propostos por diferentes autores para estofos espessos para bandas de frequência entre os 125 e os 4000 Hz. [1]

Quadro 5.9 - Parâmetros utilizados para o cálculo do Tempo de Reverberação (TR) com a sala totalmente ocupada

Parâmetros						
Área da plateia (S ; m ²)	180					
Volume da sala (V ; m ³)	3192					
Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α (cadeira vazia)	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79
α (cadeira ocupada)	0,76	0,83	0,88	0,91	0,91	0,89
$\Delta\alpha$	0,04	0,04	0,05	0,07	0,08	0,10
$\Delta A = \Delta\alpha \cdot S$ (m ²)	7	7	9	13	14	18

Quadro 5.10 - Cálculo do novo Tempo de Reverberação (TR) com a sala totalmente ocupada para bandas de frequência de 1/1 de oitava entre os 125 e os 4000 Hz

Frequência (Hz)	TR sala vazia (s)	A sala vazia (m2)	A sala ocupada (m2) *	TR sala ocupada (s) *	TR [500-2k Hz] (s) *
125	1,25	409	416	1,23	1,23
250	1,03	496	503	1,02	
500	1,18	433	442	1,16	
1000	1,37	373	385	1,32	
2000	1,24	412	426	1,20	
4000	1,03	496	514	0,99	
* Previsão					

A partir do quadro 5.10, observa-se que o tempo de reverberação médio para as frequências de 500, 1000 e 2000 Hz passaria de 1,27 para 1,23 segundos, apresentando, assim, uma diferença pouco considerável. A Fig. 5.9 exhibe a diferença entre os tempos de reverberação com a sala ocupada e vazia para as bandas de 1/1 de oitava, sendo notório o seu impacto nas médias frequências.

Por último, procedeu-se à análise comparativa dos tempos de reverberação recomendados em função do tipo de utilização com os tempos de reverberação médios com a sala vazia e com a sala ocupada. Neste caso, utilizou-se o tempo de reverberação médio para as frequências de 500 e 1000 Hz para bandas de 1/1 de oitava, obtendo-se os valores de 1,28 e 1,24 segundos. A informação encontra-se organizada no quadro 5.11.

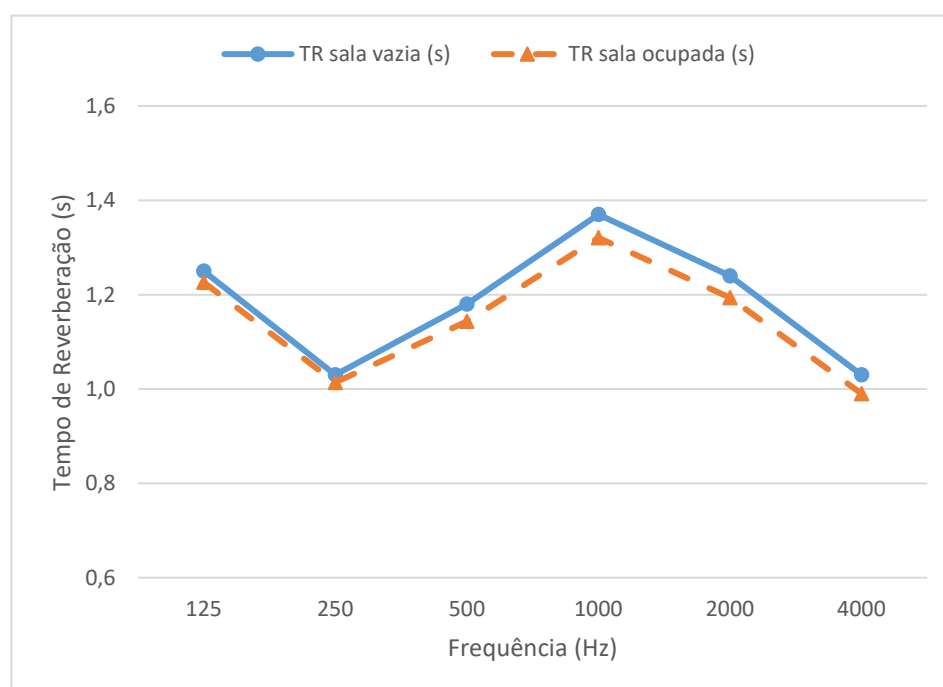


Fig. 5.9 - Tempo de Reverberação (TR) em condições de sala vazia e 100% ocupada (valor previsto) para bandas de frequência de 1/1 de oitava compreendidas entre os 125 e os 4000 Hz

Quadro 5.11 - Comparação entre valores médios do tempo de reverberação médio (500 e 1000 Hz) em condições de sala vazia e ocupada com os valores recomendados em função do tipo de utilização

Função		Tempo de Reverberação ideal (s) (500-1000 Hz) [1]	Comparação com o auditório vazio (TR ₅₀₀₋₁₀₀₀ Hz = 1,28 s)	Comparação com o auditório ocupado (TR ₅₀₀₋₁₀₀₀ Hz = 1,24 s)*
Auditório (palavra)		0,7-0,8	Desadequado	
Ópera	Não wagneriana	1,3-1,7	Adequado	Aceitável
	Wagner	1,8-1,9	Desadequado	
Música de câmara		1,4-1,7	Aceitável	
Música sinfónica	Barroca	1,4-1,6	Aceitável	
	Clássica	1,6-1,8	Tolerável	Desadequado
	Romântica	1,9-2,2	Desadequado	
	Moderna	1,4-1,9	Aceitável	
Música popular		0,8-1,0	Desadequado	Aceitável
Música de órgão		2,5-3,5	Desadequado	
Coros gregorianos		3 – 4	Desadequado	
* Previsão				

5.4. STI

Para a avaliação deste parâmetro os três pontos de estudo anteriormente mencionados voltam a ser alvo de medições diferenciadas relativamente às condições de funcionamento do sistema de ventilação. No quadro 5.12 apresentam-se os valores registados do STI e a média aritmética para cada ponto, assim como a média global relativa a cada cenário. A informação encontra-se graficamente representada na Fig. 5.10, contando esta ainda com a diferença entre os valores médios do STI com e sem o AVAC ligado. Para uma melhor compreensão dessa diferença foi organizado o quadro 5.13.

Quadro 5.12 - Resultados do STI, em cada ponto de medição, com e sem o sistema AVAC em funcionamento, incluindo os respetivos desvio-padrão e média

	Posições	STI masculino	STI feminino	Desvio-padrão	Média	Média global
Com AVAC	P1	0,67	0,71	0,02	0,69	0,58
	P2	0,52	0,54	0,01	0,53	
	P3	0,52	0,53	0,01	0,53	
Sem AVAC	P1	0,68	0,73	0,03	0,71	0,62
	P2	0,55	0,58	0,02	0,57	
	P3	0,58	0,60	0,01	0,59	

Quadro 5.13 - Diferença entre os valores médios do STI com e sem o sistema AVAC em funcionamento para cada ponto de medição ($\Delta\text{STI} = \text{com} - \text{sem AVAC}$)

	ΔP1	ΔP2	ΔP3	Média global	%
ΔSTI	-0,02	-0,03	-0,06	-0,04	-7

Observando o quadro 5.12 e a Fig. 5.10, verifica-se que os valores mais elevados de STI correspondem à posição P1 (primeira fila), o que seria expectável, dado que é o ponto que se encontra mais próximo e mais central em relação à fonte sonora, pelo que a inteligibilidade da palavra será aí percebida de uma forma mais clara. Deste modo, seria de esperar que o local com menor inteligibilidade correspondesse à posição P3 (última fila), visto que é a que se encontra mais afastada tanto da fonte sonora como da zona central. No entanto, a menor inteligibilidade da palavra ocorre na posição P2 (fila do meio), constatando-se assim que as reflexões sonoras favorecem quem se situa nos limites da plateia.

Considerando o quadro 2.9, constata-se que a atividade do sistema de ventilação exprime uma inteligibilidade *razoável*, ao contrário do cenário oposto, o qual se traduz numa *boa* inteligibilidade. Contudo, analisando o quadro 5.13 conclui-se que o sistema AVAC não afeta significativamente a inteligibilidade da palavra, sendo o seu funcionamento representado por uma diminuição do STI em aproximadamente 7%.

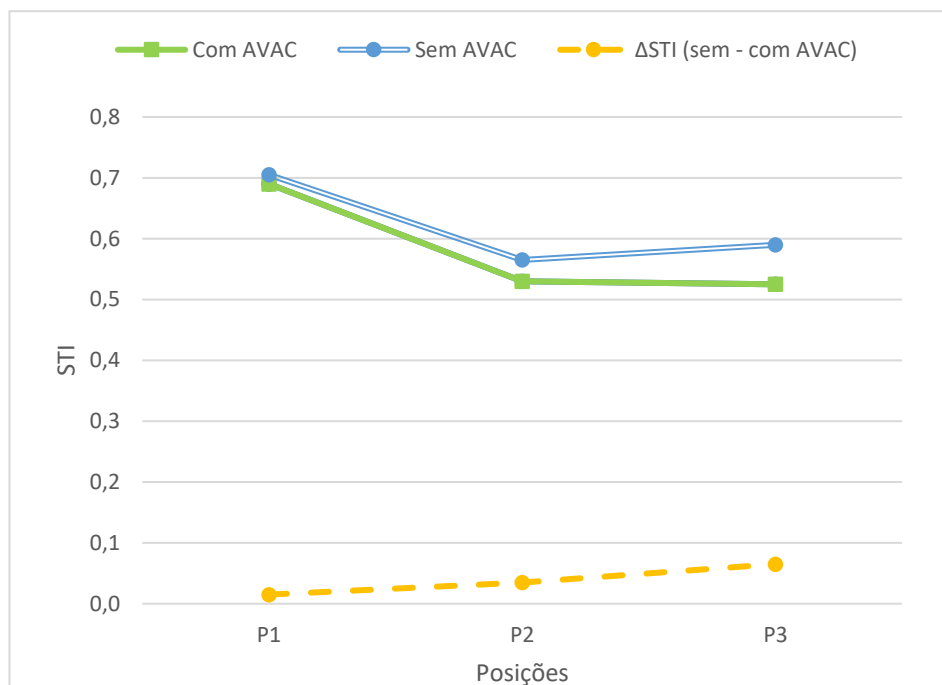


Fig. 5.10 - Resultados do STI, em cada ponto de medição, com e sem o sistema AVAC em funcionamento e diferença entre ambos

5.5. ÍNDICE DE ARTICULAÇÃO

De forma a complementar a análise em relação à inteligibilidade da palavra procedeu-se ao cálculo do parâmetro Índice de Articulação (*Articulation Index* - AI) tendo em conta o quadro 2.7. Os quadros 5.14 e 5.15 contêm os resultados obtidos das medições do nível de pressão sonora (L_p) para bandas de frequência de 1/3 de oitava de 200 a 5000 Hz associados à ausência e presença da atividade do sistema AVAC, respetivamente. Por observação dos mesmos, verifica-se que o funcionamento do sistema de ventilação em nada afeta os valores de AI.

Segundo o quadro 2.8, conclui-se que para ambos os cenários o Grande Auditório apresenta um grau de inteligibilidade *excelente*. No entanto, é de notar que este parâmetro não tem em conta a distância à fonte sonora, medindo a energia sonora equivalente a um só ponto, ao contrário do STI que mede cada ponto individualmente. Deste modo, verifica-se que o AI é bastante menos exato comparativamente com o STI para o espaço em questão. A aplicação deste método é mais indicada para salas pequenas, tais como escritórios e restaurantes. A obtenção deste parâmetro surgiu meramente como complemento para análise do caso de estudo.

Quadro 5.14 - Resultados do AI sem o sistema AVAC ligado para bandas de frequência de 1/3 de oitava compreendidas num intervalo de 200 a 5000 Hz

Frequência (Hz)	Nível de conversação (nc)	Peso (p)	Ruído de fundo (rf) em dB	nc-rf (máx. 30)	(nc-rf)*p
200	67	4	17,5	30	120
250	68	10	18,2	30	300
315	69	10	14,9	30	300
400	70	14	14,1	30	420
500	68	14	14,6	30	420
630	66	20	10,3	30	600
800	65	20	10,9	30	600
1000	64	24	8,6	30	720
1250	62	30	8,6	30	900
1600	60	37	7,2	30	1110
2000	59	37	7,0	30	1110
2500	57	34	9,4	30	1020
3150	55	34	7,6	30	1020
4000	53	24	8,0	30	720
5000	51	20	8,1	30	600
				Σ	9960
				AI = $\Sigma/10000$	1,00

Quadro 5.15 - Resultados do AI com o sistema AVAC ligado para bandas de frequência de 1/3 de oitava compreendidas num intervalo de 200 a 5000 Hz

Frequência (Hz)	Nível de conversação (nc)	Peso (p)	Ruído de fundo (rf) em dB	nc-rf (máx. 30)	(nc-rf)*p
200	67	4	25,6	30	120
250	68	10	24,6	30	300
315	69	10	20,8	30	300
400	70	14	19,6	30	420
500	68	14	19,1	30	420
630	66	20	17,7	30	600
800	65	20	17,4	30	600
1000	64	24	15,9	30	720
1250	62	30	16,0	30	900
1600	60	37	12,9	30	1110
2000	59	37	10,7	30	1110
2500	57	34	10,8	30	1020
3150	55	34	8,9	30	1020
4000	53	24	8,2	30	720
5000	51	20	8,1	30	600
				Σ	9960
				AI = $\Sigma/10000$	1,00

5.6. CLARIDADE

A Claridade (C_{80}) é um parâmetro acústico relacionado com a “inteligibilidade” da música, pelo que se trata de um aspeto fundamental a ser analisado para o caso em estudo. Os quadros 5.16 e 5.17 contêm os resultados obtidos das medições para bandas de frequência de 1/1 de oitava compreendidas num intervalo de 125 a 4000 Hz sem e com o sistema AVAC ligado, respetivamente. As Fig. 5.11 e 5.12 exibem graficamente a informação contida nesses quadros, estando também presente uma comparação entre os dois cenários (Fig. 5.13). O quadro 5.16 explicita em pormenor a diferença entre os valores médios da C_{80} com e sem o AVAC ligado.

Quadro 5.16 - Resultados da Claridade (C_{80}), em cada ponto de medição, sem o sistema AVAC ligado, incluindo os respetivos desvio-padrão e média

Posições	Frequência (Hz)							C_{80} [500-1k Hz] (dB)
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1	0,31	4,54	5,36	5,24	8,39	12,25	17,77	5,30
P2	3,91	5,33	3,92	2,73	5,27	7,94	11,87	3,33
P3	4,56	4,89	5,98	4,97	6,83	8,16	11,67	5,48
Desvio-padrão	1,87	0,32	0,86	1,12	1,27	1,98	2,83	0,99
Média	2,93	4,92	5,09	4,31	6,83	9,45	13,77	4,70

Quadro 5.17 - Resultados da Claridade (C_{80}), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC ligado, incluindo os respetivos desvio-padrão e média

Posições	Frequência (Hz)							C_{80} [500-1k Hz] (dB)
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1	0,45	5,69	5,91	5,27	8,97	12,24	18,03	5,59
P2	3,9	4,92	3,54	2,99	5,18	8,01	11,93	3,27
P3	5,06	4,87	5,97	4,89	6,77	8,1	11,82	5,43
Desvio-padrão	1,96	0,38	1,13	1,00	1,55	1,97	2,90	1,06
Média	3,14	5,16	5,14	4,38	6,97	9,45	13,93	4,76

Quadro 5.18 - Diferença entre os valores médios da Claridade (C_{80}) com e sem o sistema AVAC em funcionamento para cada ponto de medição (ΔC_{80} = com – sem AVAC)

	Frequência (Hz)							C_{80} [500-1k Hz] (dB)
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
ΔC_{80}	0,21	0,24	0,05	0,07	0,14	0,00	0,16	0,06
%	7	5	1	2	2	0	1	1

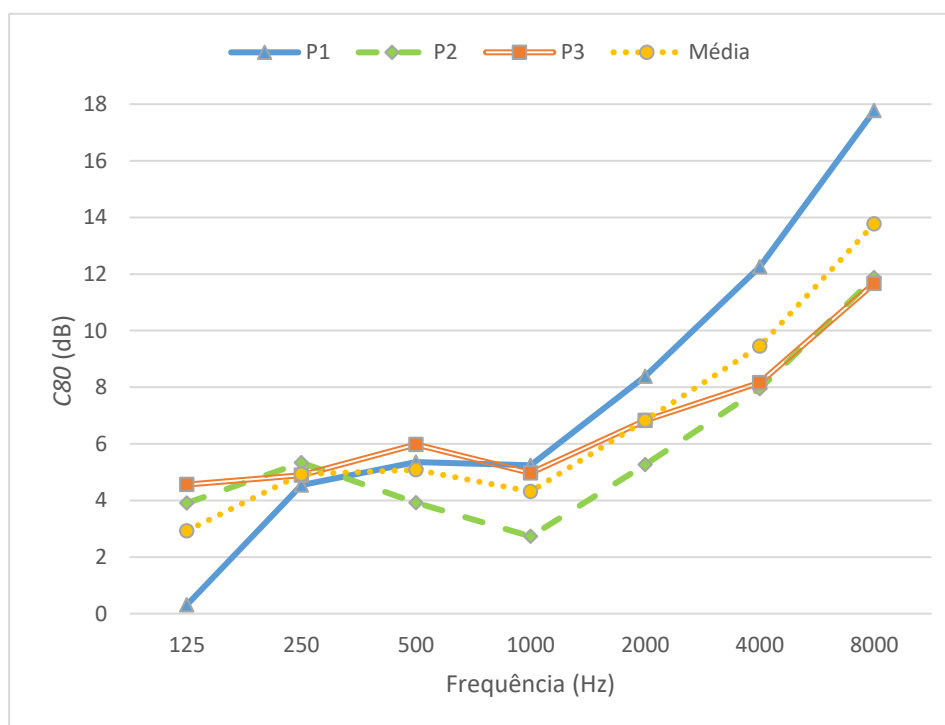


Fig. 5.11- Resultados da Claridade (C_{80}), com o sistema AVAC desligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava

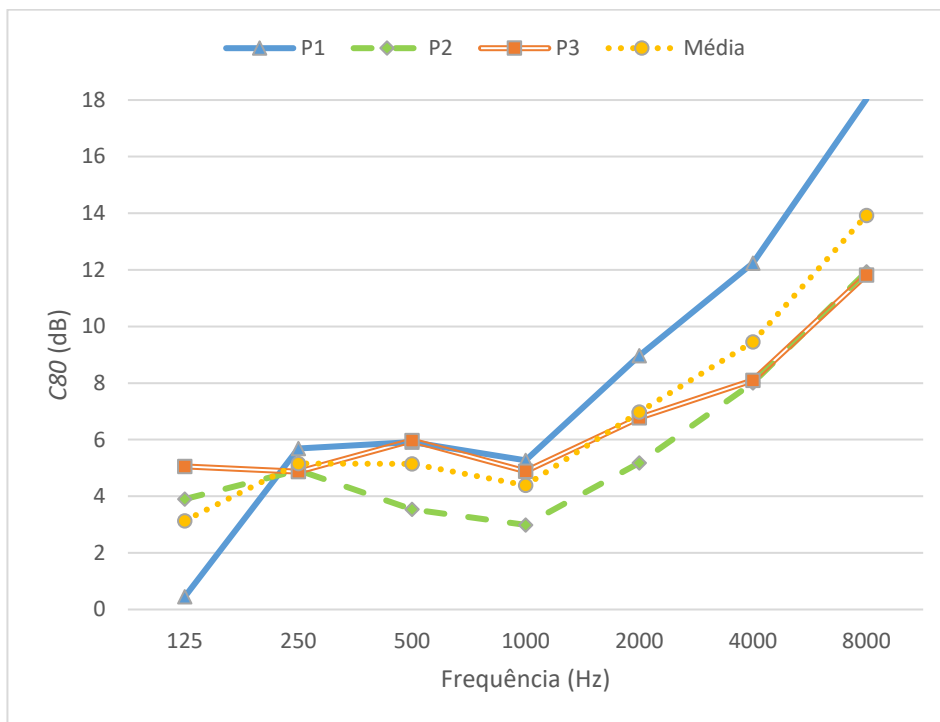


Fig. 5.12 - Resultados da Claridade (C_{80}), com o sistema AVAC ligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava

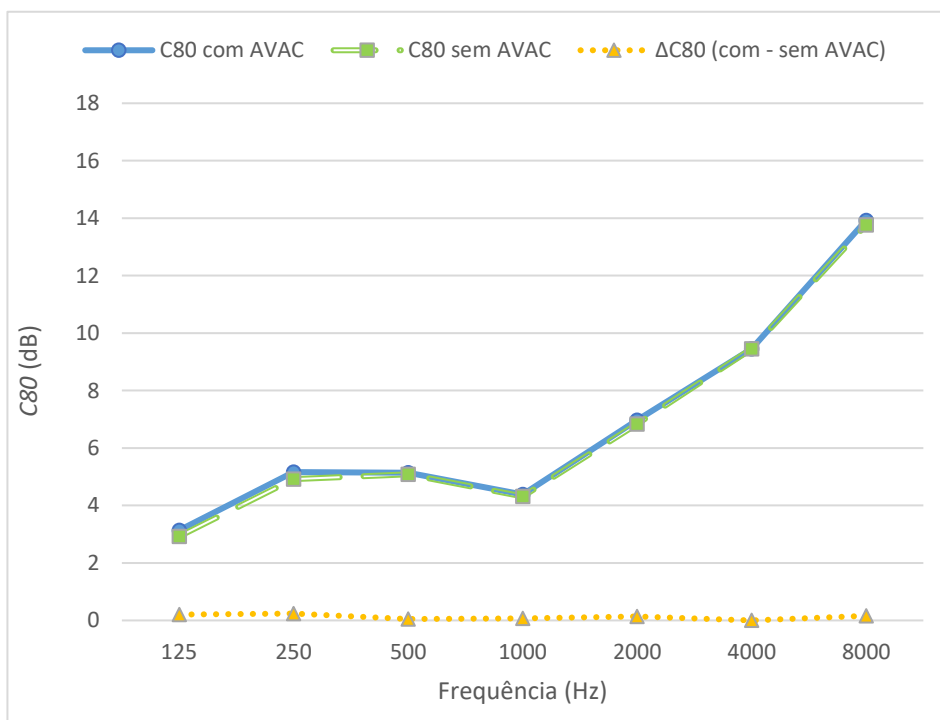


Fig. 5.13 - Valores médios da Claridade (C_{80}), com e sem o sistema AVAC em funcionamento e diferença entre ambos para bandas de frequência de 1/1 de oitava

Analisando as figuras apresentadas, verifica-se que os valores demonstram um comportamento bastante idêntico ao longo da banda de frequências para ambos os cenários, apresentando a posição P1 um melhor desempenho a partir dos 1000 Hz.

A informação presente no quadro 5.18 deverá certamente despertar a atenção do leitor, uma vez que este explicita que o funcionamento do sistema AVAC trará consequências positivas para a clareza da música, dado o aumento de 1%. De notar que, apesar de se tratar de um aspeto curioso, a diferença entre os dois cenários não é expressiva, sendo esta informação enfatizada pela Fig. 5.13, na qual se observa que os valores médios deste parâmetros são aproximadamente coincidentes a partir dos 500 Hz.

Por último, procedeu-se à análise comparativa dos valores recomendados de C_{80} em função do tipo de utilização com os resultados médios nas frequências de 500 e 1000 Hz para bandas de 1/1 de oitava sem e com o sistema AVAC ligado, obtendo-se os valores de 4,7 e 4,8 dB. A informação encontra-se organizada no quadro 5.19.

Quadro 5.19 – Comparação entre os valores médios da Claridade (C_{80}) dos 500 e 1000 Hz, com e sem o sistema AVAC em funcionamento, com os valores recomendados em função do tipo de utilização

Função		C_{80} 500-1000 Hz ideal (dB) [1]	Comparação com o AVAC desligado e ligado (C_{80} 500-1000 Hz = 4,7 e 4,8 dB)
Auditório (palavra)		> 6	Tolerável
Ópera	Não wagneriana	3 a 4	Aceitável
	Wagner	1 a 2	Desadequado
Música de câmara		-1 a 1	Desadequado
Música sinfónica	Barroca	0 a 2	Desadequado
	Clássica	-1 a 0	Desadequado
	Romântica	-2 a 1	Desadequado
	Moderna	-1 a 0	Desadequado
Música popular		> 6	Tolerável
Música de órgão		< -2	Desadequado
Coros gregorianos		-3 a -1	Desadequado

5.7. DEFINIÇÃO

A Definição (D_{50}) trata-se de um parâmetro acústico objetivo relacionado com a inteligibilidade da palavra. Os quadros 5.20 e 5.21 contêm os resultados obtidos das medições para bandas de frequência de 1/1 de oitava compreendidas num intervalo de 125 a 4000 Hz diferenciando-se sobre as condições de operação sistema de ventilação, estando a informação graficamente exposta nas Fig. 5.14 e 5.15. Foi igualmente efetuada uma análise comparativa entre ambos os cenários (Fig. 5.16), auxiliada pelo quadro 5.22 que explicita em pormenor a diferença entre os valores médios da D_{50} com e sem o AVAC ligado.

Pela informação apresentada, verifica-se que a ausência ou presença da atividade do sistema AVAC em nada interfere com os valores associados a este parâmetro. Quer ao nível da análise individual como ao nível da análise global, observa-se que os valores dos três pontos de medição são bastante semelhantes ou até mesmo coincidentes ao longo das bandas de frequência, sendo esta afirmação reforçada pela diferença nula entre os valores médios da Definição para o intervalo de 500 a 1000 Hz (quadro 5.22)

Para que a Definição seja considerada ótima o seu valor deve ser igual ou superior a 0,60, o que se verifica para o caso de estudo, exibindo o valor médio de 0,63.

Assim como para a C_{80} , o aumento dos valores da D_{50} com o incremento da frequência pode ser explicado em especial pelo facto da sala possuir maior capacidade de absorção sonora nas altas frequências devido ao tipo de cadeiras e ao grande volume de ar existente, mas também pelas reflexões (e difusão) na envolvente.

Quadro 5.20 - Resultados da Definição (D_{50}), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC desligado, incluindo os respetivos desvio-padrão e média

Posições	Frequência (Hz)							D_{50} [500-1k Hz]
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1	0,32	0,68	0,67	0,68	0,81	0,92	0,97	0,68
P2	0,52	0,58	0,57	0,53	0,64	0,78	0,87	0,55
P3	0,38	0,64	0,67	0,66	0,74	0,80	0,89	0,67
Desvio-padrão	0,08	0,04	0,05	0,07	0,07	0,06	0,04	0,06
Média	0,41	0,63	0,64	0,62	0,73	0,83	0,91	0,63

Quadro 5.21 - Resultados da Definição (D_{50}), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC ligado, incluindo os respetivos desvio-padrão e média

Posições	Frequência (Hz)							D_{50} [500-1k Hz]
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1	0,36	0,73	0,65	0,68	0,84	0,92	0,97	0,67
P2	0,50	0,58	0,56	0,53	0,64	0,76	0,89	0,55
P3	0,38	0,65	0,67	0,66	0,74	0,80	0,89	0,67
Desvio-padrão	0,06	0,06	0,05	0,07	0,08	0,07	0,04	0,06
Média	0,41	0,65	0,63	0,62	0,74	0,83	0,92	0,63

Quadro 5.22 - Diferença entre os valores médios da Definição (D_{50}) com e sem o sistema AVAC em funcionamento para cada ponto de medição (ΔD_{50} = com – sem AVAC)

	Frequência (Hz)							D_{50} [500-1k Hz]
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
ΔD_{50}	0,00	0,02	-0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00

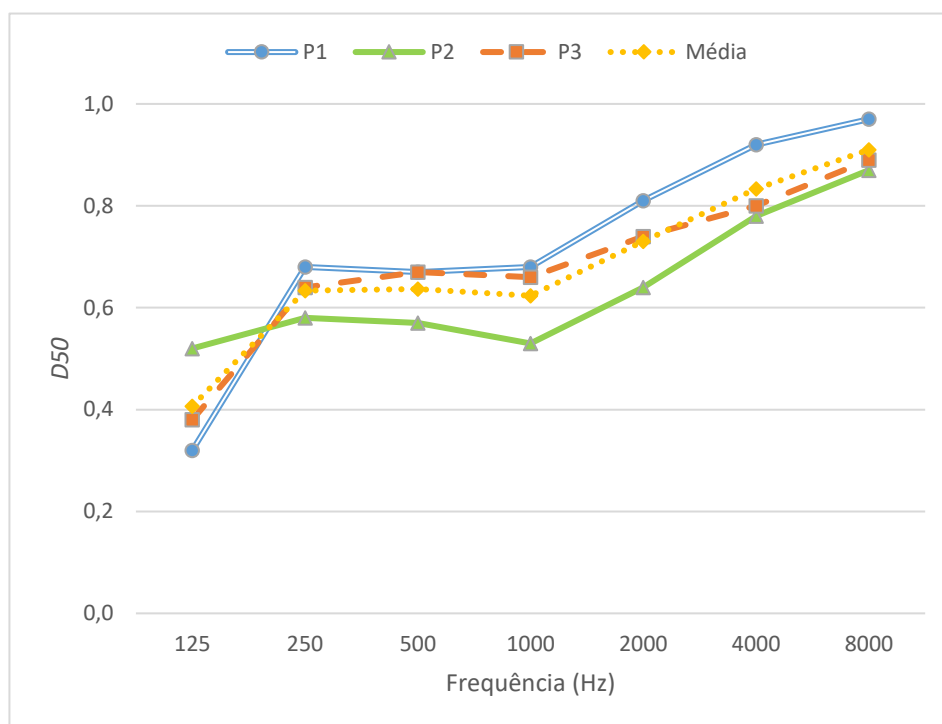


Fig. 5.14 - Resultados da Definição (D_{50}), com o sistema AVAC desligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava

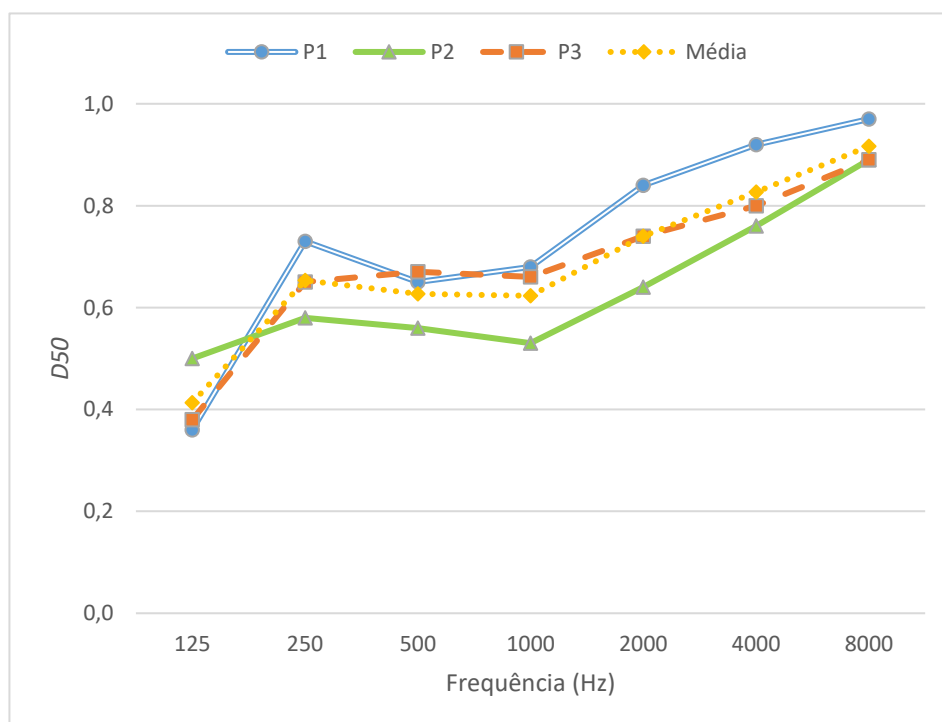


Fig. 5.15 - Resultados da Definição (D_{50}), com o sistema AVAC ligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava

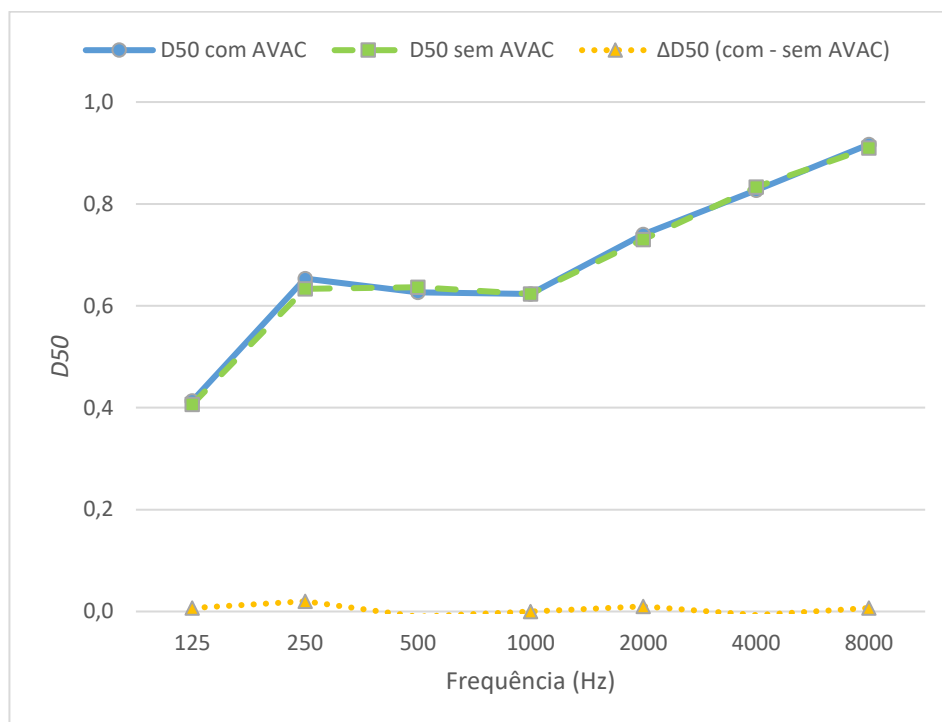


Fig. 5.16 - Valores médios da Definição (D_{50}), com e sem o sistema AVAC em funcionamento e diferença entre ambos para bandas de frequência de 1/1 de oitava

5.8. TEMPO CENTRAL

O processo de análise do Tempo Central (TS) foi análogo ao dos parâmetros Claridade (C_{80}) e Definição (D_{50}), destacando-se em relação a estes por não se limitar a um valor máximo. Os quadros 5.23 e 5.24 apresentam os resultados das medições para bandas de frequência de 1/1 de oitava compreendidas num intervalo de 125 a 4000 Hz sem e com o sistema AVAC em funcionamento, respetivamente. As Fig. 5.17 e 5.18 ilustram graficamente a contida nesses quadros, tendo sido efetuada de igual modo uma comparação entre os dois cenários (Fig. 5.19). O quadro 5.25 detalha a diferença entre os valores médios do TS com e sem o AVAC ligado.

Quadro 5.23 - Resultados do Tempo Central (TS), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC desligado, incluindo os respetivos desvio-padrão e média

Posições	Frequência (Hz)							TS [500-1k Hz] (ms)
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1	97	47	51	51	29	13	4	51
P2	82	57	64	80	58	36	19	72
P3	80	59	53	61	47	34	19	57
Desvio-padrão	8	5	5	12	12	11	7	9
Média	86	54	56	64	45	28	14	60

Quadro 5.24 - Resultados do Tempo Central (TS), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC ligado, incluindo os respetivos desvio-padrão e média

Posições	Frequência (Hz)							TS [500-1k Hz] (ms)
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1	92	43	49	47	23	13	4	48
P2	82	58	68	79	58	36	18	73
P3	80	59	53	61	47	34	19	57
Desvio-padrão	5	7	8	13	13	11	7	11
Média	85	53	57	62	44	28	14	59

Quadro 5.25 - Diferença entre os valores médios do Tempo Central (TS) com e sem o sistema AVAC em funcionamento para cada ponto de medição ($\Delta TS = \text{com} - \text{sem AVAC}$)

	Frequência (Hz)							TS [500-1k Hz] (ms)
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
ΔTS	-1	-1	1	-2	-1	0	0	-1
%	-1	-2	2	-3	-2	0	0	-2

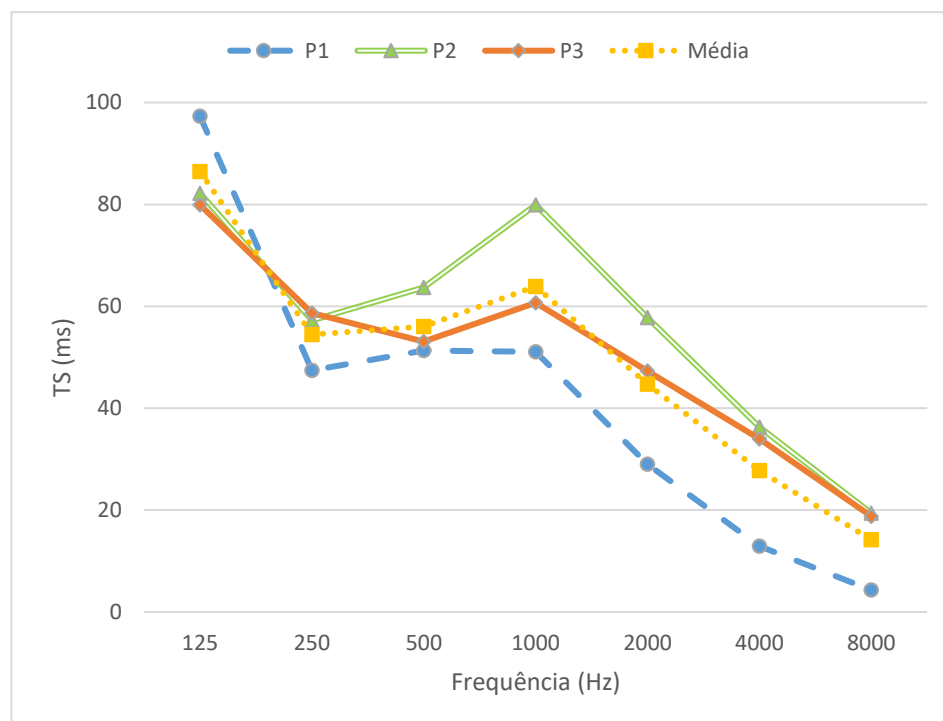


Fig. 5.17 - Resultados do Tempo Central (TS), com o sistema AVAC desligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava

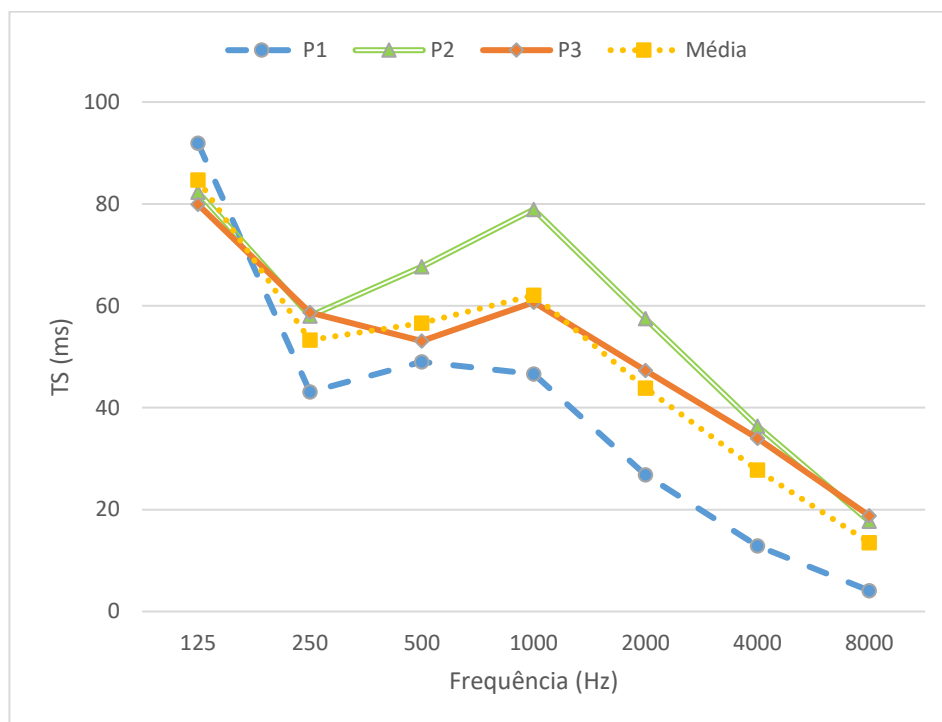


Fig. 5.18 - Resultados do Tempo Central (TS), com o sistema AVAC desligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava

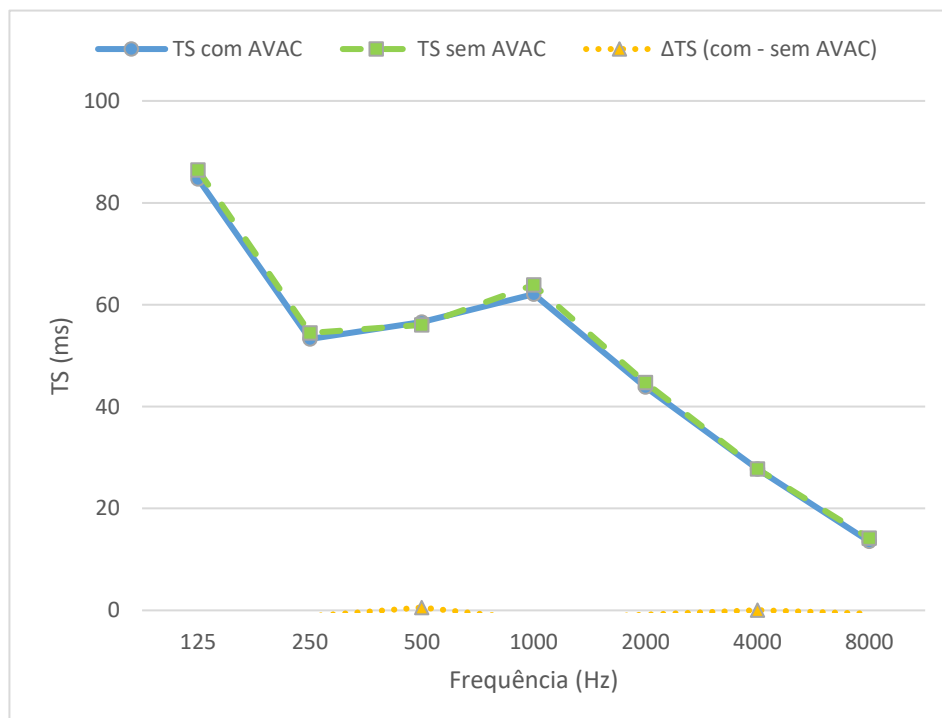


Fig. 5.19 - Valores médios do Tempo Central (TS) com e sem o sistema AVAC em funcionamento e diferença entre ambos para bandas de frequência de 1/1 de oitava

De acordo com os quadros e figuras apresentadas, a posição P2 (fila do meio) é a que revela um melhor desempenho, quebrando a norma em relação aos restantes parâmetros acústicos energéticos analisados, nos quais, em geral, exibiu um pior comportamento comparativamente com os restantes pontos de estudo.

Segundo o quadro 5.25, verifica-se que a operação do sistema AVAC apresenta consequências negativas para o desempenho dos pontos de estudo, porém o seu peso não é expressivo. Por observação da Fig. 19, o comportamento sobre as diferentes condições de ventilação é quase como idêntico ao longo da banda de frequências.

No que toca à inteligibilidade da palavra, desejam-se valores inferiores a 80 milissegundos [1], condição cumprida pelo caso em estudo, contando com valores médios de 60 e 59 sem e com o sistema AVAC em funcionamento, respetivamente. Relativamente à música, esperam-se valores compreendidos num intervalo de 80 a 250 milissegundos em função do tipo de música [1], pelo que este requisito não é cumprido.

5.8. RÁCIO DE BAIXOS

O Rácio de Baixos é uma medida objetiva sobre a capacidade de uma sala reproduzir sons graves de forma equilibrada face às altas frequências, um aspeto importante dado que uma quantidade inadequada pode resultar em problemas de inteligibilidade e qualidade sonora global. Tendo por base os valores expostos no quadro 5.7 e a expressão 2.18, procedeu-se ao cálculo dos Rácios de Baixos baseados no Tempo de Reverberação (BR) para cada ponto de estudo. A informação encontra-se organizada no quadro 5.26.

Em relação à música, para salas com um TR médio inferior a 1,8 segundos (o resultado obtido do TR médio para o caso de estudo com a sala desocupada foi de aproximadamente 1,3 segundos para 500 e 1000 Hz), o valor de BR deve respeitar o intervalo de 1,1 a 1,5, sendo que um valor inferior a 1,0 não é recomendável [9], [25]. Analisando o quadro 5.26, verifica-se que o valor médio de 0,9 não se encontra em conformidade com os requisitos apresentados.

No que diz respeito à palavra, são preferíveis valores compreendidos entre 0,9 e 1,0 [9], pelo que o caso de estudo exibe um valor adequado para o efeito.

Quadro 5.26 - Resultados dos Rácios de Baixos baseados no Tempo de Reverberação (BR) para cada ponto de medição e respetiva média

Posição	Frequência (Hz)				BR	Média
	125	250	500	1000		
P1	1,2	1,0	1,2	1,4	0,9	0,9
P2	1,4	1,1	1,2	1,4	0,9	
P3	1,1	1,0	1,1	1,3	0,9	

6

ANÁLISE COMPARATIVA COM OUTRAS SALAS

6.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo centra-se na comparação do caso de estudo com outras salas de espetáculo que foram alvo de um estudo acústico semelhante noutras teses de mestrado, a fim de enquadrar o desempenho acústico do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto no panorama nacional. Deste modo, procedeu-se à comparação dos parâmetros tempo de reverberação, nível de pressão sonora do ruído de fundo, curvas de incomodidade NC e NR e classificação RASTI/STI. As dissertações consideradas para o efeito foram:

- Caracterização acústica da Casa da Cultura de Ílhavo [46];
- Caracterização acústica do renovado CineTeatro de Amarante [47];
- Caracterização acústica do Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia [48];
- Caracterização acústica de Grandes Auditórios - o caso do auditório da FEUP [49];
- Caracterização acústica do Centro de Artes de Águeda [50];
- Caracterização acústica do centro de congressos do Altice Fórum Braga [51];
- Caracterização Acústica do Teatro Municipal da Covilhã [52];
- Caracterização Acústica do Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra) [53].

6.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O quadro 6.1 apresenta os valores do Volume, tempo de reverberação para bandas de frequência de 1/1 de oitava dos 500 e 1000 Hz e o respetivo tempo de reverberação médio para esse intervalo de frequências relativamente a cada sala. Focando apenas nos atributos comuns, o Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia e o Centro de Artes de Águeda são os que exibem o “melhor” tempo de reverberação para eventos em que se procure uma boa inteligibilidade da palavra, cujo valor ideal se insere entre os 0,7 e os 0,8 segundos, tal como mencionado em 3.2.1.

Relativamente a atividades destinadas à música, de acordo com o quadro 3.1, o Auditório da FEUP, o Teatro Municipal da Covilhã e o Grande Auditório do Convento de S. Francisco

destacam-se dentro do conjunto em análise por apresentarem os valores mais adequados para eventos de música sinfónica barroca, clássica e moderna, música de câmara e ópera não wagneriana. Para este tipo de atividades, o Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto exibe valores aceitáveis, excetuando a música sinfónica barroca. No que se refere a outro tipo de eventos musicais, a Casa da Cultura do Ílhavo, o Grande Auditório do Altice Fórum Braga, o Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia e o Centro de Artes de Águeda possuem os valores mais adequados para a música popular.

A fórmula de Sabine (2.12) indica que o tempo de reverberação é proporcional ao Volume do espaço, verificando-se que a sala com o valor mais elevado do tempo de reverberação (Grande Auditório do Convento de S. Francisco) é a que possui o maior volume. No entanto, observa-se que a segunda sala com o segundo maior tempo de reverberação (Auditório da FEUP) não é a que possui o segundo maior volume (Grande Auditório do Altice Fórum Braga), indo assim contra as expectativas. Tal pode ser explicado pelo facto de se poder influenciar o valor do tempo de reverberação através das condições geométricas e pela capacidade absorvente da sala, tal como anteriormente referido em 2.4.

A Fig. 6.1 corrobora o exposto, na qual se observa que a amostra em questão exibe uma correlação linear ligeiramente crescente entre o tempo de reverberação e o volume do espaço, sendo este comportamento caracterizado por um coeficiente de correlação diminuto ($R^2=0,16$), traduzindo assim a pouca dependência entre estes parâmetros.

Quadro 6.1 - Valores do Tempo de Reverberação médio para as bandas de frequência de 1/1 de oitava de 500 e 1000 Hz com salas desocupadas e sem AVAC e os respetivos volumes

Sala	Volume (m ³)	TR (500 e 1000 Hz) (s)	TR médio (s)
Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto	3192	1,18	1,28
		1,37	
Casa Cultural de Ílhavo [46]	3779	1,03	1,03
		1,03	
CineTeatro de Amarante [47]	2700	1,17	1,24
		1,30	
Auditório Municipal VNG [48]	3218	0,74	0,79
		0,84	
Auditório FEUP [49]	3317	1,50	1,45
		1,40	
Centro de Artes de Águeda [50]	5066	0,78	0,83
		0,88	
Altice Fórum Braga - Grande Auditório [51]	9150	1,04	1,03
		1,01	
Altice Fórum Braga - Pequeno Auditório [51]	1320	0,43	0,47
		0,50	
Teatro Municipal da Covilhã [52]	4258	1,44	1,43
		1,41	
Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra) [53]	12000	1,49	1,49
		1,49	

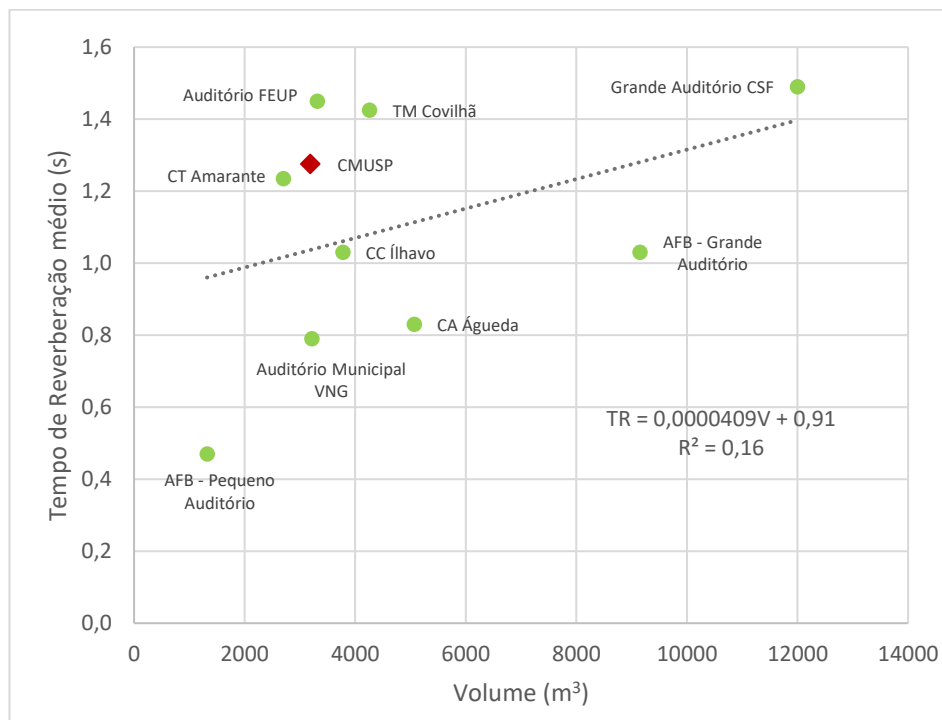


Fig. 6.1 - Valores do Tempo de Reverberação médio de 500 e 1000 Hz em função do volume com linha de tendência linear

No que toca à legislação RRAE relativamente à “oratória”, a verificação foi alvo de um processo análogo ao descrito em 5.3. A informação encontra-se organizada no quadro 6.2, sendo possível observar que a maioria das salas em análise cumprem com os limites impostos.

Para o intervalo de 500 a 2000 Hz, o Grande Auditório do Altice Fórum Braga, a segunda sala com maior volume, volta a não assumir o segundo maior valor do tempo de reverberação, enfatizando ainda mais a afirmação de que este parâmetro não está somente ligado ao Volume do espaço. Na Fig. 6.2 verifica-se um valor de R^2 praticamente idêntico ao apresentado na Fig. 6.1, indo novamente contra a generalização de que os dois fatores aumentam tendencialmente entre si.

Da amostra em estudo destacam-se sobretudo o Grande Auditório do Altice Fórum Braga e Grande Auditório do Convento de S. Francisco por possuírem baixos tempos de reverberação em relação às suas grandes dimensões, sendo possível afirmar que estes espaços possuem melhores características de absorção sonora comparativamente com os restantes. Contam também com boas características de absorção sonora a Casa da Cultura de Ílhavo e o Centro de Artes de Águeda, dado que pertencem simultaneamente aos conjuntos de salas com maior volume e menor tempo de reverberação. Contrariamente a estes, o Auditório da FEUP, o Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto e CineTeatro de Amarante destacam-se pela negativa pelo facto de integrarem simultaneamente os grupos com menor volume e maior tempo de reverberação.

Quadro 6.2 - Verificação do cumprimento do RRAE para o Tempo de Reverberação (TR) para espaços com função assente na “oratória” face às diferentes salas de espetáculo consideradas

Sala	Volume (m³)	TR (500-2000 Hz) (s)	TR médio medido (s)	Tempo de Reverberação medido com a Incerteza de 35% (s)	Tempo de Reverberação máximo RRAE (s)	Verificação
Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto	3192	1,18	1,27	0,95	0,91	Não cumpre
		1,37				
		1,24				
Casa Cultural de Ílhavo [46]	3779	1,03	1,02	0,69	0,93	Cumpre
		1,03				
		1,00				
CineTeatro de Amarante [47]	2700	1,17	1,30	0,99	0,90	Não cumpre
		1,30				
		1,43				
Auditório Municipal VNG [48]	3218	0,74	0,83	0,51	0,92	Cumpre
		0,84				
		0,92				
Auditório FEUP [49]	3317	1,50	1,37	1,04	0,92	Não cumpre
		1,40				
		1,20				
Centro de Artes de Águeda [50]	5066	0,78	0,84	0,50	0,95	Cumpre
		0,88				
		0,85				
Altice Fórum Braga - Grande Auditório [51]	9150	1,04	1,01	0,59	1,05	Cumpre
		1,01				
		0,99				
Altice Fórum Braga - Pequeno Auditório [51]	1320	0,43	0,47	0,17	0,85	Cumpre
		0,50				
		0,47				
Teatro Municipal Covilhã [52]	4258	1,44	1,37	1,04	0,94	Não cumpre
		1,41				
		1,27				
Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra) [53]	12000	1,49	1,51	1,05	1,14	Cumpre
		1,49				
		1,54				

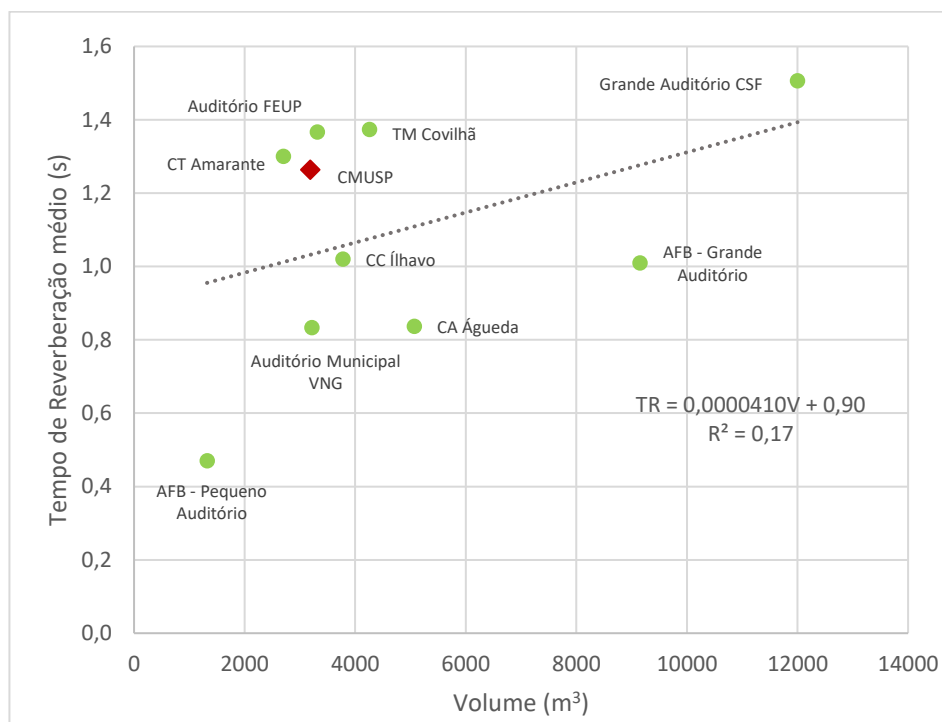


Fig. 6.2 - Valores do Tempo de Reverberação médio de 500 a 2000 Hz conforme o RRAE em função do volume com linha de tendência linear

6.3. RUÍDO DE FUNDO E CURVAS DE INCOMODIDADE

No quadro 6.3 encontram-se dispostos os valores do nível sonoro contínuo equivalente (L_{Aeq}) sem e com o AVAC, a diferença desse mesmo parâmetro entre ambas as situações, bem como os valores das curvas de incomodidade NC e NR associadas ao funcionamento do sistema de ventilação para cada uma das salas.

Verifica-se que na ausência da atividade do sistema ventilação todas as salas cumprem com o limite máximo de 30 dB(A) imposto pelo RRAE para o nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo. No entanto, o Grande Auditório do CMUSP e o Grande Auditório do Convento de S. Francisco são as únicas salas capazes de cumprir com a restrição de 30 dB(A) para o nível sonoro contínuo equivalente associado ao funcionamento de sistemas AVAC, para a qual a primeira apresenta o melhor resultado. É de notar ainda que o caso em estudo apresenta uma das menores diferenças de L_{Aeq} , pelo que exibe um melhor desempenho em termos de isolamento sonoro face ao sistema AVAC comparativamente com a maioria das salas da amostra em questão. O Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia revela-se o caso mais crítico, no qual o valor de L_{Aeq} com o sistema AVAC ligado é energeticamente cerca de 198 vezes superior ao valor do mesmo parâmetro com o sistema desligado, correspondendo a uma diferença de 23 dB(A).

Relativamente às curvas de incomodidade, apenas o Grande Auditório do CMUSP, o Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga e o Grande Auditório do Convento de S. Francisco conseguem satisfazer simultaneamente as exigências referentes aos valores máximos recomendados de NC e NR já mencionados nos subcapítulos 2.5 e 5.2. No que diz respeito às outras salas, a Casa da Cultura de Ílhavo, o CineTeatro de Amarante, o Centro

de Artes de Águeda e o Grande Auditório do Altice Fórum Braga encontram-se em conformidade face às exigências para salas de conferências. Por fim, Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia, o Auditório da FEUP e o Teatro Municipal da Covilhã exibem valores excessivos que ultrapassam todos os limites recomendados, tratando-se das piores salas ao nível do desempenho isolamento sonoro face ao sistema AVAC.

Quadro 6.3 - Valores do nível sonoro contínuo equivalente (L_{Aeq}) com e sem o AVAC, diferença entre ambos e valores das curvas de incomodidade NC e NR associadas ao funcionamento do sistema de ventilação face às diferentes salas de espetáculo consideradas

Sala	L_{Aeq} (dB) sem AVAC	L_{Aeq} (dB) com AVAC	ΔL_{Aeq} (dB) (= com – sem AVAC)	NC com AVAC	NR com AVAC
Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto	22	28	6	15	16
Casa Cultural de Ílhavo [46]	25	36	11	25	27
CineTeatro de Amarante [47]	23	34	11	24	27
Auditório Municipal VNG [48]	24	47	23	37	38
Auditório FEUP [49]	27	31	4	37	39
Centro de Artes de Águeda [50]	26	31	5	25	27
Altice Fórum Braga - Grande Auditório [51]	24	34	10	23	25
Altice Fórum Braga - Pequeno Auditório [51]	25	31	7	18	20
Teatro Municipal Covilhã [52]	24	41	17	38	38
Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra) [53]	27	30	3	19	21

6.4. RASTI/STI

Neste subcapítulo é feita a comparação entre os valores do STI médio do auditório em estudo com os valores médios do RASTI referentes às salas consideradas para análise. Apesar de possuírem designações diferentes, não existirão incongruências, dado que o RASTI corresponde a um método simplificado para o cálculo do STI. A informação disposta no quadro 6.4 é relativa aos valores RASTI/STI sem e com a operação do sistema AVAC, à diferença entre estes dois cenários e à posterior classificação da inteligibilidade da palavra tendo em conta o quadro 2.7. Para esta análise não foi considerado o Auditório da FEUP, uma vez que não foi alvo de medições RASTI/STI sem e com o sistema AVAC.

Verifica-se que a atividade do sistema de ventilação reduz a inteligibilidade da palavra no Grande Auditório do CMUSP, assim como no Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia, porém a sua expressão não é significativa, tal como se pode observar pelos resultados das diferenças. Os valores do Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia para ambas as situações traduzem uma *boa* inteligibilidade da palavra, destacando-se pela positiva em relação ao Grande Auditório do CMUSP, o qual assume uma classificação *razoável* aquando da atividade do sistema de ventilação.

De acordo com o exposto pelos autores das diferentes dissertações, os restantes espaços não foram alvo de medições RASTI tendo em conta o funcionamento do sistema AVAC, pelo que não é possível proceder à comparação entre os dois cenários. Na ausência de atividade do sistema de ventilação, todas as salas apresentam condições para que se atinja uma boa inteligibilidade da palavra, destacando-se o Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga por permitir uma inteligibilidade considerada excelente.

A comparação estendeu-se para uma análise gráfica dos valores médios do RASTI/STI face ao tempo de reverberação médio de 500 a 2000 Hz (Fig. 6.3) e ao Volume (Fig. 6.4) na ausência de atividade do sistema AVAC.

Um tempo de reverberação excessivo pode dificultar a percetibilidade do discurso e consequentemente conduzir a valores mais baixos do RASTI/STI. Esta afirmação é enfatizada pela Fig. 6.3, na qual se observa um elevado coeficiente de correlação ($R^2 = 0,92$) para a tendência logarítmica que relaciona estes dois parâmetros. Deste modo, é possível concluir que a inteligibilidade da palavra diminui com o aumento do tempo de reverberação.

Pela análise da Fig. 6.4, observa-se uma dependência mais baixa entre o RASTI/STI e o Volume, expressa por um coeficiente de correlação de 0,37. Apesar de depender das dimensões da sala, a inteligibilidade da palavra está também dependente de outros fatores, tais como o número de lugares e da forma geométrica. É igualmente necessário ter em consideração que a amostra em questão é composta por salas com diferentes volumes, variando entre os 1300 e os 12000 m³. Assim, todos estes fatores podem explicar o resultado obtido.

Quadro 6.4 - Valores do RASTI/STI médio com e sem o sistema AVAC em funcionamento, diferença entre ambos e posterior classificação da inteligibilidade da palavra para cada cenário face às diferentes salas de espetáculo consideradas

Sala	RASTI/STI médio sem AVAC	RASTI/STI médio com AVAC	Δ RASTI/STI (com-sem AVAC)	Classificação sem AVAC	Classificação com AVAC
Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto	0,62	0,58	-7%	Boa	Razoável
Casa da Cultura de Ílhavo [46]	0,68	Não realizado	/	Boa	/
CineTeatro de Amarante [47]	0,62	Não realizado	/	Boa	/
Auditório Municipal VNG [48]	0,68	0,65	-4%	Boa	Boa
Auditório FEUP [49]	Não realizado	Não realizado	/	/	/
Centro de Artes de Águeda [50]	0,67	Não realizado	/	Boa	/
Altice Fórum Braga - Pequeno Auditório [51]	0,80	Não realizado	/	Excelente	/
Altice Fórum Braga - Grande Auditório [51]	0,67	Não realizado	/	Boa	/
Teatro Municipal da Covilhã [52]	0,64	Não realizado	/	Boa	/
Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra) [53]	0,61	Não realizado	/	Boa	/

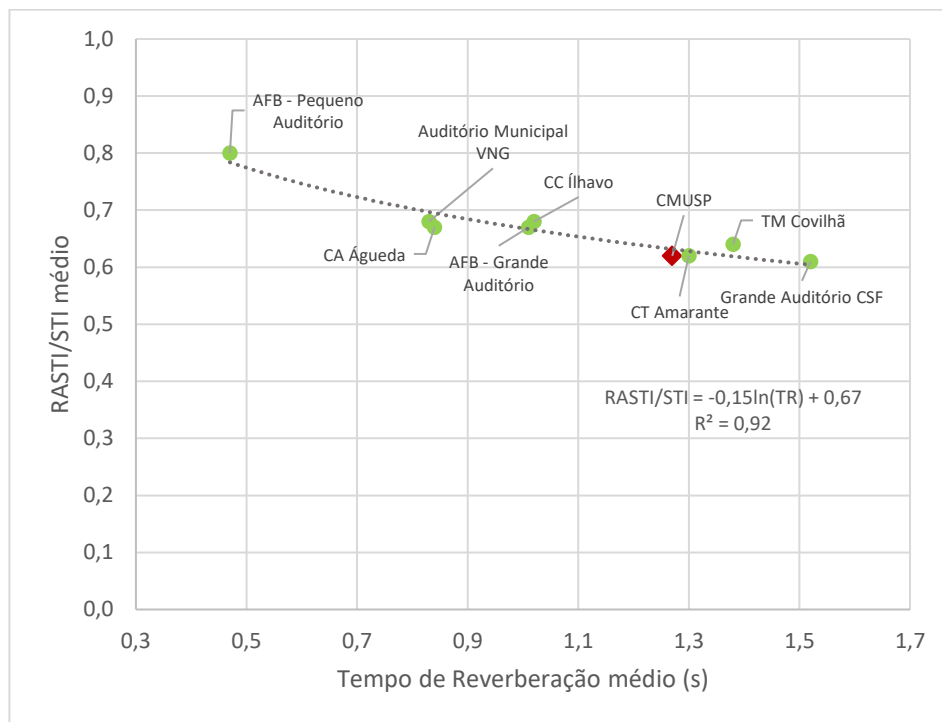


Fig. 6.3 - Valores do RASTI/STI médio face ao Tempo de Reverberação médio de 500 a 2000 Hz (conforme o RRAE), com linha de tendência logarítmica

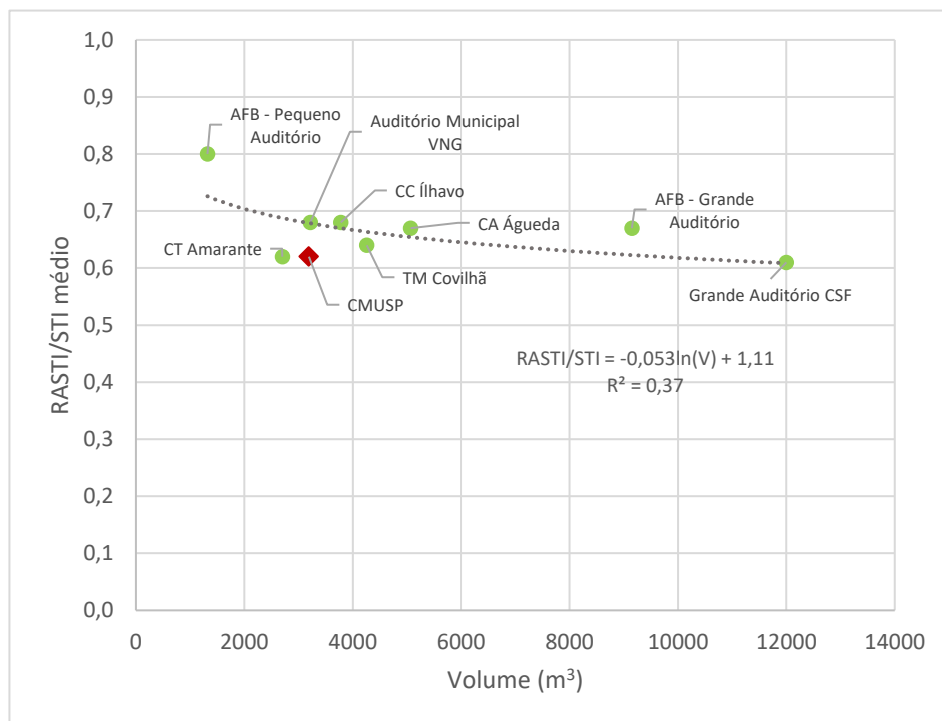


Fig. 6.4 - Valores do RASTI/STI médio face ao Volume, com linha de tendência logarítmica

7

CONCLUSÃO

7.1. CONCLUSÕES

Apesar do crescente interesse e preocupação dos utilizadores perante a Acústica, o desempenho acústico continua a não receber a devida consideração aquando da fase de projeto, resultando por vezes em soluções inadequadas para que determinado espaço seja capaz de servir o seu propósito.

Este trabalho baseia-se na caracterização acústica do Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto, cujo desenvolvimento contribuiu para a compreensão das diferentes exigências e para um aumento da consciencialização da importância da Acústica relativamente a outras áreas, sobretudo a arquitetura.

Tendo por base medições *in situ*, o auditório foi alvo de análise segundo parâmetros acústicos objetivos e posterior comparação com outras salas de espetáculo portuguesas previamente caracterizadas, a fim de enquadrar o Grande Auditório no panorama nacional. Para o efeito, os valores obtidos foram verificados de acordo com valores recomendados por diferentes autores, assim como pelos valores limite estipulados pelo RRAE. O espaço em questão, conforme o demonstrado, é classificado como um auditório multiusos, com forte incidência para atividade musical. Embora conte com a presença de mecanismos de acústica variável, mais concretamente, o conjunto painéis de madeira amovíveis na parede de fundo do palco, os ensaios foram realizados apenas segundo uma única configuração.

O Grande Auditório obteve um valor de 1,28 segundos para o Tempo de Reverberação (TR) médio registado para as frequências de 500 e 1000 Hz de 1/1 de oitava, não se encontrando totalmente adequado para atividades focadas na palavra na ausência de reforço eletroacústico. Face à música, o caso de estudo exhibe valores aceitáveis para eventos de música sinfónica barroca e moderna, música de câmara e ópera não wagneriana (embora a sala não esteja vocacionada para tal), revelando-se pouco adequado para as restantes atividades musicais, tanto para as que necessitem de um TR elevado, como para as que requeiram um valor mais baixo a fim de se conseguir reter um maior proveito do som.

Verifica-se que o TR médio registado para bandas de frequências compreendidas num intervalo de 500 a 2000 Hz, com valor de 1,27 segundos e de 0,95 segundos se associado à incerteza regulamentar de 35%, não cumpre com o limite máximo de 0,91 segundos

imposto pelo RRAE. No entanto, dado que a sua principal função não passa pela realização de atividades assentes na “oratória”, o caso de estudo não é obrigado a cumprir com este limite.

Constata-se que o Grande Auditório cumpre com os valores regulamentares no que se refere ao nível sonoro equivalente contínuo máximo do ruído de fundo interior do recinto e do ruído particular associado ao funcionamento de sistemas AVAC (30 dB(A)), obtendo respetivamente os valores de 22 e 28 dB(A), podendo-se concluir que nenhum dos dois tipos de ruído é prejudicial para a experiência do espectador. A análise segundo curvas de incomodidade com AVAC revelou valores de NC 15 e NR 16, cumprindo com os limites máximos recomendados de NC 20 e NR 25 para salas de concerto. Neste sentido, o Grande Auditório revela um ótimo desempenho em termos do ruído emitido pelo funcionamento do sistema de ventilação.

A inteligibilidade da palavra foi avaliada segundo os parâmetros acústicos STI e AI. O auditório revelou um valor médio do STI de 0,62 na ausência da atividade do sistema de ventilação, correspondendo a uma *boa* inteligibilidade. Na presença da atividade do AVAC, o STI assume um valor médio de 0,58 (-7%), fazendo com que a palavra passe a ser compreendida de uma forma *razoável*. Apesar das diferentes classificações, dada a diferença reduzida entre estes valores, concluiu-se que o sistema de ventilação não prejudica significativamente a inteligibilidade da palavra. Relativamente ao parâmetro AI, o caso de estudo obteve para ambas as situações o valor de 1,00, correspondendo a um grau de inteligibilidade *excelente*. Este parâmetro não tem em consideração a distância à fonte sonora, sendo bastante menos preciso quando comparado com o STI.

Em relação aos parâmetros acústicos energéticos, as medições foram igualmente realizadas sobre diferentes condições do sistema AVAC e análise foi efetuada segundo as frequências de 500 e 1000 Hz para bandas de 1/1 de oitava, excetuando o Rácio de Baixos baseado no Tempo de Reverberação (BR) cujo valor médio obtido foi de 0,9. Para a Claridade (C_{80}), o Grande Auditório obteve os valores médios de 4,7 e 4,8 dB, respetivamente sem e com AVAC, verificando-se um comportamento positivo, porém não expressivo, face à atividade do sistema de ventilação. Relativamente ao TS, os resultados traduzem um comportamento negativo associado ao funcionamento do sistema de ventilação, apesar de este não se relevar significativo, contando este parâmetro com os valores médios de 60 e 59 milissegundos, respetivamente sem e com AVAC. Por último, para o parâmetro Definição (D_{50}) o Grande Auditório revela um valor médio de 0,63 para ambos os cenários. Deste modo, conclui-se que para o caso em estudo o funcionamento do sistema de ventilação pouco ou nada interfere com os valores associados a estes parâmetros.

No que diz respeito aos valores recomendados, de acordo com o quadro 5.17, os valores médios registados para a Claridade (C_{80}) não se encontram totalmente ajustados face às utilizações mencionadas. Relativamente à Definição (D_{50}), o caso de estudo cumpre com o limite mínimo recomendado de 0,60. No que toca ao Tempo Central, os valores médios registados não atingem o limite mínimo de 80 milissegundos associado à inteligibilidade da palavra, nem o intervalo de 80 a 250 milissegundos, em função do tipo de música. Por último, o valor alcançado para o BR não coincide com o intervalo ideal recomendado para a música (1,1 a 1,5 para salas com TR inferior a 1,8 segundos), no entanto insere-se no intervalo recomendado para a palavra (0,9 a 1,0).

Da análise comparativa com outras nove salas de espetáculo portuguesas contendo volumes entre os 1300 e os 12000 m³, o Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto destaca-se ao nível do isolamento sonoro face ao sistema AVAC, dado que é uma das duas únicas salas da amostra que cumpre simultaneamente com os limites impostos pelo RRAE para o nível sonoro contínuo equivalente do ruído ambiente interior do recinto e para o ruído associado ao funcionamento de sistemas AVAC e a que apresenta os melhores valores das curvas de incomodidade NC e NR.

O quadro 7.1 apresenta esquematizada a informação previamente descrita, assim como a verificação dos resultados comparativamente com os valores máximos recomendados.

Quadro 7.1 - Resumo dos principais parâmetros acústicos medidos no Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto

Parâmetro	Situação	Valor medido	Valor Recomendado	Avaliação
L _{Aeq} (dB)	Sem AVAC	22	≤ 30 [36]	Cumpre
	Com AVAC	28		Cumpre
NC	Com AVAC	15	≤ 20 [1]	Adequado
NR		16	≤ 25 [45]	Adequado
TR [500-2k Hz] (s)	Sala vazia	1,27	0,7-0,8 (Palavra) [1] 1,4-2,2 (Música de câmara e sinfónica) [1]	Desadequado (Palavra) Tolerável (Música)
	Sala ocupada *	1,23		
TR [500-1k Hz] (s)	Sala vazia	1,28	0,7-0,8 (Palavra) [1] 1,4-2,2 (Música de câmara e sinfónica) [1]	Desadequado (Palavra) Tolerável (Música)
	Sala ocupada *	1,24		
STI	Sem AVAC	0,62	≥ 0,60 (Palavra) [15]	Adequado
	Com AVAC	0,58		Desadequado
C ₈₀ [500-1k Hz] (dB)	Sem AVAC	4,7	-2 a 2 (Música de câmara e sinfónica) [1]	Desadequado
	Com AVAC	4,8		
D ₅₀ [500-1k Hz]	Sem AVAC	0,63	≥ 0,60 (Palavra) [1]	Adequado
	Com AVAC	0,63		
TS [500-1k Hz] (ms)	Sem AVAC	60	≤ 80 (Palavra) [1] [80-250] (Música) [1]	Adequado (Palavra) Desadequado (Música)
	Com AVAC	59		
BR	Sem AVAC	0,9	1,1-1,5 (Música) [9], [25] 0,9 -1,0 (Palavra) [9]	Desadequado (Música) Adequado (Palavra)
* Previsão				

Considerou-se apropriado analisar a influência do Volume sobre o TR médio registado para as frequências de 500 e 1000 Hz e de 500 a 2000 Hz, verificando-se para ambos os casos um grau de correlação bastante baixo ($R^2=0,16$ e $0,17$, respetivamente). Dentro do grupo analisado, o caso de estudo revela-se menos satisfatório em relação a alguns dos restantes espaços, tanto para a palavra como para a música, por coincidir com os grupos com menor volume e maior tempo de reverberação, possuindo, portanto, menor capacidade de absorção sonora.

No que diz respeito ao RASTI/STI médio, o Grande Auditório enquadra-se na classificação global para a amostra em estudo, possuindo condições para que se atinja uma boa inteligibilidade da palavra aquando da ausência da atividade do sistema de ventilação. Posteriormente, procedeu-se à análise deste parâmetro em função do TR médio de 500 a 2000 Hz e do Volume, revelando-se uma forte correlação com o primeiro ($R^2=0,92$) e um correlação mais baixa com o segundo ($R^2=0,37$).

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Perante os resultados obtidos, concluiu-se que o auditório exhibe valores de tempo de reverberação pouco adequados para algumas das possíveis atividades que pode acolher, sugerindo-se assim o estudo e a implementação de mecanismos de acústica variável que visem a alteração da capacidade de absorção sonora do espaço, a fim de se atingirem condições mais propícias para a realização dos diversos tipos de eventos. Por motivos de logística e de tempo, as medições foram realizadas segundo uma única configuração dos painéis de madeira móveis de cariz difusor/refletor que constituem a parede de fundo do palco, pelo que se considera interessante a realização de novos estudos seguindo diferentes disposições.

No sentido de aprofundar ainda mais a investigação, sugere-se a inclusão de parâmetros acústicos objetivos suplementares à análise, nomeadamente o Tempo de Decaimento Curto (*Early Decay Time* - EDT), a Intensidade Sonora (G) e o *Bass Ratio* baseado na Intensidade Sonora (BR_L).

Por fim, considera-se pertinente incluir na investigação a realização de pesquisas de avaliação subjetiva com recurso a inquéritos sobre a qualidade acústica do auditório a membros independentes da audiência e posterior comparação com os resultados da análise objetiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, A. P. Oliveira - *Acústica Ambiental e de Edifícios.*, Edição 8.20, FEUP, 2024.
- [2] Berg, Richard. Sound (Physics). <https://www.britannica.com/science/sound-physics>, acessado a 21/02/2024.
- [3] Noise (Acoustics). <https://www.britannica.com/science/noise-acoustics>, acessado a 21/02/2024.
- [4] Pressão sonora. <https://www.binaural.com.br/blog/perda-auditiva/sistema-auditivo-entenda-como-funciona/>, acessado a 21/02/2024.
- [5] Areias, Bruno - *Simulação biomecânica do ouvido humano, incluindo patologias do ouvido médio*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [6] Brandão, Eric - *Acústica de Salas: projeto e modelagem*. Blucher, São Paulo, 2016.
- [7] Patrício, Jorge - *Acústica nos Edifícios - 7ª Edição*. Engebook, Espanha, 2018.
- [8] Propagação do som. <https://www.fq.pt/som/propagacao-do-som>, acessado a 23/02/2024.
- [9] Everest, F. A. - *The Master Handbook of Acoustics*, 5ª Edição, The McGraw-Hill Companies, Nova Iorque, 2009.
- [10] Ermann, Michael - *Architectural Acoustics Illustrated*, Hoboken, New Jersey, 2015.
- [11] Silva, Diogo - *Caracterização acústica do CineTeatro Eduardo Brazão*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [12] Curvas de incomodidade NC (Noise Criterion) e NR (Noise Rating) - https://www.cirrusresearch.co.uk/library/documents/technical_papers/TN31_Calculation_of_NR_and_NC_Curves_in_the_optimus_sound_level_meter_and_NoiseTools_software.pdf, acessado a 02/03/2024.
- [13] Barron, Michael - *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, Spon Press, 2ª Edição, 2010.
- [14] ASTM E1130 - 16; *Standard Test Method for Objective Measurement of Speech Privacy in Open Plan Spaces Using Articulation Index*, 2021.
- [15] IEC 60268-16:2011; *Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*, 2011.

- [16] Silva, Carlos - *O Tempo de Reverberação e a Inteligibilidade da Palavra - Caso de estudo: salas de aula da FEUP*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [17] Egan, David. *Architectural Acoustics*. J.ROSS publishing, Nova Iorque, 2007.
- [18] Almeida, Manuel; Silva, Sandra e Ferreira, Tiago - *Física das Construções: Acústica Ambiental e de Edifícios*. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, 2007.
- [19] Focalização - <https://portalacustica.info/acustica-para-auditorios-quais-problemas-contornar/>, acedido a 04/03/2024.
- [20] *Quadratic Residue Diffuser (QRD)* - <https://www.acousticfields.com/how-to-build-a-quadratic-diffuser/>, acedido a 04/03/2024.
- [21] *Art Diffuser* - <https://www.acousticsfirst.com/diffuser-art-diffuser-model-w.htm>, acedido a 04/03/2024.
- [22] Espetáculo. <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/espet%C3%A1culo>, acedido a 08/03/2024.
- [23] Teatro Grego: características, histórico, principais gêneros, autores e teatros. <https://haac1.wordpress.com/2017/09/15/teatro-grego-caracteristicas-historico-principais-generos-autores-e-teatros/>, acedido a 08/03/2024.
- [24] Teatro grego: história, elementos, figurinos e máscaras. <https://maestrovirtuale.com/teatro-grego-historia-elementos-figurinos-e-mascaras/>, acedido a 08/03/2024.
- [25] Long, Marshall - *Architectural Acoustics*, Elsevier, 2006.
- [26] Theatre (building). <https://www.britannica.com/art/theater-building>, acedido a 08/03/2024.
- [27] César, Lise - *Flutuações do espaço: Da Arquitetura para a Performance à Arquitetura-Performance*. Dissertação de Mestrado Integrado em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto, 2021.
- [28] Bellia, Angela e Bevilacqua, Antonella - *Rediscovering the Intangible Heritage of Past Performative Spaces: Interaction between Acoustics, Performance and Architecture*, Heritage, 2023.

- [29] Danckwardt, V. P. - *O edifício teatral. Resultado edificado da relação palco-platéia*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- [30] Sabine, W. C. - *Collected papers on acoustics*, Harvard University, Cambridge, 1922.
- [31] Gaspar, Anna - *Estudos de estratégias não-convencionais de acústica variável*. Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 2018.
- [32] Soares, Diana - *Condicionamento Acústico de espaços: Análise de uma Solução de Acústica Variável*. Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 2020.
- [33] Macedo, António - *Caracterização Acústica de Conchas Acústicas ao Ar Livre*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.
- [34] Concha acústica *Hollywood Bowl* - <https://www.hollywoodbowl.com/about/the-bowl/hollywood-bowl-history?modal=877174>, acedido a 09/03/2024.
- [35] Púlpito - https://pt.wikipedia.org/wiki/P%C3%BAlpito#/media/Ficheiro:Paris_06_-_St_Sulpice_pulpit_01.jpg, acedido a 09/03/2024.
- [36] RRAE - Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de junho, Diário da República, 2008.
- [37] Conservatório de Música do Porto – História <https://www.conservatoriodemusicadoporto.pt/a-escola/historia>, acedido a 26/03/2024.
- [38] Conservatório de Música do Porto <https://www.meloteca.com/o-conservatorio-de-musica-do-porto/>, acedido a 26/03/2024.
- [39] Conservatório de Música do Porto <https://artsandculture.google.com/partner/the-conservatory-of-music-of-oporto?hl=pt-pt>, acedido a 26/03/2024.
- [40] Cem anos do Conservatório de Música do Porto <https://www.porto.pt/pt/noticia/cem-anos-do-conservatorio-de-musica-do-porto>, acedido a 26/03/2024.
- [41] Google Earth, Conservatório de Música do Porto, Porto <http://www.google.com/earth/index.html>, acedido a 26/03/2024.

- [42] Conservatório de Música do Porto – Galeria de Imagens <https://www.conservatoriodemusicadoporto.pt/a-escola/galeria-de-imagens>, acedido a 26/03/2024.
- [43] *InAcoustics* - Sobre Nós. <https://www.inacoustics.com/sobre-nos/>, acedido a 26/03/2024.
- [44] Peças desenhadas do Conservatório de Música do Porto (documentos internos da *InAcoustics*).
- [45] Valores máximos de NR. NR - Curva de Classificação de Ruído (engineeringtoolbox.com), acedido a 16/04/2024.
- [46] Ribas, Manuel - *Caracterização acústica da Casa da Cultura de Ílhavo*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [47] Prada, Paulo - *Caracterização acústica do renovado CineTeatro de Amarante*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [48] Hirayama, André - *Caracterização acústica do Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [49] Pinto, Mónica - *Caracterização acústica de Grandes Auditórios - O caso do auditório da FEUP*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [50] Abelha, Helena - *Caracterização acústica do Centro de Artes de Águeda*. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2022.
- [51] Rocha, Gil - *Caracterização acústica do centro de congressos do Altice Fórum Braga*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2022.
- [52] Lemos, João - *Caracterização Acústica do Teatro Municipal da Covilhã*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [53] Miranda, Tiago - *Caracterização Acústica do Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra)*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.