

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DO TEATRO JORDÃO (GUIMARÃES)

MARIA CARVALHO FORTUNATO

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 2025

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2024/2025

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 Integrado em Engenharia Civil - 2023/2024 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2025*.

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 Irmã

A vida é muito importante para ser levada a sério

Oscar Wilde

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, obrigada por tudo o que sempre fizeram por mim. Por me darem as melhores bases, por estarem sempre presentes e por nunca deixarem de acreditar, mesmo quando as coisas não corriam bem. Foram exemplo de trabalho, de dedicação e de amor incondicional. Este caminho foi meu, mas foi construído com muito da vossa força, dos vossos valores e da vossa paciência. Nada disto teria sido possível sem vocês.

E ao meu cão, obrigada por estares sempre por perto, a teu jeito, sem pressas nem exigências. Mesmo sem saberes, foste muitas vezes o momento de calma que eu precisava no meio do caos.

Ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, agradeço a orientação atenta, a disponibilidade e a exigência construtiva. Foi um privilégio poder contar com o seu acompanhamento ao longo desta dissertação e ter tido a oportunidade de aprofundar conhecimentos através das suas aulas.

Ao Engenheiro António Eduardo Batista da Costa, agradeço todo o apoio na deslocação e medições no Teatro Jordão. A sua disponibilidade e simpatia foram fundamentais para facilitar este processo.

Aos amigos que ficaram, aos que chegaram nos últimos anos e aos que, de uma forma ou de outra, foram ficando por perto, obrigada por estarem presentes nos momentos bons e, principalmente, nos mais difíceis. Obrigada por me aturarem quando o *stress* apertava, por saberem sempre dar espaço ou puxar conversa quando era preciso e, acima de tudo, por conseguirem pôr um sorriso na minha cara mesmo nos dias em que parecia impossível. Foram fundamentais, mesmo que às vezes não o saibam.

À minha namorada, obrigada por estares ao meu lado ao longo destes dois anos. Foste apoio, força e calma em momentos em que tudo parecia demasiado. Obrigada por acreditares sempre em mim, mesmo quando eu não conseguia fazê-lo, por me ajudares a superar cada obstáculo e por estares presente de forma tão genuína e constante. Foste o meu refúgio nos dias mais difíceis e a minha motivação silenciosa em tantos outros. És o meu farol. Este trabalho também é teu.

RESUMO

A presente dissertação incide sobre a caracterização acústica do Teatro Jordão, um edifício histórico localizado na cidade de Guimarães, recentemente reabilitado para acolher atividades culturais, educativas e artísticas. O auditório principal deste espaço multifuncional recebe espetáculos de teatro, concertos musicais, conferências e atividades pedagógicas, cada um com exigências acústicas distintas, tornando essencial uma análise detalhada do seu desempenho sonoro e da sua adequação às várias tipologias de utilização.

O trabalho inicia-se com a apresentação dos fundamentos teóricos da acústica arquitetónica, incluindo conceitos como absorção sonora, isolamento sonoro, tempo de reverberação, inteligibilidade da palavra e os principais parâmetros objetivos utilizados na avaliação acústica de salas. Seguidamente, é abordado o enquadramento histórico e arquitetónico do Teatro Jordão, bem como as soluções adotadas no processo de reabilitação, com ênfase nas características geométricas e nos materiais de revestimento que influenciam o seu comportamento acústico.

A caracterização acústica foi realizada com base em medições *in situ*, efetuadas com a sala desocupada, com e sem o sistema AVAC em funcionamento. As medições foram analisadas por bandas de 1/3 de oitava nos pontos representativos da plateia e do balcão, e incluíram ainda a determinação das curvas de incomodidade NC e NR. De forma resumida, os principais valores médios obtidos, sem AVAC, foram:

- Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (LAeq): 25 dB;
- Tempo de reverberação (TR [500, 1.000 Hz]): 0,70 s;
- Rácio de baixos (BR_TR): 1,29;
- *Speech Transmission Index* (STI) médio: 0,70;
- Claridade (C_{80} [500, 1.000 Hz]): 8,6 dB;
- Definição (D_{50} [500, 1.000 Hz]): 0,74;
- Tempo central (t_s [500, 1.000 Hz]): 40 ms.

Os resultados foram analisados com base na legislação nacional (RRAE) e em referências recomendadas para diferentes usos da sala. Verificou-se que o espaço apresenta boas condições para a palavra, com níveis adequados de STI, Claridade e Definição. No entanto, o rácio de baixos inferior a 1,0 evidencia um desequilíbrio tonal nas frequências graves, o que pode comprometer a envolvimento sonora em contextos musicais. Em particular, no caso da música sinfónica, a resposta do auditório revela-se demasiado seca, evidenciando limitações na sustentação das frequências graves e na criação de um ambiente sonoro envolvente, essencial para este tipo de repertório.

Complementarmente, foi realizada uma análise comparativa com quinze salas de espetáculo nacionais, de diferentes tipologias, permitindo situar o Teatro Jordão no panorama acústico português. Esta comparação reforçou a sua adequação a funções comunicacionais, embora com menor vocação para repertórios musicais exigentes. Neste sentido, identificam-se oportunidades de melhoria futura, com vista à otimização da resposta acústica e à ampliação da versatilidade do auditório.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Salas de espetáculo, Tempo de reverberação, Inteligibilidade da palavra, Som.

ABSTRACT

This dissertation focuses on the acoustic characterization of Teatro Jordão, a historic building located in the city of Guimarães, Portugal, recently rehabilitated to host cultural, educational, and artistic activities. The main auditorium of this multifunctional venue accommodates theatre performances, musical concerts, conferences, and pedagogical events, each with specific acoustic requirements. This makes a detailed assessment of its acoustic performance and suitability for various types of use essential.

The study begins by presenting the theoretical foundations of architectural acoustics, covering concepts such as sound absorption, sound insulation, reverberation time, speech intelligibility, and the main objective parameters commonly used in the acoustic assessment of performance spaces. It then explores the historical and architectural context of Teatro Jordão, as well as the solutions adopted during the rehabilitation process, with emphasis on the geometric characteristics and the surface materials that influence its acoustic behaviour.

The acoustic characterization was based on *in situ* measurements, carried out with the auditorium unoccupied and with the HVAC system both on and off. The measurements were analysed in 1/3 octave frequency bands at representative locations in the audience area at the ground level and balcony. Additionally, Noise Criterion (NC) and Noise Rating (NR) curves were determined. A summary of the main average results obtained with the HVAC system off is as follows:

- Background noise sound level (LAeq): 25 dB;
- Reverberation time (RT [500, 1,000 Hz]): 0.70 s;
- Bass Ratio (BR_TR): 1.29;
- Speech Transmission Index (STI): 0.70;
- Clarity (C₈₀ [500, 1,000 Hz]): 8.6 dB;
- Definition (D₅₀ [500, 1,000 Hz]): 0.74;
- Central time (ts [500, 1,000 Hz]): 40 ms.

The results were analysed according to national regulatory requirements (RRAE) and reference values recommended for different usage types. The space showed good acoustic conditions for speech, with appropriate levels of STI, Clarity, and Definition. However, the bass ratio below 1.0 indicated a tonal imbalance in the lower frequencies, which may compromise the sense of envelopment in musical contexts. In particular, for symphonic music, the auditorium's response proved too dry, with limited low-frequency support and a lack of immersive sound, both essential for this type of repertoire.

Additionally, a comparative analysis was carried out with fifteen national performance venues of different typologies, allowing Teatro Jordão to be positioned within the Portuguese acoustic landscape. This comparison reinforced its suitability for communicational functions, although with limited aptitude for more demanding musical repertoires. In this regard, future improvement opportunities are identified, aiming at optimizing the acoustic response and enhancing the venue's versatility.

KEYWORDS: Acoustics, Theaters, Reverberation time, Speech intelligibility, Sound.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE QUADROS	XVI
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	XVIII

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	1
1.3. ESTRUTURA DA TESE	2
2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.1.1. O SOM	3
2.1.2. OUVIDO HUMANO	3
2.2. CONCEITOS TEÓRICOS BÁSICOS	4
2.2.1. ANÁLISE DA PRESSÃO	4
2.2.1.1. Propagação do Som	4
2.2.1.2. Celeridade	5
2.2.1.3. Intensidade e Potência Sonora	6
2.2.1.4. Níveis de Pressão Sonora	7
2.2.2. ANÁLISE DA FREQUÊNCIA	8
2.2.2.1. Definição	8
2.2.2.2. Comprimento de Onda	9
2.2.2.3. Bandas de Frequências	10
2.2.2.4. Curvas de Ponderação	10
2.2.3. ANÁLISE DO TEMPO	13
2.3. ABSORÇÃO SONORA	14
2.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	16
2.4.1. DEFINIÇÃO	16
2.4.2. EFEITOS	17
2.4.3. FÓRMULAS DE PREVISÃO	18

2.5. MATERIAIS E SISTEMAS DE ABSORÇÃO SONORA	19
2.5.1. CONCEITOS	19
2.5.2. MATERIAIS POROSOS E FIBROSOS	19
2.5.3. RESSOADORES	20
2.5.4. MEMBRANAS	21
2.6. ISOLAMENTO SONORO	22
2.6.1. DEFINIÇÃO E CONCEITOS	22
2.6.2. RUÍDO DE FUNDO E INCOMODIDADE	23
2.7. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	25
2.7.1. CONCEITOS	25
2.7.2. PARÂMETROS DE MEDIDA	25
2.8. ACÚSTICA ARQUITETÓNICA	27
2.8.1. CONCEITOS BÁSICOS	27
2.8.1.1. Reflexões e Ecos	27
2.8.1.2. Difusão	29
2.8.2. PARÂMETROS ACÚSTICOS	29
2.8.2.1. Introdução	29
2.8.2.2. Parâmetros Acústicos Objetivos	30
2.8.2.3. Parâmetros Acústicos Subjetivos	31
3. ESTADO DA ARTE	33
3.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	33
3.2. ACÚSTICA VARIÁVEL	44
3.2.1. INTRODUÇÃO	44
3.2.2. VARIAÇÃO NA ABSORÇÃO SONORA	45
3.2.3. VARIAÇÃO NO VOLUME	47
3.3. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS POR TIPO DE USO	49
3.3.1. AUDITÓRIOS PARA TEATRO	49
3.3.2. AUDITÓRIOS PARA A PALAVRA	51
3.3.3. SALAS PARA MÚSICA	53
3.3.4. SALAS PARA MÚLTIPLOS FINS	55
3.4. LEGISLAÇÃO PORTUGUESA	57
4. METODOLOGIA	59
4.1. TEATRO JORDÃO	59

4.1.1. ENQUADRAMENTO CENTRAL	59
4.1.2. CARACTERIZAÇÃO ARQUITETÓNICA E GEOMÉTRICA.....	61
4.2. METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS	67
4.2.1. PARÂMETROS MEDIDOS	67
4.2.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	67
4.2.3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	68
4.2.3.1. Ruído de Fundo.....	68
4.2.3.2. STI / Tempo de Reverberação / Claridade / Definição / Tempo Central.....	70
5. RESULTADOS OBTIDOS	73
5.1. RUÍDO DE FUNDO.....	73
5.2. CURVAS DE INCOMODIDADE (NC/NR).....	79
5.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	81
5.3.1. SALA VAZIA.....	81
5.3.2. SALA OCUPADA	84
5.3.3. RÁCIO DE BAIXOS (BR)	87
5.4. STI.....	87
5.5. CLARIDADE (C_{80})	90
5.6. DEFINIÇÃO (D_{50})	93
5.7. TEMPO CENTRAL (TS).....	96
6. ANÁLISE COMPARATIVA COM OUTRAS SALAS	101
6.1. INTRODUÇÃO	101
6.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	102
6.3. <i>RAPID SPEECH TRANSMISSION INDEX (RASTI) / SPEECH TRANSMISSION INDEX (STI)</i>	106
6.4. CLARIDADE, DEFINIÇÃO E TEMPO CENTRAL.....	110
7. CONCLUSÃO	115
7.1. CONCLUSÕES	115
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	118
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação do som através de uma onda sonora [3]	3
Figura 2.2 – Esquema do ouvido humano [4].....	4
Figura 2.3 – Propagação de som no ar (1- Zona de Compressão; 2- Zona de Rarefação) [7]. ...	5
Figura 2.4 – Pressão atmosférica e pressão sonora [7]	5
Figura 2.5 – Relação entre a Potência sonora (W) e Intensidade sonora (I). [1]	7
Figura 2.6 – Curvas de nível de audibilidade na audição humana [6]	7
Figura 2.7 – Espectro Sonoro do ser humano. [11].....	9
Figura 2.8 – Representação gráfica de sons de alta e baixa frequência. [12]	9
Figura 2.9 – Comprimento de onda (λ) de uma onda sonora. [6].....	9
Figura 2.10 – Curvas de igual sensibilidade auditiva (em fone) [7]	11
Figura 2.11 - Curvas de Ponderação (filtros) A, B, C e D [13]	12
Figura 2.12– Mecanismo da absorção sonora. [15]	14
Figura 2.13– Esquema de um tubo de ondas estacionárias [7]	15
Figura 2.14 – Som direto e som refletido [7]	16
Figura 2.15 – Definição de Tempo de Reverberação T (A- valor teórico; B- obtido por extrapolação do declive). [7].....	16
Figura 2.16 – Diferentes valores de tempos de reverberação ideais em função do uso. [17]....	17
Figura 2.17 - Comportamento em frequência dos três tipos de materiais e sistemas absorventes. [1]	19
Figura 2.18 – Esquema básico de Ressonadores. [1]	20
Figura 2.19 – Esquema básico de membranas. [1]	21
Figura 2.20 – Transmissão de ruído de percussão (esquerda) e ruído aéreo (direita). [21]	22
Figura 2.21 – Transmissão Sonora Direta e Transmissão Sonora Marginal. [22]	23
Figura 2.22 e 2.23 - Curvas NC (esquerda) [24] e NR (direita) [25]	24
Figura 2.24 – Efeito das reflexões sonoras numa sala de espetáculo. [7]	27
Figura 2.25 – Reflectograma de um espaço fechado. [7]	28
Figura 2.26 – Exemplo de reflectograma com eco. [23]	28
Figura 2.27 – Eco repetido (flutter eco) entre paredes. [23]	29
Figura 2.28 – Dispersão sonora das reflexões em difusão. [7]	29
Figura 3.1– Planta Esquemática de um teatro grego. [27].....	34
Figura 3.2 – Corte Transversal do Teatro de Epidauro, Grécia. [23].....	34
Figura 3.3 – Representação da propagação do som nos teatros gregos. [23]	34
Figura 3.4 – Planta esquemática de teatro romano. [28].....	35

Figura 3.5 – Vista aérea do Teatro de Aspendos, Turquia. [28].....	36
Figura 3.6 – Corte Transversal do Teatro de Aspendos, Turquia. [23].....	36
Figura 3.7 – Teatro Olímpico de Vicenza, Itália. [26].....	37
Figura 3.8 – Teatro all'Antica, Sabbioneta, Itália. [26]	37
Figura 3.9 – Teatro Farnese, Parma, Itália. [26].....	38
Figura 3.10 – Teatro Santo Giovanni e Paolo, Veneza, Itália. [26]	39
Figura 3.11 – Hanover Square Rooms, Londres, Inglaterra. [26].....	40
Figura 3.12 – Esquema do Altes Gewandhaus, Leipzig, Alemanha. [26].....	40
Figura 3.13 – Teatro Alla Scala, Milão, Itália. [23]	40
Figura 3.14 – Symphony Hall, Boston. [23].....	42
Figura 3.15 – Planta e secção do Symphony Hall, Boston. [23]	42
Figura 3.16 – Planta e secção do Metropolitan Opera House, Nova Iorque [23].....	43
Figura 3.17 – Planta e secção do Carnegie Hall, Nova Iorque. [26]	43
Figura 3.18 – Variação da absorção sonora de cortinas consoante o nível de pregueado [26].	45
Figura 3.19 e 3.20 – Painéis giratórios a 90° e a 180°, respetivamente (a) máxima absorção; b) mínima absorção). [29].....	46
Figura 3.21 – Paineis deslizantes (a) mínima absorção; b) máxima absorção). [29]	46
Figura 3.22– Prismas rotativos utilizados nas paredes e teto do Espace de Projection, IRCAM: (a) reflexão espetacular; (b) difusão; (c) absorção; (d) difusão elevada. [23].....	47
Figura 3.23 – Veterans' Memorial Auditorium, Califórnia: a) configuração da sala como espaço para concertos (esquerda) e para teatro (direita); b) representação das reflexões de primeira ordem. [29]	48
Figura 3.24 – Diferentes posições possíveis do teto móvel do Milton Keynes Theatre, Reino Unido. [23]	48
Figura 3.25 – Eugene McDermott Concert Hall, Dallas: planta e corte com indicações das cavidades reverberantes acopladas. [23].....	49
Figura 3.26 – Cain Auditorium, Manhattan: a) configuração da sala como espaço para concertos (esquerda) e para teatro (direita); b) representação das reflexões de primeira ordem. [29]	49
Figura 3.27 – Tipologias de palcos mais comuns em auditórios para teatro. [26]	50
Figura 3.28 – Impacto negativo da geometria do teto na eficácia das reflexões sonoras. [23] ..	51
Figura 3.29 – Representação da intensidade do som ao longo do tempo, evidenciando o efeito de mascaramento das consoantes pelas vogais. [23].....	52
Figura 3.30 – Relação entre o volume da sala e o tempo de reverberação recomendado para diferentes usos. [26].....	52
Figura 3.31 – Relação entre a inteligibilidade da palavra e a relação sinal/ruído para diferentes tipos de sons (frases ou palavras isoladas). [26].....	53

Figura 3.32 – Representação de respostas impulsivas em duas salas de concerto: a) sala pequena; b) sala maior. [23].....	54
Figura 3.33 – Formas típicas, em planta, de salas de concerto. [26].....	55
Figura 4.1 – Bernardino Jordão. [35]	59
Figura 4.2– Localização do Teatro Jordão, em Guimarães. [35]	60
Figura 4.3 – Teatro Jordão, Guimarães. [32]	60
Figura 4.4 – Auditório principal do Teatro Jordão, visto a partir do palco. [32].....	61
Figura 4.5 – Planta Piso 0 (plateia) do Teatro Jordão. [36]	62
Figura 4.6 – Planta do Piso 1 (balcão) do Teatro Jordão. [36].....	62
Figura 4.7 – Corte longitudinal A-A' do Teatro Jordão. [36].....	63
Figura 4.8 – Revestimento das paredes laterais da plateia com painéis de madeira (esquerda); detalhe do material fonoabsorvente aplicado entre os painéis (direita). [fotos da autora]	64
Figura 4.9 – Detalhes dos painéis absorventes de fibras de madeira aplicados nas paredes do palco do Teatro Jordão. [fotos da autora]	64
Figura 4.10 – Cortinas de tecido espesso aplicadas no palco do Teatro Jordão. [foto da autora]	65
Figura 4.11 – Canópias suspensas em madeira no teto do auditório. [foto da autora]	65
Figura 4.12 – Assentos estofados da plateia do Teatro Jordão. [fotos da autora].....	66
Figura 4.13– Grelhas do sistema AVAC localizados sob os assentos da plateia do Teatro Jordão. [foto da autora].....	66
Figura 4.14 – Equipamentos de medição: 1 - Fonte sonora Brüel & Kjær 4720; 2 - Sonómetro Brüel & Kjær 2260; 3 - Calibrador de microfone Brüel & Kjær 4231; 4 - Microfone Brüel & Kjær 4189. [37] [38] [39] [40]	68
Figura 4.15 – Planta do Teatro Jordão com a representação dos pontos RF1 e RF2 escolhidos para as medições do ruído de fundo na plateia. (adaptado de [36]).....	69
Figura 4.16 – Planta do Teatro Jordão com a representação do ponto RF3 escolhido para a medição do ruído de fundo no balcão. (adaptado de [36]).	69
Figura 4.17 – Planta do Teatro Jordão com a representação da fonte sonora (FS) e dos pontos P1, P2 e P3 escolhidos para a medição do TR, ts, C_{80} , D_{50} e STI, localizados na plateia. (adaptado de [36]).....	70
Figura 4.18 - Planta do Teatro Jordão com a representação dos pontos P4 e P5 escolhidos para a medição do TR, ts, C_{80} , D_{50} e STI, localizados no balcão. (adaptado de [36]).....	71
Figura 4.19 – Monitorização das medições acústicas com recurso ao software DIRAC: à esquerda, sonómetro Brüel & Kjær 2260 ligado ao sistema; à direita, registo dos dados durante o ensaio. [fotos da autora].....	71
Figura 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.	76

Figura 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.	77
Figura 5.3– Valores médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) com e sem o sistema de AVAC em funcionamento e a diferença entre ambos para bandas de frequência de 1/3 de oitava.	77
Figura 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 de AVAC em funcionamento e a diferença entre ambos para bandas de frequência de 1/3 de oitava.	78
Figura 5.5– Comparação dos níveis médios de pressão sonora de ruído de fundo no Teatro Jordão, com o sistema AVAC em funcionamento, com as curvas de incomodidade NC.....	80
Figura 5.6 – Comparação dos níveis médios de pressão sonora de ruído de fundo no Teatro Jordão, com o sistema AVAC em funcionamento, com as curvas de incomodidade NR.....	80
Figura 5.7 – Resultados do Tempo de Reverberação (TR) por bandas de frequência de 1/3 de oitava, em cada ponto de medição e respetiva média.....	83
Figura 5.8- Resultados do Tempo de Reverberação (TR) por bandas de frequência de 1/1 de oitava, em cada ponto de medição e respetiva média.....	84
Figura 5.9 - Valores do tempo de reverberação com a sala desocupada (0%) e totalmente ocupada previsto (100%) em bandas de 1/1 oitava.	86
Figura 5.10 – Comparação dos valores do parâmetro STI, em cada ponto de medição, com e sem o sistema AVAC em funcionamento.....	89
Figura 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.	91
Figura 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.	92
Figura 5.13- Valores da Claridade (C_{80}), com e sem o sistema AVAC em funcionamento, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava.	92
Figura 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.	94
Figura 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.	95
Figura 5.16 – Valores da Definição (D_{50}), com e sem o sistema AVAC em funcionamento, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava.	96
Figura 5.17 – Resultados do Tempo Central (t_s), com o sistema AVAC desligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava.	98
Figura 5.18 – Resultados do Tempo Central (t_s), com o sistema AVAC ligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava.	98
Figura 5.19 – Valores da Tempo Central (t_s), com e sem o sistema AVAC em funcionamento, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava.	99

Figura 6.1 - Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] em função do Volume das quinze salas nacionais e do Teatro Jordão com linha de tendência (logarítmica).	104
Figura 6.2 - Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] em função do número de lugares das quinze salas nacionais e do Teatro Jordão com linha de tendência (logarítmica).	105
Figura 6.3 – Valores do parâmetro RASTI ou STI médio em função do Tempo de reverberação médio (TR [500, 1.000 Hz]) das quinze salas nacionais incluindo, Teatro Jordão com linha de tendência (potência).	109
Figura 6.4 – Valores do parâmetro RASTI ou STI médio em função do Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) sem AVAC de quinze salas nacionais incluindo, o Teatro Jordão com linha de tendência (linear)	109
Figura 6.5 – Valores do parâmetro RASTI ou STI médio em função do Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) com AVAC de quinze salas nacionais incluindo, o Teatro Jordão com linha de tendência (linear)	110
Figura 6.6 - Valores do parâmetro Claridade média em função do Tempo de Reverberação médio das cinco salas nacionais incluindo, o Teatro Jordão com linha de tendência (exponencial) ..	112
Figura 6.7 – Valores do parâmetro Claridade média em função do Tempo Central médio das cinco salas nacionais incluindo, o Teatro Jordão com linha de tendência (exponencial)	112
Figura 6.8 – Valores do parâmetro Claridade média em função da Definição média das cinco salas nacionais incluindo, o Teatro Jordão com linha de tendência (linear).	113

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Valores numéricos (dB) das ponderações da curva A para bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava na gama do audível. [1]	13
Quadro 2.2 – Valores limites máximos de NC para algumas situações. [1]	24
Quadro 2.3 – Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes. [1].....	25
Quadro 2.4 – Perceção subjetiva para a inteligibilidade e privacidade da palavra em função dos valores numéricos do AI. [1]	26
Quadro 2.5 – Relação entre o parâmetro STI (ou RASTI) e a Inteligibilidade da palavra. (traduzido de [7])	27
Quadro 3.1 – Limites básicos de capacidade, distância ao palco e tempo de reverberação em função do uso do auditório (traduzido de [23])	45
Quadro 3.2 – Distâncias máximas para inteligibilidade da palavra em função do rácio de reflexões iniciais nos teatros. (adaptado de [23])	50
Quadro 3.3 – Tempos de Reverberação recomendados para os diferentes tipos de música. (adaptado de [23] [25]).....	54
Quadro 3.4 – Intervalo ideal de volume por lugar, por tipo de auditório. [26]	56
Quadro 5.1 - Níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), com o sistema AVAC desligado, 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})	74
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}).....	75
Quadro 5.3 – Avaliação regulamentar (RRAE) do nível sonoro contínuo equivalente no interior do Teatro Jordão. [30].....	79
Quadro 5.4 – Verificação do cumprimento dos limites recomendados para curvas NC no Teatro Jordão. [41].....	81
Quadro 5.5 – Verificação do cumprimento dos limites recomendados para curvas NR no Teatro Jordão. [41].....	81
Quadro 5.6 – Resultados do Tempo de Reverberação (T_{30}), em cada ponto de medição do Teatro Jordão, por bandas de frequência de 1/3 de oitava compreendidas num intervalo de 100 a 5.000 Hz; Média e Desvio Padrão.....	82
Quadro 5.7 - Resultados do Tempo de Reverberação (T_{30}), em cada ponto de medição do Teatro Jordão, por bandas de frequência 1/1 de oitava compreendidas num intervalo de 125 a 4.000 Hz; Média e Desvio Padrão.	83
Quadro 5.8– Avaliação regulamentar (RRAE) do tempo de reverberação médio do Teatro Jordão para a função oratória.	84
Quadro 5.9 - Parâmetros utilizados para a previsão do Tempo de Reverberação (TR) com a sala totalmente ocupada do Teatro Jordão.	85

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.	85
Quadro 5.11 – Verificação dos 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. [1].....	86
Quadro 5.12 – Valores do rácio de baixos (BR_TR) em bandas de 1/1 oitava nos nove pontos ensaiados do Teatro Jordão.....	87
Quadro 5.13 - Resultados do STI, em cada ponto de medição, com e sem o sistema AVAC em funcionamento, incluindo os respetivos desvios-padrão e médias.....	88
Quadro 5.14 – Diferença entre os valores médios do STI com e sem o sistema AVAC em funcionamento para cada ponto de medição, incluindo a média global.	89
Quadro 5.15 - Resultados da Claridade (C_{80}), em cada ponto de medição, sem o sistema AVAC ligado, incluindo os respetivos desvios-padrão e médias.	90
Quadro 5.16 - Resultados da Claridade (C_{80}), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC ligado, incluindo os respetivos desvios-padrão e médias.	91
Quadro 5.17 – Verificação dos valores médios da Claridade (C_{80}) dos 500 e 1000 Hz, em condições de sala vazia e ocupada com os valores recomendados em função do tipo de utilização.....	93
Quadro 5.18 – Resultados da Definição (D_{50}), em cada ponto de medição, sem o sistema AVAC ligado, incluindo os respetivos desvios-padrão e médias.	94
Quadro 5.19 – Resultados da Definição (D_{50}), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC ligado, incluindo os respetivos desvios-padrão e médias.	95
Quadro 5.20 – Resultados do Tempo Central (t_s), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC desligado, incluindo os respetivos desvio-padrão e média.	97
Quadro 5.21 – Resultados do Tempo Central (t_s), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC ligado, incluindo os respetivos desvio-padrão e média.	97
Quadro 6.1 – Comparação das diversas funções das quinze salas nacionais.....	102
Quadro 6.2 – Valores do Volume, Número de lugares e TR médio (500, 1000 Hz) das quinze salas nacionais incluindo o Teatro Jordão.	103
Quadro 6.3 – Verificação dos valores recomendados do parâmetro tempo de reverberação médio de acordo com vários tipos de uso das quinze salas nacionais [42] [43] [44] [45] [46] [47] [48] [49] [50] [51] [52] [53] [54] [1]	106
Quadro 6.4 – Valores do Volume, Número de lugares, RASTI ou STI médio e Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) com e sem AVAC para as quinze salas nacionais incluindo o Teatro Jordão.....	107
Quadro 6.5 – Valores da C_{80} , D_{50} , TS e TR médios (500, 1000 Hz) das cinco salas nacionais incluindo o Teatro Jordão.	111
Quadro 6.6 – Valores de R^2 obtidos entre pares de parâmetros. Entre parêntesis é indicado o tipo de regressão (exp = exponencial; lin = linear; log = logarítmica) correspondente ao maior R^2 obtido entre os três modelos.	111

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A	– Área de Absorção sonora equivalente (m^2)
AC	– <i>Articulation Class</i>
AI	– <i>Articulation Index</i> (Índice de Articulação)
AVAC	– Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BR	– <i>Bass Ratio</i> (Rácio de Baixos)
c	– Celeridade (m/s)
C_{80}	– Claridade (dB)
α	– Coeficiente de absorção sonora
λ	– Comprimento de onda (m)
K	– Constante
D_{50}	– Definição
EDT	– <i>Early Decay Time</i> (Tempo de Decaimento Curto) (s)
E	– Energia (J)
FS	– Fonte Sonora
f	– Frequência (Hz)
f_0	– Frequência central; valor médio (Hz)
f_1	– Frequência de limite inferior (Hz)
f_2	– Frequência de limite superior (Hz)
ITDG	– <i>Initial Time Delay Gap</i> (ms)
I	– Intensidade Sonora (W/m^2)
I_0	– Intensidade Sonora de Referência (W/m^2)
B	– Largura de banda (Hz)
ρ	– Massa Volúmica (kg/m^3)
L_i	– Nível de Intensidade Sonora (dB)
L_p	– Nível de Pressão Sonora (dB)
L_w	– Nível de Potência Sonora (dB)
L_{eq}	– Nível de pressão sonora contínua equivalente (dB)
L_A	– Nível Sonoro (dB)
NC	– <i>Noise Criteria</i>
NR	– <i>Noise Rating</i>

p – Pressão (Pa)

P_{at} – Pressão atmosférica (Pa)

p_0 – Pressão de Referência (Pa)

r – Distância (m)

RASTI – *Rapid Speech Transmission Index*

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

S – Superfície real do material (m²)

SIL – *Speech Interference Level*

STI – *Speech Transmission Index*

T – Temperatura (K)

t_s – Tempo central (ms)

θ – Temperatura (°C)

V – Volume do comportamento (m³)

W – Potência Sonora (W)

W_0 – Potência Sonora de Referência (W)

DIRAC – *Software* utilizado para medição e análise de parâmetros acústicos

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

A acústica é a ciência que estuda a geração e propagação do som e os seus efeitos nos diferentes ambientes, sendo essencial para compreender a forma como o som interage com os espaços construídos. O seu estudo tornou-se fundamental para áreas como a comunicação, a música e a arquitetura, influenciando diretamente a qualidade da percepção sonora em teatros, auditórios e outras salas de espetáculo.

Ao longo da História, diferentes civilizações procuraram formas de otimizar a propagação do som nos seus espaços de espetáculo. Os teatros gregos e romanos são exemplos notáveis desse esforço, tendo sido concebidos com base em observações empíricas rigorosas e soluções arquitetónicas engenhosas que permitiam assegurar que a voz dos atores fosse claramente ouvida por toda a plateia, mesmo sem o auxílio de amplificação. Com o avanço da tecnologia e do conhecimento acústico, a compreensão sobre a propagação sonora e o impacto dos materiais e da geometria dos espaços tornou-se mais detalhada surgindo, no século XX, com o trabalho pioneiro de W.C Sabine, a acústica arquitetónica como uma área estruturada, possibilitando uma abordagem mais técnica e objetiva ao projeto e reabilitação de salas de espetáculo. [1]

Apesar desses avanços, muitos edifícios históricos foram construídos sem considerações acústicas detalhadas, uma vez que, na época, não existiam conhecimentos técnicos ou ferramentas de previsão acústica. Além disso, a necessidade de preservar a configuração original desses espaços limita as possibilidades de intervenção, o que dificulta a sua adaptação às exigências acústicas modernas. Nos últimos anos, a crescente valorização da acústica tem impulsionado intervenções que procuram equilibrar a preservação do património arquitetónico com a otimização da qualidade sonora. O desenvolvimento de novas metodologias e tecnologias tornou possível caracterizar espaços com maior precisão, possibilitando ajustes que asseguram um desempenho acústico otimizado sem comprometer a integridade histórica dos edifícios.

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objetivo desta dissertação é a caracterização acústica do Teatro Jordão, analisando se, após a sua reabilitação, os seus parâmetros acústicos cumprem os valores de referência regulamentares e os critérios desejáveis para a sua utilização. Pretende-se avaliar a adequação das condições sonoras do espaço às diferentes tipologias de eventos realizados, garantindo uma experiência auditiva de qualidade para o público e a otimização do desempenho acústico da sala. Para esse

efeito, foram realizadas medições *in situ* com equipamentos especializados, permitindo recolher dados objetivos sobre o comportamento acústico do auditório.

Os parâmetros analisados incluem:

- Tempo de reverberação;
- *Speech Transmission Index (STI)*;
- Níveis de pressão sonora do ruído de fundo;
- Curvas de Incomodidade NC e NR.
- Claridade (C_{80});
- Definição (D_{50});
- Tempo Central (t_s).

1.3. ESTRUTURA DA TESE

A presente dissertação encontra-se organizada em sete capítulos.

No primeiro capítulo, “Introdução”, é abordado o contexto geral da dissertação, os objetivos a ser atingidos e a estrutura global do documento.

No segundo capítulo, “Conceitos e Definições”, são apresentados os princípios fundamentais da acústica essenciais para a compreensão do trabalho.

O terceiro capítulo, “Estado da Arte”, explora a evolução da acústica em teatros e os desafios associados à reabilitação de edifícios históricos, bem como as exigências funcionais e regulamentares aplicáveis a salas de espetáculo.

No quarto capítulo, “Metodologia”, é descrito o Teatro Jordão enquanto caso de estudo, abordando a sua caracterização arquitetónica e geométrica. Além disso, são ainda detalhados os procedimentos de medição, os equipamentos utilizados e os parâmetros acústicos analisados.

No quinto capítulo, “Resultados Obtidos”, são apresentados os dados recolhidos a partir das medições *in situ*, acompanhados das respetivas análises e verificações com valores regulamentares ou ideais.

No sexto capítulo, “Análise Comparativa com Outras Salas”, é realizada uma comparação dos resultados obtidos com os de outras salas de espetáculo previamente estudadas.

No sétimo e último capítulo, “Conclusão”, encontram-se conclusões referentes aos resultados obtidos e de todo o trabalho realizado na dissertação, destacando possíveis melhorias acústicas e sugerindo direções para futuros estudos na área.

Por fim, são apresentadas as Referências Bibliográficas, onde se encontram todas as fontes consultadas para a realização desta dissertação.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. INTRODUÇÃO

2.1.1. O SOM

O som é o resultado, no cérebro, de um fenómeno físico resultante da vibração de um meio natural, sendo uma onda mecânica longitudinal no ar que requer um meio elástico para se propagar, podendo ser captado pelo sistema auditivo (Figura 2.1). Essas ondas sonoras têm origem numa fonte sonora (a causa) e propagam-se em todas as direções a partir dela (o efeito). [2] [3]

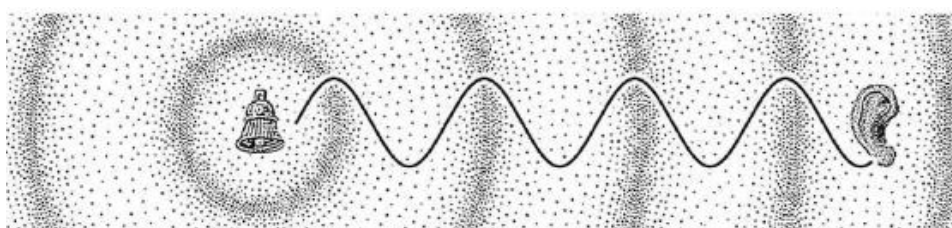


Figura 2.1 - Representação do som através de uma onda sonora [3]

Este som pode ser classificado em dois tipos: Som e Ruído. A distinção de ambos não depende apenas das características físicas da onda, mas também da percepção subjetiva do ouvinte. Enquanto o som é geralmente associado a algo agradável e/ou com significado para o ouvinte, o ruído é, frequentemente, percebido como desagradável ou caótico e/ou sem significado para o ouvinte. Apesar de apresentarem esta distinção, ambos resultam do mesmo fenómeno físico, sendo a interpretação que lhes é dada o fator determinante. [1]

O estudo dos sons ou dos ruídos baseia-se em três domínios de análise distintos: Pressão, Frequência e Tempo.

2.1.2. OUVIDO HUMANO

O ouvido humano é um órgão especializado na captação e interpretação de estímulos, sendo responsável por transformar vibrações mecânicas em impulsos elétricos que são processados pelo cérebro como som (ou ruído). No entanto, a audição apresenta limitações, não sendo capaz de detetar sons com frequências inferiores a 20 Hz (infra-sons) ou superiores a 20 kHz (ultra-sons).

A estrutura do ouvido divide-se em três partes principais: ouvido externo, ouvido médio e ouvido interno, como apresenta a Figura 2.2.

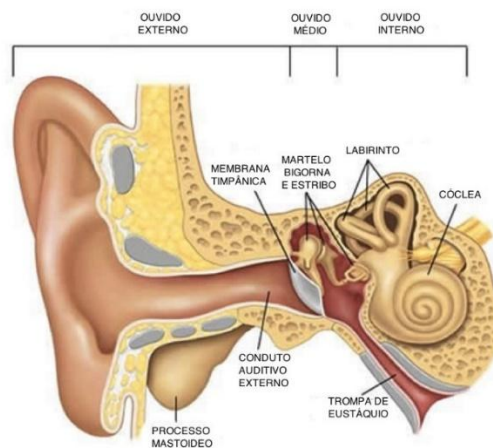


Figura 2.2 – Esquema do ouvido humano [4]

O ouvido externo permite a entrada do som no canal auditivo de forma direta ou através da reflexão no pavilhão auditivo (orelha), cuja estrutura auxilia na condução eficiente das ondas sonoras, com o objetivo de potenciar a sua captação e localização espacial. Esta configuração anatómica contribui, assim, para melhorar a percepção da direção e intensidade dos sons.

O ouvido médio tem a função de amplificar e transmitir a pressão exercida pelas ondas sonoras no tímpano até ao ouvido interno. O tímpano, uma membrana elástica, vibra em resposta às ondas sonoras, e essa vibração é conduzida pelos ossículos (martelo, bigorna e estribo) que intensificam e ajustam a transmissão mecânica do som. Para além disso, contribui para adaptação da audição a diferentes níveis de intensidade sonora e para a atenuação de amplitudes sonoras excessivas.

O ouvido interno é composto pela cóclea, que converte o som em sinais elétricos, e pelo labirinto, cuja função está relacionada com o equilíbrio corporal. Na cóclea, as escalas vestibular e timpânica formam um sistema hidrodinâmico, onde as variações de pressão deslocam a membrana basilar. Esses deslocamentos originam oscilações consoante a frequência do som: as frequências mais elevadas (sons agudos) provocam maior vibração na região mais tensa da membrana basilar, próxima ao estribo, enquanto as frequências mais baixas (sons graves) produzem oscilações na parte mais espessa e flexível, situada na cóclea. O ouvido interno liga-se ao encéfalo através do nervo auditivo, sendo este o responsável pela condução dos impulsos elétricos gerados pela cóclea. Sem essa decodificação, os estímulos captados pelo ouvido não teriam o mesmo significado. [5]

2.2. CONCEITOS TEÓRICOS BÁSICOS

2.2.1. ANÁLISE DA PRESSÃO

2.2.1.1. Propagação do Som

O som requer a presença de um meio material para se propagar, uma vez que as ondas sonoras se deslocam através da vibração das partículas desse meio. Assim, o som não se propaga no vácuo. Embora o ar seja um dos condutores mais comuns, a propagação sonora também ocorre em líquidos e sólidos, como a água, o aço e o betão. [6] [7]

No presente estudo, considera-se o ar como meio de propagação mais relevante, pelo que a análise será centrada exclusivamente neste meio. No ar, o som propaga-se geralmente sob a forma de ondas concêntricas, tendo a fonte sonora como ponto central. Quando a fonte é ativada, as partículas do meio entram em colisão sucessiva, provocando variações na velocidade e, consequentemente, flutuações na pressão existente, que se propagam devido à elasticidade do meio. Como resultado desse fenómeno, formam-se em torno da fonte sonora zonas alternadas de compressão e rarefação, correspondentes a locais de maior e menor pressão, respetivamente (Fig. 2.3). [1]

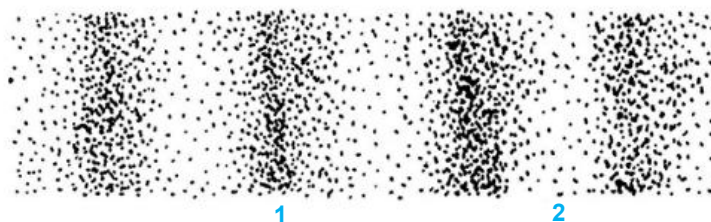


Figura 2.3 – Propagação de som no ar (1- Zona de Compressão; 2- Zona de Rarefação) [7].

O som deve-se, assim, às variações de pressão no meio de propagação das ondas sonoras, provocadas pela sucessiva colisão das partículas que o constituem. Por esse motivo, a variação da pressão sonora é um dos elementos mais importantes a ser medido, sempre tomando como referência a pressão atmosférica normal, cujo valor aproximado de 101400 Pa ($\approx 10^5$ Pa). O ouvido humano é sensível apenas a pequenas variações em torno desse valor, sendo essa a base da percepção auditiva. (Figura 2.4) [1]

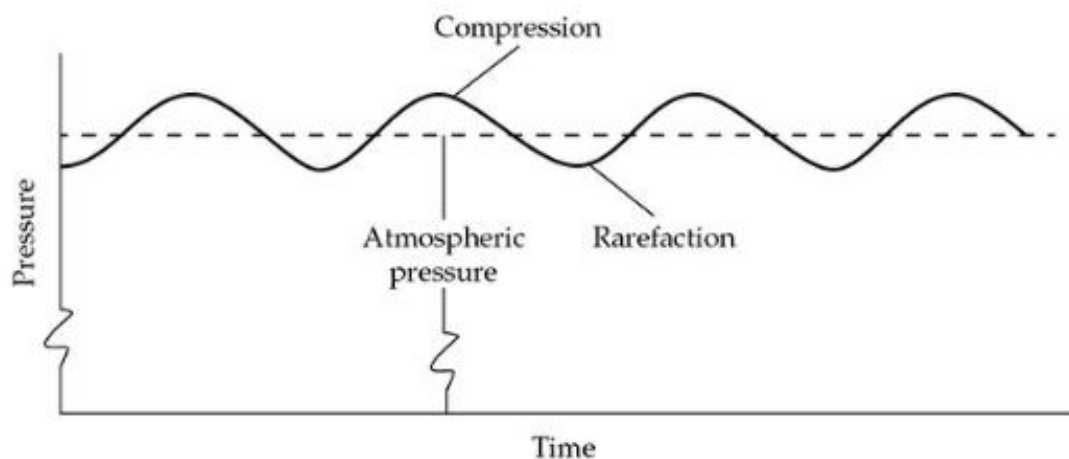


Figura 2.4 – Pressão atmosférica e pressão sonora [7]

2.2.1.2. Celeridade

A celeridade do som, também designada por velocidade de propagação das ondas sonoras, corresponde à rapidez com que as variações de pressão se deslocam através de um meio. Essa velocidade depende diretamente das características do meio de propagação, nomeadamente da sua densidade, elasticidade e temperatura. [6] [7]

No ar, a celeridade do som à temperatura de 20°C e ao nível do mar é de aproximadamente 343 m/s. A sua variação com a temperatura pode ser descrita de acordo com a expressão 2.1: [1]

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

Em que:

- c – Celeridade (m/s);
- T – Temperatura (K);
- θ – Temperatura (°C).

2.2.1.3. Intensidade e Potência Sonora

Como já foi referido anteriormente, a pressão é uma das grandezas mais importante na análise da propagação sonora. No entanto, além desta, existem mais duas grandezas fundamentais: a Intensidade Sonora e a Potência Sonora, que permitem descrever a energia transportada pelas ondas sonoras e o comportamento da sua propagação. [1]

A Intensidade Sonora (I) corresponde à quantidade medida de energia que atravessa, por segundo, uma área de 1 m², na perpendicular à direção de propagação do som. Diferente da pressão sonora, que é uma grandeza escalar, a intensidade sonora é vetorial, permitindo descrever a propagação do som em diferentes direções (Figura 2.5). [1]

Por outro lado, a Potência Sonora (W) é uma característica média temporal da fonte sonora e representa a energia total emitida num segundo, independentemente da direção. Define-se como a quantidade de energia que atravessa uma esfera fictícia de qualquer raio centrada na fonte sonora. [1]

A relação entre potência, intensidade e pressão sonora é dada pela expressão 2.2:

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

Onde,

- I – Intensidade sonora (W/m²);
- W – Potência sonora (W);
- r – Distância (m);
- p – Pressão sonora (Pa);
- ρ – Massa volúmica (kg/m³), para o ar $\approx 1,2$ kg/m³;
- c – Celeridade (m/s).

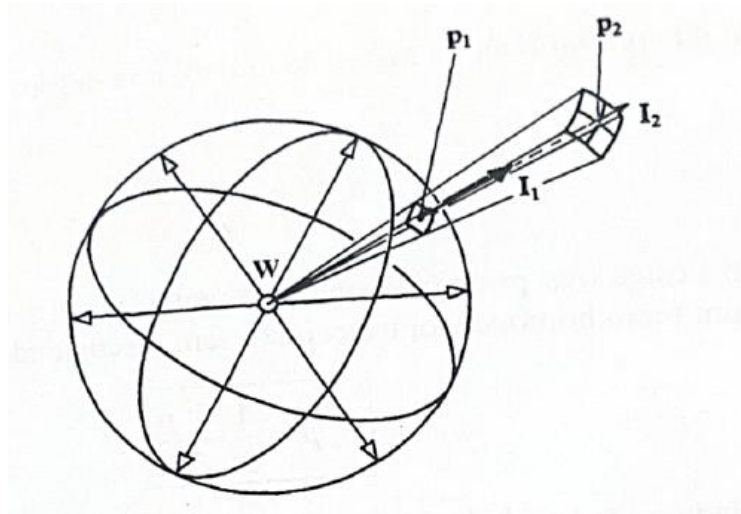


Figura 2.5 – Relação entre a Potência sonora (W) e Intensidade sonora (I). [1]

2.2.1.4. Níveis de Pressão Sonora

O ouvido é sensível a uma gama ampla de pressões sonoras, variando entre os 2×10^{-5} Pa (limiar da audição) e 10^2 Pa (limiar da dor). A razão entre esses valores extremos é cerca de 10^7 , o que demonstra a elevada dinâmica da percepção auditiva humana. Devido à grande discrepância entre os valores mínimo e máximo, a utilização de uma escala linear em *pascal* para a análise de pressões sonoras torna-se pouco útil. Para superar essa limitação, foi introduzida a escala de níveis de pressão sonora, expressa em *decibel* (dB), onde o limiar da audição corresponde a 0 dB e o limiar da dor a, aproximadamente, 130 dB (Figura 2.6). [8] [9]

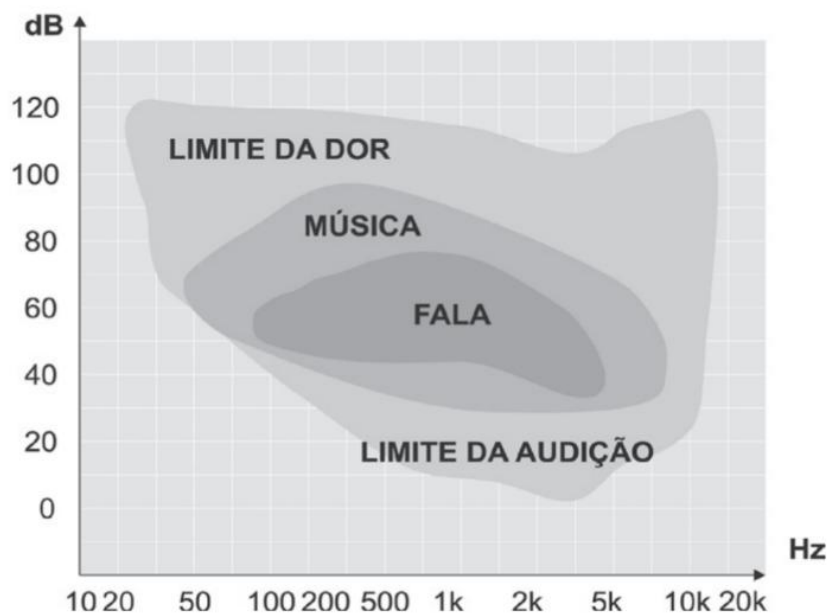


Figura 2.6 – Curvas de nível de audibilidade na audição humana [6]

De modo a realizar a conversão de pressões (p) para níveis de pressão sonora (L_p) utiliza-se a equação 2.3: [9]

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

Onde,

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

Além da pressão sonora, há outras grandezas acústicas, como a intensidade sonora (I) e a potência sonora (W), que podem ser expressas em *decibel*. Essas relações são descritas pelas equações 2.4 e 2.5, respetivamente: [8]

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2.4)$$

$$L_W = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (2.5)$$

Onde,

- I – Intensidade sonora (W/m^2);
- I_0 – Intensidade sonora de referência = 10^{-12} W/m^2 ;
- W – Potência sonora (W);
- W_0 - Potência de referência = 10^{-12} W.

Em casos nos quais seja necessário somar níveis de pressão sonora provenientes de fontes independentes, a soma é realizada de forma logarítmica, conforme mostra a equação 2.6. Este método não se aplica a fontes dependentes, dado que a interferência entre sinais pode alterar significativamente o resultado. [1]

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

2.2.2. ANÁLISE DA FREQUÊNCIA

2.2.2.1. Definição

A frequência (f) é uma das características fundamentais do som, sendo a segunda mais relevante na sua descrição, logo após a pressão sonora. Define-se como o número de ciclos completos de uma onda sonora que ocorrem por segundo e é expressa em *hertz* (Hz), em homenagem ao físico alemão Heinrich Hertz. [1] [7]

Como já foi referido anteriormente, a faixa de audição humana situa-se, em regra, entre 20 e 20.000 Hz, sendo que as frequências mais baixas correspondem aos sons graves e as frequências mais altas aos sons agudos. Sons com frequências inferiores a 20 Hz são denominados por infrassons, podendo ser produzidos por fenómenos como vibrações da água e batimentos cardíacos. Já as frequências superiores a 20 kHz são classificadas como ultrassons, estando associadas a emissões de animais, sonares, equipamentos médicos e industriais (Figura 2.7). [10]

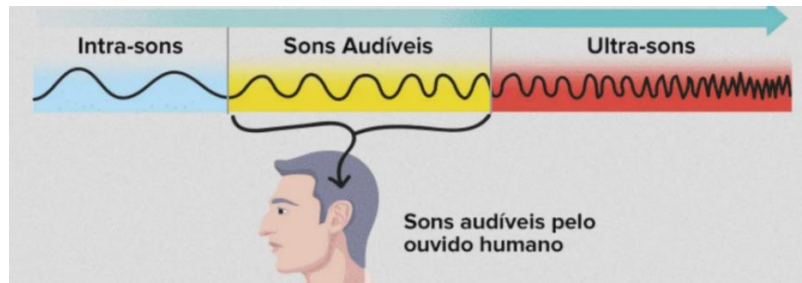


Figura 2.7 – Espectro Sonoro do ser humano. [11]

Na acústica dos edifícios, é habitual distinguir três zonas de frequências (Figura 2.8): [1]

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



Figura 2.8 – Representação gráfica de sons de alta e baixa frequência. [12]

2.2.2.2. Comprimento de Onda

O comprimento de onda (λ) corresponde à distância percorrida por uma onda durante um ciclo completo de oscilação. Pode ser medido entre dois pontos correspondentes de ciclos consecutivos, como picos sucessivos ou qualquer outro ponto idêntico na forma da onda. Este conceito aplica-se não apenas a ondas sonoras, mas também a qualquer onda periódica (Figura 2.9). [7]

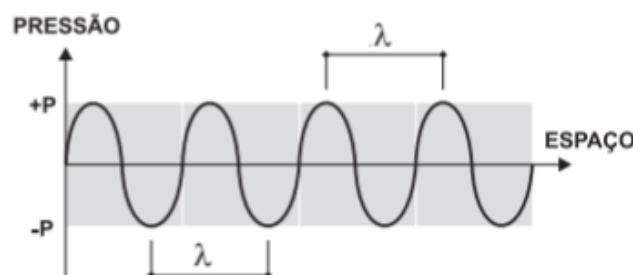


Figura 2.9 – Comprimento de onda (λ) de uma onda sonora. [6]

Em acústica, o comprimento de onda está diretamente relacionado com a frequência (f) e a celeridade do som (c) através da equação 2.7: [6]

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.7)$$

Onde,

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

2.2.2.3. Bandas de Frequências

As bandas de frequência correspondem a intervalos de frequências definidos por um limite inferior e um limite superior. A criação destas bandas tornou-se essencial para a análise acústica, pois permite simplificar o estudo do som e do ruído, evitando a necessidade de analisar individualmente as incontáveis frequências existentes. [1]

A largura da banda representa a diferença entre os seus limites superior e inferior. Existem diversas bandas de frequência, no entanto na acústica de edifícios e para esta dissertação irão apenas ser utilizadas as denominadas bandas proporcionais de oitava, neste caso, de 1/1 oitava e 1/3 oitava. O cálculo da largura de uma banda de oitava ou fração de oitava é realizado através das equações 2.8 e 2.9: [1]

$$B = f_2 - f_1 = \frac{2^K - 1}{\sqrt{2^K}} \times f_0 \quad (2.8)$$

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

Em que:

- B – Largura da banda (Hz);
- f_1 – Frequência do limite inferior (Hz);
- f_2 – Frequência do limite superior (Hz);
- f_0 – Frequência Central; valor médio (Hz);
- K – Constante de 1 ou 1/3 se for de banda 1/1 oitava ou de 1/3 de oitava.

2.2.2.4. Curvas de Ponderação

A sensibilidade auditiva humana não é uniforme ao longo do espectro sonoro, ao contrário dos equipamentos de medição, que registam todas as frequências com igual sensibilidade. Esta variação resulta da forma como o ouvido humano processa o som, sendo mais sensível a frequências médias, entre os 2 e 5 kHz, e menos sensível a frequências muito baixas ou muito altas. Esta variação na sensibilidade auditiva depende não apenas da frequência, mas também do nível de pressão sonora. A baixas intensidades sonoras, os sons graves são percebidos com menor intensidade do que os sons agudos, mas essa diferença reduz-se à medida que a intensidade sonora aumenta. [7] [9] [13]

Para estudar esta variação da percepção auditiva, foram desenvolvidas as curvas de igual sonoridade, também designadas curvas isofônicas. Estas curvas foram inicialmente determinadas por Fletcher e Munson, tendo sido posteriormente refinadas por Robinson e Dadson, e atualmente padronizadas pela norma ISO 226:2003. Representam os níveis de pressão sonora necessários para que diferentes frequências sejam percebidas com igual intensidade subjetiva. A unidade utilizada para quantificar essa relação é o *fone*, que tem como referência um som de 1000 Hz (Figura 2.10). [7] [13]

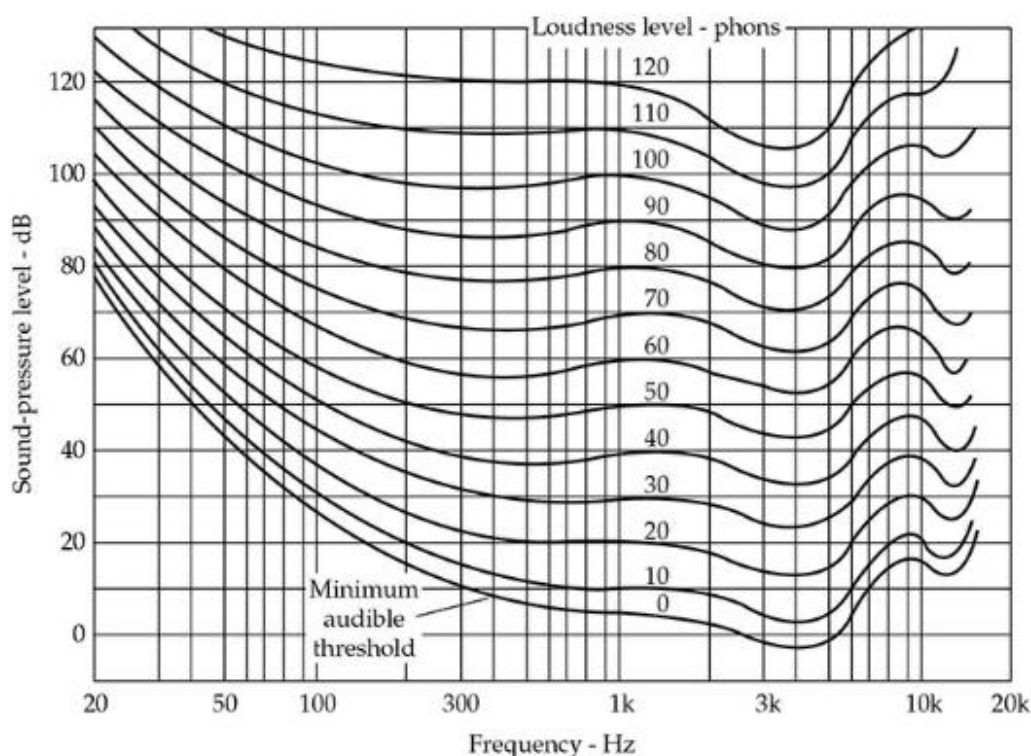


Figura 2.10 – Curvas de igual sensibilidade auditiva (em *fone*) [7]

Estas curvas demonstram que a percepção auditiva não é uniforme ao longo do espectro sonoro. A sensibilidade do ouvido humano é mais elevada na faixa dos 2 aos 5 kHz, onde são necessários níveis de pressão sonora mais baixos para que um som seja audível com a mesma intensidade de referência a 1 kHz. Em contrapartida, a sensibilidade a sons graves (baixas frequências) é menor, exigindo níveis de pressão sonora mais elevados para que esses sejam percebidos com a mesma intensidade subjetiva. [13]

Outro aspeto relevante é o facto de a sensibilidade auditiva não depender apenas da frequência, mas também da amplitude do som. Esse efeito torna-se mais evidente a baixas intensidades, onde a percepção das frequências mais graves é ainda mais reduzida. Assim, dois sons com frequências distintas, mas amplitudes idênticas, podem ser percebidos com intensidades sonoras subjetivas diferentes. Por exemplo, um som a 20 Hz será percebido com menor sonoridade do que um som de 4.000 Hz, mesmo que ambos tenham a mesma amplitude. Consequentemente, sons de frequências diferentes necessitam de amplitudes de pressão distintas para serem percebidos com a mesma intensidade sonora subjetiva. [9]

Devido a estas variações na percepção auditiva, tornou-se necessário corrigir os aparelhos de medição para que as medições reflitam melhor a forma como o ouvido humano percebe o som. Essa correção é feita através de filtros eletrônicos aplicados nos sonómetros, originando as curvas de ponderação A, B, C e D (Figura 2.11). [13]

Estas curvas permitem que os valores registados sejam mais representativos da percepção subjetiva do som, tornando a avaliação acústica em diferentes contextos mais realista. O filtro A tem como principal característica a atenuação dos sons graves, resultando num maior ganho para a faixa entre 1 e 8 kHz, e voltando a atenuar acima desta gama. Esta curva procura aproximar-se da sensibilidade do ouvido humano, sendo amplamente utilizado na Acústica de Edifícios para baixos níveis de pressão sonora. Existem outros filtros menos comuns, alguns em desuso, como o filtro B. O filtro C apresenta uma resposta próxima da linearidade e é geralmente utilizada para avaliar a presença de sons de baixa frequência. Já o filtro D possui uma ênfase na faixa de 1 kHz a 10 kHz e é utilizada exclusivamente para medições de ruído de aeronaves. [13]

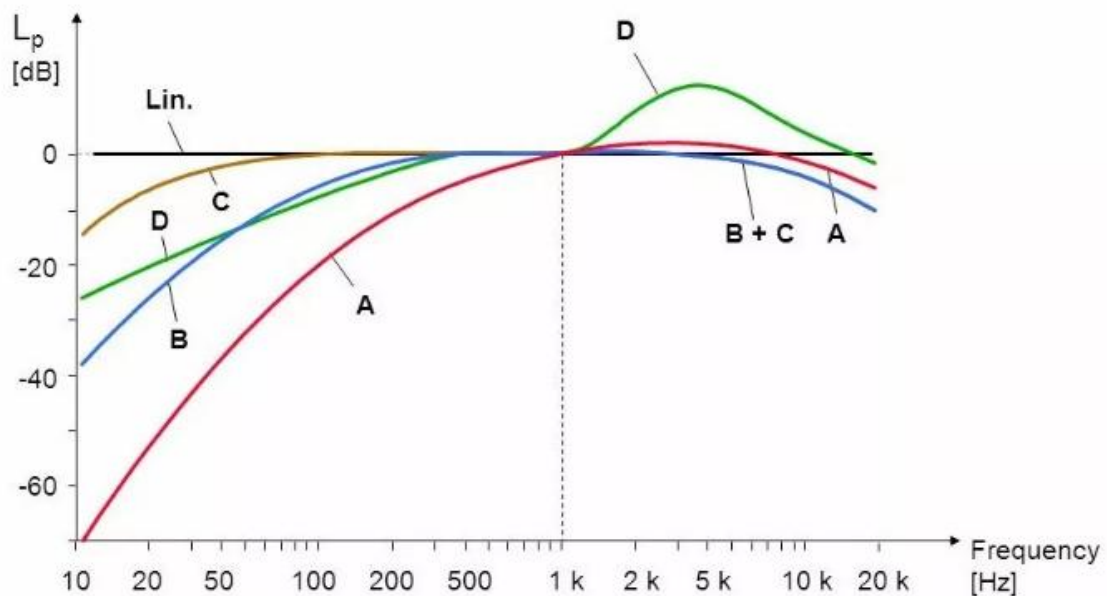


Figura 2.11 - Curvas de Ponderação (filtros) A, B, C e D [13]

Desta forma, para obter os valores ajustados à percepção auditiva humana, os níveis de pressão sonora linear (em dB) das diferentes bandas devem ser somados algebricamente às respetivas ponderações, conforme ilustrado no quadro 2.1. Posteriormente, esses valores são combinados através de uma adição logarítmica, resultando no nível sonoro final expresso em dB(A). [1]

Quadro 2.1 – Valores numéricos (dB) das ponderações da curva A para bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava na gama do audível. [1]

Banda de frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 oitava (dB)	Ponderação A para 1/1 oitava (dB)	Banda de frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 oitava (dB)	Ponderação A para 1/1 oitava (dB)
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	+
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				

2.2.3. ANÁLISE DO TEMPO

O tempo constitui a terceira característica fundamental para a descrição de um sinal sonoro, sendo complementar aos parâmetros de pressão sonora e frequência, anteriormente abordados. A duração de um ruído pode variar entre eventos quase instantâneos e outros prolongados, como a queda de água. Devido a essa variabilidade, torna-se necessário utilizar parâmetros de medição específicos no domínio do tempo para caracterizar o ruído. Para esse efeito recorrem-se a dois principais parâmetros: [1]

- L_{eq} – Nível de pressão sonora contínua equivalente;
- L_N – Níveis de pressão sonora estatísticos.

O nível de pressão sonora contínuo equivalente (L_{eq}) é um parâmetro energético que representa o nível constante de pressão sonora que, num dado intervalo de tempo, produziria a mesma

energia que o som em análise. Assim, este parâmetro permite calcular um valor médio da variação da pressão sonora ao longo do tempo. Pode-se calcular através da equação 2.10. [1]

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

Onde,

- L_{eq} – Nível de pressão sonora contínua equivalente (dB);
- T – Intervalo de Tempo;
- $p(t)$ – Pressão sonora (Pa);
- p_0 – Pressão de referência (2×10^{-5} Pa).

O nível de pressão sonora estatístico (L_N) está associado a quantis de densidade e probabilidade e refere-se ao nível que, num determinado intervalo de tempo, é excedido durante N% da duração do período de medição. No caso do L_{50} , este corresponde à mediana do intervalo de tempo, enquanto L_{eq} representa a média energética. No contexto da legislação portuguesa, indicadores como L_{95} e L_{50} foram anteriormente utilizados, mas foram gradualmente substituídos por outros parâmetros definidos no Regulamento Geral de Ruído e no Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios. [1]

2.3. ABSORÇÃO SONORA

Quando uma onda sonora atinge uma superfície, esta pode refletir, transmitir ou absorver a energia do som (Figura 2.12). A absorção sonora é o fenómeno no qual parte da energia sonora incidente sobre um determinado material não é refletida, mas sim dissipada sob a forma de energia, geralmente térmica. No caso da absorção total, a energia incidente atravessa o material e não ao meio oposto àquele em que foi gerada. [14]

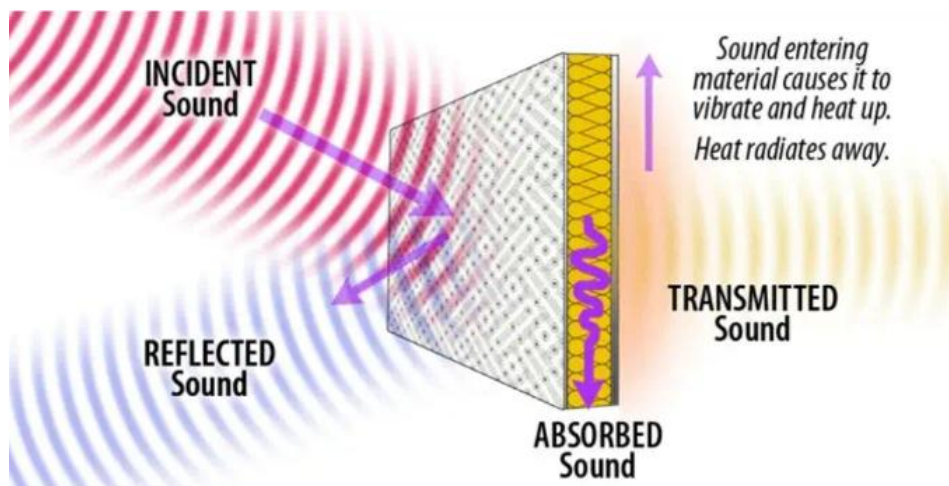


Figura 2.12– Mecanismo da absorção sonora. [15]

A eficiência de um material na absorção do som é descrita pelo coeficiente de absorção sonora (α), que representa a relação entre energia sonora absorvida (E_a) e a energia sonora incidente (E_i). Este coeficiente é expresso pela equação 2.11: [7]

$$\alpha = \frac{E_{\text{Absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.11)$$

Em que:

- α – Coeficiente de Absorção Sonora (adimensional);
- E – Energia Sonora (J).

Os valores do coeficiente de absorção sonora variam entre 0 e 1. Um material altamente refletivo apresenta um coeficiente próximo de 0, enquanto um material altamente absorvente apresenta um coeficiente próximo de 1. Por exemplo, um material com $\alpha = 0,3$ absorve 30% da energia sonora incidente, enquanto os restantes 70% são refletidos ou transmitidos. Em geral, considera-se que um material é altamente absorvente quando apresenta α superior a 0,5. [7] [14]

Atualmente, para determinar o coeficiente de absorção sonora de um material, utilizam-se dois métodos normalizados:

- **Tubo de ondas estacionárias:** Consiste em medir a absorção sonora a partir da interação entre ondas incidentes e refletidas dentro de um tubo rígido. A amostra testada é posicionada numa extremidade refletora, enquanto um altifalante na outra extremidade gera uma onda sonora. Um microfone regista os máximos e mínimos de pressão sonora, permitindo calcular o coeficiente de absorção em incidência normal (α_n). Este método fornece medições rápidas e precisas, mas apenas para incidência perpendicular, sendo necessária uma conversão para estimar o coeficiente em incidência aleatória. (Figura 2.13) [7]
- **Câmara Reverberante:** Consiste em medir a absorção sonora de um material em condições de incidência difusa. A câmara é um espaço de grandes dimensões, com superfícies altamente refletoras, onde se mede o tempo de reverberação antes e depois da introdução da amostra. A diferença entre os tempos permite calcular o coeficiente de absorção sonora do material (α_s), expresso em sabines. No entanto, em alguns casos, podem ser registados valores superiores a 1,0, devido à difração do som nos bordos da amostra, o que faz com que esta pareça acusticamente maior do que realmente é. [7]

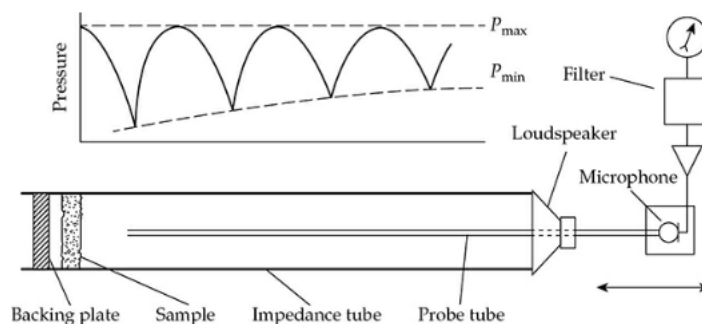


Figura 2.13– Esquema de um tubo de ondas estacionárias [7]

2.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

2.4.1. DEFINIÇÃO

A reverberação é um fenómeno acústico resultante das reflexões sucessivas do som nas superfícies de um espaço fechado, contribuindo para a dispersão de energia sonora e prolongando a percepção do som no ambiente. Este efeito ocorre devido ao comportamento das ondas sonoras ao atingirem paredes, tetos, janelas e outros elementos, gerando múltiplas reflexões que influenciam a qualidade acústica do espaço. A reverberação é, portanto, o som refletido que persiste após a cessação da fonte sonora. [16]

As ondas sonoras criadas num ambiente fechado por fontes sonoras podem ser recebidas de forma direta ou refletida. O som direto é aquele que atinge o ouvinte sem sofrer reflexões, enquanto o som refletido resulta da interação da onda sonora com as superfícies do espaço antes de chegar ao recetor. (Figura 2.14). [7]

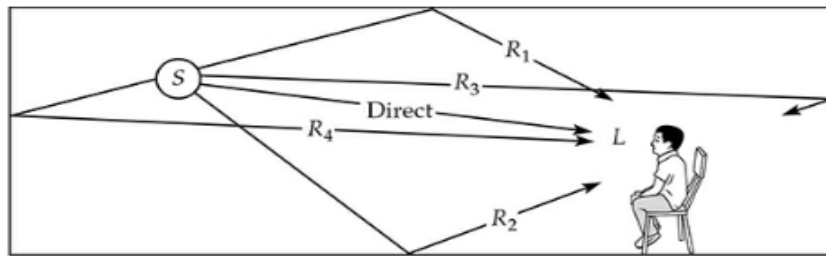


Figura 2.14 – Som direto e som refletido [7]

Quando a fonte sonora é desligada, o som remanescente não desaparece imediatamente, mas sim diminui gradualmente, à medida que perde energia em cada reflexão. O tempo necessário para que o nível de pressão sonora num espaço fechado diminua 60 dB após a interrupção da fonte sonora denomina-se tempo de reverberação (TR). Este parâmetro é fundamental para a caracterização acústica de um espaço, porque a reverberação influencia diretamente a percepção da palavra e da música. [7] [16]

Na prática, a medição direta da redução total de 60 dB pode ser dificultada pelo ruído de fundo, tornando necessário extrapolar a secção inicial do declive da curva de decaimento. Quando a medição abrange um intervalo inferior a 60 dB, como, por exemplo, 30 dB, esse valor é extrapolado para estimar o tempo correspondente à atenuação total. Nestes casos, denomina-se por T_{30} (Figura 2.15). [7]

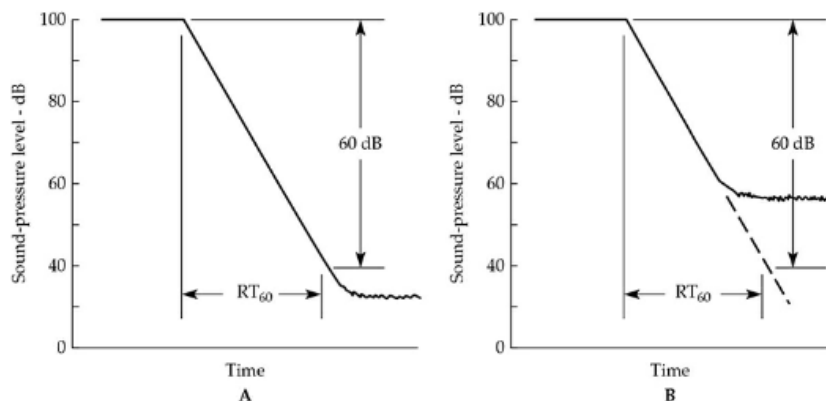


Figura 2.15 – Definição de Tempo de Reverberação T (A- valor teórico; B- obtido por extrapolação da curva mantendo declive). [7]

O tempo de reverberação pode variar consoante as dimensões da sala, os materiais presentes e a absorção sonora das superfícies. Salas com um tempo de reverberação inferior a 0,3 segundos são chamadas acusticamente de secas, devido à rápida dissipação da energia sonora. Em contrapartida, salas com tempo de reverberação superior a 2 segundos são classificadas como “ecóicas”, devido à presença de reflexões prolongadas que podem resultar em ecos audíveis. [16]

2.4.2. EFEITOS

O tempo de reverberação influencia significativamente a perceção sonora em diferentes contextos, apresentando efeitos positivos e negativos. Por um lado, um tempo de reverberação mais elevado pode aumentar o nível sonoro devido à sobreposição das múltiplas reflexões ao som direto, o que pode ser benéfico em alguns casos. No entanto, esse mesmo efeito pode resultar no encobrimento do som direto, prejudicando a inteligibilidade da palavra e a clareza auditiva. [1]

A adequação do tempo de reverberação depende da finalidade do espaço (Figura 2.16), sendo um dos fatores determinante na acústica de salas destinadas à palavra ou à música:

- Palavra – um tempo de reverberação elevado pode comprometer a inteligibilidade, pois as reflexões sonoras prolongadas podem mascarar as diferenças de intensidade e duração entre consoantes e vogais, dificultando a perceção da palavra. [1]
- Música – O desempenho acústico em salas de música exige um tempo de reverberação superior ao das salas destinadas à palavra, garantindo uma maior riqueza sonora e sustentação do som. Além disso, os valores ideais deste parâmetro podem variar consoante o estilo e a época do conteúdo musical, sendo necessário um ajuste específico para cada caso. [1]

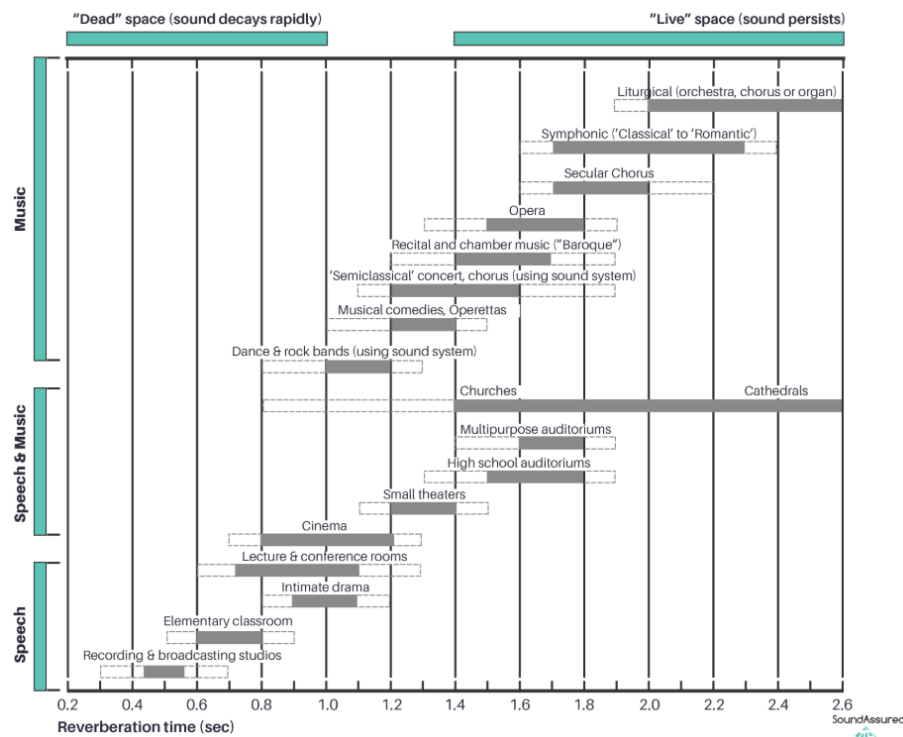


Figura 2.16 – Diferentes valores de tempos de reverberação ideais em função do uso. [17]

2.4.3. FÓRMULAS DE PREVISÃO

O tempo de reverberação foi inicialmente estudado pelo físico Wallace Clement Sabine, em 1898, resultando na expressão 2.12, conhecida atualmente por Fórmula de Sabine: [1]

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

Onde,

- TR – Tempo de Reverberação (s);
- V – Volume do compartimento (m³);
- A – Absorção sonora equivalente (m²);

O parâmetro A pode ser obtido pela expressão 2.13:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times S_i \quad (2.13)$$

Onde,

- α – Coeficiente de absorção sonora do material (adimensional);
- S – Superfície real do material (m²).

Esta equação demonstra que o tempo de reverberação depende diretamente do volume do espaço e da absorção sonora das superfícies. Quanto maior a absorção sonora, menor será o tempo de reverberação, pois a energia dissipa-se mais rapidamente. Por outro lado, um aumento do volume do espaço resulta num tempo de reverberação mais longo, uma vez que o som atinge as superfícies absorventes com menor frequência. [7]

Embora esta fórmula forneça resultados próximos da realidade, apresenta algumas limitações associadas às condições em que foi desenvolvida. A equação assume que o campo sonoro dentro da sala é difuso, ou seja, que a energia sonora se propaga uniformemente em todas as direções. No entanto, essa condição nem sempre se verifica, especialmente em espaços onde a absorção sonora não é homogênea ou onde existem superfícies altamente absorventes, que alteram a difusão do som. [7]

Além disso, a equação torna-se menos precisa quando aplicada a espaços com coeficientes de absorção elevados, sendo mais fiável para valores médios inferiores a 0,25. Em condições ideais, um espaço fechado com paredes totalmente absorventes não permitiria qualquer reflexão sonora, resultando num tempo de reverberação igual a zero, algo que não é corretamente representado pela equação. Esta discrepância decorre das hipóteses assumidas na sua formulação, o que limita a sua aplicação em determinadas situações. [7]

2.5. MATERIAIS E SISTEMAS DE ABSORÇÃO SONORA

2.5.1. CONCEITOS

Os materiais e sistemas absorventes podem ser classificados em três categorias principais, consoante a sua eficácia na absorção de diferentes faixas de frequência: [6]

- Materiais Porosos e Fibrosos;
- Membranas;
- Ressonadores.

Cada um destes sistemas apresenta um mecanismo de absorção distinto, sendo utilizados consoante as necessidades acústicas do espaço. Geralmente, os materiais porosos são mais eficazes em altas frequências, enquanto as membranas atuam principalmente em frequências baixas e os ressonadores são mais eficientes na absorção de frequências médias (Figura 2.16). [7]

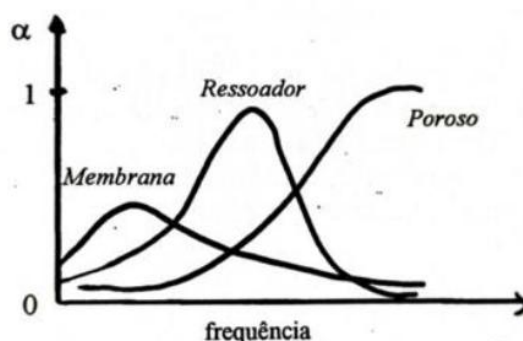


Figura 2.17 - Comportamento em frequência dos três tipos de materiais e sistemas absorventes. [1]

2.5.2. MATERIAIS POROSOS E FIBROSOS

Os materiais porosos e fibrosos caracterizam-se pela sua capacidade de absorver energia sonora através da dissipação da vibração das partículas de ar no seu interior. A absorção sonora ocorre quando as ondas sonoras penetram na estrutura porosa do material e a energia acústica é convertida em calor devido à fricção entre as partículas do ar e as fibras do material. Este tipo de absorção é particularmente eficaz em médias e altas frequências, sendo largamente utilizado para reduzir a reverberação em salas de espetáculo, estúdios e outros espaços. [7]

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, poliestireno expando e espumas flexíveis de poliuretano);
- Aglomerados de cortiça (negro e composto).

Os absorventes porosos apresentam algumas limitações, nomeadamente a sua baixa eficácia na absorção de baixas frequências, o que exige, por vezes, a conjugação com outros sistemas absorventes, como membranas ou ressoadores, para um controlo acústico mais equilibrado. [7]

2.5.3. RESSOADORES

Os ressoadores podem ser divididos em dois grupos, ressoadores isolados, também conhecidos por ressoadores de Helmholtz, e ressoadores agrupados. Este tipo de sistemas atua com maior eficiência nas médias frequências ainda que possam ser utilizados noutras gamas de frequência. [1]

Os ressoadores de Helmholtz são dispositivos acústicos concebidos para absorver frequências específicas através do princípio da ressonância. Estes ressoadores consistem numa cavidade fechada com uma pequena abertura (ou gargalo), onde a oscilação do ar no interior da cavidade dissipa a energia sonora (Figura 2.18).

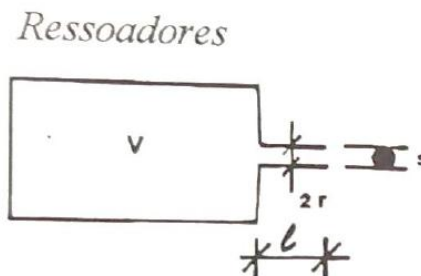


Figura 2.18 – Esquema básico de Ressoadores. [1]

O funcionamento baseia-se no movimento do ar dentro do gargalo do ressoador, que atua como uma mola. Quando a onda sonora atinge a abertura, o ar no gargalo oscila, absorvendo energia e reduzindo a intensidade da onda em função do seu valor comparado com o da frequência de ressonância. A frequência de ressonância é a máxima absorção sonora e pode ser determinada através da equação 2.14: [1] [7]

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

Onde,

- c – Celeridade (m/s);
- S – Área da abertura do gargalo (m²);
- V – Volume do ressoador (m³);
- l – Profundidade da entrada de ar (m);
- r – Raio de cada perfuração (m).

A outra categoria de ressoadores, os ressoadores agrupados, é a mais utilizada. Estes ressoadores surgem normalmente em forma de painéis perfurados. Mesmo tendo um funcionamento igual aos ressoadores isolados, têm uma expressão de cálculo diferente que é dada pela expressão 2.15: [1]

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

Onde,

- c – Celeridade (m/s);
- P – Percentagem da área perfurada (%);
- e – Espessura de placa perfurada (cm)
- d – Largura da caixa de ar (cm);
- r – Raio de cada perfuração (cm).

2.5.4. MEMBRANAS

As membranas são particularmente eficazes em baixas frequências. Estes sistemas operam com base na vibração de uma superfície flexível montada sobre a caixa de ar (Figura 2.19). Quando uma onda sonora incide sobre a membrana, esta entra em ressonância, dissipando parte da energia sonora através da deformação do material. A absorção sonora é otimizada quando o espaço atrás da membrana inclui um material poroso, como fibra de vidro, que ajuda a converter a energia acústica em calor e reduz as reflexões internas. Este tipo de absorvente é utilizado em estúdios, auditórios e salas de concerto para mitigar ondas estacionárias e reverberações excessivas. [7]

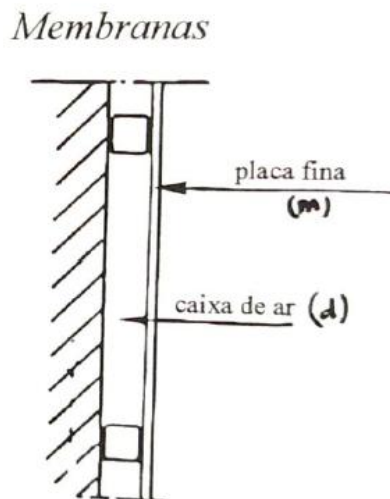


Figura 2.19 – Esquema básico de membranas. [1]

2.6. ISOLAMENTO SONORO

2.6.1. DEFINIÇÃO E CONCEITOS

O isolamento sonoro consiste na redução da transmissão do som entre dois espaços, minimizando a propagação sonora de um ambiente para outro. Este conceito distingue-se da correção acústica, que se refere à melhoria das condições sonoras dentro de um espaço, otimizando a percepção de sons desejáveis, como a música ou a palavra. A correção acústica também pode ter como objetivo a redução da elevada sonoridade de determinados locais, criando um ambiente mais adequado para atividades específicas, como o trabalho. [18]

Os ruídos podem ser classificados de acordo com o meio pelo qual as ondas sonoras se propagam, surgindo assim dois casos de ruídos (Figura 2.20):

- **Ruídos de Condução Aérea:** Propaga-se exclusivamente através do ar, sem envolvimento direto da estrutura do edifício. A transmissão deste ruído ocorre, maioritariamente, através de janelas, portas e paredes, sendo tipicamente associado a conversas, instrumentos musicais, equipamentos sonoros, ventiladores, automóveis, entre outros. [19] [20]
- **Ruídos de Percussão:** Resulta do impacto sobre elementos construtivos, sendo transmitido através da estrutura do edifício. Este tipo de ruído é gerado por vibrações em elementos como pisos, paredes e coberturas, podendo ser provocado por ações simples, como o caminhar de uma pessoa ou a ação de um objeto na parede. A energia sonora resultante da excitação mecânica é transmitida pelo meio sólido, dispersando-se pelos elementos estruturais ligados entre si, como vigas, pilares e paredes. [19] [20]

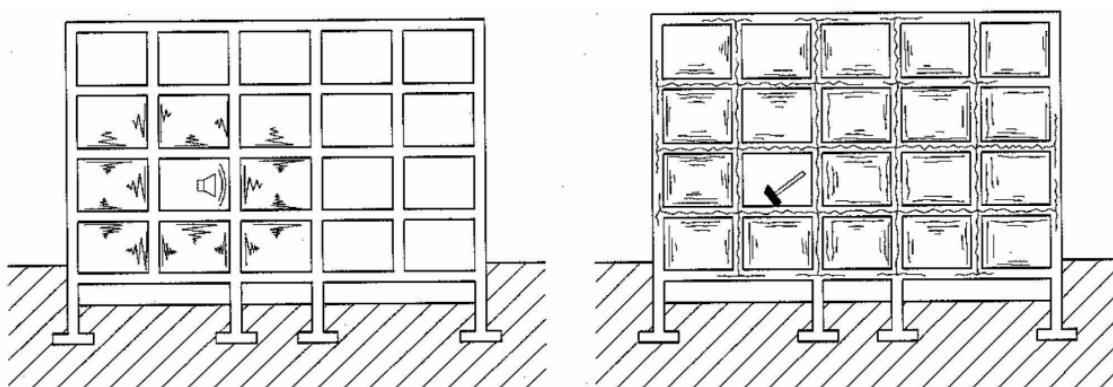


Figura 2.20 – Transmissão de ruído aéreo (esquerda) e ruído de percussão (direita). [21]

A distinção entre estes tipos de ruído é essencial para a aplicação de soluções de isolamento sonoro adequadas, consoante a origem e o meio de propagação do som.

Para além disso, a transmissão de cada um destes tipos de ruído pode ocorrer por via direta, ou por via marginal (secundária ou indireta). As transmissões por via direta são aquelas cuja transição de uma divisão de um edifício para outra se faz nos elementos de separação comuns aos dois espaços. As por via marginal ocorrem através de elementos de separação não comuns, mas comunicantes pela envolvente (Figura 2.21). [1]

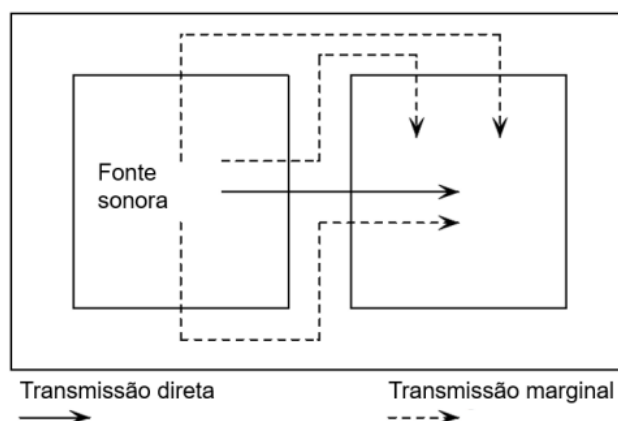


Figura 2.21 – Transmissão Sonora Direta e Transmissão Sonora Marginal. [22]

2.6.2. RUÍDO DE FUNDO E INCOMODIDADE

O ruído de fundo corresponde ao nível de ruído ambiente resultante de fontes sonoras não específicas, podendo ter origem externa ou interna ao espaço. Entre as principais fontes externas, destacam-se o tráfego rodoviário e aéreo, enquanto as fontes internas incluem sistemas de canalização, instalações elétricas, elevadores e equipamentos de climatização (AVAC). Em ambientes destinados à palavra ou à música, qualquer som que não provenha da fonte principal é considerado ruído de fundo, podendo comprometer a inteligibilidade da palavra e a qualidade da percepção sonora. Assim, a sua gestão eficaz é essencial para garantir um ambiente sonoro adequado à funcionalidade do espaço. [1]

A presença de ruído de fundo representa um desafio significativo na conceção acústica de auditórios, teatros e salas de concerto, uma vez que a qualidade sonora depende da minimização dos sons indesejados. O sistema de ventilação é frequentemente o principal responsável pelo ruído de fundo, devido ao funcionamento de ventiladores e ao ruído gerado pelo fluxo de ar. [23]

A incomodidade causada pelo ruído de fundo pode ser avaliada através das curvas de incomodidade, que caracterizam ruídos estáveis e contínuos associados a equipamentos, como os sistemas de AVAC. Estas curvas não se aplicam aos ruídos gerados pela atividade dos ocupantes. As mais comuns são a *Noise Criterion (NC)*, amplamente utilizada nos Estados Unidos, e a *Noise Rating (NR)*, adotada na Europa e padronizada por norma ISO. [1] [23]

A curva NC, desenvolvida por Leo Beranek em 1957, define níveis de pressão sonora para oito bandas de oitava entre 63 e 8.000 Hz, variando entre NC 15 e NC 70. O valor de NC atribuído a um espaço corresponde à menor curva que não é excedida por nenhum nível de pressão sonora de ruído medido em bandas de 1/1 oitava (Figura 2.22). Já a curva NR, proposta por Kosten & Vnan em 1962, opera em frequências entre 32 e 8.000 Hz, sendo utilizada para definir valores limite entre NR 0 e NR 130 (Figura 2.23). [1]

No quadro 2.2 são apresentados os valores limites máximos de NC para algumas tipologias de salas. Destes valores compreende-se que os espaços como cozinhas e lavandarias apresentam valores aceitáveis muito superiores a salas destinadas a espetáculos ou gravações.

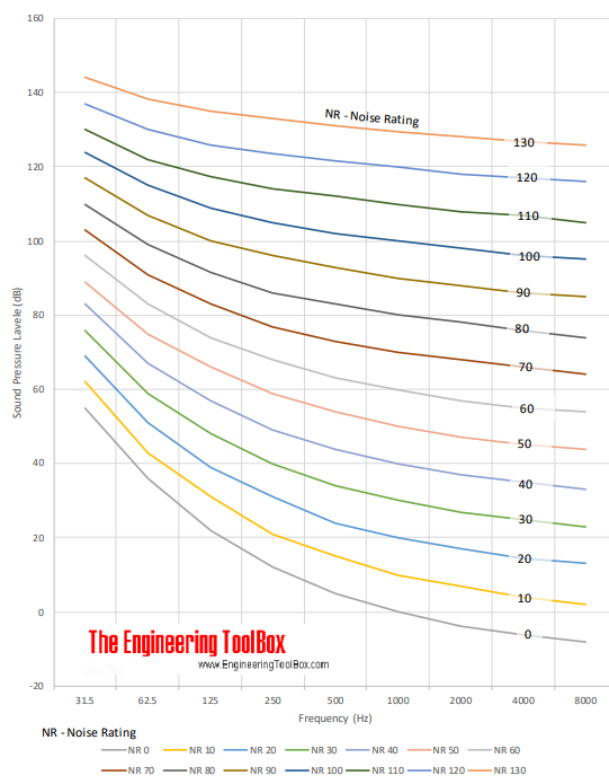
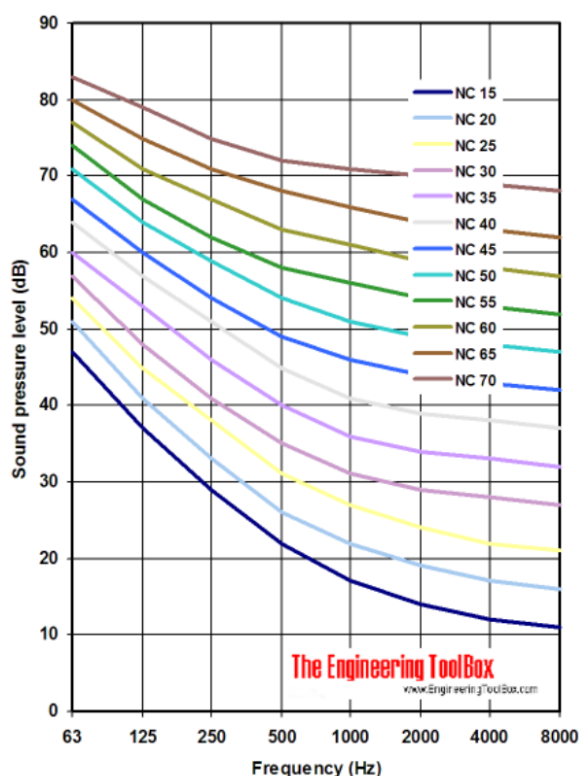


Figura 2.22 e 2.23 - Curvas NC (esquerda) [24] e NR (direita) [25]

Quadro 2.2 – Valores limites máximos de NC para algumas situações. [1]

Tipos de Salas	Valor limite máximo de Noise Criterion
Salas de concerto, salas de ópera, salas de transmissão e gravação, grandes auditórios, grandes igrejas, salas de recitais	<NC-20
Pequenos auditórios, teatros, pratica de música, grandes salas de reuniões, salas de teleconferência, instalações audiovisuais, escritórios executivos, pequenas igrejas, tribunais, capelas	NC-20 a NC-30
Quartos de dormir, hospitais, residências, apartamentos, hotéis	NC-25 a NC-35
Escritórios privados ou semiprivados, salas de aula, bibliotecas	NC-35 a NC-40
Grandes escritórios, áreas de recepção, lojas comerciais, cafetarias, restaurantes, ginásios	NC-40 a NC-45
Cozinhas, lavandarias, escolas, lojas industriais, salas para equipamento eletrónico	NC-45 a NC-55

2.7. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

2.7.1. CONCEITOS

A inteligibilidade da palavra define-se como a capacidade de compreensão de um discurso ser corretamente percebido e compreendido pelo ouvinte, sendo um parâmetro fundamental na avaliação do desempenho acústico de um espaço. O seu grau depende tanto das características acústicas do ambiente como de fatores intrínsecos à emissão vocal, nomeadamente frequências, intensidades, duração e direccionalidade. [1] [24]

A fala humana abrange um amplo espectro de frequências, em que as vogais ocorrem em frequências mais baixas (150 a 300 Hz) e as consoantes em frequências mais elevadas (3.500 a 7.000 Hz). Além disso, verifica-se uma diferença significativa na intensidade sonora, sendo as consoantes mais intensas do que as vogais, com uma variação média até 28 dB entre ambos os grupos. A duração dos fonemas também varia, com vogais a apresentarem uma média de 90 ms e as consoantes de 20 ms. Adicionalmente, a emissão da voz é predominantemente direccional, projetando-se maioritariamente para a frente do emissor, sendo esta distribuição influenciada pela frequência do som produzido. [1]

O Quadro 2.3 apresenta um quadro resumo da variabilidade da emissão da voz das vogais e consoantes.

Quadro 2.3 – Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes. [1]

Tipo	Frequência	Intensidade	Duração	Direccionalidade
Vogais	Baixas (150 – 300 Hz)	Elevado	≈ 90 ms	-5 dB por -180°
Consoantes	Altas (3.500 – 7.000 Hz)	Baixo	≈ 20 ms	-20 dB por -180°

A inteligibilidade da palavra pode ser afetada por fatores acústicos do espaço, como reflexões sonoras excessivas, elevada reverberação e ruído de fundo, que podem distorcer a percepção da fala. Em espaços de grandes dimensões, a presença de superfícies refletoras pode gerar ondas estacionárias, amplificando determinadas frequências e criando zonas com níveis sonoros irregulares. Para minimizar estes efeitos, utilizam-se materiais absorventes, sistemas de reforço sonoro e estratégias de controlo da reverberação, permitindo uma melhor percepção da palavra em espaços como auditórios, salas de conferência e locais de ensino. [24]

2.7.2. PARÂMETROS DE MEDIDA

A inteligibilidade da palavra pode ser avaliada através de diferentes parâmetros, que se classificam em dois grupos principais: subjetivos e objetivos. Os métodos subjetivos baseiam-se na percepção auditiva humana, sendo conduzidos através da leitura de frases ou palavras para um grupo de ouvintes, que transcrevem, determinando-se a inteligibilidade do espaço pela percentagem de palavras corretamente reconhecidas. Por outro lado, os métodos objetivos recorrem a equipamentos de medição, eliminando a influência da percepção humana e permitindo uma análise mais rigorosa e padronizada das condições acústicas. [1]

Neste método destacam-se: [1]

- Índice de Articulação (*AI*): estabelece o nível médio de inteligibilidade percebido pelos ouvintes na presença de um ruído de fundo variando de zero a um (quadro 2.4);
- Nível de Interferência na Conversação (*SIL*): define-se como o cálculo da média aritmética dos níveis de pressão sonora dos ruídos de fundo em cada uma das bandas de oitava, de 500 aos 2.000 Hz;
- *Articulation Class (AC)*: segue um método bastante semelhante àquele empregado na determinação da *AI*, no entanto, a análise é conduzida abrangendo uma faixa mais ampla de frequências;
- *Speech Transmission Index (STI)* e *Rapid Speech Transmission Index (RASTI)*: ambos os métodos avaliam a inteligibilidade da palavra, diferenciando-se pelo facto de o *RASTI* ser uma versão simplificada do *STI*. Os valores obtidos variam entre 0 (nula inteligibilidade) e 1 (excelente inteligibilidade), conforme apresentado no quadro 2.5. A medição deste parâmetro baseia-se na redução de modulação do sinal entre as posições dos altifalantes. O processo consiste na geração de um sinal de teste por um transmissor (ruído rosa nas bandas de oitava de 500 a 2.000 Hz no *RASTI* e 126 a 8.000 Hz no *STI*) que imita o espectro da palavra. Esse sinal é então captado por um recetor (microfone omnidirecional), que o analisa e calcula o valor de *STI* ou *RASTI*. Estas medições são utilizadas para avaliar a comunicação direta, sem interferência de sistemas eletroacústicos que possam mascarar o som.

Quadro 2.4 – Percepção subjetiva para a inteligibilidade e privacidade da palavra em função dos valores numéricos do *AI*. [1]

<i>AI</i> (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
≥ 0,65	Privacidade totalmente inexistente	Excelente comunicação (conferências, aulas, etc.)

Quadro 2.5 – Relação entre o parâmetro *STI* (ou *RASTI*) e a Inteligibilidade da palavra. (traduzido de [7])

STI	Inteligibilidade da palavra
[0 – 0,30[	Má
[0,30 – 0,45[	Medíocre
[0,45 – 0,60[	Suficiente
[0,60 – 0,75[	Bom
[0,75 – 1,00[	Excelente

2.8. ACÚSTICA ARQUITETÓNICA

2.8.1. CONCEITOS BÁSICOS

2.8.1.1. Reflexões e Ecos

As reflexões sonoras desempenham um papel fundamental na percepção acústica de espaços como auditórios e salas de concerto, afetando tanto a clareza do som como a sensação de envolvimento. A acústica de um recinto é fortemente condicionada pela forma da sala e pelos materiais que a compõem, sendo estes responsáveis pelo comportamento da reflexão das ondas sonoras. [23]

Quando um som é produzido num espaço fechado, o ouvinte recebe primeiro o som direto, que percorre a distância mais curta entre a fonte sonora e o recetor. Seguidamente, ocorrem as reflexões iniciais, provenientes de superfícies como paredes, teto e pavimento, que chegam ao ouvinte com um pequeno atraso devido ao percurso mais longo que percorrem (Figura 2.24). Como consequência, estas reflexões apresentam um nível de pressão sonora inferior ao do som direto, a menos que ocorra um efeito de focalização sonora. [23]

Um parâmetro fundamental na análise das reflexões é o tempo de atraso inicial (*Inicial Time-Delay Gap* – ITDG), que corresponde ao intervalo entre a chegada do som direto e o início do campo reverberante. Este atraso é essencial para a percepção do tamanho e da resposta acústica da sala, sendo amplamente estudado no projeto de auditórios e no desenvolvimento de algoritmos de reverberação artificial (Figura 2.25). [7]

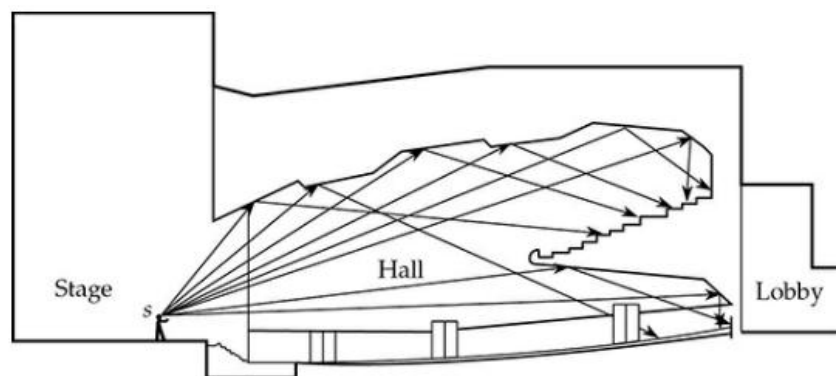


Figura 2.24 – Efeito das reflexões sonoras numa sala de espetáculo. [7]

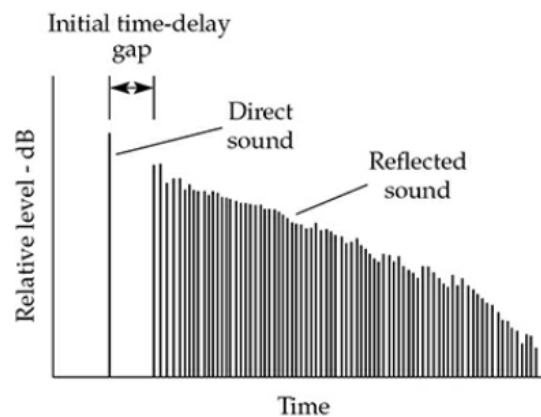


Figura 2.25 – Reflectograma de um espaço fechado. [7]

O eco é um fenómeno acústico resultante da reflexão do som em superfícies distintas, onde a onda refletida chega ao ouvinte com um atraso suficientemente grande para ser percebida como um evento sonoro distinto. Diferenciam-se da reverberação, que consiste numa sobreposição contínua de reflexões que não são audíveis separadamente. Para que uma reflexão seja percebida como eco, é necessário um atraso mínimo de 50 ms em relação ao som direto e que a sua intensidade seja suficientemente elevada para se destacar das restantes reflexões secundárias (Figura 2.26). [7] [23]

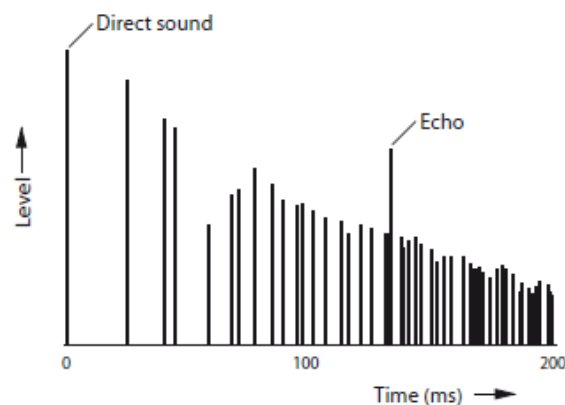


Figura 2.26 – Exemplo de reflectograma com eco. [23]

A ocorrência de ecos pode comprometer significativamente a inteligibilidade da palavra e a qualidade sonora em espaços arquitetónicos. Em salas de grandes dimensões ou em ambientes com superfícies altamente refletoras, os ecos podem ser particularmente problemáticos, exigindo soluções acústicas específicas para a sua mitigação. A disposição de elementos difusores, a inclinação de superfícies paralelas e a introdução de materiais absorventes são estratégias frequentemente empregues para minimizar este efeito. [23]

Um tipo específico de eco, conhecido como eco repetido (*flutter echo*), ocorre quando o som é refletido repetidamente entre superfícies paralelas, criando uma sucessão rápida de repetições sonoras (Figura 2.27). Este efeito pode ser perceptível e indesejável, sendo comum em salas com paredes paralelas não tratadas acusticamente. [7]

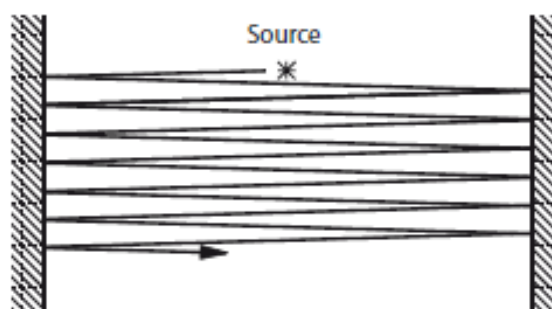


Figura 2.27 – Eco repetido (*flutter eco*) entre paredes. [23]

2.8.1.2. Difusão

A difusão sonora ocorre quando a energia refletida é dispersa de maneira uniforme em várias direções, o que depende das irregularidades da superfície refletora e do comprimento de onda do som incidente. Em espaços destinados à reprodução musical, seja ao vivo ou gravada, a difusão é um fator essencial para garantir um ambiente acústico equilibrado (Figura 2.28).

Antigamente, a arquitetura favorecia a difusão devido ao uso de superfícies altamente dispersivas pelo uso de formas geométricas e elementos decorativos em relevo. No entanto, com a modernização da construção, materiais como gesso liso, betão e gesso cartonado tornaram-se predominantes, reduzindo a difusão sonora e comprometendo a qualidade acústica em alguns espaços. Para corrigir essa limitação, superfícies modulares e difusores otimizados são utilizados para melhorar a dispersão do som e garantir um campo sonoro uniforme. [7]

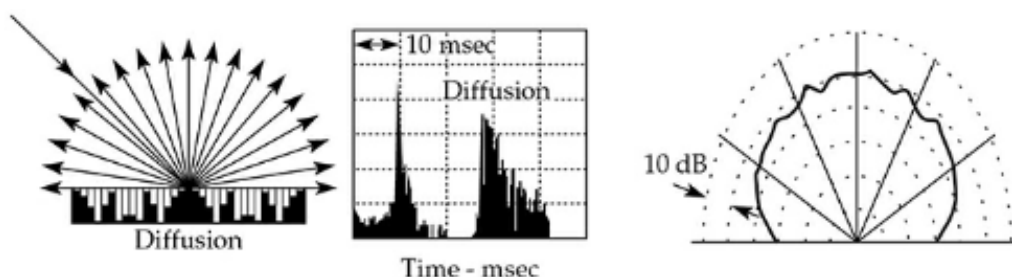


Figura 2.28 – Dispersão sonora das reflexões em difusão. [7]

2.8.2. PARÂMETROS ACÚSTICOS

2.8.2.1. Introdução

Para avaliar as condições acústicas de uma sala, recorrem-se a parâmetros acústicos, que podem ser classificados em objetivos e subjetivos. Os parâmetros objetivos são determinados através de equipamentos que analisam relações energéticas e temporais das ondas sonoras. Em contraste, os parâmetros subjetivos resultam da percepção individual de cada pessoa, baseando-se em avaliações pessoais e, portanto, dependentes da experiência auditiva de cada ouvinte. [1]

2.8.2.2. Parâmetros Acústicos Objetivos

Os descritores objetivos mais importantes atualmente utilizados para grandes salas de espetáculo e mais aplicáveis de forma a fornecerem a melhor descrição potencial das funções da palavra e da música são:

A) Tempo de Reverberação (TR)

Como já foi referido anteriormente, o tempo de reverberação corresponde ao período necessário para que o som diminua 60 dB após a cessação da fonte sonora. Na prática, a medição direta deste valor pode ser afetada por limitações do ruído de fundo, pelo que é comum determinar-se o decaimento de 20 ou 30 dB (T_{20} e T_{30}) e, posteriormente, aplicar um fator de extrapolação para estimar o valor correspondente aos 60 dB. Este processo é realizado através das expressões 2.16 e 2.17. [1]

$$T_{20} = 3[DS^{-1}(25) - DS^{-1}(5)] \text{ (s)} \quad (2.16)$$

$$T_{30} = 2[DS^{-1}(35) - DS^{-1}(5)] \text{ (s)} \quad (2.17)$$

Onde,

- $DS(t)$ – Decaimento sonoro em função do tempo;
- DS^{-1} - Função inversa de $DS(t)$.

B) *Early Decay Time (EDT)*

O conceito é semelhante ao anterior, diferenciando-se pelo facto de, neste caso, ser medido o decaimento do sinal em 10 dB. Para estimar o valor correspondente aos 60 dB, o resultado é multiplicado por um fator de 6. A sua determinação é realizada através da expressão 2.18. [1]

$$EDT = 6[DS^{-1}(10) - DS^{-1}(0)] \text{ (s)} \quad (2.18)$$

C) Claridade (C_{80}):

A Claridade, expressa em decibel (dB), é um parâmetro que quantifica a relação entre a energia sonora recebida nos primeiros 80 ms após a emissão do som e a energia recebida posteriormente. O intervalo de 80 ms corresponde ao limite de percepção auditiva para a música, sendo este valor adotado como referência para distinguir o som direto e as reflexões iniciais do campo reverberante tardio. Pode ser calculada pela expressão 2.19. [1] [7]

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \text{ (dB)} \quad (2.19)$$

D) Definição (D_{50})

A Definição, também designada por *early energy fraction* ou *early to total sound index*, é a razão entre a energia recebida nos primeiros 50 ms após a emissão de um sinal e a energia total recebida. Proposto por Thiele em 1953, este parâmetro, que varia entre 0 e 1,0, avalia a inteligibilidade da palavra, sendo que valores mais próximos de 1 indicam melhor clareza do discurso. O cálculo é realizado através da equação 2.20, considerando 50 ms como o limite médio de percepção da palavra. [1]

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \text{ (s)} \quad (2.20)$$

E) Tempo Central (TS)

O tempo central é o instante, expresso em ms, no qual a energia sonora recebida antes desse ponto é igual à energia recebida posteriormente. Proposto por Cremer e Muller em 1978, este parâmetro é utilizado para caracterizar a distribuição temporal da energia sonora num espaço. Em salas de concerto, o seu valor situa-se habitualmente entre 140 e 180 ms. É possível determinar o seu valor segundo a expressão 2.21, na qual $p(t)$ corresponde à resposta do espaço ao impulso sonoro. [1]

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \text{ (ms)} \quad (2.21)$$

G) Rácio de Baixos

O rácio de baixos é utilizado para avaliar o balanço tonal de um espaço, comparando os tempos de reverberação entre baixas e altas frequências. Um *Bass Ratio (BR)* superior a 1,0 indica uma predominância de frequências graves, proporcionando uma sensação de maior calor acústico. Em salas com T_{60} inferior a 1,8 segundos, o rácio de baixos deve situar-se entre 1,1 e 1,45, enquanto, em espaços com um T_{60} mais elevado, este valor deve estar entre 1,1 e 1,25. Para espaços destinados à palavra, um BR entre 0,9 e 1,0 é o mais adequado para garantir clareza e inteligibilidade. O rácio de baixos baseado no tempo de reverberação é determinado através da expressão 2.23. [1] [7]

$$BR_{TR} = \frac{TR_{125} + TR_{250}}{TR_{500} + TR_{1000}} \quad (2.23)$$

2.8.2.3. Parâmetros Acústicos Subjetivos

Os parâmetros acústicos subjetivos mais importantes atualmente utilizados em grandes salas de espetáculos e mais aplicáveis de forma a fornecerem a melhor descrição potencial das funções da música são: [1]

- Ruído de fundo: refere-se a todos os sons presentes no ambiente que não provêm da fonte sonora principal, interferindo na percepção auditiva e na comunicação.
- Intensidade do Som: define-se como a percepção do “volume” sonoro pelos espetadores dentro de um espaço de espetáculos. Resulta da combinação entre o som direto e o som reverberante, influenciando a forma como o público sente a envolvimento sonora da sala.

- Clareza do discurso musical: refere-se à capacidade de distinguir as notas musicais no tempo, garantindo que os sons são percebidos de forma definida e separada. Este parâmetro é diretamente influenciado pela natureza e disposição das superfícies refletoras no interior da sala.
- Reverberância: corresponde ao tempo necessário para que um som se dissipe após a interrupção da sua emissão pela fonte sonora. A reverberância é um fator determinante na percepção acústica de um espaço.
- Intimidade: descreve a sensação auditiva de proximidade da fonte sonora, independentemente da distância física entre o recetor e a fonte. Esta característica permite que uma sala grande transmita a percepção de um espaço mais reduzido e acolhedor.
- Envolvimento: traduz-se na sensação de imersão sonora, onde o som parece provir de todas as direções com igual intensidade. Este efeito resulta da distribuição do som reverberante na sala, criando um ambiente acústico mais homogêneo.
- Equilíbrio Tímbrico: refere-se à uniformidade entre os níveis sonoros das altas e baixas frequências. Um espaço com bom equilíbrio tímbrico proporciona ao ouvinte a percepção de todas as frequências sonoras de forma equilibrada.
- Impressão Geral: corresponde à percepção global da qualidade acústica de um espaço, resultante da interação de múltiplos parâmetros acústicos e da experiência auditiva do ouvinte.

3

ESTADO DA ARTE

3.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

Desde a Antiguidade, o ser humano tem procurado formas de comunicar com maior eficácia, recorrendo ao som como meio de expressão coletiva. Mesmo sem uma compreensão científica do fenómeno acústico, sempre existiu a preocupação de escolher lugares onde a voz se fizesse ouvir com clareza. A acústica foi, durante séculos, um saber empírico, construído com base na experiência e na observação. Só mais tarde se começou a reconhecer que a relação entre espaço e som tem um papel fundamental não só na perceção do que é ouvido, mas também como a arte e a comunicação são pensadas e vividas. [23] [25] [26]

A Grécia Antiga foi uma das primeiras civilizações a demonstrar uma preocupação evidente com a propagação do som em espaços de espetáculo. Os teatros gregos, além de serem marcos arquitetónicas, foram projetados para garantir que a voz dos atores chegasse com clareza a grandes audiências, influenciando diretamente o desenvolvimento da acústica nos séculos seguintes. O primeiro registo escrito sobre este tema surge nos tratados de Vitruvius, no século I a.C., onde se descrevem os critérios necessários para um teatro bem projetado. Segundo o autor, a localização e a configuração do espaço eram fatores determinantes para evitar distorções sonoras e garantir a inteligibilidade da palavra. [23]

Estes teatros eram construídos ao ar livre, quase sempre em encostas naturais, o que facilitava a propagação do som e minimizava a necessidade de suporte estrutural adicional. O público dispunha-se no *theatron*, uma estrutura semicircular cujos assentos seguiam uma inclinação entre os 20° e 34°, permitindo que todos os espetadores estivessem direcionados para o palco e recebessem o som de forma clara e homogênea. No centro do teatro situava-se a *orchestra*, um espaço circular ao nível do solo, cuja superfície contribuía significativamente para a reflexão sonora, ajudando a aumentar a projeção da voz. Atrás desta zona, a *skene* servia como pano de fundo e refletor acústico, ajudando a direcionar o som para a audiência (Figura 3.1). [27] [25]

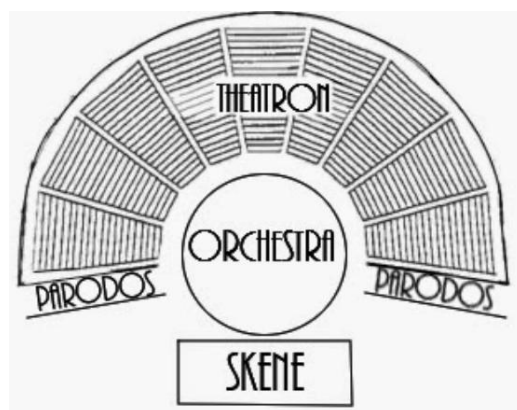


Figura 3.1– Planta Esquemática de um teatro grego. [27]

Entre os diversos teatros gregos, o Teatro de Epidauro (Figura 3.2), datado de aproximadamente 350 a.C., é um dos exemplos mais emblemáticos da engenharia acústica da Antiguidade. Com capacidade para cerca de 14.000 espectadores, este teatro destaca-se pela sua simetria e pela forma eficiente como o som se propaga. Estudos indicam que a reflexão sonora na *orchestra* aumentava a projeção do som cerca de 40%, garantindo que a voz dos autores permanecesse clara até às últimas filas, situadas a cerca de 70 metros do palco (Figura 3.3). Além disso, a escolha da pedra como material construtivo e a inclinação das bancadas contribuíam para uma distribuição uniforme do som. A localização afastada dos centros urbanos também ajudava a reduzir ruídos externos, criando condições ideais para as representações teatrais.

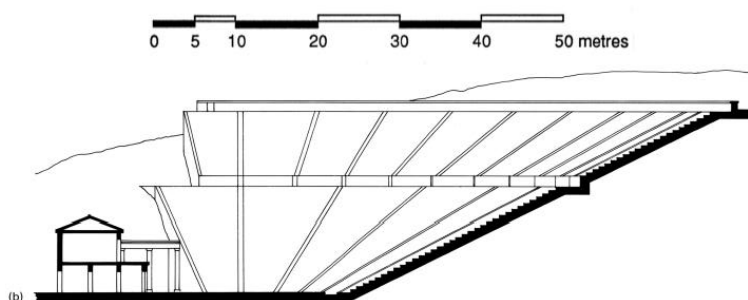


Figura 3.2 – Corte Transversal do Teatro de Epidauro, Grécia. [23]



Figura 3.3 – Representação da propagação do som nos teatros gregos. [23]

Outro elemento essencial para acústica era o uso de máscaras teatrais, que, para além de realçarem as expressões dos atores, amplificavam a voz e a projetavam na direção da plateia, funcionando como megafones rudimentares. Além disso, a importância do silêncio do público era reconhecida como fundamental para a perceção da palavra, um princípio ainda presente nos espaços de espetáculo modernos. [23]

Os princípios acústicos desenvolvidos pelos gregos estabeleceram um modelo que influenciaria a arquitetura teatral nos séculos seguintes. No entanto, à medida que o império Romano expandia o seu domínio, surgiu a necessidade de adaptar esses conceitos a edifícios mais grandiosos e funcionalmente versáteis. O domínio de novas técnicas construtivas, como o uso do betão e das abóbadas, permitiu que os teatros romanos se tornassem estruturas independentes da topografia natural, podendo ser erguidos em qualquer local. [23] [25]

Embora tenham sido inspirados pelos modelos gregos, os teatros romanos apresentavam diferenças estruturais notáveis. A *cavea*, em vez de ser esculpida em encostas naturais, passou a ser construída sobre uma estrutura de arcadas e abóbadas, permitindo uma inclinação mais acentuada das bancadas, frequentemente entre 30° e 34°. A *orchestra* manteve o seu formato semicircular, mas perdeu a função de refletor acústico, uma vez que era ocupada pelos senadores e não mais pelo coro. Como consequência, foi necessário reduzir a altura do palco para cerca de 1,5 metros, garantindo que os espectadores mais próximos mantivessem uma boa visibilidade do espetáculo. [23]

Uma das principais características dos teatros romanos era a incorporação de uma estrutura posterior elevada, que envolvia a cena e servia tanto como pano de fundo visual como elemento acústico, *scaenae* (Figura 3.4). Este edifício ajudava a reforçar a projeção sonora, uma vez que as suas paredes refletiam o som na direção da plateia. Além disso, os teatros romanos recorriam ao uso de vasos acústicos, inseridos em nichos das bancadas para otimizar a propagação do som e minimizar ressonâncias indesejadas. [25]

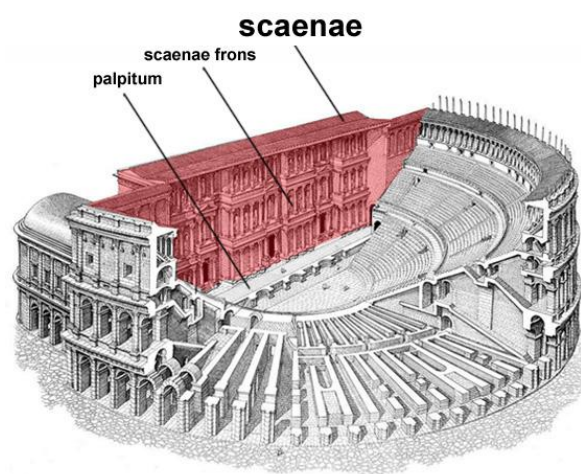


Figura 3.4 – Planta esquemática de teatro romano. [28]

O Teatro de Aspendos, na atual Turquia, é um dos exemplos mais bem preservados da arquitetura romana (Figura 3.5). Construído no século II d.C., tinha capacidade para cerca de 7.000 espectadores, com a distância máxima entre o palco e as últimas filas atingindo aproximadamente 53 metros (Figura 3.6). Para mitigar o impacto da luz solar direta e, possivelmente, melhorar a acústica, os romanos introduziram o *velarium*, uma cobertura de lona retrátil que podia ser estendida sobre o teatro. Embora o *velarium* tivesse uma leve capacidade reflexiva, o efeito na reverberação do som era reduzido, contribuindo para uma boa inteligibilidade da palavra mesmo sem amplificação artificial.



Figura 3.5 – Vista aérea do Teatro de Aspendos, Turquia. [28]

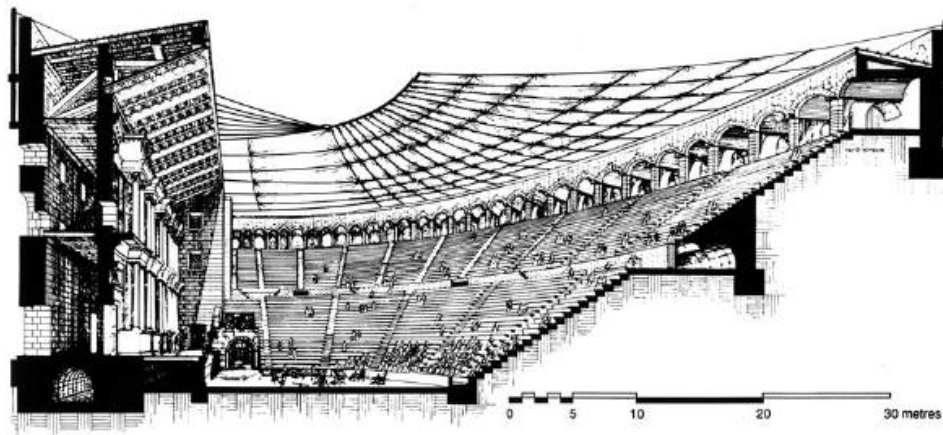


Figura 3.6 – Corte Transversal do Teatro de Aspendos, Turquia. [23]

Ao contrário dos gregos, que construíam teatros ao ar livre, os romanos também desenvolveram espaços fechados, como o Odeon de Agripa, em Atenas, construído em 12 a.C. Com uma altura estimada de 40 metros, este edifício apresentava um tempo de reverberação superior a 5 segundos, tornando-o mais adequado para espetáculos musicais do que para teatro falado. Esta preocupação com a acústica em espaços fechados revela o avanço significativo no entendimento da relação entre o som e arquitetura na Roma Antiga, uma abordagem que influenciaria o *design* de auditórios e salas de espetáculos nos séculos seguintes. [23]

Com a queda do Império Romano, a construção de teatros entrou em declínio e as apresentações dramáticas passaram a ocorrer em estruturas temporárias ao ar livre. Durante grande parte da Idade Média, não houve um desenvolvimento significativo de edifícios dedicados ao teatro, sendo os espetáculos esporádicos e geralmente associados a festividades. No entanto, com o Renascimento, no final do século XV, o interesse pelos edifícios teatrais voltou a emergir, inicialmente através de estruturas temporárias que serviam de base para a evolução dos teatros permanentes. [25] [26]

O Renascimento italiano trouxe um novo dinamismo à construção teatral, retomando os princípios clássicos, mas adaptando-os às necessidades dos espaços fechados. Um dos marcos desta época foi o Teatro Olímpico de Vicenza, desenhado por Palladio em 1584 (Figura 3.7). Inspirado nos teatros da Antiguidade, este espaço fechado manteve a tradicional *scenae frons*, um elemento decorativo típico dos teatros romanos, mas introduziu novidades como a utilização de perspectiva para criar um efeito de profundidade no palco. Mais tarde, Scamozzi, discípulo de Palladio, levou este conceito ainda mais longe no Teatro all’Antica, em Sabbioneta, onde a disposição semicircular das bancadas foi substituída por uma planta em forma de U, aproximando-se da estrutura dos teatros modernos (Figura 3.8). [23]

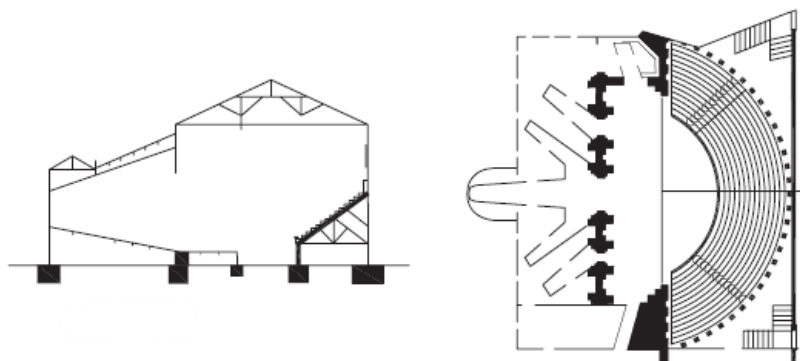


Figura 3.7 – Teatro Olímpico de Vicenza, Itália. [26]

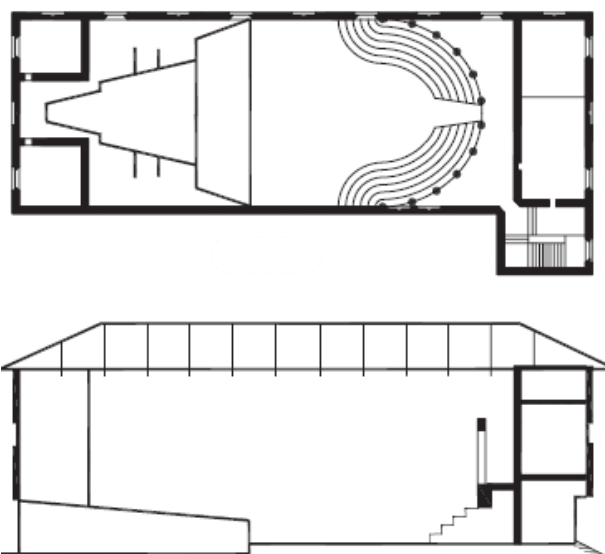


Figura 3.8 – Teatro all’Antica, Sabbioneta, Itália. [26]

A transição do teatro ao ar livre para espaços fechados trouxe consigo desafios acústicos. Nos teatros renascentistas, o som, ao ser refletido múltiplas vezes nas superfícies do recinto, criava um efeito de reverberação que podia comprometer a inteligibilidade da palavra. No entanto, a presença do público e a disposição cuidadosa dos elementos arquitetónicos ajudava a equilibrar este efeito, permitindo uma boa perceção do discurso teatral. As superfícies em pedra e mármore, predominantes nestes espaços, contribuíam para um tempo de reverberação mais prolongado nas frequências graves, conferindo uma sonoridade característica às salas de espetáculo. [25]

Com o início do século XVII, o teatro entrou numa nova fase. As exigências do público e o surgimento da ópera como forma de expressão dominante impulsionaram uma transformação

profunda na forma como os espaços de espetáculo eram pensados. Em Itália, berço destas inovações, surgem os primeiros teatros barrocos com características que iriam marcar toda a arquitetura teatral europeia nos séculos seguintes.

Um dos exemplos mais marcantes desta mudança é o Teatro Farnese em Parma, construído entre 1618 e 1628 por Giovanni Battista Aleotti (Figura 3.9). Este edifício introduziu elementos inovadores como maquinaria de palco, bastidores e cenários móveis, permitindo criar ambientes visuais em constante mutação. O palco deixava de ser um simples plano de representação para se tornar um espaço dinâmico, onde a ação ganhava nova profundidade e impacto visual. [26]

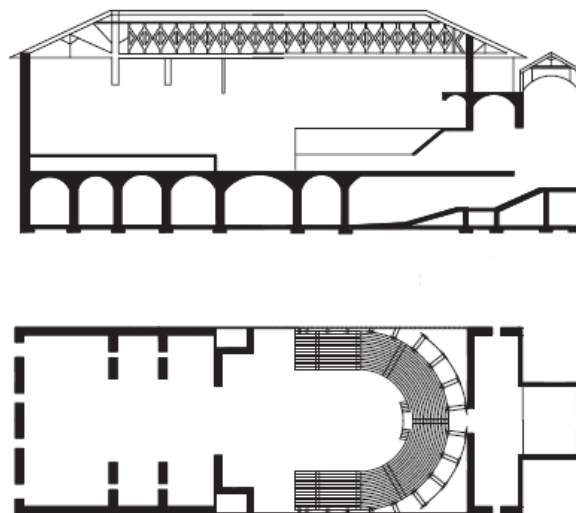


Figura 3.9 – Teatro Farnese, Parma, Itália. [26]

Com a evolução das formas musicais e cénicas, os teatros começaram também a refletir uma maior atenção à acústica. As salas barrocas, como as que surgiram em Veneza nas décadas seguintes, adotaram uma configuração em forma de U, que permitia uma melhor distribuição visual e social do público. A orquestra foi reposicionada, primeiro ao fundo do palco e mais tarde em fosso, e os palcos tornaram-se mais profundos e mecanizados. Estes teatros procuravam controlar melhor a propagação sonora e adaptar-se às novas exigências da música e da representação.

A elevada procura por ópera levou à construção de centenas de casas de espetáculo, sendo Veneza um caso exemplar, com quase quatro centenas de teatros erguidos até ao final do século. Um dos primeiros exemplos desta tipologia foi o Teatros Santi Giovanni e Paolo (Figura 3.10), inaugurado em 1637, que marcou o início da era dos teatros de ópera públicos e trouxe inovações tanto na organização do espaço como no desempenho acústico.

A crescente complexidade das representações e o aumento da escala dos teatros exigiram também soluções para o controlo acústico. Com plateias mais numerosas e, por vezes, ruidosas, surgiram estratégias como a utilização de sinais musicais para marcar o início do espetáculo. Além disso, foram experimentados dispositivos, como tubos colocados sob o palco para direcionar o som até às filas mais distantes. Estas inovações demonstram um crescente cuidado com o ambiente acústico e com a relação entre a arquitetura dos espaços e a eficácia do seu desempenho. [26]

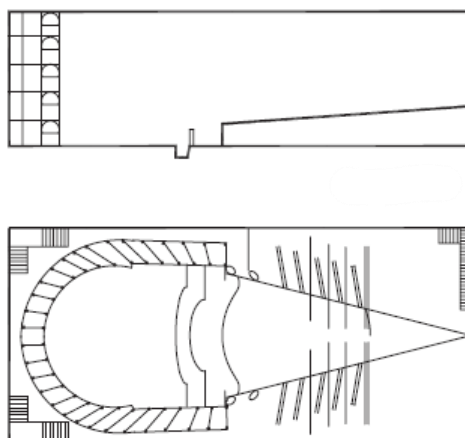


Figura 3.10 – Teatro Santo Giovanni e Paolo, Veneza, Itália. [26]

À medida que o século XVIII avançava, as necessidades musicais e performativas começaram a transformar a forma como os espaços de espetáculo eram concebidos. O final do período barroco, marcado pela exuberância cénica e pela crescente sofisticação técnica, abriu caminho a uma nova abordagem mais racional e equilibrada. A ópera, ainda predominante em muitas regiões da Europa, começou a dividir protagonismo com a música instrumental, que passou a ser pensada para ser executada em salas específicas. Este novo cenário marcou o início do período clássico e trouxe consigo uma atenção mais consciente às qualidades acústicas dos espaços construídos.

Foi neste contexto que surgiram, pela primeira vez, espaços concebidos especificamente para a performance musical. A arquitetura passou a responder às exigências da música, procurando garantir uma boa clareza e distribuição sonora. Estas novas salas apresentavam, geralmente, plantas retangulares, galerias laterais e tetos altos e abobadados. Esta configuração proporcionava reflexões fortes laterais e assegurava uma boa inteligibilidade, essencial para a perceção clara do som, especialmente em contextos de música instrumental e vocal sem amplificação. Com capacidades entre 400 e 800 lugares, estes espaços apresentavam tempos de reverberação, em geral, inferiores a 1,5 segundos, o que permitia uma perceção nítida do som.

Entre os exemplos mais notáveis da época encontra-se o *Hanover Square Rooms*, construído em Londres entre 1773 e 1775, onde Haydn apresentou as suas sinfonias compostas especificamente para este espaço. O salão principal tinha cerca de 24 metros de comprimento por menos de 10 metros de largura, com pé-direito entre 6,7 e 8,5 metros. Esta configuração contribuía para elevados níveis de clareza acústica, ainda que com um volume relativamente reduzido (Figura 3.11).

Outro exemplo relevante é o *Altes Gewandhaus*, em Leipzig, adaptado a partir de um edifício existente em 1781. Com capacidade para cerca de 400 pessoas e um tempo de reverberação estimado em 1,4 segundos, esta sala reforçou a tendência para espaços com volumes moderados, com painéis em madeira e palcos elevados, melhorando a projeção sonora e a distribuição do som no interior do auditório (Figura 3.12). [26]

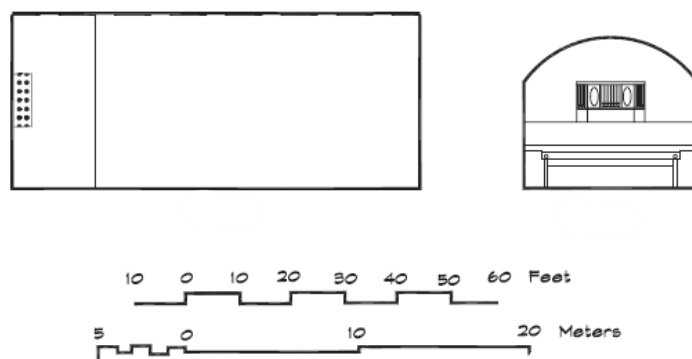


Figura 3.11 – Hanover Square Rooms, Londres, Inglaterra. [26]

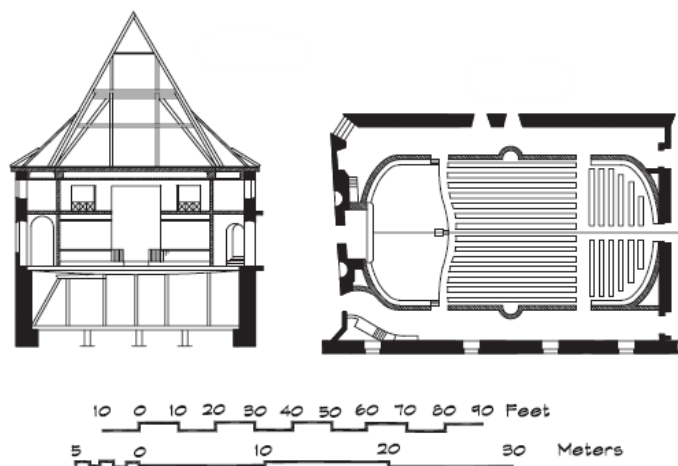


Figura 3.12 – Esquema do Altes Gewandhaus, Leipzig, Alemanha. [26]

Enquanto no norte da Europa se desenvolviam salas de concerto dedicadas, no sul, particularmente em Itália, a tradição operática manteve-se como eixo central da atividade cultural. O Teatro *Alla Scala*, inaugurado em Milão em 1778, apresentava um modelo em ferradura, com vários níveis de camarotes. A baixa absorção sonora lateral das superfícies, cerca de 40%, promovia reflexões sonoras significativas, reforçando a percepção da música tanto para o público como para os músicos (Figura 3.13).

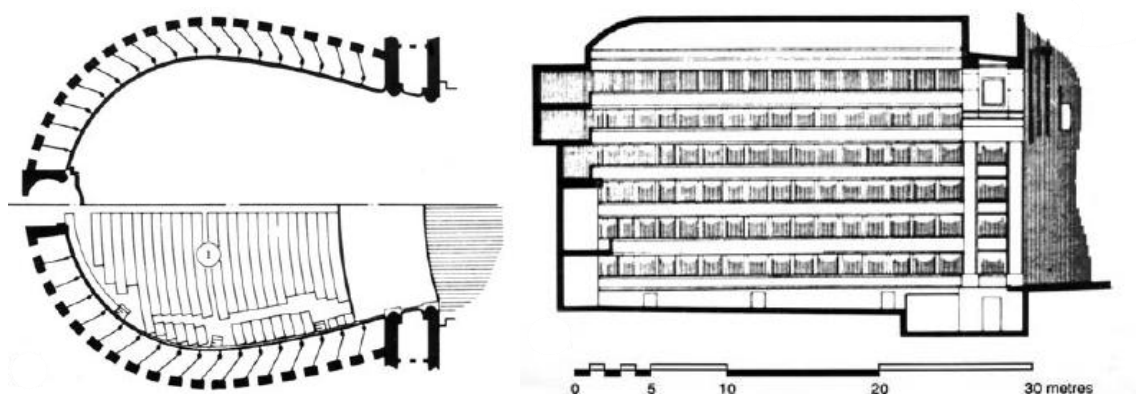


Figura 3.13 – Teatro Alla Scala, Milão, Itália. [23]

Desta forma, o período Clássico caracteriza-se por uma maior formalização dos espaços destinados à música, acompanhada de um avanço significativo na compreensão das suas exigências acústicas. A definição de volumes adequados, a escolha de materiais de revestimento e o controlo das reflexões tornaram-se elementos fundamentais no planeamento arquitetónico de salas de espetáculo desta época. Esta evolução abriria caminho a uma nova fase, marcada por um olhar mais técnico e analítico sobre o comportamento do som nos espaços construídos.

Durante o século XIX, a acústica começou a afirmar-se como uma disciplina científica, ultrapassando a tradição empírica que até então guiava o projeto arquitetónico de salas de espetáculo. O crescente interesse por compreender, medir e controlar os fenómenos sonoros conduziu à formulação das primeiras teorias estruturadas sobre o som em ambientes fechados, dando início a uma nova era na relação entre arquitetura e desempenho acústico. [25] [26]

Foi a partir desse contexto que se começou a publicar algumas das obras mais marcantes da história da acústica. A obra *Sensations of Tone*, de Hermann von Helmholtz (1860), abriu caminho para a compreensão da perceção auditiva a partir de uma base científica. Pouco depois, Lord Rayleigh reuniu e aprofundou os conhecimentos da época com *Theory of Sound* (1877-1896), lançando as fundações da acústica física tal como é entendida atualmente.

Em paralelo, o desenvolvimento tecnológico acelerado das décadas de 1870 e 1880 trouxe consigo invenções fundamentais como o microfone de carvão de Alexander Graham Bell (1876), o fonógrafo de Thomas Edison (1877), e os primeiros transdutores eletroacústicos, patenteados por Ernst Siemens. Estas inovações criaram as bases para a reprodução e gravação sonora, e influenciaram fortemente a forma como o som começou a ser pensado na arquitetura e nos espaços de espetáculo.

Foi, no entanto, com os estudos do físico norte-americano Wallace Clement Sabine, no final do século XIX, que se estabeleceu a acústica de salas como um ramo científico aplicado. Através de experiências conduzidas em diversos auditórios da Universidade de Harvard, Sabine identificou a relação entre o tempo de reverberação de uma sala, o seu volume e as características de absorção sonora dos materiais. Sabine desenvolveu, assim, uma fórmula que se tornou a base para projetos de acústica arquitetónica, e pela primeira vez foi possível prever o comportamento sonoro de um espaço ainda antes da sua construção.

O Symphony Hall de Boston, inaugurado em 1900, tornou-se o primeiro grande exemplo de auditório a ser projetado com base em critérios acústicos definidos cientificamente. Com a sua forma retangular, materiais cuidadosamente selecionados e uma reverberação controlada, foi desenhado com o objetivo claro de proporcionar uma experiência sonora rica, equilibrada e envolvente, considerando-se, ainda hoje, como um dos melhores auditórios do mundo (Figura 3.14 e 3.15).

Outros exemplos relevantes da época incluem o Metropolitan Opera House (Figura 3.16) e o Carnegie Hall (Figura 3.17), ambos em Nova Iorque. Enquanto o Carnegie Hall, com o seu *design* tipo *shoebox*, ficou conhecido pela clareza dos agudos, o Metropolitan, com um volume duas vezes superior ao da Alla Scala, enfrentava desafios na projeção vocal para lugares mais afastados. [26]



Figura 3.14 – Symphony Hall, Boston. [23]

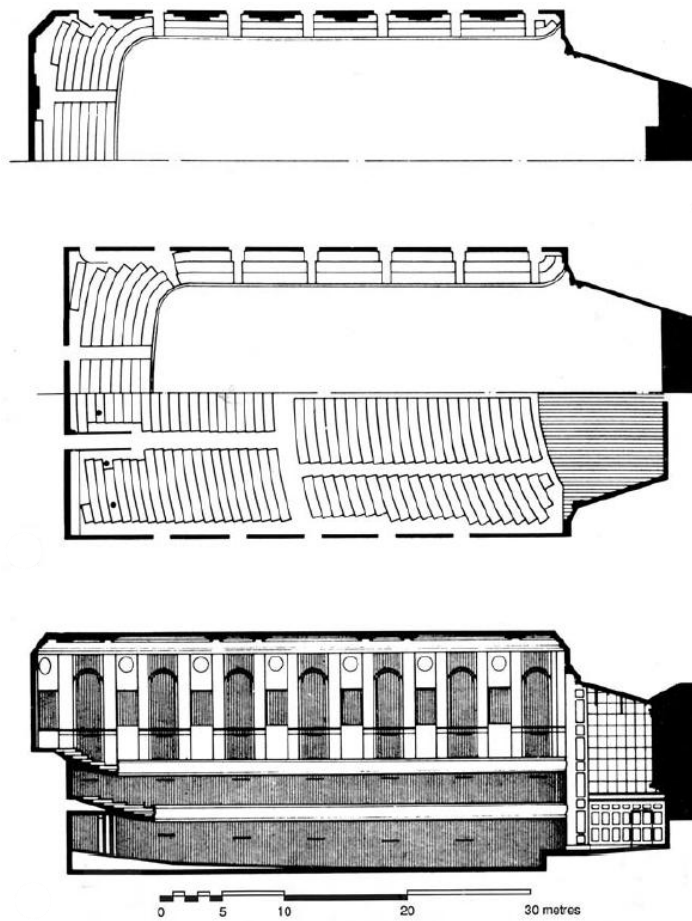


Figura 3.15 – Planta e secção do Symphony Hall, Boston. [23]

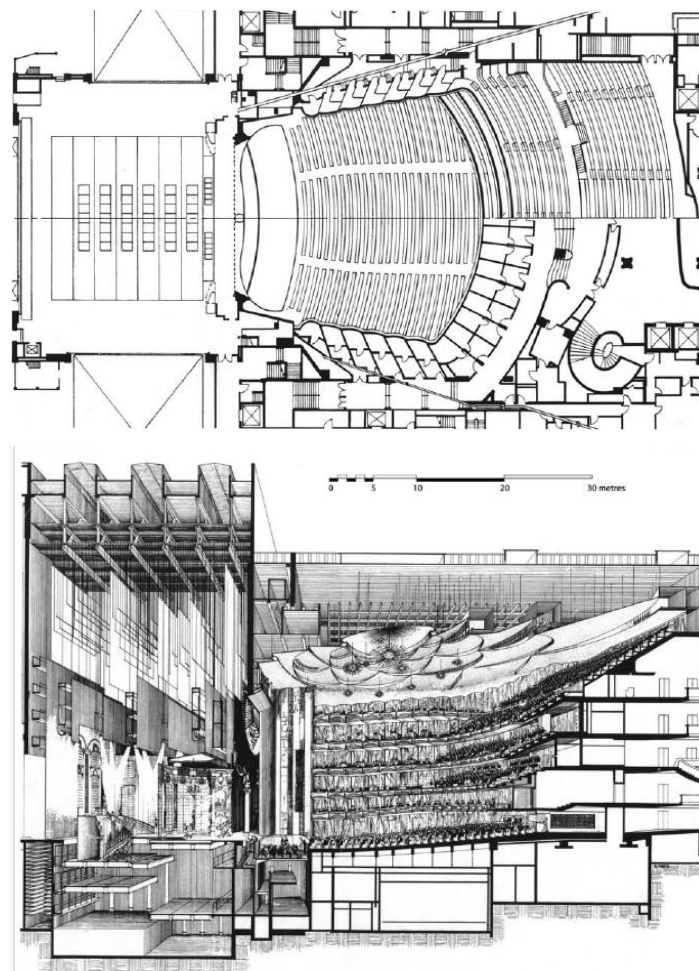


Figura 3.16 – Planta e secção do Metropolitan Opera House, Nova Iorque [23]

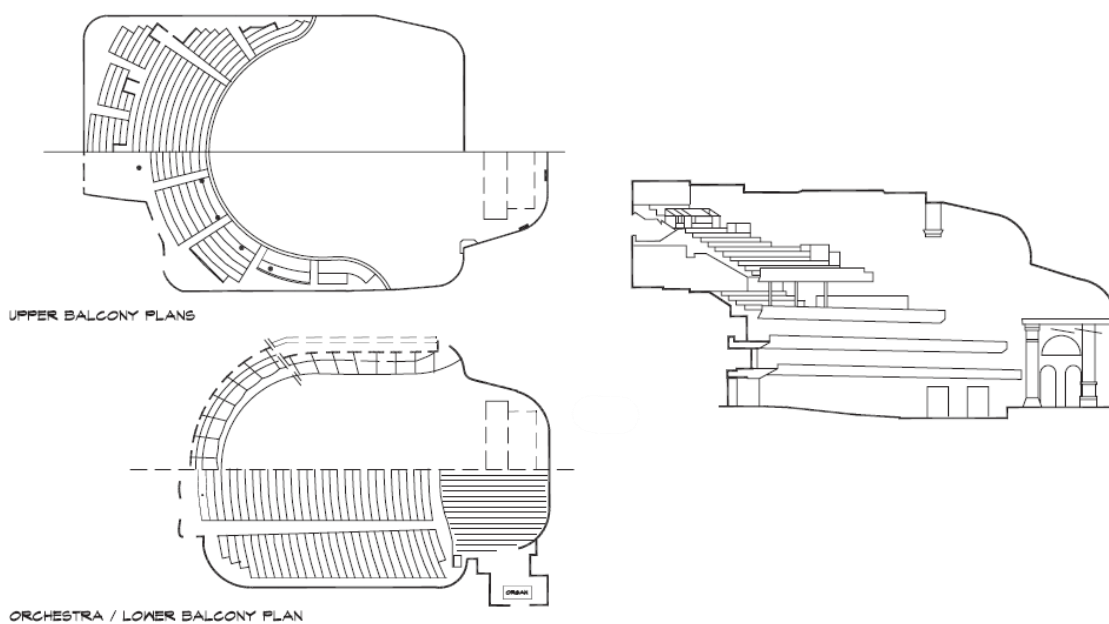


Figura 3.17 – Planta e secção do Carnegie Hall, Nova Iorque. [26]

Com o avanço do século XX, a acústica consolidou-se como uma área multidisciplinar, consolidando saberes da física, da arquitetura, da psicologia e da percepção auditiva. A teoria de Sabine, centrada no tempo de reverberação, foi complementada por abordagens geométricas e ondulatórias, que passaram a considerar a distribuição do som, as reflexões iniciais e a resposta subjetiva do ouvinte. A arquitetura deixou de depender exclusivamente de soluções empíricas ou estéticas, passando a integrar o desempenho acústico desde as fases iniciais do projeto. [25]

Ao mesmo tempo, o avanço das tecnologias eletroacústicas, como o desenvolvimento de microfones, altifalantes, amplificadores e sistemas de gravação, alterou profundamente a forma como se escuta e como se projeta o som. Ao mesmo tempo que permitiam melhorar a inteligibilidade e a cobertura sonora em grandes salas, estas tecnologias elevaram as expectativas do público, habituado a gravações com níveis de perfeição difíceis de alcançar em contexto ao vivo. [26]

A partir desse momento, a acústica deixou de ser apenas uma questão de física aplicada e passou também a ser uma arte, um campo onde se equilibra ciência, percepção e experiência sensorial, moldado tanto pela evolução tecnológica como pelos hábitos auditivos de cada época. [25] [26]

3.2. ACÚSTICA VARIÁVEL

3.2.1. INTRODUÇÃO

A crescente exigência de versatilidade nas salas de espetáculo tem levado ao desenvolvimento de soluções arquitetónicas e técnicas que permitem adaptar o desempenho acústico dos espaços a diferentes tipos de utilização. Embora a prática de utilizar um mesmo espaço para fins distintos exista há séculos, só nas últimas décadas se consolidou a consciência de que essa flexibilidade deve ser pensada desde o projeto, de forma a garantir condições sonoras adequadas a cada tipo de evento. [29]

A possibilidade de transformar uma sala vocacionada para a representação teatral num espaço apropriado para música sinfónica ou vice-versa implica alterações acústicas significativas. Mudanças pontuais, como a introdução de pequenas áreas absorventes ou o ajuste da inclinação de superfícies, revelam-se geralmente insuficientes. Para que uma transformação seja realmente eficaz e perceptível, é necessário que envolva alterações relevantes na resposta acústica do espaço, particularmente no tempo de reverberação. [23] [29]

O tempo de reverberação é, por isso, o parâmetro mais representativo da eficácia de uma solução de acústica variável. Por exemplo, enquanto um tempo da ordem de 1 segundo é ideal para o teatro, a música sinfónica exige valores próximos de 2 segundos. Esta diferença torna o projeto de salas multifuncionais especialmente desafiante, já que os requisitos não são apenas distintos, mas frequentemente contraditórios. A inteligibilidade da palavra beneficia de tempos curtos, ao passo que a música requer uma envolvimento sonora mais prolongada. [29]

De forma a demonstrar esta diferença de exigências, o Quadro 3.1 apresenta valores típicos de capacidade, distância ao palco e tempo de reverberação recomendado para diferentes tipos de uso de um auditório. Estes dados demonstram a complexidade de conceber um espaço verdadeiramente polivalente, capaz de responder de forma eficaz às particularidades de cada evento.

Quadro 3.1 – Limites básicos de capacidade, distância ao palco e tempo de reverberação em função do uso do auditório (traduzido de [23])

Tipo de uso	Capacidade máxima (lugares)	Distância máximo ao palco (m)	Tempo de reverberação ótimo (s)
Música Popular	-	-	<1,0
Teatro (drama)	1300	20	0,7 - 1,0
Ópera e Ballet	2300	30	1,3 – 1,8
Música de Câmara	1200	30	1,4 – 1,8
Música Orquestral	3000	40	1,8 – 2,2

3.2.2. VARIAÇÃO NA ABSORÇÃO SONORA

A forma mais comum de introduzir flexibilidade acústica num espaço prende-se com a possibilidade de ajustar o grau de absorção sonora das superfícies envolventes. Esta estratégia baseia-se na adição, remoção ou exposição de materiais com diferentes capacidades de absorção, sendo especialmente eficaz em salas de dimensão reduzida ou média. Nestes casos, pequenas alterações na área absorvente podem resultar em mudanças audíveis no tempo de reverberação. Contudo, à medida que o volume da sala aumenta, é necessário que a superfície absorvente variável seja proporcionalmente maior, idealmente comparável à área ocupada pela plateia, para que as alterações produzam um impacto relevante. [23] [26] [29]

Entre os métodos mais utilizados destacam-se as cortinas acústicas, que podem ser instaladas ao longo das paredes laterais, atrás de varandas ou painéis perfurados, e recolhidas vertical ou horizontalmente quando não são necessárias. Para que tenham um efeito significativo, estas cortinas devem ter densidade suficiente e estar afastadas alguns centímetros da parede, de forma a melhorar a absorção nas baixas frequências. Embora este sistema seja simples e eficaz, especialmente em salas pequenas, a sua influência é limitada nas gamas mais graves, o que pode resultar num equilíbrio acústico pouco uniforme entre as diferentes faixas de frequência. A Figura 3.18 demonstra o efeito do nível de pregueado na absorção sonora das cortinas, evidenciando como a quantidade de tecido acumulado, ou seja, o grau de compressão da cortina, pode influenciar significativamente o coeficiente de absorção sonora, sobretudo nas frequências médias e altas. [23] [29]

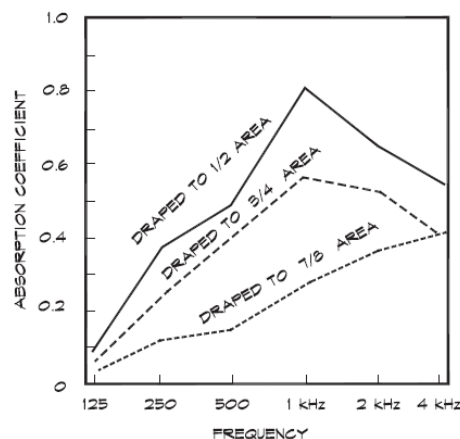


Figura 3.18 – Variação da absorção sonora de cortinas consoante o nível de pregueado [26]

Outro sistema amplamente adotado consiste na utilização de *baffles* acústicos, normalmente suspensos do teto. Estes painéis têxteis ou porosos são eficazes nas médias e altas frequências, mas, tal como nas cortinas, têm impacto reduzido nos sons mais graves. A sua introdução permite reduzir o tempo de reverberação em valores que, embora modestos (geralmente até 0,3 segundos em salas pequenas), são suficientes para adaptar a sala a eventos como conferências ou recitais. Em salas de maiores dimensões, os *banners* devem cobrir áreas significativas para produzir uma alteração perceptível, o que implica também soluções eficazes de armazenamento quando estão recolhidos. [23] [26]

Além das soluções têxteis, existem sistemas mais complexos, como os painéis giratórios (Figura 3.19 e 3.20) ou deslizantes (Figura 3.21), que oferecem uma resposta mais personalizada. Estes dispositivos podem ter uma face absorvente e outra refletora, sendo rodados ou deslocados para expor a superfície desejada conforme o uso da sala. Existem ainda variantes mais sofisticadas, como os prismas rotativos (Figura 3.22), cujas faces apresentam características distintas: uma absorvente, uma refletora e outra difusora. A sua rotação permite múltiplas combinações e um controlo mais preciso da resposta acústica, sendo particularmente eficazes em ambientes experimentais ou técnicos, como o caso do IRCAM, em Paris. [23] [29]

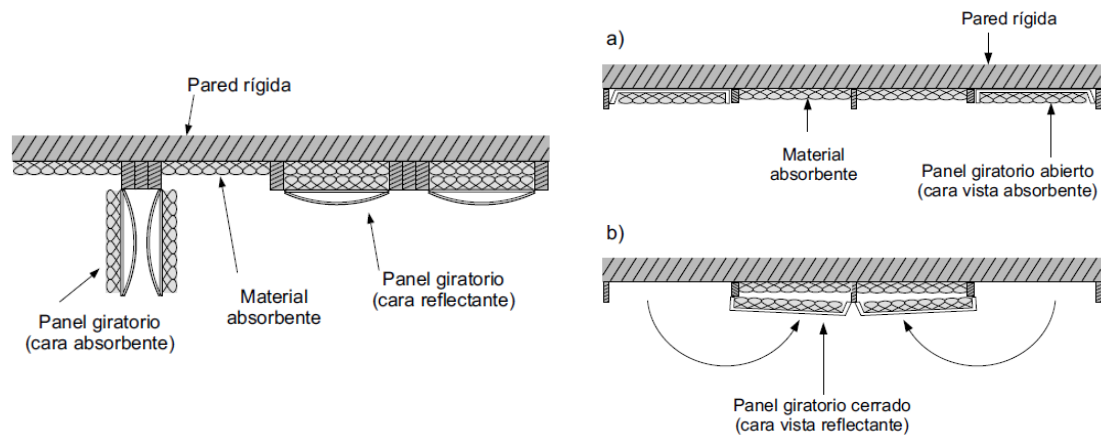


Figura 3.19 e 3.20 – Painéis giratórios a 90° e a 180°, respetivamente (a) máxima absorção; b) mínima absorção. [29]

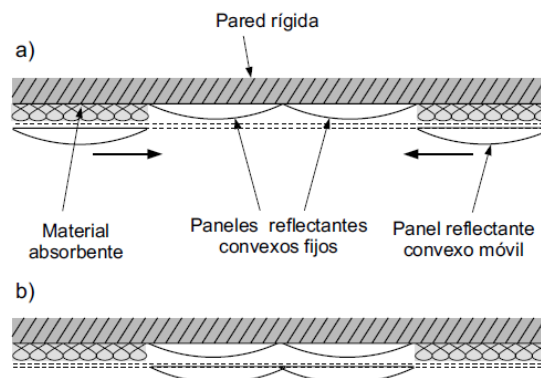


Figura 3.21 – Painel deslizante (a) mínima absorção; b) máxima absorção. [29]

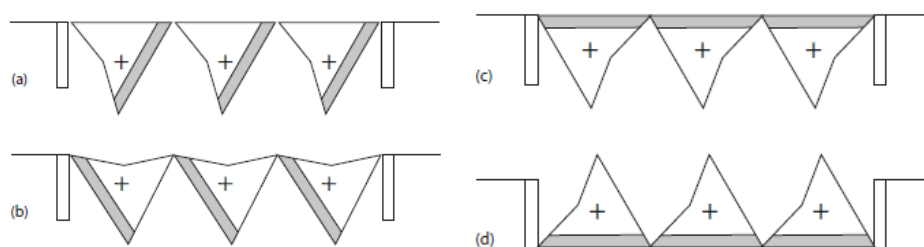


Figura 3.22– Prismas rotativos utilizados nas paredes e teto do Espace de Projection, IRCAM: (a) reflexão especular; (b) difusão; (c) absorção; (d) difusão elevada. [23]

Apesar da sua utilidade, os sistemas baseados em absorção sonora variável apresentam também algumas limitações. Em contextos de som não amplificados, a introdução de materiais absorventes pode reduzir o nível sonoro global e atenuar reflexões úteis, prejudicando a inteligibilidade da palavra ou a presença musical. A localização dos elementos absorventes deve, por isso, ser cuidadosamente estudada, evitando que interfiram com as primeiras reflexões que contribuem para a clareza e definição do som. Em salas de maiores dimensões, onde é necessário conservar a energia acústica, este tipo de solução pode tornar-se menos eficiente ou até contraproducente se mal dimensionada. [26]

Assim, a variação da absorção sonora continua a ser uma ferramenta poderosa para adaptar salas a diferentes usos, desde que integrada de forma criteriosa no projeto arquitetónico e técnico do espaço.

3.2.3. VARIAÇÃO NO VOLUME

A possibilidade de ajustar o volume de uma sala constitui uma abordagem relevante na conceção de espaços com acústica variável. Embora seja uma solução menos comum do que a variação por absorção, a modificação do volume permite alterar de forma significativa o tempo de reverberação sem comprometer os níveis de energia sonora refletida. Esta estratégia revela-se especialmente eficaz em salas de maiores dimensões, onde a simples introdução de materiais absorventes pode ser insuficiente ou contraproducente para alcançar as condições acústicas desejadas [23] [26] [29]

Entre as soluções existentes, destacam-se as divisórias verticais móveis, que permitem compartimentar o espaço e reduzir o seu volume útil, tornando possível a adaptação do tempo de reverberação a configurações mais intimistas. No entanto, este método tende a ter impacto limitado na resposta acústica, a menos que as divisórias ofereçam um bom desempenho em termos de isolamento e absorção sonora. A Figura 3.23 ilustra um exemplo dessa solução, aplicado no *Veterans' Memorial Auditorium*, nos Estados Unidos, onde se observa a transformação da sala consoante o tipo de uso e as alterações no padrão de reflexões. [23] [29]

Outro método consiste na utilização de tetos móveis, geralmente compostos por painéis suspensos ou secções ajustáveis que podem ser elevadas ou rebaixadas. Esta solução permite alterar de forma significativa o volume da sala, como demonstram casos como o da Sala São Paulo, no Brasil, ou do Milton Keynes Theatre, no Reino Unido (Figura 3.24). Nestes espaços, a variação volumétrica permite ajustar os tempos de reverberação de acordo com o tipo de evento, indo de valores mais curtos e adequados à palavra, cerca de 1,0 segundos, até valores mais longos para a música sinfónica, superiores a 1,5 segundos. [23] [26]

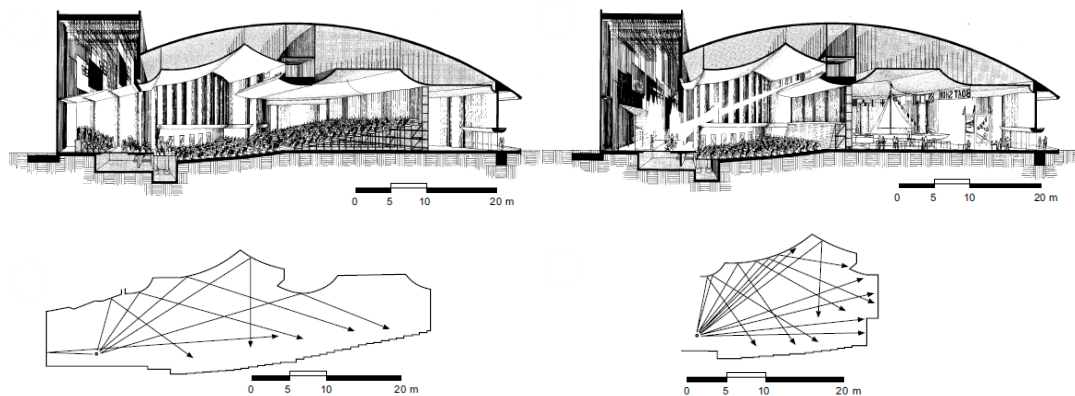


Figura 3.23 – Veterans' Memorial Auditorium, Califórnia: a) configuração da sala como espaço para concertos (esquerda) e para teatro (direita); b) representação das reflexões de primeira ordem. [29]



Figura 3.24 – Diferentes posições possíveis do teto móvel do Milton Keynes Theatre, Reino Unido. [23]

As cavidades reverberantes acopladas representam outra estratégia possível. Estas zonas, geralmente posicionadas na envolvente superior ou lateral da sala, são projetadas com materiais altamente refletores e podem ser conectadas ou isoladas do espaço principal através de sistemas mecânicos (portas). A Figura 3.25 mostra o caso do Eugene McDermott Concert Hall, Dallas nos Estados Unidos, onde estas cavidades são acionadas conforme a necessidade de reforço da reverberação. Quando ativadas, aumentam o volume efetivo do recinto e prolongam a duração do som refletido. Apesar de este efeito poder ser subtil e por vezes pouco perceptível, é uma ferramenta útil na modelação da resposta acústica em determinadas situações musicais. [29]

Por fim, os sistemas de painéis móveis suspensos no teto permitem, além da variação volumétrica, ajustar o padrão de reflexão das primeiras energias sonoras. A sua inclinação e posicionamento podem ser otimizados para reforçar a presença sonora no pública ou, em alternativa, reduzir o tempo de reverberação em zonas específicas. A Figura 3.26 demonstra as diferentes configurações deste tipo de sistema aplicadas no Cain Auditorium. Estes sistemas, apesar das suas vantagens, exigem uma integração cuidadosa com os restantes elementos técnicos da sala, como a iluminação e a climatização. [26] [29]

Embora a implementação de variação exija um maior grau de complexidade técnica e custos associados, os exemplos existentes demonstram que, com um projeto bem planeado, é possível obter espaços versáteis e acusticamente adaptáveis às exigências contemporâneas da programação artística.

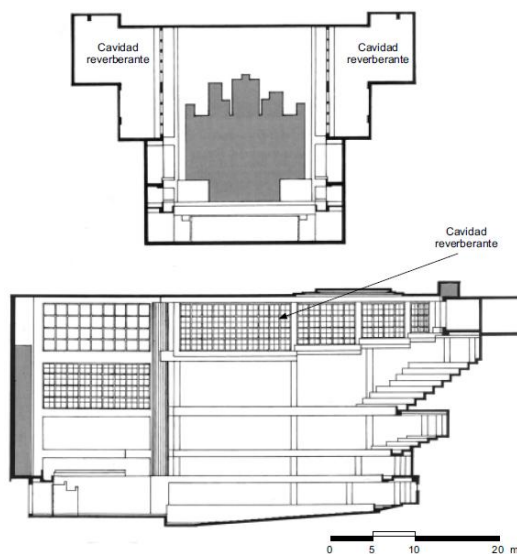


Figura 3.25 – Eugene McDermott Concert Hall, Dallas: planta e corte com indicações das cavidades reverberantes acopladas. [23]

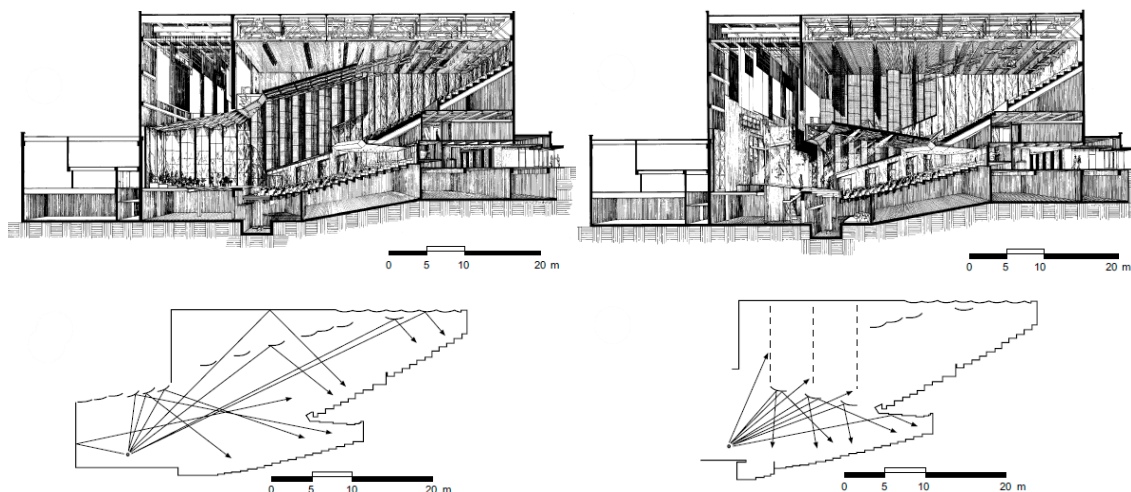


Figura 3.26 – Cain Auditorium, Manhattan: a) configuração da sala como espaço para concertos (esquerda) e para teatro (direita); b) representação das reflexões de primeira ordem. [29]

3.3. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS POR TIPO DE USO

3.3.1. AUDITÓRIOS PARA TEATRO

Os auditórios destinados ao teatro exigem condições acústicas que favoreçam, acima de tudo, a inteligibilidade da palavra. A escolha da configuração do palco e da plateia influencia significativamente a propagação sonora e, por conseguinte, a experiência do público. Entre os vários modelos existentes, o palco proscénio é frequentemente apontado como o mais eficaz, pois a moldura da boca de cena ajuda a concentrar a atenção e direcionar o som para a audiência. [26]

Como mostra a Figura 3.27, existem quatro configurações típicas: proscénio, arena, palco aberto e palco proscénio aberto. Cada uma destas soluções apresenta desafios distintos, sendo os palcos abertos ou em arena mais exigentes no controlo da difusão e reflexão sonora, devido à dispersão da audiência em torno da fonte sonora. [26]

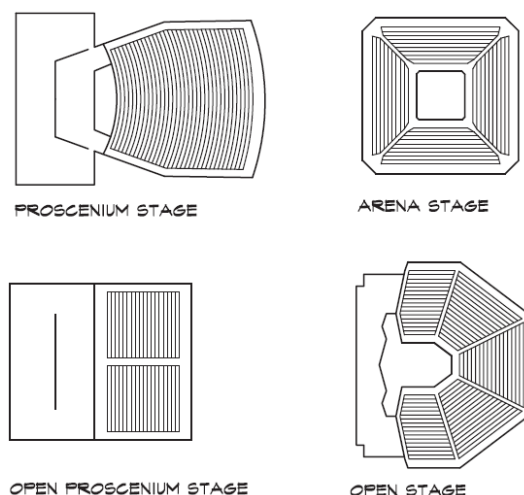


Figura 3.27 – Tipologias de palcos mais comuns em auditórios para teatro. [26]

Para além da geometria da sala, o tratamento das superfícies é determinante. As paredes laterais mais próximas do palco devem ser refletoras, de modo a devolver o som para a plateia quando os atores não estão virados para o público. Já a parede traseira da plateia, pelo risco de reflexões indesejadas, deve ser absorvente, mesmo em salas pequenas, uma vez que superfícies duras nessa zona tendem a amplificar excessivamente o som, comprometendo o equilíbrio acústico. [26]

A inteligibilidade da palavra está fortemente dependente do valor da fração de energia inicial (*early energy fraction*), que corresponde à relação entre o som direto e as primeiras reflexões. Quanto maior a fração de energia inicial, melhor a inteligibilidade. Este valor é influenciado pelo rácio de reflexões iniciais (*early reflection ratio*), que quantifica o número e intensidade dessas reflexões nas primeiras dezenas de milissegundos após a emissão da palavra. A importância destas reflexões aumenta com a distância entre o orador e o ouvinte e com a dimensão da sala. [23]

O quadro 3.2 mostra a relação entre o rácio de reflexões iniciais e a distância máxima de propagação da palavra inteligível, em função do ângulo do ouvinte relativamente ao orador. Observa-se que para manter a inteligibilidade em situações de maior afastamento ou quando o orador está de lado ou de costas, são necessárias várias reflexões precoces. [23]

Quadro 3.2 – Distâncias máximas para inteligibilidade da palavra em função do rácio de reflexões iniciais nos teatros. (adaptado de [23])

Rácio de reflexões iniciais	Distâncias limite máximas em metros		
	Ângulo do ouvinte em relação à direção frontal do orador		
	0°	90°	150°
1	20,0	13,0	8,9
2	28,3	18,4	12,8
3	34,6	22,6	15,5
4	40,6	26,1	17,9
5	44,7	29,2	20,0

O tempo de reverberação ideal para salas de teatro situa-se normalmente em torno de 1,0 segundo. Contudo, valores ligeiramente inferiores (entre 0,7 e 0,8 s) podem ser mais adequados para assegurar uma boa inteligibilidade em salas de maiores dimensões. Tempos inferiores a 0,5 segundos devem ser evitados, pois resultam em ambientes acusticamente secos e desconfortáveis, apesar de tecnicamente eficazes para a palavra. [23]

Em termos arquitetónicos, a conceção da cobertura da sala desempenha um papel crítico. Muitas vezes, o desenho do teto é subordinado à iluminação cénica, o que pode comprometer a função acústica se não forem previstas superfícies de reflexão adequadas. A Figura 3.28 ilustra uma secção típica onde as superfícies do teto foram desenhadas apenas para ocultar projetores, inviabilizando a criação de reflexões úteis para a audiência. [23]

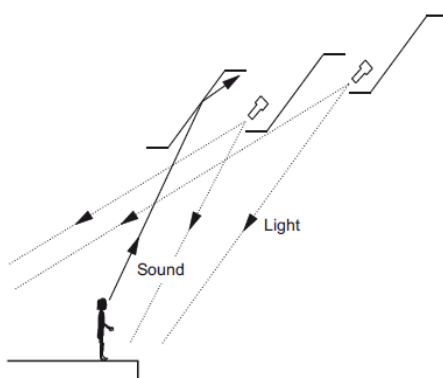


Figura 3.28 – Impacto negativo da geometria do teto na eficácia das reflexões sonoras. [23]

A integração de sistemas de reforço sonoro é também comum em salas com mais de 150 lugares, especialmente em produções contemporâneas com maior complexidade técnica. Nestes casos, recomenda-se que a mesa de mistura esteja localizada dentro da audiência, garantindo um controlo acústico mais eficaz. [26]

3.3.2. AUDITÓRIOS PARA A PALAVRA

Os espaços destinados à comunicação verbal, como salas de aula, auditórios para conferências e pequenos anfiteatros, requerem condições acústicas que favoreçam a inteligibilidade da palavra. A eficácia da comunicação nestes contextos depende de múltiplos fatores interrelacionados: o nível sonoro direto, as primeiras reflexões, o ruído de fundo, o tempo de reverberação e a presença de defeitos acústicos. [26]

A fala humana combina sons curtos e agudos, as consoantes, essenciais para a inteligibilidade, com sons mais longos e graves, como as vogais. No entanto, em ambientes com elevada reverberação, as vogais podem sobrepor-se às consoantes, dificultando a compreensão do discurso. Esta situação é ilustrada na Figura 3.29, onde se observa a persistência da vogal a mascarar parcialmente a consoante seguinte. [23] [26]

Para evitar esse efeito, torna-se essencial garantir a presença de reflexões iniciais, até 50 ms após o som direto, que reforcem o conteúdo articulado da palavra. Estas reflexões devem provir de superfícies rígidas próximas do orador ou do teto, otimizando o rácio de energia inicial, reconhecido como um indicador fiável da inteligibilidade. Valores superiores a 0,50 são geralmente considerados satisfatórios. [23] [26]

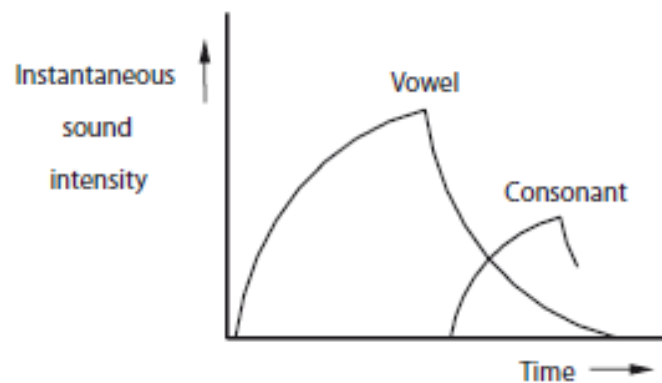


Figura 3.29 – Representação da intensidade do som ao longo do tempo, evidenciando o efeito de mascaramento das consoantes pelas vogais. [23]

O tempo de reverberação ideal para este tipo de espaços situa-se geralmente entre 0,6 e 1,0 segundos, dependendo do volume e das características geométricas da sala. Em vez de se adotar um valor fixo ao longo de todo o espectro audível, é atualmente reconhecido que o tempo de reverberação deve ser ajustado em função do volume do espaço, de forma a garantir uma resposta acústica adequada às exigências da comunicação verbal. A Figura 3.30 representa a relação entre o volume da sala e os tempos de reverberação recomendados para diferentes tipos de utilização. Observa-se que os espaços orientados para a palavra ocupam a base da escala, refletindo a necessidade de um controlo mais rigoroso da reverberação nesses contextos. [23] [26]

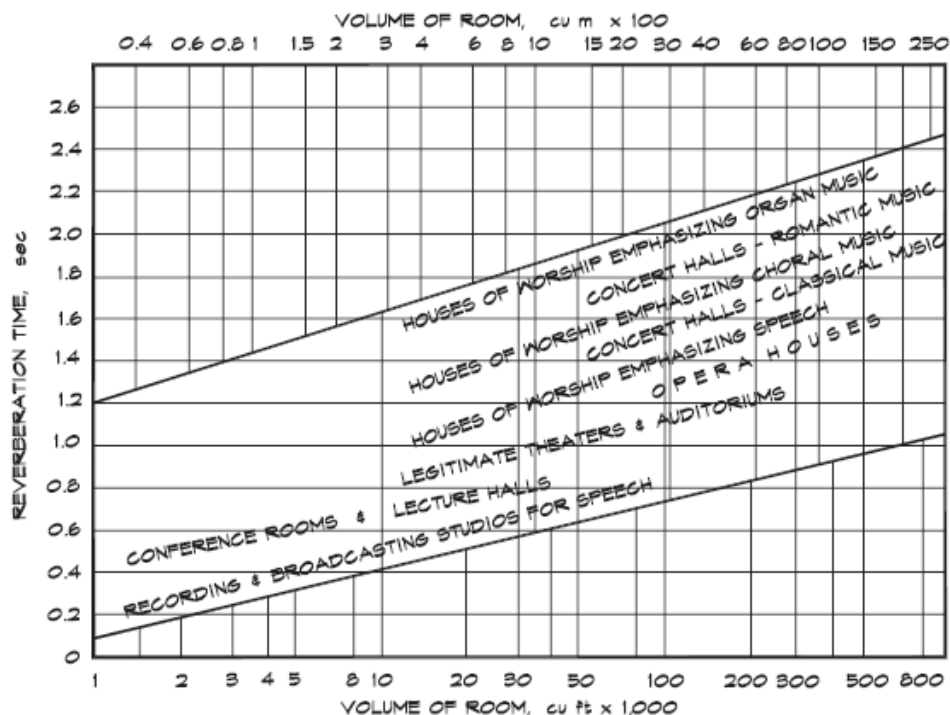


Figura 3.30 – Relação entre o volume da sala e o tempo de reverberação recomendado para diferentes usos. [26]

Além do tempo de reverberação, a distância entre o orador e os ouvintes assume um papel determinante. Distâncias superiores a 12 metros, especialmente em ambientes não amplificados, tendem a comprometer a inteligibilidade. Assim, configurações que mantenham o público mais

próximo do emissor, como auditórios com varandas ou planta em leque, revelam-se vantajosas. [23] [26]

Outro fator decisivo é o controlo do ruído de fundo. Em espaços dedicados à palavra, como pequenas salas ou grandes auditórios, os níveis de ruído devem situar-se abaixo dos 30 dBA (NC 30) e 25 dB(A) (NC 25), respetivamente. A Figura 3.31 ilustra a relação entre a inteligibilidade e a relação sinal/ruído, demonstrando como a presença de ruído interfere negativamente na perceção da mensagem verbal. [26]

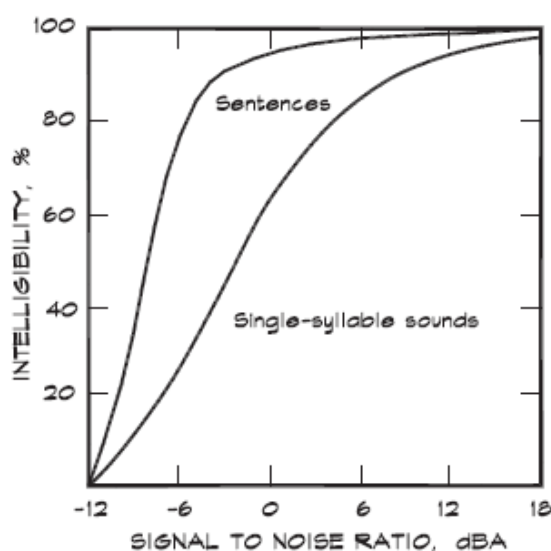


Figura 3.31 – Relação entre a inteligibilidade da palavra e a relação sinal/ruído para diferentes tipos de sons (frases ou palavras isoladas). [26]

Por fim, a qualidade acústica depende também da ausência de defeitos como ecos, *flutter echoes*, ou reflexões tardias. Estes fenómenos podem ser combatidos com o recurso a materiais absorventes ou difusores estrategicamente posicionados, garantindo assim um ambiente auditivo confortável e funcional. [23] [26]

3.3.3. SALAS PARA MÚSICA

Ao contrário dos espaços dedicados à palavra, as salas destinadas à música, seja em contexto coral, instrumental ou sinfónico, exigem condições acústicas que promovam a envolvimento, a riqueza tímbrica e a clareza harmónica. Nestes contextos, a qualidade da experiência sonora está intimamente ligada à forma como o som se propaga, interage no espaço e se prolonga no tempo.

Um dos fatores mais determinantes neste tipo de salas é o tempo de reverberação que deve variar de acordo com o tipo de música praticada. Para música sinfónica, valores entre 1,8 e 2,2 segundos são considerados ideais, enquanto música de câmara beneficia de tempos ligeiramente mais curtos, entre 1,4 e 1,8 segundos. Óperas, por sua vez, requerem uma articulação mais equilibrada entre clareza e sustentação, situando-se tipicamente entre 1,3 e 1,8 segundos (Quadro 3.3). [23] [26]

A Figura 3.32 reforça esta abordagem ao apresentar uma comparação gráfica entre os impulsos sonoros iniciais numa sala pequena e numa maior. Constatou-se que, apesar de o tempo de reverberação poder ser semelhante, as reflexões iniciais diferem em quantidade e distribuição, influenciando a perceção da envolvimento sonora.

Quadro 3.3 – Tempos de Reverberação recomendados para os diferentes tipos de música. (adaptado de [23] [25])

Género Musical	Tempo de Reverberação Recomendado (s)
Música Barroca	$\leq 1,5$
Música Clássica	1,6 – 1,8
Música Romântica	1,8 – 2,2
Música de Câmara	1,4 – 1,7
Ópera (não wagneriana)	1,3 – 1,6
Ópera wagneriana	1,6 – 2,0
Órgão	$\geq 2,5$

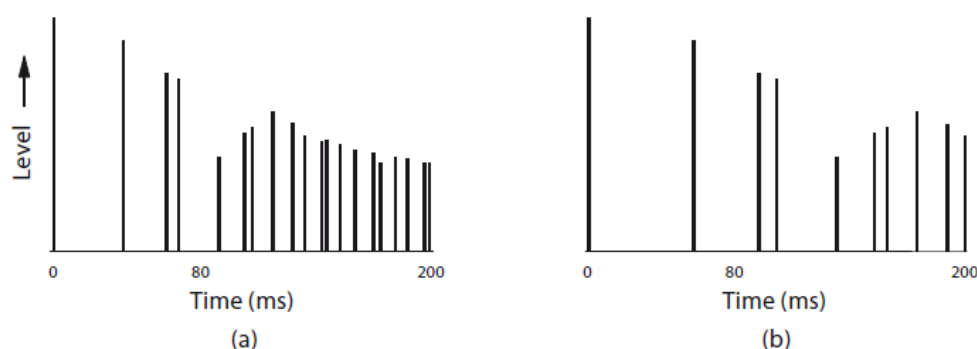


Figura 3.32 – Representação de respostas impulsivas em duas salas de concerto: a) sala pequena; b) sala maior. [23]

O volume da sala tem uma relação direta sobre o tempo de reverberação, mas não deve determinar o seu valor ideal, que deve ser definido em função do tipo de utilização do espaço. Salas com maiores volumes tendem, naturalmente, a apresentar tempos de reverberação mais elevados, sendo necessário um controlo acústico adequado para atingir os valores desejados. No entanto, um volume excessivo pode dificultar a definição do som ou causar sensação de dispersão acústica. Para espaços dedicados exclusivamente à música, é habitual considerar entre 8 e 12 m³ por lugar, dependendo do tipo de música e da presença de materiais absorventes adicionais. A Figura 3.30, anteriormente apresentada, permite compreender como estes espaços se posicionam nos níveis superiores da escala de volume e tempo de reverberação, refletindo a sua necessidade de maior sustentação sonora. [26]

Outro elemento fundamental são as reflexões laterais iniciais, responsáveis por criar uma sensação de envolvimento e proximidade do som. O seu equilíbrio com o som direto permite uma escuta mais natural e envolvente, sobretudo em música instrumental. O parâmetro LF (*lateral fraction*), mede a proporção de energia sonora proveniente dos lados durante os primeiros 80 ms, sendo ideais os valores entre 0,15 e 0,25 em música orquestral. A Clareza (C_{80}), que avalia a relação entre a energia inicial e tardia, deve situar-se entre -2 e +2 dB, pois promove uma fusão acústica mais rica entre os sons dos vários instrumentos. [23]

A forma da sala, Figura 3.33, tem também grande influência no modo como o som se distribui. A tradicional tipologia “*shoebox*”, com planta retangular e proporções equilibradas, continua a ser uma das mais eficazes, devido à sua capacidade de gerar múltiplas reflexões úteis. Por outro lado, salas em leque ou circulares tendem a reduzir a incidência de reflexões úteis, prejudicando a envolvimento acústica. No entanto, soluções contemporâneas exploram formas mais complexas e o uso de tetos suspensos, canópias ou difusores, para garantir uma distribuição sonora mais uniforme. [23] [26]

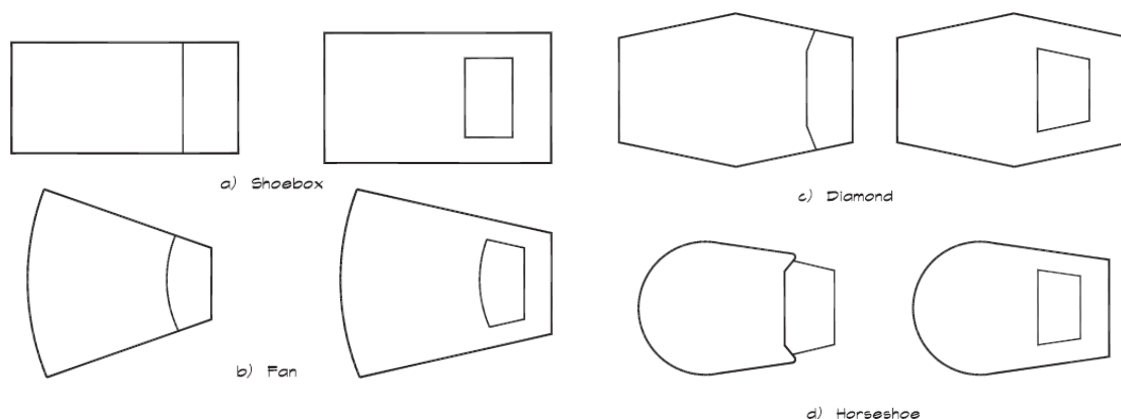


Figura 3.33 – Formas típicas, em planta, de salas de concerto. [26]

No tratamento das superfícies, são preferidos materiais refletores, como a madeira ou o gesso cartonado, para garantir uma boa propagação do som. Os tetos podem incluir elementos suspensos ou canópias que ajudam a distribuir o som de forma uniforme. Já a parede traseira deve ser cuidadosamente tratada com difusores ou materiais absorventes evitando ecos tardios que comprometam a definição e articulação musical. O palco, quando presente, deverá incluir uma concha acústica bem dimensionada, capaz de projetar o som da orquestra para a audiência com clareza e equilíbrio. [25] [26]

Por fim, muitas salas modernas incluem soluções de acústica variável, como cortinados móveis, painéis ajustáveis ou sistemas de reforço eletrônico. Estas estratégias permitem adaptar a sala a diferentes tipos de música, desde concertos de música barroca a atuações amplificadas, garantindo a melhor resposta acústica em cada situação. [25] [26]

3.3.4. SALAS PARA MÚLTIPLOS FINS

As salas para múltiplos fins apresentam uma solução versátil para edifícios culturais, educativos e cívicos, permitindo a realização de diferentes tipos de eventos como concertos, conferências, peças de teatro ou projeções audiovisuais. Contudo, esta flexibilidade coloca desafios acústicos complexos, uma vez que diferentes tipos de uso implicam exigências distintas, por vezes contraditórias. [25]

A questão central reside no equilíbrio entre inteligibilidade e envolvimento sonora. Enquanto os eventos de palavra requerem clareza, definição e tempos de reverberação curtos, os eventos musicais beneficiam de maior sustentação e difusão do som. Assim, define-se um intervalo de compromisso para o tempo de reverberação, habitualmente entre 1,0 e 1,4 segundos, suficiente para acomodar ambos os usos sem comprometer a qualidade acústica de forma significativa. Esta zona de compromisso encontra-se representada na Figura 3.30, que associa os tempos de reverberação recomendados a diferentes tipos de sala, considerando também os volumes

habitualmente observados em cada caso, sem que isso implique que o volume determine o valor ideal de TR. [25] [26]

Outro parâmetro importante é o volume da sala por lugar, geralmente situado entre 6 e 9 m³/lugar nestes espaços (Quadro 3.4). Trata-se de um valor intermédio entre os exigidos para auditórios vocacionados para a palavra e para salas de concerto. Um volume excessivo comprometeria a clareza do som, mas, por outro lado, um volume demasiado reduzido poderia limitar a envolvimento acústica desejada em eventos musicais. [25] [26]

Quadro 3.4 – Intervalo ideal de volume por lugar, por tipo de auditório. [26]

Tipo de Auditório	Volume por Lugar (m ³)
Salas para a Palavra	2,3 – 4,3
Salas de Concertos	6,2 – 10,8
Salas de Ópera	4,5 – 7,4
Igrejas/Sinagogas	5,1 – 9,1
Auditórios de Usos Múltiplos	5,1 – 8,5
Salas de Cinema	2,8 – 5,1

Dada esta variabilidade funcional, o projeto destas salas recorre frequentemente a estratégias de acústica variável, como cortinados motorizados, painéis rotativos, painéis deslizantes ou sistemas eletrónicos de reverberação assistida. Estas soluções permitem ajustar a resposta acústica consoante o tipo de evento, garantindo maior controlo e adaptabilidade sem alterar muito a configuração física da sala. [25] [26]

A forma da sala também desempenha um papel crucial na difusão sonora. Geometrias neutras, compactas e simétricas tendem a facilitar a adaptação a diferentes disposições de palco e plateia. No entanto, soluções como a tipologia “*shoebox*”, já destacada na Figura 3.33, continuam a oferecer vantagens significativas, sobretudo no controlo de reflexões laterais e na promoção da clareza e envolvimento sonora. Deve evitar-se a presença de superfícies paralelas ou côncavas que favoreçam fenómenos como focagem, flutter ou ecos. [23]

O tratamento das superfícies, por sua vez, deve procurar um equilíbrio entre materiais refletores e absorventes. As paredes laterais e o teto, quando tratados com difusores ou elementos de reflexão variável, ajudam a distribuir o som de forma mais homogénea. Por outro lado, a parede traseira deve ser cuidadosamente controlada para evitar reflexões prejudiciais à clareza da palavra ou à definição musical. [23] [25]

Por se tratar de espaços utilizados com frequência para conferências e apresentações, é essencial garantir inteligibilidade elevada. O índice STI deve idealmente situar-se acima de 0,6, assegurando uma compreensão clara da palavra. A relação sinal/ruído, dependendo da escala da sala e do tipo de evento, deve manter-se entre +10 e +25 dB. A utilização de sistemas de reforço sonoro é, por isso, quase sempre indispensável, sendo importante a sua correta integração arquitetónica e eletrónica no espaço. [25] [26]

Por fim, a coexistência de diferentes usos exige um controlo rigoroso para minimizar defeitos acústicos. Reflexões excessivas, ecos de cauda longa, fenómenos de *flutter* (ecos paralelos) ou

ressonâncias de baixa frequência, devem ser evitados através de uma combinação equilibrada de difusão, absorção e até reforço eletroacústico. Embora estas preocupações sejam comuns a qualquer espaço performativo, tornam-se particularmente sensíveis em contextos polivalentes, onde a qualidade sonora não pode ser otimizada para apenas um tipo de utilização.

3.4. LEGISLAÇÃO PORTUGUESA

Em Portugal, os requisitos legais relativos ao desempenho acústico dos edifícios estão definidos no Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), aprovado pelo Decreto-Lei nº 129/2002, de 11 de maio, e posteriormente alterado pelos Decretos-Lei nº 96/2008, de 9 de junho, e nº 95/2019. Este regulamento tem como principal objetivo garantir níveis adequados de conforto acústico, promovendo a qualidade do ambiente sonoro interior dos edifícios e, em consequência, o bem-estar e a saúde dos seus ocupantes, em consonância com a legislação relativa ao ruído ambiental. [30]

O RRAE aplica-se a edifícios novos, bem como a intervenções de reconstrução, ampliação ou alteração de construções existentes, abrangendo várias tipologias de uso, nomeadamente: [30]

- 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 de espetáculo.

No que respeita às salas de espetáculo e auditórios, o regulamento especifica no Artigo 10º - A os requisitos a cumprir em função da principal utilização do espaço, distinguindo entre espaços vocacionados para a oratória, como salas de conferência, auditórios ou cinemas, e espaços destinados a espetáculos musicais ou performativos. [30]

Para espaços destinados à oratória, o RRAE estabelece limites máximos para o tempo de reverberação médio, T , nas bandas de oitava centradas em 500, 1000 e 2000 Hz, conforme o volume interior do espaço, V . Os limites são definidos pelas seguintes expressões: [30]

$$T \leq 0,12 \times V^{\frac{1}{3}}, \text{ se } V < 250 \text{ m}^3 \quad (3.1)$$

$$T \leq 0,32 + 0,17 \times \log V, \text{ se } 250 \text{ m}^3 \leq V < 9000 \text{ m}^3 \quad (3.2)$$

$$T \leq 0,05 \times V^{\frac{1}{3}}, \text{ se } V \geq 9000 \text{ m}^3 \quad (3.3)$$

Estes valores devem ser verificados com a sala mobilada e sem ocupação. Além disso, o projeto acústico deve assegurar um estudo específico que garanta níveis adequados de inteligibilidade da palavra, assegurando que a resposta acústica seja uniforme em todos os pontos da sala. [30]

Para espaços cuja função principal não está centrada na oratória, como salas de espetáculo ou concertos, o regulamento não define valores fixos para o tempo de reverberação. Nestes casos, é exigido a um estudo específico de condicionamento acústico que assegure uma resposta sonora apropriada à função do espaço, garantindo a envolvimento e a qualidade da escuta. [30]

Adicionalmente, o regulamento determina limites para o nível de ruído ambiente proveniente do exterior e para o ruído gerado pelos sistemas técnicos do edifício, medidos com a sala desocupada. O nível sonoro contínuo equivalente, resultante do ruído ambiente exterior, deve satisfazer a expressão (3.4): [30]

$$LA_{eq} \leq 30 \text{ dB} \quad (3.4)$$

No caso do ruído particular, proveniente de instalações técnicas como sistemas de ventilação, climatização ou aquecimento (AVAC), os limites são: [30]

- $LA_{eq} \leq 38 \text{ dB}$ para salas de cinema;
- $LA_{eq} \leq 30 \text{ dB}$ para os restantes tipos de recinto.

Para assegurar a fiabilidade dos resultados obtidos nas medições acústicas realizadas *in situ*, é obrigatório a aplicação de um fator de incerteza (I). Este fator deve ser considerado da seguinte forma: [30]

- Para o tempo de reverberação (T), o valor medido deve ser reduzido percentualmente, conforme o volume do espaço:
 - i. 25% se $V < 250 \text{ m}^3$;
 - ii. 35% se $250 \text{ m}^3 \leq V < 9000 \text{ m}^3$;
 - iii. 40% se $V \geq 9000 \text{ m}^3$.
- No caso do nível de ruído particular (LA_{eq}), o valor obtido deve ser reduzido em 3 dB antes da verificação da conformidade com o limite regulamentar.

No caso de estudo, embora se realizem atividades assentes na oratória, trata-se de um espaço vocacionado para a música e o espetáculo, pelo que não está sujeito aos limites regulamentares definidos para o tempo de reverberação em recintos destinados à comunicação verbal. Este aspeto será aprofundado no capítulo seguinte, onde se analisa o desempenho acústico específico do edifício. [30]

4

METODOLOGIA

4.1. TEATRO JORDÃO

4.1.1. ENQUADRAMENTO CENTRAL

O Teatro Jordão localiza-se na Avenida D. Afonso Henriques, no centro da cidade de Guimarães, junto à Zona de Couros, atualmente classificada como Património Mundial da Unesco (Figuras 4.2 e 4.3). O edifício foi inaugurado a 20 de novembro de 1938 e, desde então, assumiu um lugar de destaque na vida cultural da cidade. Originalmente concebido como um cineteatro, um tipo de equipamento cultural muito comum em Portugal nas décadas de 1930 e 1940, o espaço estava pensado para acolher tanto sessões de cinema como espetáculos teatrais promovidos por companhias itinerantes, também bastante frequentes à época. Esta combinação de funções reflete uma tentativa de modernização que começava a surgir nos centros urbanos portugueses, através da introdução de novos hábitos culturais e equipamentos inovadores para o seu tempo.



A origem do edifício remonta à iniciativa do empresário Bernardino Jordão (Figura 4.1), que, em 1936, assumiu o impulso privado para a construção de um novo teatro na cidade, num período em que se discutia intensamente a necessidade de um espaço condigno para espetáculos, face ao encerramento do antigo Teatro D. Afonso Henriques e à degradação do Teatro Gil Vicente. A construção teve início em fevereiro de 1937, sob direção do arquiteto e engenheiro civil Júlio José de Brito. Apesar de ter sido inicialmente planeado como "Teatro Jordão", por imposição política da época, a designação oficial na inauguração foi "Teatro Martins Sarmento", nome que se manteve até após a morte do seu fundador, em 1940. Posteriormente, o teatro passaria a ser conhecido como Teatro Jordão, em homenagem ao seu promotor original. [31] [32] [33][35]

Figura 4.1 – Bernardino Jordão. [35]

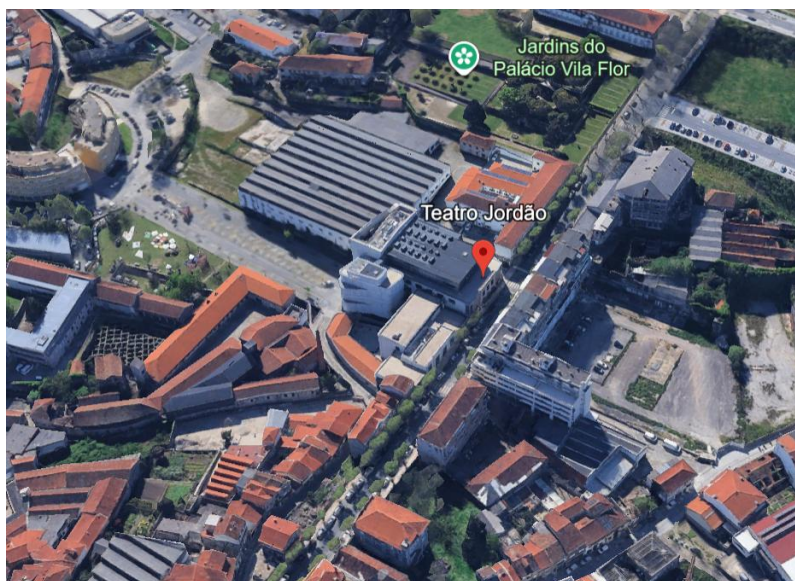


Figura 4.2– Localização do Teatro Jordão, em Guimarães. [35]



Figura 4.3 – Teatro Jordão, Guimarães. [32]

Para além da sua vocação cultural, o edifício integrava também, no piso inferior, o “Restaurante Jordão”. Esta conjugação de espaços contribuiu para fazer do Teatro Jordão um ponto de encontro e de convívio na cidade, conferindo-lhe um valor simbólico que perdurou mesmo após o encerramento das suas atividades originais e o consequente estado de degradação física em que o teatro viria a encontrar-se nas décadas finais do século XX. [32] [33]

A sua imagem arquitetónica, marcada pela volumetria robusta e uma expressão de modernidade visível nas fachadas voltadas para a avenida, constituiu-se como um marco visual e identitário da cidade. O edifício é representativo da linguagem modernista com influências da estética *Art Déco*, que caracterizou a arquitetura portuguesa dos anos de 1930. [32] [33]

Foi neste enquadramento que, entre 2016 e 2022, se desenvolveu o processo de reabilitação e reconversão do Teatro Jordão, num projeto de ampla escala com uma área de intervenção de cerca

de 12 400 m², promovido pela NVE engenharias, S.A., em consórcio com a Costeira - Engenharia e Construção, S.A. A intervenção integrou também a recuperação da adjacente Garagem Avenida, edifício da mesma época e de valor patrimonial reconhecido. Esta obra destacou-se pela complexidade técnica e simbólica, procurando preservar a essência arquitetónica do edifício original, sem comprometer a necessária adaptação funcional e tecnológica às novas possibilidades de uso. [33]

No domínio da acústica, a responsabilidade do projeto foi assumida pelo Professor Vasco Peixoto de Freitas, sendo esta uma componente fundamental no sucesso da transformação do antigo cineteatro num auditório moderno e versátil. O novo espaço conta com capacidade para 386 lugares sentados, dispondo de uma estrutura flexível e acessibilidades adaptadas para visitantes com mobilidade reduzida. [32] [33]

A reabertura ao público teve lugar no dia 12 de fevereiro de 2022, com a instalação de três escolas, a Escola de Artes Performativas, a Escola de Artes Visuais e a Escola de Música, repartidas entre diferentes entidades, nomeadamente a Universidade do Minho e a Sociedade Musical de Guimarães. O auditório (Figura 4.4), resultante da reconversão da antiga sala do Teatro Jordão, foi desenhado como uma sala multifuncional, capaz de responder a diversas tipologias de eventos, incluindo apresentações teatrais, concertos, congressos e espetáculos de dança. Neste contexto, a presente dissertação foca-se na análise do comportamento acústico deste auditório, enquanto espaço central de expressão artística, pedagógica e cultural. [31] [32] [33]

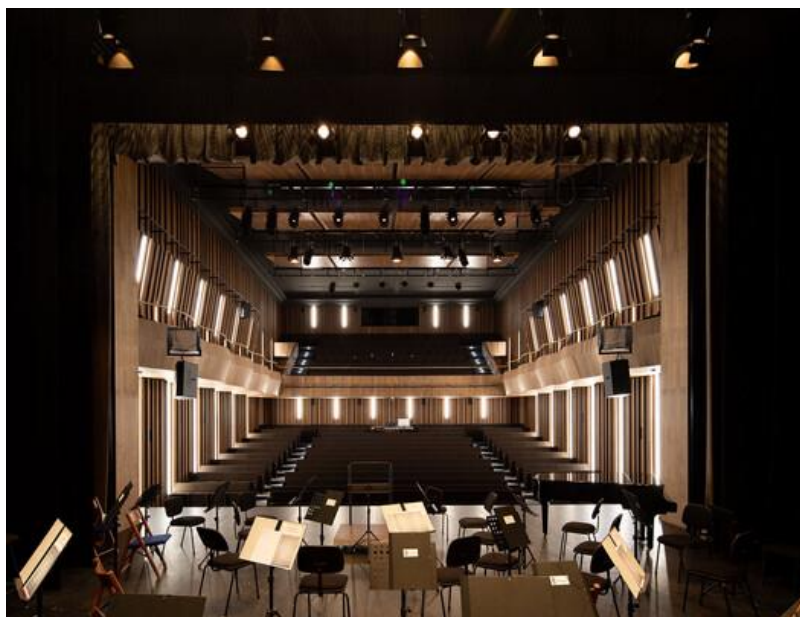


Figura 4.4 – Auditório principal do Teatro Jordão, visto a partir do palco. [32]

4.1.2. CARACTERIZAÇÃO ARQUITETÓNICA E GEOMÉTRICA

O auditório principal do Teatro Jordão apresenta uma configuração típica de uma sala de espetáculos multifuncional, adaptada a diferentes tipos de eventos culturais. Desenvolve-se em dois níveis: o piso térreo, correspondente à plateia, e um balcão superior (Figuras 4.5 e 4.6). A capacidade da sala é de 386 lugares, dos quais 249 se localizam na plateia e 137 no balcão, aos quais acrescem ainda três lugares reservados a pessoas com mobilidade reduzida.

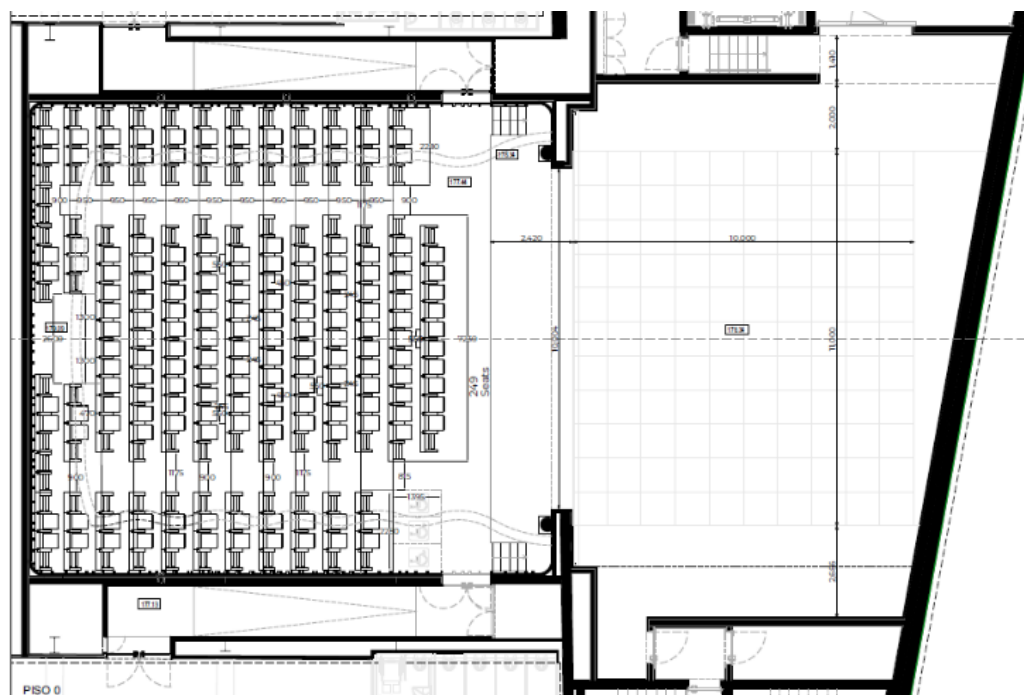


Figura 4.5 – Planta Piso 0 (plateia) do Teatro Jordão. [36]

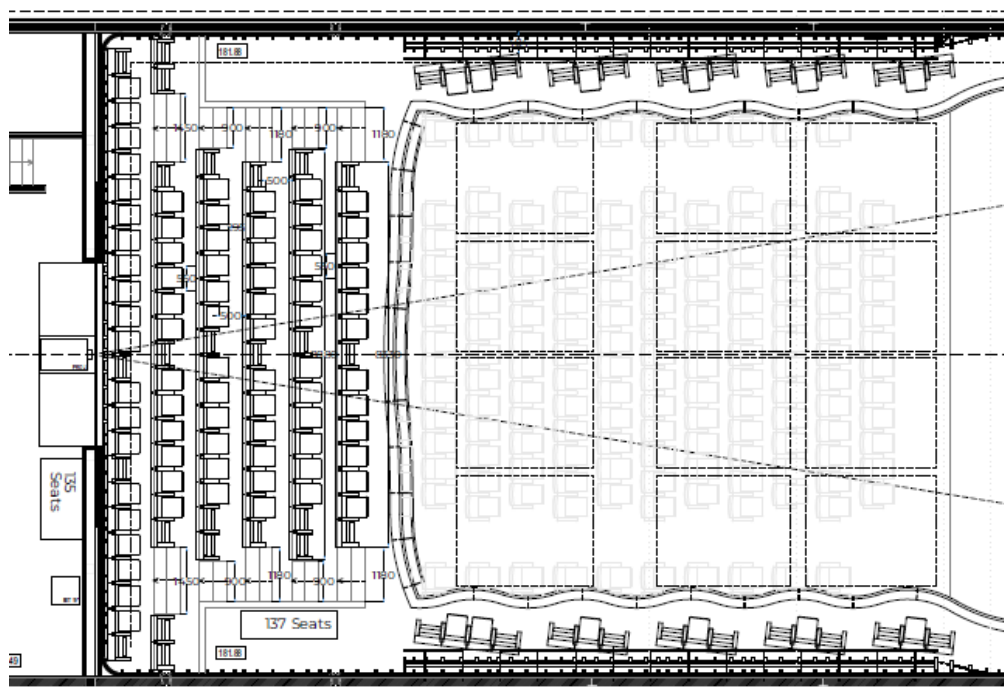


Figura 4.6 – Planta do Piso 1 (balcão) do Teatro Jordão. [36]

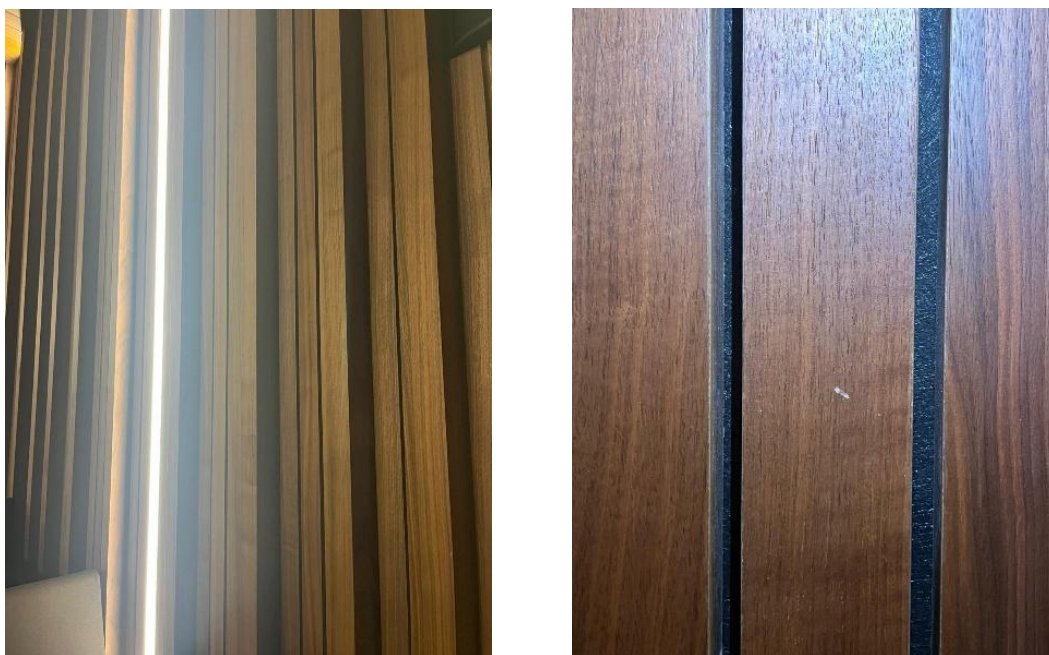


Figura 4.8 – Revestimento das paredes laterais da plateia com painéis de madeira (esquerda); detalhe do material fonoabsorvente aplicado entre os painéis (direita). [fotos da autora]

Na zona do palco, a solução construtiva é distinta: as paredes são revestidas com painéis de fibras de madeira aglutinadas, de cor escura e textura rugosa, que desempenham uma função essencial na absorção sonora (Figura 4.9). Além disso, existem cortinas escuras de tecido espesso nas laterais e no fundo do palco, que permitem ajustar o comportamento acústico consoante o tipo de evento a decorrer (Figura 4.10).

No teto do auditório, destacam-se as canópias suspensas em madeira, com inclinações e alturas variadas, como se pode ver nas Figura 4.7 e 4.11. Estes elementos servem para apoiar a iluminação técnica, mas também ajudam a refletir e difundir o som de forma equilibrada.



Figura 4.9 – Detalhes dos painéis absorventes de fibras de madeira aplicados nas paredes do palco do Teatro Jordão. [fotos da autora]



Figura 4.10 – Cortinas de tecido espesso aplicadas no palco do Teatro Jordão. [foto da autora]

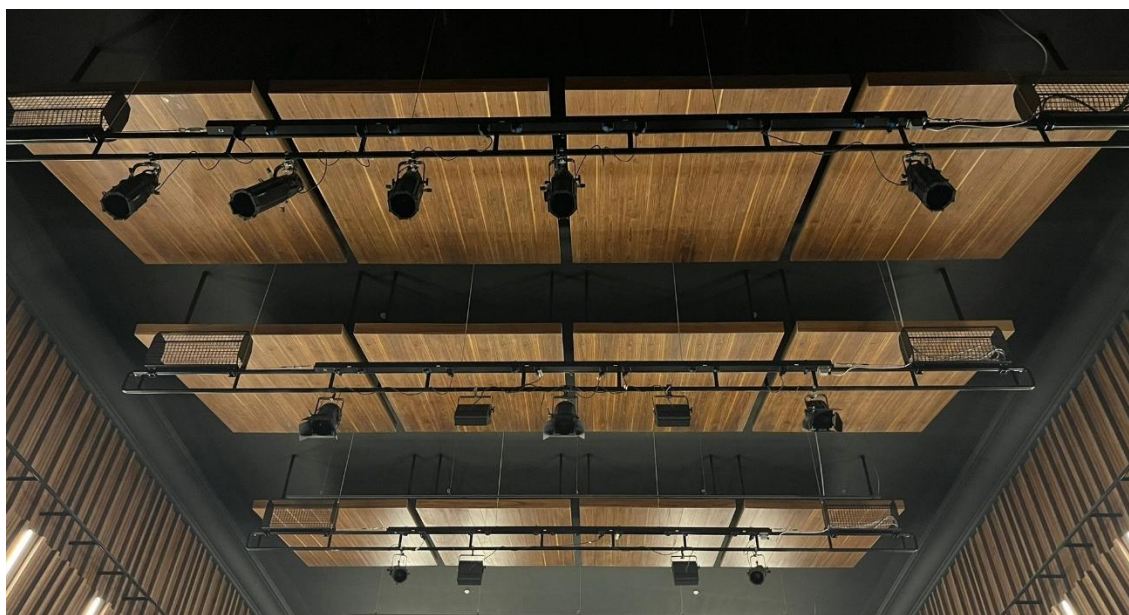


Figura 4.11 – Canópias suspensas em madeira no teto do auditório. [foto da autora]

Os assentos, estofados com tecido escuro e dotados de encostos altos, estão distribuídos de forma uniforme entre a plateia e o balcão (Figuras 4.12). Estes elementos não apenas garantem conforto ao público, como também contribuem para a absorção sonora, especialmente útil em situações de ocupação parcial da sala. O pavimento da plateia, revestido com alcatifa de pequena espessura, reforça este efeito, ao atenuar reflexões sonoras nas frequências mais altas. Por baixo dos assentos encontram-se grelhas metálicas circulares que fazem parte do sistema de climatização (AVAC) (Figura 4.13).



Figura 4.12 – Assentos estofados da plateia do Teatro Jordão. [fotos da autora]



Figura 4.13– Grelhas do sistema AVAC localizados sob os assentos da plateia do Teatro Jordão. [foto da autora]

4.2. METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS

4.2.1. PARÂMETROS MEDIDOS

No âmbito da presente dissertação, foi realizada a caracterização acústica do auditório do Teatro Jordão, com o objetivo de avaliar o comportamento sonoro do espaço face às exigências das suas atuais funções culturais e educativas. As medições decorreram no dia 7 de abril de 2025, *in situ*, com o apoio técnico do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Os ensaios foram conduzidos pelo Engenheiro António Eduardo Costa, com a assistência da autora, recorrendo a equipamento especializado para a medição de parâmetros acústicos objetivos, já mencionados no capítulo 2.

Foram analisados os seguintes parâmetros:

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

Com o intuito de garantir a representatividade dos resultados, foram definidos vários pontos de medição ao longo da plateia e do balcão, tendo sido considerada a simetria do espaço como critério para a seleção dos locais de ensaio. Assim, os pontos de análise foram distribuídos numa metade longitudinal da sala, assumindo-se que os valores seriam semelhantes na metade oposta.

As medições foram realizadas, no dia 7 de abril de 2025 ao final da tarde, com a sala completamente desocupada, à exceção da presença da autora, do engenheiro responsável e do técnico Carlos Ribeiro. Não foi utilizado qualquer sistema de reforço eletroacústico durante os ensaios. Por se tratar de um espaço inserido num contexto urbano e educativo, verificaram-se algumas interferências ocasionais de ruído exterior, tendo sido necessário repetir certas medições de modo a garantir a fiabilidade dos dados obtidos.

A altura dos microfones foi definida em aproximadamente 1,20 metros, por forma a simular a posição da cabeça de um espetador sentado, assegurando que os resultados fossem representativos da experiência auditiva real dos utilizadores do auditório. A seleção dos parâmetros e a metodologia adotada visaram obter uma leitura detalhada da resposta acústica do espaço, abrangendo quer o domínio da palavra, quer o da música.

4.2.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para a realização das medições acústicas no auditório do Teatro Jordão, foi utilizado equipamento técnico fornecido pelo Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), adequado às exigências de precisão e fiabilidade exigidas por este tipo de ensaio.

Os equipamentos utilizados foram os seguintes:

- **Fonte sonora Brüel & Kjær, modelo 4720 (*Echo Speech Source*):** fonte calibrada para medições de inteligibilidade da palavra, compatível com o *software* DIRAC e adequada para ambientes com ruído de fundo significativo (Figura 4.14);

- **Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260:** analisador de som portátil, alimentado por bateria, com capacidade para medições em tempo real e análises de elevada fiabilidade (Figura 4.14);
- **Calibrador de microfones Brüel & Kjær, modelo 4231:** equipamento portátil para calibração do sistema de medição, garantindo a precisão (Figura 4.14);
- **Microfone Brüel & Kjær, modelo 4189 (13 mm):** microfone de campo livre, com elevada sensibilidade, adequado para medições precisas numa gama de frequências entre 6 e 20 Hz (Figura 4.14);
- **Tripé portátil Brüel & Kjær, modelo UA0049:** estrutura ajustável utilizado para garantir a estabilidade e o posicionamento correto do microfone durante os ensaios;
- **Software DIRAC:** plataforma digital utilizada para o processamento e análise automática dos parâmetros acústicos medidos.

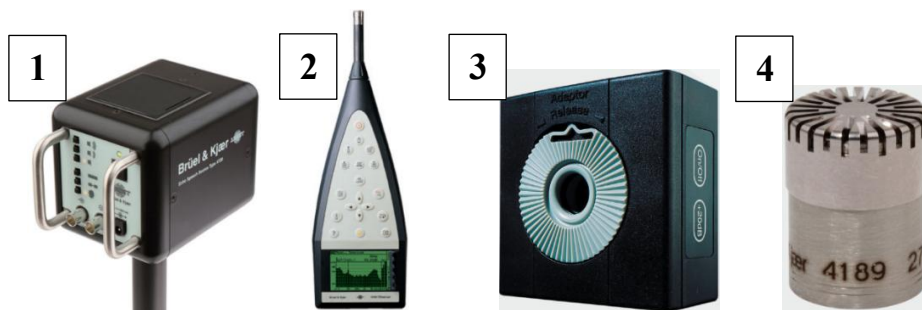


Figura 4.14 – Equipamentos de medição: 1 - Fonte sonora Brüel & Kjær 4720; 2 - Sonómetro Brüel & Kjær 2260; 3 - Calibrador de microfones Brüel & Kjær 4231; 4 - Microfone Brüel & Kjær 4189. [37] [38] [39] [40]

4.2.3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

4.2.3.1. Ruído de Fundo

Conforme referido no Capítulo 2, o ruído de fundo corresponde a todos os sons presentes no ambiente que não provêm da fonte sonora principal, podendo interferir na perceção auditiva e comprometer a comunicação. A sua análise torna-se particularmente relevante em espaços destinados à performance e à formação, onde o silêncio de base é essencial para assegurar condições acústicas adequadas.

Neste ensaio, procurou-se quantificar o nível de ruído ambiente existente na sala em condições de repouso acústico, ou seja, sem qualquer sistema ativo ou presença de público. As medições foram realizadas com e sem o sistema AVAC em funcionamento, recorrendo ao sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260, montado num tripé portátil, com o microfone colocado a uma altura de aproximadamente 1,20 metros, simulando a posição da cabeça de um espetador.

Foram definidos três pontos distintos do auditório de forma a garantir uma cobertura espacial representativa: RF1 e RF2, na plateia (Figura 4.15), RF3, no balcão (Figura 4.16). Em cada ponto registaram-se os níveis de pressão sonora contínuos equivalentes (L_{eq}), e os valores ponderados, utilizando o filtro A (L_{Aeq}). As medições foram ainda analisadas por bandas de 1/3 de oitava, permitindo identificar as gamas de frequência mais afetadas.

Apesar do sistema de ventilação ter sido desligado, subsistiu algum ruído residual proveniente da iluminação técnica, que não pôde ser desativada no momento da medição. Esta condição poderá ter contribuído para um ligeiro aumento dos níveis registados.

Os resultados obtidos permitirão avaliar a eficácia das soluções construtivas adotadas na contenção do ruído ambiente e verificar se os valores medidos se encontram dentro dos padrões aceitáveis para espaços de uso cultural e educativo.

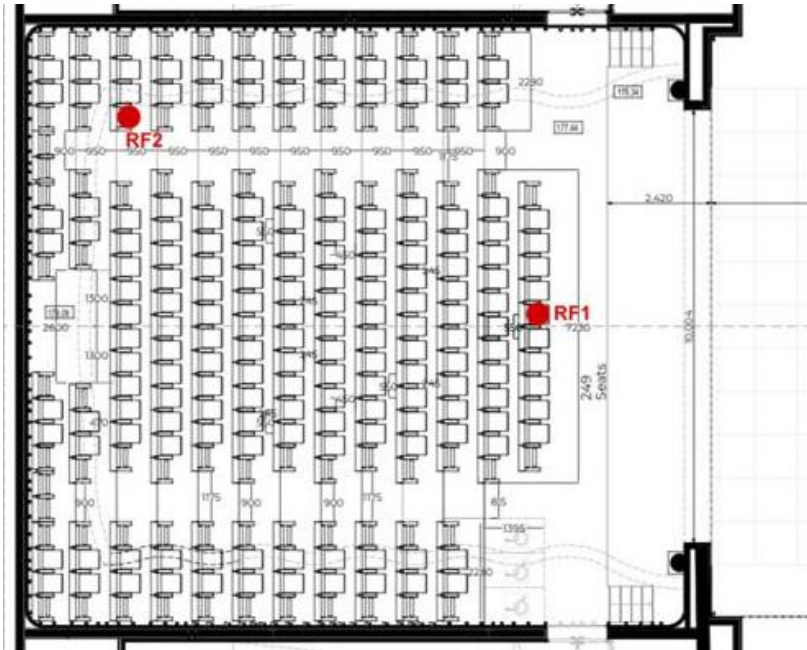


Figura 4.15 – Planta do Teatro Jordão com a representação dos pontos RF1 e RF2 escolhidos para as medições do ruído de fundo na plateia. (adaptado de [36])

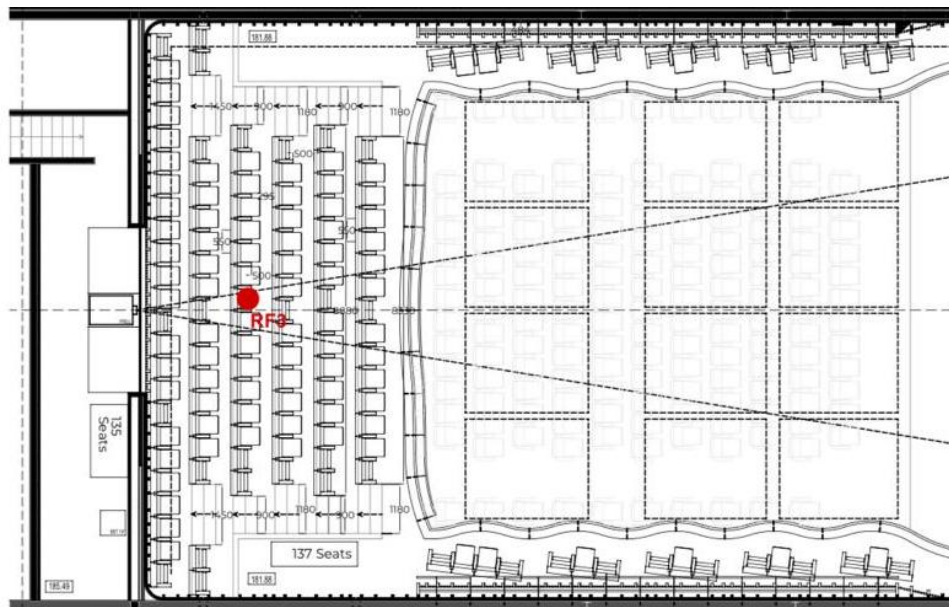


Figura 4.16 – Planta do Teatro Jordão com a representação do ponto RF3 escolhido para a medição do ruído de fundo no balcão. (adaptado de [36]).

4.2.3.2. STI / Tempo de Reverberação / Claridade / Definição / Tempo Central

Neste ensaio, foram medidos os seguintes parâmetros Tempo de Reverberação (TR), Tempo Central (ts), Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}) e *Speech Transmission Index* (STI), com o objetivo de avaliar a resposta acústica da sala tanto na vertente musical como na inteligibilidade da palavra.

Para a realização das medições foi utilizada a fonte sonora posicionada de forma centrada no palco, a uma distância de aproximadamente 1,80 metros da borda frontal. A fonte emitiu ruído branco durante cerca de 10 segundos por medição, com intensidade suficiente para superar os níveis de ruído de fundo previamente registados.

O sonómetro de Brüel & Kjær, modelo 2260, operou como recetor, estando montado sobre o tripé portátil com o microfone colocado à altura de 1,20 metros, simulando a posição da cabeça de um espectador sentado. Foram definidos dez pontos de medição: sete localizados na plateia (Figura 4.17) e três no balcão (Figura 4.18), abrangendo uma área representativa da audiência, sendo que, para o ensaio do TR, foram apenas definidos quatro pontos na plateia e dois no balcão.

Estas medições foram efetuadas com e sem o sistema de AVAC em funcionamento, permitindo comparar os resultados e perceber o impacto que este pode ter sobre os parâmetros avaliados. Em ambas as condições, os dados foram recolhidos e processados automaticamente através do *software* DIRAC que calculou os valores dos parâmetros com base na resposta impulsional obtida (Figura 4.19).

O tempo de reverberação foi determinado a partir do tempo de decaimento do sinal, em intervalos de 20 ou 30 dB, sendo posteriormente extrapolado para um decaimento padrão de 60 dB (T_{20}/T_{30}), conforme previsto nas normas técnicas aplicáveis.

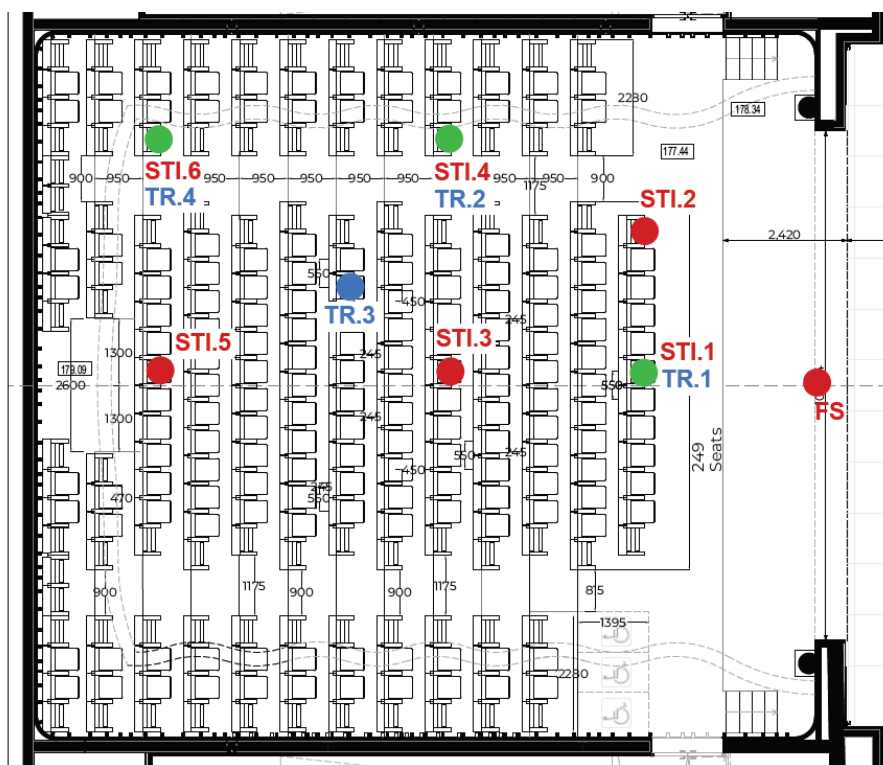


Figura 4.17 – Planta do Teatro Jordão com a representação da fonte sonora (FS) e dos pontos P1, P2 e P3 escolhidos para a medição do TR, ts, C_{80} , D_{50} e STI, localizados na plateia. (adaptado de [36])

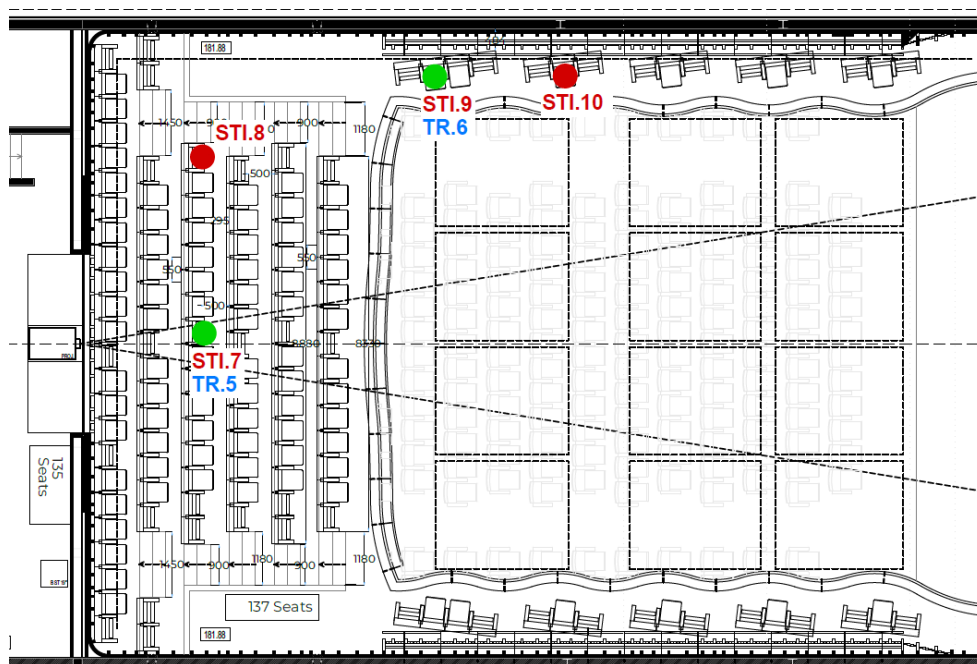


Figura 4.18 - Planta do Teatro Jordão com a representação dos pontos P4 e P5 escolhidos para a medição do TR, ts, C_{80} , D_{50} e STI, localizados no balcão. (adaptado de [36])

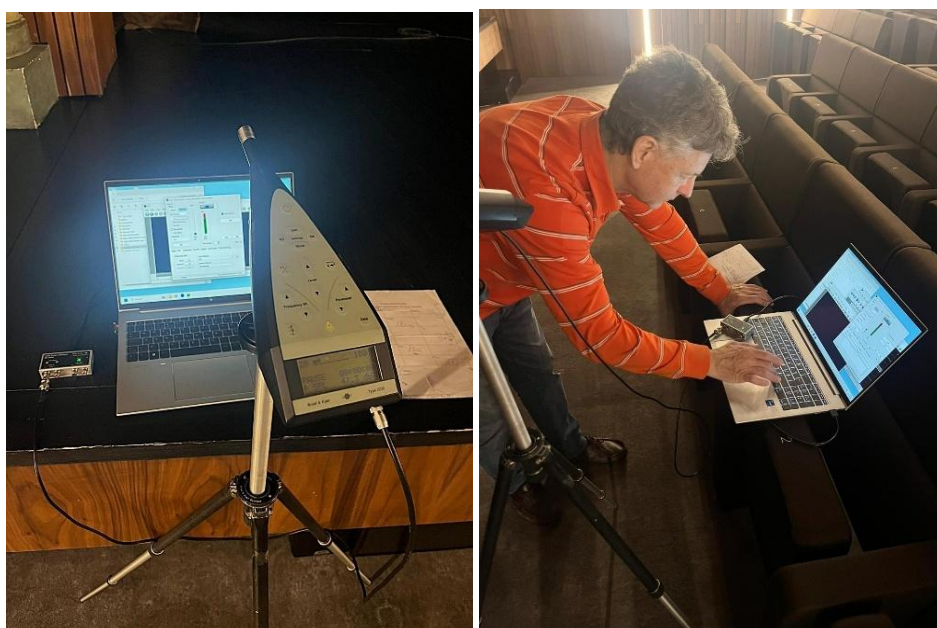


Figura 4.19 – Monitorização das medições acústicas com recurso ao software DIRAC: à esquerda, sonómetro Brüel & Kjær 2260 ligado ao sistema; à direita, registo dos dados durante o ensaio. [fotos da autora]

5

RESULTADOS OBTIDOS

5.1. RUÍDO DE FUNDO

A análise do ruído de fundo no auditório principal do Teatro Jordão teve como finalidade avaliar os níveis de pressão sonora ambiente, em diferentes condições de funcionamento do sistema de ventilação e climatização (AVAC). Foram considerados os parâmetros L_{eq} e L_{Aeq} de forma a compreender a influência do AVAC no desempenho acústico da sala e verificar o cumprimento dos limites definidos no Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE).

As medições foram realizadas em três pontos distintos da plateia (RF1, RF2 e RF3), como já foi referido no Capítulo 4.2.3, com o sistema AVAC desligado e ligado. A recolha de dados foi efetuada por bandas de frequência de 1/3 de oitava, entre os 20 Hz e os 20.000 Hz, durante cerca de 10 minutos por ponto. Com base nos valores obtidos, foram calculadas as médias logarítmicas por frequência, bem como os valores globais de L_{eq} e L_{Aeq} para cada condição.

Os resultados obtidos encontram-se organizados no Quadro 5.1 e Quadro 5.2, respetivamente para os cenários com o AVAC desligado e ligado. Estes quadros incluem os níveis medidos em cada ponto e respetivas médias, com e sem aplicação da ponderação A, permitindo uma análise detalhada do ruído tanto em termos energéticos como percetivos. As figuras 5.1 e 5.2 apresentam estes dados de forma gráfica, facilitando a leitura da evolução espectral do ruído e das diferenças introduzidas pelo AVAC.

Na Figura 5.1 estão representados os níveis de pressão sonora do ruído de fundo com o sistema AVAC desligado, para os pontos RF1, RF2 e RF3. Observa-se um perfil decrescente com o aumento da frequência, embora com valores mais elevados nas bandas médias, sobretudo entre os 160 e os 1.250 Hz, onde os níveis se mantêm acima dos 15 dB. Nas frequências graves, os valores situam-se entre os 50 e os 60 dB, com diferenças ligeiras entre pontos. A partir dos 2.000 Hz, os três perfis tornam-se praticamente coincidentes e estabilizam abaixo dos 10 dB nas frequências mais altas.

Quadro 5.1 - Níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), com o sistema AVAC desligado, 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})

Ruído de Fundo (L e LA) sem AVAC (dB)								
Frequência (Hz)	Posição						Média Logarítmica	
	RF1		RF2		RF3			
	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A
20	52,7	2,2	53,9	3,4	54,8	4,3	53,9	3,4
25	49,1	4,4	50,3	5,6	51,0	6,3	50,2	5,5
31	41,0	1,6	41,7	2,3	42,3	2,9	41,7	2,3
40	34,5	-0,1	33,7	-0,9	33,8	-0,8	34,0	-0,6
50	33,3	3,1	32,1	1,9	32,9	2,7	32,8	2,6
63	25,6	-0,6	25,6	-0,6	25,9	-0,3	25,7	-0,5
80	25,2	2,7	24,9	2,4	24,6	2,1	24,9	2,4
100	20,7	1,6	21,3	2,2	21,4	2,3	21,1	2,0
125	18,1	2,0	18,1	2,0	18,1	2,0	18,1	2,0
160	15,1	1,7	15,2	1,8	15,4	2,0	15,2	1,8
200	14,6	3,7	14,8	3,9	14,6	3,7	14,7	3,8
250	14,9	6,3	14,9	6,3	14,9	6,3	14,9	6,3
315	14,2	7,6	14,1	7,5	14,1	7,5	14,1	7,5
400	17,7	12,9	17,9	13,1	17,5	12,7	17,7	12,9
500	13,9	10,7	13,9	10,7	13,9	10,7	13,9	10,7
630	16,9	15,0	18,1	16,2	17,8	15,9	17,6	15,7
800	16,9	16,1	18,1	17,3	18,1	17,3	17,7	16,9
1.000	15,8	15,8	18,6	18,6	15,9	15,9	17,0	17,0
1.250	13,1	13,7	13,7	14,3	13,1	13,7	13,3	13,9
1.600	11,3	12,3	12,1	13,1	12,0	13,0	11,8	12,8
2.000	10,7	11,9	11,5	12,7	11,7	12,9	11,3	12,5
2.500	10,4	11,7	11,4	12,7	11,4	12,7	11,1	12,4
3.150	9,5	10,7	10,1	11,3	10,2	11,4	9,9	11,1
4.000	10,7	11,7	10,7	11,7	11,0	12,0	10,8	11,8
5.000	9,5	10,0	9,9	10,4	10,0	10,5	9,8	10,3
6.300	8,9	8,8	9,2	9,1	9,0	8,9	9,0	8,9
8.000	9,0	7,9	9,1	8,0	8,7	7,6	8,9	7,8
10.000	9,2	6,7	9,2	6,7	9,0	6,5	9,1	6,6
12.500	8,9	4,6	8,3	4,0	8,0	3,7	8,4	4,1
16.000	9,2	2,6	9,0	2,4	8,9	2,3	9,0	2,4
20.000	9,6	0,3	9,6	0,3	9,2	-0,1	9,5	0,2
L_{eq}	54,6	-	55,7	-	56,5	-	55,7	-
L_{Aeq}	-	24,8	-	25,8	-	25,3	-	25,3

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}).

Ruído de Fundo (L e LA) com AVAC (dB)									
Frequência (Hz)	Posição						Média Logarítmica		ΔL (= com – sem AVAC)
	RF1		RF2		RF3				
	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A	
20	51,7	1,2	56,8	6,3	55,4	4,9	55,1	4,6	1,2
25	51,7	7,0	54,4	9,7	53,2	8,5	53,2	8,5	3,0
31	50,6	11,2	51,2	11,8	50,1	10,7	50,7	11,3	9,0
40	46,9	12,3	45,3	10,7	44,3	9,7	45,6	11,0	11,6
50	45,5	15,3	42,8	12,6	42,4	12,2	43,8	13,6	11,0
63	42,0	15,8	42,0	15,8	41,0	14,8	41,7	15,5	16,0
80	40,2	17,7	41,5	19,0	40,4	17,9	40,7	18,2	15,8
100	37,8	18,7	38,2	19,1	37,7	18,6	37,9	18,8	16,8
125	36,4	20,3	36,3	20,2	36,3	20,2	36,3	20,2	18,2
160	34,5	21,1	33,7	20,3	33,2	19,8	33,8	20,4	18,6
200	30,4	19,5	30,8	19,9	30,4	19,5	30,5	19,6	15,9
250	27,2	18,6	28,0	19,4	27,8	19,2	27,7	19,1	12,8
315	26,8	20,2	26,6	20,0	26,3	19,7	26,6	20,0	12,4
400	25,0	20,2	25,0	20,2	25,1	20,3	25,0	20,2	7,3
500	24,9	21,7	25,0	21,8	25,2	22,0	25,0	21,8	11,1
630	22,9	21,0	23,4	21,5	23,7	21,8	23,3	21,4	5,7
800	19,3	18,5	18,6	17,8	19,0	18,2	19,0	18,2	1,2
1.000	18,5	18,5	17,5	17,5	18,5	18,5	18,2	18,2	1,2
1.250	19,1	19,7	17,9	18,5	18,9	19,5	18,7	19,3	5,4
1.600	16,4	17,4	15,3	16,3	16,7	17,7	16,2	17,2	4,4
2.000	15,0	16,2	13,9	15,1	15,0	16,2	14,7	15,9	3,3
2.500	12,2	13,5	11,3	12,6	12,9	14,2	12,2	13,5	1,1
3.150	10,6	11,8	9,7	10,9	11,1	12,3	10,5	11,7	0,6
4.000	12,2	13,2	10,8	11,8	11,3	12,3	11,5	12,5	0,7
5.000	8,5	9,0	8,5	9,0	9,2	9,7	8,7	9,2	0,0
6.300	7,6	7,5	7,7	7,6	8,1	8,0	7,8	7,7	0,0
8.000	8,0	6,9	7,8	6,7	7,9	6,8	7,9	6,8	0,0
10.000	8,3	5,8	8,0	5,5	8,0	5,5	8,1	5,6	0,0
12.500	7,9	3,6	7,8	3,5	7,8	3,5	7,8	3,5	0,0
16.000	9,1	2,5	8,8	2,2	8,8	2,2	8,9	2,3	0,0
20.000	9,6	0,3	9,9	0,6	9,6	0,3	9,7	0,4	0,2
L_{eq}	57,3	-	59,9	-	58,7	-	66,7	-	6,0
L_{Aeq}	-	31,9	-	31,7	-	31,8	-	31,8	6,5

Na Figura 5.2 apresentam-se os níveis de pressão sonora do ruído de fundo com o sistema AVAC ligado, para os pontos RF1, RF2 e RF3. Tal como no cenário anterior, verifica-se um comportamento decrescente ao longo do espectro de frequências, com valores mais elevados nas bandas graves (entre 20 e 80 Hz), onde se atingem níveis superiores a 55 dB. A partir dos 100 Hz, os níveis vão diminuindo gradualmente, estabilizando abaixo dos 20 dB nas frequências mais altas. As curvas dos três pontos apresentam um perfil semelhante, com pequenas variações entre elas, o que evidencia uma distribuição uniforme do ruído ambiente no espaço.

Assim, é possível concluir que, para ambos os cenários, o nível de ruído de fundo apresenta um comportamento semelhante entre os três pontos de medição, sem variações significativas conforme a posição na plateia. As diferenças entre os perfis são pontuais e pouco expressivas ao longo da maioria do espectro. Contudo, com o sistema AVAC em funcionamento, verifica-se um aumento mais acentuado nas frequências graves e médias, onde o efeito do sistema se faz sentir com maior intensidade, ainda que de forma relativamente uniforme entre os pontos analisados.

Na Figura 5.3 são representados os valores médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo (sem filtro A) para os dois cenários analisados, com e sem o sistema AVAC em funcionamento, assim como a diferença entre ambos (ΔL). Observa-se uma disparidade significativa entre os valores nas frequências baixas e médias, sobretudo entre os 63 e os 250 Hz, onde o funcionamento do AVAC contribui para aumentos que ultrapassam os 15 dB. Esta diferença tende a reduzir-se progressivamente a partir dos 800 Hz, estabilizando em valores muito próximos nas frequências superiores a 2.500 Hz.

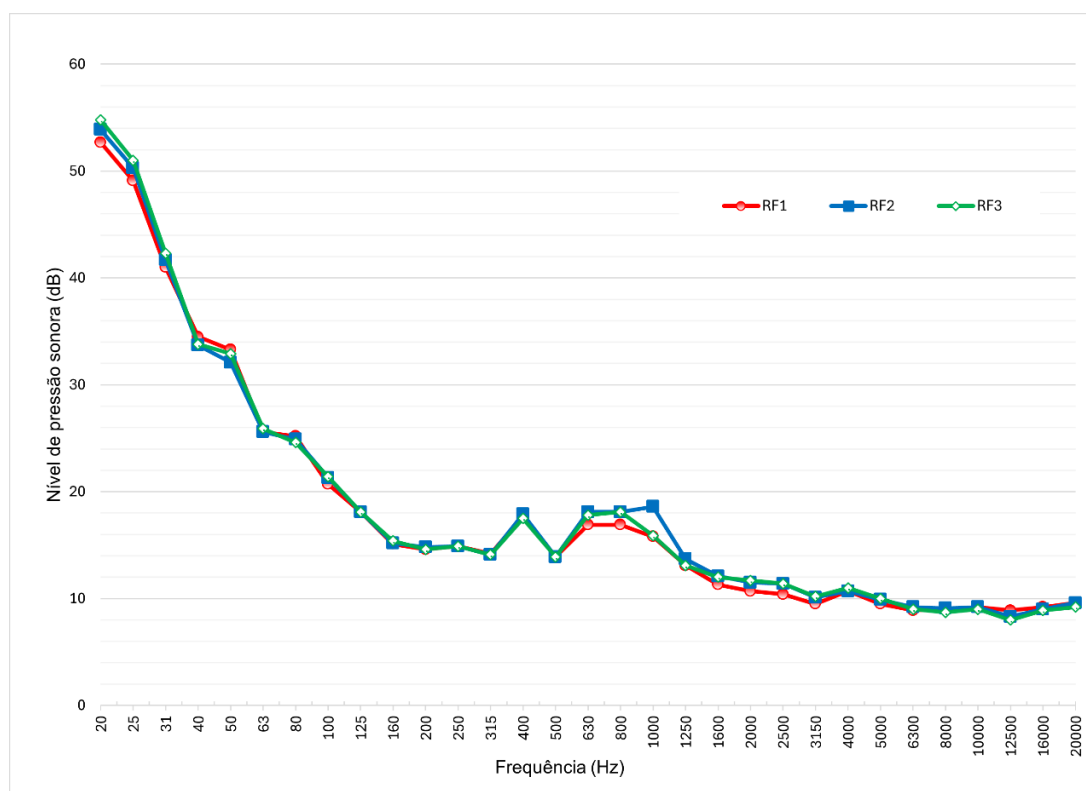


Figura 5.1 – Níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), com sistema AVAC desligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/3 de oitava.

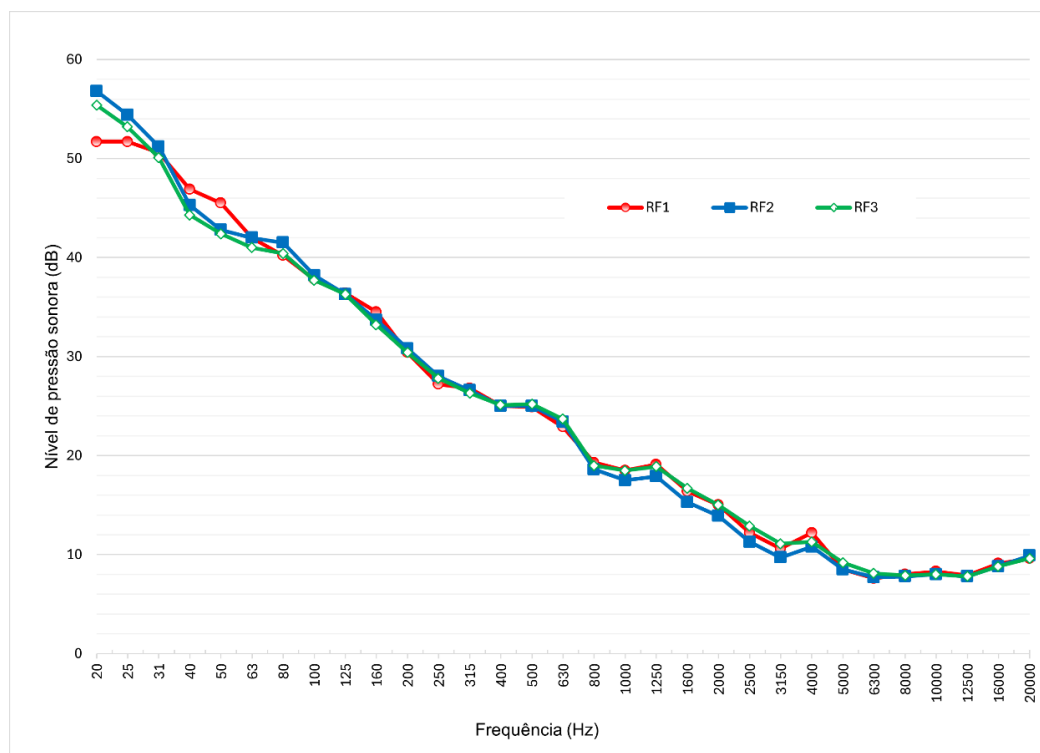


Figura 5.2 – Níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), com sistema AVAC ligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/3 de oitava.

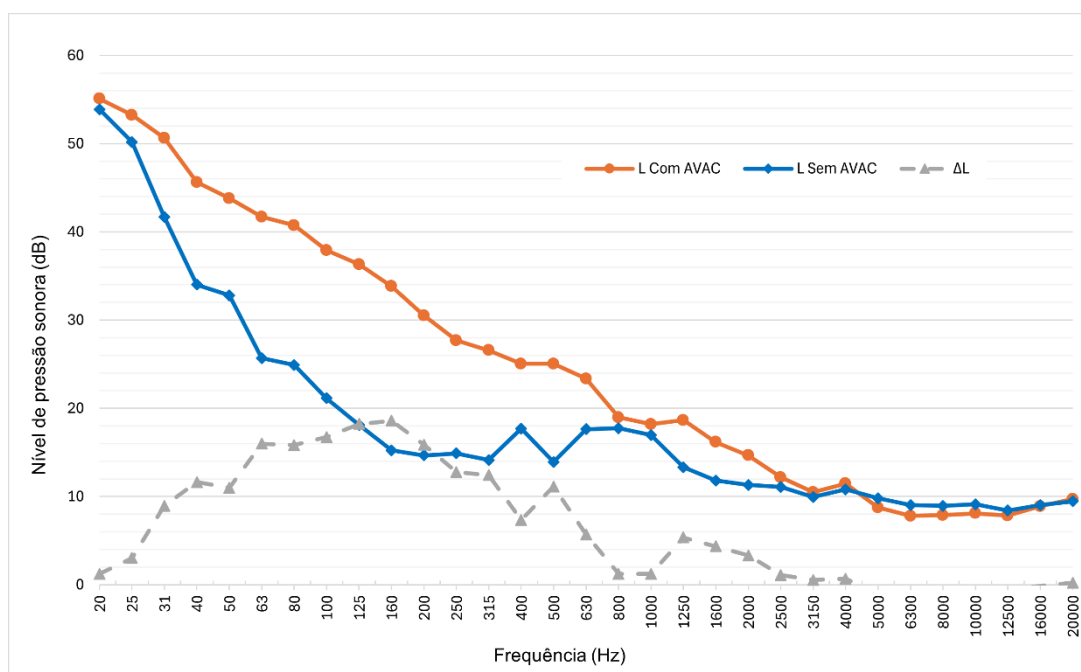


Figura 5.3– Valores médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) com e sem o sistema de AVAC em funcionamento e a diferença entre ambos para bandas de frequência de 1/3 de oitava.

Em ambas as situações, o ruído de fundo apresenta um comportamento decrescente ao longo do espectro audível, com valores mais elevados nas frequências graves e uma estabilização abaixo dos 10 dB nas mais agudas. No entanto, a curva com AVAC ligado revela uma potência acústica mais elevada de forma consistente, com o valor global médio de L_{eq} a atingir 66,7 dB, comparativamente aos 55,7 dB registados no cenário sem AVAC (Quadros 5.1 e 5.2). Esta diferença de 9 dB traduz-se num aumento significativo da potência sonora ambiente, perceptível na experiência auditiva no interior da sala.

Na Figura 5.4 encontram-se representados os valores médios do parâmetro L_{Aeq} , com e sem o sistema AVAC em funcionamento, bem como a diferença entre ambas as situações (ΔL_A). A análise do gráfico permite identificar uma diferença acentuada nas frequências mais baixas, com valores de ΔL_A que atingem os 15 dB(A) nas bandas entre os 63 e os 200 Hz, consideradas críticas do ponto de vista do conforto acústico.

A partir dos 800 Hz as curvas tornam-se mais próximas e desde os 2.000 Hz a diferença estabiliza, sendo inferior a 2 dB(A) nas frequências mais elevadas. Esta aproximação entre os dois cenários nas altas frequências reflete-se também nos valores globais: com o AVAC desligado, o valor médio de L_{Aeq} foi de 25,3 dB(A), enquanto com o sistema em funcionamento subiu para 31,8 dB(A), conforme apresentado nos Quadros 5.1 e 5.2. Esta diferença de 6,5 dB(A) representa um aumento energético significativo, sendo particularmente relevante em contextos de silêncio absoluto ou música de baixa intensidade.

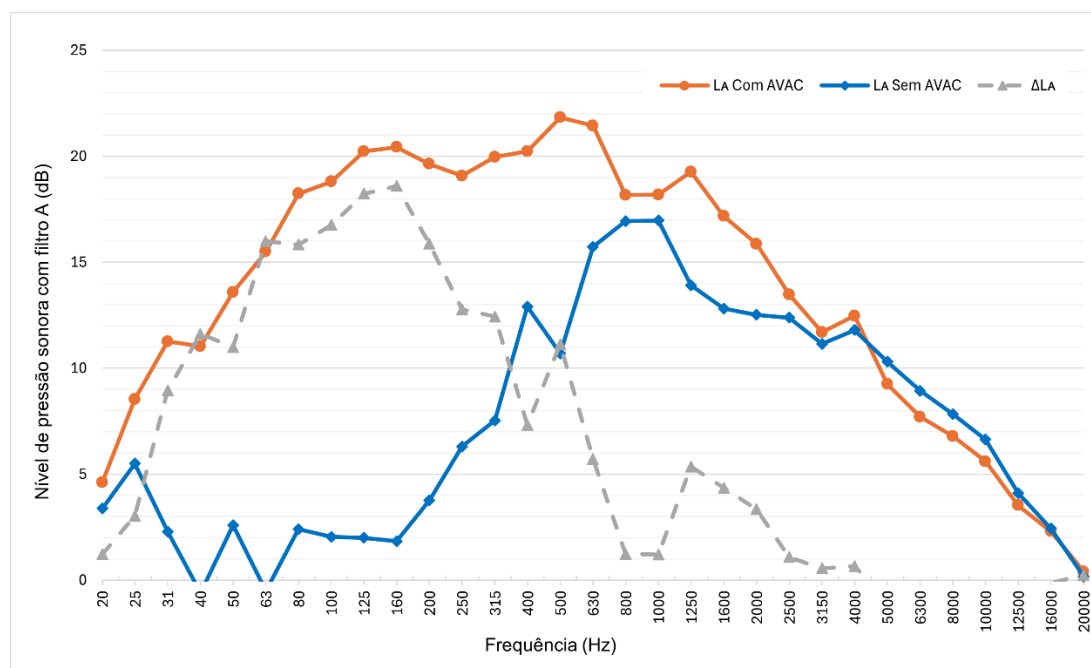


Figura 5.4 – Valores médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) com a ponderação do filtro A com e sem o sistema de AVAC em funcionamento e a diferença entre ambos para bandas de frequência de 1/3 de oitava.

De acordo com o estipulado no Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), o nível sonoro contínuo equivalente ponderado L_{Aeq} , associado ao funcionamento de equipamentos técnicos, como sistemas de ventilação e climatização, não deve ultrapassar os 30 dB(A) no interior de recintos destinados a espetáculos, com exceção das salas de cinema. Para efeitos de verificação, o valor medido deve ser corrigido pela subtração de um fator de incerteza (I) de 3 dB(A), conforme já foi referido no Subcapítulo 3.4. O Quadro 5.3 resume os resultados obtidos e o respetivo cumprimento face ao exigido pela legislação.

Quadro 5.3 – Avaliação regulamentar (RRAE) do nível sonoro contínuo equivalente no interior do Teatro Jordão. [30]

Situação Avaliada	Limite RRAE	Valor Medido	Valor Corrigido	Cumprimento
Ruído ambiente interior sem AVAC	≤ 30 dB(A)	25,3 dB(A)	22,3 dB(A)	Sim
Ruído particular com AVAC	≤ 30 dB(A)	31,8 dB(A)	28,8 dB(A)	Sim

5.2. CURVAS DE INCOMODIDADE (NC/NR)

As curvas de incomodidade NC (*Noise Criterion*) e NR (*Noise Rating*), tal como introduzido no subcapítulo 2.6.2, são critérios utilizados na avaliação do ruído de fundo gerado por equipamentos técnicos em espaços interiores, nomeadamente em espaços de espetáculo, salas de conferência e auditórios. Estes critérios fornecem um valor numérico que caracteriza o nível de incomodidade sonora percebida, permitindo verificar se o espaço se encontra dentro dos limites aceitáveis para o tipo de utilização previsto.

As curvas NC são definidas para bandas de frequência entre os 63 e os 8.000 Hz, enquanto as curvas NR abrangem também a banda dos 31,5 Hz, sendo especialmente sensíveis nas frequências baixas, onde normalmente se encontra o ruído gerado por sistemas AVAC. Neste estudo, foram sobrepostos os valores médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo com o sistema AVAC em funcionamento às curvas de referência NC e NR, de forma a determinar o nível máximo de incomodidade e verificar a conformidade com os valores recomendados.

Na Figura 5.5 encontra-se representada a comparação entre os níveis de pressão sonora média do ruído de fundo no Teatro Jordão, com AVAC ligado, e as curvas NC. A curva correspondente aos valores medidos permanece abaixo da curva NC-20 ao longo de todas as bandas, posicionando-se mais próxima da curva NC-25, o que permite classificar o ruído de fundo na categoria NC-18. Este valor é considerado adequado para pequenos auditórios e salas de conferência, e ainda mais exigente do que o valor de referência recomendado para este tipo de espaço ($NC \leq 25$) (Quadro 5.4).

Na Figura 5.6 apresenta-se a sobreposição entre os mesmos dados medidos e as curvas NR. Neste caso, a curva do Teatro Jordão permanece abaixo da NR-25 em todo o espetro de frequências analisado (31,5 a 8.000 Hz), permitindo atribuir ao espaço uma classificação de NR-21, valor também enquadrado nas recomendações internacionais para auditórios com uso regular. A curva medida pouco ultrapassa a tendência da NR-20, com maior proximidade nas frequências médias, mantendo uma margem de segurança face aos limites superiores (Quadro 5.5).

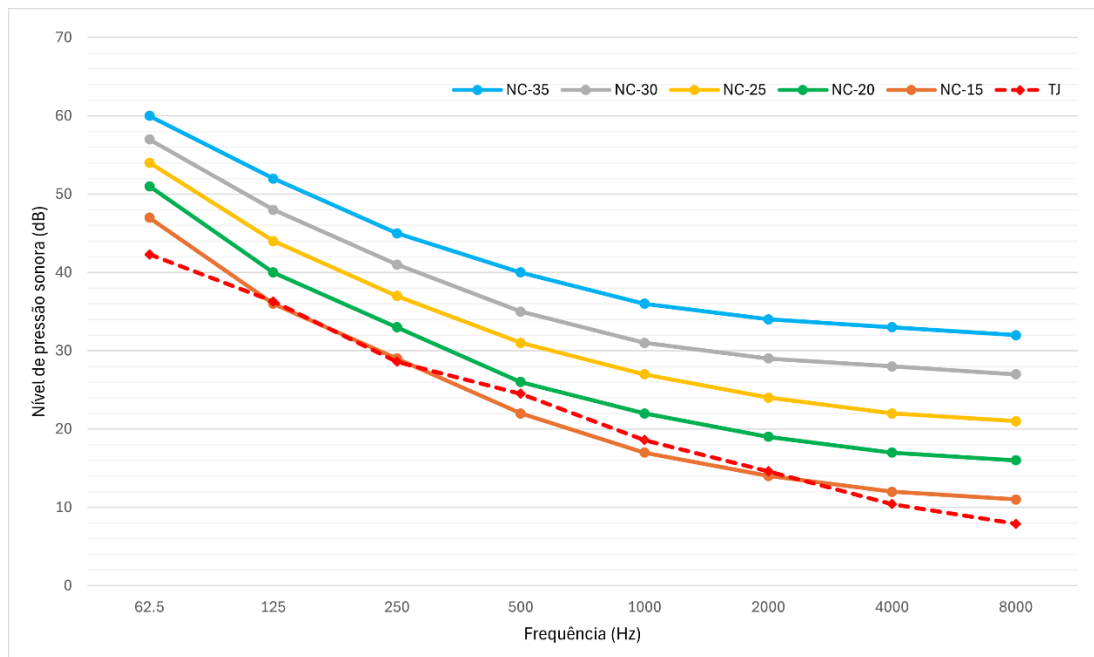


Figura 5.5— Comparação dos níveis médios de pressão sonora de ruído de fundo no Teatro Jordão, com o sistema AVAC em funcionamento, com as curvas de incomodidade NC.

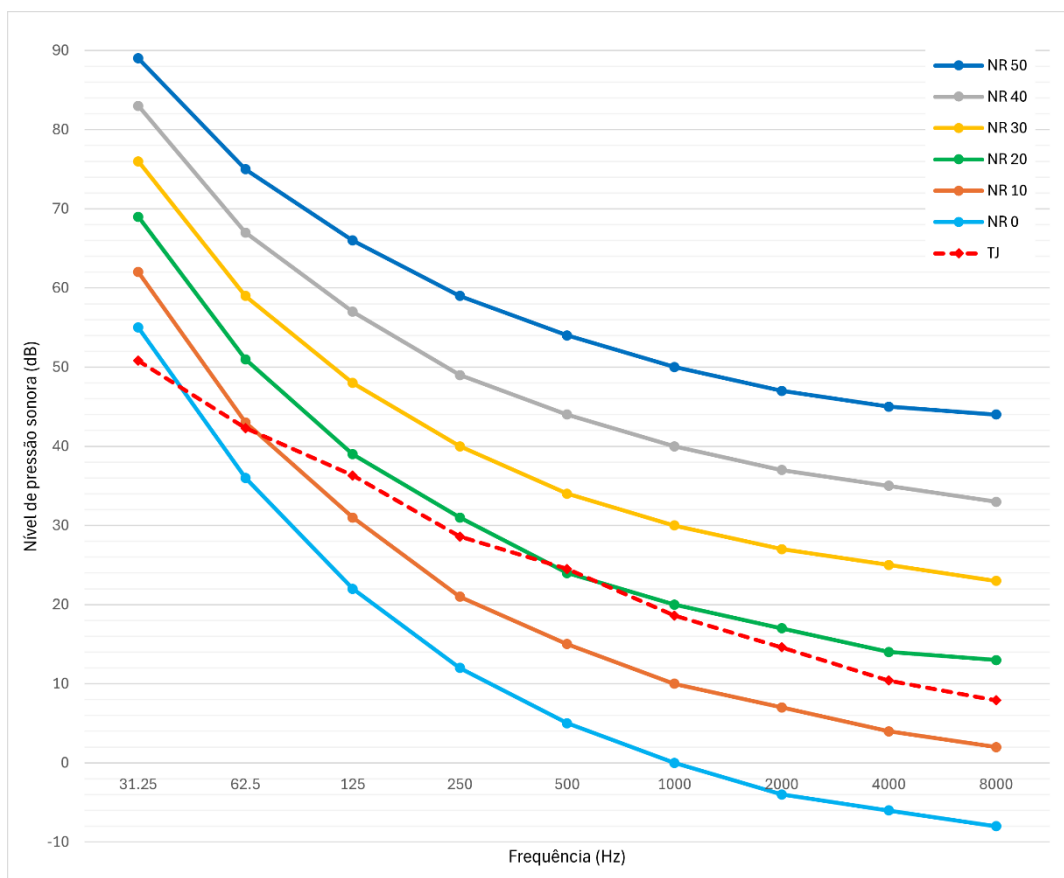


Figura 5.6 – Comparação dos níveis médios de pressão sonora de ruído de fundo no Teatro Jordão, com o sistema AVAC em funcionamento, com as curvas de incomodidade NR.

Quadro 5.4 – Verificação do cumprimento dos limites recomendados para curvas NC no Teatro Jordão.
[41]

Utilização Recomendada	Limite NC	NC Teatro Jordão	Cumprimento
Pequenas salas de espetáculo	≤ 25	18	Sim
Salas de conferência	≤ 30	18	Sim

Quadro 5.5 – Verificação do cumprimento dos limites recomendados para curvas NR no Teatro Jordão.
[41]

Utilização Recomendada	Limite NR	NR Teatro Jordão	Cumprimento
Pequenos auditórios	≤ 25	21	Sim
Salas de conferência	≤ 30	21	Sim

5.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

5.3.1. SALA VAZIA

As medições *in situ* do tempo de reverberação (T_{30}) foram realizadas no auditório do Teatro Jordão com a sala vazia, conforme exigido para a verificação regulamentar. Utilizou-se o software DIRAC, com base na resposta impulsional obtida através da emissão de ruído branco, para o cálculo dos parâmetros. A fonte sonora foi colocada ao centro do palco, e os microfones distribuídos por seis pontos distintos, quatro na plateia e dois no balcão, cobrindo uma área representativa da sala. O tempo de reverberação foi determinado com base no decaimento do sinal em 30 dB (T_{30}), em conformidade com as normas técnicas aplicáveis.

No Quadro 5.6 apresentam-se os valores de T_{30} por bandas de frequência de 1/3 de oitava, no intervalo de 100 a 5.000 Hz, para as seis posições de medição (P1 a P6), juntamente com a média e desvio padrão por frequência. A análise gráfica destes resultados encontram-se na Figura 5.7, onde é possível observar a consistência das curvas de TR entre os diferentes pontos a partir dos 250 Hz. As variações são mais evidentes nas frequências graves, especialmente nos 100 e 125 Hz.

Para facilitar a leitura e permitir a comparação com recomendações de uso, os valores foram também agrupados por bandas de 1/1 de oitava, no intervalo de 125 a 4.000 Hz, conforme apresentado no Quadro 5.7. A Figura 5.8 mostra a distribuição das curvas nessa escala, onde se verifica o valor mais elevado nas frequências graves, em especial na banda dos 125 Hz. A partir dos 250 até aos 5.000 Hz, os valores tornam-se mais uniformes entre os diferentes pontos de medição. Este comportamento confirma a consistência da resposta acústica da sala nas frequências médias e altas, relevantes para a palavra e a maior parte da música.

O valor médio de T_{30} no intervalo entre 500 e 1.000 Hz é de 0,69 s, situando-se dentro dos limites recomendados para pequenos auditórios para a palavra e próximo dos valores ideais para salas com uso polivalente, como o Teatro Jordão, mas longe dos valores ideais para a música sinfônica.

De acordo com o subcapítulo 3.4, o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) estabelece limites máximos para o tempo de reverberação médio (T) em função do volume interior da sala, quando esta é destinada a atividades cuja função principal é a oratória. Para volumes compreendidos entre 250 m³ e 9.000 m³, aplica-se a expressão (3.2), que relaciona o limite com o logaritmo do volume. No caso do Teatro Jordão, o volume da zona de audiência é de 2.230 m³, o que corresponde a um tempo de reverberação máximo permitido de 0,89 s.

De acordo com o regulamento, os valores medidos devem ainda ser corrigidos através da aplicação de um fator de incerteza de 35%, previsto para esta gama de volumes. O valor médio de T_{30} obtido para o intervalo de 500 a 2.000 Hz foi de 0,69 s, resultando num valor corrigido de 0,45 s, claramente abaixo do limite regulamentar. A verificação do cumprimento é apresentada de forma resumida no Quadro 5.8.

Quadro 5.6 – Resultados do Tempo de Reverberação (T_{30}), em cada ponto de medição do Teatro Jordão, por bandas de frequência de 1/3 de oitava compreendidas num intervalo de 100 a 5.000 Hz; Média e Desvio Padrão.

Tempo de Reverberação (T_{30}) (s)								
Frequência (Hz)	Posição						Média	Desvio Padrão
	P1	P2	P3	P4	P5	P6		
100	1,24	1,94	1,04	1,10	1,37	1,00	1,28	0,32
125	1,08	-	1,14	0,91	1,05	1,09	1,05	0,08
160	0,79	0,83	0,90	1,14	1,19	0,81	0,95	0,16
200	0,85	0,67	0,80	0,88	0,85	0,91	0,83	0,08
250	0,72	0,73	0,85	0,61	0,76	0,69	0,73	0,07
315	0,79	0,84	0,67	0,71	0,81	0,66	0,75	0,07
400	0,73	0,58	0,67	0,62	0,74	0,67	0,67	0,05
500	0,68	0,66	0,64	0,64	0,68	0,62	0,66	0,02
630	0,77	0,81	0,70	0,65	0,73	0,68	0,72	0,05
800	0,72	0,88	0,73	0,74	0,66	0,70	0,74	0,07
1.000	0,72	0,73	0,83	0,70	0,64	0,66	0,72	0,06
1.250	0,66	0,71	0,79	0,69	0,68	0,68	0,70	0,04
1.600	0,72	0,76	0,73	0,75	0,68	0,62	0,71	0,05
2.000	0,67	0,70	0,77	0,69	0,67	0,67	0,69	0,04
2.500	0,62	0,65	0,69	0,66	0,62	0,61	0,64	0,03
3.150	0,57	0,55	0,57	0,56	0,51	0,55	0,55	0,02
4.000	0,54	0,51	0,56	0,56	0,50	0,59	0,54	0,03
5.000	0,58	0,58	0,55	0,60	0,56	0,54	0,57	0,02
TR [500, 1.000 Hz] (s)	0,70	0,70	0,74	0,67	0,66	0,64	0,69	-

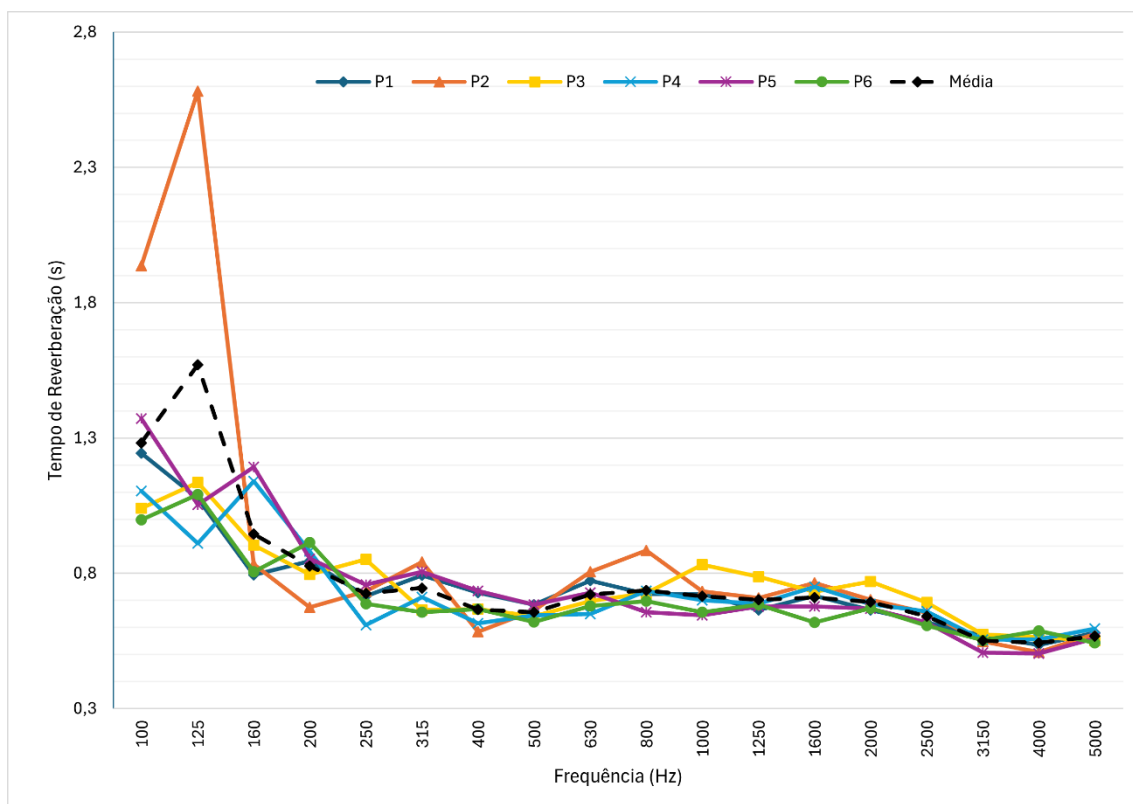


Figura 5.7 – Resultados do Tempo de Reverberação (TR) por bandas de frequência de 1/3 de oitava, em cada ponto de medição e respetiva média.

Quadro 5.7 - Resultados do Tempo de Reverberação (T_{30}), em cada ponto de medição do Teatro Jordão, por bandas de frequência 1/1 de oitava compreendidas num intervalo de 125 a 4.000 Hz; Média e Desvio Padrão.

Tempo de Reverberação (T_{30}) (s)								
Frequência (Hz)	Posição						Média	Desvio Padrão
	P1	P2	P3	P4	P5	P6		
125	1,04	0,92	1,03	1,05	1,21	0,97	1,04	0,09
250	0,78	0,75	0,77	0,73	0,81	0,75	0,77	0,02
500	0,73	0,68	0,67	0,64	0,72	0,66	0,68	0,03
1.000	0,70	0,78	0,78	0,71	0,66	0,68	0,72	0,05
2.000	0,67	0,71	0,73	0,70	0,66	0,63	0,68	0,03
4.000	0,56	0,54	0,56	0,57	0,52	0,56	0,55	0,02
TR [500, 1 kHz] (s)	0,72	0,73	0,73	0,67	0,69	0,67	0,70	-
TR [500, 1kHz, 2 kHz] (s)	0,70	0,72	0,73	0,68	0,68	0,66	0,69	-

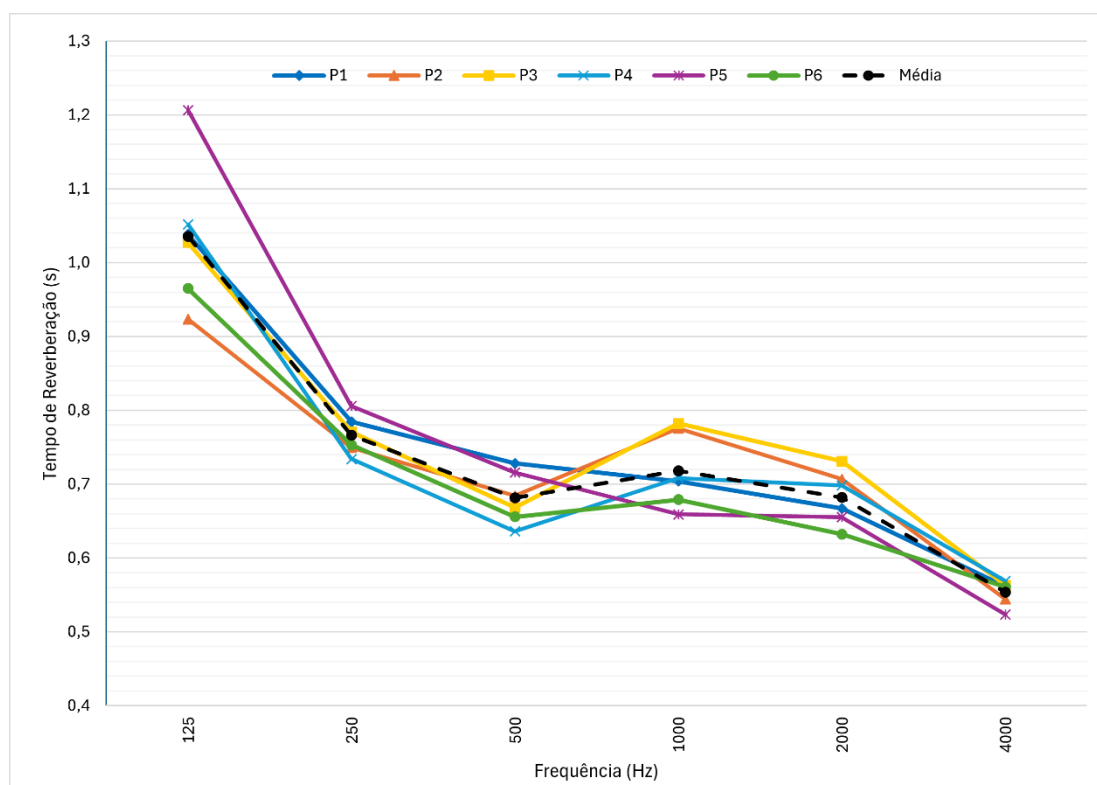


Figura 5.8- Resultados do Tempo de Reverberação (TR) por bandas de frequência de 1/1 de oitava, em cada ponto de medição e respetiva média.

Quadro 5.8- Avaliação regulamentar (RRAE) do tempo de reverberação médio do Teatro Jordão para a função oratória.

Frequência em bandas de 1/1 oitavas (Hz)	TR medido (s)	TR médio (s)	Fator de incerteza (%)	TR médio com fator incerteza (s)	TR máximo do RRAE (s)	Verificação para a "oratória"
500	0,68	0,69	35	0,45	0,89	Cumpre
1000	0,72					
2000	0,68					

Apesar de o Teatro Jordão não ter como uso exclusivo a oratória, e tratar-se de uma sala com caráter polivalente (concertos, teatro, conferências), a conformidade com este critério reforça a adequação do espaço para eventos com exigência de inteligibilidade da palavra. Nos restantes casos, em que o uso principal se relacione com música, o regulamento exige apenas um estudo de condicionamento acústico, sem impor limites numéricos obrigatórios.

5.3.2. SALA OCUPADA

De acordo com o regulamento nacional (RRAE), a verificação do tempo de reverberação é realizada com a sala desocupada. Contudo, torna-se relevante compreender o impacto que a presença de público pode ter na absorção sonora e, consequentemente, no comportamento acústico do espaço. A ocupação do auditório resulta num aumento da absorção sonora, o que

conduz a uma redução do tempo de reverberação efetivo. Em contexto real de utilização, é improvável que a sala esteja vazia, pelo que se justifica a realização de uma previsão do TR considerando a sala totalmente ocupada, para uma análise mais fiel às condições de funcionamento do espaço.

Neste sentido, foi efetuada a previsão do tempo de reverberação com a sala ocupada, utilizando os valores medidos para as bandas de 1/1 de oitava, no intervalo entre 125 e 4000 Hz, e recorrendo à aplicação da fórmula de Sabine (equação 2.12). Para o cálculo da área de absorção (S), considerou-se especificamente a área ocupada pelas cadeiras (com base no número total de 386 assentos), à qual foi adicionada uma faixa absorvente de 0,5 metros em todo o perímetro. Esta abordagem permitiu obter o valor final da área equivalente de 150 m², utilizado nos cálculos. Os coeficientes de absorção sonora (α), aplicáveis às condições de cadeiras vazias e ocupadas, foram selecionados com base em valores de referência para materiais estofados espessos, tal como recomendado por diferentes autores para bandas entre 125 e 4000 Hz. Estes parâmetros encontram-se organizados no Quadro 5.9. [1]

No Quadro 5.10 são comparados os valores do tempo de reverberação medido com a sala desocupada e os tempos previstos para a sala totalmente ocupada, para cada banda de frequência de 1/1 de oitava. Observa-se que a presença de público provoca uma redução no TR, especialmente nas frequências mais baixas, embora esta diferença seja globalmente modesta, com uma variação de cerca de 0,01-0,02 s. A representação gráfica desta tendência encontra-se na Figura 5.9, que ilustra claramente que o efeito da ocupação é mais expressivo nas bandas graves, mantendo-se praticamente nas médias e altas frequências.

Quadro 5.9 - Parâmetros utilizados para a previsão do Tempo de Reverberação (TR) com a sala totalmente ocupada do Teatro Jordão.

Parâmetros						
Área da plateia (S; m ²)	150					
Volume da sala (V; m ³)	2.230					
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)	6	6	8	11	12	15

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)	Sala Vazia			Sala Ocupada			Δ TR (s)
	TR (s)	A sala (m ²)	TR [500, 1.000 Hz] (s)	TR (s)	A sala (m ²)	TR [500, 1.000 Hz] (s)	
125	1,04	347	0,70	1,02	353	0,69	0,02
250	0,77	469		0,76	475		0,01
500	0,68	527		0,67	534		0,01
1000	0,72	500		0,70	511		0,01
2000	0,68	527		0,67	539		0,02
4000	0,55	649		0,54	664		0,01

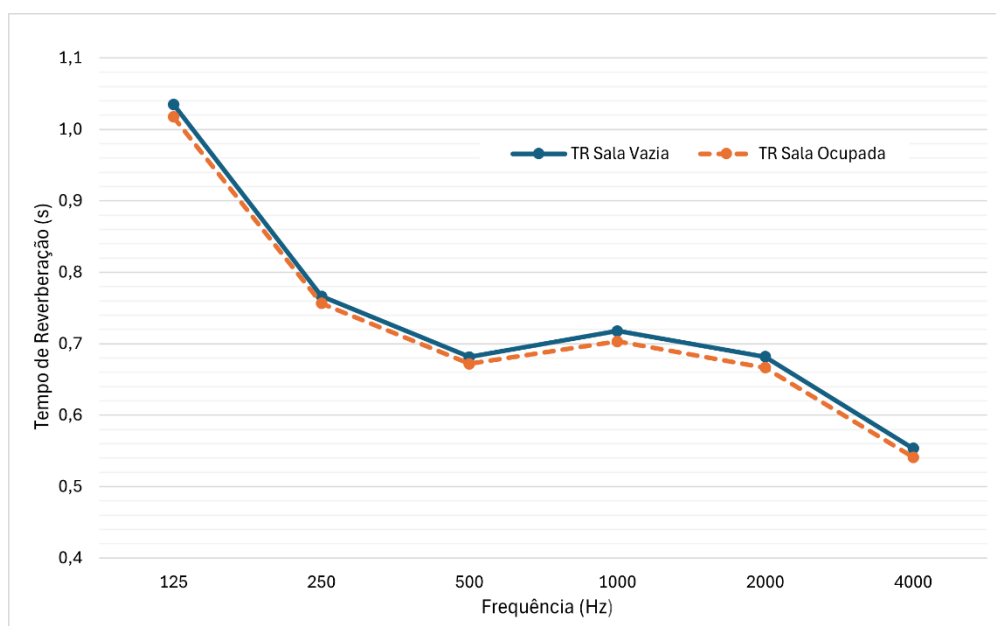


Figura 5.9 - Valores do tempo de reverberação com a sala desocupada (0%) e totalmente ocupada previsto (100%) em bandas de 1/1 oitava.

Por fim, procedeu-se à análise comparativa dos valores médios de TR obtidos com os intervalos recomendados para diferentes tipos de utilização, conforme apresentado no Quadro 5.11. Para este efeito, foi utilizado o tempo de reverberação médio entre 500 e 1000 Hz, tal como é habitual nas metodologias de referência.

Observa-se que, tanto em condições de sala vazia como ocupada, o tempo de reverberação médio situa-se em 0,7 s, classificando-se como adequado para funções de auditório e teatro, e apenas tolerável para música popular. Para usos mais exigentes em termos de sustentação sonora, como música de câmara, música sinfónica ou órgão, o espaço apresenta-se como desadequado devido à sua resposta curta e pouco reverberante.

Quadro 5.11 – Verificação dos 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. [1]

Função		TR [500, 1.000 Hz] ideal (s)	Sala Vazia / Ocupada	
			TR [500, 1.000 Hz] (s)	Avaliação
Auditório (palavra)		0,7 – 0,8	0,7	Adequado
Teatro		0,7 – 1,0		Adequado
Ópera	Não wagneriana	1,3 – 1,7		Desadequado
	Wagner	1,8 – 1,9		Desadequado
Música sinfónica	Barroca	1,4 – 1,6		Desadequado
	Clássica	1,6 – 1,8		Desadequado
	Romântica	1,9 – 2,2		Desadequado
	Moderna	1,4 – 1,9		Desadequado
Música popular		0,8 – 1,0		Tolerável
Música de câmara		1,4 – 1,7		Desadequado
Música de órgão		2,5 – 3,5		Desadequado

De forma geral, os resultados obtidos indicam que o auditório do Teatro Jordão está bem preparado para acolher funções principais como oratória, teatro e eventos musicais ligeiros, cumprindo adequadamente as necessidades acústicas essenciais para essas utilizações.

5.3.3. RÁCIO DE BAIXOS (BR)

O rácio de baixos (BR), calculado com base nos valores de T_{30} obtidos para as bandas de 1/1 de oitava entre 125 e 1000 Hz, permite avaliar o equilíbrio tonal da resposta acústica do Teatro Jordão. Conforme apresentado no Quadro 5.12, todos os pontos de medição registaram valores de BR superiores a 1, variando entre 1,14 e 1,46, com uma média global de 1,29.

De acordo com a literatura, para salas com um tempo de médio de reverberação inferior a 1,8 segundos, recomenda-se que o BR esteja entre 1,1 e 1,5, sendo valores inferiores a 1,0 não aconselháveis. Assim, os resultados obtidos para o Teatro Jordão encontram-se alinhados com os requisitos apontados para funções musicais e de palavra, garantindo um equilíbrio tonal adequado entre baixas e médias frequências. [26]

Quadro 5.12 – Valores do rácio de baixos (BR_TR) em bandas de 1/1 oitava nos nove pontos ensaiados do Teatro Jordão.

Tempo de Reverberação (T_{30}) (s)							
Frequência (Hz)	Posição						Média
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	
125	1,04	0,92	1,03	1,05	1,21	0,97	1,04
250	0,78	0,75	0,77	0,73	0,81	0,75	0,77
500	0,73	0,68	0,67	0,64	0,72	0,66	0,68
1.000	0,70	0,78	0,78	0,71	0,66	0,68	0,72
BR_TR	1,27	1,14	1,24	1,33	1,46	1,29	1,29

5.4. STI

Conforme abordado no capítulo 2.7, o parâmetro *STI* (*Speech Transmission Index*) avalia a inteligibilidade da palavra, medindo a qualidade da transmissão do sinal de voz entre a fonte sonora e o recetor. Os valores de *STI* variam entre 0 (má inteligibilidade) e 1 (excelente inteligibilidade), sendo classificados de acordo com as faixas de qualidade indicadas no Quadro 2.5.

No âmbito do presente estudo, as medições do STI foram realizadas nos dez pontos de medição previamente definidos no capítulo 4.2.3.2, abrangendo a plateia e o balcão do auditório principal do Teatro Jordão. As medições foram efetuadas tanto com o sistema AVAC ligado como desligado, permitindo analisar o impacto do funcionamento do sistema de ventilação sobre a inteligibilidade da palavra. Para cada ponto, foram registados os valores de STI masculino e feminino, calculando-se posteriormente o STI médio e respetivo desvio-padrão. A média global foi obtida a partir dos valores médios de todos os pontos de medição.

No Quadro 5.13 são apresentados os resultados obtidos para cada condição de funcionamento do AVAC. Verifica-se que os valores médios de STI variam entre 0,63 e 0,78 com o sistema desligado e entre 0,57 e 0,73 com o sistema ligado, mantendo-se, em geral, dentro da classificação de "Boa" inteligibilidade da palavra. A Figura 5.10 representa graficamente a evolução dos

valores de STI médio para cada ponto de medição, em ambas as condições, permitindo uma leitura clara da distribuição espacial da inteligibilidade no auditório.

Observa-se que, tanto com o sistema AVAC ligado como desligado, os melhores valores de STI ocorrem nos pontos mais centrais e próximos da fonte sonora (P1, P2, P5, P7 e P8), onde os índices atingem valores classificados como "Boa" ou até "Excelente". Por outro lado, nos pontos mais afastados ou laterais (nomeadamente P4 e P10), registam-se valores ligeiramente inferiores, mas ainda dentro de níveis considerados adequados para a compreensão da palavra.

Relativamente ao impacto do sistema de ventilação, a comparação dos valores médios globais revela uma ligeira redução do STI com o AVAC em funcionamento, passando de 0,70 (sem AVAC) para 0,68 (com AVAC). Esta diferença é considerada pouco significativa, indicando que o funcionamento do sistema AVAC não compromete de forma relevante a inteligibilidade da palavra no auditório, conforme sintetizado na comparação do Quadro 5.14.

De forma geral, os resultados obtidos demonstram que o Teatro Jordão apresenta boas condições acústicas no que respeita à inteligibilidade da palavra, confirmando a adequação do espaço para funções de oratória e eventos teatrais.

Quadro 5.13 - Resultados do STI, em cada ponto de medição, com e sem o sistema AVAC em funcionamento, incluindo os respetivos desvios-padrão e médias.

	Posições	STI Masculino	STI Feminino	STI Médio	Inteligibilidade da palavra
Com AVAC	P1	0,72	0,73	0,73	Boa (0,60 – 0,75)
	P2	0,68	0,70	0,69	
	P3	0,65	0,67	0,66	
	P4	0,56	0,57	0,57	Suficiente (0,45 – 0,60)
	P5	0,69	0,71	0,70	Boa (0,60 – 0,75)
	P6	0,70	0,72	0,71	
	P7	0,70	0,72	0,71	
	P8	0,70	0,72	0,71	
	P9	0,66	0,68	0,67	
	P10	0,67	0,69	0,68	
Desvio-padrão		0,04	0,04	0,04	-
Sem AVAC	P1	0,76	0,80	0,78	Excelente (0,75 – 1,00)
	P2	0,66	0,68	0,67	Boa (0,60 – 0,75)
	P3	0,65	0,68	0,67	
	P4	0,61	0,64	0,63	
	P5	0,68	0,70	0,69	
	P6	0,69	0,72	0,71	
	P7	0,72	0,73	0,73	
	P8	0,71	0,73	0,72	
	P9	0,67	0,69	0,68	
	P10	0,69	0,71	0,70	
Desvio-padrão		0,04	0,04	0,04	-

Quadro 5.14 – Diferença entre os valores médios do STI com e sem o sistema AVAC em funcionamento para cada ponto de medição, incluindo a média global.

Posições	STI S/ AVAC	STI C/ AVAC	Δ STI (= com – sem AVAC)
P1	0,78	0,73	-0,06
P2	0,67	0,67	0,00
P3	0,67	0,66	-0,01
P4	0,63	0,57	-0,06
P5	0,69	0,69	0,00
P6	0,71	0,71	0,00
P7	0,73	0,71	-0,02
P8	0,72	0,71	-0,01
P9	0,68	0,67	-0,01
P10	0,70	0,68	-0,02
STI Médio Global	0,70	0,68	-0,02

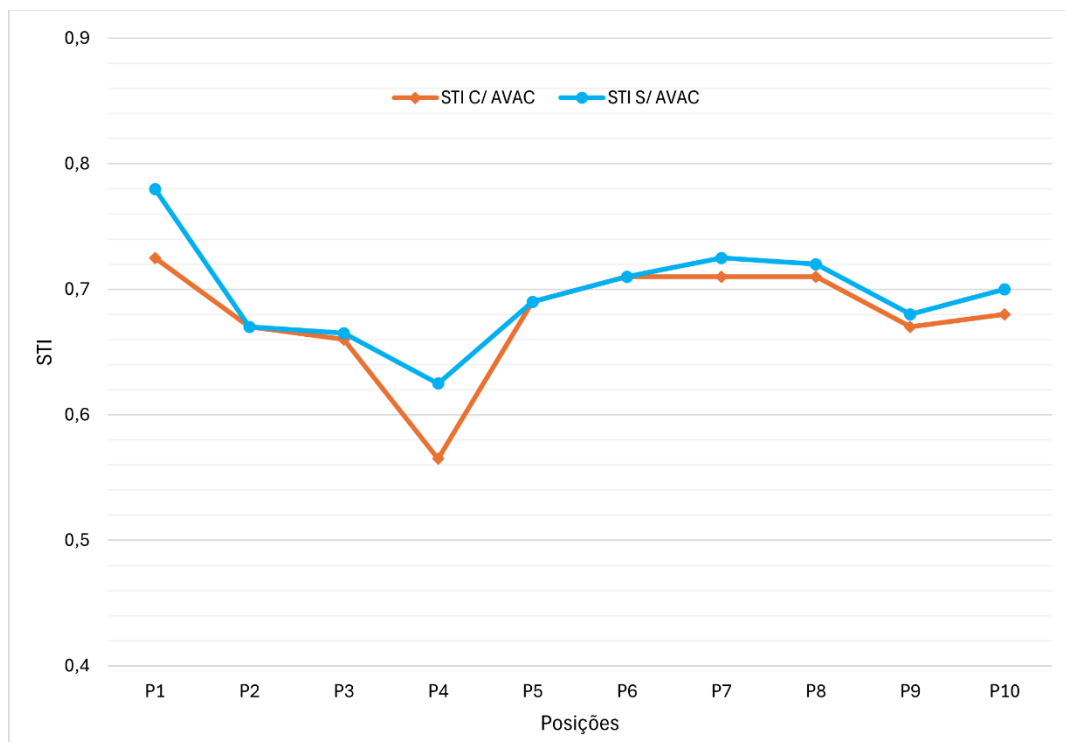


Figura 5.10 – Comparação dos valores do parâmetro STI, em cada ponto de medição, com e sem o sistema AVAC em funcionamento.

5.5. CLARIDADE (C_{80})

A Claridade (C_{80}), conforme descrito no capítulo 2.8.2.2, quantifica a relação entre a energia sonora recebida nos primeiros 80 ms e a energia subsequente, sendo essencial para avaliar a definição da música em espaços de espetáculo. Valores elevados de C_{80} indicam maior preponderância do som direto, favorecendo a clareza musical.

As medições foram realizadas em nove pontos do auditório do Teatro Jordão, abrangendo plateia e balcão, para bandas de frequência de 1/1 de oitava entre 125 e 8000 Hz, em condições com e sem o sistema AVAC em funcionamento.

Os resultados obtidos encontram-se apresentados no Quadro 5.15 para a condição sem AVAC e no Quadro 5.16 para a condição com AVAC, sendo a evolução dos valores graficamente representada nas Figuras 5.11 e 5.12, respetivamente.

Analisando os dados, verifica-se que, com o sistema AVAC desligado, os valores de C_{80} aumentam de forma consistente com a frequência, comportamento típico de salas bem controladas acusticamente. O valor médio de C_{80} para as frequências de 500 e 1000 Hz situa-se nos 8,6 dB.

Com o sistema AVAC em funcionamento, observa-se uma ligeira diminuição global dos valores, com o C_{80} médio para as mesmas frequências a descer para 8,2 dB. Esta variação moderada sugere que o funcionamento do sistema de ventilação introduz uma pequena dispersão adicional da energia sonora, embora sem comprometer significativamente a clareza sonora no espaço.

De forma geral, constata-se que o comportamento dos valores de C_{80} é estável nas frequências médias (500 - 2000 Hz), enquanto nas frequências extremas (125 e 8000 Hz) se registam variações mais acentuadas, associadas às características de absorção e difusão acústica do auditório.

A comparação entre os valores médios de C_{80} obtidos nas diferentes frequências, com e sem o sistema AVAC em funcionamento, encontra-se representada na Figura 5.13, permitindo visualizar de forma clara a tendência de redução associada ao funcionamento do sistema de ventilação.

Quadro 5.15 - Resultados da Claridade (C_{80}), em cada ponto de medição, sem o sistema AVAC ligado, incluindo os respetivos desvios-padrão e médias.

Posições	Frequência (Hz)							C_{80} [500, 1.000 Hz] (dB)
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1	10,7	9,1	12,3	10,6	12,0	15,1	18,2	11,4
P2	7,4	8,6	8,9	9,2	9,0	11,0	13,5	9,0
P3	3,6	4,3	8,3	6,5	9,0	12,1	15,8	7,4
P4	3,2	8,4	7,8	7,1	8,5	10,3	12,8	7,4
P5	0,3	7,4	9,2	7,3	7,3	10,7	13,2	8,3
P6	4,7	11,0	10,3	8,5	11,0	10,1	11,5	9,4
P7	3,1	11,5	10,2	9,2	9,3	10,6	12,0	9,7
P8	4,2	7,3	9,4	6,1	7,9	10,1	12,0	7,7
P9	7,2	9,2	7,3	6,2	8,8	8,9	13,3	6,8
Média	4,9	8,5	9,3	7,8	9,2	11,0	13,6	8,6
Desvio - padrão	2,9	2,0	1,4	1,5	1,4	1,7	2,0	-

Quadro 5.16 - Resultados da Claridade (C_{80}), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC ligado, incluindo os respetivos desvios-padrão e médias.

Posições	Frequência (Hz)							C_{80} [500, 1.000 Hz] (dB)
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1	5,0	11,8	10,8	9,5	9,2	10,7	16,2	10,2
P2	7,2	9,9	7,5	8,6	6,4	10,1	13,1	8,1
P3	-0,1	7,0	7,6	7,5	7,1	7,7	11,9	7,5
P4	1,8	5,9	7,4	5,8	5,6	8,7	9,6	6,6
P5	-0,4	7,4	9,5	7,8	7,4	10,0	13,0	8,6
P6	4,6	11,7	9,2	8,9	9,8	10,2	10,9	9,1
P7	3,0	10,8	9,4	9,0	9,7	9,5	11,5	9,2
P8	4,3	7,2	7,9	4,5	8,4	9,4	11,5	6,2
P9	8,0	9,0	9,5	6,9	8,5	9,3	12,3	8,2
Média	3,7	9,0	8,8	7,6	8,0	9,5	12,2	8,2
Desvio - padrão	2,8	2,1	1,1	1,6	1,4	0,9	1,7	-

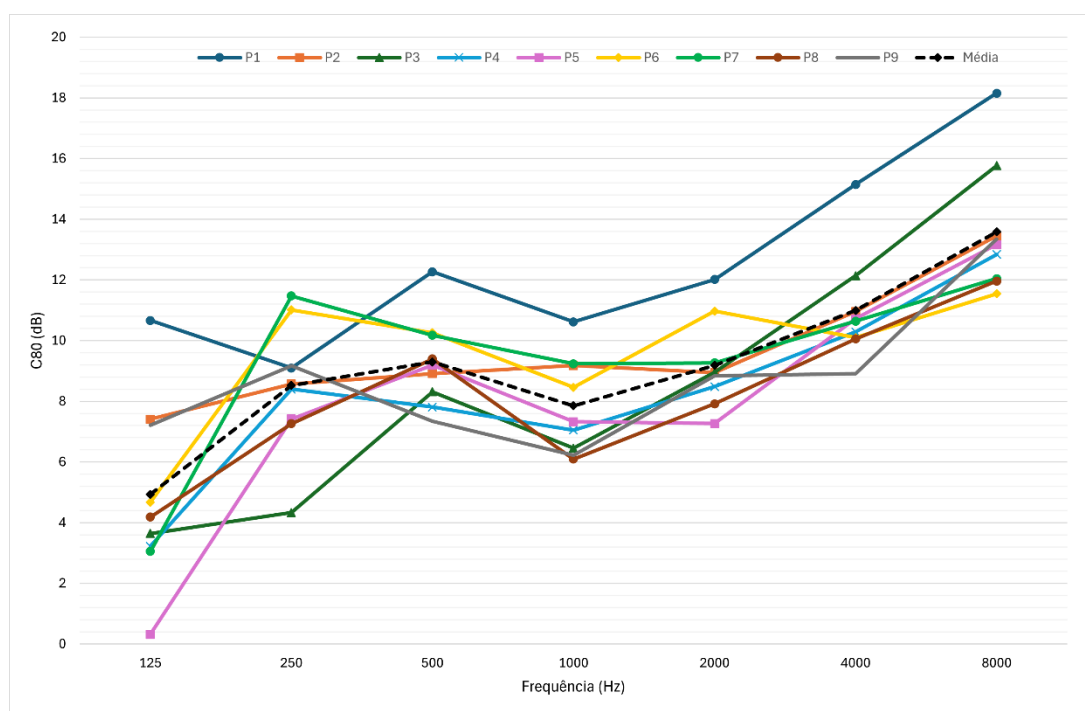


Figura 5.11 – Resultados da Claridade (C_{80}), com o sistema AVAC desligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava.



Figura 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.

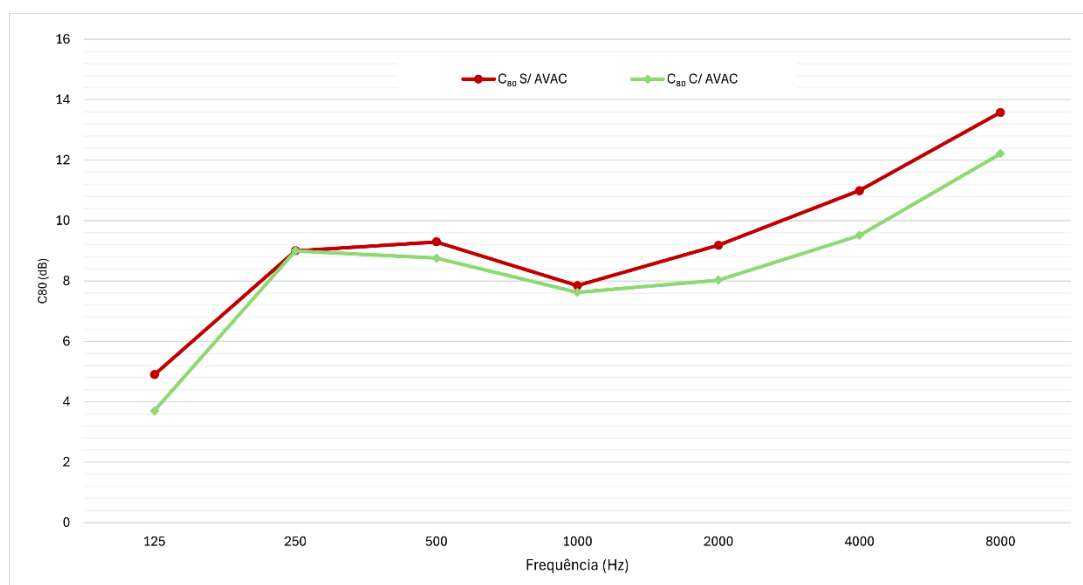


Figura 5.13- Valores da Claridade (C_{80}), com e sem o sistema AVAC em funcionamento, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava.

Por último, procedeu-se à análise comparativa dos valores recomendados de C_{80} em função do tipo de utilização com os resultados médios obtidos nas frequências de 500 e 1000 Hz para bandas de 1/1 de oitava, tanto com o sistema AVAC desligado como ligado, registando-se valores de 8,6 dB e 8,2 dB, respetivamente. A informação comparativa encontra-se organizada no Quadro 5.17.

Quadro 5.17 – Verificação dos valores médios da Claridade (C_{80}) dos 500 e 1000 Hz, em condições de sala vazia e ocupada com os valores recomendados em função do tipo de utilização.

Função		C_{80} [500, 1.000 Hz] ideal (dB) [1]	Comparação com Teatro Jordão (C_{80} = 8,6 e 8,2 dB)
Auditório (palavra)		> 6	Adequado
Teatro		> 6	Adequado
Cinema		> 5	Adequado
Ópera	Não wagneriana	3 a 4	Desadequado
	Wagner	1 a 2	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	Adequado
Música de câmara		< -2	Desadequado
Música de órgão		-3 a -1	Desadequado

5.6. DEFINIÇÃO (D_{50})

A Definição (D_{50}), conforme abordado no capítulo 2.8.2.2, é um parâmetro acústico associado à percepção da palavra, relacionando a energia recebida nos primeiros 50 ms após a emissão sonora com a energia total recebida. Valores de D_{50} superiores a 0,60 indicam uma boa definição sonora, favorável à inteligibilidade do discurso.

As medições foram realizadas em nove pontos do auditório do Teatro Jordão, distribuídos entre plateia e balcão, para bandas de frequência de 1/1 de oitava entre 125 e 8000 Hz, em condições com e sem o funcionamento do sistema AVAC.

Os resultados encontram-se apresentados no Quadro 5.18 (sem AVAC) e no Quadro 5.19 (com AVAC), sendo a evolução dos valores graficamente representada nas Figuras 5.14 e 5.15, respetivamente, e a comparação entre cenários ilustrada na Figura 5.16. Observa-se que, com o sistema AVAC desligado, os valores de D_{50} aumentam de forma consistente com a frequência, comportamento típico de salas bem controladas. O valor médio de D_{50} para as frequências de 500 e 1000 Hz é de 0,74, descendo ligeiramente para 0,73 com o AVAC ligado, evidenciando um impacto mínimo do sistema de ventilação na definição sonora.

A dispersão dos valores é mais acentuada nas frequências mais baixas, com um desvio padrão de 0,12 a 125 Hz, enquanto nas frequências médias e altas a variação é reduzida, indicando uniformidade espacial na definição sonora. Os melhores resultados de D_{50} foram registados na zona da plateia, em especial no ponto P1, com valores superiores a 0,80 em várias frequências, enquanto os valores mais baixos se observam em zonas mais afastadas, como o ponto P9, embora ainda superiores a 0,65.

De forma global, os resultados confirmam que o Teatro Jordão apresenta uma definição da palavra classificada como "suficiente a boa" em todos os pontos de medição, garantindo condições adequadas para espetáculos teatrais e outros eventos oratórios.

Quadro 5.18 – Resultados da Definição (D_{50}), em cada ponto de medição, sem o sistema AVAC ligado, incluindo os respetivos desvios-padrão e médias.

Posições	Frequência (Hz)							D_{50} [500, 1.000 Hz]
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1	0,81	0,75	0,88	0,83	0,90	0,95	0,97	0,86
P2	0,73	0,82	0,79	0,76	0,78	0,86	0,93	0,78
P3	0,42	0,68	0,79	0,70	0,80	0,89	0,94	0,75
P4	0,53	0,78	0,74	0,71	0,81	0,84	0,90	0,73
P5	0,46	0,70	0,78	0,68	0,73	0,85	0,90	0,73
P6	0,48	0,86	0,83	0,78	0,83	0,79	0,87	0,81
P7	0,53	0,83	0,82	0,82	0,78	0,83	0,84	0,82
P8	0,57	0,62	0,61	0,59	0,68	0,78	0,78	0,60
P9	0,67	0,66	0,64	0,65	0,75	0,75	0,87	0,65
Média	0,58	0,75	0,77	0,72	0,78	0,84	0,89	0,74
Desvio - padrão	0,12	0,08	0,08	0,08	0,06	0,06	0,05	-

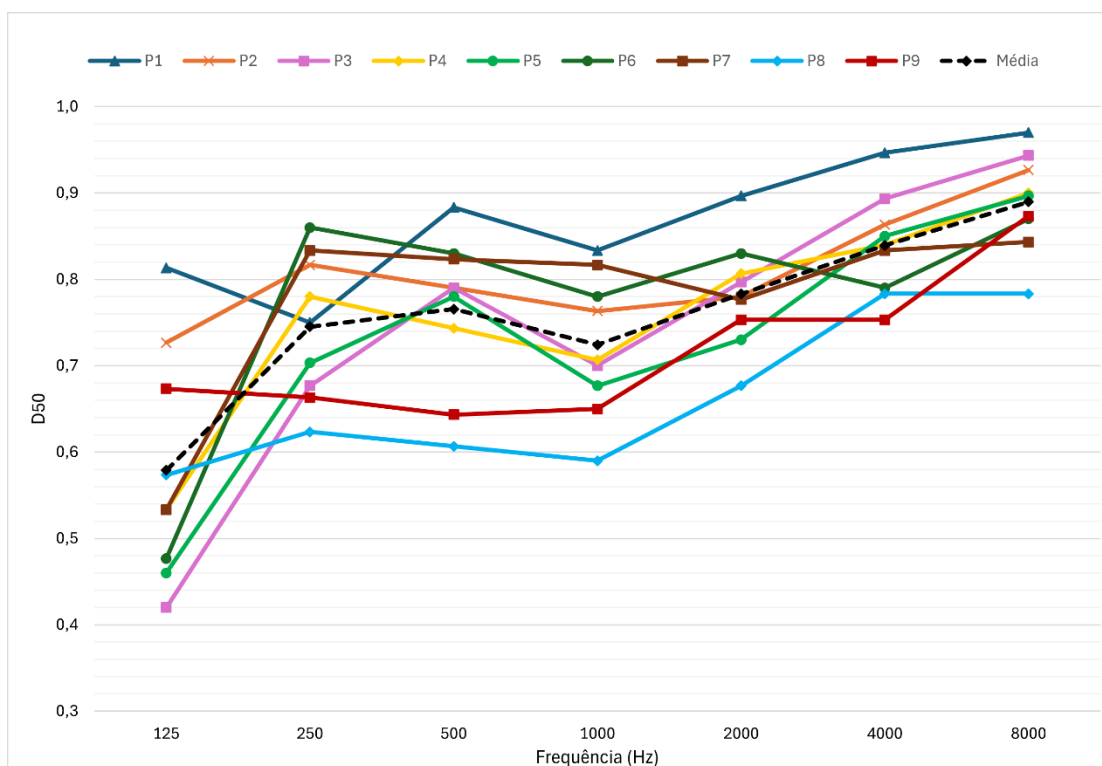


Figura 5.14 – Resultados da Definição (D_{50}), com o sistema AVAC desligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava.

Quadro 5.19 – Resultados da Definição (D_{50}), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC ligado, incluindo os respectivos desvios-padrão e médias.

Posições	Frequência (Hz)							D_{50} [500, 1.000 Hz]
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1	0,70	0,91	0,86	0,78	0,81	0,80	0,93	0,82
P2	0,61	0,82	0,75	0,75	0,67	0,79	0,90	0,75
P3	0,38	0,76	0,73	0,65	0,69	0,68	0,85	0,69
P4	0,40	0,67	0,67	0,64	0,66	0,76	0,80	0,66
P5	0,44	0,67	0,81	0,69	0,77	0,82	0,88	0,75
P6	0,54	0,86	0,86	0,79	0,82	0,78	0,85	0,82
P7	0,57	0,81	0,77	0,81	0,82	0,79	0,84	0,79
P8	0,57	0,64	0,74	0,56	0,63	0,76	0,78	0,65
P9	0,65	0,69	0,69	0,64	0,68	0,77	0,81	0,66
Média	0,54	0,76	0,76	0,70	0,73	0,77	0,85	0,73
Desvio - padrão	0,11	0,09	0,06	0,08	0,07	0,04	0,05	-

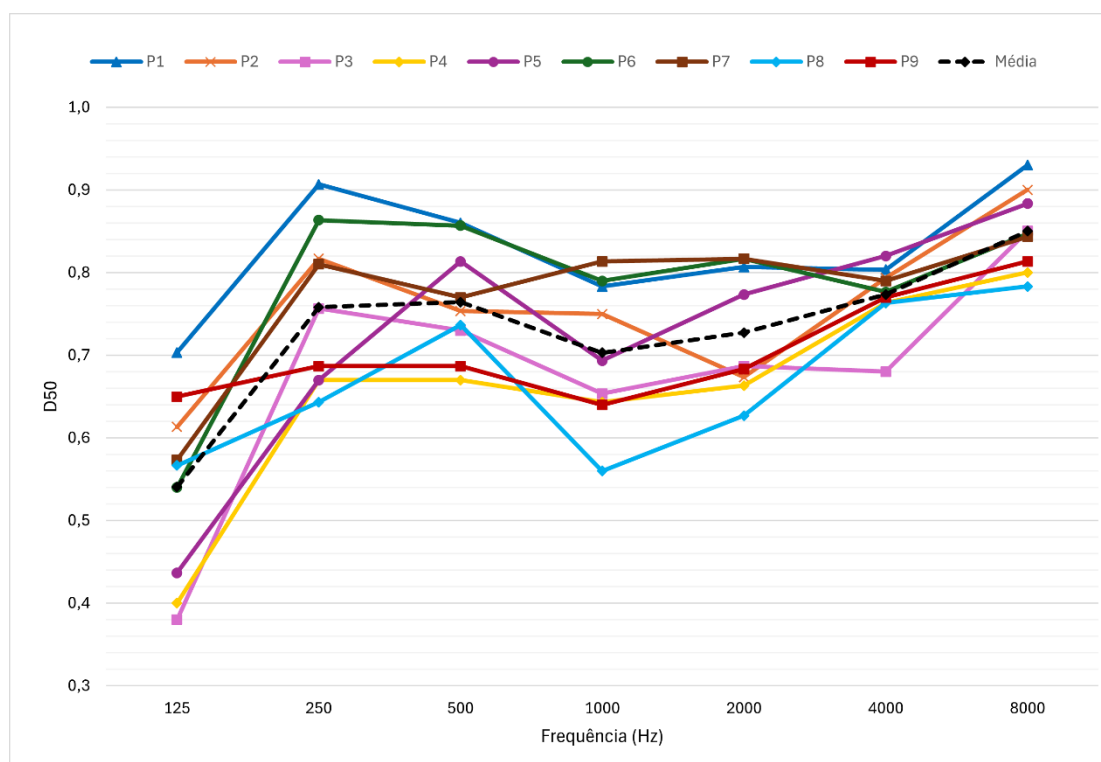


Figura 5.15 – Resultados da Definição (D_{50}), com o sistema AVAC ligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava.

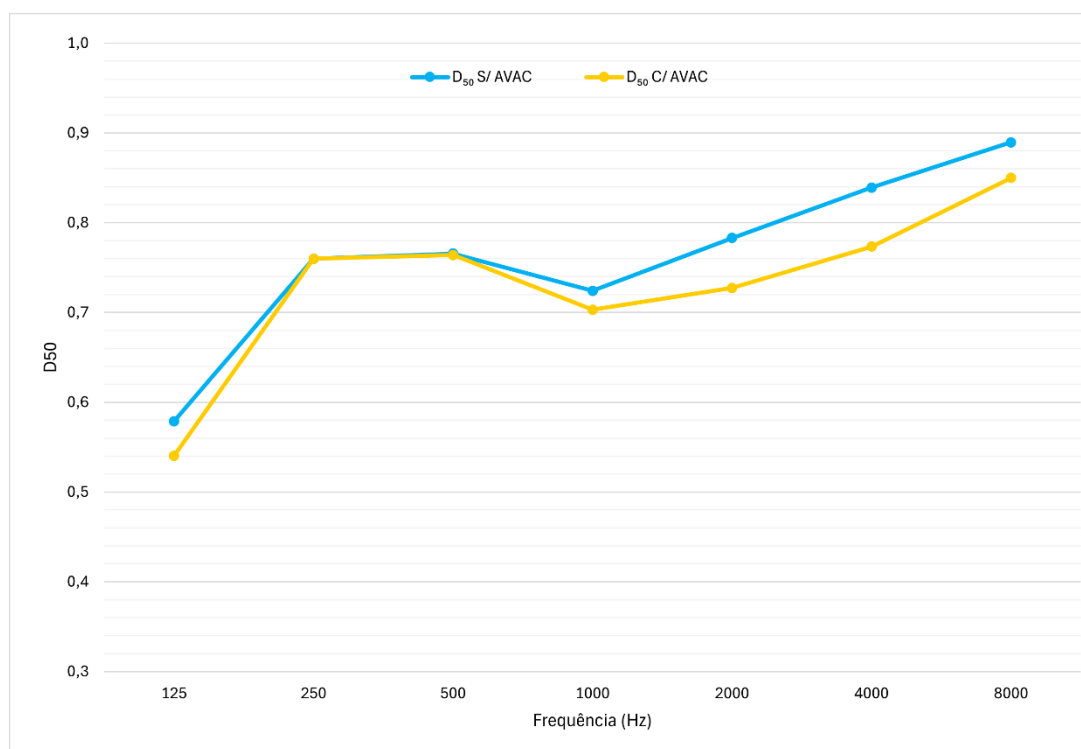


Figura 5.16 – Valores da Definição (D_{50}), com e sem o sistema AVAC em funcionamento, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava.

5.7. TEMPO CENTRAL (t_s)

O Tempo Central (t_s), conforme descrito no capítulo 2.8.2.2, corresponde ao instante no tempo no qual 50% da energia acústica total foi recebida, refletindo a distribuição entre a energia das primeiras reflexões e a da cauda reverberante. Valores de t_s mais baixos indicam maior concentração da energia no início da resposta impulsional, favorecendo um som mais claro e melhor inteligibilidade da palavra, enquanto valores mais elevados traduzem ambientes mais reverberantes. Para este parâmetro, foram realizadas medições em nove pontos distintos (P1 a P9) no auditório do Teatro Jordão, abrangendo a plateia e o balcão, considerando bandas de frequência de 1/1 de oitava entre 125 e 8000 Hz, nas condições com e sem o sistema AVAC em funcionamento.

Os resultados encontram-se apresentados no Quadro 5.20 (sem AVAC) e no Quadro 5.21 (com AVAC), sendo a evolução dos valores representada graficamente nas Figuras 5.17 e 5.18, respetivamente. A comparação média entre os dois cenários é ilustrada na Figura 5.19. Observa-se que, sem o AVAC, o valor médio de t_s nas frequências de 500 e 1000 Hz é de 40 ms, enquanto com o AVAC em funcionamento este valor aumenta muito ligeiramente para 41 ms, indicando que o sistema de ventilação provoca um aumento marginal da dispersão da energia sonora, mas sem impactar a definição do som.

De um modo geral, verifica-se que o comportamento dos valores de t_s é coerente com o esperado: são registados valores mais elevados nas frequências graves (125–250 Hz), diminuindo progressivamente nas frequências médias e altas, comportamento típico de ambientes acusticamente equilibrados. A dispersão dos resultados é mais acentuada nas baixas frequências, enquanto nas frequências médias (500–2000 Hz) e altas (4000–8000 Hz) o desvio padrão é

bastante reduzido, revelando maior uniformidade espacial do comportamento acústico nestas gamas.

Relativamente à adequação funcional, valores de t_s inferiores a 80 ms são recomendados para garantir boa inteligibilidade da palavra, enquanto valores entre 80 e 230 ms são adequados para música sinfônica e de câmara. Os resultados obtidos mostram que o Teatro Jordão apresenta tempos centrais médios inferiores a 80 ms, com e sem AVAC, confirmando a sua aptidão para eventos teatrais e oratórios, embora não cumpra os requisitos ideais para salas destinadas prioritariamente à música.

Quadro 5.20 – Resultados do Tempo Central (t_s), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC desligado, incluindo os respetivos desvio-padrão e média.

Posições	Frequência (Hz)							ts [500, 1.000 Hz] (ms)
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1	52	41	22	26	14	8	4	24
P2	74	39	38	34	30	19	13	36
P3	96	58	38	46	29	15	9	42
P4	102	47	39	43	31	22	16	41
P5	112	59	43	50	43	29	25	46
P6	101	45	37	34	27	31	25	35
P7	85	37	35	34	36	28	24	34
P8	85	55	49	55	44	30	28	52
P9	71	52	51	50	37	35	22	50
Média	86	48	39	41	32	24	18	40
Desvio - padrão	18	8	8	9	9	8	8	-

Quadro 5.21 – Resultados do Tempo Central (t_s), em cada ponto de medição, com o sistema AVAC ligado, incluindo os respetivos desvio-padrão e média.

Posições	Frequência (Hz)							ts [500, 1.000 Hz] (ms)
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1	70	27	24	31	28	25	11	28
P2	75	37	39	38	43	28	15	39
P3	118	54	41	46	41	41	22	44
P4	110	57	46	52	47	35	27	49
P5	113	61	41	47	41	31	25	44
P6	99	46	34	35	31	33	29	35
P7	86	39	37	33	34	31	25	35
P8	85	56	44	57	45	32	29	51
P9	71	54	50	48	41	34	28	49
Média	92	48	40	43	39	32	23	41
Desvio - padrão	18	11	7	9	6	4	6	-

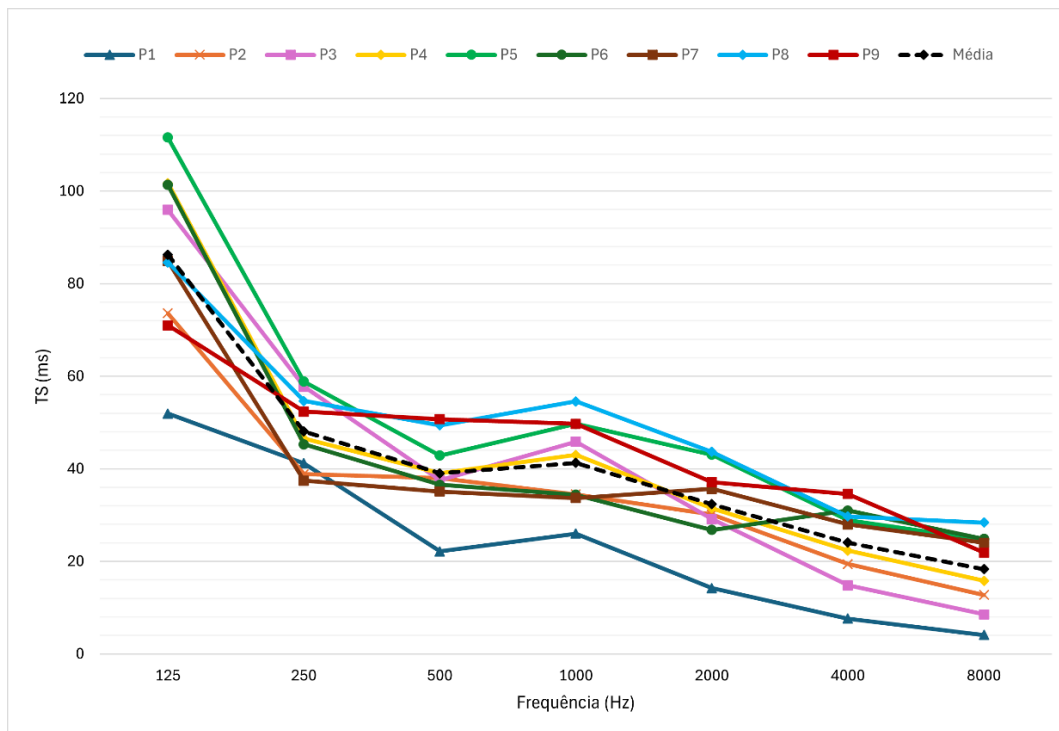


Figura 5.17 – Resultados do Tempo Central (t_s), com o sistema AVAC desligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava.

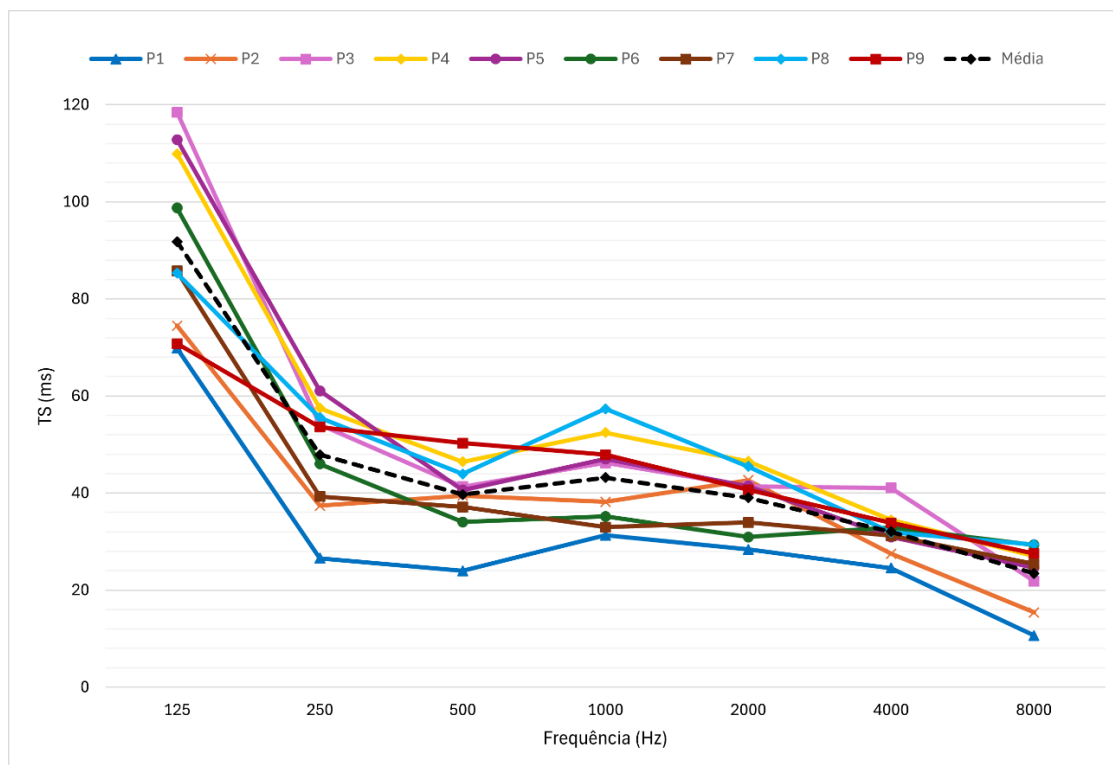


Figura 5.18 – Resultados do Tempo Central (t_s), com o sistema AVAC ligado, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava.

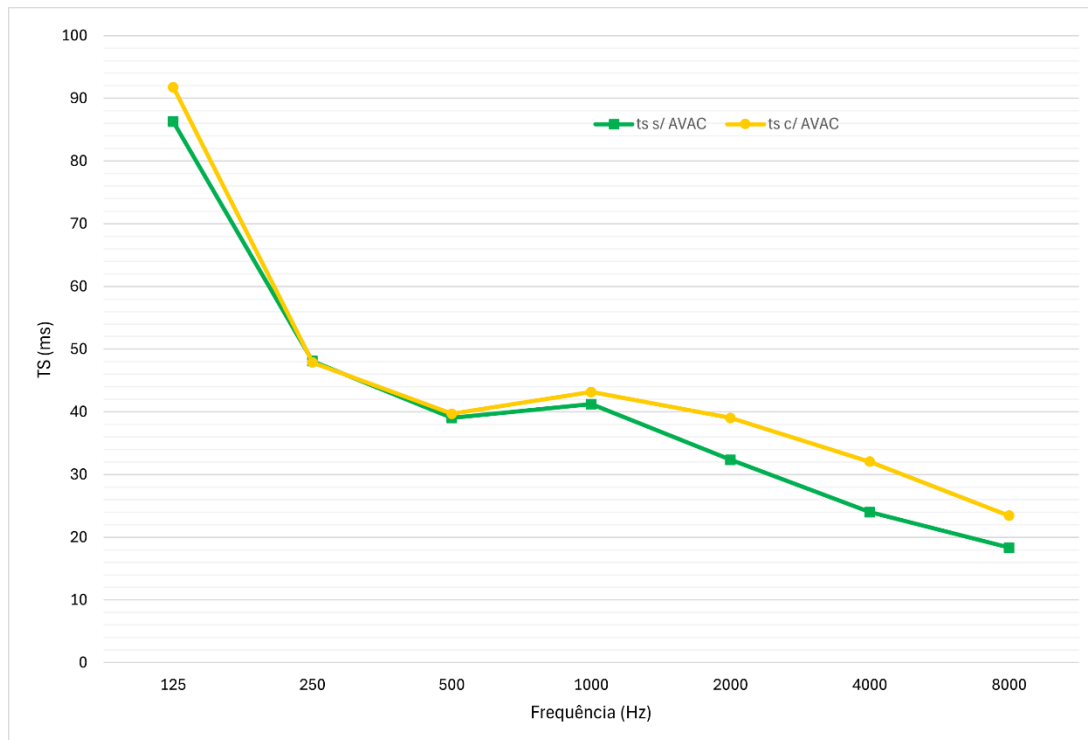


Figura 5.19 – Valores da Tempo Central (t_s), com e sem o sistema AVAC em funcionamento, em cada ponto de medição, para bandas de frequência de 1/1 de oitava.

6

ANÁLISE COMPARATIVA COM OUTRAS SALAS

6.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo centra-se na análise comparativa do desempenho acústico do Teatro Jordão com outras salas de espetáculo nacionais previamente caracterizadas em dissertações de mestrado. O principal objetivo consiste em enquadrar os resultados obtidos no presente estudo, identificando as qualidades e eventuais limitações acústicas do auditório no contexto mais alargado das salas de espetáculo em Portugal, permitindo assim uma leitura crítica e fundamentada das medições realizadas.

No Quadro 6.1 apresenta-se um resumo das salas incluídas nesta comparação, destacando as suas funções principais e a predominância dos usos associados à palavra, à música, ou a ambos.

Foram selecionadas para a comparação salas com diferentes tipologias arquitetónicas, áreas e funções predominantes (palavra, música ou ambas), permitindo uma análise abrangente e representativa do panorama acústico português. Esta comparação será realizada com base nos seguintes parâmetros acústicos:

- Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq});
- Tempo de reverberação médio (TR);
- *Speech Transmission Index (STI)/ Rapid Speech Transmission Index (RASTI)*;
- Claridade (C_{80});
- Definição (D_{50});
- Tempo Central (TS).

Quadro 6.1 – Comparação das diversas funções das quinze salas nacionais

Salas de espetáculos	Atividades mais usuais	Música	Palavra
Auditório da FEUP [42]	Estabelecimento de ensino		X
Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia [43]	Palavra e cinema	X	X
Centro de Artes de Águeda [44]	Dança clássica e contemporânea, música, teatro e cinema	X	X
Cineteatro de Amarante [45]	Espetáculos	X	
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares) [46]	Cinema, teatro, concertos e palestras	X	X
Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto [47]	Música e estabelecimento de ensino	X	X
Grande Auditório do Altice Fórum Braga [48]	Conferências e seminários, espetáculos musicais, infantis, teatro, dança e <i>stand up comedy</i>	X	X
Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra) [49]	Música, teatro e entretenimento	X	X
Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga [48]	Seminários, conferências, formações e debate		X
Teatro Municipal da Covilhã [50]	Música e teatro	X	X
Teatro Municipal de Ourém [51]	Teatro, cinema e eventos corporativos	X	X
Teatro Nacional São João (Porto) [52]	Ópera e teatro	X	X
Teatro Ribeiro Conceição (Lamego) [53]	Teatro, cinema, espetáculos musicais, dança, palestras e entretenimento	X	X
Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo) [54]	Teatro, música, dança e cinema	X	X
Teatro Jordão (Guimarães)	Música, teatro, dança e congressos	X	X

6.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O Quadro 6.2 apresenta os valores de volume, número de lugares e tempo de reverberação médio (TR) nas bandas de 500 e 1000 Hz de quinze salas de espetáculo nacionais, incluindo o Teatro Jordão. Estes dados servem de base para a análise gráfica que se segue, representada na Figura 6.1 e Figura 6.2.

Numa análise inicial, observa-se que o Teatro Jordão possui um dos menores volumes entre as salas analisadas (2230 m³), sendo apenas superior ao do Cineteatro Eduardo Brazão e ao do Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga. Em termos de capacidade, com 386 lugares, posiciona-se entre os espaços de dimensão intermédia, semelhante ao Cineteatro de Amarante, ao Teatro Sá Miranda, ao Centro de Artes de Águeda e ao Cineteatro Eduardo Brazão.

Relativamente ao tempo de reverberação médio, o Teatro Jordão apresenta um valor de 0,70 segundos, posicionando-se como o segundo mais baixo entre todas as salas analisadas, apenas superado pelo Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga, com 0,50 s. Ambos os valores estão abaixo da média geral de 1,00 s.

Quadro 6.2 – Valores do Volume, Número de lugares e TR médio (500, 1000 Hz) das quinze salas nacionais incluindo o Teatro Jordão.

Salas de espetáculos	Volume (m³)	Nº de lugares	TR [500, 1.000 Hz] (s)
Auditório da FEUP [42]	3317	500	1,50 (+)
Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia [43]	3219	330	0,80
Centro de Artes de Águeda [44]	5066	398	0,80
Cineteatro de Amarante [45]	2700	386	1,20
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares) [46]	2111	386	1,00
Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto [47]	3192	233	1,30
Grande Auditório do Altice Fórum Braga [48]	9150	998	1,00
Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra) [49]	12000 (+)	1093 (+)	1,50 (+)
Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga [48]	1320 (-)	254 (-)	0,50 (-)
Teatro Municipal da Covilhã [50]	4258	600	1,40
Teatro Municipal de Ourém [51]	3915	441	1,00
Teatro Nacional São João (Porto) [52]	4560	614	1,20
Teatro Ribeiro Conceição (Lamego) [53]	4184	417	1,05
Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo) [54]	2491	378	1,20
Teatro Jordão (Guimarães)	2230	386	0,70
Média	4248	494	1,00
Mediana	3317	398	1,05

Como representado na Figura 6.1, o tempo de reverberação médio das quinze salas analisadas foi colocado em função do respetivo volume. A distribuição dos pontos permitiu o traçado de uma linha de tendência logarítmica, com um coeficiente de determinação de R^2 igual a 0,23, valor que demonstra uma correlação fraca entre estas duas variáveis. Isto permite concluir que apenas 23% da variação dos valores de TR pode ser explicada pela variação do volume das salas, sendo os restantes 77% condicionados por outros fatores não considerados nesta relação, como a absorção sonora, a geometria do espaço ou os materiais utilizados.

Apesar de existir uma tendência geral de aumento do TR com o volume, verifica-se que salas como o Grande Auditório do Altice Fórum Braga (9150 m³) apresentam valores de TR inferiores ao esperado (1,0 s), o que sugere a presença de elevada absorção sonora. O mesmo se verifica no

Teatro Jordão, que com um volume de 2230 m³ regista um TR médio de apenas 0,70 s, posicionando-se significativamente abaixo da linha de tendência. Estes desvios sugerem a existência de intervenções acústicas eficazes que promovem a redução da reverberação, ao contrário de salas mais próximas da curva de regressão, onde o TR parece depender mais diretamente do volume e da ausência de tratamento acústico significativo.

Na Figura 6.2, o tempo de reverberação médio encontra-se em função do número de lugares das quinze salas analisadas. A linha de tendência obtida apresenta uma regressão logarítmica com um coeficiente de determinação de R² igual a 0,22, valor que indica uma fraca correlação entre estas duas variáveis. Assim, conclui-se que apenas 22% da variação dos valores do TR pode ser explicada pelo número de lugares das salas, sendo a restante variação influenciada por outros fatores, como a absorção sonora, a geometria ou os materiais de revestimento.

Este gráfico segue a mesma lógica do anterior (Figura 6.1), em que quanto maior é o número de lugares, geralmente associado a um maior volume da sala, tende a observar-se um aumento no tempo de reverberação. A linha de regressão apresenta uma trajetória crescente, demonstrando que o número de lugares influencia os valores de TR, ainda que de forma limitada. O Teatro Jordão, com 386 lugares, volta a posicionar-se abaixo da curva de tendência, com um valor de TR médio de 0,70 s.

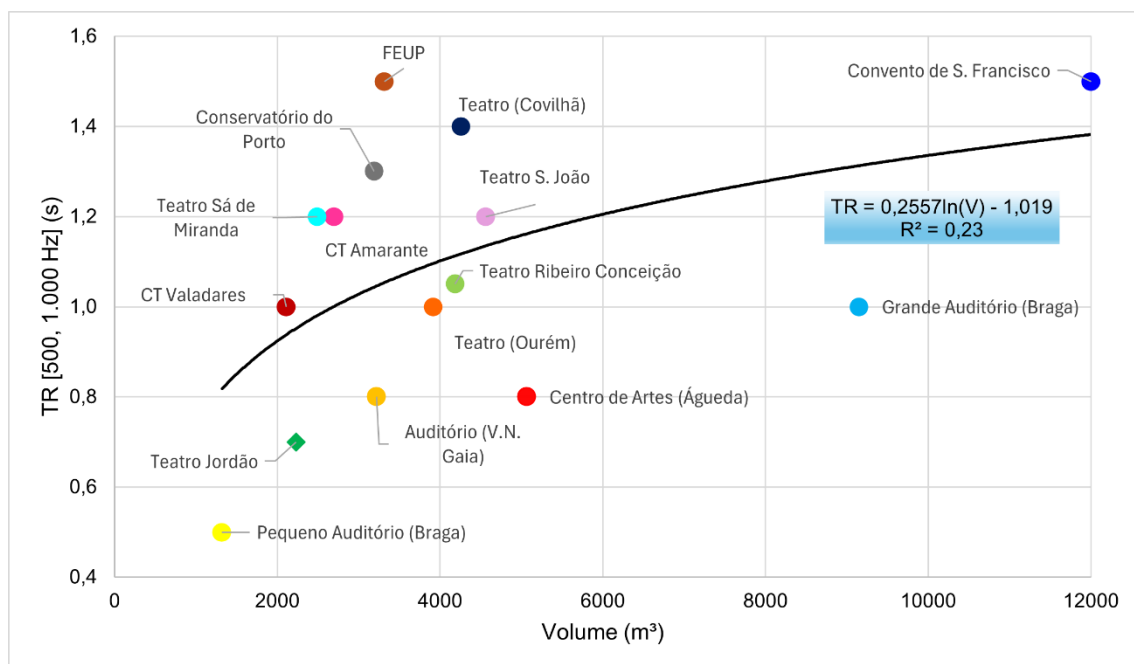


Figura 6.1 - Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] em função do Volume das quinze salas nacionais e do Teatro Jordão com linha de tendência (logarítmica).

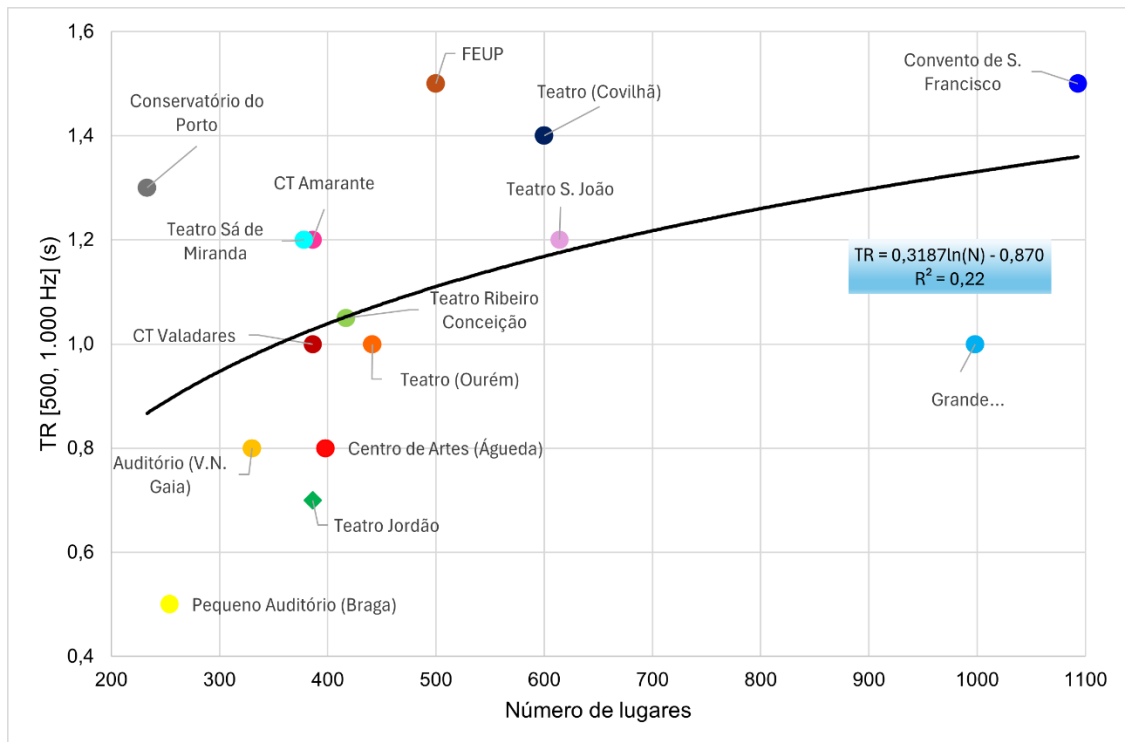


Figura 6.2 - Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] em função do número de lugares das quinze salas nacionais e do Teatro Jordão com linha de tendência (logarítmica).

No Quadro 6.3 apresenta-se a verificação da adequação do tempo de reverberação médio (TR [500, 1.000 Hz]) das quinze salas analisadas para diferentes tipos de utilização. Para funções musicais mais exigentes, como ópera (não wagneriana), música sinfónica barroca e música sinfónica moderna, apenas três salas se destacam por satisfazerem os requisitos em simultâneo: o Auditório da FEUP, o Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra) e o Teatro Municipal da Covilhã. No caso da ópera (não wagneriana), junta-se ainda o Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto, totalizando quatro salas adequadas.

No que respeita a funções associadas à palavra, como auditórios, apenas três espaços demonstram valores de TR adequados: o Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia, o Centro de Artes de Águeda e o Teatro Jordão. Para a função teatro, são quatro as salas que cumprem os critérios: Vila Nova de Gaia, Águeda, Teatro Jordão e o Altice Fórum Braga. No caso do cinema, destacam-se cinco salas: Vila Nova de Gaia, Cineteatro Eduardo Brazão, Altice Fórum Braga, Teatro Municipal de Ourém e Teatro Ribeiro Conceição. Para música popular, são seis as salas consideradas adequadas: Vila Nova de Gaia, Águeda, Cineteatro Eduardo Brazão, Altice Fórum Braga, Teatro Municipal de Ourém e Teatro Ribeiro Conceição. De notar ainda que o Teatro Jordão, apesar do seu volume relativamente reduzido, evidencia um desempenho favorável nas funções associadas à palavra e ao teatro, não se enquadrando, no entanto, nas funções com maiores exigências reverberantes.

Quadro 6.3 – Verificação dos valores recomendados do parâmetro tempo de reverberação médio de acordo com vários tipos de uso das quinze salas nacionais [42] [43] [44] [45] [46] [47] [48] [49] [50] [51] [52] [53] [54] [1]

Função	TR [500, 1.000 Hz] ideal (s)	Salas
Auditório (Palavra)	0,7 a 0,8	Auditório Municipal de V. N. de Gaia, Centro de Artes de Águeda e Teatro Jordão
Teatro	0,7 a 1,0	Auditório Municipal de V. N. de Gaia, Centro de Artes de Águeda, Teatro Jordão e Grande Auditório do Altice Fórum Braga
Cinema	0,8 a 1,0	Auditório Municipal de V. N. de Gaia, Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares), Grande Auditório do Altice Fórum Braga, Teatro Municipal de Ourém e Teatro Ribeiro Conceição
Ópera (não wagneriana)	1,3 a 1,7	Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra), Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto, Auditório da FEUP e Teatro Municipal da Covilhã
Ópera wagneriana	1,8 a 1,9	-
Música sinfónica (Romântica)	1,9 a 2,2	-
Música sinfónica (Barroco)	1,4 a 1,6	Auditório da FEUP, Grande Auditório do Convento S. Francisco e Teatro Municipal da Covilhã
Música sinfónica (Clássica)	1,6 a 1,8	-
Música sinfónica (Moderna)	1,4 a 1,9	Auditório da FEUP, Grande Auditório do Convento S. Francisco e Teatro Municipal da Covilhã
Música popular	0,8 a 1,0	Auditório Municipal de V. N. de Gaia, Centro de Artes de Águeda, Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares), Grande Auditório do Altice Fórum Braga, Teatro Municipal de Ourém e Teatro Ribeiro Conceição.
Música de órgão	2,5 a 3,5	-

6.3. RAPID SPEECH TRANSMISSION INDEX (RASTI) / SPEECH TRANSMISSION INDEX (STI)

No Quadro 6.4 encontram-se representados os valores de volume, número de lugares, índice de transmissão da palavra (STI médio) e os níveis sonoros equivalentes de ruído de fundo (LAeq), medidos com e sem funcionamento do sistema AVAC, para as quinze salas selecionadas, incluindo o Teatro Jordão. Estes dados servem de base para a análise desenvolvida nas Figuras 6.3, 6.4 e 6.5, que visam explorar a relação entre a inteligibilidade da palavra e parâmetros como o tempo de reverberação e o ruído de fundo.

Quadro 6.4 – Valores do Volume, Número de lugares, RASTI ou STI médio e Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (LA_{eq}) com e sem AVAC para as quinze salas nacionais incluindo o Teatro Jordão.

Salas de espetáculos	Volume (m³)	Nº de lugares	STI médio	L _{Aeq} (dB)	
				Sem AVAC	Com AVAC
Auditório da FEUP [42]	3317	500	0,61	27	46
Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia [43]	3219	330	0,68	24	47 (+)
Centro de Artes de Águeda [44]	5066	398	0,67	26	31
Cineteatro de Amarante [45]	2700	386	0,62	23	34
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares) [46]	2111	386	0,60	32 (+)	37
Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto [47]	3192	233	0,62	22 (-)	28 (-)
Grande Auditório do Altice Fórum Braga [48]	9150	998	0,67	24	34
Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra) [49]	12000 (+)	1093 (+)	0,61	27	30
Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga [48]	1320 (-)	254 (-)	0,80 (+)	25	31
Teatro Municipal da Covilhã [50]	4258	600	0,64	24	41
Teatro Municipal de Ourém [51]	3915	441	0,69	24	35
Teatro Nacional São João (Porto) [52]	4560	614	0,55	31	-
Teatro Ribeiro Conceição (Lamego) [53]	4184	417	0,55	25	31
Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo) [54]	2491	378	0,53 (-)	26	32
Teatro Jordão (Guimarães)	2230	386	0,70	25	32
Mediana	3317	398	0,62	25	33

Analisando o Quadro 6.4, verifica-se que o Teatro Jordão apresenta um STI médio de 0,70, um dos mais elevados entre as salas analisadas, apenas superado pelo Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga, que regista o valor máximo de 0,80. Este resultado reflete-se num nível de inteligibilidade da palavra considerado excelente, favorecido pelo reduzido tempo de reverberação e por um volume controlado. Por oposição, o Teatro Sá de Miranda apresenta o valor mais baixo de STI médio de 0,53, o que traduz uma inteligibilidade mais limitada, embora ainda considerada suficiente para a maioria das utilizações.

No que diz respeito aos níveis de ruído de fundo, o Teatro Jordão apresenta 25 dB(A) sem AVAC e 32 dB(A) com AVAC, valores dentro dos limites aceitáveis para auditórios. Em contraste, o Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia, com 47 dB(A) com AVAC, e o Auditório da FEUP, com 46 dB(A), registam os valores mais elevados que podem comprometer a perceção da palavra, especialmente em momentos de silêncio ou em discursos com baixa projeção vocal. Estes valores

contrastam com os observados em salas como o Grande Auditório do Convento de S. Francisco ou o Conservatório de Música do Porto, que se mantêm abaixo dos 30 dB(A) com AVAC. De forma geral, os valores de STI obtidos mostram-se satisfatórios em todas as salas, não se verificando nenhum caso com inteligibilidade desadequada.

As diferenças verificadas sugerem que salas com menor volume e tempos de reverberação mais curtos tendem a obter melhores valores de STI, como se confirma nos casos do Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga e do Teatro Jordão. Estes espaços, ao favorecerem a predominância das primeiras reflexões e uma menor persistência do som residual, revelam-se particularmente adequados para funções que exigem comunicação oral clara, como aulas, conferências e espetáculos teatrais.

Na Figura 6.3 encontram-se representados os valores de STI médio em função do tempo de reverberação médio nas quinze salas analisadas. A relação entre os dois parâmetros foi ajustada por uma linha de tendência logarítmica, que apresenta um coeficiente de determinação de R^2 igual a 0,55. Este valor indica que 55% da variação dos valores de STI médio pode ser explicada pela variação dos valores de TR médio, enquanto os restantes 45% estão associados a outros fatores que também influenciam diretamente a inteligibilidade da palavra.

Entre esses fatores incluem-se o nível de ruído ambiente, que pode afetar o STI mesmo em ambientes com o mesmo TR, e a geometria da sala, que determina a forma como as reflexões sonoras se distribuem. Adicionalmente, o STI é particularmente sensível a determinadas bandas de frequência, ao passo que o TR, embora não integre diretamente a influência de cada faixa de frequência de forma diferenciada, é geralmente avaliado apenas nas bandas de 500 e 1.000 Hz quando aplicado à análise da inteligibilidade da palavra. Assim, embora exista uma tendência clara de degradação do STI com o aumento do TR, esta correlação não é absoluta. O Teatro Jordão, por exemplo, apresenta um valor de STI de 0,70 e um TR médio de 0,70 s, situando-se entre os espaços com melhor equilíbrio entre reverberação controlada e inteligibilidade da palavra. Já salas como o Teatro Sá de Miranda, o Teatro Nacional São João e o Teatro Ribeiro Conceição, com tempos de reverberação mais elevados, surgem na parte inferior do gráfico com os valores de STI mais baixos, confirmando que o TR tem um impacto direto na inteligibilidade. No entanto, esta relação não é determinante, pois o TR, ao representar apenas uma média em frequências específicas, não reflete a totalidade dos fatores que afetam a percepção da fala. Conclui-se, assim, que o tempo de reverberação é um parâmetro relevante, mas não suficiente por si só para prever com exatidão o STI num dado ambiente.

Nas Figuras 6.4 e 6.5 apresentam-se as relações entre os valores de STI médio e o nível sonoro equivalente de ruído de fundo (LAeq), respetivamente com e sem funcionamento do sistema AVAC. Ambas as distribuições foram ajustadas com uma linha de regressão logarítmica, obtendo-se um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,12 sem AVAC e nulo com AVAC. Estes valores revelam uma correlação muito fraca entre o ruído de fundo e o STI, indicando que o LAeq, por si só, não explica as variações observadas na inteligibilidade da palavra.

Apesar de ser reconhecido que níveis elevados de ruído de fundo podem reduzir o STI, especialmente quando coincidem com as frequências da fala (entre 500 Hz e 4 kHz), os dados demonstram que, neste conjunto de salas, essa relação não é dominante. O efeito do ruído de fundo parece diluir-se quando comparado com outros fatores acústicos, como o tempo de reverberação, a geometria da sala e o tipo de revestimentos utilizados. De facto, algumas salas com valores mais altos de LAeq, como o Auditório da FEUP ou o Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia, continuam a apresentar valores de STI médio elevados, ao passo que outras, com

níveis de ruído mais baixos, registam STI mais reduzidos. Assim, conclui-se que, neste caso, o ruído de fundo não se apresenta como um parâmetro preditivo forte do STI, sendo a sua influência condicionada pela interação com outros elementos do ambiente sonoro.

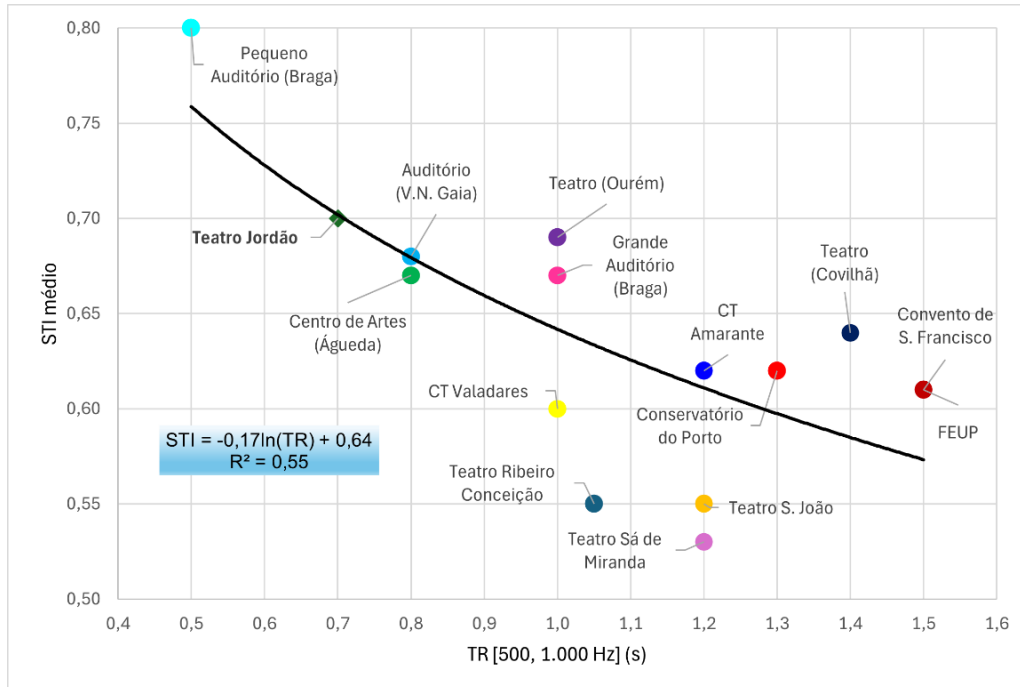


Figura 6.3 – Valores do parâmetro RASTI ou STI médio em função do Tempo de reverberação médio (TR [500, 1.000 Hz]) das quinze salas nacionais incluindo, Teatro Jordão com linha de tendência (potência).

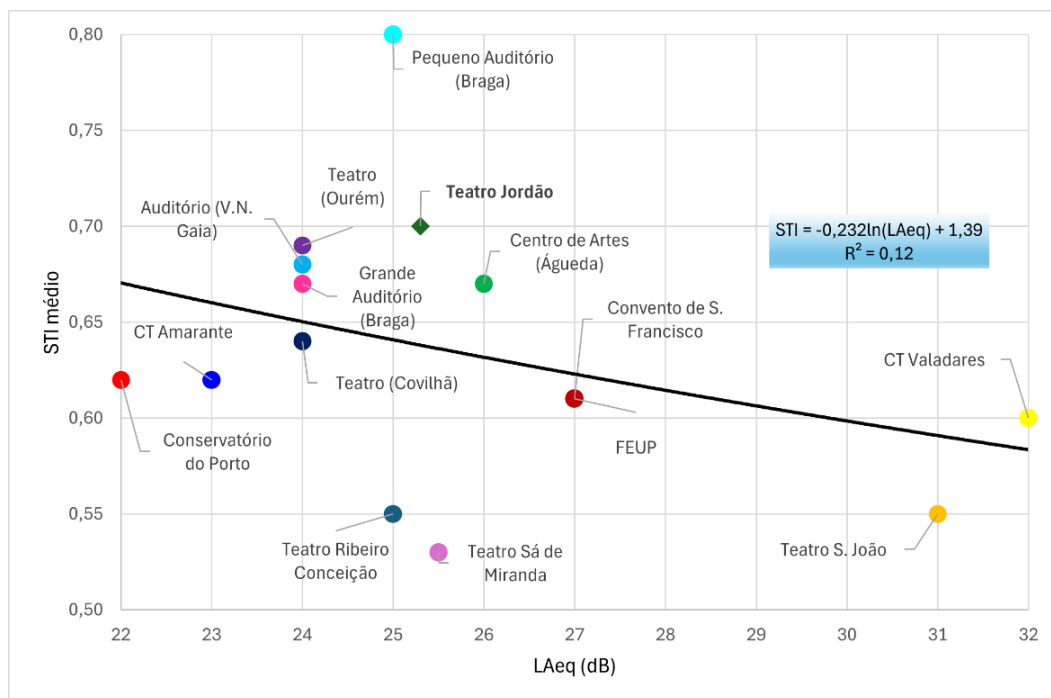


Figura 6.4 – Valores do parâmetro RASTI ou STI médio em função do Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (LA_{eq}) sem AVAC de quinze salas nacionais incluindo, o Teatro Jordão com linha de tendência (linear)

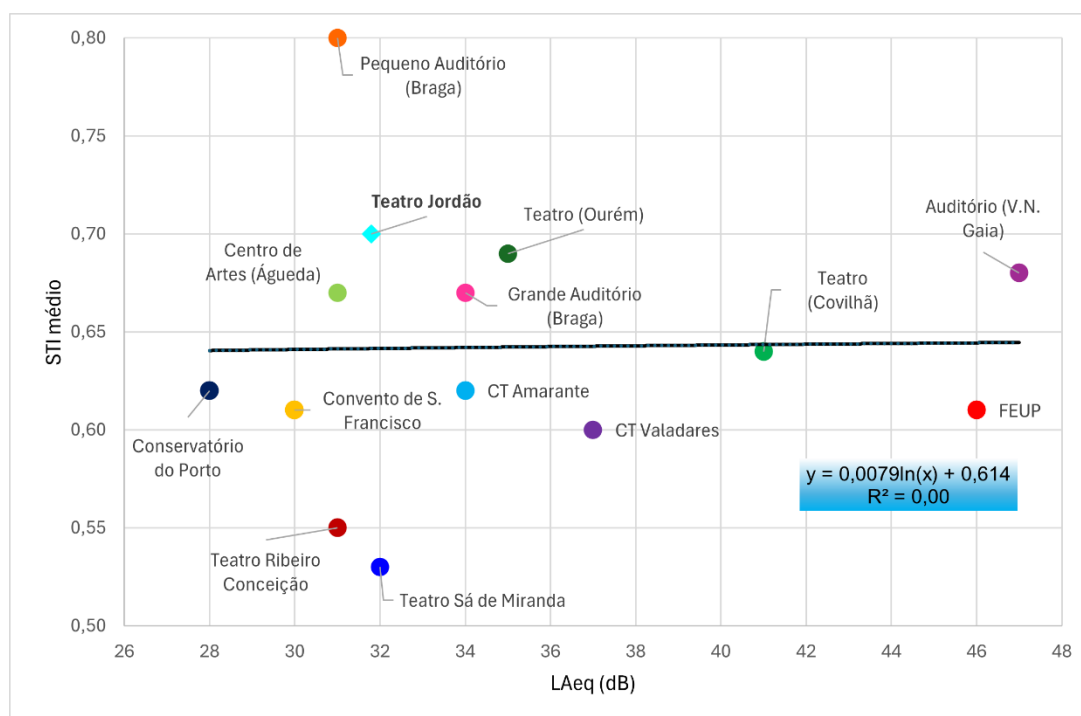


Figura 6.5 – Valores do parâmetro RASTI ou STI médio em função do Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (LA_{eq}) com AVAC de quinze salas nacionais incluindo, o Teatro Jordão com linha de tendência (linear)

6.4. CLARIDADE, DEFINIÇÃO E TEMPO CENTRAL

O Quadro 6.5 apresenta os valores médios dos parâmetros Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}), Tempo Central (TS) e Tempo de Reverberação (TR) nas bandas de 500 e 1000 Hz, obtidos no Teatro Jordão e noutras quatro salas de espetáculo nacionais. A seleção destas salas deve-se ao facto de serem as únicas, entre as analisadas, que disponibilizam os quatro indicadores considerados. Estes dados servem de base à análise estatística desenvolvida neste subcapítulo, apresentada no Quadro 6.6 e complementada pelas Figuras 6.6, 6.7 e 6.8, que ilustram as correlações mais relevantes entre os parâmetros estudados.

Analisando o Quadro 6.5, verifica-se que o Teatro Jordão apresenta o valor mais elevado de C_{80} (8,6 dB), acompanhado de um valor de D_{50} igualmente superior (0,74) e de um TS notoriamente mais curto (40 ms). Estes valores contrastam com os das restantes salas, cujos valores se apresentam mais próximos entre si, tanto em termos de claridade como de distribuição temporal da energia sonora.

O Quadro 6.6 apresenta os valores dos coeficientes de determinação (R^2) obtidos entre os parâmetros C_{80} , D_{50} , TS e TR, calculados com base nos dados médios das cinco salas consideradas. Para cada par de variáveis foi determinado o modelo de regressão que melhor descreve a relação entre os dados observados, tendo sido considerados os ajustes linear, logarítmico e exponencial. O valor de R^2 e o tipo de regressão correspondente encontram-se indicados entre parêntesis.

A Figura 6.6 ilustra a correlação entre C_{80} e TR, que apresentou o valor de R^2 mais elevado da matriz (0,9801), com regressão de tipo exponencial. Verifica-se uma tendência decrescente clara,

em que valores mais baixos de TR estão associados a níveis mais elevados de Claridade. O Teatro Jordão destaca-se neste gráfico, apresentando o menor TR, com 0,70 s, e o valor de C_{80} mais elevado, com 8,6 dB.

A Figura 6.7 representa a relação entre C_{80} e o TS, com R^2 de 0,9795, também com ajuste exponencial. Observa-se novamente uma tendência decrescente: à medida que o Tempo Central diminui, os valores de Claridade aumentam. Este comportamento confirma a forte ligação entre os parâmetros temporais e a percepção subjetiva de nitidez sonora.

Por fim, a Figura 6.8 mostra a correlação entre D_{50} e TS, cujo R^2 foi de 0,9654 com ajuste linear. Este gráfico evidencia uma relação inversa entre dois parâmetros: salas com maior Definição tendem a apresentar Tempos Centrais mais curtos. O Teatro Jordão volta a destacar-se com os valores mais extremos em ambos os eixos, o que reforça a consistência do seu desempenho acústico na concentração da energia sonora no tempo.

Quadro 6.5 – Valores da C_{80} , D_{50} , TS e TR médios (500, 1000 Hz) das cinco salas nacionais incluindo o Teatro Jordão.

Salas de espetáculos	C_{80} (dB)	D_{50}	TS (ms)	TR (s)
Grande Auditório do Conservatório de Música do Porto [47]	4,7	0,63	60	1,30
Teatro Nacional São João (Porto) [52]	5,1	0,61	60	1,20
Teatro Ribeiro Conceição (Lamego) [53]	5,6	0,65	58	1,05
Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo) [54]	4,7	0,60	64	1,20
Teatro Jordão (Guimarães)	8,6	0,74	40	0,70
Média	5,7	0,65	56	1,1
Mediana	5,1	0,63	60	1,2

Quadro 6.6 – Valores de R^2 obtidos entre pares de parâmetros. Entre parêntesis é indicado o tipo de regressão (exp = exponencial; lin = linear; log = logarítmica) correspondente ao maior R^2 obtido entre os três modelos.

Parâmetros	C_{80}	D_{50}	TS	TR
C_{80}	-	-	-	-
D_{50}	0,9616 (exp)	-	-	-
TS	0,9795 (exp)	0,9654 (lin)	-	-
TR	0,9801 (exp)	0,8996 (log)	0,9148 (log)	-

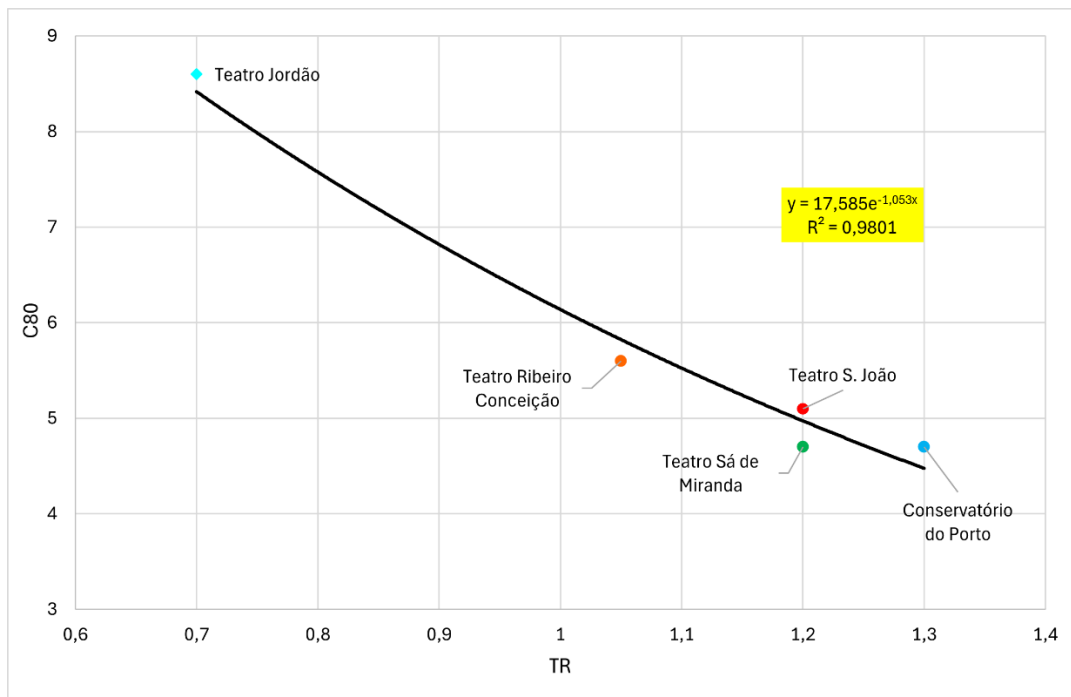


Figura 6.6 - Valores do parâmetro Claridade média em função do Tempo de Reverberação médio das cinco salas nacionais incluindo, o Teatro Jordão com linha de tendência (exponencial)

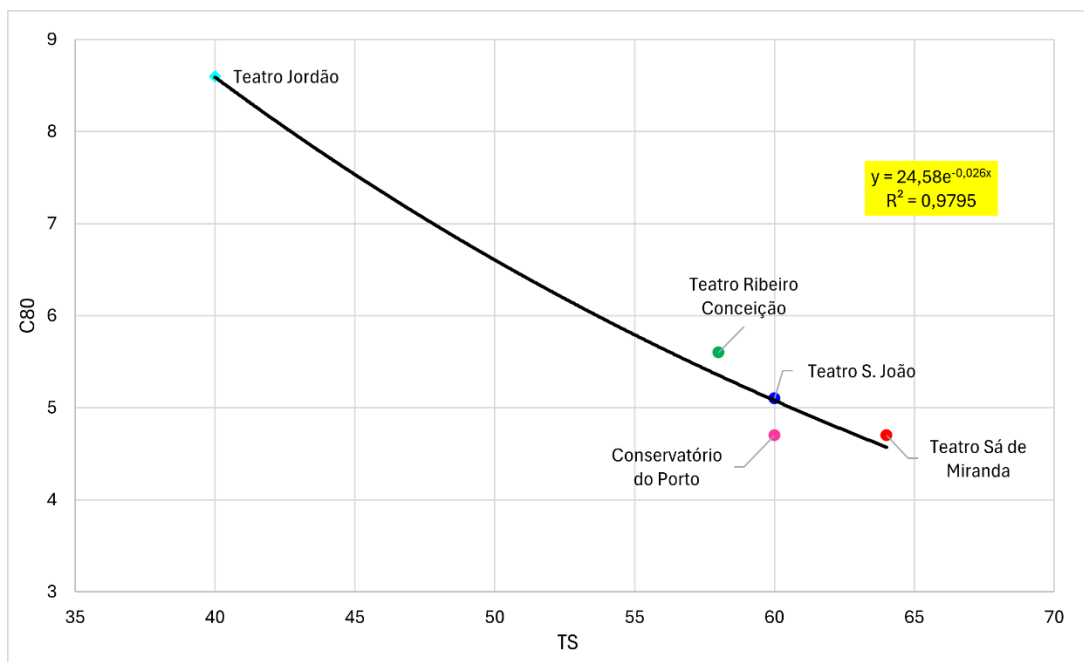


Figura 6.7 – Valores do parâmetro Claridade média em função do Tempo Central médio das cinco salas nacionais incluindo, o Teatro Jordão com linha de tendência (exponencial)

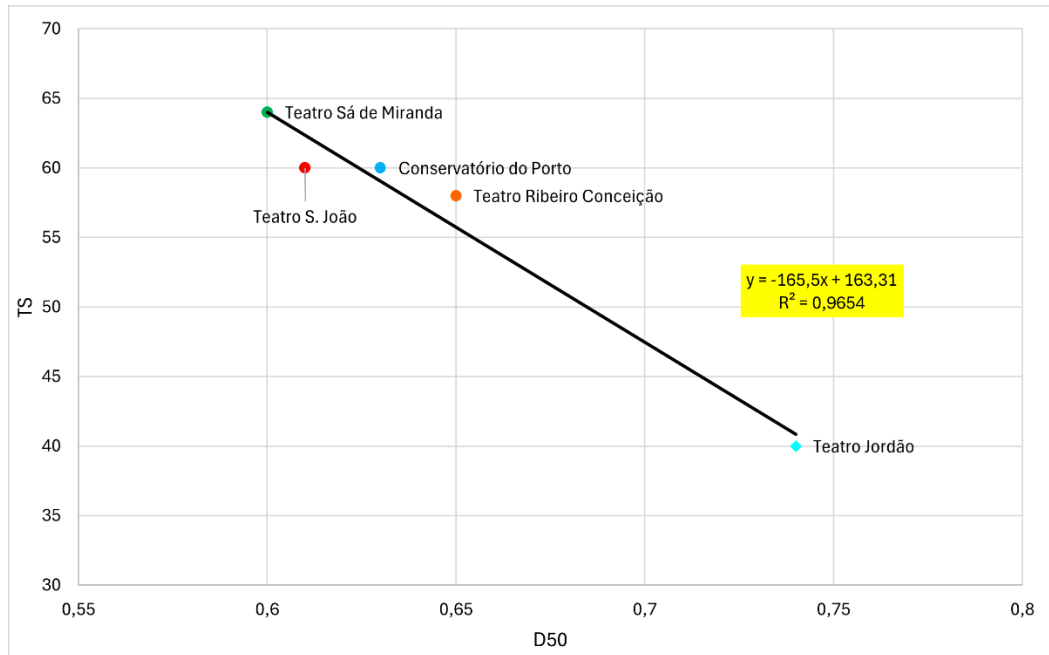


Figura 6.8 – Valores do parâmetro Claridade média em função da Definição média das cinco salas nacionais incluindo, o Teatro Jordão com linha de tendência (linear).

7

CONCLUSÃO

7.1. CONCLUSÕES

Nos últimos anos, a acústica de salas de espetáculo tem assumido uma importância crescente, acompanhando a evolução das exigências culturais, educativas e técnicas da sociedade. A forma como o som é projetado, refletido e absorvido num espaço influencia diretamente a percepção do público, interferindo na inteligibilidade da palavra, na clareza musical e no conforto auditivo. Neste contexto, garantir uma resposta acústica adequada deixou de ser um mero requisito técnico para se tornar um fator determinante na criação de ambiente envolventes, funcionais e acessíveis. A crescente sensibilidade dos utilizadores à qualidade sonora, aliada ao desenvolvimento de soluções construtivas mais eficazes, tem conduzido a abordagens cada vez mais integradas no projeto e na reabilitação de salas de espetáculos, reconhecendo a acústica como parte essencial da experiência global.

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre o comportamento acústico de salas de espetáculo em contexto nacional, foi realizada a caracterização do auditório principal do Teatro Jordão através da realização de ensaios *in situ*. As medições decorreram com e sem o funcionamento do sistema de ventilação e climatização, e foram conduzidas sem recurso a qualquer tipo de reforço eletroacústico, permitindo observar de forma direta o desempenho natural do espaço. Os resultados obtidos foram interpretados com base nos limites definidos pelo Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) e complementados com uma análise comparativa com outras salas nacionais já estudadas, procurando enquadrar os dados obtidos e oferecer uma leitura mais alargada da realidade acústica em equipamentos culturais semelhantes. As avaliações realizadas e dados obtidos no capítulo 5 encontram-se resumidos no quadro 7.1.

No que respeita ao ruído de fundo, os valores medidos no auditório do Teatro Jordão revelam uma resposta adequada às exigências regulamentares. Com o sistema de ventilação e climatização (AVAC) em funcionamento, registou-se um valor médio de L_{Aeq} de 32 dB(A), que após a aplicação do fator de incerteza de 3 dB(A) previsto no RRAE, corresponde a um valor corrigido de 29 dB(A), enquadrando-se dentro do limite máximo admissível de 30 dB(A). Quando o sistema de encontrava desligado, o valor de L_{Aeq} desceu para 25 dB(A), reforçando o silêncio de base da sala em condições de repouso acústico. Adicionalmente, as curvas de incomodidade acústica NC e NR, determinadas com o sistema AVAC ligado, situaram-se respetivamente nos valores NC-18 e NR-21, ambos abaixo dos limites recomendados para pequenos auditórios ($\leq NC-25$ e $\leq NR-25$), o que permite classificar o ambiente como adequado no que diz respeito à percepção do ruído de fundo.

Quadro 7.1 – Resumo dos parâmetros acústicos medidos no Teatro Jordão com as respetivas verificações regulamentares e avaliação funcional

Parâmetros	AVAC	Simbologia	Valor Obtido	Valor com Incerteza RRAE	Valores máximos RRAE	Avaliação	
						Teatro/ Audit.	Música Popular/ Sinfónica
Ruído de Fundo	Com/ Sem	LAeq (dB)	32/25	29/22	30	A	
Curvas de Incomodidade	Com	NC/NR	18/21	-	25	A	
Tempo de Reverberação (TR) (s)	Com/ Sem	[500, 1 kHz] desocupado / 100% ocupação *	0,70	0,45	0,89 (oratória)	A	T/D
<i>Speech Transmission Index (STI)</i>	Com	máximo	0,73	-	-	Boa	
		médio	0,68	-	-	Boa	
		mínimo	0,57	-	-	Suficiente	
	Sem	máximo	0,78	-	-	Excelente	
		médio	0,70	-	-	Boa	
		mínimo	0,63	-	-	Boa	
Claridade (C_{80}) (dB)	Com/ Sem	[500, 1 kHz]	8,2/8,6	-	-	A	A/D
Definição (D_{50})	Com/ Sem	[500, 1 kHz]	0,73/ 0,74	-	-	B	B/D
Tempo Central (TS) (ms)	Com/ Sem	[500, 1 kHz]	41/40	-	-	A	D
Rácio de Baixos	Com/ Sem	BR_TR	1,29	-	-	A	

B- Bom, A- Adequado, D – Desadequado, T – Tolerável. *Previsão

Para o tempo de reverberação obteve-se um valor médio de 0,70 segundos para as frequências de 500 e 1.000 Hz, tanto com a sala desocupada como para a condição de ocupação total prevista. Este valor cumpre o limite regulamentar definido para espaços com função “oratória” e é considerado adequado para teatro. No caso da música popular, embora se situe ligeiramente abaixo do intervalo ideal, pode ainda ser classificado como tolerável. A resposta curta obtida reflete o controlo acústico do espaço, condicionado pela geometria, pelo volume da sala e pelos materiais absorventes aplicados. Pelo contrário, a curta duração da resposta reverberante e a ausência de um sistema de modulação sonora tornam o espaço desadequado para géneros musicais que exigem maior envolvimento, como a música sinfónica, em particular a do período romântico. Nestes casos, a sala revela-se demasiado “seca”, comprometendo a riqueza harmónica e a

imersividade pretendida neste tipo de repertório. A configuração atual privilegia a nitidez e a inteligibilidade em detrimento da espacialidade, o que limita a sua adequação a estas tipologias musicais mais exigentes.

No que respeita à inteligibilidade da palavra, os resultados obtidos no Teatro Jordão revelam um desempenho acústico bastante favorável. O valor do STI médio foi de 0,68 com o sistema AVAC em funcionamento e de 0,70 sem AVAC, classificando-se como “bom” em ambas as situações. Verificou-se ainda que os valores mais elevados ocorreram nas zonas centrais da plateia, enquanto os mais baixos foram registados em pontos mais afastados, embora sempre dentro de intervalos aceitáveis. O parâmetro de definição (D_{50}), associado à perceção da energia sonora útil, apresentou valores médios de 0,74 sem AVAC e 0,73 com AVAC, o que confirma uma boa capacidade do espaço para garantir a compreensão do discurso. A Claridade (C_{80}), que relaciona a energia sonora precoce com a tardia, registou valores médios de 8,6 dB sem AVAC e 8,2 dB com AVAC, posicionando-se acima do limiar mínimo recomendado para teatro e palavra (>6 dB). Por fim, o tempo central (t_s) foi de 40 ms com o sistema desligado e de 41 ms com o sistema ligado, em ambos os casos abaixo do limite de 80 ms, o que indica a adequação da sala para funções que exigem clareza e projeção da palavra.

Numa análise comparativa entre os diferentes pontos ensaiados no auditório do Teatro Jordão, verifica-se que os lugares situados na plateia apresentam melhores condições acústicas no que respeita à inteligibilidade da palavra. Este desempenho está associado à predominância da energia sonora direta e das primeiras reflexões, que se fazem sentir de forma mais intensa nas zonas centrais e frontais da sala. Em contraste, nos pontos localizados no balcão, o som que predomina é o reverberante, refletido por valores ligeiramente mais baixos de Claridade (C_{80}) e mais elevados de Tempo Central (t_s), o que revela uma maior dispersão da energia sonora e uma diminuição da definição do sinal. Os valores de STI e D_{50} acompanham esta tendência, sendo mais elevados na plateia e ligeiramente inferiores no balcão, o que comprova a influência da distância à fonte sonora e da geometria da sala no desempenho acústico em diferentes zonas do auditório.

De forma complementar, a análise comparativa com outras salas de espetáculos, analisadas no Capítulo 6, evidencia a posição sólida do Teatro Jordão no contexto nacional. A sala demonstra um desempenho particularmente consistente nos parâmetros associados à inteligibilidade da palavra, ao controlo da reverberação e à distribuição equilibrada da energia sonora. Esta estabilidade nos resultados obtidos reforça a adequação do espaço às suas funções principais, confirmando a sua vocação para usos predominantemente comunicativos. Em contraste com salas mais reverberantes ou com geometrias complexas, o Teatro Jordão apresenta uma resposta clara, controlada e adaptada ao seu perfil polivalente, revelando-se eficaz para atividades de carácter educativo, performativo e cultural.

Considerando os valores médios obtidos e a sua relação com os intervalos de referência, conclui-se que o Teatro Jordão oferece boas condições para a utilização da palavra, sem recurso a reforço eletroacústico. A predominância da energia precoce relativamente à cauda reverberante confere ao som maior clareza e inteligibilidade, especialmente nas zonas mais próximas do palco. Em termos funcionais, a sala revela-se adequada para atividades como o teatro, conferências e eventos de carácter educativo, e tolerável para a música popular. Pelo contrário, a curta duração da resposta reverberante e a ausência de um sistema de modulação sonora não permitem considerar o espaço como apropriado para géneros musicais mais exigentes, como a música sinfónica ou a ópera. Ainda assim, o desempenho global é algo coerente com o perfil polivalente da sala, evidenciando uma acústica controlada, particularmente favorável à comunicação verbal e ao uso didático e performativo contemporâneo.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A presente dissertação proporcionou uma base sólida para a compreensão do comportamento acústico do auditório principal do Teatro Jordão, permitindo avaliar a sua adequação às funções culturais, pedagógicas e performativas que nele se desenvolvem. No entanto, subsistem algumas possibilidades de aprofundamento que poderão contribuir para uma caracterização mais completa e para a otimização do desempenho acústico da sala. Assim, propõem-se os seguintes desenvolvimentos futuros:

- Realização de medições com a sala ocupada por público real, durante ensaios, aulas ou eventos, de forma a confirmar os valores previstos do tempo de reverberação em contexto real de funcionamento;
- Desenvolvimento de um modelo acústico computacional da sala, que permita simular diferentes cenários de ocupação, alterações nos materiais ou mudança na disposição espacial, facilitando o estudo de intervenções de forma não intrusivas;
- Aplicação de inquéritos de percepção sonora aos utilizadores do auditório, como docentes, estudantes, artistas e público, de modo a recolher dados subjetivos que complementem os resultados objetivos obtidos e permitam avaliar a experiência acústica real;
- Realização de ensaios com a utilização de reforço eletroacústico, permitindo analisar a uniformidade da cobertura sonora e a sua influência na inteligibilidade da palavra e no equilíbrio sonora do espaço;
- Avaliação da resposta acústica em situações com diferentes graus de ocupação parcial, analisando a variação de parâmetros como o tempo de reverberação (TR), o índice de transmissão da palavra (STI) e a clareza (C_{80}), de acordo com o número de utilizadores presentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, A.P. Oliveira. *Acústica Ambiental e de Edifícios*. Edição 8.21, FEUP, 2024.
- [2] R. Brandão, E. Nunes, J. Lima, R. Abreu, V. Pinheiro e J. Alexandre. *Estudo de Acústica das Edificações: Revisão dos Conceitos, Normas e Desafios para Materiais Sustentáveis*. 2023.
- [3] Marshall, S. *Acoustics: The Art of Sound*. Wooden Books, 2024.
- [4] Saúde Acústica (<https://saudeacustica.pt/o-ouvido/>). Acedido em 21 fevereiro 2025.
- [5] Rui, L., Steffanni, M. *Física: Som e Audição*. Física: Som e Audição, 2007.
- [6] Carvalho, R. *Acústica Arquitetônica*. Brasil, 2010.
- [7] Everest, F., Pohlmann, K. *Master Handbook of Acoustics*. McGraw Hill, 2022.
- [8] Fletcher, N., Rossing, T. *The Physics of Musical Instruments*, Springer, 1998.
- [9] Kuttruff, H. *Room Acoustics*. Spon Press, 2000.
- [10] Croce, B. *Acústica básica – PARTE I*. Portal acústica. (<https://portalacustica.info/acustica-basica-parte-i/>). Acedido em 1 março 2025).
- [11] G. Santana, G. *Ondas Sonoras*. Todo Estudo. (<https://www.todoestudo.com.br/fisica/ondas-sonoras>). Acedido em 1 março 2025.
- [12] L. M. Oliveira, L., Veit, E., Schneider, C. *Frequência*. Instituto de Física março 2002. (<https://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/som/freq.html>). Acedido em 3 março 2025.
- [13] Croce, B. “*Conceitos básicos da acústica - PARTE II*.” Portal acústica,” 15 julho 2019. (<https://portalacustica.info/conceitos-basicos-da-acustica-parte-ii/>). Acedido em 2 março 2025.
- [14] Py, S. *Difusão e absorção*. Falando de acústica. 18 agosto 2022. (<https://www.falandodeacustica.com/post/difus%C3%A3o-e-absor%C3%A7%C3%A3o>). Acedido em 3 março 2025.
- [15] Acoustic Sciences Corporation. *Sound absorption*. ASC. (<https://shop.acousticsscience.com/pages/sound-absorption>). Acedido em 4 março 2025.
- [16] NTi. *Medição do tempo de reverberação*. NTi. (<https://www.nti-audio.com/pt/aplicacoes/acustica-de-salas-e-edificios/tempo-de-reverberacao-medicao>). Acedido em 4 março 2025.
- [17] IndiePulseMusic. *Reverberation Time Chart*. Indie Pulse Music. (<https://indiepulsemusic.com/2019/01/05/acoustic-treatments-explained/reverberation-time-chart-rt60-t60-for-different-rooms-and-venues/>). Acedido em 5 março 2025.
- [18] Paya, M. *Isolamento Térmico e Acústico*. Lisboa, Plátano Edições Técnicas, 1999.

- [19] Paula, M. *Como reduzir o ruído de impacto*. Portal Acústica. 23 setembro 2019. (<https://portalacustica.info/como-reduzir-o-ruído-de-impacto-o-famoso-toc-toc-entre-lajes/>). Acedido em 6 março 2025.
- [20] Revista Digital AdNormas. *A classificação do isolamento acústico a ruídos aéreos em edificações*. Revista Digital AdNormas. 3 março 2022. Acedido em 6 março 2025.
- [21] P. J. *Acústica de Edifícios: índices de isolamento a sons de percussão utilizados no espaço europeu*. Revista de Acústica. vol. 36, nº 1 e 2.
- [22] Way, A., Couchman, G. *Acoustic Detailing For Steel Construction*. The Steel Construction Institute. 2008.
- [23] Barron, M. *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Taylor & Francis e-Library, 2009.
- [24] Svantek Academia. *Inteligibilidade da fala*. Svantek. (<https://svantek.com/pt/academia/inteligibilidade-da-fala/>). Acedido em 6 março 2025.
- [25] Sancho, J., L. Galina, L., Reyna, A. *Acustica Arquitectonica y Urbanistica*. Editorial Universitat Politècnica de València, Valência, 2011.
- [26] Long, M. *Architectural Acoustics*. Elsevier, Oxford, 2014.
- [27] Gabicasal, *Face Teatral e Humanística na Grécia Antiga*. wordpress. 26 fevereiro 2016. (<https://hav120151.wordpress.com/2016/02/26/face-teatral-e-humanistica-na-grecia-antiga/>). Acedido em 20 março 2025.
- [28] Fuhr, M. *Arquitetura de teatros e anfiteatros romanos no mundo*. Apaixonados por história Outubro 2006. (<https://apaixonadosporhistoria.com.br/texto/203/arquitetura-de-teatros-e-anfiteatros-no-mundo-romano>). Acedido em 21 março 2025.
- [29] Isvert, A. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Edicions UPC, Barcelona, 1998.
- [30] RRAE. *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios*. Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de junho. Diário da República, 2008.
- [31] em Guimarães. *Teatro Jordão I Garagem Avenida*. em Guimarães. (https://em.guimaraes.pt/geo_artigo-28/teatro-jordao-garagem-avenida). Acedido em 31 março 2025.
- [32] Pitagorasgroup, *Reabilitação do edifício do antigo Teatro Jordão e Garagem Avenida*. Pitagorasgroup. 5 setembro 2024. (<https://www.pitagorasgroup.com/project/teatro-jordao-e-garagem-avenida/?lang=pt-pt>). Acedido em 31 março 2025.
- [33] NVE engenharia e construção. *Inauguração do Teatro Jordão*. NVE. 14 fevereiro 2022. (<https://www.nve.pt/pt/communication/inauguracao-do-teatro-jordao.html>). Acedido em 31 março 2025.
- [34] Neves, A. *Para a história do Teatro Jordão*. Memórias de Araduca, 18 dezembro 2010. (<https://araduca.blogspot.com/2010/12/para-historia-do-teatro-jordao-1.html>). Acedido em 14 maio 2025.

- [35] Google Earth. *Google Earth*. (<https://earth.google.com/web>). Acedido em 2 abril 2025.
- [36] Contacto por email com o Teatro Jordão em 7 março 2025.
- [37] Brüel & Kjær. *Tipo 4720 - Fonte de som de eco de fala*. Brüel & Kjær. (<https://www.bksv.com/pt/transducers/acoustic/sound-sources/echo-speech-source-type-4720>). Acedido em 4 abril 2025.
- [38] Equipment Connection. *Brüel And Kjaer 2260 General Equipment*. Equipment Connection (https://www.testequipmentconnection.com/40808/Brüel_And_Kjaer_2260.php9). Acedido em 4 abril 2025.
- [39] Brüel & Kjær. *Tipo 4231 Calibrador de Nível Sonoro*. Brüel & Kjær. (<https://www.bksv.com/pt/transducers/acoustic/calibrators/sound-calibrator-4231>). Acedido em 4 abril 2025.
- [40] Brüel & Kjær. *TYPE 4189 Microfone de campo livre de ½ polegada, 6,3 Hz a 20 kHz, pré-polarizado*. Brüel & Kjær. (<https://www.bksv.com/pt/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4189>). Acedido em 4 abril 2025.
- [41] NTI Audio. *Noise Curves*. 2023.
- [42] Barbosa, S. *Caracterização Acústica de Grandes Auditórios. O caso do auditório da FEUP*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 2012.
- [43] Hirayama, A. *Caracterização acústica do Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 2023.
- [44] Abelha, H. *Caracterização Acústica do Centro de Artes de Águeda*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 2022.
- [45] Prada, P. *Caracterização acústica do Renovado Cineteatro de Amarante*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [46] Silva, D. *Caracterização acústica do CineTeatro Eduardo Brazão*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [47] Pinto, J. *Caracterização Acústica do Auditório do Conservatório de Música do Porto*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2024.
- [48] Rocha, G. *Caraterização acústica do centro de congressos do Altice Fórum Braga*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2022.
- [49] Miranda, T. *Caracterização Acústica do Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra)*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 2023.
- [50] Tavares, P. *Caracterização acústica do Teatro Municipal da Covilhã*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.

- [51] Vieira, F. *Caracterização acústica do Teatro Municipal de Ourém*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [52] Mocarzel, H. *Caracterização acústica do Teatro Nacional São João (Porto)*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2024.
- [53] Gomes, M. *Caracterização acústica do Teatro Ribeiro Conceição*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2025.
- [54] Forte, A. *Caracterização acústica do Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo)*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2024.