U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DO TEATRO SÁ DA BANDEIRA (PORTO)

RAFAEL MACHADO SOUSA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

FEVEREIRO DE 2026

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2025/2026

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ 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

✉ feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil – 2025/2026 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2026.*

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.

A meus Pais, Família e Amigos

"O futuro depende do que fazemos no presente."
Mahatma Gandhi

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação representa a concretização de um percurso desafiante, marcado por momentos de grande exigência, aprendizagem e crescimento pessoal e académico. Este trabalho não teria sido possível sem o apoio, incentivo e confiança de diversas pessoas, às quais expresso o meu profundo agradecimento.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor António Pedro Oliveira de Carvalho, pela sua disponibilidade constante, pela orientação rigorosa e esclarecedora e pela paciência demonstrada ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. A sua dedicação e capacidade de motivação foram fundamentais para a conclusão desta dissertação.

Dirijo igualmente um sincero agradecimento ao Engenheiro António Eduardo Batista da Costa, pelo suporte técnico imprescindível, pela competência demonstrada e pela permanente disponibilidade para esclarecer dúvidas e auxiliar em diferentes fases deste projeto. O seu contributo foi determinante para a concretização deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos, deixo o meu reconhecimento pelo apoio ao longo destes últimos cinco anos, pelas discussões construtivas, pelas palavras de incentivo nos momentos de maior dificuldade e pela amizade que tornou este percurso mais leve e significativo.

Agradeço profundamente à minha família, em particular à minha mãe e ao meu irmão, pelo amor, compreensão e apoio incondicional em todas as etapas desta caminhada.

Um agradecimento muito especial é dirigido ao meu pai, cuja memória me acompanhou ao longo de todo este processo. Embora já não esteja presente fisicamente, foi e continuará a ser uma referência de força, dedicação e integridade. A concretização deste objetivo representa também a realização de um sonho que sempre partilhei. Este trabalho é, em grande parte, para ele e por ele.

Por fim, agradeço à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, ao Teatro Sá da Bandeira e a todas as entidades envolvidas que tornaram possível a realização desta dissertação, pela colaboração e condições proporcionadas ao desenvolvimento deste estudo.

A todos, o meu sincero obrigado.

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo contribuir para a compreensão da complexidade acústica das salas de espetáculo, uma vez que, por vezes, este tipo de edificação não se encontra devidamente projetado, do ponto de vista acústico, para o conjunto de atividades que nela se desenvolvem. Para tal, é fundamental identificar quais as necessidades acústicas associadas a estes espaços, dado que diferentes utilizações exigem características específicas. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo a caracterização acústica do Teatro Sá da Bandeira, localizado na cidade do Porto, visando a avaliação das suas condições de inteligibilidade da palavra e da qualidade sonora para música. A análise acústica de salas de espetáculo assume particular relevância na otimização das condições de audição, influenciando diretamente a experiência dos espectadores e o desempenho dos artistas.

Inaugurado em 1870, o Teatro Sá da Bandeira foi, ao longo da sua história, alvo de diversas intervenções e remodelações, que contribuíram para a configuração atual do espaço. O teatro acolhe uma grande diversidade de eventos, como teatro, dança, música e cinema, sendo ainda possível receber conferências, congressos e outras iniciativas de natureza semelhante. A caracterização acústica desenvolvida nesta dissertação incide sobre a sala do teatro.

Esta dissertação inicia-se com um capítulo dedicado à apresentação de conceitos fundamentais de acústica, definições e parâmetros utilizados nos ensaios experimentais. Entre os conceitos abordados incluem-se o Tempo de Reverberação (TR), absorção sonora, inteligibilidade da palavra, Tempo Central (TS), Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}) e o Speech Transmission Index (STI), entre outros. As medições acústicas foram realizadas em diferentes pontos da sala, com o sistema AVAC desligado e ligado.

Procedeu-se à caracterização arquitetónica e geométrica do Teatro Sá da Bandeira. Na fase experimental foram realizadas medições *in situ* e apresentada a análise dos resultados obtidos, confrontando-os com os valores recomendados na regulamentação nacional aplicável (RRAE), bem como com valores de referência considerados ideais para diferentes tipos de utilização, com particular enfoque na palavra. Adicionalmente, os resultados foram comparados com dados disponíveis para outras salas de espetáculo, nacionais e internacionais, com o objetivo de identificar os principais pontos fortes e as limitações do comportamento acústico do teatro em estudo.

Através da análise dos resultados das medições e em resumo obtiveram-se os seguintes valores médios:

- Nível sonoro equivalente do ruído de fundo com o sistema de AVAC desligado (L_{Aeq}) = 24 dB e ligado (L_{Aeq}) =42 dB;
- Tempo de Reverberação (TR [500, 1.000 Hz]) = 0,84 s;
- Rácio de Baixos (BR_TR) = 1,15;
- *Speech Transmission Index* (*STI*) mínimo, médio e máximo = 0,55; 0,62 e 0,72;
- Claridade (C_{80} [500, 1.000 Hz]) = 6,2 dB e 6,0 com AVAC ligado;
- Definição (D_{50} [500, 1.000 Hz]) = 0,64;
- Tempo Central (TS [500, 1.000 Hz]) = 56 ms.

O Teatro Sá da Bandeira foi comparado com dezanove salas nacionais, verificando-se que apresenta um tempo de reverberação reduzido (TR igual a 0,85 s desocupado e 0,83 s para ocupação total

prevista), níveis de claridade elevados (6,0 a 6,2 dB) e um tempo central igualmente baixo (TS igual a 56 a 57 ms), evidenciando uma forte predominância de energia sonora precoce. O índice de transmissão da palavra revelou valores médios de STI próximos de 0,61, correspondendo a uma inteligibilidade globalmente boa. Estes resultados indicam que o Teatro Sá da Bandeira se encontra particularmente vocacionado para atividades baseadas na palavra, como teatro e conferências, podendo, contudo, revelar algumas limitações para música não amplificada ou sinfónica, dada a curta duração do campo reverberante. De forma geral, a sala apresenta um desempenho acústico controlado e coerente com os seus usos contemporâneos predominantes.

Este trabalho insere-se no domínio da análise acústica de salas de espetáculo em Portugal, reforçando a importância da caracterização do desempenho sonoro em edifícios culturais e contribuindo com informação relevante para a preservação e adaptação destes espaços no contexto nacional.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Teatro, Tempo de Reverberação, Inteligibilidade da palavra.

ABSTRACT

This dissertation aims to contribute to the understanding of the acoustic complexity of performance halls, since these buildings are often not adequately designed, from an acoustic point of view, for the range of activities that take place within them. To this end, it is essential to identify the acoustic requirements associated with such spaces, as different uses demand specific characteristics. In this context, the present work focuses on the acoustic characterization of Teatro Sá da Bandeira, located in the city of Porto, with the purpose of assessing its conditions for speech intelligibility and sound quality for music. The acoustic analysis of performance spaces is of particular importance for the optimisation of listening conditions, directly influencing both audience experience and artists' performance.

Inaugurated in 1870, Teatro Sá da Bandeira has undergone several interventions and refurbishments throughout its history, which have contributed to its current configuration. The theatre hosts a wide variety of events, such as theatre, dance, music and cinema, and can also accommodate conferences, congresses and other similar initiatives. The acoustic characterization developed in this dissertation focuses on the main hall of the theatre.

The dissertation begins with a chapter dedicated to fundamental concepts of acoustics, definitions and the parameters used in the experimental tests. Among the addressed concepts are Reverberation Time (RT), sound absorption, speech intelligibility, Centre Time (TS), Clarity (C_{80}), Definition (D_{50}) and Speech Transmission Index (STI), among others. Acoustic measurements were carried out at different positions in the hall, both with the AVAC system switched off and on.

Subsequently, the architectural and geometric characterization of Teatro Sá da Bandeira was performed. In the experimental phase, in situ measurements were conducted and the corresponding results were then analysed, comparing them with the values recommended in the applicable national regulation (RRAE), as well as with reference values considered ideal for different types of use, with particular emphasis on speech. Additionally, results were compared with data available for other national and international performance spaces, with the aim of identifying the main strengths and limitations of the acoustic behaviour of the theatre under study.

By analyzing the results of the measurements, the following average values were obtained:

- Equivalent sound level of background noise (L_{Aeq}) = 24 dB, with AVAC on (LAeq) = 42 dB;
- Reverberation time (RT [500, 1,000 Hz]) = 0,85 s;
- Bass ratio (BR_TR) = 1,15;
- Speech Transmission Index (STI) minimum, average and maximum = 0.55; 0.62 and 0,72;
- Clarity (C_{80} [500, 1,000 Hz]) = 6.2 dB, and 6.0 dB with AVAC on;
- Definition (D_{50} [500, 1,000 Hz]) = 0.64;
- Central Time (TS [500, 1,000 Hz]) = 56 ms, and 57 ms with AVAC on.

Teatro Sá da Bandeira was compared with nineteen national halls. It was found to present a relatively low reverberation time (RT equal to 0.85 s unoccupied and 0.83 s for the predicted full occupied condition), high clarity values (6.0 to 6.2 dB) and similarly low centre time values (TS equal to 56 to 57 ms), evidencing a strong predominance of early sound energy. The speech transmission index showed average values close to 0.61, corresponding to globally good intelligibility. These results indicate that Teatro Sá da Bandeira is particularly suited to speech-

based activities such as theatre and conferences, although it may present limitations for unamplified or symphonic music due to the short reverberant tail. Overall, the hall displays a controlled acoustic performance, consistent with its predominant contemporary uses.

This work is framed within the field of acoustic analysis of performance venues in Portugal, reinforcing the importance of characterising the sonic performance of cultural buildings and contributing relevant information for the preservation and adaptation of these spaces in the national context.

KEYWORDS: Acoustics, Theater, Reverberation time, Speech Intelligibility.

Índice geral

AGRADECIMENTOS……...I
RESUMO……..III
ABSTRACT……..……....*V*
ÍNDICE DE FIGURAS……...……...……XI
ÍNDICE DE QUADROS……XVII
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS……XIX

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS 1
1.2 ESTRUTURA DA TESE 2

2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES 3
2.1 INTRODUÇÃO 3
2.1.1 NATUREZA DO SOM 3
2.1.2 SISTEMA AUDITIVO HUMANO 4
2.2 CONCEITOS TEÓRICO BÁSICOS 5
2.2.1 ANÁLISE DA PRESSÃO 5
2.2.2 FREQUÊNCIA 9
2.2.3 ANÁLISE DO TEMPO 13
2.3 ABSORÇÃO SONORA 14
2.4 TEMPO DE REVERBERAÇÃO 17
2.4.1 DEFINIÇÃO 17
2.4.2 CÁLCULO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO 18
2.4.3 INFLUÊNCIA NA INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA E NO CONFORTO ACÚSTICO 18
2.5 ISOLAMENTO SONORO 19
2.5.1 DEFINIÇÃO E CONCEITOS 19
2.5.2 RUÍDO DE FUNDO E INCOMODIDADE 20
2.5.3 CURVAS DE INCOMODIDADE (NC E NR) 21
2.6 INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA 22
2.6.1 CONCEITOS 22
2.6.2 PARÂMETROS DE MEDIDA 23
2.7 ACÚSTICA ARQUITETÓNICA 25
2.7.1 INTRODUÇÃO 25
2.7.2 INTERLIGAÇÃO SOM/ARQUITETURA 25
2.7.3 ACÚSTICA VARIÁVEL 28
2.7.4 PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJETIVOS 30
2.7.5 PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJETIVOS 33

3 ESTADO DE ARTE 35
3.1 CONTEXTO HISTÓRICO DAS SALAS DE ESPETÁCULO 35

3.1.1 PERÍODO GREGO E ROMANO 35
3.1.2 PERÍODO DO RENASCIMENTO 37
3.1.3 PERÍODO BARROCO 38
3.1.4 PERÍODO NEOCLÁSSICO E O INÍCIO DA ACÚSTICA CIENTÍFICA 39

3.2 EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS 41
3.2.1 PARÂMETROS GERAIS 41
3.2.2 GEOMETRIA E CONFIGURAÇÃO ESPACIAL DAS SALAS DE ESPETÁCULO 41
3.2.3 SALAS PARA A MÚSICA 42
3.2.4 SALAS MULTIUSOS 44
3.2.5 PROSCÉNIO 45

3.3 LEGISLAÇÃO PORTUGUESA 46

4 METODOLOGIA 49
4.1 TEATRO SÁ DA BANDEIRA 49
4.1.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO 49
4.1.2 CARACTERIZAÇÃO ARQUITETÓNICA E ORGANIZACIONAL DO AUDITÓRIO DO TEATRO SÁ DA BANDEIRA 51
4.1.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DO AUDITÓRIO 54

4.2 METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS 56
4.2.1 PARÂMETROS MEDIDOS 56
4.2.2 EQUIPAMENTOS 57
4.2.3 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS 58

5 RESULTADOS 61
5.1 INTRODUÇÃO 61
5.2 RUIDO DE FUNDO 61
5.3 CURVAS DA INCOMODIDADE (NC/NR) 68
5.4 TEMPO DE REVERBERAÇÃO 68
5.4.1 MEDIÇÕES EM SITU 68
5.4.2 PREVISÃO PARA SALA OCUPADA 72

5.5 RÁCIOS DE BAIXOS 73
5.6 *STI* (*SPEECH TRANSMISSION INDEX*) 74
5.7 DEFINIÇÃO (D_{50}) 77
5.8 CLARIDADE (C_{80}) 82
5.9 TEMPO CENTRAL(TS) 85

6 COMPARAÇÃO COM OUTROS TEATROS 91
6.1 INTRODUÇÃO 91
6.2 TEMPO DE REVERBERAÇÃO 93
6.3 CLARIDADE (C_{80}) 97
6.4 TEMPO CENTRAL (TS) 99
6.5 DEFINIÇÃO (D_{50}) 102
6.6 SPEECH TRANSMISSION INDEX (STI) /RAPID SPEECH TRANSMISSION INDEX (RASTI) 104

7 CONCLUSÃO 109
7.1 CONCLUSÕES 109
7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 111

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema do ouvido humano [3].....4
Figura 2.2 – Propagação do som (Zonas de Compressão e Zonas de Rarefação) [1]…….....5
Figura 2.3 – Inter-relação entre a potência sonora (W), pressão (p) e intensidade (I)[1].....7
Figura 2.4 – Pressão sonora e nível de pressão sonora [8].....8
Figura 2.5 – Exemplos de gamas de frequências [1].....9
Figura 2.6 – Escala de frequências do som [9].....10
Figura 2.7 – Definição de comprimento de onda [10].....11
Figura 2.8 – Descrição das curvas de Ponderação (Filtros A, B, C e D) [1]….....13
Figura 2.9 – Mecanismo de absorção sonora [11]…….15
Figura 2.10 – Comportamento em frequência dos três tipos de materiais [1]……17
Figura 2.11 – Definição do tempo de reverberação (esquerda valor teórico e obtido por extrapolação do declive, direita) [1]……...…….....18
Figura 2.12 – Transmissão de ruído aéreo (esquerda) e ruído de percussão (direita) [1]……...20
Figura 2.13 – Transmissão sonora direta e transmissão sonora marginal [15]…….....20
Figura 2.14 – Descrição das Curvas NR [16]……22
Figura 2.15 – Chegada de um som direto e sons refletidos a um recetor [19 *apud 14*]……..26
Figura 2.16 – Exemplo de reflectograma com eco [1]…….27
Figura 2.17 – Exemplo de correção de ecos por absorção (em cima) e por alteração do ângulo de reflexão (em baixo) [1]……27
Figura 2.18 – Exemplo de disco voadores (Royal Albert Hall, Londres) [1]…….28
Figura 2.19 – Efeito de difusão do som [19]……28
Figura 2.20 – Mecanismos de absorção variável [20 *apud* 32]……..…...29
Figura 2.21 – Exemplo da variação de volume para diferentes usos [20 *apud* 32]……30
Figura 3.1- Teatro Epidauro, Grécia [21]…….35
Figura 3.2 – Teatro de Orange, França (séc. I d.C.) [25]……...36
Figura 3.3 – Teatro Olímpico de Vicenza, Itália (1580–1585) [30]……..37

Figura 3.4 – Teatro Farnese de Parma, Itália (1618) [32]…….....38

Figura 3.5 – Teatro alla Scala, Milão (1778) [22]…….39

Figura 3.6 – Interior do Teatro alla Scala, Milão [22]……..40

Figura 3.7 – Interior do Teatro Nacional de São Carlos, Lisboa (1793) [38]…….....41

Figura 3.8 – Tipologias de palcos mais comuns em auditórios de teatro [21]……...42

Figura 3.9 – Formas típicas de salas de concerto: a) Shoebox, b) Leque, c) hexágono, d) ferradura……...43

Figura 3.10 – Distribuição das reflexões sonoras em torno do proscénio e do palco, ilustrando o papel dos painéis suspensos e das torres acústicas na projeção do som (adaptado de Construction Canada, 2024) [40]…….....46

Figura 4.1 – Bernardo de Sá Nogueira de Figueiredo, Marquês de Sá da Bandeira [44]……...50

Figura 4.2 – Localização do Teatro Sá da bandeira [47]……...51

Figura 4.3 – Planta da Sala do Teatro Sá da Bandeira [48]……53

Figura 4.4 – Vista do segundo balcão [Foto do autor]…….53

Figura 4.5 – Camarote lateral perto do proscénio [Foto do autor]…….54

Figura 4.6 – Revestimento têxtil das paredes [Foto do autor]……...55

Figura 4.7 – Cadeiras estofadas em tecido (lado esquerdo), Painéis de madeira (lado direito) [Fotos do autor]…….....56

Figura 4.8 – Equipamentos e acessórios utilizados nas medições: A – Fonte Sonora Brüel & Kjaer 4720, B – Sonómetro Brüel & Kjær 2260, C – Calibrador de microfone Brüel & Kjær 4231, D – Microfone de 13 mm Brüel & Kjær 4189 e E- Tripé portátil Brüel & Kjær UA0049 [49], [50], [51], [52],[53]……...57

Figura 4.9 – Controlo das medições acústicas via software DIRAC [Foto do autor]…….....59

Figura 4.10 – Planta do Teatro Sá da Bandeira com a representação dos pontos escolhidos para todas as medições [adaptado de 48]…….....60

Figura 5.1 – Valores dos níveis de pressão sonora dos três pontos (RF1 a RF3) do ruído de fundo (dB) sem o filtro A em bandas de frequência de 1/3 de oitava do Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC desligado…….....62

Figura 5.2 – Valores dos níveis de pressão sonora nos três pontos (RF1 a RF3) do ruído de fundo com o filtro A em bandas de frequência de 1/3 de oitava (25 a 20.000 Hz) do Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC desligado…….65

Figura 5.3 – Valores dos níveis de pressão sonora dos três pontos (RF1 a RF3) do ruído de fundo (dB) sem o Filtro A em bandas de frequência de 1\1 oitava do Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC desligado…….....65

Figura 5.4 – Valores dos níveis de pressão sonora dos três pontos (RF1 a RF3) do ruído de fundo (dB) sem o filtro A em bandas de frequência de 1/1 de oitava do Teatro Sá da Bandeira, com o sistema AVAC ligado.……..…66

Figura 5.5 – Valores dos níveis de pressão sonora dos três pontos (RF1 a RF3) do ruído de fundo (dB) sem o filtro A em bandas de frequência de 1/3 de oitava do Teatro Sá da Bandeira, com o sistema AVAC ligado……..66

Figura 5.6 – Valores médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) com e sem o sistema de AVAC em funcionamento para bandas de frequência de 1/3 de oitava……67

Figura 5.7 – Valores do tempo de reverberação para os sete pontos medidos (P1, P4, P7, P8, P10, P11, P13, P15 e P16) em bandas de frequência de 1/3 oitava do Teatro Sá da Bandeira……...……....71

Figura 5.8 – Valores do tempo de reverberação para os sete pontos medidos em bandas de frequência de 1/1 oitava do Teatro Sá da Bandeira……...……71

Figura 5.9 – Comparação dos valores do parâmetro STI (Speech Transmission Index) com AVAC desligado para os nove pontos medidos (P1 a P16) e a média no Teatro Sá da Bandeira……...……75

Figura 5.10 – Comparação dos valores do parâmetro STI (Speech Transmission Index) com AVAC ligado para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) e a média no Teatro Sá da Bandeira……...……....76

Figura 5.11 – Comparação dos valores da Definição (D50) [500, 1k Hz] para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) e a média, no Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC desligado……...……...78

Figura 5.12 – Valores do parâmetro Definição (D50) para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) em bandas de frequência de 1/1 oitava no Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC desligado……...……...79

Figura 5.13 – Comparação dos valores da Definição (D50) [500, 1k Hz] para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) e a média, no Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC ligado……...…….80

Figura 5.14 – Valores do parâmetro Definição (D50) para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) em bandas de frequência de 1/1 oitava e a média no Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC ligado……...……80

Figura 5.15 – Valores do parâmetro Definição (D50) para a média entre as frequências 500 e 1000 Hz sem AVAC e com AVAC no teatro Sá da Bandeira, para os dezasseis pontos medidos……...…….80

Figura 5.16 – Valores do parâmetro Claridade (C80) para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) em bandas de frequência de 1/1 oitava do Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC desligado……...……...82

Figura 5.17 – Valores do parâmetro Claridade (C80) para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) em bandas de frequência de 1/1 oitava do Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC ligado……..…….85

Figura 5.18 – Valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) em bandas de frequência de 1/1 oitava do Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC desligado…….....88

Figura 5.19 – Valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) em bandas de frequência de 1/1 oitava do Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC ligado……...88

Figura 6.1 – Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] em função do Volume das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira com linha de tendência (logarítmica)…….....95

Figura 6.2 – Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] em função do Número de lugares das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira com linha de tendência (Linear)…….95

Figura 6.3 – Valores da Claridade (C80) [500, 1.000 Hz] em função do Volume das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira com linha de tendência (linear)……..……..…….98

Figura 6.4 – Valores da Claridade (C80) [500, 1.000 Hz] em função do Número de lugares das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira com linha de tendência (linear) ……..……98

Figura 6.5 – Valores da Tempo Central (TS) [500, 1.000 Hz] em função do Volume das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira com linha de tendência (exponencial)…….....…101

Figura 6.6 – Valores da Tempo Central (TS) [500, 1.000 Hz] em função do Número de lugares das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira com linha de tendência (exponencial)……..……...……101

Figura 6.7 – Valores da Definição (D50) [500, 1.000 Hz] em função do Volume das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira com linha de tendência (linear) …….……..…103

Figura 6.8 – Valores da Definição (D50) [500, 1.000 Hz] em função do Número de lugares das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira com linha de tendência (linear)……..…….103

Figura 6.9 – Valores do Rasti ou STI em função do tempo de reverberação médio (TR [500, 1.000 Hz]) (s) para as dezanove salas e do Teatro Sá da Bandeira, com uma linha de tendência (potência)…….……..105

Figura 6.10 – Valores do Rasti ou STI em função do nível sonoro equivalente do ruído de fundo (LAeq com AVAC desligado) para as dezanove salas e do Teatro Sá da Bandeira, com uma linha de tendência (logarítmica)…….……..……107

Figura 6.11 – Valores do tempo de reverberação médio (TR [500, 1.000 Hz]) para as dezanove salas e do Teatro Sá da Bandeira em função do nível sonoro equivalente do ruído de fundo (LAeq), com uma linha de tendência (logarítmica).……...……..…107

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 audível [1]……...…13

Quadro 2.2- Valores de coeficiente de absorção sonora (α) de alguns materiais ou sistemas……16

Quadro 2.3 – Valores ideais para o Tempo de Reverberação em função do tipo de utilização (adaptado de [1])……..19

Quadro 2.4 – Valores máximos de NC para algumas situações [1]…….……..21

Quadro 2.5 – Variabilidade da emissão de voz entre as vogais e consoantes (adaptado de [1])…….……..23

Quadro 2.6 – Perceção subjetiva para a inteligibilidade e privacidade da palavra em função dos valores numéricos de AI [1]…….24

Quadro 2.7 – Valores para a Definição (D50) para algumas situações [20 *apud* 34]…….31

Quadro 2.8 – Valores ideais de C80 para diversos parâmetros acústicos objetivos em função do tipo de utilização (adaptado de [1])…….....32

Quadro 4.1 – Dimensões e Volume do Auditório…….52

Quadro 5.1 – Valores dos Níveis de Pressão Sonora medidos para bandas de frequência de 1/3 de oitava, nível de pressão sonora equivalente (Leq), nível sonoro equivalente (LAeq), média logarítmica e Δ*L* medidos no Teatro Sá da Bandeira com o sistema AVAC desligado.....63

Quadro 5.2 – Valores dos Níveis de Pressão Sonora medidos para bandas de frequência de 1/3 de oitava, nível de pressão sonora equivalente (Leq), nível sonoro equivalente (LAeq), média logarítmica e Δ*L* medidos no Teatro Sá da Bandeira com o sistema AVAC desligado…….63

Quadro 5.3 – Avaliação regulamentar (RRAE) do nível sonoro contínuo equivalente no interior do Teatro Sá da Bandeira…….....67

Quadro 5.4 – Valores do parâmetro tempo de reverberação (*T*30) em bandas de 1/3 de oitava de 100 a 5.000 Hz para os pontos P1 a P16 medidos do Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão…….....69

Quadro 5.5 – Valores ideias para diversos parâmetros acústicos objetivos em função do tipo de utilização [1]……...…….71

Quadro 5.6 – Parâmetros utilizados para a previsão do tempo de reverberação com a sala a 100% ocupada do Teatro Sá da Bandeira……72

Quadro 5.7 – Cálculo do novo tempo de reverberação com a sala a 100% ocupada para bandas de 1/1 oitava de 250 a 4.000 Hz do Teatro Sá da Bandeira……..……..73

Quadro 5.8 – Valores do parâmetro Rácio de Baixos (BR_TR) em bandas de 1/1 oitava nos nove pontos ensaiados (P1 a P16)…….……73

Quadro 5.9 – Valores médios do parâmetro Rácio de Baixos (BR-TR) para os pontos P1 a P16 e a respetiva comparação dos valores ideais de Rácio de baixos de acordo com o Tempo de reverberação, no Teatro Sá da Bandeira……...……74

Quadro 5.10 – Valores do parâmetro STI (Speech Transmission Index) sem uso do AVAC para os pontos P1 a P16 medidos do Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão……....75

Quadro 5.11 – Valores do parâmetro STI (Speech Transmission Index), com uso do AVAC, para os pontos P1 a P16 medidos do Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão……....77

Quadro 5.12 – Valores do parâmetro Definição ($D50$) para os pontos P1 a P16 medidos no Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão, sem sistema de AVAC ligado……..……..78

Quadro 5.13 – Valores do parâmetro Definição ($D50$) para os pontos P1 a P16 medidos no Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão, com sistema de AVAC ligado……..……..79

Quadro 5.14 – Valores do parâmetro Claridade ($C80$) (dB) para os pontos P1 a P16 medidos no Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão, com sistema de AVAC desligado……..82

Quadro 5.15 – Valores do parâmetro Claridade ($C80$) (dB) para os pontos P1 a P16 medidos no Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão, com sistema de AVAC ligado…….83

Quadro 5.16 – Verificação dos valores ideais para o parâmetro Claridade (C80) em função do uso da sala do Teatro Sá da Bandeira……..84

Quadro 5.17 – Valores do parâmetro Tempo Central (TS) (ms) para os dezasseis pontos (P1 a P16) medidos do Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão, com sistema de AVAC desligado……...……...86

Quadro 5.18 – Valores do parâmetro Tempo Central (TS) (ms) para os dezasseis pontos (P1 a P16) medidos do Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão, com sistema de AVAC ligado……..…….87

Quadro 5.19- Valores ideais para o Tempo Central (TS) para palavra e música[1]……..……89

Quadro 6.1- Comparação das diversas funções das vinte salas nacionais…….92

Quadro 6.2 – Valores do Volume, Número de lugares e TR médio (500, 1.000 Hz) das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira……...…….94

Quadro 6.3 – Verificação dos valores ideais do parâmetro Tempo de Reverberação médio [500, 1.000 Hz] de acordo com vários tipos de função de vinte salas nacionais…….96

Quadro 6.4 – Valores da Claridade ($C80$) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz e o valor médio……..…….97

Quadro 6.5 – Valores do Tempo Central (TS) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz e o valor médio…….100

Quadro 6.6 – Valores da Definição (D50) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz e o valor……..……103

Quadro 6.7 – Valores do Volume, Número de lugares, RASTI/STI médio e Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (LAeq) sem e com AVAC das vinte salas nacionais incluindo o Sá da Bandeira……...…….……106

Quadro 8.1 – Resumo dos parâmetros acústicos medidos do teatro Sá da Bandeira com as respetivas verificações regulamentares e avaliação funcional……..……...110

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A – Absorção sonora equivalente (m²)

AC – Articulation Class

AI - Articulation Index (Índice de Articulação)

AVAC- Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado

BR – Bass Ratio (Rácio de Baixos)

B – Largura de banda (Hz)

c – Celeridade (m/s)

C_{80} – Claridade (dB)

α – Coeficiente de absorção sonora

α – Coeficiente de absorção sonora do material

λ – Comprimento de onda (m)

$K-$ Constante

K_{tonal} – Penalidade RGR (3 dBA)

D_{50} – Definição

r – Distância (m)

EDT – Early Decay Time (Tempo de Decaimento Curto) (s)

E – Energia (J)

FS – Fonte Sonora

F – Intensidade audível absoluta (*fone*)

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 – Initial Time Delay Gap (ms)

$I-$ Intensidade Sonora (W/m²)

I_0 – Intensidade Sonora de Referência (W/m²)

ρ – Massa Volúmica (kg/m³)

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 continuo equivalente (dB)

NC – Noise Criteria

NR – Noise Rating

p – Pressão (Pa)

P_{at} – Pressão atmosférica (Pa)

p_0 – Pressão de Referência (Pa)

RASTI – Rapid Speech Transmission Index

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

S – Intensidade audível relativa (*sone*)

S – Superfície real do material (m²)

SIL – Speech Interference Level

STI – Speech Transmission Index

T − Temperatura (K)

TS – Tempo central (ms)

TR – Tempo de reverberação (s)

W − Potência Sonora (W)

W_0 – Potência Sonora de Referência (W)

θ – Temperatura (ºC)

V – Volume do compartimento (m³)

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

A acústica, enquanto ramo da Física, dedica-se ao estudo da propagação e receção de ondas sonoras, bem como aos seus efeitos nos diferentes ambientes e na perceção humana. O som, além de desempenhar um papel essencial na comunicação, na música e no teatro, assume também uma relevância central no âmbito da arquitetura, onde a interação entre a forma construída e o campo sonoro determina a qualidade da experiência auditiva em salas de espetáculo.

Desde a Antiguidade, diversas civilizações procuraram compreender e otimizar a propagação sonora nos seus espaços culturais. Exemplos notáveis encontram-se nos teatros gregos e romanos, concebidos a partir de observações empíricas e soluções arquitetónicas engenhosas que garantiam projeção clara da voz quase sem recurso a sistemas de amplificação artificiais. Com o avanço da ciência e da tecnologia, sobretudo a partir do século XX, com o contributo pioneiro de W. C. Sabine, a acústica arquitetónica consolidou-se como disciplina estruturada, permitindo análises quantitativas e metodologias de intervenção orientadas para a otimização do desempenho sonoro em espaços construídos.

No entanto, muitos edifícios históricos foram concebidos sem considerações acústicas formais, uma vez que, à época, não existiam ferramentas científicas que possibilitassem previsões de desempenho. Atualmente, a necessidade de preservar a integridade arquitetónica destes espaços, aliada às exigências contemporâneas de utilização, coloca desafios adicionais à reabilitação, exigindo soluções que conciliem preservação patrimonial com qualidade sonora.

O presente estudo insere-se no âmbito da acústica arquitetónica e tem como objetivo central a caracterização acústica do Teatro Sá da Bandeira no Porto, mediante a análise dos principais parâmetros que condicionam a qualidade sonora do espaço. Neste contexto, são avaliados indicadores relevantes, tais como o tempo de reverberação (TR), o tempo central (TS), a claridade (C_{80}), a definição (D_{50}) e a integibilidade da palavra através do *Speech Transmission Index* (STI), entre outros. A análise destes parâmetros permite obter uma compreensão aprofundada do desempenho acústico da sala, identificando as suas qualidades intrínsecas, bem como eventuais limitações que possam comprometer a adequada perceção sonora nas diferentes tipologias de uso do espaço.

Complementarmente, os resultados obtidos são comparados com valores ideiais de referência estabelecidos na literatura e em documentos internacionais aplicáveis a salas de espetáculo, assim

como com dados de outros teatros de características semelhantes, a nível nacional e internacional. Este enquadramento comparativo permite situar o desempenho do Teatro Sá da Bandeira num contexto mais amplo, salientando pontos fortes e possíveis fragilidades relativamente a espaços análogos.

Com base nos resultados alcançados, são ainda discutidas recomendações e possíveis medidas de intervenção que possam contribuir para a otimização do desempenho acústico da sala, assegurando simultaneamente a preservação da identidade arquitetónica e histórica do edifício.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

A presente dissertação encontra-se organizada em sete capítulos.

No primeiro capítulo, Introdução, é feito o enquadramento geral do trabalho, apresentando-se os objetivos centrais e a organização global da dissertação.

O segundo capítulo, Conceitos e Definições, reúne um conjunto de noções fundamentais, definições e princípios básicos da acústica, de forma a proporcionar ao leitor uma melhor compreensão dos aspetos que serão aprofundados ao longo do trabalho.

No terceiro capítulo, Estado da Arte, procede-se a uma revisão bibliográfica relativa à Acústica de salas de espetáculo, incluindo uma contextualização histórica e a análise de diferentes teatros. São igualmente referidas as principais exigências funcionais destes espaços, bem como as normas aplicáveis, com destaque para o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE).

No quarto capítulo, Teatro Sá da Bandeira e Metodologia dos Ensaios, apresenta-se a caracterização arquitetónica do edifício e descrevem-se os equipamentos utilizados e os procedimentos de medição, bem como os parâmetros adotados e as condições experimentais que permitiram a obtenção dos resultados.

No quinto capítulo, Resultados, expõe os valores obtidos nas medições, confrontando-os com referências normativas e estudos prévios, refletindo sobre o seu significado em termos da adequação face aos requisitos regulamentares e a valores de ideais.

No sexto capítulo, Comparação com Outros Teatros, é apresentada uma análise comparativa do Teatro Sá da Bandeira com outras salas nacionais e internacionais, evidenciando semelhanças e diferenças com base em parâmetros acústicos relevantes.

O sétimo capítulo, Conclusões, sintetizam-se as principais conclusões do estudo e dos resultados alcançados, sugerindo-se ainda possíveis linhas de investigação futura que possam contribuir para o aperfeiçoamento do conhecimento e do desempenho acústico sobre o espaço analisado.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1 INTRODUÇÃO

2.1.1 NATUREZA DO SOM

O som é o resultado, no cérebro, de um fenómeno físico produzido pela vibração de um corpo, que gera perturbações num meio material elástico. Essas perturbações manifestam-se sob a forma de ondas mecânicas longitudinais, constituídas por pequenas variações de pressão em torno de um valor médio. Como fenómeno mecânico, o som não se propaga no vácuo, necessitando sempre de um meio sólido, líquido ou gasoso, capaz de transmitir a energia da vibração [1].

As partículas do meio vibram em torno da sua posição de equilíbrio, transferindo energia umas às outras sem deslocamento permanente de matéria. Assim, o som é simultaneamente um fenómeno físico, relacionado com o movimento das partículas, e um fenómeno psicofisiológico, dependente da perceção auditiva do recetor [2].

Para que o "som" exista, são necessários três elementos fundamentais:

- **Emissor:** a fonte que origina a vibração;
- **Meio de propagação:** o material que transmite a energia sonora;
- **Recetor:** o elemento que capta e interpreta as vibrações (por exemplo, o ouvido humano) [1].

O som pode ser classificado em:

- **Som:** estímulo agradável e/ou dotado de significado auditivo;
- **Ruído:** estímulo indesejável e/ou sem significado.

Apesar desta distinção, ambos resultam do mesmo fenómeno físico, a propagação de ondas mecânicas diferenciando-se apenas pela perceção subjetiva do ouvinte [1].

O estudo do som baseia-se em três parâmetros principais: pressão sonora, frequência e tempo, que permitem caracterizar o comportamento acústico dos espaços [1].

2.1.2 Sistema Auditivo Humano

O sistema auditivo humano é o elemento responsável pela receção, transmissão e interpretação das ondas sonoras. É através deste sistema que as variações de pressão do ar se convertem em impulsos elétricos que o cérebro interpreta como som. Assim, o ouvido humano atua como o elo entre o fenómeno físico e a perceção auditiva [1][3].

O ouvido é um órgão sensível e altamente especializado, dividido em três secções principais: ouvido externo, ouvido médio e ouvido interno, que trabalham em conjunto para garantir a perceção correta do som (Figura 2.1) [1].

O ouvido externo é composto pelo pavilhão auricular, canal auditivo e tímpano. O pavilhão auricular recolhe as ondas sonoras e direciona-as através do canal auditivo até ao tímpano, uma membrana flexível e fina que vibra em resposta às variações de pressão. Estas vibrações marcam o início do processo de conversão da energia acústica em energia mecânica [1].

O ouvido médio contém três ossículos (martelo, bigorna e estribo), que formam uma cadeia articulada responsável por amplificar as vibrações sonoras e transmiti-las ao ouvido interno. O estribo, ao pressionar a janela oval, permite que as vibrações se propaguem para o fluido da cóclea. A trompa de Eustáquio desempenha um papel essencial na equalização da pressão entre o ouvido médio e o meio exterior, assegurando o correto funcionamento do sistema auditivo.

O ouvido interno compreende a cóclea, uma estrutura em espiral onde as vibrações são convertidas em impulsos elétricos. O fluido interno da cóclea, denominado perilinfa, movimenta-se de acordo com as vibrações transmitidas pelo estribo, provocando o deslocamento da membrana basilar. Sobre esta membrana encontram-se as células ciliadas, que transformam a energia mecânica em sinais elétricos que são posteriormente conduzidos ao cérebro através do nervo auditivo [1].

A membrana basilar apresenta uma resposta seletiva em frequência: as regiões próximas da janela oval são estimuladas por sons de alta frequência, enquanto as regiões mais distais respondem a baixas frequências. Este fenómeno permite ao ser humano distinguir sons de diferentes tons e intensidades [1].

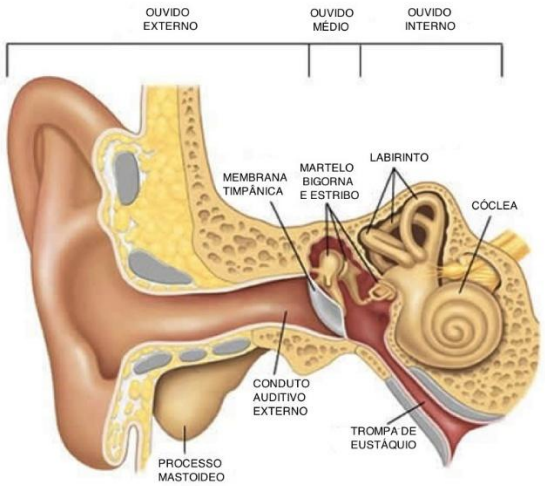


Figura 2.1-Esquema do ouvido humano [3].

2.2 CONCEITOS TEÓRICO BÁSICOS

2.2.1 ANÁLISE DA PRESSÃO

2.2.1.1 Propagação do Som

O som (as variações do som) propaga-se através de um meio elástico, como o ar, a água ou os sólidos, sob a forma de ondas mecânicas longitudinais, nas quais as partículas vibram na mesma direção da propagação. Para que ocorra a transmissão do som, é indispensável a existência de um meio material, uma vez que no vácuo não há partículas que possam transmitir a perturbação [1] [4].

Quando uma fonte sonora entra em vibração, as partículas do meio oscilam em torno da sua posição de equilíbrio, provocando variações de pressão que se propagam sucessivamente para as partículas vizinhas.
Estas variações formam zonas alternadas de compressão (aumento da pressão) e rarefação (diminuição da pressão), que se deslocam no espaço transmitindo a energia sonora [1]. A Figura 2.2 ilustra este fenómeno, representando o avanço da onda sonora e as regiões de maior e menor pressão.

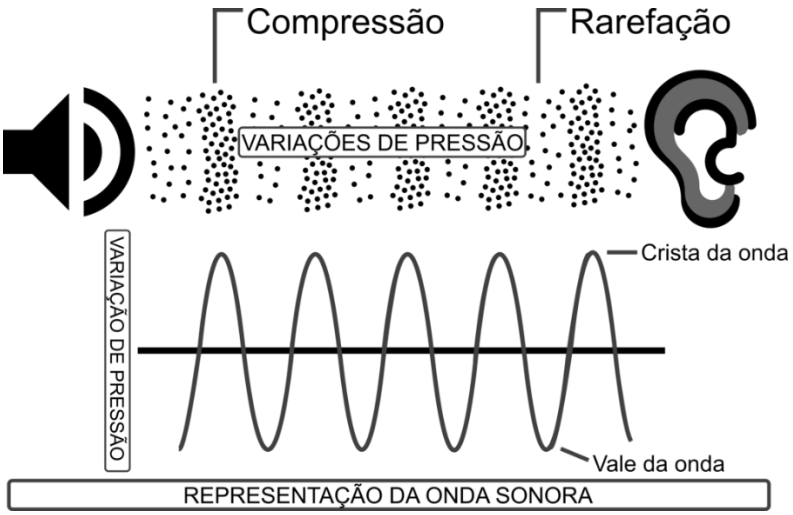


Figura 2.2- Propagação do som (Zonas de Compressão e Zonas de Rarefação) [1].

2.2.1.2 Pressão Atmosférica e Temperatura

A propagação do som está intimamente relacionada com as características físicas do meio onde ocorre, sendo a pressão atmosférica e a temperatura fatores determinantes no comportamento das ondas sonoras.

No caso do planeta Terra, o meio de propagação predominante é o ar atmosférico, cuja pressão média ao nível do mar é aproximadamente 101325 Pa ($\approx 10^5$ Pa) [1].

Esta pressão contribui o ponto de referência das medições acústicas e é designada por pressão atmosférica normal.

As ondas sonoras resultam de pequenas variações de pressão em torno desse valor médio, provocadas pela vibração das partículas do ar. Quando a fonte sonora está em repouso, a pressão mantém-se constante (pressão atmosférica). No entanto, quando ocorre uma vibração, geram-se

alternadamente zonas de compressão (aumento de pressão) e zonas de rarefação (diminuição de pressão), originando as variações que caracterizam a pressão sonora. Estas variações são relativamente pequenas, na ordem de milésimos de Pascal, mas são suficientes para serem percecionadas pelo ouvido humano [4].

A pressão atmosférica define o nível de referência em torno do qual se processam as variações de pressão sonora, enquanto a temperatura afeta a mobilidade das partículas do ar e, consequentemente, a rapidez de propagação das ondas sonoras. Estes fatores influenciam diretamente a celeridade do som, abordada no ponto seguinte.

2.2.1.3 Celeridade

A celeridade corresponde à rapidez que a perturbação de pressão se desloca no meio de propagação. Esta grandeza é influenciada pelas condições termodinâmicas do meio, em especial pela temperatura, e pode ser calculada pelas expressões 2.1 e 2.2, aplicáveis ao ar seco e ao nível medio do mar [1].

$$c = 20{,}045\sqrt{T} \tag{2.1}$$

$$T = 273{,}15 + \theta \tag{2.2}$$

Em que:

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

Sendo assim, para uma temperatura, de 20ºC, a celeridade do som é aproximadamente 343 m/s, aumentando cerca de 0,6 m/s por cada grau Celsius adicional.

2.2.1.4 Intensidade Sonora e Potência Sonora

A intensidade sonora (I), numa dada direção, é a quantidade média de energia que atravessa por segundo uma área de 1 m^2, normal a essa direção e quantifica-se em W/m^2. De forma geral, a intensidade sonora permite avaliar a componente direcional do som, sendo, portanto, representada por uma grandeza vetorial. Assim, pode-se descrever o campo de intensidade sonora como um campo vetorial.

O nível de intensidade sonora pode ser determinado segundo a expressão apresentada na equação 2.3 [1]:

$$L_I = 10 \times log \frac{I}{I_0} \tag{2.3}$$

Em que:

- L_I – Nível de intensidade sonora (dB);
- I – Intensidade sonora (W/m^2);

- I_0 – Intensidade sonora de referência (W/m^2), 10^{-12}W/m^2.

A potência sonora (W) está associada à fonte sonora propriamente dita, e não ao estímulo acústico produzido por essa fonte em um ponto ou direção específicos, como ocorre com a pressão sonora e a intensidade sonora. Define-se como a quantidade total de energia sonora emitida pela fonte por unidade de tempo, a qual atravessa, em um segundo, uma superfície imaginária de raio arbitrário, centrada na própria fonte. A potência sonora é expressa em W, conforme ilustrado na figura 2.3 [1].

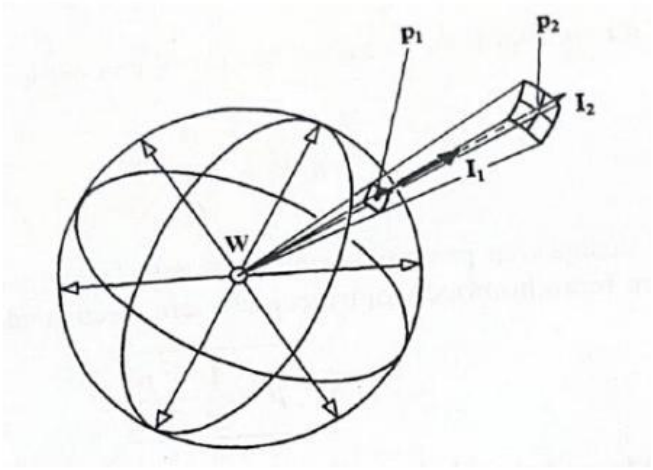


Figura 2.3- Inter-relação entre a potência sonora (W), pressão (p) e intensidade (I)[1].

Essas três grandezas (I, W e p) estão relacionadas entre si da seguinte maneira:

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

Em que:

- I – Intensidade sonora (W/m^2);
- W – Potência sonora (W);
- r – Distância (m);
- p – Pressão sonora (Pa);
- ρ – Massa volúmica (ar) ≈ 1,2 kg/m^3;
- c – Celeridade (m/s) ≈ 340 m/s.

2.2.1.5 Nível de Pressão Sonora

O ouvido humano apresenta sensibilidade a uma ampla gama de pressões sonoras, variando aproximadamente entre os 2×10^{-5} Pa ,correspondente ao limiar de audição, e cerca de 10^2,

associado ao limiar da dor (Figura 2.4) [1] [6]. A razão entre esses valores extremos é da ordem de 10^7, o que evidencia a elevada dinâmica do ser humano.

Devido a essa grande discrepância entre os valores mínimos e máximos de pressão sonora, a utilização de uma escala linear em pascal (Pa) torna-se pouco prática para fins de análise e comparação. Para ultrapassar essa limitação, foi introduzida a escala logarítmica de níveis de pressão sonora, expressa em decibel (dB), unidade derivada em homenagem a Alexander Graham Bell (1847–1922).

A adoção desta escala baseia-se no facto de o ouvido humano não responder de forma linear aos estímulos sonoros, mas sim de maneira aproximadamente logarítmica, o que permite que a escala em decibéis represente de forma mais fiel a perceção auditiva. Nesta escala, o limiar de audição é convencionalmente fixado em 0 dB, enquanto o limiar da dor situa-se em torno de 130 dB, abrangendo assim toda a gama de pressões sonoras percetíveis pelo ser humano [7].

De acordo com a norma portuguesa NP 1730:1996 [17], o nível de pressão sonora, *Lp*, em decibéis, é dado pela expressão:

$$L_p = 10\log\left(\frac{p}{p_0}\right)^2 = 20log\frac{p}{p_0} \tag{2.5}$$

Em que:

- p – Valor eficaz da pressão sonora, em pascal (Pa);
- p_0 – Valor eficaz da pressão sonora de referência (2 x 10^{-5} Pa).

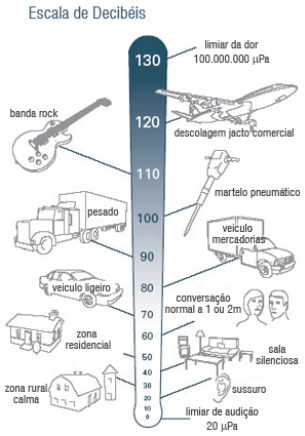


Figura 2.4- Pressão sonora e nível de pressão sonora [8].

Quando é necessário combinar níveis de pressão sonora provenientes de fontes independentes, a soma deve ser realizada de forma logarítmica, tendo em conta que o decibel é uma unidade não linear. Assim, o nível total resulta da soma energética dos contributos individuais, conforme expresso na equação 2.6. Este método, contudo, não se aplica a fontes dependentes, pois a interferência entre os sinais pode alterar significativamente o valor obtido [1].

$$Lsoma = 10\log\left(\sum_{i=1}^{n} 10^{\frac{Li}{10}}\right) \tag{2.6}$$

2.2.2 FREQUÊNCIA

2.2.2.1 Definição

A frequência (f) representa o número de ciclos completos de variação da pressão sonora que ocorrem por unidade de tempo. Em termos físicos, corresponde ao inverso do período (T) da onda, sendo expressa em hertz (Hz). Esta grandeza é fundamental na caracterização do som, uma vez que está diretamente relacionada com a perceção auditiva do som. Sons de baixa frequência são percebidos como graves, enquanto sons de alta frequência são percebidos como agudos (Expressão 2.7) [4] [5].

$$f = \frac{1}{T} \tag{2.7}$$

Em Acústica de Edifícios é normal distinguir-se três grandes zonas de frequências [1]:

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

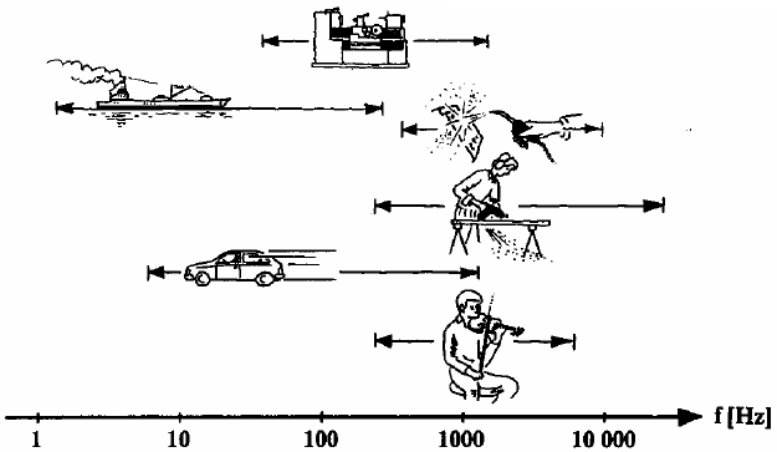


Figura 2.5- Exemplos de gamas de frequências [1].

Por outro lado, o ser humano ouve aproximadamente entre os 20 e os 20.000 Hz e desta forma a escala de frequências é, usualmente, dividida em três grupos:

- Infrassons (<20 Hz);
- Gama de frequência audível (entre 20 e 20 000 Hz);
- Ultrassons (>20 000 Hz).

A figura 2.6 apresenta uma escala de frequências desde os infrassons aos ultrassons, com alguns exemplos de frequências de sons na gama audível.

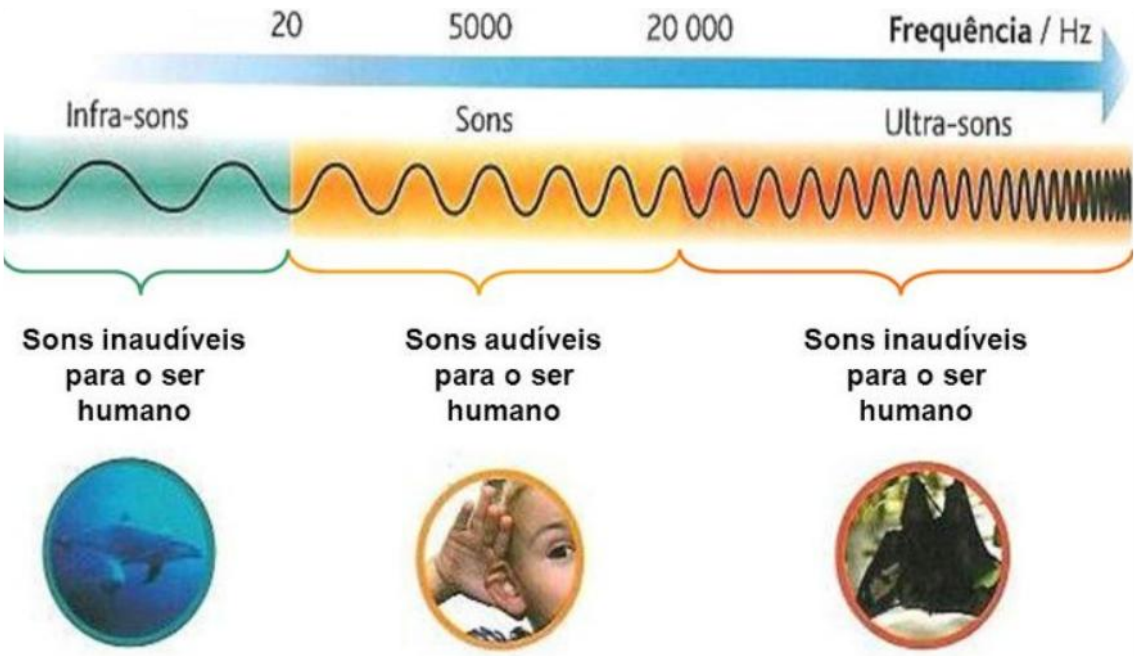


Figura 2.6- Escala de frequências do som [9].

Os infrassons possuem comprimentos de onda muito longos e são frequentemente produzidos por fenómenos naturais, como o vento, o movimento de grandes massas de ar ou a atividade sísmica. Apesar de se situarem fora da faixa audível, podem ser percecionados indiretamente através de vibrações físicas em estruturas ou no corpo humano. Já os ultrassons, devido ao seu comprimento de onda muito curto, são utilizados em diversas aplicações tecnológicas e médicas, como a deteção de defeitos em materiais e emissões de animais [1].

2.2.2.2 Comprimento de Onda

O comprimento de onda (λ) representa a distância que uma perturbação percorre no meio de propagação durante um ciclo completo de vibração. Pode ser determinado entre dois pontos correspondentes da forma de onda, como entre duas cristas ou dois vales consecutivos. (Figura 2.7) Nas ondas sonoras, o comprimento de onda está diretamente relacionado com a frequência (f) e a velocidade de propagação da onda sonora (c), pela expressão 2.8[1].

$$\lambda = c.T = \frac{c}{f} \tag{2.8}$$

Em que:

- λ – Comprimento de onda (m);
- c – Celeridade (velocidade de propagação do som no ar) (m/s);
- T – Período (s);

- f – Frequência (Hz)



Figura 2.7- Definição de comprimento de onda [10].

2.2.2.3 Bandas de Frequências

As bandas de frequência correspondem a intervalos delimitados por um limite inferior e um limite superior, nos quais se agrupa a energia sonora existente. A utilização destas bandas é essencial na análise acústica, pois permite simplificar o estudo, evitando a necessidade de avaliar individualmente todas as frequências. A largura da banda é definida pela diferença entre os seus limites superior e inferior, representando a extensão das frequências consideradas nesse intervalo.

Na acústica de edifícios, são frequentemente utilizadas as bandas proporcionais de oitava, nomeadamente as de 1/1 oitava e 1/3 de oitava. Estas bandas refletem de forma mais adequada a perceção auditiva humana e permitem uma análise equilibrada entre detalhe e clareza dos resultados. O cálculo dos limites inferior e superior de cada banda é realizado conforme demonstrado nas equações 2.9 e 2.10 [1].

$$\mathrm{B} = f_2 - f_1 = \frac{2^K - 1}{\sqrt{2^K}} \times f_0 \tag{2.9}$$

$$f_0 = \sqrt{f_1 \times f_2} \tag{2.10}$$

Em que:

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

2.2.2.4 Curvas de Ponderação

O ouvido humano não possui a mesma sensibilidade para todas as frequências sonoras. Em níveis moderados de pressão sonora, a perceção auditiva é mais sensível às frequências na zona dos 2300

aos 2800 Hz e muito pouco sensível para baixas frequências (inferiores a 125 Hz). Para representar esta resposta subjetiva do ouvido humano em medições acústicas, foram desenvolvidas as chamadas curvas de ponderação ou filtros de ponderação [1].

As curvas de igual sonoridade auditiva (ou curvas de igual perceção subjetiva da intensidade sonora) são parametrizadas pela unidade *fone*, que assume o valor numérico do nível de pressão sonora a 1000 Hz, conforme definido pela norma ISO 226[17]. Estas curvas representam os níveis de pressão sonora necessários para que diferentes frequências sejam percecionadas com igual intensidade subjetiva. A relação entre o *sone* (S) e o *fone* (F) é expressa pela equação 2.11 [1].

$$S = 2^{(F-40)/10} \tag{2.11}$$

Em que:

- S – Intensidade audível relativa (*sone*);
- F – Intensidade audível absoluta (*fone*).

Como referido anteriormente, o ouvido humano apresenta uma sensibilidade auditiva variável consoante a frequência. Esta característica levou ao desenvolvimento de filtros eletrónicos de ponderação aplicados aos equipamentos de medição acústica com o objetivo de corrigir os valores registados e torná-los mais compatíveis com a perceção subjetiva de intensidade sonora do ouvido humano.
Assim, foram definidas as curvas de ponderação A, B, C e D, que representam as correções aplicadas em função da frequência do som captado, conforme ilustrado na Figura 2.8 [1].

Entre estas curvas, a ponderação A é a mais amplamente utilizada, especialmente em acústica de edifícios e em avaliações de ruído ambiental. Este filtro foi originalmente concebido para reproduzir a resposta auditiva humana a sons de baixa intensidade, sendo aproximadamente o inverso da curva de 40 fones das curvas de igual sensibilidade auditiva. Os filtros B e C foram desenvolvidos para representar o comportamento do ouvido a níveis de som mais elevados, apresentando correções menos acentuadas nas baixas frequências. No entanto, com o tempo, o uso destes filtros tornou-se residual, permanecendo a curva A como a referência universal nas medições acústicas.

Por sua vez, a curva D foi criada especificamente para a avaliação do ruído proveniente de aeronaves, apresentando uma ênfase nas altas frequências, onde esse tipo de ruído é mais predominante.

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

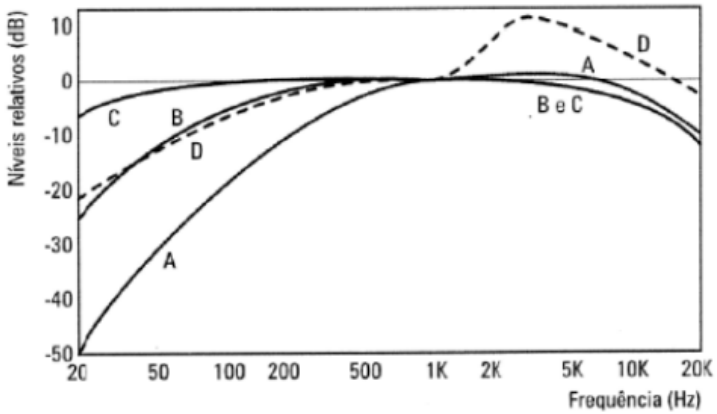


Figura 2.8- Descrição das curvas de Ponderação (Filtros A, B, C e D) [1].

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 audível [1].

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

2.2.3 Análise do Tempo

A duração de um ruído constitui um dos fatores fundamentais para a sua caracterização, complementando os parâmetros de pressão sonora e frequência abordados anteriormente. O comportamento temporal do som permite distinguir fenómenos acústicos transitórios, como um disparo ou uma faísca, de ruídos contínuos ou prolongados, como o som gerado pelo tráfego rodoviário, sistemas de ventilação ou quedas de água [1].

Devido à variação temporal dos níveis de pressão sonora observada na maioria dos ruídos reais, tornou-se necessário definir grandezas representativas que permitam descrever quantitativamente esta flutuação ao longo do tempo. Assim, foram estabelecidos dois parâmetros de medição fundamentais no domínio temporal: o nível de pressão sonora contínua equivalente (L_{eq})e o nível de pressão sonora estatístico (L_N) [1].

O nível contínuo equivalente de pressão sonora (L_{eq})é definido como o nível constante que, atuando durante um intervalo de tempo T, produz a mesma energia sonora média que o som real no mesmo período. Este parâmetro permite representar de forma simplificada um ruído variável, transformando-o num valor único e comparável. O cálculo de L_{eq}é efetuado de acordo com a equação 2.12, a partir da média energética das pressões sonoras medidas ao longo de T.

Por sua vez, o nível de pressão sonora estatístico (L_N) descreve o valor de nível sonoro que é excedido em N% do tempo durante o intervalo de medição considerado. Por exemplo, o parâmetro L_{50}representa o nível de pressão sonora excedido em 50% do período total (ou seja, a mediana dos níveis), enquanto L_{10}e L_{90}são utilizados muitas vezes para identificar respetivamente picos de ruído e níveis de fundo. Estes indicadores são amplamente aplicados na avaliação de ambientes acústicos variáveis, permitindo distinguir entre ruídos contínuos e intermitentes

$$L_{eq} = 10\log\frac{1}{T}\int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0}\right)^2 dt \qquad (2.12)$$

Em que:

- L_{eq} – Nível de pressão sonora contínua equivalente (dB);
- T – Intervalo de tempo;
- $p(t)$ – Pressão sonora (Pa);
- p_0 – Pressão de referência (Pa).

2.3 ABSORÇÃO SONORA

A absorção sonora é a propriedade que possuem certos materiais de poderem transformar parte da energia sonora, que neles incidem, em outra qualquer modalidade de energia, geralmente térmica [1].

Na Figura 2.9 pode-se observar uma onda sonora que atinge uma superfície, onde esta pode absorver, refletir ou transmitir a energia do som.

Absorção sonora é a propriedade que possuem certos materiais de transformar parte da energia sonora que sobre eles incide em outro tipo de energia, normalmente térmica [1].

A designação de α (alfa) trata-se do coeficiente de absorção sonora e exprime a relação entre a quantidade de energia sonora que é absorvida por determinado material e aquela que sobre ele incide, como demonstra a equação 2.13 [1].

$$\alpha = \frac{Eabsorvida}{Eincidente} \qquad (2.13)$$

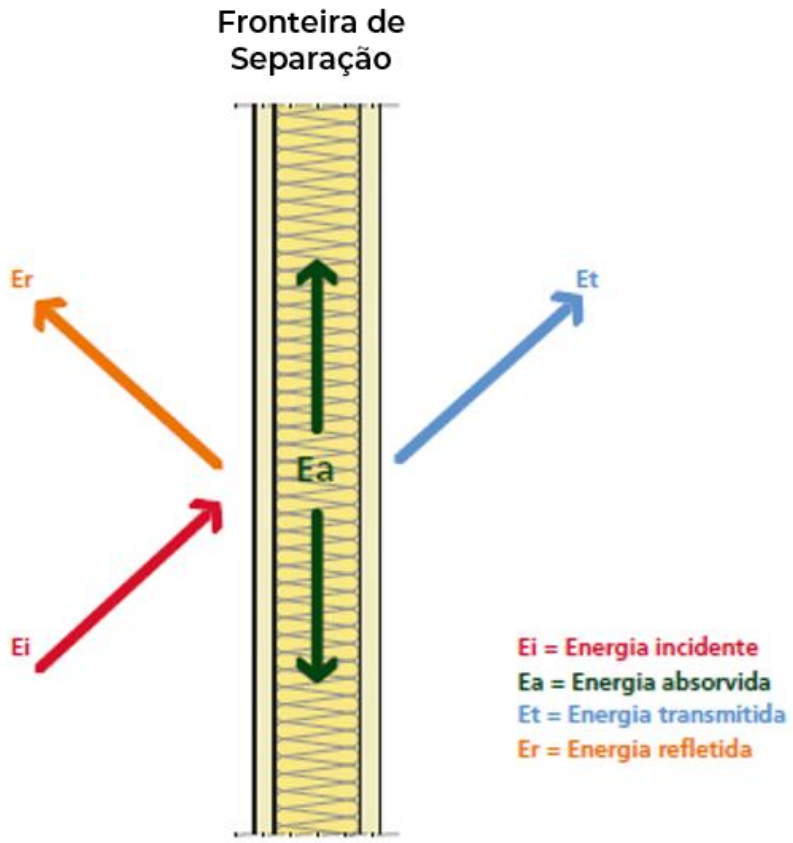


Figura 2.9- Mecanismo de absorção sonora [11].

O coeficiente de absorção sonora varia entre 0 e 1 e de acordo com o ângulo de incidência e com a frequência do som incidente. Deste modo, um material altamente refletor apresenta um coeficiente próximo de 0, indicando que quase toda a energia sonora é refletida. Em contrapartida, um material altamente absorvente apresenta um coeficiente próximo de 1.

Por exemplo, um material com $\alpha \; igual \; a$ 0,3 absorve 30% da energia sonora incidente, enquanto os restantes 70% são refletidos ou transmitidos através da sua estrutura. Em geral, considera-se que um material é acusticamente absorvente quando apresenta $\alpha \; maior \; que$ 0,5 [7].

Os materiais de elevada absorção sonora são geralmente porosos e fibrosos, como por exemplo a lã mineral, que permitem a penetração das ondas sonoras e a consequente dissipação da energia. Por outro lado, superfícies refletoras, como betão, vidro, cerâmica ou superfícies metálicas lisas, apresentam valores de α muito baixos, tipicamente inferiores a 0,05, refletindo quase integralmente a energia sonora incidente [1].

Atualmente existem dois métodos normalizados para determinar o coeficiente de absorção sonora: método do tubo de ondas estacionárias (ou tubo de Kundt) e método da câmara reverberante [1].

No Quadro 2.2 observam-se os valores de coeficiente de absorção sonora dos seguintes materiais:

Quadro 2.2- Valores de coeficiente de absorção sonora (α) de alguns materiais ou sistemas [10].

Material/Sistema	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
Argamassa	0,14	0,1	0,06	0,05	0,04	0,03
Gesso cartonado, 2 Placas (32 mm)	0,28	0,1	0,06	0,17	0,13	0,09
Madeira com caixa-de-ar de 25 mm	0,19	0,14	0,09	0,1	0,07	0,06
Painéis de contraplacado fino	0,42	0,1	0,07	0,09	0,07	0,04
Blocos de betão com acabamento liso	0,11	0,02	0,03	0,03	0,05	0,07
Vidro espesso	0,18	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Pavimento em betão	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Pavimento em Betão armado revestido com mosaico ou mármore	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Teto de betão rebocado e estucado	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05
Linóleo sobre betão	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Soalho (parquet) de madeira sobre betão	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Soalho sobre vigas de madeira com caixa-de-ar	0,15	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10
Alcatifa densa colocada sobre betão	0,02	0,24	0,57	0,69	0,71	0,72
Alcatifa densa com base de borracha	0,08	0,29	0,55	0,72	0,72	0,72
Alcatifa leve colada sobre betão	0,02	0,04	0,08	0,20	0,35	0,40
Cortina leve	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortina pesada	0,14	0,4	0,65	0,72	0,68	0,65
Espelho de água (piscina ou similar)	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Audiência - Estofo espesso	0,76	0,83	0,88	0,91	0,91	0,89
Audiência - Estofo médio	0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86
Audiência - Estofo leve	0,56	0,68	0,79	0,83	0,86	0,86
Cadeiras vazias - Estofo espesso	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79
Cadeiras vazias - Estofo médio	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
Cadeiras vazias - Estofo leve	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55

Os materiais e sistemas absorventes sonoros desempenham um papel fundamental na acústica de edifícios, permitindo controlar o tempo de reverberação e melhorar a inteligibilidade sonora nos espaços.
O coeficiente de absorção sonora (α) apresenta uma variação significativa em função da frequência, refletindo o facto de diferentes mecanismos físicos de absorção serem mais eficazes em determinadas faixas do espectro audível.

Tendo em conta que o coeficiente de absorção sonora apresenta uma grande variação dependendo da banda de frequência sonora em que se encontra, os materiais e sistemas absorventes sonoros podem agrupar-se em três categorias em função das suas características básicas (Figura 2.10):

- Porosos e fibrosos: Estes materiais são particularmente eficazes na absorção de médias e altas frequências, devido à sua estrutura permeável e porosa, que permite a penetração do sonoros no seu interior.

- Ressoadores: Também conhecidos como ressonadores de cavidade ou ressonadores de *Helmholtz*, são especialmente eficazes na absorção de médias frequências.
- Membranas: As membranas ou painéis vibrantes são mais eficazes na absorção de baixas frequências, onde os materiais porosos se tornam ineficazes.

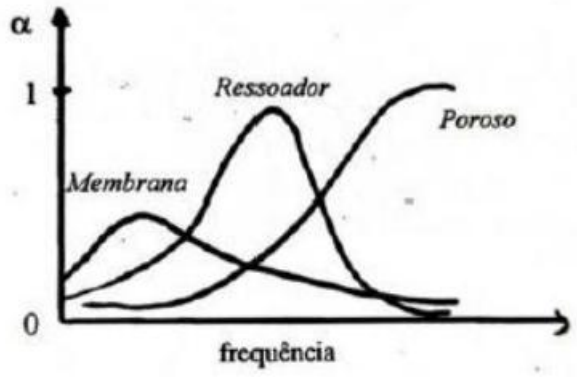


Figura 2.10- Comportamento em frequência dos três tipos de materiais [1].

2.4 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

2.4.1 DEFINIÇÃO

O tempo de reverberação é um dos parâmetros fundamentais utilizados na caracterização acústica de recintos fechados, constituindo uma medida direta da persistência do som num espaço após a interrupção da sua fonte. Define-se como o intervalo de tempo necessário para que o nível de pressão sonora decresça 60 dB, em relação ao nível inicial, após a cessação da emissão sonora [1][4].

Fisicamente, este fenómeno resulta das reflexões sucessivas das ondas sonoras nas superfícies do recinto, que provocam uma diminuição gradual da energia sonora até que esta se extinga quase por completo.
No interior de uma sala, as ondas sonoras chegam ao ouvinte de duas formas distintas:

- ondas diretas, provenientes diretamente da fonte sonora;
- ondas refletidas ou reverberadas, que atingem o recetor após múltiplas interações com as superfícies do espaço.

A energia associada a estas reflexões diminui progressivamente, devido à absorção sonora dos materiais e à atenuação causada pelo ar, conduzindo ao desaparecimento gradual do som audível [1].

O tempo de reverberação é, portanto, o intervalo de tempo em segundos que um som demora a extinguir-se quase totalmente após múltiplas reflexões. Na prática, a medição direta de um decaimento de 60 dB é dificultada pela presença de ruído de fundo, que tende a sobrepor-se ao final da curva de decaimento. Por esta razão, a determinação é normalmente feita através da extrapolação de decaimentos parciais de 20 dB (T_{20}) ou de 30 dB (T_{30}), conforme o método estabelecido pela norma ISO 3382-2:2008 [1].

Na Figura 2.11, apresenta-se graficamente o conceito de tempo de reverberação. À esquerda observa-se o decaimento teórico ideal de 60 dB, correspondente à definição formal do parâmetro.

À direita, ilustra-se a determinação experimental, em que o tempo de reverberação é obtido por extrapolação linear do declive medido a partir de uma atenuação parcial (T_{20} ou T_{30}) [1].

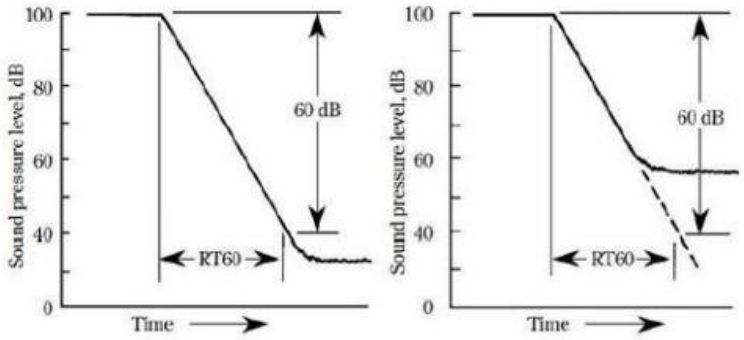


Figura 2.11- Definição do tempo de reverberação (esquerda valor teórico e obtido por extrapolação do declive, direita) [1].

2.4.2 CÁLCULO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O modelo clássico de cálculo foi desenvolvido por Wallace C. Sabine, que estabeleceu a relação entre o tempo de reverberação, o volume do recinto e a área de absorção equivalente, (Equação 2.14) [1]:

$$T = \frac{0{,}16 * V}{A} \tag{2.14}$$

$$A = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i S_i \tag{2.15}$$

Em que:

- T – Tempo de Reverberação (s);
- V – Volume do compartimento (m^3);
- T – Área de Absorção sonora equivalente (m^2);
- α – Coeficiente de absorção sonora do material (sem unidades);
- S – Superfície real do material (m^2).

A equação de Sabine aplica-se com maior rigor a salas de baixa absorção média ($\alpha_m \; menor \; que \; 0{,}3$) e assumindo um campo sonoro difuso.

2.4.3 INFLUÊNCIA NA INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA E NO CONFORTO ACÚSTICO

O tempo de reverberação influencia de forma decisiva a inteligibilidade da palavra e a qualidade sonora dos ambientes. Valores excessivos provocam sobreposição temporal das sílabas e reduzem a perceção das consoantes, de curta duração e baixa intensidade [12]. Por outro lado, tempos demasiado curtos eliminam a sensação de envolvência sonora, essencial em salas de música ou culto [1].

Assim, a definição de um tempo de reverberação ótimo depende do uso previsto do recinto, devendo ser ajustada através da seleção de materiais absorventes, difusores e geometria adequada do espaço. O quadro 2.3 apresenta valores recomendados do Tempo Reverberação para diferentes tipos de ambientes [1].

Quadro 2.3- Valores ideais para o Tempo de Reverberação em função do tipo de utilização (adaptado de [1]).

Função	**TR 500 – 1k Hz (s)**	**Função**	**TR 500 – 1 kHz (s)**
Auditório (palavra)	0,7 – 0,8	Música sinfónica Barroca	1,4 – 1,6
Teatro	0,7 – 0,8	Música sinfónica Clássica	1,6 – 1,8
Cinema	0,8 – 1,0	Música sinfónica Romântica	1,9 – 2,2
Estúdio de gravação	0,4 – 0,6	Música sinfónica Moderna	1,4 – 1,9
Ópera (não wagneriana)	1,3 – 1,7	Música popular	0,8 – 1,0
Ópera (Wagner)	1,8 – 1,9	Música de órgão	2,5 – 3,5
Música de câmara	1,4 – 1,7	Coros gregorianos	3 - 4

2.5 ISOLAMENTO SONORO

2.5.1 DEFINIÇÃO E CONCEITOS

O isolamento sonoro consiste na redução da transmissão de energia sonora entre dois espaços distintos, limitando a propagação do som de um ambiente para outro [1]. Este conceito diferencia-se da correção acústica, que está relacionada com o controlo da reflexão e da absorção sonora dentro do próprio ambiente. O isolamento sonoro visa, portanto, evitar que sons produzidos num espaço se propaguem para outro, garantindo privacidade, conforto acústico e bem-estar dos ocupantes [1].

A correção acústica contribui para a melhoria da inteligibilidade sonora no interior de um compartimento, enquanto o isolamento atua na contenção do ruído entre recintos, sendo determinante em edifícios de habitação, ensino, saúde e serviços [4]. O seu principal objetivo é minimizar a transmissão de sons indesejáveis, como o ruído de tráfego, conversas, equipamentos elétricos ou impactos sobre pavimentos, criando assim ambientes mais confortáveis e adequados à função de cada espaço [6].

Os ruídos podem ser classificados de acordo com o meio pelo qual as ondas sonoras se propagam, originando dois tipos principais (Figura 2.12):

• **Ruídos de Condução Aérea:** Propagam-se exclusivamente através do ar, sem envolvimento direto da estrutura do edifício. A transmissão ocorre quando as ondas sonoras incidem sobre um elemento construtivo, como paredes, janelas ou portas, em que o fazem vibrar, transmitindo parte dessa energia para o outro lado. Deste modo, os exemplos típicos são: a voz humana, música, televisão, tráfego automóvel e equipamentos de ventilação [13][14].

• **Ruídos de Percussão:** Resultam do choque direto sobre elementos construtivos, sendo transmitidos através da estrutura do edifício. Este tipo de ruído é gerado por vibrações em pisos, paredes e coberturas, que normalmente são causadas, por exemplo, por passos, quedas de objetos

ou deslocação de móveis, e propaga-se rapidamente pelas ligações estruturais (vigas, pilares, paredes e etc) [15].

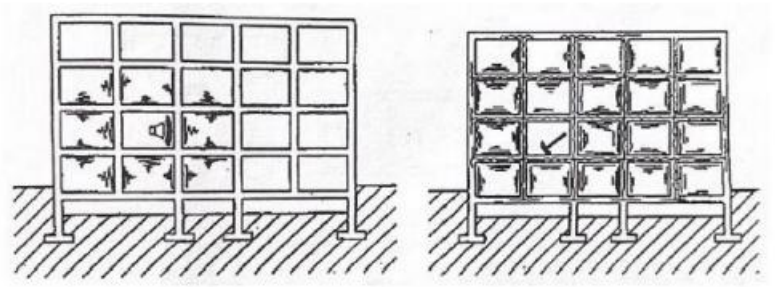


Figura 2.12- Transmissão de ruído aéreo (esquerda) e ruído de percussão (direita). [1].

A distinção entre estes dois tipos de ruído é essencial para a aplicação correta das soluções de isolamento sonoro, uma vez que cada um exige estratégias diferentes de controlo.

Além disso, a transmissão sonora pode ocorrer por via direta, quando o som atravessa o elemento separador, ou por via marginal, quando o som se propaga através de elementos adjacentes, como paredes e pavimentos (Figura 2.13) [1].

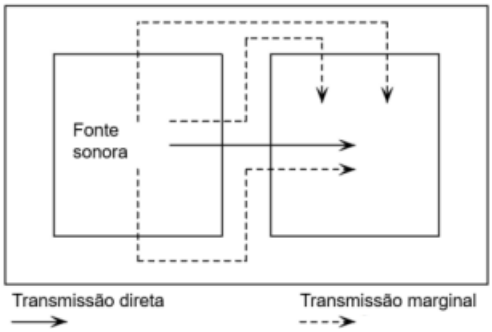


Figura 2.13-Transmissão sonora direta e transmissão sonora marginal [15].

2.5.2 Ruído de Fundo e Incomodidade

O ruído de fundo é um dos principais parâmetros acústicos a considerar na caracterização de espaços como os auditórios de teatros. Ele pode ser definido como o que é desagradável ou sem significado para o ouvinte. Este ruído pode ter diversas origens tais como: equipamentos elétricos, sistemas de ventilação (AVAC), tráfego rodoviário ou até mesmo sons provenientes do próprio edifício como passos ou conversas adjacentes [1].

A avaliação do nível de ruído de fundo é realizada através de medições com um sonómetro e é expressa em decibéis (dB). Visto o ouvido do ser humano apresentar sensibilidade em diferentes frequências, utiliza-se a ponderação A, resultando em valores expressos em dB(A) [1].

2.5.3 CURVAS DE INCOMODIDADE (NC E NR)

2.5.3.1 Introdução

As "Curvas de Incomodidade" podem ser utilizadas para avaliar a incomodidade de um ambiente interno, particularmente em auditórios, teatros, salas de concerto e outros, em relação ao ruído gerado por equipamentos. Estas curvas, NR e NC, podem ser empregues para mediar os níveis de pressão sonora nos pontos mais ruidosos da sala (idealmente à altura dos ouvidos do ouvinte). Devem ser empregues para identificar ruídos de fundo estáveis e constantes, geralmente provenientes de um sistema de condicionamento higro-térmico, e não ruídos de atividade emitidos pelos presentes no local [1].

2.5.3.2 Curvas *NC e NR*

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. 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 2.14).

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 [1].

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

Tipo de Espaço	**Valor máximo recomendado *NC***
Salas de concerto, salas de ópera, estúdios de transmissão e gravação, grandes auditórios, grandes igrejas, salas de recitais.	< 20
Pequenos auditórios, teatros, salas de prática musical, grandes salas de reuniões, salas de teleconferência, instalações audiovisuais, grandes salas de conferências, escritórios pequenos, igrejas, tribunais.	[20;30]
Quartos, dormitórios, hospitais, residências, apartamentos, hotéis.	[25;35]
Escritórios, pequenas salas de conferência, salas de aula, livrarias.	[30;35]
Grandes escritórios, áreas de receção, lojas de venda ao público, cafés, restaurantes, ginásios.	[35;40]
Lobbies, laboratórios, salas de desenho e engenharia, áreas de secretaria, oficinas de manutenção (de equipamentos elétricos).	[40;45]
Cozinhas, lavandarias, lojas industriais, salas de equipamento informático.	[45;55]

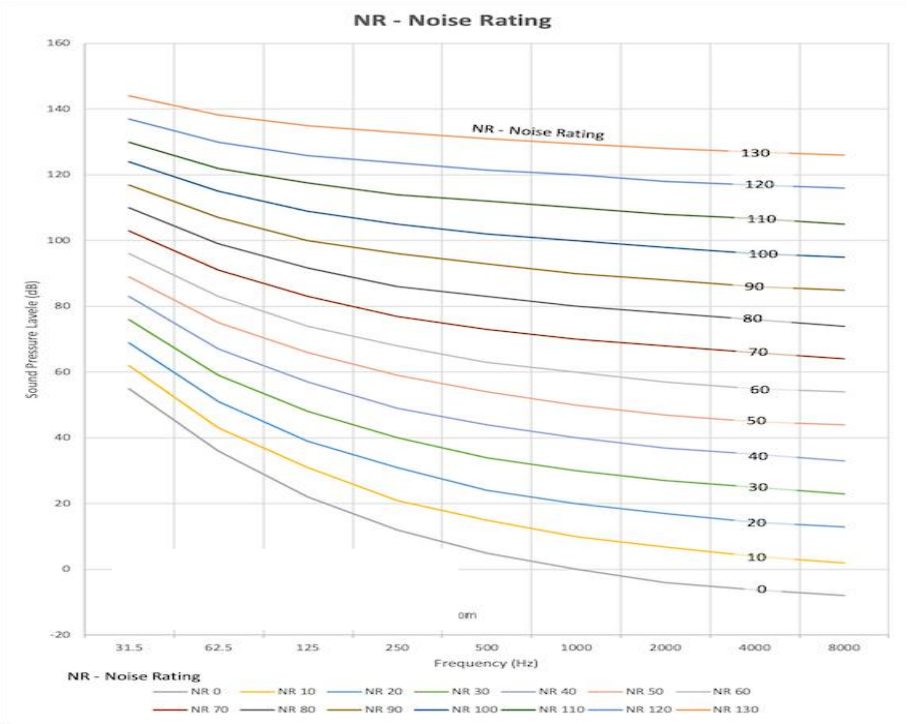


Figura 2.14- Descrição das Curvas NR [16].

2.6 INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

2.6.1 CONCEITOS

Em acústica, a inteligibilidade da palavra refere-se à capacidade de o ouvinte perceber e distinguir claramente a fala num determinado ambiente. Este conceito é essencial em espaços onde a perceção da palavra é fundamental, como auditórios, salas de aula, igrejas, tribunais e salas de conferência, sendo um dos principais indicadores da qualidade acústica de um espaço desse tipo [1][2]. A inteligibilidade da palavra é fortemente influenciada pelo nível de ruído de fundo, pelo tempo de reverberação e pelas condições geométricas e materiais do recinto [4][6].

Quando um ambiente apresenta múltiplas fontes sonoras ou níveis elevados de ruído de fundo, a clareza da palavra é comprometida, dificultando a interpretação da mensagem por parte do recetor. O cérebro humano consegue, até certo ponto, reconstruir palavras parciais mesmo quando parte do som é mascarada por ruído; contudo, à medida que o ruído de fundo se aproxima do nível de pressão sonora da palavra, a compreensão torna-se cada vez mais difícil [2][6]. Além disso, o tempo de reverberação desempenha um papel determinante na inteligibilidade: quando é excessivo, as reflexões sonoras prolongadas causam sobreposição de sílabas e mascaramento temporal, reduzindo a distinção entre vogais e consoantes [1][7].

As consoantes são os elementos mais críticos para a compreensão do discurso, pois contêm a maior parte da informação articulatória. Já as vogais funcionam como sons de ligação, responsáveis pela fluidez do discurso [2][4]. Assim, a inteligibilidade depende tanto da perceção mais das consoantes do que da clareza das vogais. Estudos clássicos de Beranek e Kuttruff demonstram que a perda de articulação das consoantes está diretamente relacionada com o aumento da reverberação e com a diminuição da relação sinal/ruído [4][7].

A fala humana cobre um espetro de frequências bastante amplo, compreendido aproximadamente entre 150 e 7k Hz, onde as vogais predominam nas frequências mais baixas (150–700 Hz) e as consoantes nas frequências mais elevadas (3,5–7 kHz) [2][5]. No que respeita à intensidade sonora, verifica-se uma diferença média de 21 a 28 dB entre vogais e consoantes, sendo as primeiras geralmente mais intensas. Relativamente à duração, as vogais apresentam em média 90 ms, enquanto as consoantes têm cerca de 20 ms [2]. Quanto à direcionalidade da emissão vocal, a voz humana tende a projetar-se predominantemente para a frente do emissor, sendo esta direcionalidade mais acentuada nas altas frequências [4][5].

O Quadro 2.5 resume a variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes, considerando a frequência, intensidade, duração e direcionalidade.

Quadro 2.5- Variabilidade da emissão de voz entre as vogais e consoantes (adaptado de [1]).

Tipo	**Frequência**	**Intensidade**	**Duração**	**Direccionalidade**	**Contribuição para inteligibilidade da palavra**
Vogais	baixas	elevado	≈ 90 ms	-5 dB p/ -180º	Baixa
Consoantes	Altas	baixo	≈ 20 ms	-20 dB p/ -180º	Alta

A inteligibilidade da palavra pode ser ainda afetada por fatores acústicos do espaço, como reflexões excessivas, reverberação prolongada e ruído de fundo, que provocam mascaramento auditivo e reduzem a perceção das consoantes [6][7]. Para minimizar esses efeitos, recorrem-se a materiais absorventes (como painéis porosos ou tetos acústicos), à correção da geometria da sala e à redução do ruído de fundo, otimizando a comunicação verbal em espaços destinados à palavra [1][11][15].

2.6.2 Parâmetros de Medida

A inteligibilidade da palavra pode ser quantificada através de métodos subjetivos e métodos objetivos, os quais permitem avaliar a capacidade de um espaço em garantir a correta perceção do discurso.
Estes parâmetros são amplamente utilizados em acústica de edifícios, projetos de sonorização e avaliações de conforto auditivo, fornecendo informações fundamentais para o dimensionamento de materiais e sistemas acústicos [1][2][4].

Os métodos subjetivos baseiam-se na avaliação direta da perceção da fala por ouvintes humanos. Consistem na leitura de palavras ou frases por um emissor a um grupo de recetores que registam o grau de compreensão das mensagens. O resultado é expresso em percentagem de acertos, correspondendo à proporção de palavras corretamente compreendidas, e, portanto, ao nível de inteligibilidade do espaço [2][5][17].

Entre os principais testes subjetivos destacam-se:

- PB (*Phonetically Balanced Words)* – conjunto de palavras que contém todos os fonemas da língua em proporções semelhantes às da linguagem corrente, garantindo uma amostragem representativa do discurso;
- MRT (*Modified Rhyme Test*) – método em que o ouvinte escolhe entre palavras semelhantes (ex.: *casa, rasa, vasa*), avaliando a distinção fonética e articulatória;

- SRT (*Speech Reception Threshold*) – determina o nível mínimo de pressão sonora necessário para que 50% das palavras sejam corretamente compreendidas [2][17].

Estes testes, embora forneçam uma perceção fiel da inteligibilidade real, são demorados e exigem condições controladas, motivo pelo qual são frequentemente substituídos por métodos objetivos [17][18].

Os métodos objetivos avaliam a inteligibilidade sem necessidade de participação humana, utilizando medições acústicas automatizadas. Têm como base a análise da relação sinal/ruído, do tempo de reverberação e das variações de nível de pressão sonora entre bandas de frequência [4][6][18].

Entre os principais parâmetros destacam-se:

- Índice de Articulação (AI)

O AI permite determinar o grau médio de inteligibilidade e privacidade da palavra, mesmo na presença de ruído de fundo. O seu valor varia entre 0 (nula inteligibilidade) e 1 (excelente inteligibilidade), sendo calculado a partir de medições em bandas de oitava compreendidas entre 200 e 5k Hz (Quadro 2.6) [1][4][18].

Quadro 2.6- Perceção subjetiva para a inteligibilidade e privacidade da palavra em função dos valores numéricos de *AI* [1].

***AI* (Índice de Articulação)**	**Grau de privacidade**	**Grau de inteligibilidade**
< 0,05	Confidencial	Nula
[0,05 – 0,20[	Normal privacidade	Muito fraca
[0,20 – 0,35[	Marginal	Fraca
[0,35 – 0,40[	Pobre	Sofrível
[0,40 – 0,65[	Em geral, sem privacidade	Boa
≥ 0,65	Privacidade totalmente inexistente	Excelente comunicação

- *SIL* (*Speech Interference Level*) corresponde ao nível médio dos ruídos de fundo em bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz, representando a interferência na comunicação verbal. Valores mais baixos de SIL indicam melhor inteligibilidade da palavra [4][6].

$$SIL\ (dB) = (RF_{500\ Hz} + RF_{1\ kHz} + RF_{2\ kHz})/3 \quad (2.16)$$

- O AC (*Articulation Class*) é uma extensão do AI, utilizado para avaliar a inteligibilidade entre salas adjacentes.A análise é realizada em bandas de 1/3 de oitava, entre 200 e 5k Hz, sendo ponderada por 15 pesos específicos para cada banda de frequência. É particularmente útil em espaços partilhados por divisórias, como salas de reuniões ou open spaces [4][15][18].

$$AC\ (dB) = \sum_{i=1}^{15} \Delta L_i\ .peso_i/3 \qquad (2.17)$$

- *STI* e *RASTI* (*Speech Transmission Index* e *Rapid Speech Trnasmission Index*) – o *STI* varia entre 0 (nula inteligibilidade) e 1 (ótima inteligibilidade) e o *RASTI* é um método simplificado de o calcular [1].

2.7 ACÚSTICA ARQUITETÓNICA

2.7.1 INTRODUÇÃO

A acústica arquitetónica é o ramo da acústica que se dedica ao estudo, planeamento e controlo do som em ambientes construídos, com o objetivo de proporcionar conforto auditivo, inteligibilidade da palavra e qualidade sonora adequadas à função de cada espaço [1][2][4]. Esta área combina conhecimentos de física do som, materiais de construção, psicoacústica e arquitetura, procurando otimizar tanto a propagação como a absorção sonora dentro dos recintos [5][11].

Enquanto a acústica ambiental se foca na relação do som com o meio envolvente exterior, a acústica arquitetónica atua no interior dos edifícios, abordando desde a forma geométrica do espaço até à seleção de revestimentos e sistemas de correção acústica. O seu principal objetivo é equilibrar a reflexão, absorção e difusão sonora, garantindo um campo sonoro homogéneo e uma experiência auditiva natural [4][5][11].

2.7.2 INTERLIGAÇÃO SOM/ARQUITETURA

2.7.2.1 Reflexões

A envolvente arquitetónica (geometria e revestimentos de paredes, teto e pavimento) condiciona de forma decisiva o comportamento do campo sonoro interior. O som que parte da fonte chega ao recetor por duas vias principais: (i) som direto, que percorre a linha reta fonte–recetor, e (ii) som refletido, resultante dos múltiplos impactos nas superfícies da sala (Figura 2.15). Em salas de maior volume, estas interações geram cadeias de reflexões muito numerosas, formando o campo difuso que caracteriza o som no interior do recinto [1][4].

Do ponto de vista temporal, distinguem-se habitualmente reflexões precoces (*early sound*) e som tardio (*late sound*):

- As reflexões precoces são as que chegam ao recetor nos primeiros ~50–80 ms após o som direto. Quando bem controladas (provenientes, por exemplo, de paredes laterais ou do teto), reforçam a clareza e a presença da fonte, contribuindo positivamente para a inteligibilidade da palavra e para a definição musical.

- O som tardio é a soma das reflexões que chegam depois desse intervalo, alimentando o campo reverberante; em excesso, conduz a mascaramento temporal e perda de articulação [1][4][12].

O intervalo temporal entre a chegada do som direto e a primeira reflexão designa-se tempo de atraso inicial (*Initial Time Delay Gap – ITDG*). Valores moderados de ITDG associam-se, em geral, a maior sensação de intimidade e de proximidade da fonte; já valores de ITDG muito longos podem induzir perceções de eco ou de falta de coesão sonora [4][12]. Assim, o projeto arquitetónico deverá orientar e/ou difundir as primeiras reflexões no plano útil do recetor, evitando trajetórias excessivamente longas ou superfícies especulares muito extensas (paredes paralelas, abóbadas côncavas, etc.) [1][4].

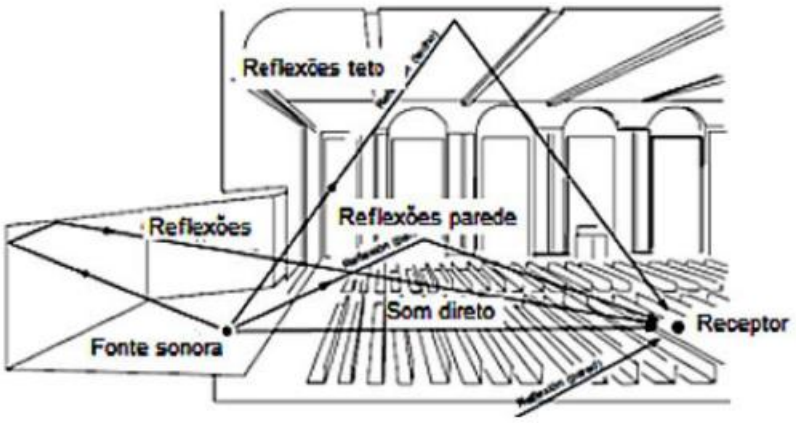


Figura 2.15- Chegada de um som direto e sons refletidos a um recetor [19 *apud 14*].

2.7.2.2 Ecos

Nem todas as reflexões são favoráveis para a criação de um local acusticamente agradável e por vezes nem todas as reflexões sonoras contribuem positivamente para a qualidade acústica de um espaço. Quando estas reflexões chegam com atraso suficientemente elevado e intensidade significativa, são percecionadas como replicações distintas do som original, fenómeno designado por eco [1][12]. Este comportamento ocorre, tipicamente, em espaços de grandes dimensões ou com superfícies refletoras muito afastadas, nas quais o som refletido demora mais de 50 milissegundos a atingir o recetor após o som direto, intervalo a partir do qual o ouvido humano distingue as duas ocorrências sonoras [1][12].

Na Figura 2.16, apresenta-se um reflectograma típico, onde se observa o atraso temporal entre o som direto e o som refletido que dá origem ao eco.

A presença de ecos tende a prejudicar a inteligibilidade da palavra e a clareza sonora, sobretudo em auditórios, igrejas ou salas com paredes paralelas e superfícies duras [4][15].

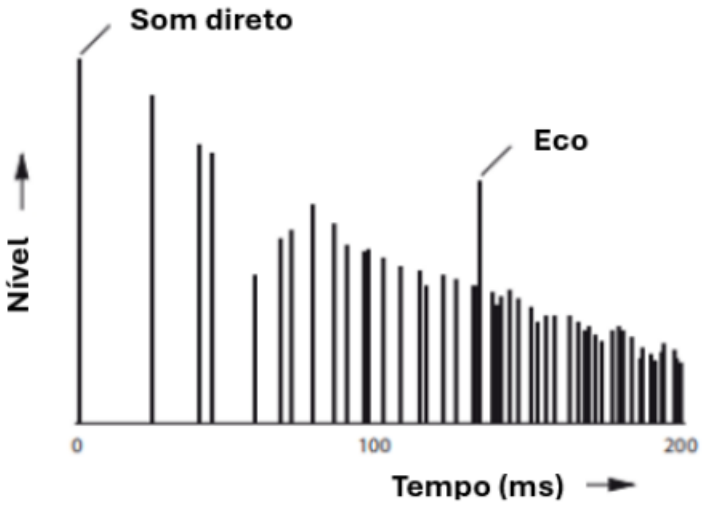


Figura 2.16- Exemplo de reflectograma com eco [1].

A energia refletida chega ao ouvinte com atraso, mascarando sílabas subsequentes e introduzindo sensação de confusão auditiva. Em situações mais críticas, o eco pode mesmo ser percebido como uma repetição completa da emissão original [1][12].

Este fenómeno pode ser alcançado de duas formas principais:

Alteração da absorção sonora das superfícies, recorrendo a materiais porosos, painéis acústicos ou revestimentos fibrosos, que reduzem a energia refletida;

Modificação geométrica das superfícies refletoras, ajustando o ângulo de incidência e reflexão, de modo a redirecionar as ondas para zonas onde o impacto auditivo seja reduzido [1].

Estas abordagens estão ilustradas na Figura 2.17, onde se representa, na parte superior, uma situação com eco e, na inferior, uma solução de correção através de material absorvente e reorientação angular da superfície.

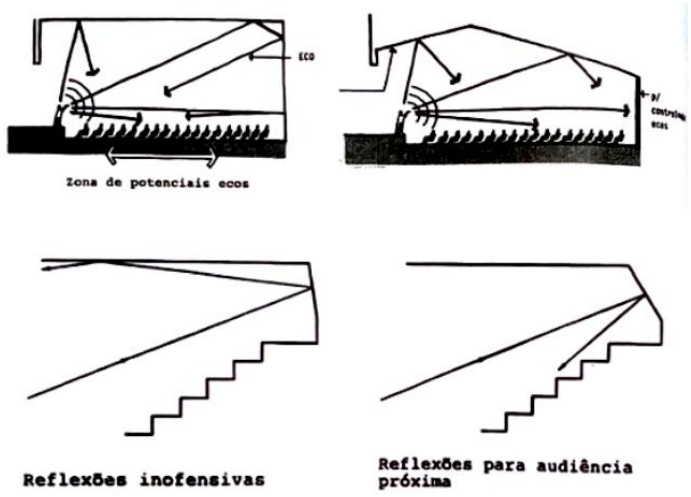


Figura 2.17- Exemplo de correção de ecos por absorção (em cima) e por alteração do ângulo de reflexão (em baixo) [1].

Além do eco principal, pode também ocorrer o fenómeno conhecido como eco repetido (*flutter echo*), caracterizado por múltiplas reflexões sucessivas entre duas paredes paralelas e pouco

afastadas.
Este efeito é frequente em salas estreitas, corredores e estúdios não tratados acusticamente, e a sua eliminação exige difusores sonoros, painéis inclinados ou materiais absorventes adequadamente posicionados [4].

2.7.2.3 Discos Voadores

Disco voadores também designados de discos suspensos ou nuvens, são colocados em salas de espetáculo que apresentem um teto muito elevado e servem para evitar que o som direto proveniente do palco os atinja, provocando ecos (Figura 2.18) [1].

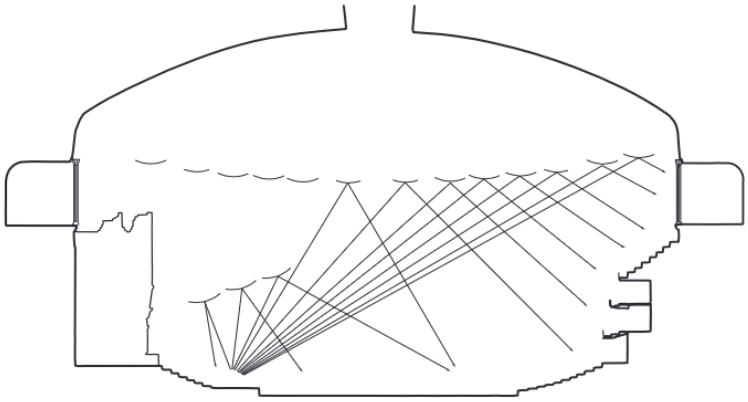


Figura 2.18- Exemplo de disco voadores (Royal Albert Hall, Londres) [1].

2.7.2.4 Difusão

A difusão sonora ocorre quando a energia refletida se espalha de forma homogénea em várias direções, em vez de se concentrar num ponto específico. Este fenómeno depende diretamente das irregularidades geométricas da superfície refletora e da relação entre o comprimento de onda e a dimensão dessas irregularidades [1][4]. Em espaços destinados à reprodução musical ou transmissão da palavra, a difusão desempenha um papel essencial para garantir uma distribuição equilibrada da energia acústica, evitando concentrações excessivas de som ou zonas de sombra acústica. A Figura 2.19 ilustra o comportamento típico da difusão sonora, comparando-a com a reflexão especular numa superfície lisa.

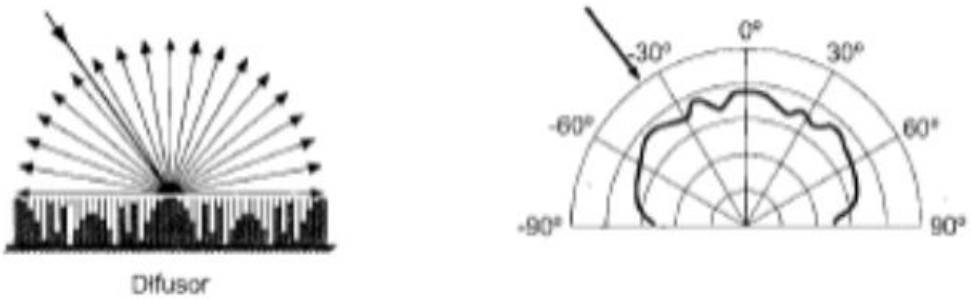


Figura 2.19- - Efeito de difusão do som [19].

2.7.3 Acústica Variável

Ao longo do tempo, um mesmo espaço pode ser utilizado para diversos usos diferentes, porém existem poucos espaços que sejam projetados com o objetivo multifuncional, isto devido a razões económicas. Desta forma, a acústica variável surge devido à necessidade de suprir a carência acústica de espaços com múltiplos usos [20].

Existem duas condicionantes possíveis que são fundamentais na acústica variável: a variação na absorção sonora e a variação no volume [1]:

Variação na absorção: A alteração das características acústicas de grandes superfícies da envolvente das zonas refletoras para zonas absorventes ou vice-versa é feita através de dispositivos mecânicos ou manuais (Figura 2.20).

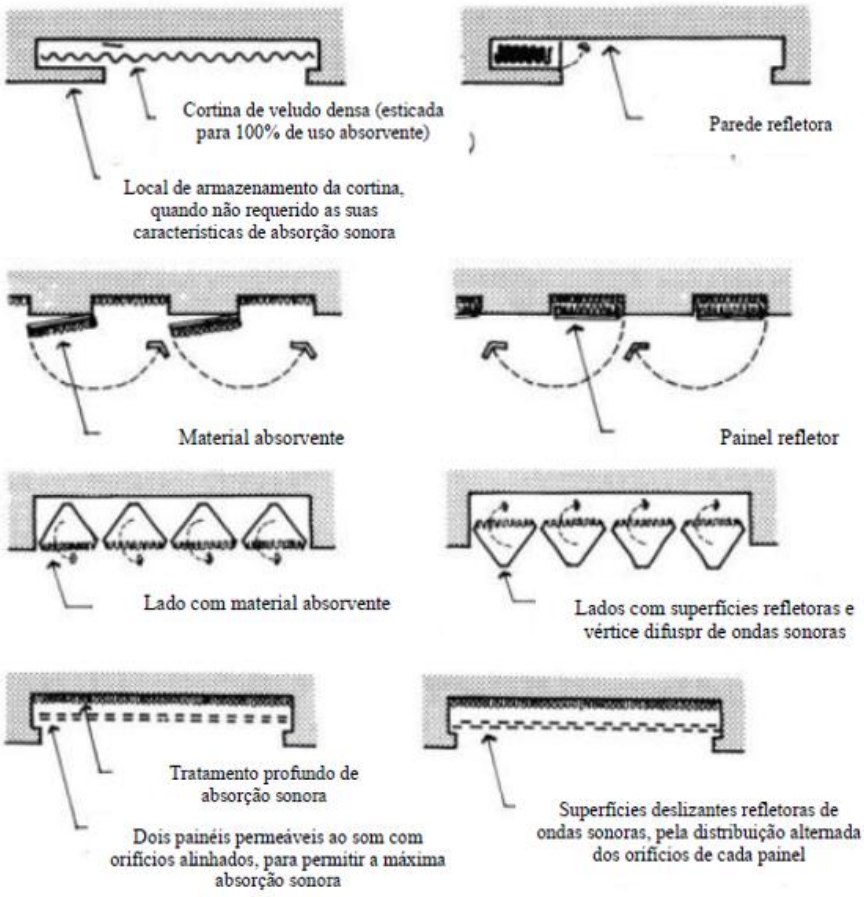


Figura 2.20- Mecanismos de absorção variável [20 *apud 32*].

Variação no volume: Outra forma de alterar o tempo de reverberação é através da variação do volume da sala, como acontece por exemplo na sala *Edwin Thomas Hall* (Universidade de *Akron*, EUA, Figura 2.21). Não é muito usual este tipo de mecanismo, mas através da movimentação do teto é possível proporcionar diferentes modos de uso: concerto, ópera e teatro [1].

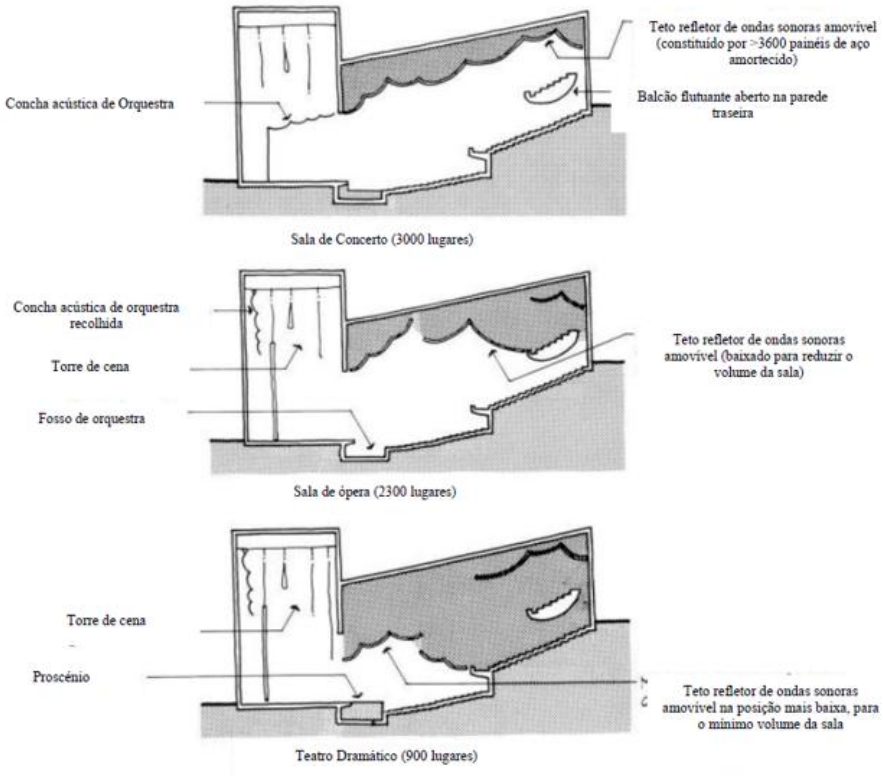


Figura 2.21- Exemplo da variação de volume para diferentes usos [20 *apud* 32].

2.7.4 PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJETIVOS

2.7.4.1 Definição (D_{50})

A Definição (D_{50}) representa a proporção da energia sonora que chega ao ouvinte nos primeiros 50 milissegundos em relação à energia total recebida, sendo um parâmetro normalizado pela ISO 3382-1 (equação 2.18). Este índice, introduzido por Thiele (1953), avalia a clareza e inteligibilidade da palavra num determinado espaço. Valores de D_{50} superiores a 0,65 indicam boas condições acústicas para salas de conferência e ambientes de comunicação verbal, onde é essencial que o som direto e as primeiras reflexões predominem sobre as reflexões tardias, assegurando uma perceção nítida da fala (Quadro 2.7) [1].

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50\,ms} p^2(t)\,dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)\,dt} \tag{2.18}$$

Em que:

- D_{50} – Definição;
- $p(t)$ – Reação impulsiva da sala em um determinado ponto (Pa).

Quadro 2.7- Valores para a Definição (D_{50}) para algumas situações [20 *apud 34*].

Definição (D_{50})	
Muito bom	0,86 – 1,00
Boa	0,67 – 0,86
Suficiente	0,39 – 0,67
Insuficiente	0,17 – 0,39
Muito insuficiente	0,06 – 0,17

2.7.4.2 Claridade (C_{80})

A Claridade está diretamente relacionada com o fator subjetivo de clareza auditiva, sendo um parâmetro de grande importância em espaços onde a inteligibilidade da música é essencial, como salas de concerto. Define-se como a razão entre a energia sonora inicial, recebida nos primeiros 80 milissegundos, e a energia sonora tardia, que chega após este intervalo. Este parâmetro foi inicialmente proposto por Reichardt *et al.* (1975) e está normalizado na ISO 3382-1 [12][17].

De forma prática, valores elevados de C_{80} indicam uma predominância das reflexões precoces, resultando num som mais nítido e definido, o que é desejável em salas de música de câmara. Por outro lado, valores baixos de traduzem uma maior presença das reflexões tardias, proporcionando uma sensação de envolvência sonora, característica desejável em salas de música sinfónica ou coral, onde alguma mistura entre notas é aceitável e até esteticamente agradável [1][4][17].

A Claridade é calculada através da equação (2.19), que expressa a relação entre a energia sonora acumulada nos primeiros 80 ms e a energia total posterior:

$$C_{80} = 10\log\left(\frac{\int_0^{80\ ms} p^2(t)\ dt}{\int_{80\ ms}^{\infty} p^2(t)\ dt}\right) \tag{2.19}$$

Em que:

- C_{80} – Claridade (dB);
- $p(t)$ – Reação impulsiva da sala em um determinado ponto (Pa).

De acordo com a ISO 3382-1 [12], o limite de 80 ms foi adotado por corresponder ao limiar de perceção temporal entre o som direto e o início da reverberação, sendo o intervalo ideal para distinguir o som inicial (*early sound*) do som tardio (*late sound*) em ambientes para música. Para salas destinadas à palavra, aplica-se o parâmetro C_{50}, que segue a mesma formulação, mas considera o intervalo de 0 a 50 ms, representando o tempo crítico para a perceção clara da palavra. Em geral, valores de C_{80} superiores a +6 dB são considerados adequados para salas de conferência e auditórios, enquanto valores entre -2 e +2 dB são preferíveis para salas de concerto.

Quadro 2.8 - Valores ideais de C_{80} para diversos parâmetros acústicos objetivos em função do tipo de utilização (adaptado de [1]).

Função	C_{80} **(dB)**	**Função**	C_{80} **(dB)**
Auditório (palavra)	> 6	Música sinfónica Clássica	-1 a 0
Teatro	> 6	Música sinfónica Romântica	-2 a -1
Cinema	> 5	Música sinfónica Moderna	-1 a 0
Estúdio de gravação	> 6	Música popular	> 6
Ópera (não wagneriana)	3 a 4	Música de órgão	< -2
Ópera (Wagner)	1 a 2	Coros gregorianos	-3 a -1
Música sinfónica Barroca	0 a 2		

2.7.4.3 Tempo Central (*TS*)

O Tempo Central (TS) representa o centro de gravidade temporal da resposta impulsiva de uma sala, sendo um dos parâmetros utilizados para descrever a distribuição temporal da energia sonora no campo acústico. Este parâmetro indica o instante médio em que a energia sonora é recebida pelo recetor, considerando toda a duração do decaimento sonoro após a emissão do som direto. Em termos práticos, corresponde ao ponto no tempo em que a energia recebida antes e depois desse instante é igual, funcionando como uma medida do equilíbrio entre som direto e som refletido [1].

O conceito foi introduzido por Cremer e Müller (1978), que sugeriram o Tempo Central como um indicador alternativo da clareza sonora global em salas de concerto. Valores mais baixos de TS indicam uma predominância de energia sonora inicial, resultando num som mais definido e articulado, enquanto valores mais elevados traduzem uma maior contribuição de energia tardia, proporcionando uma sensação mais envolvente e reverberante [18].

De acordo com Kuttruff [4] e a norma ISO 3382-1 [12], os valores típicos de TS variam entre 140 ms e 180 ms para frequências médias de 250 a 2k Hz, dependendo da dimensão e absorção do espaço.
A sua determinação é feita com base na resposta impulsiva da sala, conforme a equação (2.20):

$$TS = \frac{\int_0^\infty t * p^2(t)\, dt}{\int_t^\infty p^2(t)\, dt} \tag{2.20}$$

Em que:

- TS – Tempo central (ms);
- t – Tempo (ms);
- $p(t)$ – Reação impulsiva da sala em um determinado ponto (Pa).

2.7.5 PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJETIVOS

Os parâmetros acústicos subjetivos dizem respeito a aspetos avaliados com base na perceção individual dos ouvintes, refletindo opiniões e sensações pessoais relativamente à qualidade sonora de um espaço. Estes parâmetros são de particular relevância na análise acústica de grandes salas de espetáculos, onde a experiência auditiva assume um papel determinante na perceção global do ambiente [1].

- **Ruído de fundo**: corresponde aos ruídos presentes no ambiente que não têm origem na fonte sonora principal nem nos ouvintes. Inclui o ruído de tráfego, sistemas de ventilação, equipamentos elétricos e outros ruídos indesejáveis que possam interferir com a audição e a comunicação dentro do espaço;
- **Intensidade do som**: refere-se à perceção global do "volume" ou força do som num determinado ponto do espaço. Resulta da combinação entre o som direto e o som reverberante, influenciando a sensação de envolvência e conforto acústico.
- **Clareza do discurso musical**: traduz o grau de distinção entre notas sucessivas, ou seja, a capacidade de ouvir cada som separadamente e de forma definida no tempo. Está diretamente relacionada com o comportamento das superfícies refletoras da sala e com o equilíbrio entre as reflexões iniciais e tardias.
- **Reverberância**: é a persistência do som num recinto após a fonte sonora deixar de emitir. Este parâmetro está intimamente ligado ao tempo de reverberação, permitindo estimar o período durante o qual o som permanece audível no espaço.
- **Eco**: corresponde a reflexões sonoras suficientemente retardadas e intensas para serem percebidas como sons distintos do original. Tendem a ocorrer em locais onde as paredes ou tetos refletores estão muito afastados da fonte sonora, particularmente em grandes auditórios ou igrejas com tempos de reverberação relativamente curtos.
- **Direccionalidade**: é a sensação de que o som vem do eixo da fonte sonora. Geralmente sente-se que o som vem na direção em que se vê a fonte, no entanto acontece também de existir a sensação de que o som é emitido dum ponto diferente daquele em que a fonte sonora se encontra.
- **Intimidade**: consiste na sensação auditiva de proximidade com a fonte sonora, dando a sensação de que se encontra numa sala de pequenas dimensões apesar de que não o seja.
- **Envolvimento**: é o sentimento de estar imerso no som ou rodeado por ele. Este envolvimento com o som resulta da maneira de como o som reverberante se espalha pelo espaço, ou seja, da maneira de como o som de difunde na sala.
- **Equilíbrio tímbrico**: é a sensação de que não há desigualdade na receção de todos os tipos de sons tanto para frequências baixas como para altas.
- **Impressão geral**: é a impressão geral da qualidade acústica sentida na sala.

3

ESTADO DE ARTE

3.1 CONTEXTO HISTÓRICO DAS SALAS DE ESPETÁCULO

3.1.1 PERÍODO GREGO E ROMANO

Os primeiros espaços dedicados à representação dramática surgiram na Grécia Antiga, constituindo exemplos notáveis da integração entre arquitetura, topografia e acústica. Estes teatros, concebidos ao ar livre, eram implantados em encostas naturais, aproveitando a inclinação do terreno para assegurar visibilidade e projeção sonora sem recurso a amplificação artificial.

O Teatro de Epidauro (Figura 3.1) representa o paradigma desse tipo construtivo, combinando a forma semicircular da cavea com o uso de pedra calcária, material que funcionava como refletor natural do som [21]. Sendo que, estudos recentes demonstram que a disposição angular dos degraus e a ausência de cobertura permitiam uma distribuição uniforme da energia sonora, assegurando elevados níveis de inteligibilidade da palavra, mesmo nas filas superiores [22][23].



Figura 3.1- Teatro Epidauro, Grécia [21].

Durante o período helenístico, a forma dos teatros tornou-se mais regular, e a *skené* (o cenário fixo) ganhou maior relevância arquitetónica e acústica, funcionando como elemento refletor. Esta evolução consolidou princípios que influenciaram a conceção dos teatros posteriores [24].

Com o advento do Império Romano, os teatros passaram a assumir configurações arquitetónicas autónomas, deixando de depender da modelação natural do terreno, como acontecia nos teatros gregos. Uma das principais características destas novas estruturas era a cavea semicircular, isto é, o conjunto de bancadas em forma de meia-lua, organizada em setores concêntricos e suportada por galerias e abóbadas, permitindo acomodar grandes audiências com uma distribuição espacial mais uniforme. Outro elemento estruturante era a scaenae frons monumental, a fachada arquitetónica que compunha o pano de fundo do palco, geralmente composta por colunatas, nichos, estátuas e múltiplos planos decorativos. Esta estrutura funcionava não apenas como elemento cénico, mas também como superfície refletora, promovendo a projeção da energia sonora em direção à plateia e contribuindo para a melhoria da inteligibilidade da palavra [25]. Os teatros romanos incorporavam também o velarium, um grande toldo têxtil retrátil que se estendia sobre parte da cavea, garantindo conforto térmico e, simultaneamente, contribuindo para a contenção do som, reduzindo perdas para o exterior e reforçando ligeiramente o campo sonoro percebido pelo público (Figura 3.2). Assim, a reflexão sonora passou a ser fortemente condicionada pela scaenae frons, cuja geometria vertical e ornamentação complexa produziam múltiplas reflexões, reforçando o campo direto sobretudo nas zonas centrais da plateia [26].



Figura 3.2- Teatro de Orange, França (séc. I d.C.) [25].

De acordo com Rindel [27], a introdução de superfícies curvas e concavas gerou fenómenos de eco focalizado, que foram mitigados através da segmentação e ornamentação das fachadas interiores. A literatura clássica, nomeadamente Vitrúvio, já descrevia preocupações com a propagação das ondas sonoras, estabelecendo os primeiros princípios empíricos de acústica arquitetónica [28].

A análise comparativa entre teatros gregos e romanos demonstra que os primeiros privilegiavam a relação natural entre voz e ambiente, enquanto os segundos procuravam o controlo geométrico e cenográfico do som. Estes modelos, apesar das limitações construtivas da época, antecipam conceitos modernos de reflexão primária, tempo de reverberação ótimo e distribuição energética, atualmente estudados pela acústica de salas [22][23] [24].

Em síntese, os teatros da Antiguidade constituem a origem do pensamento acústico aplicado à arquitetura. O equilíbrio entre forma, materialidade e função, observado nestas construções, permanece um referencial para o estudo contemporâneo das salas de espetáculo e estabelece a base conceptual para as fases subsequentes da evolução histórica.

3.1.2 PERÍODO DO RENASCIMENTO

O Renascimento, período compreendido entre os finais do século XIV e o século XVI, marcou uma rutura profunda com as tradições construtivas medievais e uma reinterpretação dos princípios clássicos herdados da Antiguidade. A partir do século XV, a arquitetura teatral foi revitalizada sob a influência do Humanismo, corrente que colocava o ser humano e a experiência sensorial no centro da criação artística. Neste contexto, as salas de espetáculo começaram a refletir uma preocupação crescente com a geometria, a perspetiva e a harmonia visual e acústica, conduzindo à transformação gradual dos espaços performativos e abrindo caminho, entre os séculos XVI e XVII, para a formalização do teatro moderno [29].

Durante os séculos XV e XVI, o teatro italiano tornou-se o principal laboratório de inovação arquitetónica e cénica da Europa. Neste contexto, e apoiando-se nos tratados redescobertos de Vitruvius e nos avanços científicos do período, arquitetos como Andrea Palladio e Vincenzo Scamozzi desenvolveram uma nova abordagem ao espaço performativo. O seu objetivo consistia em reinterpretar o modelo clássico de teatro, não apenas recuperando os princípios antigos, mas adaptando-os às necessidades dramatúrgicas emergentes, dando origem às primeiras soluções sistematizadas de cenografia e ilusão perspetiva.

Assim sendo, o Teatro Olímpico de Vicenza (Figura 3.3) constitui um marco inaugural, sendo considerado o primeiro teatro coberto e permanente do mundo moderno. A sua planta elíptica, a plateia em degraus e a cenografia em perspetiva forçada projetada por Scamozzi conferem-lhe uma unidade espacial inédita. A integração entre arquitetura e ilusão cénica proporcionou um ambiente acústico equilibrado, com reflexões sonoras múltiplas e homogéneas, reforçadas pelas superfícies de madeira e estuque [30].



Figura 3.3- Teatro Olímpico de Vicenza, Itália (1580–1585) [30]

Por outro lado, o Teatro all Antica, construído em Sabbioneta em 1588, representa a transição entre o modelo clássico e o experimentalismo renascentista. A introdução de um palco retangular fixo e a eliminação do espaço circular da orquestra acentuaram a separação entre atores e público, configurando o embrião do palco frontal moderno [31].

Em consequência destas transformações, a noção de "caixa italiana" começou a consolidar-se, caracterizando-se por um espaço retangular, coberto, com plateia inclinada e palco delimitado por

um proscénio. Este modelo permitia um maior controlo da propagação sonora, uma vez que as reflexões eram confinadas e direcionadas pelas superfícies laterais e pelo teto [23].

Além disso, o volume mais reduzido e o revestimento em materiais como a madeira favoreceram um tempo de reverberação curto, adequado à inteligibilidade da palavra e à música vocal predominante da época [22].

O Teatro Farnese de Parma (Figura 3.4), frequentemente associado à transição entre o Renascimento e o Barroco, reforçou este paradigma. A sua estrutura integralmente construída em madeira, aliada à utilização de galerias e camarotes, introduziu novas possibilidades de envolvimento visual e acústico do público [32].



Figura 3.4-Teatro Farnese, Parma, Itália (1618) [32].

3.1.3 PERÍODO BARROCO

O Período Barroco, compreendido entre os séculos XVII e XVIII, representou um ponto de viragem na história do teatro e da arquitetura das salas de espetáculo. Este movimento, que privilegiava a emoção, o esplendor visual e o envolvimento do público, traduziu-se na criação de espaços cenográficos grandiosos, onde a acústica, a ornamentação e a cenografia atuavam de forma integrada [33].

Ao contrário da sobriedade geométrica renascentista, o Barroco procurava a teatralidade total, uma experiência sensorial e simbólica, onde o som, a luz e a decoração contribuíam para a mesma narrativa.

Assim, a arquitetura teatral deste período evoluiu para formas mais complexas, destacando-se o desenvolvimento do modelo em ferradura, que passou a dominar a construção de teatros europeus. Esta configuração, com plateia central, camarotes dispostos em vários níveis e um proscénio fortemente ornamentado, permitia uma maior proximidade visual e social entre público e espetáculo [35].

Além disso, a distribuição vertical e envolvente das galerias gerava reflexões sonoras múltiplas e difusas, proporcionando uma sensação de envolvência acústica única [23].

O Teatro Farnese de Parma (1618), embora construído no final do Renascimento, é considerado um precursor direto do barroco, pois introduziu elementos que seriam amplamente replicados. O espaço em madeira, o palco elevado e o uso de camarotes hierarquizados constituíram referências fundamentais para a tipologia seguinte [31].

Já no século XVIII, teatros como o Teatro di San Carlo, em Nápoles (1737), e o Teatro alla Scala (Figura 3.5), em Milão (1778), aperfeiçoaram esta fórmula, associando a excelência acústica à monumentalidade arquitetónica [22].



Figura 3.5-Teatro alla Scala, Milão (1778) [22].

Por outro lado, a difusão do estilo barroco para o norte da Europa originou edifícios de grande requinte técnico e acústico, como a Ópera de Dresden e a Ópera de Viena, onde o uso de madeiras nobres, tecidos pesados e estuques ornamentais contribuiu para uma absorção sonora equilibrada, controlando a reverberação e realçando a clareza musical [35].

Desta forma, o período barroco consolidou a forma arquitetónica que perduraria até ao século XIX, o teatro em ferradura com palco frontal. As dimensões volumétricas médias (entre 8 000 e 14 000 m³) e a forte presença de materiais difusores e absorventes criavam condições ideais para a música lírica e a voz humana, géneros predominantes na época. Deste modo, a análise acústica destes espaços, realizada por autores como Beranek e Long, demonstra tempos de reverberação médios entre 1,2 e 1,6 segundos, considerados ótimos para ópera e canto [36].

Em síntese, o Barroco elevou a experiência teatral a um novo patamar sensorial, fundindo arquitetura, arte e som num mesmo conceito de espetáculo total. A partir deste momento, o espaço teatral passou a ser entendido como um instrumento acústico e visual cuidadosamente projetado, antecipando os princípios que viriam a orientar as grandes salas de concerto dos séculos seguintes.

3.1.4 Período Neoclássico e o Início da Acústica Científica

O Neoclassicismo, emergente na segunda metade do século XVIII, constituiu uma reação racional e estética ao excesso ornamental do período barroco. Inspirado pelos princípios da Antiguidade clássica e pelas descobertas arqueológicas de Pompeia e Herculano, este movimento procurou restaurar a ordem, a simetria e a proporção como fundamentos do projeto arquitetónico [37].

Assim, a arquitetura teatral neoclássica traduziu um retorno à clareza formal e à lógica construtiva, onde o espaço passou a ser desenhado com base em critérios de equilíbrio geométrico e funcionalidade acústica.

Durante este período, o modelo em ferradura manteve-se predominante, mas foi reinterpretado de forma mais sóbria e racional. As salas passaram a apresentar linhas arquitetónicas mais depuradas,

com ornamentação moderada e maior atenção à relação entre forma e propagação sonora. Este equilíbrio permitia uma melhor distribuição das reflexões acústicas, reduzindo os focos excessivos e favorecendo a inteligibilidade da palavra [23].

Um exemplo paradigmático desta transição é o Teatro alla Scala, em Milão, inaugurado em 1778. Embora concebido sob forte influência barroca, a sua estrutura proporcional e rigor axial revelam já uma clara adesão ao ideal neoclássico. A conjugação entre materiais de alta difusividade, como a madeira e o estuque, e um volume controlado, resultou numa acústica equilibrada, adequada tanto à ópera quanto à música instrumental (Figura 3.6) [22].



Figura 3.6- Interior do Teatro alla Scala, Milão [22].

Em Portugal, o Teatro Nacional de São Carlos (Figura 3.7), inaugurado em 1793 em Lisboa, representa o principal exemplo do Neoclassicismo teatral nacional. O edifício, projetado pelo arquiteto José da Costa e Silva, inspirou-se diretamente no Scala de Milão, adaptando o modelo italiano às condições urbanas e culturais da capital portuguesa. A sala apresenta um volume aproximado de 12 000 m³, planta em ferradura e palco frontal, possuindo uma das acústicas mais equilibradas da Europa, reconhecida pela sua clareza e homogeneidade sonora [38].

Com o avanço do século XIX, o Neoclassicismo deu origem ao Ecletismo, abrindo caminho para a integração de novos materiais e técnicas construtivas, como o ferro fundido e, mais tarde, o betão armado. Estes avanços estruturais permitiram o aumento do volume das salas e um controlo mais rigoroso da forma, inaugurando uma fase de experimentação acústica. Paralelamente, surge o interesse crescente pelo estudo científico do som em recintos fechados, impulsionado por investigações pioneiras sobre reverberação e inteligibilidade [35].

A transição do empirismo para a medição objetiva concretizou-se com o trabalho de Wallace Clement Sabine, que no final do século XIX formulou a relação entre o tempo de reverberação (T), o volume do recinto e a área de absorção dos materiais.

Desta forma, o período Neoclássico consolidou uma visão racional e científica da arquitetura teatral, em que o projeto deixou de depender exclusivamente da experiência empírica e passou a integrar princípios quantitativos. A conjugação entre estética clássica, proporção e método científico estabeleceu os fundamentos que orientariam a construção das grandes salas do século XX.



Figura 3.7-Interior do Teatro Nacional de São Carlos, Lisboa (1793) [38].

3.2 EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS

3.2.1 PARÂMETROS GERAIS

As salas de espetáculo são espaços concebidos para acolher uma variedade de manifestações artísticas (teatro, música, dança, cinema ou conferências) e, como tal, exigem um conjunto de parâmetros funcionais que assegurem simultaneamente o conforto do público, a eficiência técnica e a qualidade acústica do espaço [21].

A definição destes parâmetros depende da natureza do uso previsto e das características físicas e sonoras do ambiente, integrando aspetos arquitetónicos, ergonómicos e acústicos que determinam o desempenho global da sala.

3.2.2 GEOMETRIA E CONFIGURAÇÃO ESPACIAL DAS SALAS DE ESPETÁCULO

3.2.2.1 Auditórios de 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 (Figura 3.8), o palco proscénio é frequentemente apontado como o mais eficaz, pois a moldura da boca de cena ajuda a concentrar a atenção e a direcionar o som para a audiência [21].

Existem, contudo, outras configurações típicas, como o palco aberto, o palco de arena e o palco proscénio aberto (Figura 3.8). Cada uma destas soluções apresenta desafios distintos, sendo os

palcos abertos ou em arena mais exigentes no controlo da difusão e da reflexão sonora, devido à dispersão da audiência em torno da fonte sonora [23].

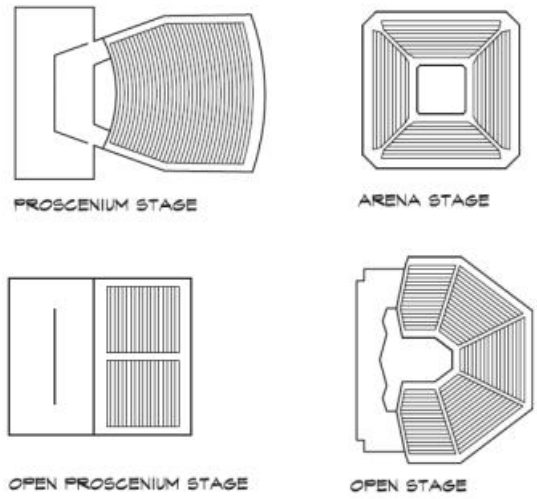


Figura 3.8- Tipologias de palcos mais comuns em auditórios de teatro [21].

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 [21].

A inteligibilidade da palavra depende fortemente da fração de energia inicial (*early energy fraction*), que corresponde à relação entre o som direto e as primeiras reflexões. Quanto maior esta fração, melhor a inteligibilidade. Este valor é influenciado pelo rácio de reflexões iniciais (*early reflection ratio*), que quantifica o número e intensidade das 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 tempo de reverberação constitui o principal parâmetro de controlo acústico em auditórios destinados á palavra. Para salas de teatro, valores ideais situam-se em torno de 1,0 segundo, proporcionando um equilíbrio adequado entre clareza e naturalidade vocal [23]. Contudo, valores ligeiramente inferiores, entre 0,7 e 0,8 s, podem ser preferíveis em salas de maiores dimensões ou com maior número de superfícies refletoras, assegurando uma boa inteligibilidade sem comprometer o conforto auditivo. Tempos de reverberação inferiores a 0,5 s devem ser evitados, pois resultam em ambientes acusticamente secos e desconfortáveis, apesar de tecnicamente eficazes para a palavra [23].

De acordo com Beranek [7], o objetivo é alcançar um campo sonoro equilibrado, em que o som direto, as primeiras reflexões e a energia reverberante contribuem harmoniosamente para a perceção de proximidade e clareza vocal. A qualidade acústica ideal traduz-se, assim, num ambiente que favorece o discurso natural, sem fadiga auditiva e com inteligibilidade consistente em todas as zonas da plateia.

3.2.3 Salas para a Música

Ao contrário dos espaços dedicados à palavra, as salas destinadas à música instrumental, coral ou sinfónica exigem condições acústicas que promovam a envolvência, 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 com o espaço e se prolonga no tempo [21][22]. Os Valores de referência apresentados para os parâmetros T_{60}, C_{80} e LF correspondem, salvo indicação contrária à média das bandas críticas da música situadas entre 500 e 1000 Hz, conforme recomendado pela ISO 3382-1 e pela literatura clássica de Beranek [7].

Deste modo, um dos parâmetros fundamentais na conceção destas salas é o tempo de reverberação, que deve variar de acordo com o tipo de música executada. Para música sinfónica, valores entre 1,8 e 2,2 segundos são considerados ideais, garantindo uma sensação de plenitude e sustentação sonora. Já para música de câmara, tempos ligeiramente inferiores, entre 1,4 e 1,8 s, favorecem a articulação e a definição dos instrumentos. Por sua vez, as óperas exigem um equilíbrio entre clareza e sustentação, situando-se geralmente entre 1,3 e 1,8 s [22][23].

Sendo assim, a envolvência acústica é fortemente dependente da presença de reflexões laterais iniciais, que reforçam a sensação de proximidade entre o público e a fonte sonora. Estas reflexões devem ocorrer entre 15 e 80 milissegundos após o som direto, com um nível de energia lateral expresso pelo parâmetro LF (*Lateral Fraction*), cujo valor ideal se situa entre 0,15 e 0,25 para música orquestral [23]. Paralelamente, a clareza musical, que relaciona a energia inicial e tardia, deve situar-se entre –2 e +2 dB, permitindo uma fusão acústica equilibrada sem perda de definição.

O volume da sala apresenta uma relação direta com o tempo de reverberação. Valores entre 8 e 12 m^3 por lugar são considerados adequados para música sinfónica, podendo ser ligeiramente inferiores em recintos de câmara. Volumes excessivos, por outro lado, dificultam a definição sonora e criam sensações de dispersão acústica [21][24].

Em termos de forma, as tipologias arquitetónicas influenciam profundamente a distribuição das reflexões e a qualidade espacial do som. A tradicional forma retangular "*shoebox*" (Figura 3.9) mantém-se como a mais eficaz para salas de concertos, devido à sua capacidade de gerar múltiplas reflexões laterais úteis. Formas em leque ou circulares, embora favoreçam a visibilidade e a capacidade do público, tendem a reduzir a incidência das reflexões laterais, prejudicando a envolvência sonora. Mais recentemente, tipologias em hexágono ou ferradura têm sido exploradas com sucesso, oferecendo uma distribuição difusa da energia sonora e uma sensação de intimidade acrescida (Figura 3.9) [21][22][23].

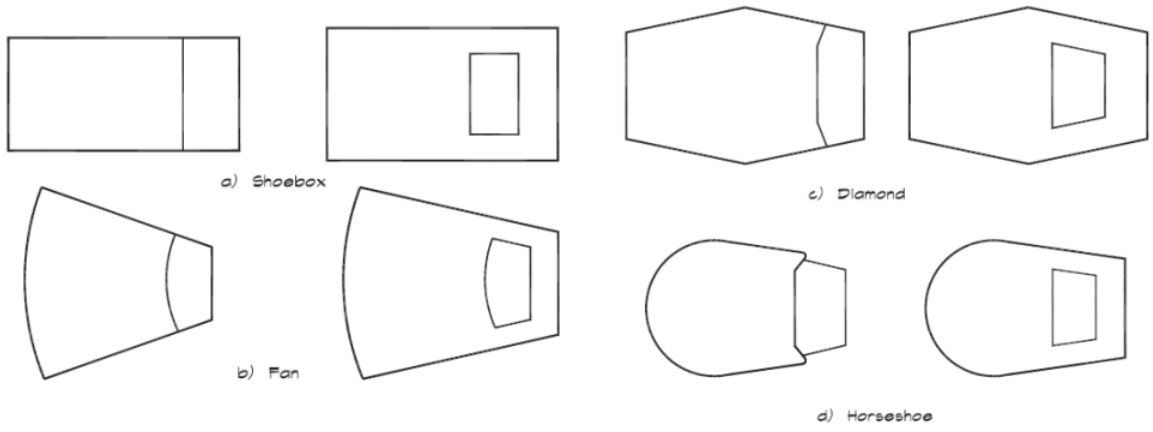


Figura 3.9- Formas típicas de salas de concerto: a) Shoebox, b) Leque, c) hexágono, d) ferradura.

O palco, por sua vez, deve integrar uma concha acústica cuidadosamente dimensionada, de modo a projetar o som da orquestra de forma homogénea para toda a audiência. Além disso, esta estrutura atua como um elemento de transição entre o volume cênico e o auditório, contribuindo para o reforço da energia direta e para o equilíbrio espectral entre as diferentes secções instrumentais. Deste modo, a concha acústica não apenas melhora a perceção do som pelo público, como também auxilia os músicos no retorno acústico e na coesão interpretativa do conjunto [23].

Com efeito, o desenvolvimento tecnológico das últimas décadas permitiu a introdução de soluções de acústica variável, que vieram ampliar significativamente a versatilidade destes espaços. Atualmente, muitas salas modernas recorrem a painéis móveis, cortinas retráteis ou sistemas de reforço eletroacústico, os quais possibilitam o ajuste da resposta acústica às características de cada repertório. Por conseguinte, torna-se viável adaptar o mesmo recinto a diferentes tipologias musicais, desde concertos sinfónicos e corais até atuações amplificadas, garantindo assim uma resposta sonora equilibrada em todas as situações [24].

Em síntese, o sucesso acústico de uma sala de música depende do equilíbrio entre clareza, envolvência e riqueza tímbrica, alcançado através de uma conjugação criteriosa entre geometria, materiais, volume e tempo de reverberação. Assim, as melhores salas distinguem-se pela capacidade de unir o rigor científico do projeto à perceção subjetiva do prazer auditivo, criando uma experiência sensorial e emocionalmente envolvente.

3.2.4 SALAS MULTIUSOS

As salas polivalentes ou multiusos são espaços concebidos para acolher uma diversidade de utilizações, desde conferências, teatro, concertos, projeções ou eventos corporativos, e, como tal, requerem uma elevada flexibilidade acústica e funcional. Frequentemente, as condições que favorecem a palavra revelam-se inadequadas para a música, e vice-versa. Assim, projetar um espaço multiusos implica conciliar requisitos acústicos contraditórios, garantindo simultaneamente inteligibilidade, envolvência e conforto auditivo [21][22].

Do ponto de vista acústico, o principal desafio reside na variabilidade do tempo de reverberação e na capacidade de o adaptar às diferentes utilizações do espaço. Para a palavra e representações teatrais, são recomendados tempos entre 0,7 e 1,0 segundos, avaliados na média das bandas de 500 e 1000 Hz, assegurando clareza e articulação. Já para música sinfónica ou coral, valores entre 1,6 e 2,0 segundos, igualmente referidos na média das bandas de 500 e 1000 Hz, revelam-se mais adequados, promovendo riqueza tímbrica e sustentação harmónica [23].

Neste contexto, a conceção destas salas recorre a sistemas de controlo acústico variável, que permitem alterar o comportamento sonoro do recinto. Entre as soluções mais utilizadas destacam-se cortinas retráteis, painéis móveis, tetos suspensos ajustáveis e difusores rotativos, que modificam o coeficiente global de absorção e reflexão. Desta forma, uma mesma sala pode ser configurada para acolher uma conferência, um concerto de câmara ou uma projeção cinematográfica sem comprometer a qualidade acústica [21][23][24].

Segundo Long [23], o desempenho de uma sala multiusos depende não apenas da sua flexibilidade, mas também da integração espacial e visual. A fonte sonora deve situar-se acima do primeiro nível de assentos, garantindo projeção e cobertura adequadas. Quando a música não é amplificada, é fundamental o uso de superfícies refletoras no teto e nas paredes laterais, de preferência móveis ou ajustáveis, para apoiar músicos e oradores. Além disso, os revestimentos e assentos devem contribuir para um controlo equilibrado da absorção sonora, minimizando diferenças entre as condições de sala vazia e ocupada.

Em termos de geometria e volume, privilegiam-se configurações retangulares ou ligeiramente em leque, capazes de assegurar uma difusão sonora uniforme e uma boa distribuição das primeiras reflexões. O volume total deve ser cuidadosamente dimensionado: um espaço demasiado pequeno pode gerar som seco e desconfortável, enquanto um volume excessivo provoca dispersão e perda de definição. A literatura recomenda valores de 8 a 12 m³ por lugar, ajustáveis em função da tipologia do uso [22].

O controlo do ruído de fundo é igualmente determinante para o conforto auditivo. De acordo com normas internacionais, os níveis de ruído não devem ultrapassar as curvas de incomodidade NC-25 (Noise Criterion) em pequenos auditórios (menos de 500 lugares), NC-20 em salas de ópera e teatro, e NC-15 em grandes salas de concerto [23]. Sistemas de ventilação silenciosos, isolamento estrutural eficaz e proteção contra vibrações são essenciais para garantir a ausência de interferências audíveis.

Atualmente, a tecnologia digital permite uma nova abordagem à flexibilidade acústica através dos sistemas de acústica assistida eletronicamente (*Electronic Acoustic Enhancement Systems).* Estes dispositivos, compostos por redes de microfones e colunas distribuídas, permitem ajustar digitalmente o tempo de reverberação e o equilíbrio espectral, mantendo a naturalidade do som. Exemplos notáveis incluem o *Konzerthaus* de Berlim e o *National Forum of Music* de Wrocław, onde esta integração entre arquitetura e engenharia sonora garante condições acústicas quase ideais para qualquer tipo de evento [24].

Em síntese, as salas multiusos representam a convergência entre acústica arquitetónica e engenharia adaptativa, constituindo uma das tipologias mais complexas de projetar. O sucesso destes espaços reside na capacidade de equilibrar versatilidade funcional e excelência sonora, assegurando que cada evento, seja uma palestra intimista ou uma atuação sinfónica, em que decorra num ambiente acusticamente otimizado e esteticamente coerente.

3.2.5 PROSCÉNIO

O proscénio constitui a estrutura arquitetónica que estabelece a transição entre o palco e a plateia, assumindo um papel determinante tanto na perceção visual como no comportamento acústico da sala. Funciona como uma moldura física e sonora, responsável por delimitar o espaço cénico e por orientar a projeção do som em direção ao público [21][23].

Do ponto de vista acústico, o proscénio atua como um elemento de difusão e canalização sonora, permitindo controlar a forma como a energia acústica gerada no palco se propaga na audiência. Estudos recentes, como no artigo " No Shell Gaem: *Ensuring Auditorium Acustics*" publicado pela *Construction* Canada [40], destacam que o desempenho acústico de um teatro depende em grande medida do tratamento aplicado nesta zona de transição.

A utilização dos painéis suspensos (*overhead panels*) e as torres acústicas laterais (*shell towers*) desempenham uma função essencial neste contexto: promovem a comunicação entre os intérpretes no palco e asseguram a projeção do som em direção à plateia. Estes elementos refletem as primeiras ondas sonoras, proporcionando uma resposta inicial controlada que reforça a clareza e a inteligibilidade. Ao mesmo tempo, a sua inclinação e disposição espacial evitam concentrações de energia acústica e ecos indesejados, contribuindo para uma distribuição sonora equilibrada (Figura 3.10).

A Figura 3.10 mostra a distribuição das reflexões sonoras em torno do proscénio e do palco, destacando a importância das superfícies superiores e laterais no reforço das primeiras reflexões e na criação de um campo sonoro equilibrado. Estas superfícies devem apresentar materiais difusores (como madeira, gesso

moldado ou painéis compostos) e formas ligeiramente inclinadas para evitar concentrações de energia sonora e focos acústicos indesejados [22][23].

Por outro lado, o dimensionamento do proscénio deve ser cuidadosamente ajustado ao volume global da sala. Uma abertura demasiado ampla tende a dispersar o som, reduzindo a projeção e a envolvência acústica, enquanto uma abertura demasiado estreita pode causar confinamento sonoro e mascaramento das altas frequências. Assim, a integração entre a geometria do proscénio, o tratamento das superfícies refletoras e o posicionamento da orquestra é essencial para alcançar um equilíbrio entre clareza, força sonora e naturalidade [24][40].

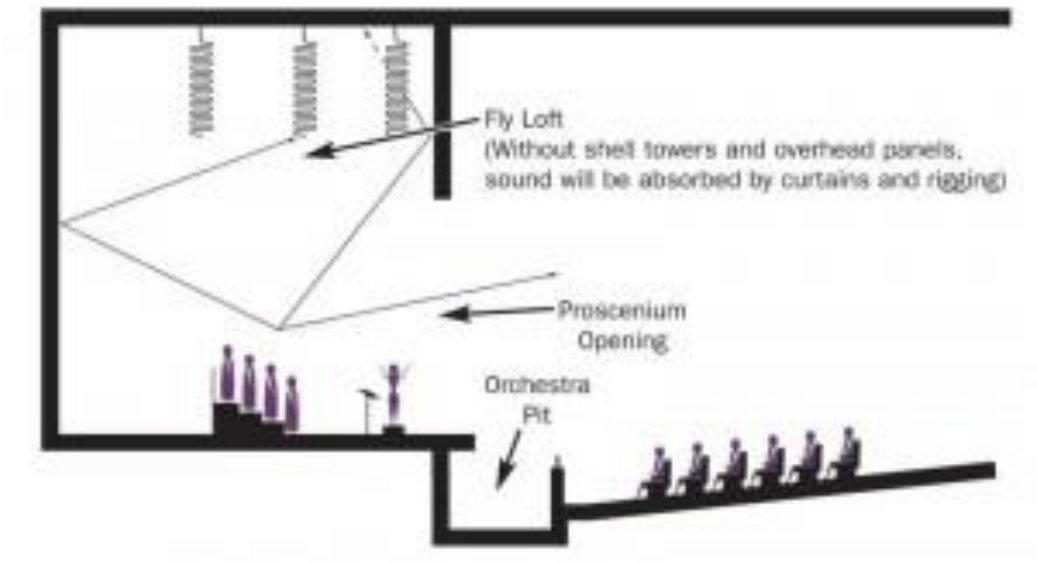


Figura 3.10- Distribuição das reflexões sonoras em torno do proscénio e do palco, ilustrando o papel dos painéis suspensos e das torres acústicas na projeção do som (adaptado de Construction Canada, 2024) [40].

3.3 LEGISLAÇÃO PORTUGUESA

Em Portugal, o desempenho acústico dos edifícios é regulamentado pelo Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 96/2008, de 9 de junho, o qual veio atualizar o anterior Decreto-Lei n.º 129/2002.Este diploma estabelece as condições acústicas a cumprir nos edifícios novos e reabilitados, em alinhamento com as diretivas europeias relativas à proteção contra o ruído e ao conforto acústico [39].

O RRAE visa regular a vertente do conforto acústico no regime da edificação e contribuir para a melhoria da qualidade do ambiente acústico, promovendo o bem-estar e a saúde das populações através da melhoria do projeto e construção de edifícios [39].

As normas do presente regulamento aplicam-se à construção, reconstrução, ampliação ou alteração de edifícios, em função dos usos a que se destinam, abrangendo as seguintes tipologias [39]:

- Edifícios habitacionais e mistos, bem como unidades hoteleiras (art.º 5.º);
- Edifícios comerciais e de serviços, e partes semelhantes em edifícios industriais (art.º 7.º);
- Edifícios escolares e de investigação (art.º 7.º);

- Edifícios hospitalares e similares (art.º 8.º);
- Recintos desportivos (art.º 9.º);
- Estações de transporte de passageiros (art.º 10.º);
- Auditórios e salas (art.º 10.º-A).

Entre as tipologias acima descritas, o artigo 10.º-A assume particular relevância no contexto desta dissertação, uma vez que define as condições acústicas específicas para auditórios, salas de conferência, teatros e cinemas.

De acordo com o ponto 1 do artigo 10.º-A, o valor máximo para o tempo de reverberação médio (T) deve ser determinado nas bandas de oitava centradas em 500, 1000 e 2000 Hz, considerando apenas o volume interior do recinto (V, em m³), segundo as expressões 3.1 3.2 e 3.3:

$$T \leq 0{,}12V^{\frac{1}{3}}, \qquad se\ V\ < 250\ m^3 \tag{3.1}$$

$$T \leq 0{,}32 + 0{,}17\log(V)\,, \qquad se\ 250 \leq V < 9.000\ m^3 \tag{3.2}$$

$$T \leq 0{,}05V^{\frac{1}{3}}, \qquad se\ V \geq 9.000\ m^3 \tag{3.3}$$

Além disso, o projeto de condicionamento acústico destes recintos deve assegurar uma inteligibilidade adequada da palavra e níveis de ruído compatíveis com o uso previsto [39].

Segundo o ponto 2 do mesmo artigo, o regulamento também se aplica aos recintos cuja principal valência não corresponda à oratória, como salas de espetáculo e auditórios musicais, exigindo um estudo acústico específico destinado a garantir o desempenho adequado à sua utilização funcional.

O ponto 3 define que as fachadas dos recintos devem assegurar valores de isolamento a ruídos aéreos, $D_{2m,nT,w}$, corrigidos pelos termos de adaptação aplicáveis Cou C_{tr}, de modo a garantir que o nível sonoro contínuo equivalente, L_{Aeq}, satisfaça a expressão 3.4:

$$L_{Aeq} \leq 30\ dB \tag{3.4}$$

O ponto 5 refere ainda que o nível de ruído contínuo equivalente particular, associado ao funcionamento de equipamentos técnicos como ventilação e climatização, deve cumprir as expressões 3.5 e 3.6.

$$L_{Aeq} \leq 38\ dB, \text{ no caso de cinemas} \tag{3.5}$$

$$L_{Aeq} \leq 30\ dB, \text{ nos restantes recintos} \tag{3.6}$$

De acordo com o ponto 8, as avaliações in situ devem considerar um fator de incerteza (I) associado à determinação das grandezas em causa.

O ponto 9 estabelece que o edifício é considerado conforme quando o valor medido para o tempo de reverberação (T) e para o nível de ruído cumpre simultaneamente:

a) O valor obtido para o tempo de reverberação (T) deve ser reduzido pelo fator I, de acordo com as seguintes expressões 3.7, 3.8 e 3.9:

$$25\ \%, se \qquad V\ < 250\ m^3 \tag{3.7}$$

$$35\ \%, se \qquad 250 \leq V < 9.000\ m^3 \tag{3.8}$$

$$40\ \%, se \qquad V \geq 9.000\ m^3 \tag{3.9}$$

b) O valor obtido para o nível de ruído particular também deve ser reduzido do fator I em 3 dB, cumprindo simultaneamente os limites regulamentares.

No caso do Teatro Sá da Bandeira, edifício histórico situado no centro do Porto, tem como utilização principal espetáculos de natureza teatral e musical, enquadrando diretamente na categoria de auditórios e salas prevista no artigo 10.º-A do RRAE [39].

4

METODOLOGIA

4.1 TEATRO SÁ DA BANDEIRA

4.1.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

O Teatro Sá da Bandeira, situado no coração da Baixa Portuense, é reconhecido como um dos espaços de espetáculo mais antigos e emblemáticos da cidade do Porto. A sua origem remonta a 1846, quando foi edificado como um modesto teatro-circo de madeira, construído por iniciativa de José Toudon Ferrer Catalon para acolher espetáculos equestres e representações itinerantes [41]. A estrutura, inicialmente provisória, rapidamente assumiu relevância no panorama cultural portuense, levando, em 1867, à construção de um novo edifício em alvenaria de pedra e cal, que forneceu a base estrutural para o teatro que hoje se preserva [42].

Durante a segunda metade do século XIX, o teatro adotou a designação de Teatro do Príncipe Real, refletindo o contexto político-monárquico da época. No entanto, após a Implantação da República em 1910, verificou-se uma redefinição das referências toponímicas e institucionais da cidade, promovendo a substituição de nomes associados à monarquia anterior por figuras notáveis do movimento liberal. É neste contexto que o teatro passa a denominar-se Teatro Sá da Bandeira, acompanhando a mudança do nome da rua onde se insere.

O nome "Sá da Bandeira" deriva diretamente de Bernado de Sá Nogueira de Figueiredo (1795-1876), militar, estadista e importante figura do liberalismo português. Sá da Bandeira destacou-se nas Guerras Liberais, defendendo a causa constitucional contra o absolutismo miguelista, tendo sido condecorado e promovido pela sua atuação militar. Posteriormente, desempenhou funções políticas de grande relevância, incluindo o cargo de Ministro da Guerra, Ministro do Reino, Presidente do Conselho de Ministros e, de forma especialmente simbólica, Ministro da Marinha e do Ultramar, cargo a partir do qual ficou conhecido por promover medidas pioneiras de abolição da escravatura nos territórios portugueses. A alcunha "da Bandeira" relaciona-se com o Alto da Bandeira, em Vila Nova de Gaia, onde, durante o Cerco do Porto (1832), Bernardo de Sá Nogueira comandou a defesa liberal, sendo gravemente ferido no braço direito, que acabaria por lhe ser amputado. A heroicidade desse episódio deu origem à alcunha e esteve na base dos títulos nobiliárquicos de barão, visconde e marquês de Sá da Bandeira (Figura 4.1) [43].

Assim, a designação do teatro não é apenas um reflexo toponímico, mas também uma expressão dos valores progressistas da época, homenageando uma das figuras mais marcantes da causa liberal e da modernização institucional do país. O teatro, ao adotar esta designação, tornou-se parte ativa

na reorganização simbólica da cidade durante as primeiras décadas da do liberalismo, reforçando o seu lugar no património cultural e político do Porto.



Figura 4.1- Bernardo de Sá Nogueira de Figueiredo, Marquês de Sá da Bandeira [44].

Para além da sua relevância histórica e simbólica, o Teatro Sá da Bandeira ocupa um papel central na vida cultural da cidade. Foi palco de atuações de grande destaque, como a da célebre atriz Sarah Bernhardt, em 1895, e acolheu, em 12 de novembro de 1896, a exibição dos primeiros filmes portugueses realizados por Aurélio da Paz dos Reis, tornando-se num dos primeiros espaços cinematográficos do país [45]. Estes acontecimentos contribuíram para a sua valorização e reconhecimento, culminando na sua classificação como Monumento de Interesse Público em 2020 [46].

Do ponto de vista arquitetónico, o edifício combina influências neoclássicas na fachada, marcada por simetria, proporção e sobriedade decorativa, com características barrocas e italianizantes no interior, evidentes na planta em ferradura, na disposição dos camarotes e na configuração do palco. Esta tipologia aproxima o teatro dos grandes modelos italianos que marcaram a evolução europeia das salas de espetáculo, garantindo condições favoráveis de visibilidade, acústica natural e projeção sonora, tal como discutido nas secções precedentes deste capítulo [46].

Atualmente, o Teatro Sá da Bandeira, localizado na rua Sá da Bandeira (Figura 4.2), mantém uma programação ativa e continua a ser uma referência na cultura portuense. A sua história, os valores simbólicos que lhe deram nome e as suas características arquitetónicas tornam-no um caso de estudo particularmente relevante no âmbito da caracterização acústica, integrando harmoniosamente património, memória urbana e funcionalidade contemporânea.

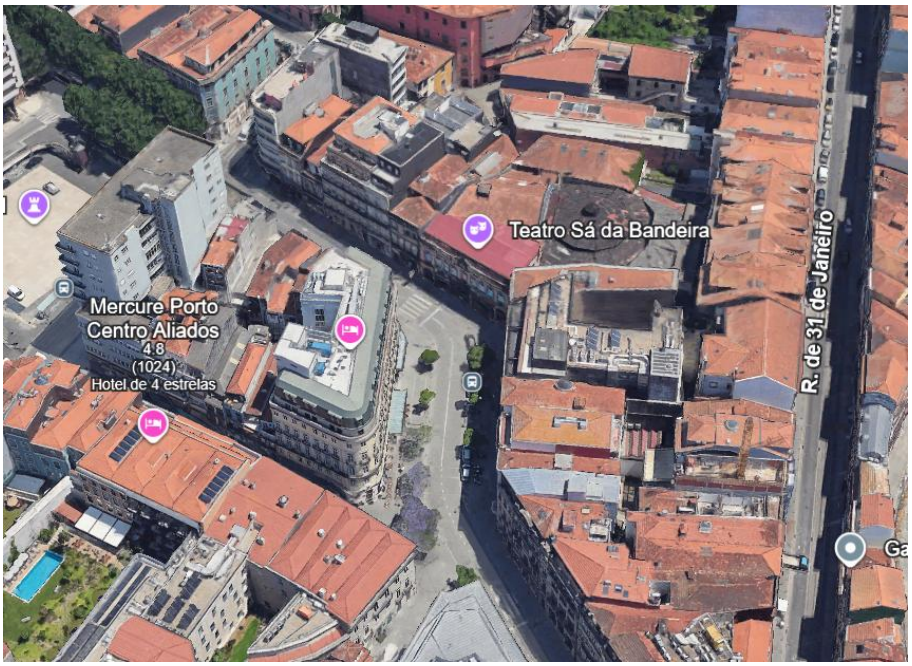


Figura 4.2-Localização do Teatro Sá da bandeira [47].

4.1.2 Caracterização Arquitetónica e Organizacional do Auditório do Teatro Sá da Bandeira

O auditório principal do Teatro Sá da Bandeira apresenta uma configuração típica dos teatros históricos de matriz italiana, refletindo as soluções arquitetónicas correntes nos séculos XVIII e XIX. A organização espacial é dominada pela planta em ferradura (Figura 4.3), elemento central desta tipologia, que promove tanto a proximidade visual ao palco como a distribuição envolvente do público.

Desenvolvida em vários níveis, a sala integra plateia, frisas, camarotes laterais e balcões superiores, garantindo diferentes ângulos de visão e proporcionando uma perceção acústica equilibrada em grande parte do auditório. A plateia, situada ao nível térreo, constitui o maior conjunto de lugares e apresenta uma disposição frontal e ligeiramente inclinada, favorecendo a visibilidade do palco.

A planta esquemática da sala, ilustrada na Figura 4.3, evidencia esta organização em ferradura e permite identificar a distribuição dos lugares por setores:

- Cadeiras de orquestra (verde escuro);
- Plateia (verde), ocupando a zona central e frontal;
- Tribunas e frisas (azul claro), localizadas lateralmente;
- Camarotes (rosa), distribuídos verticalmente em ambos os lados;
- 1.º e 2.º balcões (roxo e cinzento), ocupando as zonas superiores.

Esta distribuição concêntrica reforça a coesão espacial e assegura que grande parte do público se encontra voltada diretamente para o palco, reduzindo ângulos desfavoráveis e zonas de sombra.

A vista geral obtida a partir do 2.º balcão (Figura 4.3) evidencia a verticalidade da sala, o caráter envolvente da planta e a clara hierarquia visual entre níveis. A ornamentação interior, marcada por elementos neoclássicos e barrocos, integra colunas de suporte, guardas de ferro trabalhado e frisos decorativos em madeira e estuque.

Embora o teatro conserve a sua morfologia original, algumas intervenções pontuais ao longo das últimas décadas permitiram adaptar o espaço às exigências funcionais contemporâneas, mantendo a organização tradicional de plateia, camarotes e balcões.

No seu conjunto, a geometria da sala, forma em ferradura, distribuição vertical por níveis e relação direta entre palco e público, constitui um elemento central para a análise acústica desenvolvida na secção seguinte, influenciando de forma direta os padrões de reflexão, difusão e distribuição da energia sonora.

Uma vez descritas as características arquitetónicas e a organização espacial do auditório, torna-se igualmente relevante considerar as suas dimensões físicas, dado que a geometria e o volume da sala influenciam de forma decisiva o seu comportamento acústico. Com base na informação disponível e nas medições no local, com cobertura superior de forma aproximadamente oval, foi possível estabelecer uma estimativa das principais dimensões da sala de espetáculos.

O cálculo do volume foi feito através de uma planta elíptica com um "diâmetro de lado" de cerca de 21,23m e um "diâmetro central" de aproximamente 17,0 m, bem com uma altura variável entre cerca de 13,24 m na zona central (ponto mais elevado) e 10,8 nas zonas mais baixas, resultando numa altura média de 12 m.

Considerando adicionalmente os 28 camarotes (com cerca de 3,2 m de comprimento, 1,69 m de profundidade e 2,6 m de altura, perfazendo um volume total próximo de 400 m³) e as zonas da tribuna e dos balcões 1 e 2, que se estendem ao longo de cerca de 14 m, com aproximadamente 4 m de profundidade e 3 m de altura (contribuindo com cerca de 500 m³), obtém-se um volume global do auditório da ordem dos 4326 m³.

Este volume tem impacto direto nos parâmetros acústicos analisados, em particular no Tempo de Reverberação (TR), constituindo um fator crítico para a compreensão da resposta sonora global do auditório, sobretudo atendendo à geometria em ferradura e à presença de tribunas, balcões e camarotes, que condicionam a distribuição espacial da energia sonora.

Quadro 4.1-Dimensões e Volume do Auditório.

Zona	Altura média (m)	Área (m²)	Volume (m³)
Balcão / Tribuna - R/C	3,0	56	168
Balcão / Tribuna - 1.º Piso	3,0	56	168
Balcão / Tribuna - 2.º Piso	3,0	56	168
Plateia	12,0	283	3396
Camarotes	2,6	152 (total)	394
Área total dos balcões + tribuna		168	
Volume total excluindo o palco			4326
Volume total incluindo o palco			5520

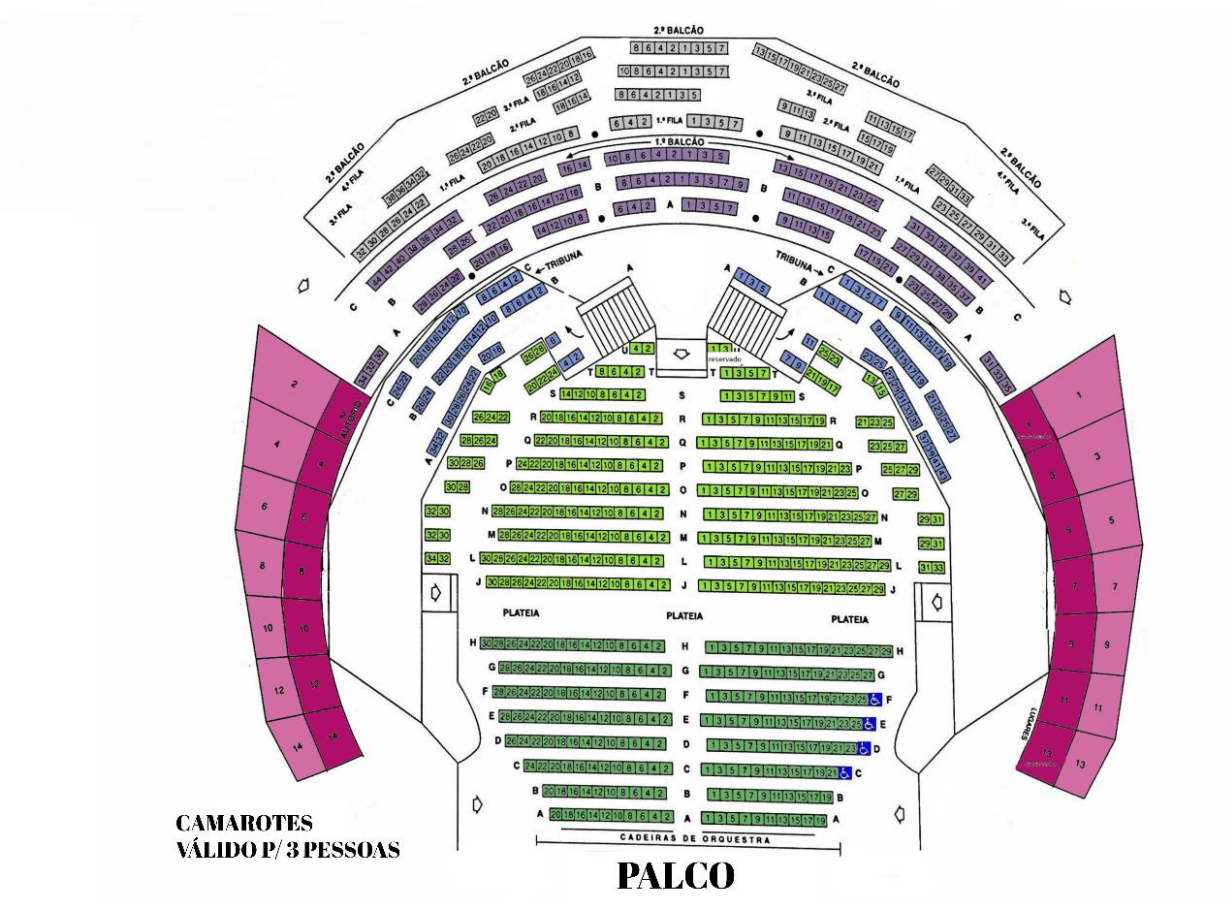


Figura 4.3- Planta da Sala do Teatro Sá da Bandeira [48].



Figura 4.4- Vista do segundo balcão [Foto do autor].

4.1.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DO AUDITÓRIO

4.1.3.1 Camarotes laterais e elementos decorativos

A resposta acústica do Teatro Sá da Bandeira resulta da combinação entre a sua geometria, descrita na secção anterior, e os materiais utilizados nos diversos elementos construtivos. O comportamento acústico do auditório reflete a coexistência de superfícies difusoras, refletoras e absorventes, que atuam conjuntamente na formação do campo sonoro da sala.

Os camarotes laterais (Figura 4.5), próximos do proscénio, apresentam superfícies ornamentadas com molduras de madeira e estuque, formando zonas difusoras. Estas irregularidades geométricas promovem a dispersão da energia sonora e reduzem fenómenos de focagem, contribuindo para um campo sonoro mais equilibrado nas zonas laterais e frontais da plateia. A geometria semicilíndrica dos camarotes reforça ainda as reflexões laterais, essenciais para a sensação de envolvimento e presença sonora.



Figura 4.5-Camarote lateral perto do proscénio [Foto do autor].

4.1.3.2 Revestimentos têxteis das paredes

Grande parte das superfícies verticais do auditório encontra-se revestida por tecido (Figura 4.6), aplicado sobre enchimentos. Estes materiais apresentam capacidade de absorção sonora significativa nas médias e altas frequências, contribuindo para controlar o tempo de reverberação e evitar excesso de brilho sonoro.As tribunas são a única zona sem revestimento têxtil, criando pequenas diferenças locais, mas sem impacto significativo no desempenho global devido à difusão oferecida pelos camarotes adjacentes.

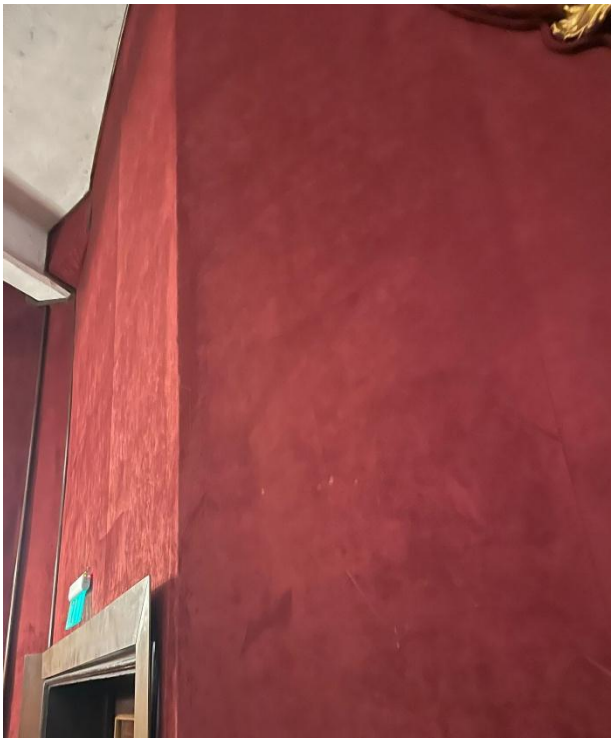


Figura 4.6- Revestimento têxtil das paredes [Foto do autor].

4.1.3.3 Cadeiras estofadas em tecido

As cadeiras estofadas (Figura 4.7) apresentam coeficientes de absorção sonora equivalentes aos de um ocupante, sobretudo a partir dos 500 Hz. Assim, mesmo quando a sala se encontra pouco ocupada, o efeito absorvente das cadeiras reduz variações significativas nos valores do tempo de reverberação entre condições de sala vazia e cheia, contribuindo para uma resposta acústica mais estável.

4.1.3.4 Laterais e painéis de madeira

Os painéis de madeira situados nas laterais inferiores da sala funcionam como superfícies refletoras, particularmente eficientes em algumas frequências (Figura 4.7). Estes elementos podem equilibrar a absorção sonora fornecida pelos revestimentos têxteis, contribuindo para um campo sonoro mais homogéneo e reforçando a clareza musical nas zonas centrais da plateia.



Figura 4.7- Cadeiras estofadas em tecido (lado esquerdo), Painéis de madeira (lado direito) [Fotos do autor].

4.2 METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS

4.2.1 PARÂMETROS MEDIDOS

No âmbito da presente dissertação, foi realizada a caracterização acústica do auditório do Teatro Sá da Bandeira, com o objetivo de avaliar o comportamento sonoro do espaço face às exigências funcionais associadas à sua utilização atual como sala de espetáculos de carácter cultural e artístico. As medições foram efetuadas na tarde do dia 11 de novembro de 2025, *in situ*, com o apoio técnico do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Os ensaios decorreram sob a supervisão do engenheiro António Costa, contando igualmente com a presença do autor, utilizando-se equipamento especializado para a medição de parâmetros acústicos objetivos, conforme descrito 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).

Durante os ensaios não foi utilizado qualquer sistema de reforço eletroacústico, de forma a assegurar que os valores obtidos representassem unicamente a resposta acústica do espaço. Por se tratar de um edifício histórico inserido em contexto urbano, registaram-se ocasionalmente pequenas interferências de ruído exterior, tendo sido necessário repetir alguns ensaios para garantir a fiabilidade dos dados recolhidos.

A altura dos microfones foi definida em conformidade com a posição da cabeça de um espetador sentado, assegurando assim 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 a dominância energética das reflexões, a inteligibilidade da palavra e o comportamento temporal da energia sonora.

4.2.2 EQUIPAMENTOS

Para a realização das medições acústicas no auditório do Teatro Sá da Bandeira, recorreu-se a um conjunto de equipamentos e ferramentas disponibilizados pelo Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Estes instrumentos permitiram garantir a precisão dos ensaios e a fiabilidade dos resultados obtidos, assegurando conformidade com as metodologias apresentadas no capítulo 2.

O conjunto de equipamentos utilizados foi o seguinte:

- Fontes Sonoras Brüel & Kjær (*Echo Speech Source* 4720 e 4224): Foram utilizadas como fontes para a geração dos sinais necessários aos ensaios acústicos. Estes dispositivos permitem a emissão controlada de sinais adequados à determinação de diversos parâmetros objetivos do ambiente sonoro;
- Sonómetro Brüel & Kjær 2260: Instrumento portátil alimentado a bateria, utilizado para a medição do nível sonoro e para a análise espectral em bandas de 1/1 de oitava e em 1/3 de oitava. A capacidade de programação interna possibilita a organização eficiente das medições, tornando-o adequado a diferentes condições de ensaio;
- Calibrador de Microfone Brüel & Kjær 4231: Responsável por verificar e possibilitar o ajuste da resposta do microfone antes das medições, garantindo que os valores registados obedecem aos níveis de referência normativos. O processo de calibração é essencial para assegurar a precisão dos resultados obtidos com o sonómetro;
- Microfone de 13 mm Brüel & Kjær 4189: Utilizado como transdutor principal para captação dos sinais sonoros. Este modelo apresenta elevada sensibilidade numa vasta gama de frequências (6 Hz a 20 kHz), sendo altamente adequado à caracterização acústica de espaços interiores, como auditórios e salas de espetáculo;
- Tripé Brüel & Kjær UA0049: Suporte utilizado para garantir a estabilidade e o posicionamento adequado do microfone durante os ensaios. O tripé possui regulação de altura entre 0,4 e 1,3 m, permitindo adaptar a posição do microfone às condições representativas do público e aos diferentes pontos de medição;
- *Software* DIRAC: Ferramenta digital empregue para o processamento automático dos sinais recolhidos e para o cálculo dos parâmetros acústicos estudados, incluindo TR, STI, C_{80} e D_{50}. Este *software* permite aplicar métodos de análise conformes com as normas internacionais.



Figura 4.8- Equipamentos e acessórios utilizados nas medições: A – Fonte Sonora Brüel & Kjaer 4720, B – Sonómetro Brüel & Kjær 2260, C – Calibrador de microfone Brüel & Kjær 4231, D – Microfone de 13 mm Brüel & Kjær 4189 e E- Tripé portátil Brüel & Kjær UA0049 [49], [50], [51], [52],[53].

4.2.3 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

4.2.3.1 Ruido de Fundo

Conforme discutido no Capítulo 2, o ruído de fundo corresponde ao conjunto de sons presentes no ambiente que não têm origem na fonte sonora utilizada nos ensaios. Este ruído pode interferir com a perceção auditiva, afetar a inteligibilidade da palavra e comprometer a qualidade das medições acústicas. Em salas de espetáculo, o controlo do ruído de fundo é essencial para garantir condições adequadas durante espetáculos, ensaios e restantes atividades culturais.

No caso do Teatro Sá da Bandeira, procedeu-se à medição do ruído ambiente em condições de repouso acústico, isto é, sem a presença de público e com todos os sistemas ruidosos desativados. Assim, o sistema de AVAC e o sistema de ventilação permaneceram desligados, conforme prática habitual do teatro durante eventos, de modo a evitar interferências no desempenho acústico da sala.

Adicionalmente, foram realizadas medições complementares com o sistema de AVAC ligado, com o objetivo de avaliar o impacto direto do funcionamento do equipamento no nível de ruído de fundo. Estas medições permitiram identificar a diferença entre as condições reais de utilização durante espetáculos (AVAC desligado) e as condições de funcionamento técnico da sala (AVAC ligado), possibilitando uma análise comparativa da contribuição do sistema para o ruído ambiente.

As medições foram realizadas com o sonómetro Brüel & Kjær 2260, montado num tripé portátil e com o microfone, simulando a posição da cabeça de um espetador sentado. Esta configuração garante que os valores registados representam de forma adequada as condições reais de utilização da sala.

Para assegurar uma cobertura espacial representativa, foram definidos três pontos de medição (Figura 4.10), distribuídos da seguinte forma:

- P1 e P7 localizados na plateia;
- P9 localizado no Balcão.

Em cada um destes pontos procedeu-se ao registo do nível de pressão sonora contínuo equivalente (Leq), bem como dos valores ponderados em A (LAeq), conforme recomendado para ambientes interiores de salas de espetáculo. As medições foram igualmente analisadas em bandas de 1/3 de oitava, permitindo identificar eventuais concentrações de energia sonora em determinadas gamas de frequência.

Apesar da localização do teatro numa zona urbana, verificou-se a presença ocasional de ruído de aviões durante os ensaios. Essas ocorrências, embora pontuais, introduziram pequenas variações nos valores registados. Ainda assim, o ambiente de fundo manteve-se maioritariamente estável ao longo do período de medição.

Os resultados recolhidos permitem avaliar o desempenho do espaço em termos de controlo de ruído ambiente e constituem a referência necessária para a interpretação dos restantes parâmetros acústicos analisados neste estudo.

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

Neste estudo foram analisados vários parâmetros acústicos essenciais, Tempo de Reverberação, Tempo Central, Claridade, Definição e *Speech trasmission* Index com o objetivo de caracterizar o comportamento acústico da sala, tanto no âmbito musical como na inteligibilidade da palavra.

A fonte sonora utilizada no ensaio foi posicionada no centro do palco emitindo ruído branco durante cerca de 10 segundos por medição. O nível de emissão foi ajustado de forma a garantir uma relação sinal-ruído adequada, superando consistentemente os valores de ruído de fundo previamente registados.

Para a recolha dos dados, foi utilizado um sonómetro Brüel & Kjær modelo 2260, montado num tripé portátil, com o microfone colocado a 1,20 m de altura, simulando a posição média da cabeça de um espectador sentado. Foram definidos dezasseis pontos de medição, distribuídos entre sete localizações na plateia, três na tribuna, três no balcão 1 e três no balcão 2, cuja disposição se encontra representada na Figura 4.10, assegurando uma cobertura espacial representativa da audiência.

As medições foram realizadas em duas condições distintas: com o sistema de AVAC ativado e com o sistema desligado, permitindo avaliar a influência deste equipamento nos parâmetros acústicos obtidos. A recolha, organização e cálculo dos parâmetros foram efetuados automaticamente através do software DIRAC, ferramenta utilizada para o controlo e processamento das medições, conforme ilustrado na Figura 4.9.



Figura 4.9- Controlo das medições acústicas via *software* DIRAC [Foto do autor].

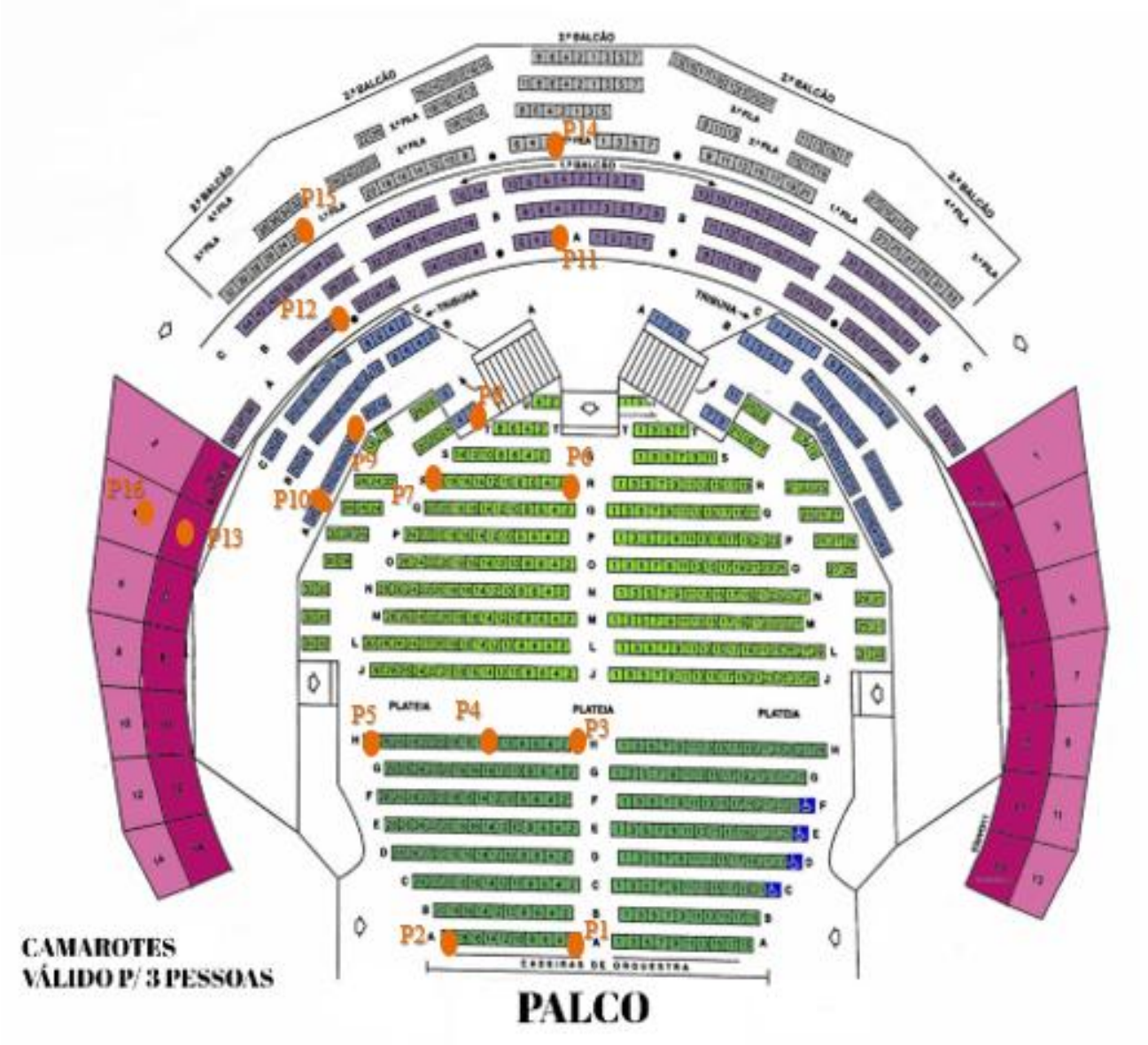


Figura 4.10- Planta do Teatro Sá da Bandeira com a representação dos pontos escolhidos para todas as medições [adaptado de 48].

5

RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados das medições realizadas no Teatro Sá da Bandeira. Os resultados são também comparados com valores ideais e com os valores regulamentares nacionais (RRAE) para confirmar se são adequados para o tipo de sala em questão.

5.2 RUIDO DE FUNDO

O ensaio do ruído de fundo foi realizado com o objetivo de caracterizar o nível sonoro residual existente no Teatro Sá da Bandeira, tanto na ausência como na presença do sistema AVAC em funcionamento. As medições foram efetuadas em três posições representativas da audiência: dois pontos na plateia (RF1 e RF2) e um ponto na tribuna (RF3). Em cada posição registaram-se os níveis de pressão sonora equivalente (Leq) e ponderado A (LAeq) para bandas de 1/3 de oitava entre 25 Hz e 20 kHz, bem como para bandas de 1/1 de oitava entre 32 Hz e 16 kHz. Para cada frequência foi ainda determinada a média logarítmica dos três pontos e o respetivo desvio padrão, permitindo uma análise integrada do comportamento acústico da sala.

No cenário "com o sistema AVAC desligado", os valores apresentados no Quadro 5.1 e representados nas Figuras 5.1 e 5.2 evidenciam um ambiente silencioso, típico de uma sala de espetáculo sem fontes mecânicas ativas. Os níveis de pressão sonora variam de forma ligeira entre os diferentes pontos, especialmente nas baixas frequências (entre 25 e 63 Hz), onde a geometria da sala e o comportamento modal tendem a influenciar o campo sonoro. A partir de 80 Hz os valores tornam-se mais homogéneos entre RF1, RF2 e RF3, apresentando uma descida progressiva com o aumento da frequência, comportamento característico de espaços naturalmente silenciosos. O valor global de LAeq situa-se cerca de 24 dB(A), refletindo um nível de ruído compatível com salas destinadas a eventos que exigem silêncio e elevada qualidade acústica.

Com o sistema AVAC em funcionamento, observam-se alterações significativas no comportamento do ruído de fundo, como ilustrado no Quadro 5.2 e nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5. O ruído aumenta de forma expressiva em praticamente todo o espetro audível, com destaque para as baixas frequências (entre 25 e 80 Hz), onde se registam acréscimos superiores a 10 dB relativamente ao cenário sem AVAC. Este aumento está associado às vibrações e turbulência do fluxo de ar produzidas pelos ventiladores e condutas do sistema, manifestando-se como componentes tonais e ruído mecânico de baixa frequência. Nas frequências médias (250 Hz a 1 kHz) o acréscimo mantém-se, embora menos pronunciado, situando-se entre 4 e 8 dB. Acima dos 2 kHz a diferença diminui, uma vez que o sistema AVAC tem menor impacto no domínio das altas frequências.

A Figura 5.6 sintetiza a comparação entre os dois cenários, mostrando que a curva com AVAC permanece acima da curva sem AVAC ao longo de todo o espetro de frequências. As maiores diferenças

concentram-se nas bandas graves, mas é possível observar aumentos consistentes também nas bandas médias. Este comportamento confirma que o sistema AVAC é a principal fonte de ruído adicional na sala, influenciando de forma significativa o conforto acústico, sobretudo em momentos que exigem silêncio, como peças teatrais ou concertos.

Relativamente aos valores globais, o nível ponderado A aumenta de 24,3 dB(A), com o sistema desligado, para cerca de 42 dB(A) quando o AVAC está ligado, representando um acréscimo de aproximadamente 17 dB(A). Tal diferença não é apenas estatisticamente relevante, mas claramente percetível pelo público e pelos artistas. Quando se aplica o fator de correção regulamentar de 3 dB(A), conforme exigido pelo RRAE, obtêm-se valores corrigidos de 21,3 dB(A) para o cenário sem AVAC e 39 dB(A) para o cenário com AVAC. Assim, o ruído de fundo da sala cumpre os requisitos regulamentares apenas quando o sistema AVAC está desligado. Com o AVAC em funcionamento, o limite de 30 dB(A) é ultrapassado, implicando que o teatro não cumpre o valor estipulado pelo RRAE para recintos de espetáculo.

De forma geral, conclui-se que o Teatro Sá da Bandeira apresenta um ambiente acusticamente adequado quando o sistema AVAC está desligado, garantindo condições de silêncio compatíveis com a utilização da sala. No entanto, com o AVAC em funcionamento, verifica-se um aumento expressivo do ruído de fundo, especialmente nas baixas frequências, comprometendo o cumprimento regulamentar e o conforto acústico global. Estes resultados evidenciam a necessidade de intervenções no sistema de ventilação caso se pretenda assegurar níveis de ruído que respeitem os limites legais e garantam melhores condições para atividades de natureza artística.

O nível sonoro equivalente do ruído de fundo aumenta de aproximadamente 24 dB(A) (sem AVAC) para cerca de 42 dB(A) (com AVAC), correspondendo a uma diferença de cerca de 18 dB. Este valor excede largamente a diferença mínima percetível típica para níveis sonoros (3 dB), sendo, portanto, claramente audível. Conclui-se assim que o funcionamento do sistema de AVAC constitui o principal fator de alteração percetiva das condições acústicas do auditório, com impacto direto na inteligibilidade da palavra.

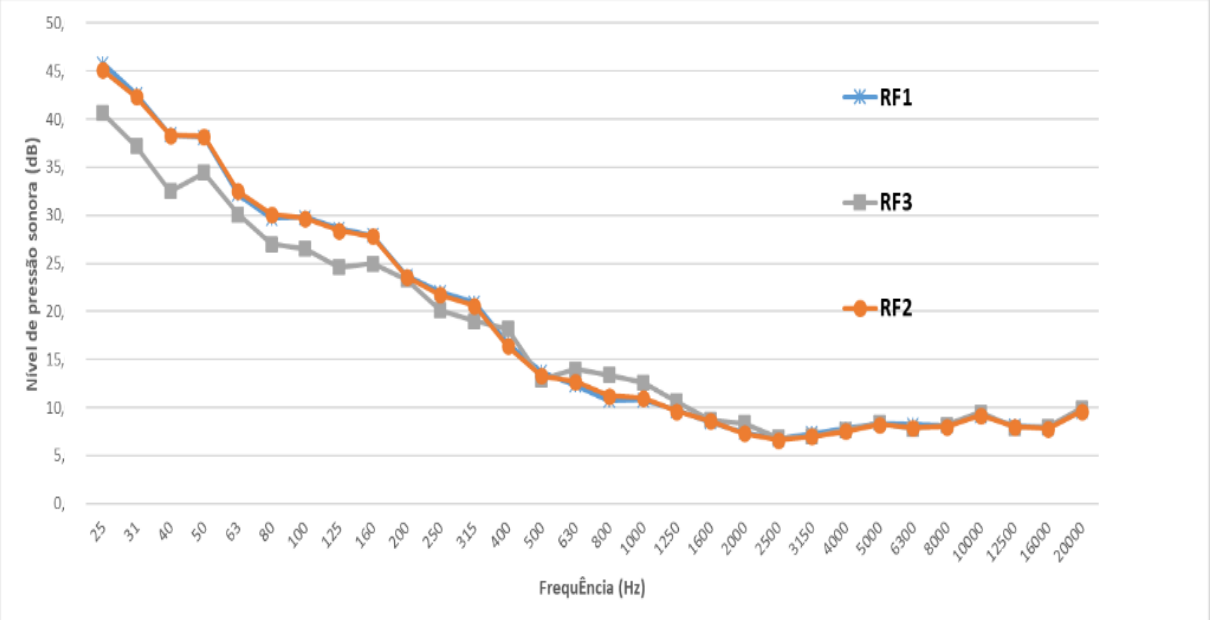


Figura 5.1- Valores dos níveis de pressão sonora dos três pontos (RF1 a RF3) do ruído de fundo (dB) sem o filtro A em bandas de frequência de 1/3 de oitava do Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC desligado.

Quadro 5.1 - Valores dos Níveis de Pressão Sonora medidos para bandas de frequência de 1/3 de oitava, nível de pressão sonora equivalente (Leq), nível sonoro equivalente (LAeq), média logarítmica e ΔL medidos no Teatro Sá da Bandeira com o sistema AVAC desligado.

Ruído de Fundo (L e L_A) (dB)										
Frequência (Hz)	**Ponto (Posição)**						**Média Logarítmica**		**Desvio Padrão**	
	RF1 (Plateia)		**RF2 (Plateia)**		**RF3 (Tribuna)**					
	sem filtro A	**com filtro A**	**sem filtro A**	**com filtro A**	**sem filtro A**	**com filtro A**	**sem filtro A**	**com filtro A**	**sem filtro A**	**com filtro A**
25	45,8	1,1	45,1	0,4	40,6	<0	43,8	0,7	2,3	2,3
31	**42,6**	**3,2**	**42,3**	**2,9**	**37,2**	**<0**	**40,6**	**3,0**	**2.5**	**2.5**
40	38,4	3,8	38,3	3,7	32,5	<0	36,3	3,7	2,8	2,8
50	38,1	7,9	38,2	8,0	34,4	4,2	36,9	6,4	1,8	1,8
63	**32,2**	**6,0**	**32,5**	**6,3**	**30,1**	**3,9**	**31,6**	**5,3**	**1,1**	**1,1**
80	29,7	7,2	30,1	7,6	27,0	4,5	28,9	6,3	1,4	1,4
100	29,8	10,7	29,7	10,6	26,5	7,4	28,6	9,4	1,5	1,5
125	**28,6**	**12,5**	**28,4**	**12,3**	**24,6**	**8,5**	**27,1**	**10,9**	**1,8**	**1,8**
160	27,9	14,5	27,8	14,4	25,0	11,6	26,9	13,4	1,3	1,3
200	23,7	12,8	23,6	12,7	23,3	12,4	23,5	12,6	0,2	0,2
250	**22,0**	**13,4**	**21,7**	**13,1**	**20,1**	**11,5**	**21,3**	**12,6**	**0,8**	**0,8**
315	20,9	14,3	20,6	14,0	19,0	12,4	20,1	13,5	0,8	0,8
400	16,7	11,9	16,4	11,6	18,2	13,4	17,1	12,3	0,8	0,8
500	**13,7**	**10,5**	**13,3**	**10,1**	**12,9**	**9,7**	**13,3**	**10,1**	**0,3**	**0,3**
630	12,3	10,4	12,7	10,8	14,0	12,1	13,0	11,1	0,8	0,8
800	10,7	9,9	11,2	10,4	13,4	12,6	11,7	10,9	1,2	1,2
1000	**10,8**	**10,8**	**11,0**	**11,0**	**12,6**	**12,6**	**11,4**	**11,4**	**0,8**	**0,8**
1250	9,7	10,3	9,6	10,2	10,6	11,2	10,0	10,6	0,8	0,8
1600	8,5	9,5	8,6	9,6	8,7	9,7	8,6	9,6	0,9	0,9
2000	**7,4**	**8,6**	**7,3**	**8,5**	**8,4**	**9,6**	**7,7**	**8,9**	**0,7**	**0,7**
2500	6,7	8,0	6,6	7,9	6,9	8,2	6,7	8,0	0,8	0,8
3150	7,3	8,5	7,0	8,2	7,0	8,2	7,1	8,3	0,8	0,8
4000	**7,8**	**8,8**	**7,5**	**8,5**	**7,7**	**8,7**	**7,7**	**8,7**	**0,3**	**0,3**
5000	8,4	8,9	8,2	8,7	8,4	8,9	8,3	8,8	0,5	0,5
6300	8,2	8,1	7,9	7,8	7,8	7,7	8,0	7,9	1,8	1,8
8000	**8,1**	**7,0**	**8,0**	**6,9**	**8,2**	**7,1**	**8,1**	**7,0**	**0,6**	**0,6**
10000	9,2	6,7	9,2	6,7	9,5	7,0	9,3	6,8	1,0	1,0
12500	8,1	3,8	8,0	3,7	7,9	3,6	8,0	3,7	0,4	0,4
16000	**7,9**	**1,3**	**7,8**	**1,2**	**8,0**	**1,4**	**7,9**	**1,3**	**1,1**	**1,1**
20000	9,6	0,3	9,6	0,3	9,9	0,6	9,7	<0	0,7	0,7
Leq	**51,9**	-	**51,5**	-	**49,0**	-	**50,8**	-	**-**	-
LAeq	-	**24,5**	-	**24,4**	-	**24,0**	-	**24,3**	-	**-**

Quadro 5.2-Valores dos Níveis de Pressão Sonora medidos para bandas de frequência de 1/3 de oitava, nível de pressão sonora equivalente (Leq), nível sonoro equivalente (LAeq), média logarítmica e Δ*L* medidos no Teatro Sá da Bandeira com o sistema AVAC ligado.

Ruído de Fundo (L e *LA*) (dB)										
Frequência (Hz)	**Ponto (Posição)**						**Média Logarítmica**		**Desvio Padrão**	
	RF1 (Plateia)		**RF2 (Plateia)**		**RF3 (Tribuna)**					
	sem filtro A	**com filtro A**	**sem filtro A**	**com filtro A**	**sem filtro A**	**com filtro A**	**sem filtro A**	**com filtro A**	**sem filtro A**	**com filtro A**
25	49,7	5,0	47,7	3,0	43,6	<0	46,9	3,9	2,5	2,5
31	**48,9**	**9,5**	**45,3**	**5,9**	**43,4**	**4,0**	**45,8**	**6,1**	**2,3**	**2,3**
40	45,7	11,1	44,6	10,0	41,0	6,4	43,7	8,9	2,0	2,0
50	46,6	16,4	45,1	14,9	36,5	6,3	42,5	11,5	4,5	4,5
63	**43,8**	**17,6**	**42,8**	**16,6**	**38,1**	**11,9**	**41,5**	**15,1**	**2,5**	**2,5**
80	42,8	20,3	40,2	17,7	39,4	16,9	40,8	18,2	1,5	1,5
100	42,6	23,5	40,0	20,9	37,9	18,8	40,1	21,0	2,0	2,0
125	**40,3**	**24,2**	**38,3**	**22,2**	**34,4**	**18,3**	**37,6**	**21,4**	**2,4**	**2,4**
160	39,1	25,7	37,6	24,2	35,9	22,5	37,5	24,1	1,3	1,3
200	39,8	28,9	38,8	27,9	35,9	25,0	38,1	27,2	1,7	1,7
250	**41,1**	**32,5**	**38,5**	**29,9**	**34,8**	**26,2**	**38,0**	**29,4**	**2,6**	**2,6**
315	39,5	32,9	37,2	30,6	33,6	27,0	36,7	30,1	2,4	2,4
400	40,5	32,0	37,6	30,3	33,7	27,2	37,2	29,8	2,4	2,4
500	**40,7**	**33,5**	**39,0**	**32,2**	**32,4**	**29,5**	**37,2**	**31,7**	**2,5**	**2,5**
630	35,4	33,5	33,7	31,8	30,6	28,7	33,2	31,3	2,0	2,0
800	35,4	34,6	33,7	32,9	31,0	30,2	33,3	32,5	1,8	1,8
1000	**34,6**	**34,6**	**32,6**	**32,6**	**30,5**	**30,5**	**32,5**	**32,5**	**1,7**	**1,7**
1250	30,6	31,2	28,5	29,1	26,7	27,3	28,6	29,2	1,6	1,6
1600	30,4	31,8	28,3	29,3	26,6	27,6	28,4	29,5	1,6	1,6
2000	**28,6**	**29,8**	**26,4**	**27,6**	**24,4**	**25,6**	**26,4**	**27,6**	**1,7**	**1,7**
2500	26,6	27,9	24,4	25,7	22,5	23,8	24,4	25,7	1,7	1,7
3150	24,6	25,8	22,3	23,5	20,4	21,6	22,4	23,6	1,7	1,7
4000	**19,9**	**20,9**	**17,8**	**18,8**	**16,9**	**17,9**	**18,2**	**19,2**	**1,3**	**1,3**
5000	16,5	17,0	14,7	15,2	13,2	13,7	14,7	15,2	1,4	1,4
6300	13,4	13,3	11,7	11,6	10,5	10,4	11,8	11,7	1,2	1,2
8000	**11,9**	**10,8**	**10,2**	**9,1**	**9,1**	**8,0**	**10,3**	**9,2**	**1,2**	**1,2**
10000	11,7	9,2	10,6	8,1	11,4	8,9	11,2	8,7	0,5	0,5
12500	8,7	4,4	8,1	3,8	8,0	3,7	8,3	4,0	0,3	0,3
16000	**9,0**	**2,4**	**8,3**	**1,7**	**8,5**	**1,9**	**8,6**	**2,0**	**0,3**	**0,3**
20000	9,1	<0	9,5	0,2	9,6	0,3	9,4	<0	0,2	0,2
Leq	**57,1**	-	**55,2**	-	**52,4**	-	**54,9**	-	-	-
LAeq	-	**44,7**	-	**42,4**	-	**39,1**	-	**42,0**	-	-

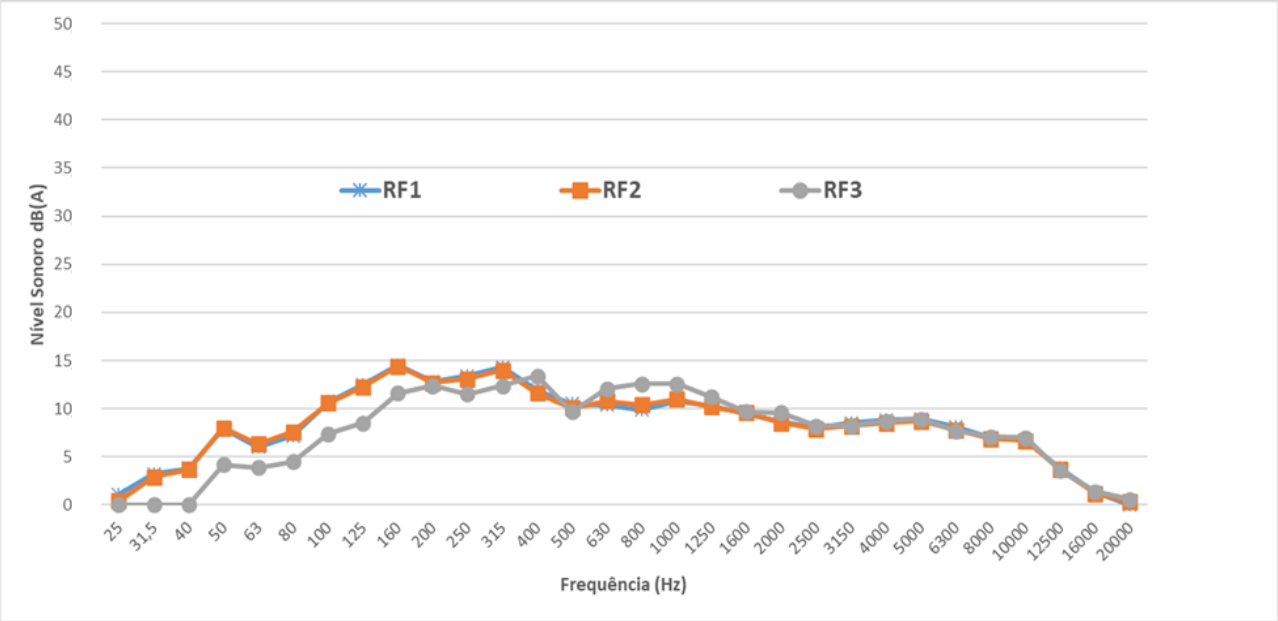


Figura 5.2-Valores dos níveis de pressão sonora nos três pontos (RF1 a RF3) do ruído de fundo com o filtro A em bandas de frequência de 1/3 de oitava (25 a 20.000 Hz) do Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC desligado.

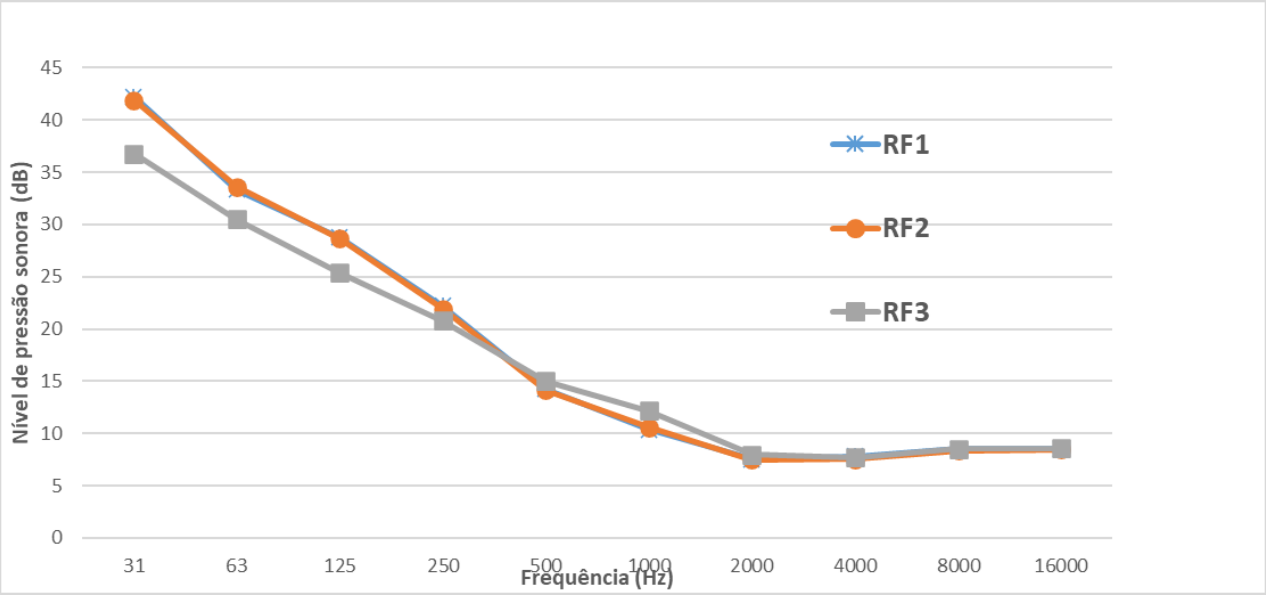


Figura 5.3- Valores dos níveis de pressão sonora dos três pontos (RF1 a RF3) do ruído de fundo (dB) sem o Filtro A em bandas de frequência de 1\1 oitava do Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC desligado.

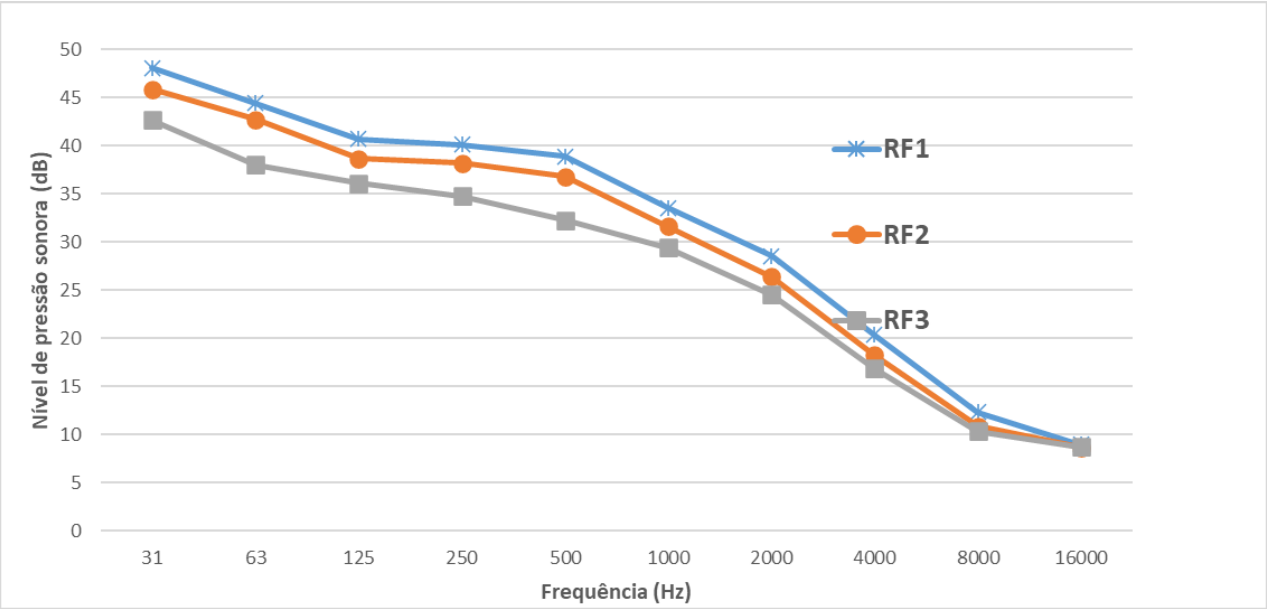


Figura 5.4- Valores dos níveis de pressão sonora dos três pontos (RF1 a RF3) do ruído de fundo (dB) sem o filtro A em bandas de frequência de 1/1 de oitava do Teatro Sá da Bandeira, com o sistema AVAC ligado.

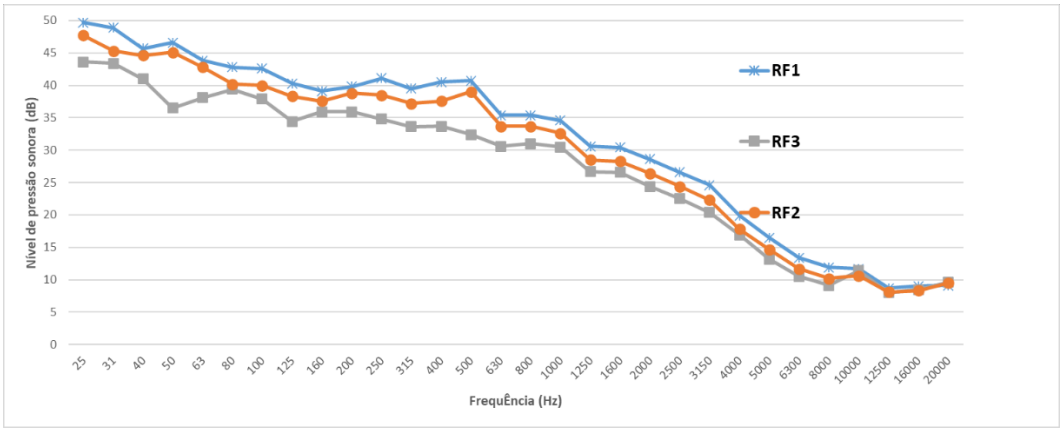


Figura 5.5- Valores dos níveis de pressão sonora dos três pontos (RF1 a RF3) do ruído de fundo (dB) sem o filtro A em bandas de frequência de 1/3 de oitava do Teatro Sá da Bandeira, com o sistema AVAC ligado.

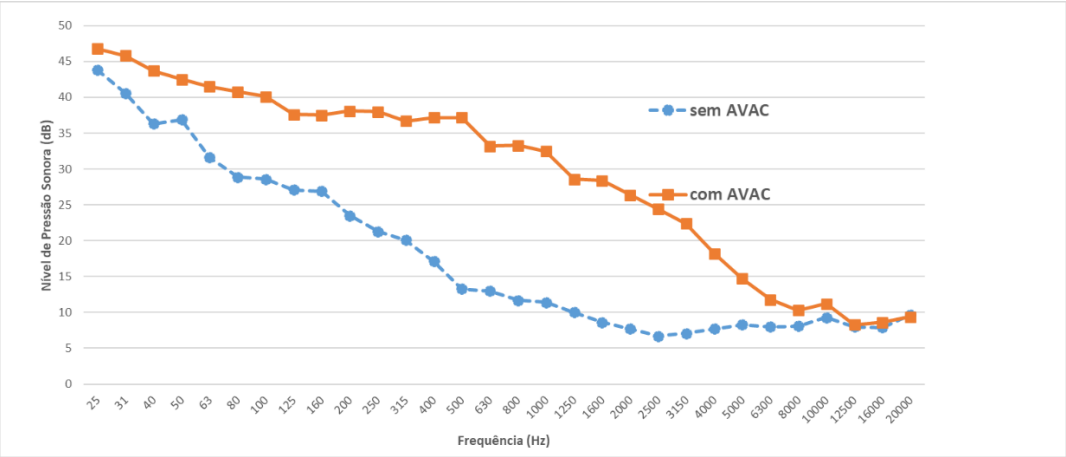


Figura 5.6- Valores médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) com e sem o sistema de AVAC em funcionamento para bandas de frequência de 1/3 de oitava.

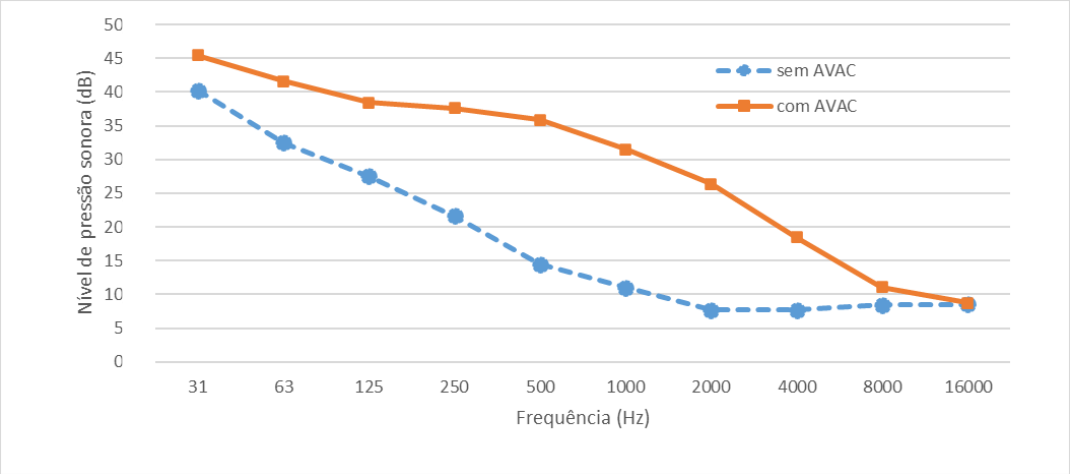


Figura 5.7-Valores médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) com e sem o sistema de AVAC em funcionamento para bandas de frequência de 1/1de oitava.

Quadro 5.3-Avaliação regulamentar (RRAE) do nível sonoro contínuo equivalente no interior do Teatro Sá da Bandeira.

Uso	L_A(dB)	L_A **=I (dB)**	**RRAE** L_{Aeq} **(dB)**	**Verificação**
Ruido de Fundo Sem AVAC	24,3	21,3	≤ 30	Ok
Ruido de Fundo com AVAC	42,0	39,0	≤ 30	Não cumpre

5.3 CURVAS DA INCOMODIDADE (NC/NR)

As curvas de incomodidade NC (*Noise Criterion*) e NR (*Noise Rating*), tal como referido no Subcapítulo 2.5.3, constituem critérios amplamente utilizados na avaliação do ruído de fundo gerado por sistemas técnicos em espaços interiores~públicos, como auditórios, salas de espetáculo e ambientes de conferência. Estes critérios permitem quantificar o nível de desconforto associado ao ruído ambiente, fornecendo uma referência objetiva para verificar se o espaço cumpre as exigências acústicas recomendadas para a sua função.

No presente estudo, procedeu-se à análise do espetro de ruído medido com o sistema AVAC em funcionamento, comparando-o com as curvas de referência NC e NR. A partir desta comparação, determinou-se que o valor correspondente a NC igual a 31 traduz um nível de ruído superior ao desejável para salas de espetáculo, situando-se acima dos limites geralmente recomendados para espaços onde se privilegia a inteligibilidade da palavra e a reprodução sonora sem reforço eletroacústico. Em especial em contextos musicais não amplificados ou em situações de discurso contínuo, valores inferiores, como NC 25 ou NC 20, são apontados como os máximos mais adequados, pelo que o valor obtido evidencia a necessidade de alguma cautela na avaliação do conforto acústico do espaço.

De forma semelhante, o valor determinado para NR igual a 32 confirma esta tendência, posicionando-se também acima dos intervalos tipicamente indicados para ambientes de elevada exigência acústica (NR $\leq$ 25). Emboras estes valores sejam frequentes em salas equipadas com sistemas de ventilação e climatização, traduzem um nível de ruído de fundo que pode interferir com a perceção clara da palavra, sobretudo em passagens de menor intensidade sonora ou em situações sem apoio de reforço eletroacústico. Assim, o desempenho observado não pode ser considerado plenamente compatível com os critérios mais rigorosos de conforto acústico.

Em síntese, os valores obtidos, NC igual a 31 e NR igual a 32, indicam que o ruído de fundo medido com o sistema AVAC ligado se encontra acima dos limites recomendados para assegurar uma boa inteligibilidade da palavra em ótimas condições de utilização para música sinfónica. O nível de incomodidade sonora é moderado, mas suficiente para condicionar aa qualidade acística do espaço em determinados contextos, pelo que se considera desejável a implementação de medidas de mitigação do ruído gerado pelo sistema AVAC, de forma a aproximar os valores obtidos das classes de referência e melhorar o desempenho acústico global do Teatro Sá da Bandeira.

5.4 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

5.4.1 MEDIÇÕES EM SITU

As medições in situ do Tempo de Reverberação foram realizadas no auditório do Teatro Sá da Bandeira 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, em conformidade com as normas técnicas aplicáveis.

Os valores obtidos para as bandas de 1/3 de oitava encontram-se apresentados no Quadro 5.4, incluindo as médias por frequência e o respetivo desvio padrão. A representação gráfica correspondente pode ser observada na Figura 5.8, onde é possível analisar a tendência espectral da reverberação para os oito pontos considerados (P1, P4, P7, P8, P10, P11, P15 e P16).

A análise do Quadro 5.4 demonstra que as curvas de T_{30} se tornam mais consistentes entre pontos a partir dos 250 Hz, revelando menor dispersão e um comportamento mais uniforme do campo reverberante nas frequências médias. As variações são mais evidentes nas frequências graves, sobretudo nas bandas de 100 e 125 Hz, onde se observam os valores mais elevados de TR, consequência previsível da reduzida absorção nessa zona do espetro.

O valor mais elevado ocorre na banda dos 125 Hz, onde se registou uma média de 1,10 s, acompanhada de um desvio padrão de 0,11 s. Este comportamento é característico de salas de grande volume, onde a absorção nas baixas frequências é limitada, conduzindo a tempos de decaimento mais longos. Tal tendência confirma que a sala apresenta uma resposta mais reverberante nesta gama, sendo este um fenómeno comum em teatros históricos com geometrias complexas e grande altura útil.

Na banda dos 250 Hz, verifica-se um decréscimo significativo para uma média de 0,86 s, ainda com alguma variabilidade espacial (desvio padrão de 0,11 s), refletindo uma transição entre o comportamento mais reverberante das frequências graves e a maior estabilidade das frequências médias. A partir desta banda, os valores tornam-se mais homogéneos entre pontos.

Entre 500 e 1.000 Hz, bandas de alguma relevância para a inteligibilidade da palavra e para a música amplificada, o tempo de reverberação apresenta consistência. A média registada é de 0,85 s (500 Hz) e 0,85 s (1.000 Hz), acompanhada de desvios padrão significativamente mais reduzidos (0,09 s e 0,10 s, respetivamente). Estes resultados sugerem que o campo reverberante na gama média é relativamente uniforme e adequado às exigências funcionais do espaço.

Na banda dos 500, 1.000 e 2.000 Hz, a média obtida foi igualmente de 0,87 s, com um desvio padrão de 0,09 s, refletindo uma ligeira dispersão entre pontos, embora ainda dentro de limites compatíveis com a tipologia da sala. Finalmente, na banda dos 4.000 Hz, o tempo de reverberação decresce para 0,91 s, com um desvio padrão de 0,08 s, evidenciando uma resposta mais controlada nas frequências altas, como seria expectável dada a maior eficácia absorvente dos materiais nesta região do espetro.

O tempo de reverberação médio calculado para a banda crítica [500–1.000 Hz], frequentemente utilizada para classificar o desempenho acústico de salas de espetáculo, foi de 0,85 s, com um desvio padrão global de 0,09 s. Este valor demonstra uma boa estabilidade na gama mais relevante do ponto de vista funcional e situa-se dentro dos limites recomendados para salas polivalentes destinadas à palavra e música amplificada.

De acordo com o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), o tempo de reverberação médio máximo admissível é definido em função do volume útil do recinto e da sua função principal. Atendendo a que o Teatro Sá da Bandeira se enquadra na categoria de grandes auditórios, aplica-se a expressão regulamentar correspondente prevista no regulamento para este tipo de espaço.

Com base no volume da zona de audiência, o intervalo de referência de ideais indicado pelo RRAE para salas predominantemente destinas à palavra situa-se, de forma geral, entre 0,7 s e 1,0 s. O valor médio de T_{30} no intervalo de 500 e 1 000 Hz, igual a 0,85 s, encontra-se dentro deste intervalo de conformidade para a função "Teatro", conforme indicado no Quadro 5.5.

Deste modo, conclui-se que o Teatro Sá da Bandeira cumpre os requisitos regulamentares do RRAE no que respeita ao tempo de reverberação, sendo o seu comportamento reverberante adequado para utilizações centradas na palavra, como teatro, conferências e apresentações.

Quadro 5.4- Valores do parâmetro tempo de reverberação (T_{30}) em bandas de 1/3 de oitava de 100 a 5.000 Hz para os pontos P1 a P16 medidos do Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão.

Tempo de Reverberação (T_{30}) (s)											
Frequência (Hz)	Pontos									**Média**	**Desvio Padrão**
	P1	P4	P7	P8	P10	P11	P13	P15	P16		
100	1,11	1,19	1,18	1,28	1,15	1,26	1,29	1,17	1,04	1,19	0,08
125	**1,10**	**1,24**	**1,03**	**1,40**	**0,98**	**1,17**	**1,08**	**0,84**	**0,99**	**1,09**	**0,16**
160	1,34	1,10	0,97	1,16	0,98	1,00	1,04	0,80	0,90	1,03	0,16
200	1,05	1,12	0,95	0,90	0,73	1,00	0,81	0,74	0,94	0,92	0,13
250	**0,81**	**1,02**	**0,85**	**0,85**	**0,58**	**1,01**	**0,81**	**0,80**	**0,89**	**0,85**	**0,13**
315	0,75	1,03	0,71	0,77	0,77	0,89	0,84	0,74	0,89	0,82	0,10
400	0,92	0,95	0,87	0,97	1,02	0,86	0,93	0,70	0,80	0,89	0,10
500	**0,83**	**0,82**	**1,00**	**0,91**	**0,68**	**0,82**	**0,79**	**0,77**	**0,89**	**0,83**	**0,09**
630	0,98	0,82	0,72	0,82	0,85	0,78	0,86	0,85	0,88	0,84	0,07
800	0,99	1,03	0,83	0,89	0,88	0,75	0,79	0,80	0,93	0,88	0,09
1k	**0,83**	**0,78**	**0,77**	**0,64**	**0,85**	**0,99**	**0,77**	**0,90**	**0,88**	**0,82**	**0,10**
1250	0,85	0,87	0,82	0,92	0,86	0,70	1,02	0,82	0,89	0,86	0,09
1600	0,90	1,05	0,95	0,96	0,86	0,96	0,90	0,81	0,93	0,92	0,07
2k	**0,89**	**0,99**	**1,00**	**0,86**	**0,86**	**0,83**	**0,90**	**0,75**	**0,91**	**0,89**	**0,08**
2500	0,89	0,80	1,00	0,98	0,76	0,88	0,83	0,82	1,01	0,89	0,09
3150	0,90	0,77	0,90	1,00	0,95	0,87	1,14	0,90	1,01	0,94	0,10
4k	**0,85**	**0,87**	**0,83**	**0,97**	**0,97**	**0,91**	**0,85**	**0,84**	**1,00**	**0,90**	**0,07**
5k	0,89	0,81	0,93	1,04	0,90	0,87	0,86	0,77	0,99	0,90	0,08
TR [500, 1.000 Hz] (s)	**0,90**	**0,88**	**0,83**	**0,86**	**0,86**	**0,82**	**0,86**	**0,81**	**0,88**	**0,85**	**0,09**
TR[500, 1000, 2000 Hz] (s)	**0,90**	**0,90**	**0,88**	**0,88**	**0,85**	**0,84**	**0,87**	**0,80**	**0,90**	**0,87**	**0,09**

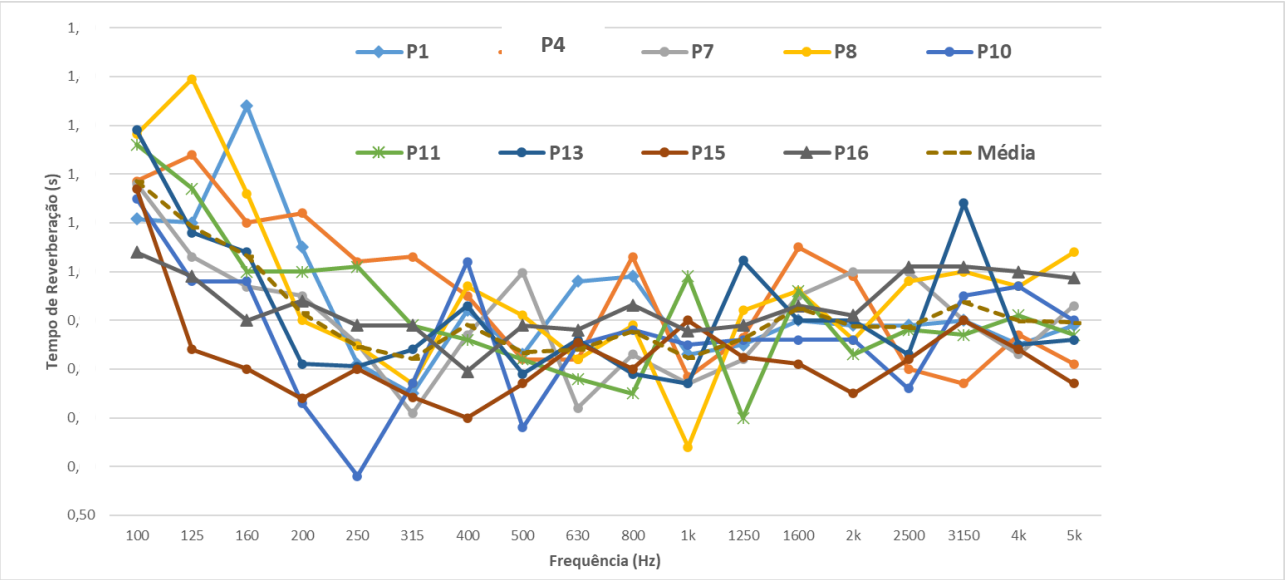


Figura 5.8- Valores do tempo de reverberação para os sete pontos medidos (P1, P4, P7, P8, P10, P11, P13, P15 e P16) em bandas de frequência de 1/3 oitava do Teatro Sá da Bandeira.

Quadro 5.5-Valores ideais para diversos parâmetros acústicos objetivos, em função do tipo de utilização [1].

Função	**TR [500, 1.000 Hz] ideal (s)**	**TR [500, 1000 Hz] (s) Médio**	**Avaliação**
Ópera wagneriana	1,7 a 1,9	**0,85**	Desadequado
Ópera (não wagneriana)	1,3 a 1,7		Desadequado
Teatro	0,7 a 1,0		Adequado
Música sinfónica (Romântica)	1,8 a 2,2		Desadequado
Música sinfónica (Barroco)	1,4 a 1,6		Desadequado
Música sinfónica (Clássica)	1,6 a 1,8		Desadequado
Música de câmara	1,4 a 1,7		Desadequado
Música de órgão	2,5 a 3,5		Desadequado

5.4.2 Previsão Para Sala Ocupada

Uma das exigências do regulamento nacional relativo à medição do Tempo de Reverberação estabelece que as salas devem ser avaliadas em condição desocupada. No entanto, em situação real de utilização de um teatro, a presença de público introduz absorção sonora adicional, conduzindo à diminuição do tempo de reverberação efetivo. Deste modo, torna-se pertinente estimar o comportamento da sala em condições de espetáculo, de forma a obter um valor mais representativo do TR em uso real.

Para a realização desta previsão foram utilizados coeficientes de absorção sonora correspondentes a cadeiras vazias e a cadeiras ocupadas [7].

A área considerada para a ocupação corresponde à projeção da zona de assentos, à qual foi adicionada uma faixa adicional de 0,5 metros ao longo de todo o perímetro da zona de audiência. Este procedimento permite representar não apenas a área estritamente ocupada pelas cadeiras, mas também a influência das laterais. A partir deste critério foi obtida uma área total de 308 metros quadrados, utilizada no cálculo do aumento de absorção devido à sala totalmente ocupada.

Conhecidos o volume do auditório, igual a 4320 metros cúbicos, os valores do tempo de reverberação medidos com a sala vazia e a absorção adicional introduzida pela presença do público, estimou-se o novo tempo de reverberação para a condição de cem por cento de ocupação através da expressão de Sabine [7].

Da análise dos resultados do Quadro 5.7 verifica-se que a diferença entre o tempo de reverberação medido com a sala vazia e o tempo previsto para a sala ocupada varia entre 0,01 segundos e 0,04 segundos. Nas frequências compreendidas entre 500 e 1000 Hertz, o tempo de reverberação diminui de cerca de 0,85 segundos para 0,83 segundos.

Esta diferença reduzida sugere que o Teatro Sá da Bandeira possui já uma quantidade significativa de absorção acústica distribuída no seu interior, pelo que a presença de público não altera drasticamente o comportamento reverberante da sala. Assim, estima-se que o TR real em situação de espetáculo se mantenha próximo daquele obtido com a sala vazia.

Quadro 5.6- Parâmetros utilizados para a previsão do tempo de reverberação com a sala a 100% ocupada do Teatro Sá da Bandeira [7].

	Área de assentos + 0,5m			**Volume (m^3)**		
	308			4320		
Frequência (Hz)	**125**	**250**	**500**	**1k**	**2k**	**4k**
α (cadeira ocupada)	0,76	0,83	0,88	0,91	0,91	0,89
α (cadeira vazia)	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79
Δα (ocupado)	0,12	0,11	0,12	0,13	0,18	0,18
ΔA=Δα*S (100 % ocupado)	37,0	22,3	24,4	26,4	36,5	48,7

Quadro 5.7- Cálculo do novo tempo de reverberação com a sala a 100% ocupada para bandas de 1/1 oitava de 250 a 4.000 Hz do Teatro Sá da Bandeira.

	0% Ocupação			100% Ocupação			ΔT (s)
Frequência (Hz) em bandas de 1/1 oitava	**TR (s)**	**A sala (m²)**	**TR [500, 1000 Hz] (s)**	**TR (s)**	**A sala (m²)**	**TR [500, 1000 Hz] (s)**	
125	1,10	632	**0,85**	1,08	645	**0,83**	0,02
250	0,86	809		0,85	821		0,01
500	0,85	818		0,83	834		0,02
1000	0,85	818		0,83	840		0,02
2000	0,90	773		0,87	797		0,03
4000	0,91	764		0,87	795		0,04
Volume (m³)							
4 320							

O tempo de reverberação médio medido na sala desocupada foi de aproximadamente 0,85 s, sendo a previsão para sala ocupada cerca de 0,83 s. A diferença observada (0,02 s) corresponde a cerca de 1 %, valor claramente inferior à diferença mínima percetível típica para TR (5 %). Assim, conclui-se que a ocupação da sala não origina uma alteração audível da reverberação, sendo a perceção global do campo reverberante praticamente idêntica nas duas condições.

5.5 RÁCIOS DE BAIXOS

O rácio de baixos (BR), calculado a partir dos valores do tempo de reverberação apresentados no Quadro 5,8 para as bandas de 1/1 oitava entre 125 e 1000 Hz, permite avaliar o equilíbrio tonal da sala. Os resultados sintetizados no Quadro 5.9 mostram valores entre 1,04 e 1,27, com uma média global de 1,15. Para salas com tempo médio de reverberação inferior a 1,8 s, o BR deve estar entre 1,1 e 1,5, garantindo um balanço adequado entre frequências graves e médias/altas. Os valores obtidos para o Teatro Sá da Bandeira enquadram-se neste intervalo, indicando um comportamento tonal equilibrado e sem predominância excessiva de baixas frequências.

De forma geral, os resultados sugerem que a sala apresenta um controlo eficaz nas baixas frequências, evitando um reforço excessivo que poderia comprometer a clareza da fala ou gerar sensação de abafamento. A consistência dos valores entre os diferentes pontos demonstra ainda uma resposta relativamente homogénea ao longo da audiência, o que é desejável em espaços destinados a funções de palavra e música amplificada. Este equilíbrio tonal é coerente com os tempos de reverberação previamente analisados, reforçando a adequação acústica global do teatro para os seus usos típicos.

Quadro 5.8- Valores do parâmetro Rácio de Baixos (*BR_TR*) em bandas de 1/1 oitava nos nove pontos ensaiados (P1 a P16).

Tempo de Reverberação (T_{30}) (s)										
Frequência (Hz)	**Pontos**									**Média**
	P1	**P4**	**P7**	**P8**	**P10**	**P11**	**P13**	**P15**	**P16**	
125	1,18	1,17	1,06	1,28	1,04	1,14	1,14	0,94	0,98	1,10
250	0,87	1,06	0,84	0,84	0,69	0,97	0,82	0,76	0,91	0,86
500	0,91	0,86	0,86	0,90	0,85	0,82	0,86	0,77	0,86	0,86
1000	0,89	0,89	0,81	0,82	0,86	0,81	0,86	0,84	0,90	0,85
BR	**1,14**	**1,27**	**1,14**	**1,23**	**1,01**	**1,29**	**1,14**	**1,05**	**1,07**	**1,15**

Quadro 5.9- Valores médios do parâmetro Rácio de Baixos (BR-TR) para os pontos P1 a P16 e a respetiva comparação dos valores ideais de Rácio de baixos de acordo com o Tempo de reverberação, no Teatro Sá da Bandeira.

Ponto (Posição)	**Rácio de Baixos (BR)**	**BR ideais para TR até 1,8 (s)**
	Sem AVAC	**1,1 <BR< 1,5**
P1	1,14	**Adequado**
P4	1,27	**Adequado**
P7	1,14	**Adequado**
P8	**1,23**	**Adequado**
P10	**1,12**	**Adequado**
P11	1,29	**Adequado**
P13	1,14	**Adequado**
P15	1,05	**Adequado**
P16	1,07	**Adequado**
Média	1,15	**Adequado**

5.6 *STI* (*SPEECH TRANSMISSION INDEX*)

Conforme apresentado no capítulo 2.6.1, o índice STI (*Speech Transmission Index*) é um parâmetro destinado a avaliar a qualidade da transmissão sonora entre o emissor e o recetor, determinando o grau de clareza com que a palavra é percecionada num espaço. O STI quantifica as deformações sofridas pelo sinal da palavra durante a sua propagação, influenciadas pela reverberação, ruído de fundo e características geométricas da sala, refletindo assim a capacidade de o ouvinte interpretar corretamente o discurso. Os valores deste índice variam entre 0 (compreensão nula) e 1 (compreensão excelente). No presente estudo, o emissor foi posicionado no centro do palco, permitindo avaliar a inteligibilidade da palavra ao longo das diversas zonas de audiência do Teatro Sá da Bandeira.

A Figura 5.9 apresenta a comparação dos valores de STI medidos sem o sistema AVAC em funcionamento, para os dezasseis pontos avaliados (P1 a P16). Os resultados correspondentes

encontram-se no Quadro 5.10, onde se observa que os valores de STI médio variam entre 0,56 e 0,72 nas diversas posições, com uma média global de 0,62, classificada como *Boa* segundo a norma IEC 60268-16 [18]. Nas posições localizadas na plateia verificam-se valores entre 0,56 e 0,66, sugerindo condições adequadas de inteligibilidade da palavra. Os pontos situados em níveis superiores (tribuna e balcões) apresentam igualmente valores entre 0,60 e 0,70, demonstrando uniformidade e mantendo-se dentro da mesma categoria de desempenho.

Na Figura 5.10 são apresentados os valores de STI com o sistema AVAC ligado, cujos valores detalhados se encontram no Quadro 5.11. De forma geral, os resultados variam entre 0,57 e 0,69 nas diversas posições, com um STI médio global de 0,61, permanecendo dentro da classificação *Boa*. Tal comportamento indica que o ruído adicional introduzido pelo sistema AVAC não compromete significativamente a inteligibilidade da palavra no espaço, mantendo-se os valores obtidos dentro dos limites considerados adequados para comunicação verbal.

Comparando ambos os cenários, AVAC ligado e desligado, verifica-se que as diferenças observadas entre os dois conjuntos de medições são reduzidas, apresentando uma variação máxima de apenas 0,04 no STI médio entre os cenários de AVAC ligado e desligado. Esta estabilidade confirma que o Teatro Sá da Bandeira apresenta uma boa eficiência acústica, independentemente do funcionamento do sistema AVAC, permitindo assegurar condições favoráveis para a perceção da palavra e confirmando a adequação do espaço para eventos de natureza verbal.

Quadro 5.10- Valores do parâmetro STI (*Speech Transmission Index)* sem uso do AVAC para os pontos P1 a P16 medidos do Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão.

Ponto (Posição)	***STI masculino***	***STI feminino***	***STI médio***	**Inteligibilidade da Palavra [22]**	***STI médio global***
P1 (Plateia)	0,71	0,73	**0,72**	**Boa (0,60-0,75)**	**0,62**
P2(Plateia)	0,62	0,63	**0,63**		
P3 (Plateia)	0,55	0,57	**0,56**		
P4 (Plateia)	0,57	0,58	**0,58**		
P5 (Plateia)	0,58	0,59	**0,59**		
P6(Plateia)	0,65	0,67	**0,66**		
P7(Plateia)	0,62	0,63	**0,63**		
P8(Tribuna)	0,59	0,6	**0,60**		
P9(Tribuna)	0,59	0,6	**0,60**		
P10 (Tribuna)	0,58	0,59	**0,59**		
P11(1º Balcão)	0,69	0,7	**0,70**		
P12(1º Balcão)	0,63	0,64	**0,64**		
P13(1º Balcão)	0,61	0,63	**0,62**		
P14(2º Balcão)	0,63	0,64	**0,64**		
P15(2ºbalcão)	0,63	0,64	**0,64**		
P16(2º Balcão)	0,64	0,65	**0,65**		
Desvio Padrão	0,04	0,04	0,04	-	-
Δ = Máx - min	0,16	0,16	0,16	-	-

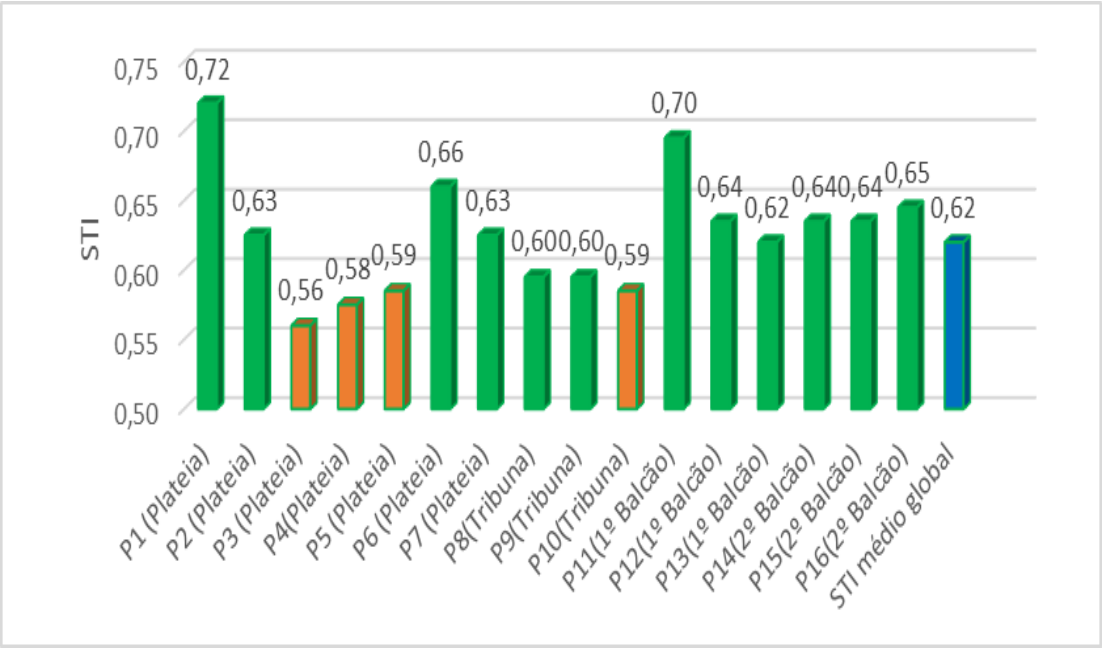


Figura 5.9- Comparação dos valores do parâmetro STI (*Speech Transmission Index)* com AVAC desligado para os nove pontos medidos (P1 a P16) e a média no Teatro Sá da Bandeira.

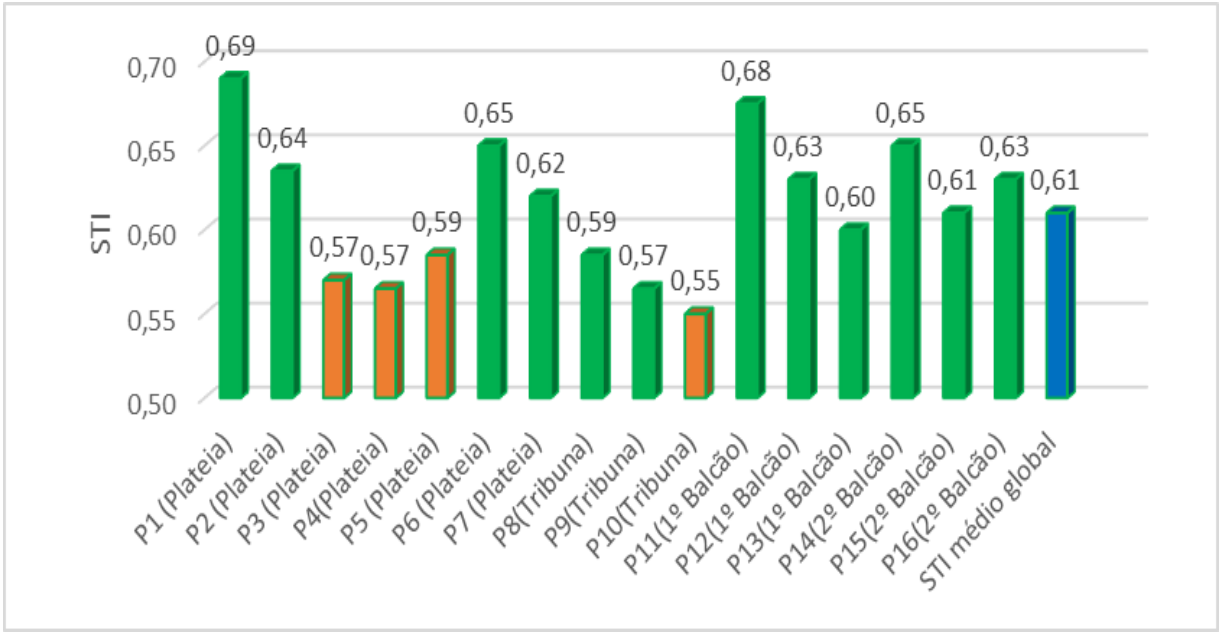


Figura 5.10- Comparação dos valores do parâmetro STI (*Speech Transmission Index)* com AVAC ligado para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) e a média no Teatro Sá da Bandeira.

Quadro 5.11- Valores do parâmetro STI (*Speech Transmission Index)*, com uso do AVAC, para os pontos P1 a P16 medidos do Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão.

Ponto (Posição)	*STI masculino*	*STI feminino*	*STI médio*	*ΔSTI= AVAC - Sem AVAC*	Inteligibilidade da Palavra [22]	*STI médio global*
P1(Plateia)	0,68	0,70	**0,69**	**-0,03**	**Boa (0,60-0,75)**	**0,61**
P2(Plateia)	0,63	0,64	**0,64**	**-0,01**		
P3 (Plateia)	0,56	0,58	**0,57**	**0,01**		
P4 (Plateia)	0,56	0,57	**0,57**	**0,01**		
P5 (Plateia)	0,58	0,59	**0,59**	**0,00**		
P6(Plateia)	0,64	0,66	**0,65**	**-0,01**		
P7(Plateia)	0,61	0,63	**0,62**	**-0,01**		
P8(Tribuna)	0,58	0,59	**0,59**	**-0,01**		
P9(Tribuna)	0,56	0,57	**0,57**	**-0,03**		
P10 (Tribuna)	0,54	0,56	**0,55**	**-0,04**		
P11(1º Balcão)	0,67	0,68	**0,68**	**-0,02**		
P12(1º Balcão)	0,62	0,64	**0,63**	**-0,01**		
P13(1º Balcão)	0,59	0,61	**0,60**	**-0,02**		
P14(2º Balcão)	0,64	0,66	**0,65**	**0,01**		
P15(2ºbalcão)	0,6	0,62	**0,61**	**-0,04**		
P16 (2º Balcão)	0,62	0,64	**0,63**	**-0,03**		
Desvio Padrão	0,04	0,04	0,04	0,02		
Δ = Máx - min	0,14	0,14	0,14	-	-	-

Os valores médios de STI situam-se em torno de 0,62 sem AVAC e cerca de 0,60 com AVAC em funcionamento. A diferença observada (0,02) aproxima-se da diferença mínima percetível típica para STI (0,03), indicando que a redução de inteligibilidade associada ao aumento do ruído de fundo poderá ser ligeiramente percetível, embora de forma moderada. Este resultado confirma que o impacto do AVAC na inteligibilidade existe, mas não compromete globalmente o desempenho acústico da sala para a palavra.

5.7 Definição (D_{50})

Como apresentado no capítulo 2.7.4, a Definição (D_{50}) é um parâmetro utilizado para avaliar a inteligibilidade da palavra, expressando a razão entre a energia sonora recebida nos primeiros 50 ms e a energia total recebida, conforme a formulação da Eq. 2.18 do capítulo 2.7.4. Este parâmetro assume valores entre 0 e 1, correspondendo respetivamente a uma péssima definição e a uma excelente definição do discurso.

Para a análise deste parâmetro foram considerados dezasseis pontos de medição (P1 a P16), distribuídos pela plateia, tribuna, 1.º balcão e 2.º balcão, conforme apresentado na figura 4.10. Os quadros correspondentes aos ensaios com sistema AVAC ligado e sistema AVAC desligado apresentam os valores da Definição (D_{50}) medidos em cada um dos pontos referidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, entre os 125 e os 8k Hz.

A observação das Figuras 5.11 e 5.14, que ilustram a variação da Definição (D_{50}) em função da frequência para os dezasseis pontos analisados, revela alguma dispersão dos valores ao longo do espetro, sendo esta mais evidente nas bandas de 125 e 1000 Hz. Este comportamento encontra correspondência nos desvios-padrão apresentados nos Quadros 5.12 e 5.13, onde se verifica que, apesar da variabilidade observada, os valores de dispersão permanecem moderados, indicando uma boa uniformidade da Definição e, consequentemente, da inteligibilidade da palavra na sala.

A Figura 5.15 apresenta a comparação direta dos valores médios de D_{50} [500, 1000 Hz] para os dezasseis pontos de medição, nas condições com e sem sistema AVAC em funcionamento. Observa-se que ambas as curvas seguem tendências muito semelhantes ao longo dos pontos analisados, ocorrendo apenas diferenças pontuais. Em alguns pontos os valores são ligeiramente superiores com o sistema AVAC ligado, enquanto noutros sucede o inverso, não se verificando qualquer padrão sistemático. Estes resultados confirmam que o funcionamento do sistema AVAC não altera significativa o comportamento do parâmetro D_{50}.

De um modo geral, os pontos analisados enquadram-se predominantemente nas classes de "boa definição" (0,67-0,86) e "definição suficiente" (0,39-0,67) [20 apud 34].Destacam-se positivamente os pontos P1, P5, P7, P11, P12 e P14, que apresentam valores médios mais elevados e consistentes, sugerindo condições acústicas favoráveis à perceção clara da palavra, associadas a uma maior contribuição do som direto e das primeiras reflexões. Em contraste, pontos como P3, P4, P8 e P9 apresentam valores inferiores, embora ainda compatíveis com uma inteligibilidade da palavra considerada suficiente, podendo este comportamento estar relacionado com fatores geométricos locais, maior afastamento da fonte sonora ou maior influência de energia sonora tardia.

Importa referir que, durante as medições realizadas sem o sistema AVAC em funcionamento, foi registada a presença de ruído proveniente dos aspiradores utilizados pela equipa de limpeza nos primeiros pontos de medição, até ao ponto P9. Adicionalmente, foi pontualmente percecionado ruído exterior associado ao sobrevoo de aeronaves. Estas fontes constituíram ruído adicional não controlado, de carácter maioritariamente estacionário no caso dos aspiradores e transitório no caso do ruído aéreo, não tendo sido, contudo, efetuado um registo sistemático da sua intensidade nem da sua localização relativamente aos pontos de medição. Apesar disso, a análise dos resultados não evidencia uma degradação sistemática dos valores de D_{50} nos pontos potencialmente afetados, o que sugere que a influência destes ruídos no parâmetro analisado foi reduzida.

Deste modo, a análise conjunta dos Quadros 5.12 e 5.13 e das Figuras 5.11 a 5.14 permite concluir que a energia sonora recebida nos primeiros 50 ms face à total é adequada e relativamente homogénea na maioria das posições avaliadas. Globalmente, a sala apresenta condições favoráveis à inteligibilidade da palavra, não se verificando diferenças relevantes entre as condições com e sem sistema AVAC, nem impactos significativos associados à presença pontual de ruído de limpeza ou de ruído exterior.

A definição média obtida foi aproximadamente 0,64, observando-se variações entre posições e condições inferiores a 0,03. Dado que a diferença mínima percetível para D_{50} é cerca de 0,05, conclui-se que a definição da palavra se mantém percecionalmente uniforme em toda a sala e entre as diferentes condições de medição.

Quadro 5.12- Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os pontos P1 a P16 medidos no Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão, sem sistema de AVAC ligado.

Ponto (Posição)	**Frequência (Hz)**							***D*50 [500, 1000 Hz]**
	125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	
P1 (Plateia)	0,88	0,94	0,86	0,88	0,81	0,78	0,94	**0,87**
P2 (Plateia)	0,78	0,65	0,82	0,76	0,62	0,65	0,81	**0,79**
P3 (Plateia)	0,44	0,53	0,63	0,50	0,56	0,56	0,72	**0,57**
P4(Plateia)	0,59	0,50	0,54	0,51	0,58	0,54	0,77	**0,52**
P5 (Plateia)	0,81	0,58	0,58	0,52	0,61	0,61	0,73	**0,55**
P6 (Plateia)	0,37	0,52	0,65	0,60	0,68	0,70	0,75	**0,63**
P7 (Plateia)	0,73	0,69	0,62	0,59	0,59	0,67	0,75	**0,61**
P8 (Tribuna)	0,48	0,51	0,73	0,59	0,55	0,53	0,66	**0,66**
P9(Tribuna)	0,61	0,64	0,51	0,50	0,50	0,52	0,68	**0,51**
P10(Tribuna)	0,56	0,41	0,56	0,58	0,41	0,50	0,65	**0,57**
P11(1º Balcão)	0,78	0,77	0,72	0,72	0,80	0,75	0,82	**0,72**
P12(1º Balcão)	0,75	0,79	0,77	0,64	0,63	0,73	0,86	**0,71**
P13(1º Balcão)	0,62	0,59	0,66	0,61	0,67	0,71	0,81	**0,64**
P14(2º Balcão)	0,71	0,61	0,70	0,55	0,79	0,70	0,74	**0,62**
P15(2º Balcão)	0,72	0,58	0,62	0,61	0,69	0,67	0,75	**0,62**
P16(2º Balcão)	0,70	0,75	0,57	0,68	0,74	0,69	0,77	**0,63**
Média	0,66	0,63	0,66	0,62	0,64	0,64	0,76	**0,64**
Desvio Padrão	0,14	0,13	0,10	0,10	0,11	0,09	0,07	0,10
Δ = Máx - min	0,51	0,53	0,35	0,39	0,40	0,28	0,29	0,37

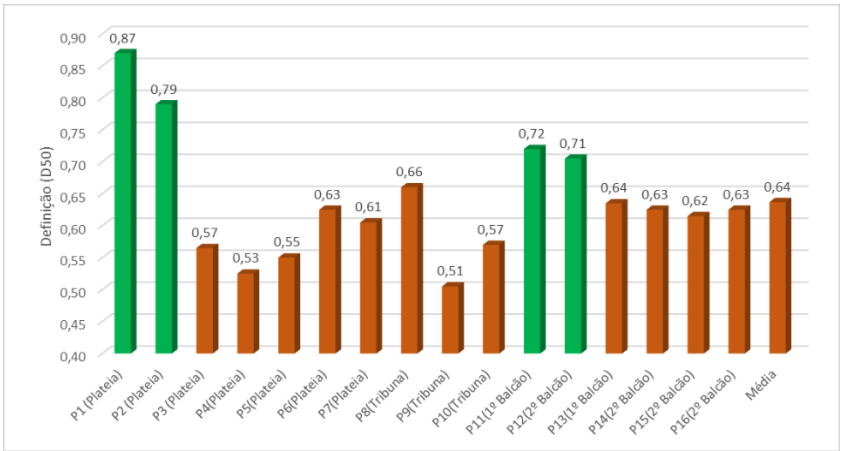


Figura 5.11- Comparação dos valores da Definição (D_{50}) [500, 1k Hz] para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) e a média, no Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC desligado.

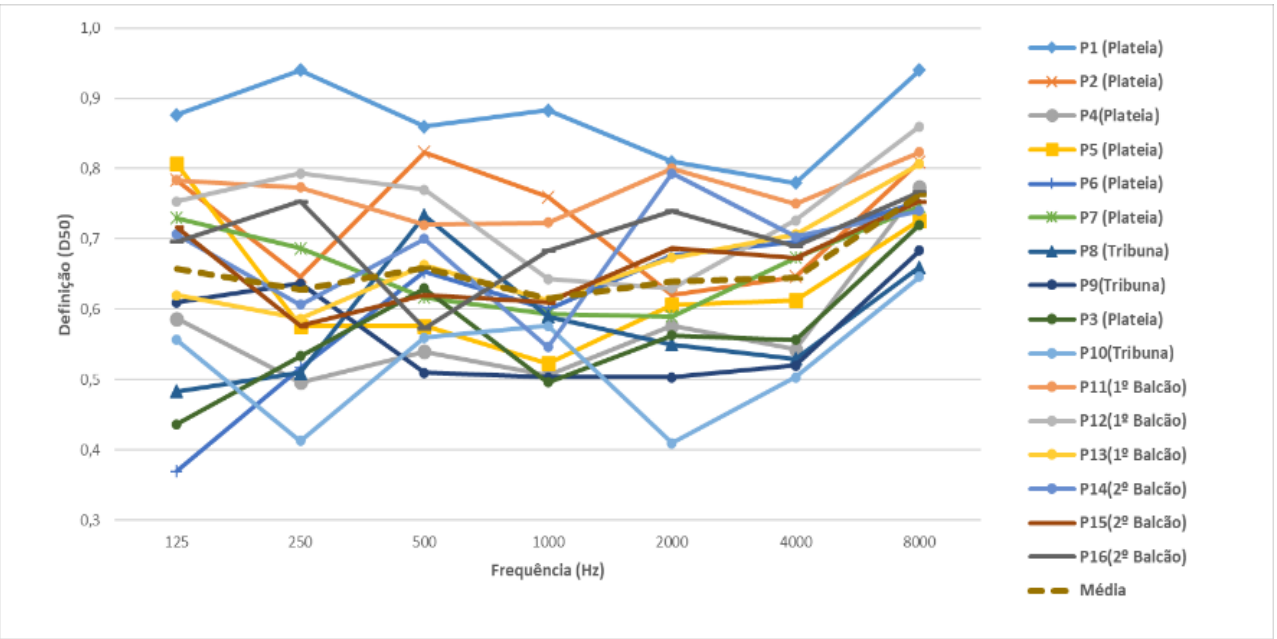


Figura 5.12- Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) em bandas de frequência de 1/1 oitava no Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC desligado.

Quadro 5.13- Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os pontos P1 a P16 medidos no Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão, com sistema de AVAC ligado.

Ponto (Posição)	**Frequência (Hz)**							***D*50 [500, 1000 Hz]**	**Δ (Com AVAC - Sem AVAC)**
	125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**		
P1 (Plateia)	0,89	0,95	0,88	0,88	0,83	0,83	0,95	**0,88**	**0,01**
P2 (Plateia)	0,74	0,58	0,70	0,74	0,63	0,66	0,80	**0,72**	**-0,07**
P3 (Plateia)	0,48	0,57	0,46	0,54	0,50	0,53	0,71	**0,50**	**-0,07**
P4(Plateia)	0,62	0,46	0,50	0,48	0,56	0,50	0,77	**0,49**	**-0,03**
P5 (Plateia)	0,81	0,57	0,51	0,50	0,60	0,60	0,71	**0,51**	**-0,04**
P6 (Plateia)	0,36	0,47	0,58	0,72	0,70	0,67	0,73	**0,65**	**0,02**
P7 (Plateia)	0,75	0,68	0,62	0,55	0,55	0,61	0,75	**0,59**	**-0,02**
P8 (Tribuna)	0,45	0,53	0,71	0,58	0,54	0,53	0,65	**0,65**	**-0,01**
P9(Tribuna)	0,50	0,55	0,52	0,67	0,51	0,53	0,71	**0,60**	**0,09**
P10(Tribuna)	0,74	0,71	0,50	0,71	0,42	0,52	0,70	**0,61**	**0,04**
P11(1º Balcão)	0,82	0,76	0,79	0,76	0,80	0,76	0,80	**0,78**	**0,06**
P12(1º Balcão)	0,73	0,79	0,73	0,62	0,63	0,67	0,83	**0,68**	**-0,03**
P13(1º Balcão)	0,62	0,63	0,67	0,61	0,70	0,74	0,81	**0,64**	**0,00**
P14(2º Balcão)	0,71	0,64	0,73	0,62	0,77	0,70	0,78	**0,68**	**0,06**
P15(2º Balcão)	0,67	0,60	0,72	0,66	0,70	0,71	0,76	**0,69**	**0,07**
P16(2º Balcão)	0,69	0,76	0,57	0,68	0,74	0,64	0,77	**0,63**	**0,00**
Média	0,66	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,76	**0,64**	**0,00**
Desvio Padrão	0,15	0,13	0,12	0,11	0,12	0,10	0,07	0,10	-
Δ = M - m	0,53	0,49	0,42	0,40	0,41	0,33	0,30	0,41	-

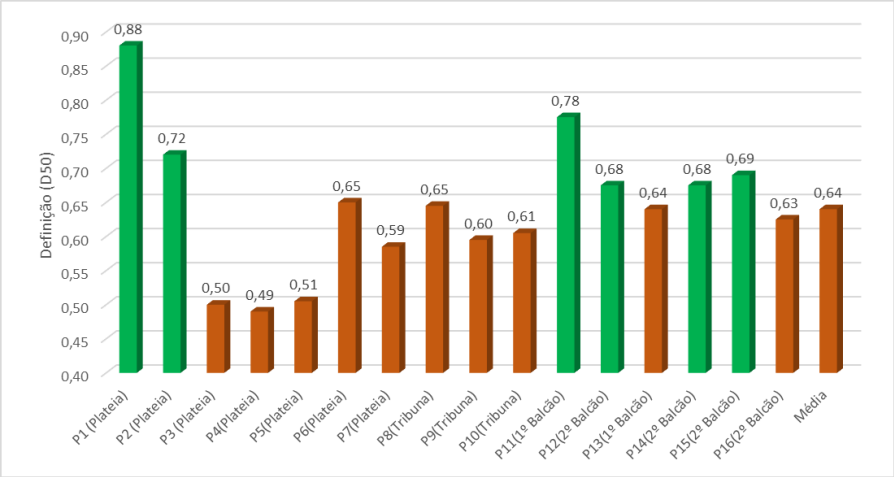


Figura 5.13- Comparação dos valores da Definição (D_{50}) [500, 1k Hz] para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) e a média, no Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC ligado.

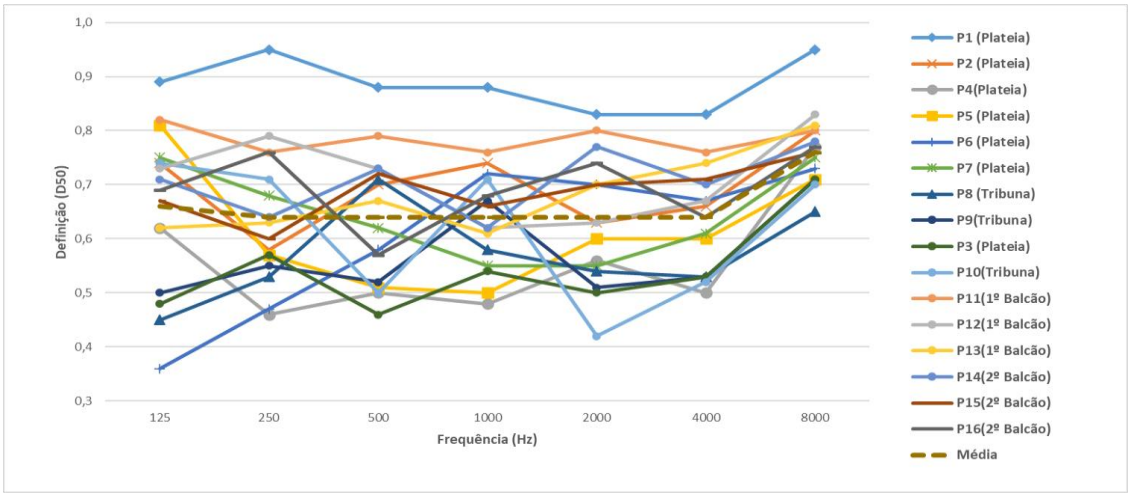


Figura 5.14- Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) em bandas de frequência de 1/1 oitava e a média no Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC ligado.

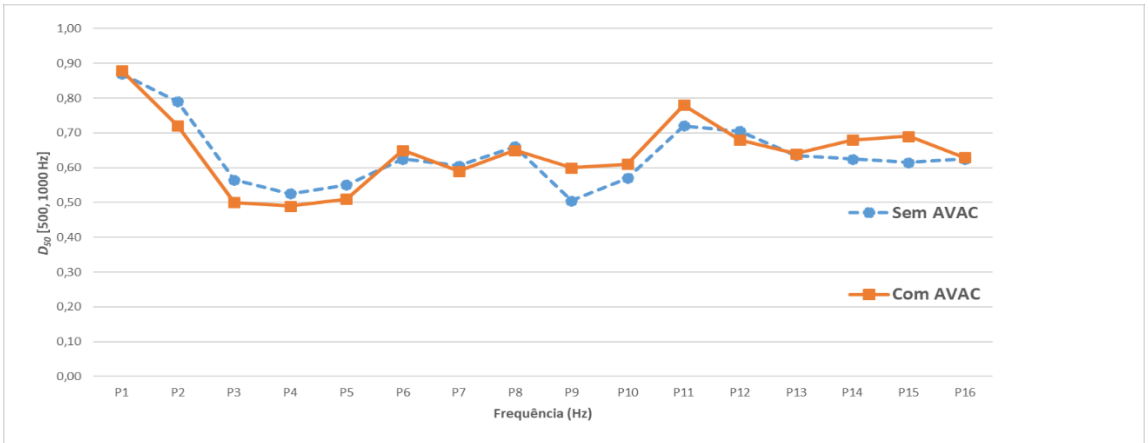


Figura 5.15- Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para a média entre as frequências 500 e 1000 Hz sem AVAC e com AVAC no teatro Sá da Bandeira, para os dezasseis pontos medidos.

5.8 CLARIDADE (C_{80})

Como referido no capítulo 2.7.4.2, a Claridade (C_{80}) é um parâmetro que alia a relação entre a energia sonora recebida nos primeiros 80 ms, que inclui o som direto e as primeiras reflexões, e a energia recebida posteriormente, associada ao campo reverberante. Valores mais elevados de C_{80} indicam predominância do som direto e das reflexões iniciais, resultando numa perceção mais definida dos detalhes sonoros, enquanto valores mais reduzidos apontam para uma maior influência do campo reverberante e consequente perda de nitidez. Este parâmetro é particularmente relevante em espaços destinados a música, onde a clareza é fundamental.

Para este estudo foram analisados dezasseis pontos (P1 a P16), distribuídos pela plateia, tribuna, 1.º balcão e 2.º balcão, conforme referido no capítulo 4.2.3. Os resultados obtidos encontram-se apresentados nos Quadros 5.14 (sistema AVAC desligado) e 5.15 (sistema AVAC ligado), os quais incluem os valores de C_{80} em bandas de 1/1 de oitava entre os 125 e os 8000 Hz, as médias por banda, a média de cada ponto considerando as frequências de 500 e 1000 Hz e os respetivos desvios-padrão. As Figuras 5.16 (sem AVAC) e 5.17 (com AVAC) apresentam a evolução espectral do parâmetro para todos os pontos.

A análise das Figuras 5.16 e 5.17 revela que os valores de C_{80} se mantêm maioritariamente positivos em todo o espetro, o que indica uma clara predominância da energia inicial sobre o campo reverberante, condição desejável para atuações musicais. Tal como é frequente verificar neste tipo de salas, os valores tendem a ser mais elevados nas frequências médias e altas (a partir dos 500 Hz) e a diminuir ligeiramente nas bandas mais baixas, onde o campo reverberante tem maior influência e os fenómenos de difração reduzem o contributo do som direto.

Os pontos P1, P5, P7, P11, P12 e P14 destacam-se nas figuras pela apresentação dos valores mais elevados, tanto com o sistema AVAC ligado como desligado. Estes resultados são coerentes com a sua localização aproximada à fonte sonora e com a existência de trajetórias reflexivas eficientes que reforçam a energia nas primeiras reflexões. Em contraste, os pontos P3, P8 e P9 apresentam valores inferiores, particularmente nas bandas de frequência mais baixas, sugerindo maior influência do campo reverberante ou possíveis sombreamentos geométricos. Apesar disto, os valores obtidos nestes pontos permanecem dentro de limites adequados para algumas funções da sala.

Os Quadros 5.14 e 5.15 mostram que as médias de C_{80} na banda crítica entre 500 e 1000 Hz são de 6,2 dB sem AVAC e 7,0 dB com AVAC, respetivamente. No Quadro 5.15 apresenta-se ainda a diferença entre as condições "Com AVAC e Sem AVAC", que revela uma média de 0,2.

De acordo com os intervalos de referência para C_{80} apresentados no capítulo 2.7.4.2 e sintetizados no Quadro 5.16, os valores obtidos enquadram-se como adequados para usos como teatro, cinema e música, nos quais se privilegia uma perceção clara e detalhada do som. Para repertórios sinfónicos não amplificados ou música coral, que beneficiam de valores de C_{80} mais baixos e de maior envolvência reverberante, os níveis medidos no Teatro Sá da Bandeira revelam-se superiores ao desejável.

Os valores médios de claridade situam-se entre aproximadamente 6,0 e 6,2 dB, verificando-se diferenças da ordem de 0,2 dB entre condições com e sem sistema de AVAC. Considerando que a as diferenças mínimas percetíveis para C80 é cerca de 1 dB, estas variações são muito inferiores ao limiar percetivo, não sendo expectável qualquer alteração audível da clareza sonora associada ao funcionamento do sistema de climatização.

Quadro 5.14- Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) (dB) para os pontos P1 a P16 medidos no Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão, com sistema de AVAC desligado.

Ponto (Posição)	Frequência (Hz)							**C80 [500, 1.000 Hz] (dB)**
	125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	
P1 (Plateia)	10,7	13,7	10,4	10,6	8,5	8,3	14,9	**10,5**
P2 (Plateia)	6,8	3,5	9,6	7,0	4,1	4,4	8,4	**8,3**
P3 (Plateia)	4,6	5,5	5,0	4,3	4,3	3,7	7,8	**4,7**
P4(Plateia)	7,1	3,2	4,6	3,4	3,6	3,3	8,1	**4,0**
P5(Plateia)	7,9	4,2	4,0	3,3	4,4	4,6	6,7	**3,7**
P6(Plateia)	6,7	6,0	7,1	5,5	7,1	6,9	9,2	**6,3**
P7 (Plateia)	6,8	7,3	5,7	5,0	5,3	5,8	8,1	**5,4**
P8(Tribuna)	5,5	4,4	7,2	6,4	4,6	4,5	6,7	**6,8**
P9(Tribuna)	4,5	6,9	3,1	4,8	3,2	3,7	7,1	**4,0**
P10(Tribuna)	3,4	4,1	5,8	4,0	2,4	2,8	5,7	**4,9**
P11(1ºBalcão)	9,9	10,6	8,3	8,9	8,7	8,0	10,3	**8,6**
P12(1ºBalcão)	7,8	9,6	6,9	6,5	6,0	6,7	10,0	**6,7**
P13(1ºBalcão)	6,7	6,0	7,1	5,5	7,1	6,9	9,2	**6,3**
P14(2ºBalcão)	9,7	8,2	8,7	7,0	9,6	7,7	8,0	**7,9**
P15(2ºBalcão)	7,9	3,5	5,1	5,8	6,8	6,3	7,8	**5,5**
P16(2ºBalcão)	6,2	8,3	5,2	6,7	7,7	6,2	7,5	**6,0**
Média	7,0	6,6	6,5	5,9	5,8	5,6	8,5	**6,2**
Desvio Padrão	2,0	2,9	2,0	1,9	2,2	1,8	2,1	**1,9**
Δ = Máx - min	2,1	-5,5	-4,7	-0,3	-5,2	-0,7	-0,5	**-2,1**

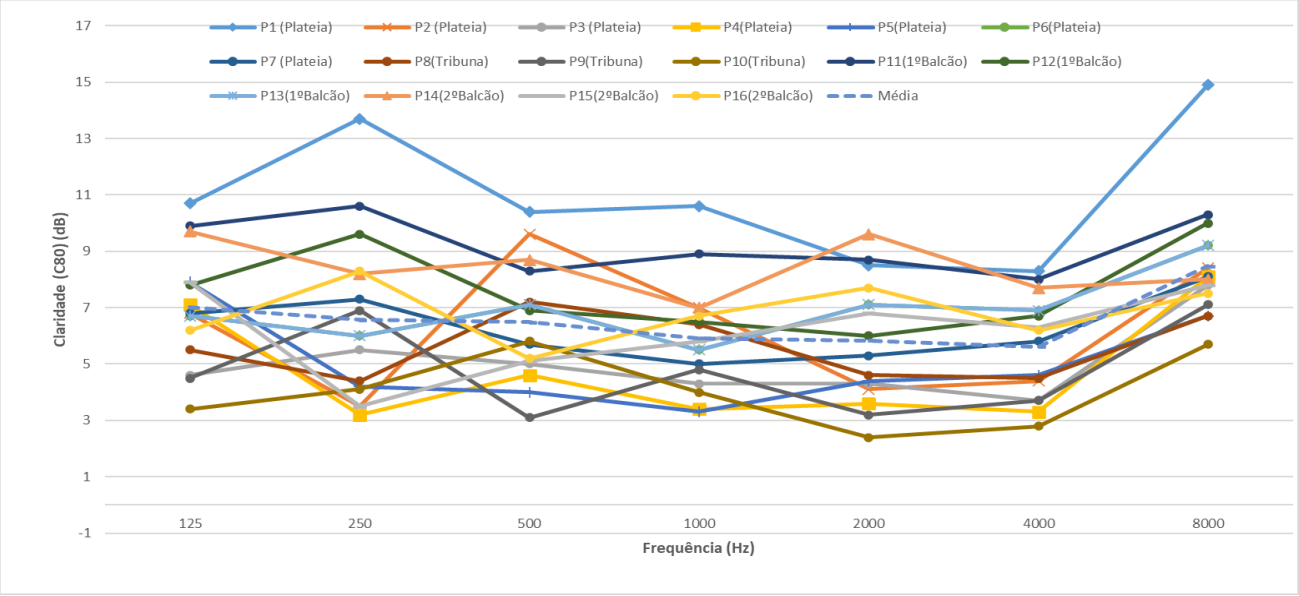


Figura 5.16- Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) em bandas de frequência de 1/1 oitava do Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC desligado.

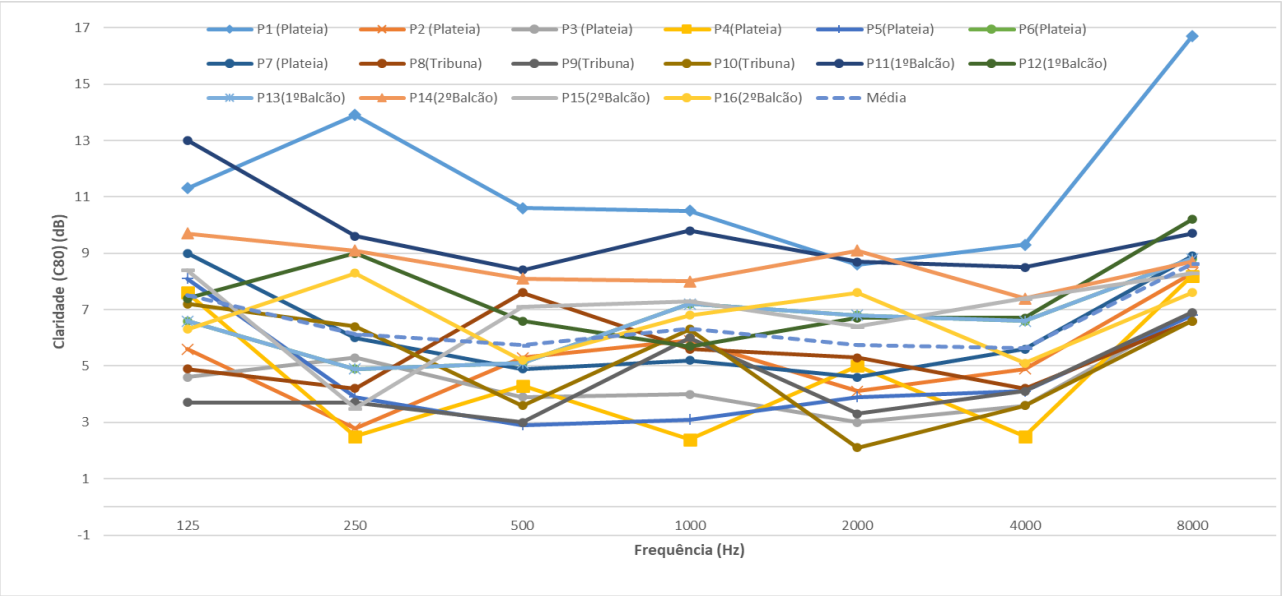


Figura 5.17- Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) em bandas de frequência de 1/1 oitava do Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC ligado.

Quadro 5.15- Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) (dB) para os pontos P1 a P16 medidos no Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão, com sistema de AVAC ligado.

Ponto (Posição)	**Frequência (Hz)**							**C80 [500, 1.000 Hz] (dB)**	**Δ (Com AVAC - Sem AVAC)**
	125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**		
P1 (Plateia)	11,3	13,9	10,6	10,5	8,6	9,3	16,7	**10,6**	**0,1**
P2 (Plateia)	5,6	2,8	5,3	5,9	4,1	4,9	8,3	**5,6**	**-2,7**
P3 (Plateia)	4,6	5,3	3,9	4,0	3,0	3,6	6,9	**4,0**	**-0,7**
P4(Plateia)	7,6	2,5	4,3	2,4	5,0	2,5	8,2	**3,4**	**-0,6**
P5(Plateia)	8,1	3,9	2,9	3,1	3,9	4,1	6,8	**3,0**	**-0,7**
P6(Plateia)	6,6	4,9	5,1	7,2	6,8	6,6	8,8	**6,2**	**-0,1**
P7 (Plateia)	9,0	6,0	4,9	5,2	4,6	5,6	8,9	**5,1**	**-0,4**
P8(Tribuna)	4,9	4,2	7,6	5,6	5,3	4,2	6,6	**6,6**	**-0,2**
P9(Tribuna)	3,7	3,7	3,0	6,0	3,3	4,1	6,9	**4,5**	**0,5**
P10(Tribuna)	7,2	6,4	3,6	6,3	2,1	3,6	6,6	**5,0**	**0,1**
P11(1ºBalcão)	13,0	9,6	8,4	9,8	8,7	8,5	9,7	**9,1**	**0,5**
P12(1ºBalcão)	7,4	9,0	6,6	5,7	6,7	6,7	10,2	**6,2**	**-0,5**
P13(1ºBalcão)	6,6	4,9	5,1	7,2	6,8	6,6	8,8	**6,2**	**-0,1**
P14(2ºBalcão)	9,7	9,1	8,1	8,0	9,1	7,4	8,7	**8,1**	**0,2**
P15(2ºBalcão)	8,4	3,5	7,1	7,3	6,4	7,4	8,3	**7,2**	**1,7**
P16(2ºBalcão)	6,3	8,3	5,2	6,8	7,6	5,1	7,6	**6,0**	**0,0**
Média	7,5	6,1	5,7	6,3	5,7	5,6	8,6	**6,0**	**-0,2**
Desvio Padrão	2,4	3,1	2,2	2,1	2,2	1,9	2,4	**2,0**	**0,1**
Δ = Máx - min	2,0	-4,8	-5,3	-1,1	-5,2	-1,5	-1,0	**-2,4**	**-0,3**

Quadro 5.16- Verificação dos valores ideais para o parâmetro Claridade (C80) em função do uso da sala do Teatro Sá da Bandeira.

Função	**C_{80} [500, 1.000 Hz]**	**C_{80} [500, 1.000 Hz]**		**Avaliação**
		Sem AVAC	**Com AVAC**	
Ópera wagneriana	1 a 2	**6,2**	**6,0**	Desadequado
Ópera (não wagneriana)	3 a 4			Desadequado
Cinema	> 6			Adequado
Teatro	> 6			Adequado
Música popular	> 6			Adequado
Música sinfónica (Romântica)	-2 a -1			Desadequado
Música sinfónica (Barroco)	0 a 2			Desadequado
Música sinfónica (Clássica)	-1 a 0			Desadequado
Música de câmara	-1 a 1			Desadequado
Música de órgão	< -2			Desadequado

5.9 TEMPO CENTRAL(TS)

De acordo com o capítulo 2.7.4.3, o Tempo Central (TS) é um parâmetro que descreve o instante temporal em que metade da energia acústica total emitida pela fonte é recebida no ponto de medição. Em termos práticos, o TS permite distinguir ambientes em que a energia se concentra maioritariamente nas primeiras reflexões, resultando em sons mais claros e definidos, daqueles em que existe uma maior contribuição da cauda reverberante, traduzindo-se em valores mais elevados e em ambientes acusticamente mais envolventes. Assim, valores reduzidos de TS estão normalmente associados a espaços destinados à palavra e a usos teatrais, enquanto valores mais altos são desejáveis em salas dedicadas a repertório musical sinfónico ou coral, onde a reverberação desempenha um papel importante no enriquecimento sonoro.

Para este estudo foram analisados dezasseis pontos (P1 a P16), distribuídos pela plateia, tribuna, 1.º balcão e 2.º balcão. Os resultados encontram-se apresentados no Quadro 5.17 (sistema AVAC desligado) e no Quadro 5.18 (sistema AVAC ligado), para bandas de frequência de 1/1 oitava entre 125 e 8000 Hz, incluindo as médias por ponto para as frequências críticas de 500 e 1000 Hz, bem como a média de cada banda de frequência e respetivos desvios-padrão. As Figuras 5.18 (sem AVAC) e 5.19 (com AVAC) apresentam a evolução espectral do TS para todos os pontos medidos.

A análise das Figuras 5.18 e 5.19 mostra que os valores de TS diminuem com a frequência, comportamento típico em salas onde as componentes de alta frequência apresentam menor energia de cauda reverberante. Verifica-se uma maior dispersão nas baixas frequências, particularmente em 125 e 250 Hz, onde os efeitos modais, a absorção variável e a interferência de ondas estacionárias influenciam significativamente a distribuição temporal da energia sonora.

Os valores médios de TS para as bandas (500 e 1000 Hz) situam-se entre 56 ms (AVAC desligado) e 54 ms (AVAC ligado). Estes valores enquadram-se na gama referida na literatura como adequada para espaços destinados primordialmente à palavra, normalmente abaixo dos 80 ms, garantindo clareza, nitidez e estabilidade temporal do som direto. A comparação entre condições revela ainda que a operação do sistema AVAC tem um efeito pouco significativo sobre o parâmetro, com diferenças inferiores a 2 ms, conforme evidente nos Quadros 5.16 e 5.17. Tal resultado indica que o ruído de fundo associado ao funcionamento do sistema de climatização não altera de forma relevante a distribuição temporal da energia sonora.

Os valores médios de TS, obtidos a partir da média entre 500 e 1000 Hz, são de 56 ms com o sistema AVAC desligado e 57 ms com o sistema AVAC ligado, conforme apresentado no Quadro 5.19. Estes valores encontram-se claramente abaixo dos 80 ms recomendados para espaços destinados prioritariamente à palavra, assegurando uma boa definição temporal do som direto e das primeiras reflexões. A diferença entre as duas condições de funcionamento do sistema AVAC é muito reduzida, da ordem de 1 ms, indicando que o funcionamento do sistema de ventilação e climatização não exerce influência significativa sobre o parâmetro TS.

Os valores obtidos por ponto evidenciam uma variação espacial moderada, com valores baixos em posições mais próximas da fonte sonora e valores mais elevados em pontos mais afastados e em zonas com menor incidência de primeiras reflexões. Observa-se um intervalo global entre cerca de 23 ms e 74 ms, abrangendo todos os setores da sala. Pontos da tribuna e dos balcões tendem a apresentar valores ligeiramente superiores aos da plateia, refletindo uma maior contribuição do campo reverberante, embora todos os pontos se mantenham dentro de limites compatíveis com espaços vocacionados para a palavra.

De acordo com os critérios apresentados no capítulo 2.7.4.3 e sintetizados no Quadro 5.19, o intervalo ideal de TS para música situa-se entre 80 ms e 230 ms, enquanto para a palavra se recomendam valores inferiores a 80 ms. Os resultados obtidos no Teatro Sá da Bandeira cumprem integralmente o critério para palavra em ambas as condições (com e sem AVAC), mas situam-se abaixo do valor mínimo recomendado para música.

Em síntese, os valores de Tempo Central (TS) medidos no Teatro Sá da Bandeira evidenciam um ambiente acusticamente favorável à palavra, caracterizado por uma predominância da energia inicial e reduzida contribuição da cauda reverberante.

O tempo central médio medido foi da ordem de 56 ms, com variações entre posições e condições tipicamente inferiores a alguns milissegundos. Considerando que as diferenças minimas percetiveis para TS é aproximadamente 10 ms, tais diferenças são claramente não percetíveis, evidenciando a consistência temporal da distribuição de energia sonora no auditório.

Quadro 5.17- Valores do parâmetro Tempo Central (*TS*) (ms) para os dezasseis pontos (P1 a P16) medidos do Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão, com sistema de AVAC desligado.

Ponto (Posição)	**Frequência (Hz)**							***TS* [500, 1000 Hz] (ms)**
	125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	
P1 (Plateia)	46	23	25	22	31	33	11	**24**
P2(Plateia)	66	65	36	41	55	49	28	**38**
P3(Plateia)	89	66	55	64	60	62	36	**60**
P4(Plateia)	80	80	64	69	63	69	33	**67**
P5(Plateia)	62	77	70	68	60	61	42	**69**
P6(Plateia)	93	72	61	65	57	52	43	**63**
P7(Plateia)	82	67	65	67	62	53	41	**66**
P8(Tribuna)	94	78	52	59	63	65	47	**55**
P9(Tribuna)	103	66	71	66	71	69	42	**68**
P10(Tribuna)	88	82	61	62	77	73	48	**62**
P11(1º Balcão)	61	46	54	48	42	44	34	**51**
P12(1º Balcão)	64	46	49	56	50	45	23	**52**
P13(1ºBalcão)	79	64	50	60	49	46	32	**55**
P14(2ºBalcão)	67	63	46	57	35	46	40	**51**
P15(2ºBalcão)	70	73	56	55	46	48	34	**55**
P16(2ºBalcão)	75	51	63	49	38	48	35	**55**
Média	76	64	55	57	54	54	36	**56**
Desvio Padrão	15	16	12	12	13	11	9	**12**
Δ = M - m	57	59	46	47	46	41	37	**45**

Quadro 5.18- Valores do parâmetro Tempo Central (*TS*) (ms) para os dezasseis pontos (P1 a P16) medidos do Teatro Sá da Bandeira; média e desvio padrão, com sistema de AVAC ligado.

Ponto (Posição)	**Frequência (Hz)**							***TS* [500, 1000 Hz] (ms)**	**Δ (Com AVAC - Sem AVAC)**
	125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**		
P1 (Plateia)	44	22	23	23	28	27	8	**23**	**-1**
P2(Plateia)	75	73	50	48	56	50	29	**49**	**11**
P3(Plateia)	90	64	69	65	67	64	40	**67**	**7**
P4(Plateia)	76	80	66	76	58	72	34	**71**	**4**
P5(Plateia)	64	76	78	69	61	61	43	**74**	**5**
P6(Plateia)	93	79	69	57	58	55	44	**63**	**0**
P7(Plateia)	75	68	64	66	66	58	39	**65**	**-1**
P8(Tribuna)	95	78	51	60	66	68	48	**56**	**1**
P9(Tribuna)	96	76	68	53	71	62	42	**61**	**-8**
P10(Tribuna)	70	57	77	46	79	65	45	**62**	**-1**
P11(1º Balcão)	55	47	50	44	41	44	37	**47**	**-4**
P12(1º Balcão)	63	44	53	58	48	49	26	**56**	**4**
P13(1ºBalcão)	83	62	50	59	47	45	32	**55**	**-1**
P14(2ºBalcão)	66	66	52	51	38	47	37	**52**	**1**
P15(2ºBalcão)	68	72	49	49	47	42	35	**49**	**-6**
P16(2ºBalcão)	74	51	62	48	37	53	34	**58**	**3**
Média	74	63	58	54	54	54	36	**57**	**0**
Desvio Padrão	15	16	14	12	14	12	9	**12**	**-**
Δ = M - m	52	58	55	53	51	44	40	**51**	**-**

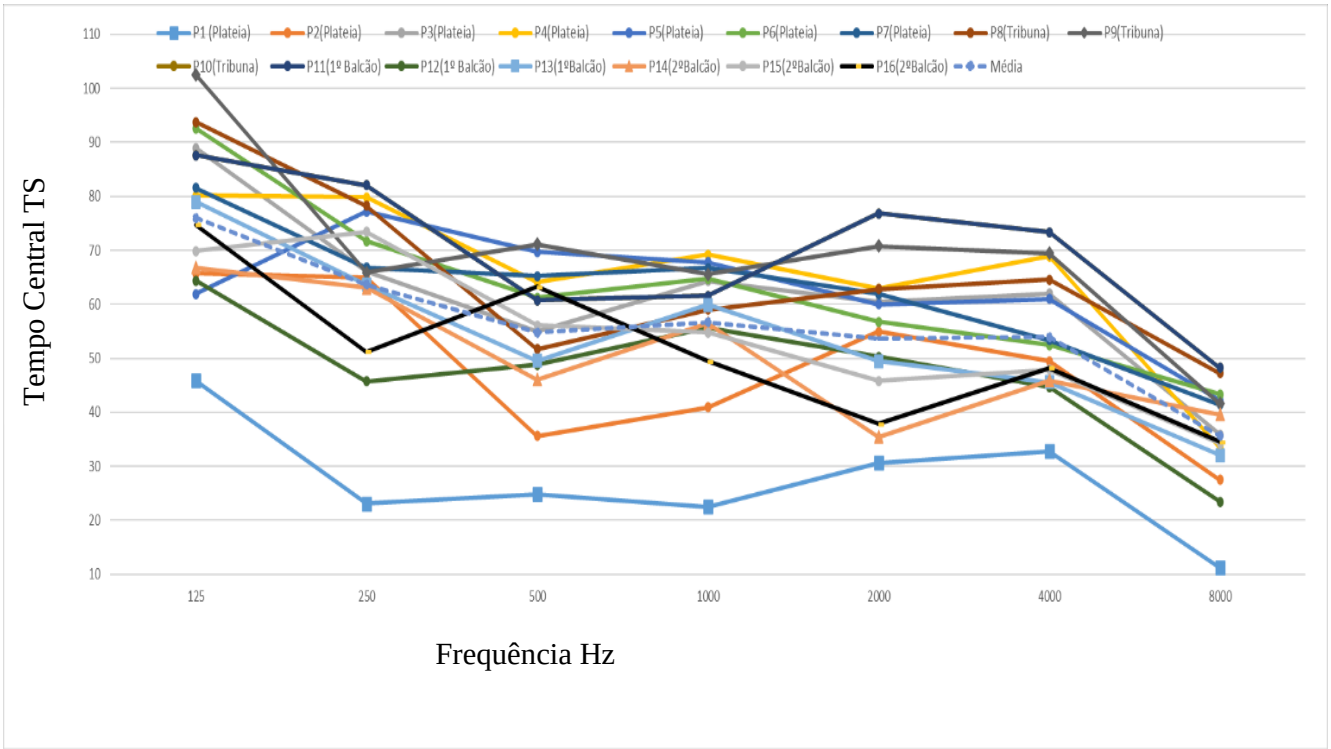


Figura 5.18- Valores do parâmetro Tempo Central (*TS*) para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) em bandas de frequência de 1/1 oitava do Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC desligado.

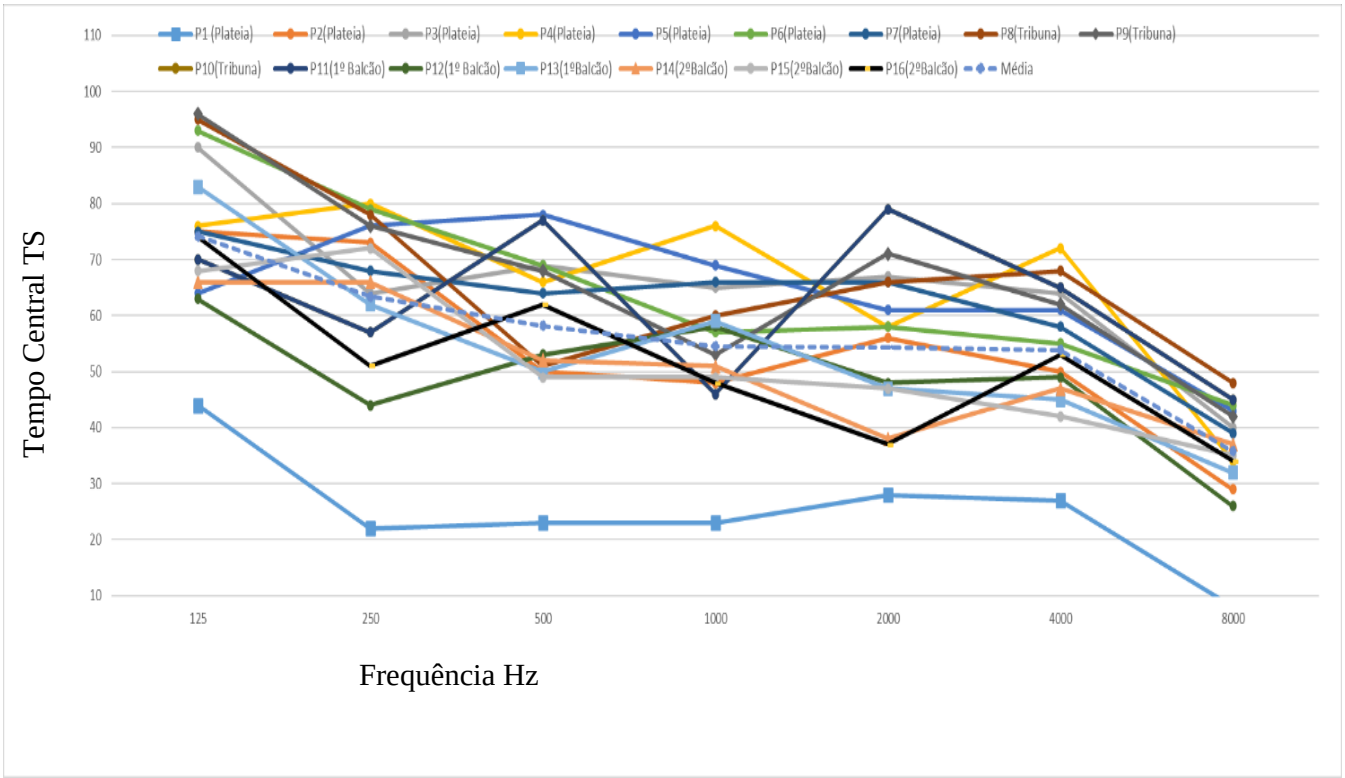


Figura 5.19- Valores do parâmetro Tempo Central (*TS*) para os dezasseis pontos medidos (P1 a P16) em bandas de frequência de 1/1 oitava do Teatro Sá da Bandeira, com sistema de AVAC ligado.

Quadro 5.19- Valores ideais para o Tempo Central (*TS*) para palavra e música [1].

Função	***TS* [500, 1.000 Hz] ideal (ms) [1]**	***TS* [500, 1.000 Hz] (ms)**		**Avaliação**
		Sem AVAC	**Com AVAC**	
Música	80 a 230	**56**	**57**	Desadequado
Palavra	< 80			Adequado

6

COMPARAÇÃO COM OUTROS TEATROS

6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo centra-se na análise comparativa do desempenho acústico do Teatro Sá da Bandeira com outras dezanove salas de espetáculo nacionais previamente caracterizadas em dissertações e estudos académicos. O principal objetivo consiste em enquadrar os resultados obtidos no presente trabalho, identificando as qualidades e eventuais limitações acústicas do auditório no contexto mais alargado das salas de espetáculo em Portugal, permitindo 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:

- Tempo de reverberação médio (TR [500, 1.000 Hz]);
- Claridade média (C_{80} [500, 1.000 Hz]);
- Definição média (D_{50} [500, 1.000 Hz]);
- Tempo central médio (*TS* [500, 1.000 Hz]);
- *Speech Transmission Index* (*STI*) ou *Rapid Speech Transmission Index* (*RASTI*);
- Nível sonoro do ruído de fundo (L_{Aeq}).

Quadro 6.1- Comparação das diversas funções das vinte salas nacionais.

Salas	Funções mais usuais	Palavra	Música
Cineteatro de Amarante [61]	Espetáculos		X
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares) [62]	Cinema, teatro, concertos e palestras	X	X
Auditório da FEUP [57]	Palavra e música		X
Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia [58]	Palavra e cinema	X	X
Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra) [64]	Eventos de música, teatro e entretenimento	X	X
Grande Auditório do Altice Fórum Braga [63]	Conferencias e seminários, espetáculos musicais, infantis, teatro, dança e stand up comedy	X	X
Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga [63]	Seminários, conferencias, formações e debate		X
Casa da Cultura de Ílhavo [59]	Espetáculos, congressos, seminários, convenções, eventos corporativos e sociais, cursos, exposições e apresentações		X
Centro de Artes de Águeda [60]	Dança clássica e contemporânea, música, teatro e cinema	X	X
Teatro Municipal da Covilhã [65]	Música e teatro	X	X
Teatro Municipal de Ourém [66]	Teatro, cinema e eventos corporativos	X	X
Teatro Nacional São João (Porto) [55]	Ópera e teatro	X	X
Auditório do Conservatório de Música do Porto [67]	Concertos, ciclos de recitais, orquestras, conferências, exposições e espetáculos de dança		x
Teatro Ribeiro Conceição (Lamego) [56]	Teatro, cinema, espetáculos musicais, danças, palestras e entretenimento	X	X
Teatro Jordão (Guimarães) [69]	Música, teatro, dança e cinema	x	x
Teatro Carlos Alberto (Porto) [19]	Teatro, eventos de musicais e dança	x	x
Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo) [54]	Teatro, música, dança e cinema	x	x
Theatro Circo (Braga) [68]	Teatro, espetáculos musicais, dança, palestras e entretenimento	x	x
Cine-Teatro Garrett (Póvoa de Varzim) [20]	Teatro, cinema, palestras, conferências, música e eventos corporativos	x	x
Teatro Sá da Bandeira (Porto)	Teatro, música, comédia, conferências e eventos	X	X

6.2 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Neste ponto procede-se à análise comparativa do tempo de reverberação médio (TR, 500–1000 Hz) do Teatro Sá da Bandeira com um conjunto de dezanove salas de espetáculo nacionais previamente estudadas. Pretende-se enquadrar o comportamento reverberante do teatro no panorama português, identificando tendências gerais de projeto e verificando a adequabilidade da sala às funções para as quais é habitualmente utilizada.

No Quadro 6.2 apresentam-se os valores do volume, número de lugares e TR médio (500–1000 Hz) para as vinte salas consideradas, incluindo o Teatro Sá da Bandeira. Os resultados são posteriormente representados nas Figuras 6.1 e 6.2, onde o TR médio é analisado em função do volume da sala e do número total de lugares, respetivamente, tendo sido ajustada uma linha de tendência do tipo logarítmico em ambos os casos.

Da observação da Figura 6.1 verifica-se que existe uma tendência crescente do TR médio com o aumento do volume do recinto, embora com dispersão significativa, evidenciada pelo afastamento de algumas salas relativamente à linha de tendência. Tal comportamento indica que o volume, apesar de ser uma variável determinante, não é o único fator responsável pelo tempo de reverberação, sendo também relevante a presença de revestimentos absorventes, o grau de estofamento das cadeiras e a existência de cortinados e elementos difusores. O Teatro Sá da Bandeira posiciona-se próximo da linha de tendência, apresentando um TR médio de aproximadamente 0,85 s para um volume de cerca de 5520 m³, valor coerente para uma sala com estas dimensões e tipologia em ferradura.

Na Figura 6.2 apresenta-se o TR médio em função do número de lugares. Tal como no caso anterior, observa-se uma tendência crescente com a capacidade de público, embora novamente com dispersão relevante entre os diferentes espaços analisados. Este resultado confirma que o número de lugares, e consequentemente a área ocupada por cadeiras estofadas e público, influencia o tempo de reverberação, mas não o determina de forma isolada. O Teatro Sá da Bandeira, com 792 lugares, apresenta um TR médio alinhado com a tendência global obtida para as restantes salas, revelando um comportamento intermédio dentro do conjunto analisado.

No Quadro 6.3 procede-se à verificação da adequabilidade dos valores de TR médio do Teatro Sá da Bandeira face a diferentes funções de utilização, recorrendo aos intervalos de referência disponíveis na literatura. Constata-se que o TR médio obtido, da ordem de 0,85 s, enquadra-se dentro das gamas consideradas adequadas para funções como teatro, cinema e auditório para palavra, nas quais se privilegia a inteligibilidade do discurso e a presença sonora. Para funções musicais que requerem maior envolvência reverberante, como música sinfónica, música coral ou ópera wagneriana, o TR do Teatro Sá da Bandeira apresenta-se inferior aos intervalos recomendados, podendo conduzir a uma perceção sonora menos envolvente para estes tipos de repertório.

Assim, pode concluir-se que o comportamento reverberante do Teatro Sá da Bandeira é coerente com a sua vocação principal, dirigida sobretudo a teatro, comédia, conferências e cinema, verificando-se que a sala se encontra acusticamente ajustada a atividades onde a inteligibilidade da palavra é prioritária. Para repertórios musicais de caráter sinfónico, o espaço poderá revelar-se excessivamente seco, sendo desejável a adoção de soluções temporárias de reforço da reverberação caso se pretenda privilegiar esse tipo de utilização

Quadro 6.2- Valores do Volume, Número de lugares e TR médio (500, 1.000 Hz) das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira.

Salas	Volume (m3)	N.º de Lugares	TR [500,1k Hz] (s)
Cineteatro de Amarante [61]	2700	386	1,20
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares) [62]	2111	275	1,00
Auditório da FEUP [57]	3317	500	1,50
Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia [58]	3219	330	0,80
Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra) [64]	12000	1093	1,50
Grande Auditório do Altice Fórum Braga [63]	9150	998	1,00
Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga [63]	1320	254	0,50
Casa da Cultura de Ílhavo [59]	3779	491	1,00
Centro de Artes de Águeda [60]	5066	398	0,80
Teatro Municipal da Covilhã [65]	4258	600	1,40
Teatro Municipal de Ourém [66]	3915	441	1,00
Teatro Nacional São João [55]	4560	614	1,20
Teatro Ribeiro Conceição (Lamego) [56]	4184	417	1,05
Auditório do Conservatório de Música do Porto [67]	3192	233	1,28
Teatro Sá de Miranda (Viana de Castelo) [54]	2491	378	1,21
Theatro Circo, Braga [68]	9800	897	1,18
Teatro Jordão (Guimarães) [69]	2230	386	0,70
Cine-Teatro Garrett (Póvoa de Varzim) [20]	5320	471	0,99
Teatro Carlos Alberto (Porto) [19]	3315	250	1,20
Teatro Sá da Bandeira (Porto)	5520	792	0,85
Média	4590	509	1,07
Mediana	3915	441	1,05

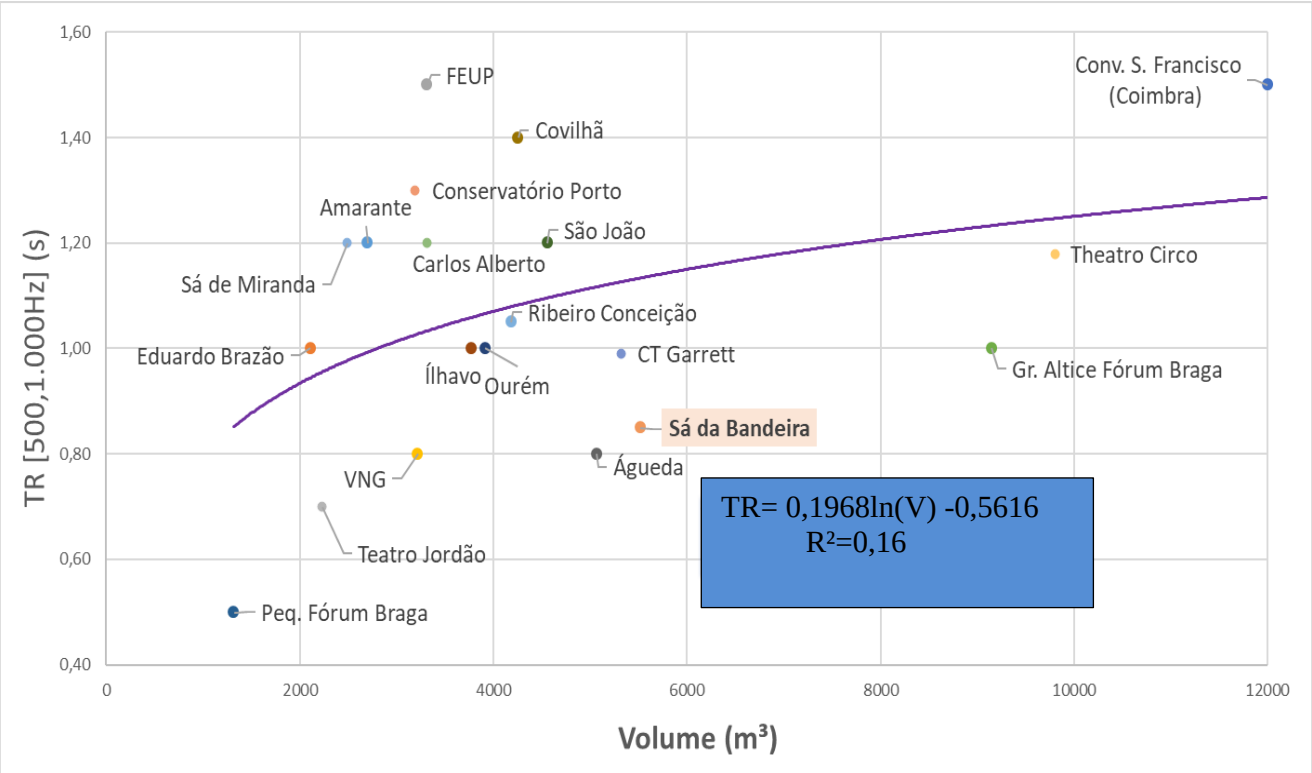


Figura 6.1-Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] em função do Volume das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira com linha de tendência (logarítmica).

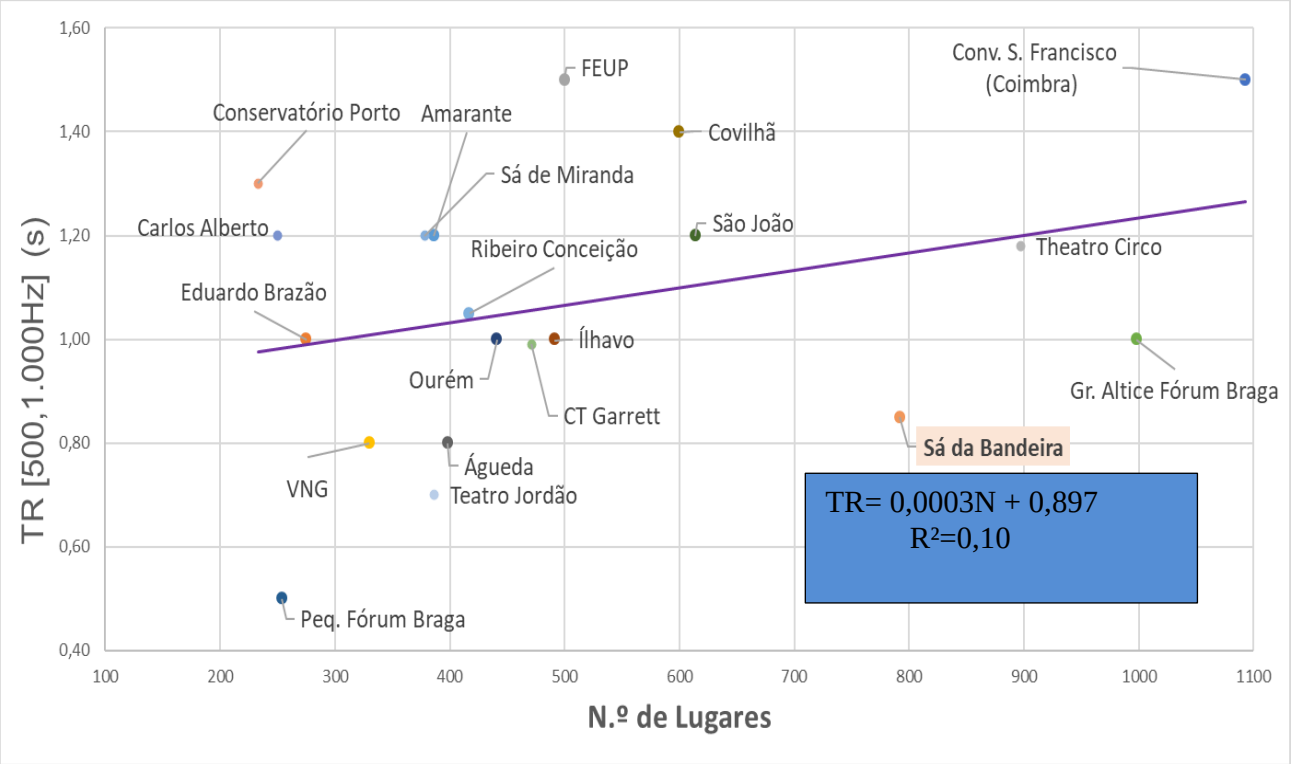


Figura 6.2- Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] em função do Número de lugares das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira, com linha de tendência (linear).

Quadro 6.3- Verificação dos valores ideais do parâmetro Tempo de Reverberação médio [500, 1.000 Hz] de acordo com vários tipos de função de vinte salas nacionais.

Função	TR [500, 1.000 Hz] (s)	Salas adequadas
Auditório (Palavra)	0,7 – 0,8	Auditório Municipal de V. N. de Gaia, Centro de Artes de Águeda, Teatro Jordão e Teatro Sá da Bandeira
Teatro	0,7 – 0,9	Auditório Municipal de V. N. de Gaia, Centro de Artes de Águeda, Cine-Teatro Garrett, Teatro Jordão e Teatro Sá da Bandeira
Cinema	0,8 – 1,0	Auditório Municipal de V. N. de Gaia, Casa da Cultura de Ílhavo, Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares), Grande Auditório do Altice Fórum Braga, Teatro Municipal de Ourém, Teatro Ribeiro Conceição, Cine-Teatro Garrett e Teatro Sá da Bandeira
Ópera (não wagneriana)	1,3 – 1,7	Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra); Auditório da FEUP, Teatro Municipal da Covilhã e Teatro Nacional São João
Ópera (wagner)	1,8 – 1,9	-
Música sinfónica Barroca	1,4 – 1,6	Auditório da FEUP, Grande Auditório do Convento S. Francisco e Teatro Municipal da Covilhã.
Música sinfónica Clássica	1,6 – 1,8	-
Música sinfónica Romântica	1,9 – 2,2	-
Música sinfónica Moderna	1,4 – 1,9	Auditório da FEUP, Grande Auditório do Convento S. Francisco e Teatro Municipal da Covilhã.
Música popular	0,8 – 1,0	Auditório Municipal de V. N. de Gaia, Casa da Cultura de Ílhavo, Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares), Grande Auditório do Altice Fórum Braga, Teatro Municipal de Ourém, Teatro Ribeiro Conceição, Cine-Teatro Garrett e Teatro Sá da Bandeira
Música de órgão	2,5 – 3,5	-
Coros gregorianos	3 – 4	-

6.3 CLARIDADE (C_{80})

No Quadro 6.4 apresentam-se os valores do parâmetro de Claridade (C_{80}) em bandas de 1/1 oitava entre 125 e 8.000 Hz para seis salas: Teatro Jordão, Teatro Circo de Braga, Teatro Carlos Alberto, Teatro Nacional São João, Teatro Ribeiro Conceição, Cine-Teatro Garrett e Teatro Sá da Bandeira, bem como o valor médio de cada sala no intervalo de 500, 1.000 Hz. A representação gráfica destes resultados é apresentada na Figura 6.3.

Tal como referido no capítulo 2.7.4.2, os valores de referência ideiais indicam que, para funções associadas predominantemente à palavra e ao teatro, a Claridade média no intervalo de 500 a 1.000 Hz deve ser superior a 6 dB. Para salas destinadas maioritariamente ao cinema, admite-se um valor mínimo de 5 dB.

No caso em estudo, o Teatro Sá da Bandeira apresenta um valor médio de (C_{80}) [500, 1.000 Hz] igual a 6,10 dB, cumprindo claramente os limites recomendados para espaços onde a inteligibilidade da palavra constitui requisito fundamental. Este resultado encontra-se em linha com a vocação funcional da sala, associada a teatro, concertos com reforço sonoro, comédia, conferências e cinema. Também o Cine-Teatro Garrett (7,2 dB) e o Teatro Jordão (8,4 dB) apresentam valores confortavelmente superiores ao limiar de 6 dB, evidenciando condições muito favoráveis à transmissão da palavra. O Teatro Carlos Alberto (5,7 dB) e o Teatro Ribeiro Conceição (5,6 dB) situam-se ligeiramente abaixo do intervalo recomendado para palavra e teatro, embora cumpram os critérios estabelecidos para salas de cinema. O Teatro Nacional São João revela um valor de 5,1 dB, adequado para cinema, mas aquém do desejável para espaços centrados na palavra.

À semelhança do esperado para este parâmetro, observa-se que os valores de Claridade aumentam com a frequência. Os valores mais baixos concentram-se nas frequências graves, enquanto nas bandas de médias e altas frequências se verificam os valores mais elevados, correspondendo a maior predominância de energia sonora nos primeiros 80 ms. Entre as salas analisadas, o Teatro Sá da Bandeira evidencia valores de C_{80} superiores a 6 dB a partir dos 500 Hz, atingindo 10,85 dB na banda de 8.000 Hz, o que confirma uma clara dominância de som direto e primeiras reflexões face ao campo reverberante.

Por fim, o Teatro Nacional São João apresenta valores mais reduzidos nas frequências médias, refletindo uma menor energia inicial e, consequentemente, um maior contributo da cauda reverberante, característica típica de salas com vocação simultânea para música e representação teatral. Em contraste, o Teatro Sá da Bandeira e o Cine-Teatro Garrett evidenciam valores elevados de Claridade, confirmando a sua maior aptidão para palavra, teatro e música.

A análise das Figuras 6.3 e 6.4 permite ainda observar a relação entre a Claridade média (C80) e os parâmetros geométricos das salas, nomeadamente o volume e o número de lugares. Em ambos os casos, a linha de tendência linear evidencia uma correlação fraca, com coeficientes de determinação reduzidos (R^2 = 0,12 para o volume e R^2 = 0,043 para o número de lugares), indicando que a Claridade não depende exclusivamente da dimensão da sala. O Teatro Sá da Bandeira posiciona-se acima da tendência média observada para salas de dimensão semelhante, apresentando valores de C80 superiores ao expectável para o seu volume e capacidade. Este comportamento sugere uma forte predominância de energia sonora precoce, associada à geometria da sala e aos materiais existentes, reforçando a sua vocação para a palavra e para espetáculos com reforço sonoro. Em contrapartida, esta mesma característica limita o desenvolvimento de um campo reverberante mais prolongado, o que penaliza a adequação da sala a repertórios de música sinfónica.

Em síntese, os valores elevados de Claridade confirmam que o Teatro Sá da Bandeira não apresenta condições acústicas ideais para música sinfónica, reforçando a sua adequação prioritária a usos centrados na palavra.

Quadro 6.4- Valores da Claridade (C_{80}) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz e o valor médio.

Claridade *C80*								***C80* [500, 1.000 Hz] (dB)**
Salas	**Frequência (Hz)**							
	125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	
Conservatório de Música do Porto [67]	2,90	4,90	5,10	4,30	6,80	9,50	13,8	4,7
Teatro Sá de Miranda [54]	2,0	3,50	4,10	2,8	4,0	6,50	9,8	3,50
Teatro Jordão (Guimarães) [69]	4,30	8,75	9,05	7,70	8,60	10,25	12,90	8,40
Theatro Circo (Braga) [68]	1,94	3,09	4,20	2,92	3,33	5,27	9,80	3,60
Teatro Carlos Alberto (Porto) [19]	9,10	5,80	6,20	5,30	4,60	5,60	7,60	5,70
Teatro Nacional São João [55]	4,20	4,70	4,90	5,20	6,20	7,50	10,5	5,10
Teatro Ribeiro Conceição (Lamego) [56]	4,70	6,20	5,40	5,80	5,80	7,00	9,5	5,60
Cine-Teatro Garrett (Póvoa de Varzim) [20]	2,45	5,88	8,35	7,51	6,48	8,56	10,93	7,17
Teatro Sá da Bandeira	7,25	6,35	6,15	6,35	6,70	5,35	8,05	6,10
Média	4,32	5,46	5,94	5,32	5,83	7,28	10,32	5,54

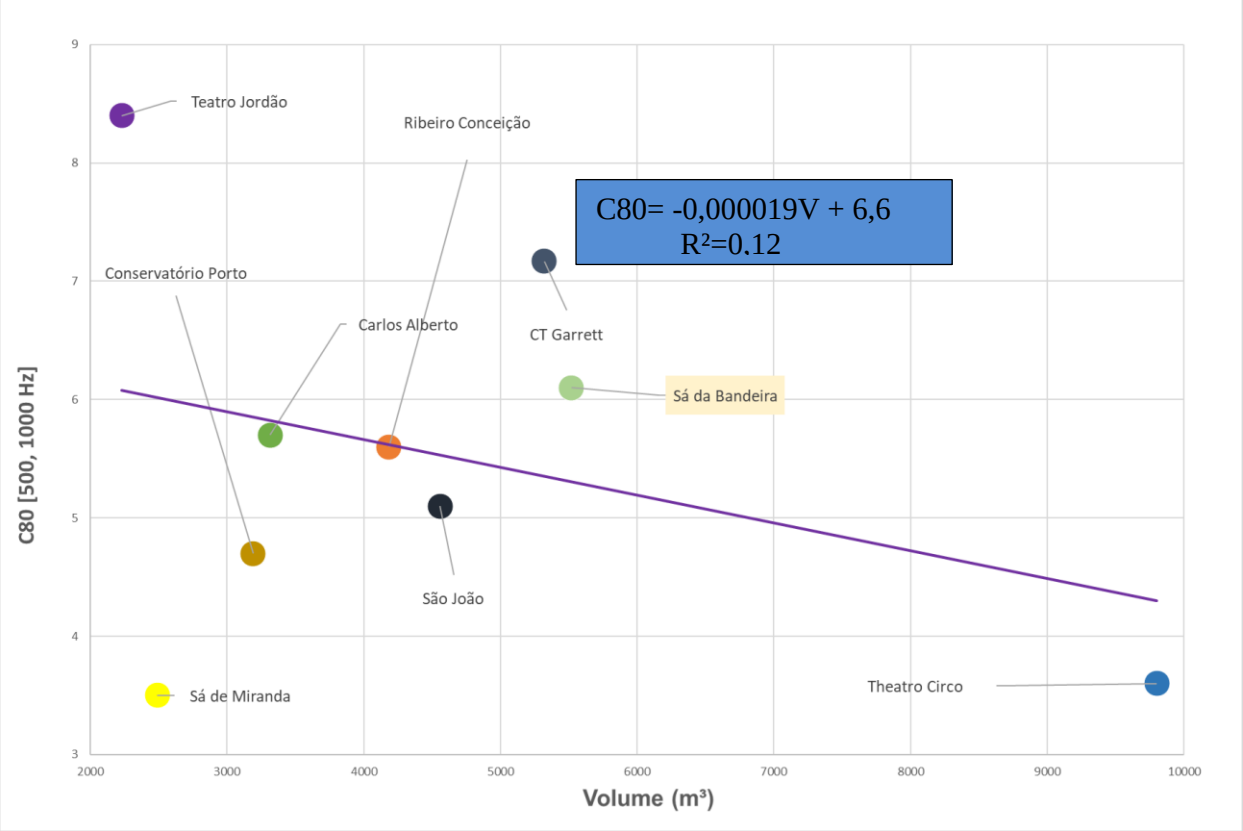


Figura 6.3- Valores da Claridade (C_{80}) [500, 1.000 Hz] em função do volume das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira, com linha de tendência (linear).

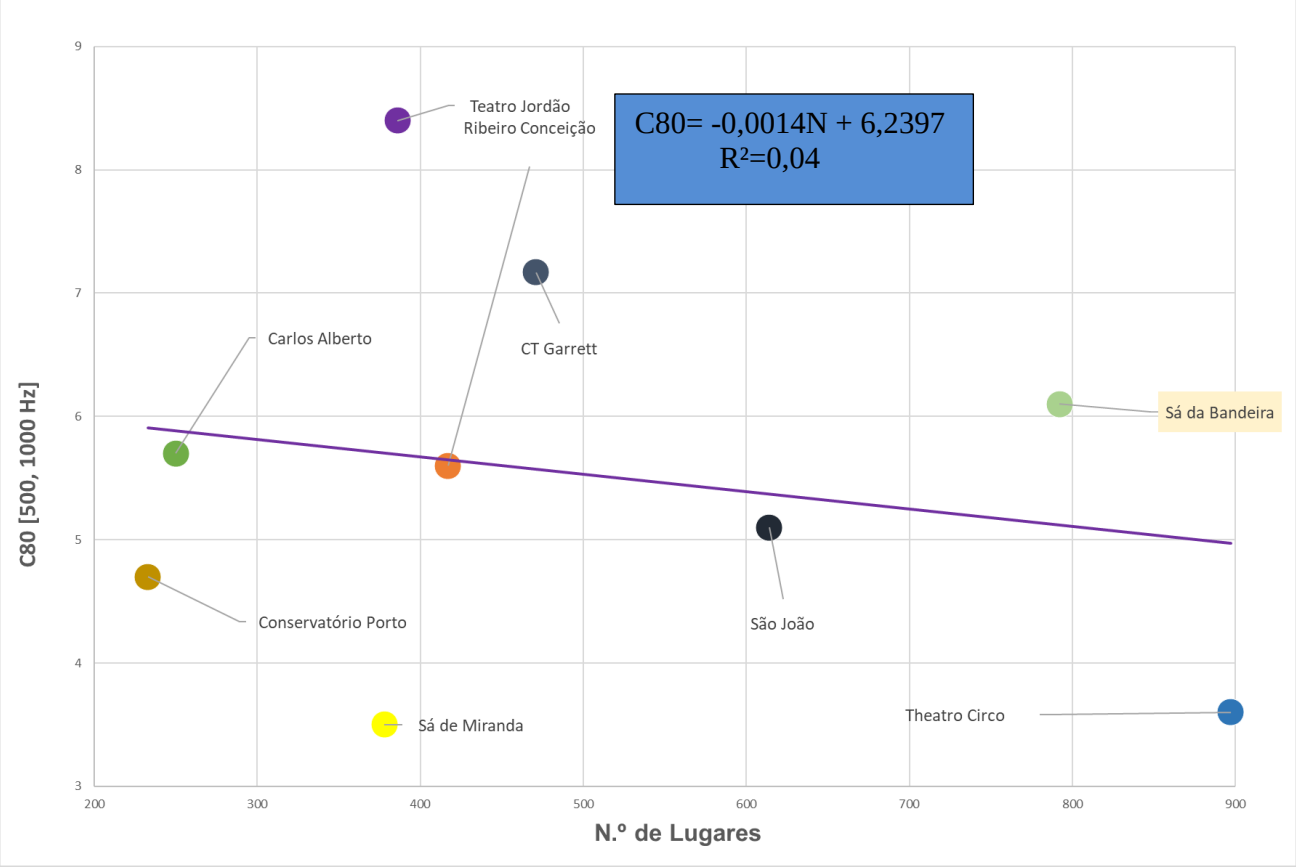


Figura 6.4- Valores da Claridade (C_{80}) [500, 1.000 Hz] em função do Número de lugares das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira, com linha de tendência (linear).

6.4 Tempo Central (TS)

No Quadro 6.5 apresentam-se os valores do parâmetro Tempo Central (TS) em bandas de 1/1 oitava, entre 125 Hz e 8.000 Hz, para o Teatro Sá da Bandeira e para as restantes salas analisadas. Na Figura correspondente é apresentada a comparação gráfica dos valores obtidos, permitindo uma leitura mais imediata da variação do parâmetro em função da frequência.

Tal como esperado do ponto de vista teórico, observa-se que o Tempo Central diminui com o aumento da frequência na generalidade das salas estudadas. Este comportamento está associado ao facto de, em frequências mais elevadas, a absorção sonora dos materiais ser superior, conduzindo a uma maior percentagem de energia absorvida nas primeiras reflexões e, consequentemente, a valores mais baixos de TS.

Analisando especificamente os valores médios de TS [500–1000 Hz], verifica-se que o Teatro Sá da Bandeira apresenta um valor de aproximadamente 57 ms, ligeiramente superior ao do Cine-Teatro Garrett (53 ms) e inferior ao do Theatro Circo (76 ms). Entre as salas estudadas, o menor valor foi registado no Teatro Carlos Alberto (41 ms), enquanto o maior corresponde ao Theatro Circo de Braga (76 ms). Assim, o Teatro Sá da Bandeira posiciona-se numa zona intermédia do conjunto analisado.

O parâmetro Tempo Central permite avaliar a proporção de energia sonora presente nas primeiras reflexões relativamente à energia tardia. Valores mais elevados de TS estão associados a ambientes mais reverberantes, ao passo que valores mais reduzidos indicam maior predominância de energia inicial e, portanto, melhor definição do som direto e das primeiras reflexões.

Neste contexto, os resultados obtidos mostram que o Teatro Sá da Bandeira não se enquadra entre as salas mais reverberantes do conjunto estudado, mas também não apresenta os valores mais baixos de TS. Pode afirmar-se que o seu comportamento se aproxima de uma condição equilibrada, onde existe presença significativa de primeiras reflexões, sem, contudo, atingir valores particularmente reduzidos.

Deste modo, todos os teatros analisados apresentam valores de TS [500–1000 Hz] inferiores a 80 ms, o que indica que, de um modo geral, se encontram adequados a funções onde a transmissão da palavra assume importância relevante, tais como teatro, conferências ou apresentações. O Teatro Sá da Bandeira segue esta tendência, confirmando a sua vocação funcional prioritária para atividades centradas na palavra, ainda que mantenha uma componente reverberante suficiente para suportar eventos musicais.

A análise das Figuras 6.5 e 6.6 permite ainda relacionar o Tempo Central médio (500–1000 Hz) com os parâmetros geométricos das salas, nomeadamente o volume e o número de lugares. Em ambos os casos se observa uma tendência exponencial, com coeficientes de determinação moderados ($R^2 = 0,25$ para o volume e $R^2 = 0,095$ para o número de lugares), evidenciando que o TS é parcialmente influenciado pela dimensão das salas, em particular pelo aumento do volume e da capacidade.

As curvas de tendência apresentam um mínimo para salas de dimensão intermédia, aumentando progressivamente para auditórios de maior volume e maior número de lugares. Este comportamento traduz o reforço do campo reverberante à medida que a escala geométrica aumenta, conduzindo a valores mais elevados de TS. O Theatro Circo, enquanto sala de maior volume do conjunto, apresenta os valores mais elevados, enquanto salas de menor dimensão, como o Teatro Carlos Alberto, evidenciam valores mais baixos de TS.

O Teatro Sá da Bandeira posiciona-se no ramo ascendente da curva, correspondente a salas de maior escala, mas ainda afastado dos valores mais elevados observados nos maiores auditórios. Este posicionamento confirma que, apesar da sua dimensão, a sala mantém um controlo eficaz da energia tardia, preservando uma proporção relevante de energia nas primeiras reflexões e sustentando um equilíbrio favorável entre clareza e envolvência sonora.

Quadro 6.5-Valores do Tempo Central (*TS*) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz e o valor médio.

Tempo Central (*TS*) (ms)								***TS* [500, 1k Hz] (ms)**
Salas	**Frequência (Hz)**							
	125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	
Teatro Nacional São João [55]	84	69	62	59	48	38	24	60
Teatro Sá de Miranda [54]	97	73	70	75	63	43	26	73
Theatro Circo (Braga) [68]	118	85	71	80	75	56	28	76
Teatro Jordão (Guimarães) [69]	89	48	40	42	36	28	21	41
Teatro Carlos Alberto (Porto) [19]	71	66	58	68	56	57	31	63
Cine-Teatro Garrett (Póvoa de Varzim) [20]	126	63	44	50	45	35	24	55
Conservatório de Música do Porto [67]	86	54	56	64	45	28	14	60
Teatro Ribeiro Conceição (Lamego) [56]	90	69	61	55	51	42	28	58
Teatro Sá da Bandeira (Porto)	75	64	57	58	54	54	36	57
Média	93	66	58	61	53	42	26	60

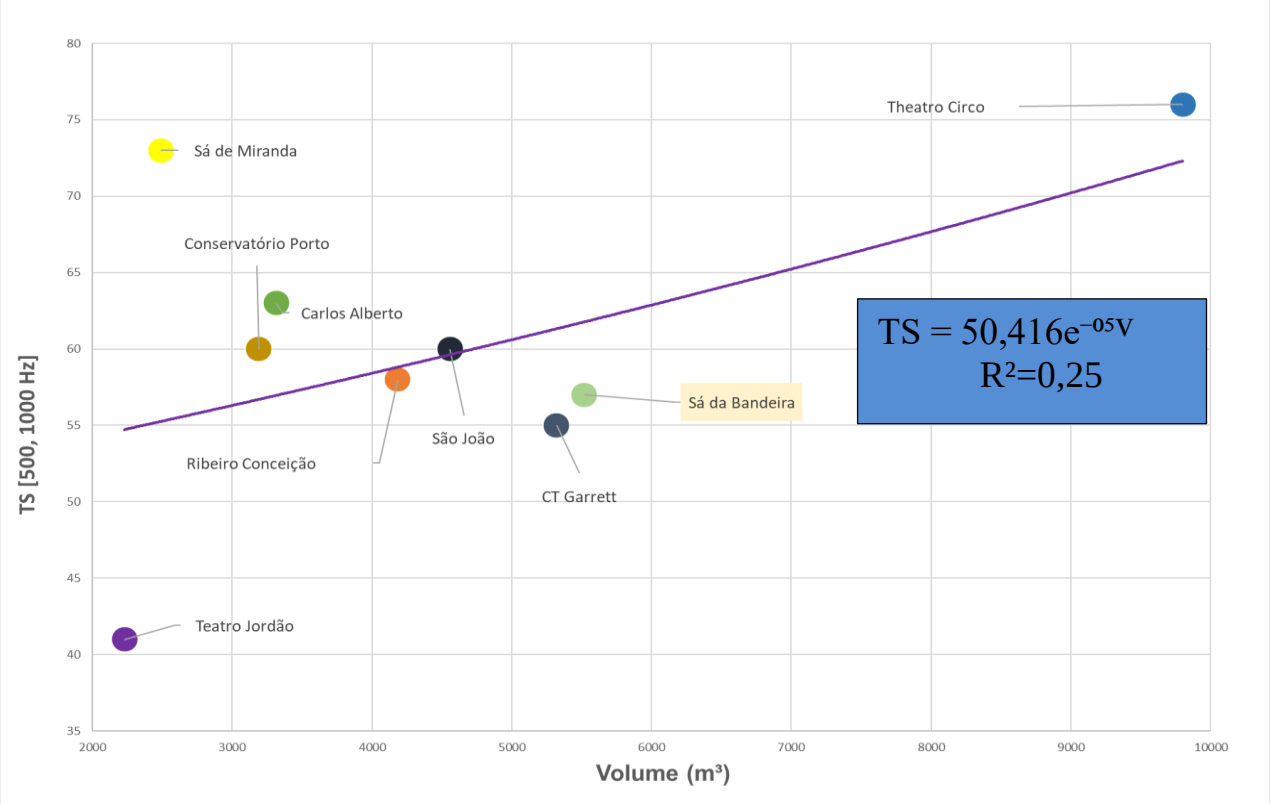


Figura 6.5- Valores do Tempo Central (TS) [500, 1.000 Hz] em função do volume das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira, com linha de tendência (exponencial).

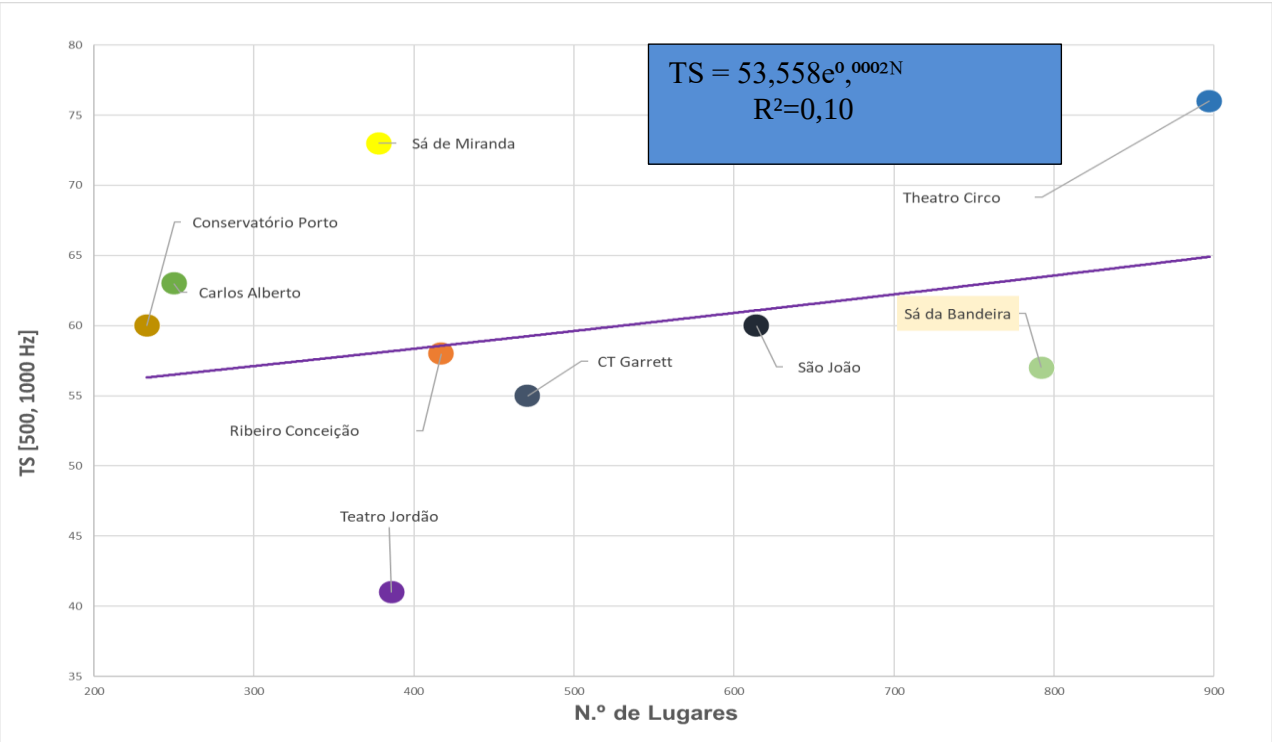


Figura 6.6- Valores do Tempo Central (*TS*) [500, 1.000 Hz] em função do Número de lugares das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira, com linha de tendência (exponencial).

6.5 DEFINIÇÃO (D_{50})

Os valores da Definição em bandas de 1/1 oitava entre os 125 e 8k Hz para o Teatro Sá da Bandeira, Teatro Nacional São João, Teatro Sá de Miranda, Teatro Ribeiro Conceição, Cine-Teatro Garrett, Theatro Circo, Teatro Jordão, Teatro Carlos Alberto e Conservatório de Música do Porto, encontram-se apresentados no Quadro 6.6.

A Definição é um parâmetro associado à perceção da palavra variando entre 0 e 1. Valores mais próximos de 1 indicam melhor inteligibilidade do discurso. Observa-se, tal como esperado, que a Definição aumenta com a frequência, atingindo valores superiores nas bandas mais altas.

Considerando, para avaliação global, as frequências de maior relevância para a palavra (500 e 1 000 Hz), obtiveram-se os seguintes valores médios: Teatro Sá da Bandeira (0,64), Teatro Carlos Alberto (0,73), Teatro Nacional São João (0,61), Teatro Sá de Miranda (0,58), Teatro Ribeiro Conceição (0,67), Cine-Teatro Garrett (0,73), Teatro Circo (0,61), Teatro Jordão (0,77) e Conservatório de Música do Porto (0,63). Verifica-se assim que todos os espaços apresentam valores adequados para a função da palavra, sendo o Teatro Jordão aquele que apresenta o valor mais elevado.

De forma coerente com a teoria do parâmetro, constata-se um aumento progressivo de D_{50} com a frequência, observando-se os valores mais elevados nas bandas de 4 000 e 8 000 Hz. Este comportamento confirma que uma maior fração de energia sonora é recebida nas primeiras reflexões nestas frequências, favorecendo a inteligibilidade da palavra.

Em termos globais, pode concluir-se que todas as salas analisadas apresentam valores de Definição (D_{50}) compatíveis com a utilização principal associada à palavra e ao teatro, sendo o Teatro Sá da Bandeira enquadrado neste desempenho acústico desejável.

A análise das Figuras 6.7 e 6.8 permite relacionar a Definição média com os parâmetros geométricos das salas, nomeadamente o volume e o número de lugares. Em ambos os casos, observa-se uma tendência linear com coeficientes de determinação reduzidos (R^2 = 0,072 para o volume e R^2 = 0,051 para o número de lugares), indicando que a Definição não é fortemente dependente da dimensão da sala, mas resulta sobretudo da geometria, da absorção e da distribuição das superfícies refletoras.

Verifica-se que os valores máximos de D_{50} ocorrem em salas de dimensão intermédia, enquanto os auditórios de maior volume tendem a apresentar valores mais baixos, refletindo uma maior presença de energia tardia e uma redução da inteligibilidade da palavra. O Teatro Sá da Bandeira posiciona-se acima da tendência média observada para salas de volume e capacidade semelhantes, evidenciando um desempenho favorável ao nível da energia sonora precoce.

Este comportamento confirma que, apesar da sua dimensão relativamente elevada, o Teatro Sá da Bandeira mantém uma proporção significativa de energia nos primeiros 50 ms, favorecendo a inteligibilidade do discurso e reforçando a sua adequação a funções centradas na palavra e no teatro

Quadro 6.6-Valores da Definição (D_{50}) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz e o valor.

Definição (D_{50})								**D_{50} [500, 1k Hz]**
Salas	**Frequência (Hz)**							
	125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	
Teatro Nacional São João [55]	0,51	0,60	0,59	0,62	0,70	0,76	0,83	0,61
Teatro Sá de Miranda [54]	0,48	0,54	0,56	0,51	0,58	0,70	0,82	0,54
Conservatório de Música do Porto [67]	0,41	0,63	0,64	0,62	0,73	0,83	0,91	0,63
Teatro Ribeiro Conceição (Lamego) [56]	0,6	0,64	0,64	0,67	0,67	0,73	0,81	0,65
Cine-Teatro Garrett [20]	0,49	0,75	0,77	0,72	0,74	0,79	0,83	0,73
Teatro Carlos Alberto (Porto) [19]	0,70	0,64	0,66	0,56	0,67	0,65	0,81	0,61
Theatro Circo [68]	0,47	0,56	0,61	0,52	0,54	0,65	0,82	0,56
Teatro Jordão [69]	0,56	0,76	0,77	0,71	0,76	0,81	0,87	0,74
Teatro Sá da Bandeira (Porto)	0,66	0,64	0,65	0,63	0,64	0,64	0,77	0,64
Média	0,53	0,66	0,67	0,67	0,70	0,76	0,82	0,63

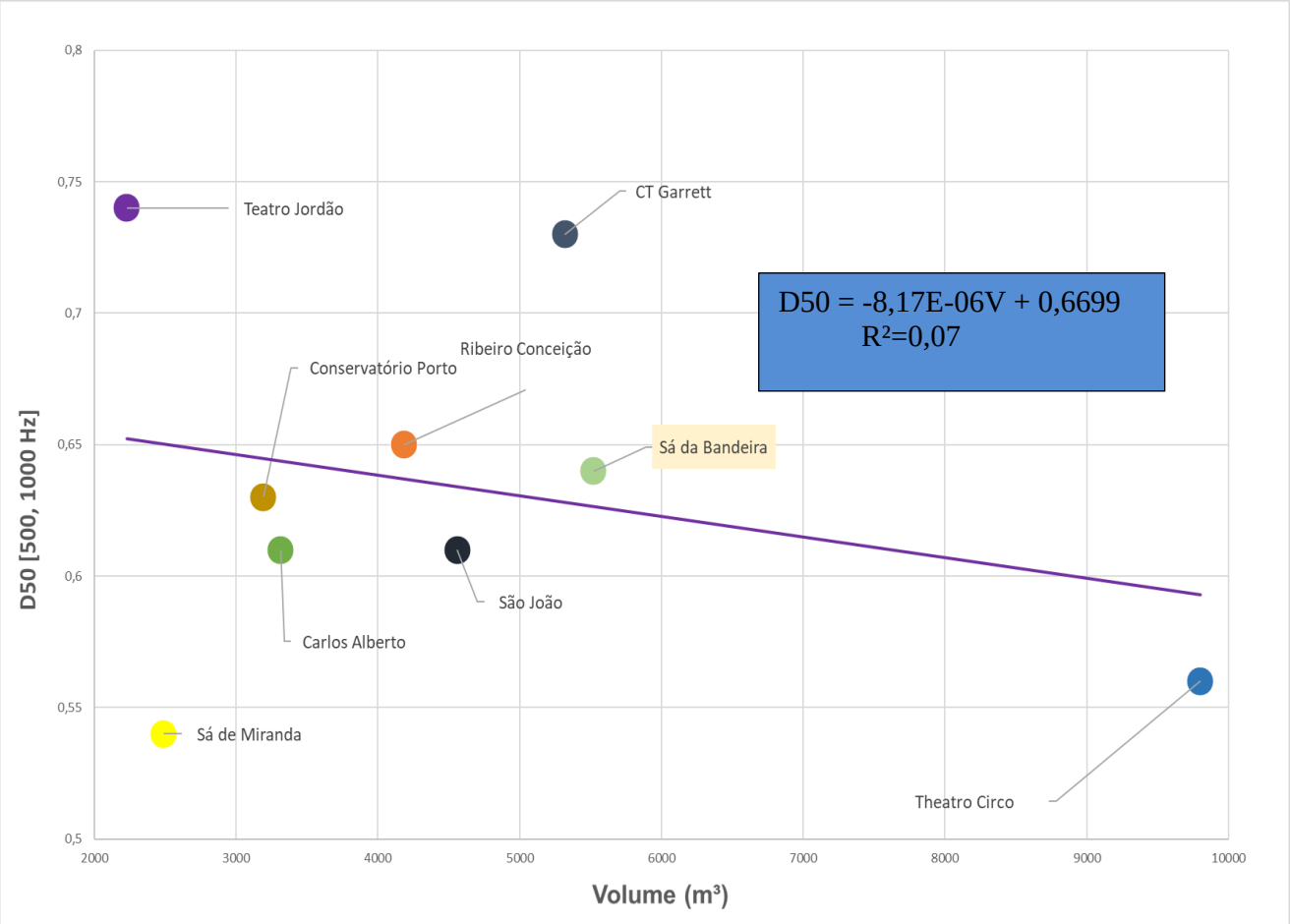


Figura 6.7-Valores da Definição (D_{50}) [500, 1.000 Hz] em função do volume das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira, com linha de tendência (linear).

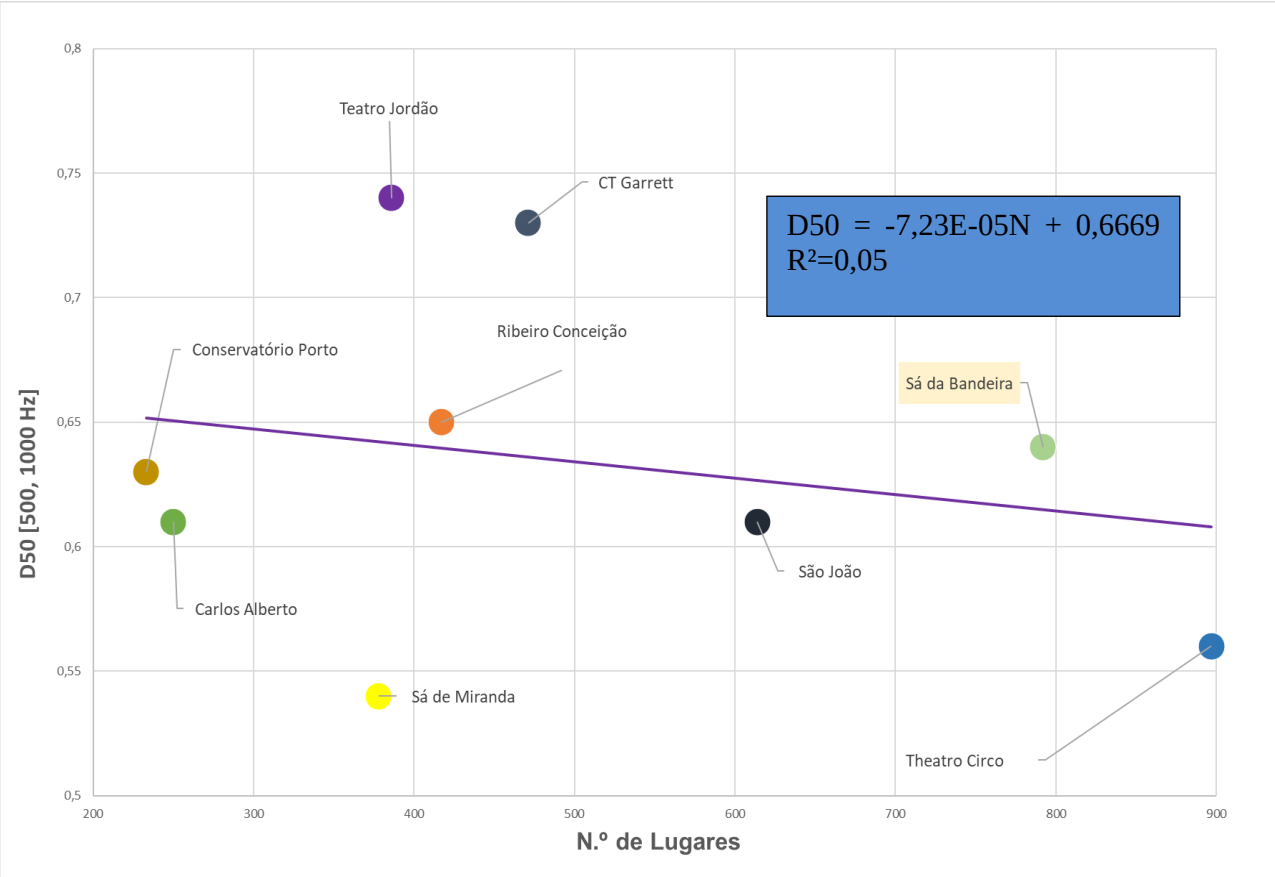


Figura 6.8- Valores da Definição (D_{50}) [500, 1.000 Hz] em função do número de lugares das vinte salas nacionais incluindo o Teatro Sá da Bandeira, com linha de tendência (linear).

6.6 SPEECH TRANSMISSION INDEX (STI) /RAPID SPEECH TRANSMISSION INDEX (RASTI)

Neste ponto comparam-se os valores médios de RASTI/STI, o nível sonoro equivalente do ruído de fundo (LAeq) com funcionamento do sistema AVAC, bem como o tempo de reverberação médio e as características geométricas das salas em análise, incluindo o Teatro Sá da Bandeira. O Quadro 6.7 apresenta os valores de RASTI/STI médio, LAeq e volume para as salas analisadas.

A Figura 6.9 representa os valores de RASTI/STI médio em função do tempo de reverberação médio TR [500–1000 Hz]. Observa-se uma tendência decrescente, confirmada pela linha de tendência, evidenciando que valores mais elevados de TR estão associados a níveis inferiores de inteligibilidade da palavra. Esta relação apresenta um coeficiente de determinação relativamente elevado (R^2 = 0,54), indicando que o TR é um dos principais fatores explicativos da variação do STI no conjunto de salas analisadas. O Teatro Sá da Bandeira apresenta um STI médio de 0,62, enquadrando-se num desempenho "bom" e posicionando-se próximo da zona intermédia do conjunto.

Na Figura 6.10 apresenta-se a relação entre o RASTI/STI médio e o nível sonoro equivalente do ruído de fundo LAeq (com AVAC). Verifica-se uma correlação muito reduzida (R^2 = 0,013), indicando que, para a amostra considerada e para a gama de níveis registados, o LAeq por si só não explica de forma significativa a variabilidade do STI. Este resultado sugere que a inteligibilidade

se encontra mais condicionada por fatores acústicos intrínsecos à sala, em particular o TR, do que por diferenças moderadas no ruído de fundo observadas entre espaços.

A Figura 6.11 mostra a relação entre o TR [500–1000 Hz] e o LAeq (com AVAC), evidenciando igualmente ausência de correlação (R^2 = 0,0028). Este resultado é coerente com o esperado, uma vez que o tempo de reverberação depende essencialmente das propriedades físicas da sala (volume, área de absorção equivalente e distribuição dos materiais), não sendo influenciado diretamente pelo nível de ruído ambiente.

Em síntese, os resultados confirmam que a inteligibilidade da palavra, expressa pelo STI, é fortemente penalizada por tempos de reverberação elevados, enquanto a influência do ruído de fundo não se evidencia de forma significativa neste conjunto de dados. Ainda assim, o controlo do ruído de fundo mantém-se crítico para garantir condições de uso consistentes, especialmente em salas com TR menos favorável, onde a margem para perda de inteligibilidade é maior.

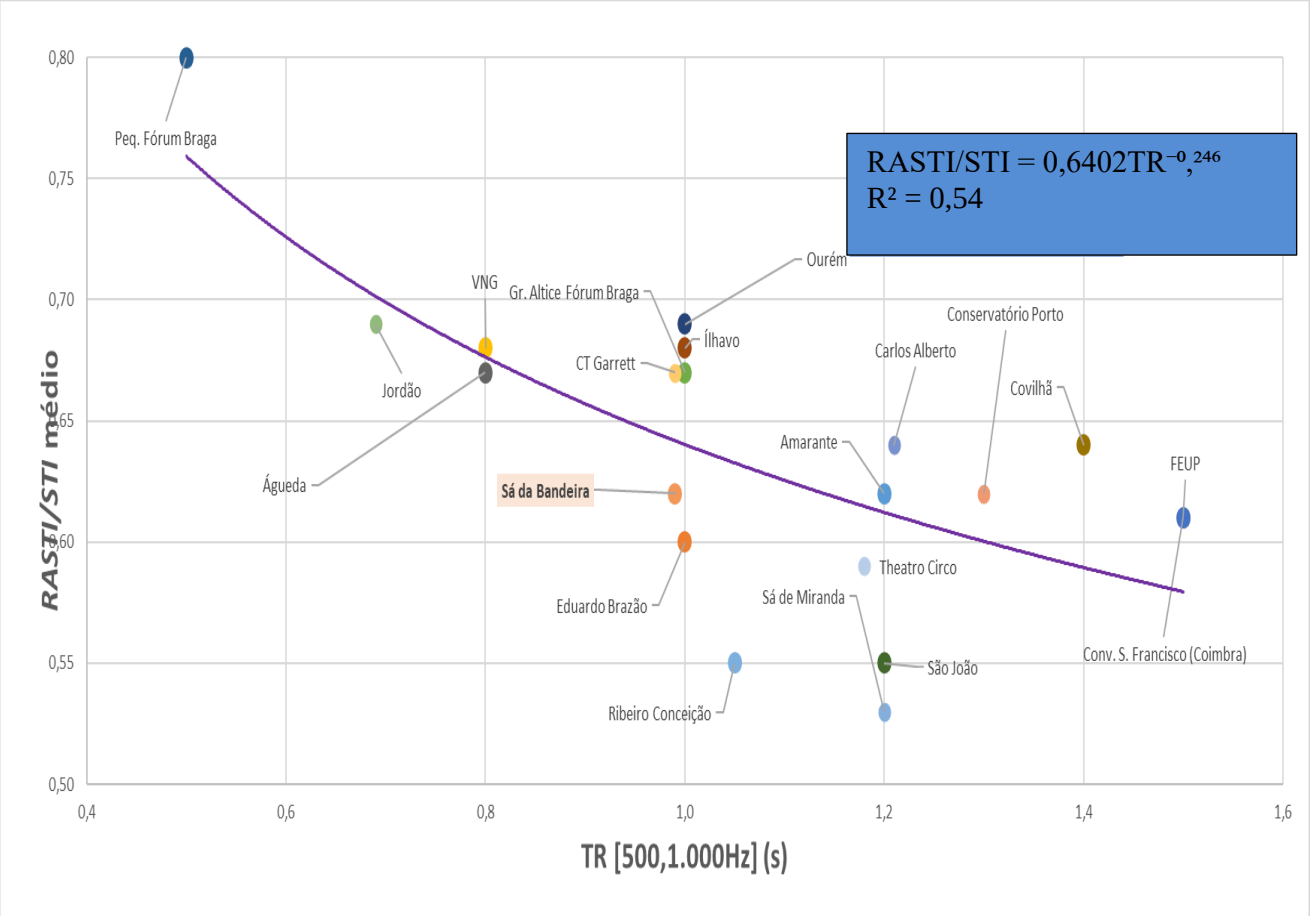


Figura 6.9- Valores do Rasti ou STI em função do tempo de reverberação médio (TR [500, 1.000 Hz]) (s) para as dezanove salas e do Teatro Sá da Bandeira, com uma linha de tendência (potência).

Quadro 6.7- Valores do Volume, Número de lugares, *RASTI/STI* médio e Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) sem e com AVAC das vinte salas nacionais incluindo o Sá da Bandeira.

Salas	Volume	N.º de Lugares	RASTI/STI médio	***LAeq*** **(sem AVAC) (dB)**	***LAeq*** **(Com AVAC) (dB)**
Cineteatro de Amarante [61]	**2700**	**386**	**0,62**	**23 -**	**34**
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares) [62]	**2111**	**275**	**0,6**	**32 +**	**37**
Auditório da FEUP [57]	**3317**	**500**	**0,61**	**27**	**43**
Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia [58]	**3219**	**330**	**0,68**	**24**	**47**
Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra) [64]	**12000 +**	**1093 +**	**0,61**	**27**	**30**
Grande Auditório do Altice Fórum Braga [63]	**9150**	**998**	**0,67**	**24**	**34**
Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga [63]	**1320 -**	**254 -**	**0,80 +**	**24**	**31**
Casa da Cultura de Ílhavo [59]	**3779**	**491**	**0,68**	**25**	**39**
Centro de Artes de Águeda [60]	**5066**	**398**	**0,67**	**26**	**31**
Teatro Municipal da Covilhã [65]	**4258**	**600**	**0,64**	**23 -**	**41**
Teatro Municipal de Ourém [66]	**3915**	**441**	**0,69**	**24**	**37**
Teatro Sá de Miranda [54]	**2491**	**378**	**0,53 -**	**26**	**NA**
Conservatório de Música do Porto [67]	**3192**	**233**	**0,62**	**22**	**32**
Teatro Nacional São João [55]	**4560**	**614**	**0,55 -**	**31**	**28**
Teatro Ribeiro Conceição (Lamego) [56]	**4184**	**417**	**0,55 -**	**25**	**31**
Cine-Teatro Garrett [20]	**5320**	**471**	**0,67**	**25**	**NA**
Theatro Circo, Braga [68]	**9800**	**897**	**0,59**	**29,1**	**35**
Teatro Jordão [69]	**2230**	**386**	**0,69**	**25**	**32**
Teatro Carlos Alberto [19]	**3315**	**250**	**0,64**	**26**	**31**
Teatro Sá da Bandeira	**5520**	**792**	**0,62**	**24**	**42**
Média	**4340**	**492**	**0,64**	**26**	**35**
Mediana	**3847**	**429**	**0,63**	**25**	**34**

NA – Não Avaliado

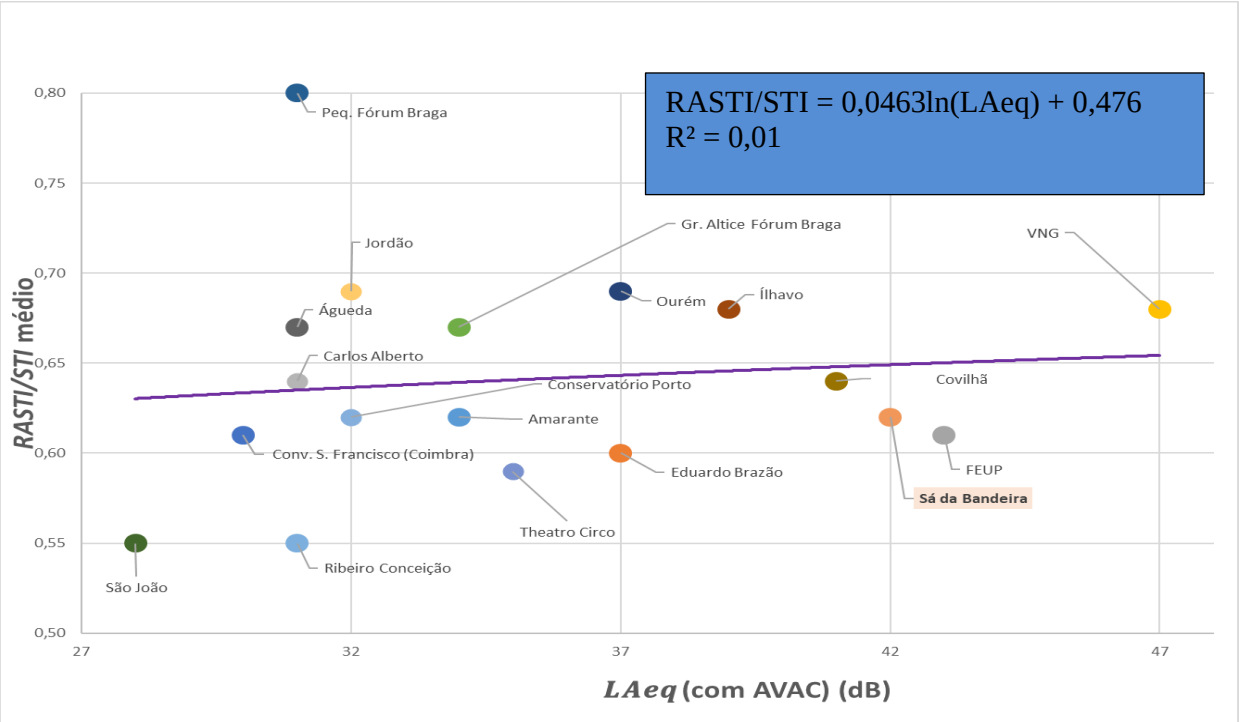


Figura 6.10- Valores do Rasti ou STI em função do nível sonoro equivalente do ruído de fundo (LAeq com AVAC) para as dezanove salas e do Teatro Sá da Bandeira, com uma linha de tendência (logarítmica).

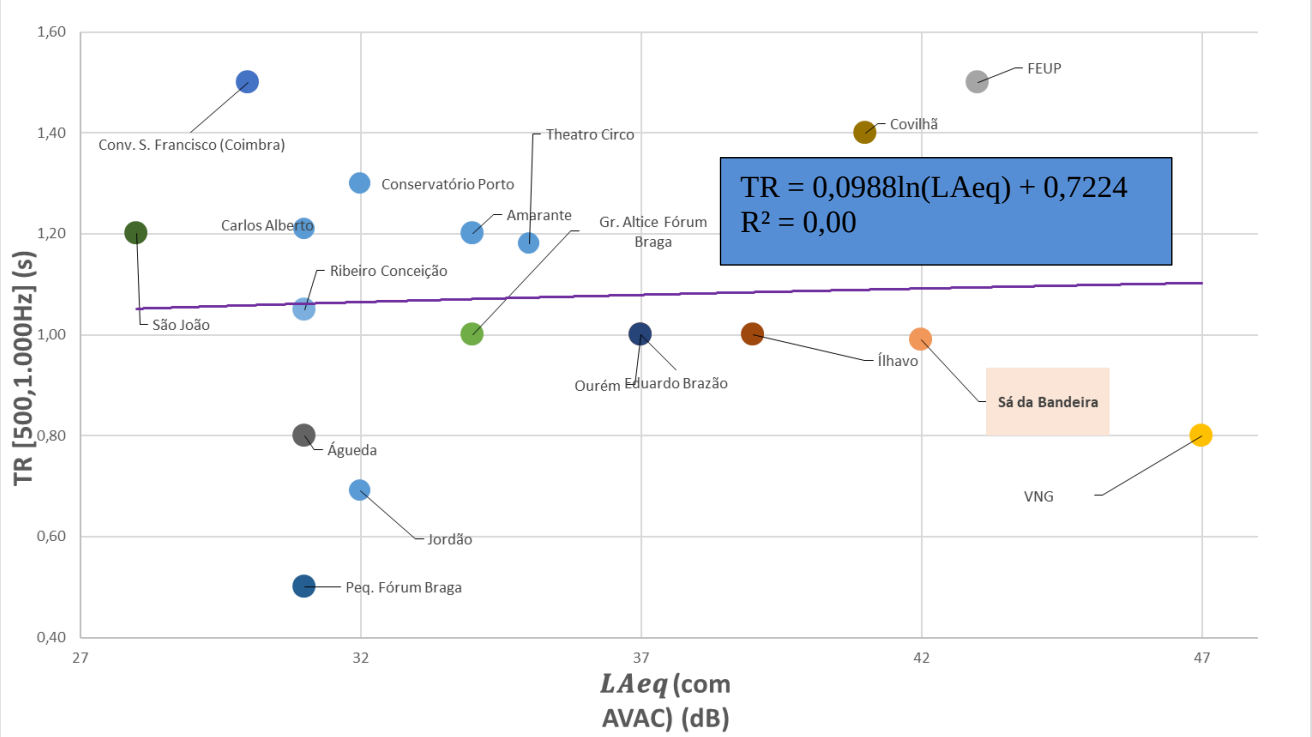


Figura 6.11- Valores do tempo de reverberação médio (TR [500, 1.000 Hz]) para as dezanove salas e do Teatro Sá da Bandeira em função do nível sonoro equivalente do ruído de fundo (LAeq), com uma linha de tendência (logarítmica).

7

CONCLUSÃO

7.1 CONCLUSÕES

Nos últimos anos, a acústica de salas de espetáculo tem assumido um papel de crescente importância, acompanhando a evolução das exigências culturais e técnicas da sociedade contemporânea. A forma como o som é produzido, propagado e percecionado no interior de um espaço tem impacto direto na inteligibilidade da palavra, na qualidade musical e no conforto auditivo do público. Neste contexto, assegurar uma resposta acústica adequada constitui um requisito essencial para garantir ambientes envolventes, funcionais e acessíveis, particularmente em salas destinadas a teatro, música e ópera.

Relativamente ao ruído de fundo, obtiveram-se valores de LAeq de 24 dB sem AVAC e 42 dB com AVAC em funcionamento. Considerando a aplicação da incerteza regulamentar de 3 dB, estes valores corrigidos correspondem a 21 dB e 39 dB, respetivamente. Assim, embora a situação sem AVAC cumpra o limite máximo imposto pelo RRAE para espaços deste tipo (30 dB(A)), o funcionamento do sistema de ventilação conduz a um valor que excede esse limite, não sendo, portanto, conforme ao regulamento. Este resultado é confirmado pelas curvas de incomodidade, tendo-se obtido NC 31 e NR 32, valores superiores às recomendações para salas destinadas à palavra e música não amplificada, refletindo a influência significativa do AVAC no ambiente sonoro de base e na inteligibilidade da palavra em condições mais exigentes.

No que diz respeito à inteligibilidade da palavra, os valores do *Speech Transmission Index* (STI) revelam um desempenho globalmente favorável. Obtiveram-se valores médios de 0,61 com AVAC e 0,62 sem AVAC, classificando-se maioritariamente como "bom", á exceção do valor mínimo, que se encontra na gama "tolerável". Estes resultados confirmam uma boa compreensão da palavra, sobretudo nas zonas mais centrais da plateia, apresentando pior desempenho nos pontos onde predominam trajetos sonoros mais reverberantes ou maior distância à fonte.

Os parâmetros de Claridade(C_{80}) e Definição (D_{50}) reforçam esta análise. Para as frequências de 500 e 1k Hz, os valores obtidos apresentam-se maioritariamente adequados para teatro e música popular, embora com alguns valores desadequados no caso da ópera. Este comportamento confirma uma resposta mais orientada para a comunicação verbal e para música amplificada, revelando menor aptidão para repertório sinfónico que requer maior envolvência espacial. O tempo central TS apresentou valores de 56 e 57 ms, abaixo do limite de 80 ms, indicando boa projeção da palavra e predominância de energia inicial.

A análise espacial dos resultados revelou que a plateia apresenta melhores condições acústicas do que os balcões e tribunas, registando-se valores superiores de STI e D_{50} nas posições da plateia e ligeira degradação nos pontos mais afastados da fonte sonora. Tal comportamento está associado à geometria do espaço e ao contributo relativo das primeiras reflexões sonoras. 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 (Ts), o que revela uma maior dispersão da energia sonora e uma diminuição da definição do sinal.

Quadro 8.1- Resumo dos parâmetros acústicos medidos do teatro Sá da Bandeira com as respetivas verificações regulamentares e avaliação funcional.

Parâmetros	Simbologia	AVAC	Valor	Avaliação			Valor com fator de Incerteza RRAE	Valores ideais legais
				Teatro e Palavra	Música	Música Sinfónica		
Ruído de Fundo (dB)	L_{eq}	Sem/Com	51/55	-	-	-	-	-
	L_{Aeq}	Sem/Com	24/42	A/D	D	D	21/39	≤ 30 RRAE
Curvas da incomodidade	*NC/NR*	Com	31/32	D			-	
Tempo de Reverberação (s) TR	500, 1K Hz desocupado	Sem	0,85	A	D	D	0,57	≤ 0,95 RRAE
	500, 1K Hz ocupado previsto	Sem	0,83				0,55	
Speech Transmition Index *STI*	máximo	Sem/Com	0,72/0,69	Boa			-	≥ 0,60
	médio	Sem/Com	0,62/0,61	Boa			-	
	mínimo	Sem/Com	0,55/0,56	Tolerável			-	
Claridade (C_{80}) (dB)	500, 1K Hz	Sem/Com	6,2/6,0	A	D	D	-	-
Definição (D_{50})	500, 1K Hz	Sem/Com	0,64/0,64	A	D	D	-	-
Tempo Central (ms) *TS*	500, 1K Hz	Sem/Com	56/57	A	D	D	-	-
Rácio de Baixos	*BR_TR*		1,15	A	A		-	-

A = Adequado T = Tolerável D = Desadequado

Quando comparado com o conjunto das 19 salas nacionais analisadas no Capítulo 6, o Teatro Sá da Bandeira integra-se num patamar intermédio de desempenho acústico. Apresenta tempos de reverberação inferiores aos observados em salas de maior volume e vocacionadas, evidenciando uma resposta mais controlada e orientada para a palavra. Por outro lado, exibe valores de STI e D_{50} superiores aos registados em espaços mais reverberantes, confirmando uma melhor inteligibilidade, sobretudo na plateia. Contudo, o ruído de fundo com o sistema AVAC em funcionamento coloca a sala entre os casos com valores mais elevados do conjunto estudado, penalizando a relação sinal e ruído. Assim, no contexto comparativo, o Teatro Sá da Bandeira revela um desempenho particularmente consistente para teatro.

Em síntese, o Teatro Sá da Bandeira apresenta uma acústica globalmente controlada e orientada para a palavra, revelando-se adequado para teatro e conferências. Contudo, verifica-se que a utilização do sistema AVAC conduz a níveis de ruído de fundo superiores aos valores regulamentares, interferindo com a perceção da palavra. Assim, conclui-se que a realização de eventos que envolvam predominantemente a palavra é plenamente viável em ambiente sem AVAC em funcionamento, condição na qual a sala cumpre os requisitos legais e assegura uma inteligibilidade adequada.

7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O estudo realizado ao Teatro Sá da Bandeira permitiu caracterizar de forma detalhada o seu comportamento acústico, identificando os seus principais pontos fortes e também algumas limitações, sobretudo associadas ao funcionamento do sistema AVAC e à utilização da sala para diferentes tipologias de espetáculo. Não obstante, permanecem diversas possibilidades de aprofundamento que poderão contribuir para uma compreensão mais completa do espaço e para a otimização do seu desempenho acústico. Assim, sugerem-se os seguintes desenvolvimentos futuros:

- Realização de medições com a sala ocupada por público real, durante espetáculos e ensaios, de forma a validar os valores previstos de tempo de reverberação e restantes parâmetros, permitindo comparar as condições reais de funcionamento com as condições simuladas de ocupação total;
- Avaliação do impacto do sistema AVAC no desempenho acústico da sala, através de campanhas de medição adicionais e de uma análise direcionada ao espectro de ruído gerado, de modo a apoiar eventuais intervenções de mitigação que permitam o cumprimento dos requisitos legais sem comprometer o conforto térmico dos utilizadores;
- Desenvolvimento de um modelo acústico computacional do Teatro Sá da Bandeira, que permita simular diferentes cenários de ocupação, introdução de materiais absorventes ou difusores e alterações geométricas reversíveis, apoiando decisões de projeto com impacto mínimo na sua identidade histórica;
- Realização de inquéritos de perceção sonora junto subjetiva de artistas, técnicos e público, de modo a complementar os resultados objetivos com a avaliação subjetiva da qualidade acústica em diferentes situações de utilização;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Carvalho, A. P. Oliveira. *Acústica Ambiental e de Edifícios*. Edição 8.21, FEUP, 2024.

[2] Howard, D. M., & Angus, J. A. S. *Acoustics and Psychoacoustics*. 5th Edition, Routledge, 2017.

[3] Saúde Acústica (2025). *O Ouvido – Anatomia e Funcionamento.* Associação Portuguesa de Audiologistas. Disponível em: https://saudeacustica.pt/o-ouvido/ ,acedido em 12 outubro 2025.

[4] Kuttruff, H. *Room Acoustics.* CRC Press, 2016.

[5] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (2000). *Fundamentals of Acoustics.* 4th ed., Wiley.

[6] Bies, D. A., & Hansen, C. H. (2009). *Engineering Noise Control: Theory and Practice.* 4th ed., CRC Press.].

[7] Beranek, L. L. . *Acoustical Measurements.* American Institute of Physics,1993.

[8]Explicatorium (2023). *Nível sonoro. Escala decibel.* Disponível em: https://www.explicatorium.com/cfq-8/nivel-sonoro.html ,acedido em 12 outubro 2025.

[9] Música & Mercado (2024). *Psicoacústica – Como a perceção influencia a produção musical.* Disponível em: https://musicaemercado.org/psicoacustica-como-a-percepcao-influencia-a-producao-musical/ ,acedido em 12 outubro 2025.

[10] Iazzetta, F. (s.d.). *Comprimento de Onda.* Escola de Comunicações e Artes da Universidade de São Paulo. Disponível em: https://iazzetta.eca.usp.br/tutor/acustica/comprimento/comprim.html (acedido em:18 outubro de2025).

[11] Pladur Gypsum, S.A.U. (2024). *Absorção Acústica – Soluções Pladur®.* Disponível em: https://corporativo.pladur.com/pt-pt/solucoes/absorcao-acustica/ ,acedido em 19 de outubro de 2025.

[12] MDPI (2021). *Acoustic Characterization of Rooms Using Reverberation Time. Applied Sciences,*

[13] NTi Audio (2024). *Sound Insulation Measurement.* Disponível em: https://www.nti-audio.com/en/applications/room-building-acoustics/sound-insulation (acedido em 19 de outubro de 2025).

[14] SVANTEK (2024). *Sound Insulation in Buildings – Principles and Measurement.* Disponível em: https://svantek.com/academy/sound-insulation-in-buildings/ ,acedido em 19 de outubro de 2025.

[15] Way, A., Couchman, G. Acoustic Detailing For Steel Construction. The Steel Construction Institute. 2008

[16]Marshall Day Acoustics (2023). *Double Walls and Acoustic Isolation Principles.* Disponível em: https://www.marshallday.com/resources/double-walls/ , acedido em 20 de outubro 2025.

[17] ISO 9921:2003- Ergonomics- Assessment of Speech Comunication. International Organization for Standardization.

[18] IEC 60268-16:2020 – *Sound System Equipment – Objective Rating of Speech Intelligibility by STI.* International Electrotechnical Commission.

[19] Fonseca, E. "Caracterização Acústica do Teatro Carlos Alberto", Porto. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2025.

[20] Ferreira, P. "Caracterização Acústica do Cine-Teatro Garet". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2025.

[21] Barron, M. Auditorium Acoustics and Architectural Design. 2nd ed. Spon Press, 2010.

[22] Beranek, L. L. Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture. 2nd ed. Springer, 2004.

[23] Long, M. (2014). Architectural Acoustics. 2nd ed. Academic Press.

[24] Ando, Y. (1998). Concert Hall Acoustics. Springer.

[25] Chourmouziadou, K., & Kang, J. "Acoustic Evolution of Ancient Greek and Roman Theatres." In Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol. 30(2), pp. 63–70, 2008.

[26] Rindel, J. H. "Roman Theatres and Revival of Their Acoustics." Acta Acustica united with Acustica, Vol. 99(1), pp. 21–31, 2013.

[27] Rindel, J. H. Acoustics of Ancient Greek Theatres. Technical University of Denmark (Lecture Notes), 2010.

[28] Vovolis, T. "Acoustical Masks and Sound Aspects of Ancient Greek Theatre." In Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol. 31(2), pp. 55–61, 2009.

[29] Vitruvius. (1914). Ten Books on Architecture. (M. H. Morgan, Trans.). Harvard University Press.

[30] Bianconi, L. (1990). Music in the Seventeenth Century. Cambridge University Press.

[31] Hart, V. "Palladio's Theatres: Architecture, Stage Design and Performance in Renaissance Italy". Yale University Press, 1998.

[32] Howell, P. "The Farnese Theatre at Parma: Form and Function in Early Modern Performance Spaces." Theatre Survey, Vol. 58(3), pp. 329–347, 2017.

[33] D'Acoustics, R. "The Acoustics of Early Italian Theatres: From Vitruvius to Palladio." Acoustics Today, Vol. 16(2), pp. 42–51, 2020.

[34] Blaser, W.. *Baroque Theatre Architecture: Space and Illusion.* Thames & Hudson, 1985.

[35] Allardyce, J. *The Italian Opera House and the Shaping of Baroque Performance.* Routledge, 2000.

[36] Martellotta, F. "Acoustic Characteristics of Historical Italian Opera Houses." Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 127(5), pp. 3028–3042, 2010.

[37] Middleton, R. *The Beaux-Arts and Neoclassical Theatre Architecture.* MIT Press, 1992.

[38] Simões, J. *Teatro Nacional de São Carlos: História, Arquitetura e Acústica.* Lisboa: Imprensa Nacional Casa da Moeda, 2016.

[39] Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de junho, Diário da República, 2008.

[40] Construction Canada. *No Shell Game: Ensuring Auditorium Acoustics*. Disponível em: https://www.constructioncanada.net/no-shell-game-ensuring-auditorium-acoustics/. Acedido em 7 de novembro de 2025.

[41] Restos de Colecção (2017). Teatro Sá da Bandeira no Porto. Disponível em: https://restosdecoleccao.blogspot.com/2017/09/teatro-sa-da-bandeira-no-porto.html , acedido em 20 outubro 2025.

[42] Comércio com História (s.d.). Teatro Sá da Bandeira. Disponível em: https://www.comerciocomhistoria.gov.pt/listings/teatro-sa-da-bandeira-3479/ ,acedido em 20 outubro de 2025.

[43] Monteiro, M. R.; Pimentel, M. R.; Lourenço, V. M. (eds.). "Marquês de Sá da Bandeira e o seu tempo". Academia Militar, 2013.

[44] decá e de lá (2015). *Sinopse da história da colonização de Angola – III: Moçâmedes e Sá da Bandeira.* Disponível em: https://decaedela.blogspot.com/2015/12/sinopse-da-historia-da-colonizacao-de.html (acedido em 28 outubro 2025).

[45] Walk in Porto (s.d.). Teatro Sá da Bandeira – O mais antigo do Porto. Disponível em: https://walkinporto.com/teatro-sa-da-bandeira-o-mais-antigo-do-porto/ ,acedido em 20 outubro 2025.

[46] Comércio com História (s.d.). Teatro Sá da Bandeira – Arquitetura e elementos construtivos. Disponível em: https://www.comerciocomhistoria.gov.pt/listings/teatro-sa-da-bandeira-3479/ ,acedido em 20 outubro 2025.

[47] Google Earth. Google Earth. (https://earth.google.com/web). Acedido em 2 abril 2025.

[48] OLIVEIRA, Nicole. *Teatro Sá da Bandeira – Planta / Documento técnico*.

[49] Calibrador de microfone Brüel & Kjær (modelo 4231), https://www.bksv.com/pt/transducers/acoustic/calibrators/sound-calibrator-4231,(acedido em 20 novembro de 2025).

[50] Microfone de 13 mm Brüel & Kjær (modelo 4189), https://www.bksv.com/pt/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4189, (acedido em 20 novembro de 2025).

[51] Tripé portátil Brüel & Kjær (modelo UA0049), https://www.manualslib.com/manual/1857603/Br-El-And-Kj-R-4131.html?page=33, (acedido em 20 de novembro de 2025).

[52] Fonte Sonora Brüel & Kjær (Echo Speech Source, modelo 4720), https://www.bksv.com/pt/transducers/acoustic/sound-sources/echo-speech-source-type-4720, (acedido em 20 de novembro de 2025).

[53] Sonómetro Brüel & Kjær (modelo 2260), https://www.leasametric.com/en/product/bruelkjaer-2260-investigator-evaluator/, (acedido em 20 de novembro de 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.

[55] Mocarzel, H. "Caracterização Acústica do Teatro Nacional São João (Porto)". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2024.

[56] Gomes, M. "Caracterização Acústica do Teatro Ribeiro Conceição". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2025.

[57] Barbosa, S. "Caracterização Acústica de Grandes Auditórios: O caso do Auditório da FEUP". Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.

[58] Hirayama, A. "Caracterização Acústica do Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.

[59] Ribas, M. "Caracterização Acústica da Casa da Cultura de Ílhavo". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.

[60] Abelha, H. "Caracterização Acústica do Centro de Artes de Águeda". Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2022.

[61] Prada, P. "Caracterização Acústica do Renovado Cineteatro de Amarante". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.

[62] Silva, D "Caracterização Acústica do Cine-Teatro Eduardo Brazão". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.

[63] Rocha, G. "Caracterização Acústica do Centro de Congressos do Altice Fórum Braga". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2022.

[64] Miranda, T. "Caracterização Acústica do Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra)". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.

[65] Tavares, P. "Caracterização Acústica do Teatro Municipal da Covilhã". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.

[66] Vieira, F. "Caracterização Acústica do Teatro Municipal de Ourém". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.

[67] 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.

[68] Alves, D. S. "Caracterização acústica do Theatro Circo". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2025.

[69] Fortunato, M. C. "Caracterização acústica do Teatro Jordão". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2025.