

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DO TEATRO NACIONAL SÃO JOÃO (PORTO)

HANNAH SEREJO FERREIRA MOCARZEL

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

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2024

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2023/2024

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ mec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2023/2024 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2024.*

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

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

Aos meus pais

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Neste momento completo cinco anos de uma trajetória árdua e linda. Estar longe do meu país, da minha cultura, dos meus familiares e amigos não foi uma mudança fácil. Foi preciso muito esforço antes mesmo de começar, mas posso afirmar, com total certeza, que foi a melhor decisão que tomei. Reservo este espaço para agradecer a tudo e a todos que me apoiaram durante esses cinco anos e na realização da minha tese, que estiveram comigo e me aceitaram neste “novo mundo”, Portugal.

Ao meu orientador Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, por toda a disponibilidade, atenção prestada e simpatia, tornando este processo longo e trabalhoso mais leve e de muito aprendizado. Agradeço também por ser um grande professor com a capacidade de despertar genuinamente o interesse e a vontade de aprender nos alunos. Muito obrigada.

Ao Eng.º António Eduardo Costa, expressei minha gratidão pela contribuição com as medições realizadas no Teatro Nacional São João e a disponibilidade e simpatia prestada durante todo o trajeto.

A toda equipa do Teatro Nacional São João pela atenção prestada e por fornecer o material necessário para a realização desta tese, bem como ao técnico do teatro, Tiago Castro, que se mostrou receptivo e sempre disponível para prestar assistência.

Aos meus pais que fizeram este sonho ser possível, e que mesmo de longe, se fizeram presentes no meu coração, com muito suporte e amor.

Ao meu namorado que serviu de suporte e companhia nesses cinco anos para todos os momentos que surgiram e me ajudou a não desistir dos meus sonhos.

Aos meus amigos que estiveram sempre comigo, criando momentos felizes e únicos que levarei para o resto da minha vida.

A Portugal e a FEUP por ter sido a minha casa durante todos esses anos.

A todos aqueles que passaram de alguma forma na minha vida, que deixaram memórias e aprendizados.

A todos,

O meu sincero obrigada!

RESUMO

A presente dissertação concentra-se na caracterização acústica de um caso de estudo específico por meio de análises e medições realizadas *in situ*: o Teatro Nacional São João. Este localiza-se na Praça da Batalha, no centro histórico da cidade do Porto em Portugal. Foi inaugurado no século XVIII e em 1908 devido a um incêndio devastador foi completamente destruído. Após ser reconstruído, foi reinaugurado alguns anos depois e reclassificado como monumento nacional.

A dissertação inicia-se com um capítulo dedicado às definições, aos conceitos básicos de acústica e aos parâmetros utilizados nos ensaios, visando uma melhor compreensão do conteúdo realizado. Posteriormente é exposta a metodologia utilizada nos ensaios. Nos resultados, é apresentado os dados obtidos nos ensaios *in situ* e submetido quer a verificações regulamentares nacionais (RRAE) quer comparando com valores considerados ideais para cada parâmetro em função da utilização. Para a caracterização acústica utilizou-se os seguintes parâmetros com os respetivos resultados com o teatro desocupado, com o sistema AVAC desligado e em vários pontos:

- Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) = 31 dB;
- Tempo de reverberação médio com ocupação prevista e medido desocupado (TR [500, 1.000 Hz]) = 1,1 e 1,2 s;
- Rácio de baixos (BR_{TR}) = 1,14;
- *Speech Transmission Index* (STI) mínimo, médio e máximo = 0,52, 0,55 e 0,66;
- Claridade média (C_{80} [500, 1.000 Hz]) = 5,1 dB;
- Definição média (D_{50} [500, 1.000 Hz]) = 0,61;
- Tempo central médio (t_s [500, 1.000 Hz]) = 60 ms.

A avaliação acústica estendeu-se na análise comparativa com outras cinco salas de ópera internacionais e um teatro nacional, com as mesmas características: formato em “ferradura”. Para além dessas, comparou-se com mais onze salas nacionais de formatos variados. Permitiu-se assim concluir que a comparação com as salas internacionais, o Teatro Nacional São João (TSNJ) demonstrou o menor tempo de reverberação e de Claridade para salas de ópera e um pouco inferior aos limites considerados ideais. Mostrou-se assim muito desadequado para alguns tipos de música sinfónica, como a do período romântico. Por outro lado, na comparação com a sala nacional de formato “ferradura”, (Teatro Sá de Miranda), o TNSJ revelou ter maiores valores médios de Claridade, tempo central, Definição e STI, apesar de apresentar o menor tempo de reverberação. Em suma, ambos os teatros se mostraram mais adequados para funções teatrais (palavra) do que para música em geral. Quanto a análise com as onze salas internacionais com formatos variados, o TNSJ apresentou um dos maiores volumes, tempo de reverberação médios e níveis sonoros equivalentes do ruído de fundo, e constatou o menor (pior) valor do STI médio. Após a avaliação global do teatro, recomendou-se a abordagem de alguns temas adicionais para complementar a análise, levando em consideração as conclusões extraídas do trabalho realizado.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Salas de ópera, Teatro, Parâmetros acústicos, Tempo de reverberação, Inteligibilidade

ABSTRACT

This dissertation focuses on the acoustic characterization of a specific case study through in situ analyses and measurements: the São João National Theater (TNSJ). It is located in Praça da Batalha in the historic center of the city of Porto in Portugal. It was inaugurated in the eighteenth century which later in 1908 due to a devastating fire was completely destroyed. After being rebuilt it was reopened a few years later and reclassified as a national monument.

The dissertation begins with a chapter dedicated to the definitions, the basic concepts of acoustics and the parameters used in the tests, aiming at a better understanding of the content performed. Subsequently, the methodology used is exposed. In the results, the data obtained in the in situ tests and submitted to national regulatory checks (RRAE) are presented and compared with values considered optimal for each parameter depending on the use. For the acoustic characterization, the following parameters were used with the respective results with the theater unoccupied and at several points (with HVAC system turned off):

- Background noise sound pressure level (L_{Aeq}) = 31 dB;
- Reverberation Time with predicted occupancy and measured unoccupied (RT [500, 1,000 Hz]) = 1.1 and 1.2 s;
- Bass Ratio (BR_{TR}) = 1.14;
- Speech Transmission Index (STI) minimum, medium and maximum = 0.52, 0.55 e 0.66;
- Clarity (C_{80} [500, 1,000 Hz]) = 5.1 dB;
- Definition (D_{50} [500, 1,000 Hz]) = 0.61;
- Central Time (ts [500, 1,000 Hz]) = 60 ms.

The acoustic evaluation was extended in the comparative analysis with five other international opera halls and one national theater, with the same characteristics: "horseshoe" format. In addition to these, it was compared with eleven other national theaters of various formats. Thus, it was possible to conclude that the comparison with the international theaters, the Teatro Nacional São João (TNSJ) showed the shortest reverberation and clarity time for opera halls and a little lower than the limits considered ideal. It thus proved to be very unsuitable for some types of symphonic music, such as that of the Romantic period. On the other hand, in comparison with the national "horseshoe" format (Teatro Sá de Miranda), the TNSJ revealed to have higher average values of Clarity, Central Time, Definition and STI, despite having the shortest reverberation time. In short, both theatres proved to be better suited for theatrical (word) functions than for music in general. As for the analysis with the eleven international rooms with varied formats, the TNSJ presented one of the highest volumes, average reverberation time and equivalent sound levels of background noise, and found the lowest (worst) value of the average STI. After the overall evaluation of the theater, it was recommended to address some additional themes to complement the analysis, taking into account the conclusions drawn from the work carried out.

KEYWORDS: Acoustics, Opera Halls, Theatre, Acoustic parameters, Reverberation time, Intelligibility

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE QUADROS	xix
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xxiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	1
1.3. ESTRUTURA DA TESE	2
2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.1.1. NATUREZA DO SOM	3
2.1.2. OUVIDO HUMANO	3
2.2. CONCEITOS TEÓRICOS BÁSICOS	5
2.2.1. PRESSÃO	5
2.2.1.1. Propagação do Som	5
2.2.1.2. Celeridade	6
2.2.1.3. Níveis de Pressão Sonora	6
2.2.1.4. Intensidade e Potência Sonora	7
2.2.2. FREQUÊNCIA	9

2.2.2.1. Definição	9
2.2.2.2. Comprimento de Onda	10
2.2.2.3. Bandas de Frequências	10
2.2.2.4. Curvas de Ponderação	11
2.2.3. TEMPO	13
2.3. ABSORÇÃO SONORA	13
2.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	16
2.4.1. DEFINIÇÃO	16
2.4.2. TEMPO DE DECAIMENTO CURTO (<i>EDT</i>)	18
2.4.3. RÁCIO DE BAIXOS (<i>BR</i>)	18
2.5. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	18
2.5.1. ABORDAGEM GERAL	18
2.5.2. CARACTERÍSTICAS DA EMISSÃO DA VOZ	19
2.5.3. PARÂMETROS ACÚSTICOS	19
2.6. ISOLAMENTO SONORO	20
2.6.1. DEFINIÇÃO E CONCEITOS	20
2.6.2. RUÍDO DE FUNDO E INCOMODIDADE	22
2.7. ACÚSTICA ARQUITETÓNICA	24
2.7.1. INTERAÇÃO SOM/ SUPERFÍCIE	24
2.7.1.1. Diferenciação	24
2.7.1.2. Reflexão	24
2.7.1.3. Absorção	26
2.7.1.4. Difusão	26
2.7.2. ECOS	27
2.7.3. ESPAÇOS ACOPLADOS	27
2.7.4. PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJETIVOS	28

2.7.4.1. Claridade (C_{80})	28
2.7.4.2. Definição (D_{50})	29
2.7.4.3. Tempo Central (t_s)	29
2.7.5. PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJETIVOS	30

3. ESTADO DA ARTE..... 31

3.1. SALAS DE ÓPERA 31

3.1.1. CONTEXTO HISTÓRICO 31

3.1.2. ÓPERA (NÃO WAGNERIANA)..... 34

3.1.3. ÓPERA WAGNERIANA 34

3.2. CONSIDERAÇÕES ACÚSTICAS PARA SALAS DE ÓPERAS 34

3.2.1. ASPETOS GERAIS 34

3.2.2. A VOZ CANTADA..... 35

3.2.3. FORMA E TAMANHO..... 37

3.2.4. BALCÕES/GALERIAS..... 38

3.2.5. PROSCÉNIO..... 40

3.2.6. TECTO E PAREDES..... 41

3.2.7. TEMPO DE REVERBERAÇÃO 42

3.2.8. A ORQUESTRA NO FOSSO 45

3.3. ACÚSTICA VARIÁVEL 48

3.4. LEGISLAÇÃO PORTUGUESA..... 52

4. METODOLOGIA..... 55

4.1. O TEATRO NACIONAL SÃO JOÃO 55

4.1.1. ENQUADRAMENTO GERAL 55

4.1.2. CARACTERIZAÇÃO ARQUITETÓNICA E GEOMÉTRICA	57
4.2. METODOLOGIA	62
4.2.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS E EQUIPAMENTOS	62
4.2.2. RUÍDO DE FUNDO	64
4.2.3. OUTROS PARÂMETROS	65
5. RESULTADOS	67
5.1. INTRODUÇÃO	67
5.2. RUÍDO DE FUNDO.....	67
5.2.1. ANÁLISE DAS MEDIÇÕES <i>IN SITU</i>	67
5.2.2. CONFORMIDADE COM A LEGISLAÇÃO NACIONAL (RRAE)	71
5.2.3. ÍNDICE DE ARTICULAÇÃO (<i>AI</i>)	71
5.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	72
5.3.1. ANÁLISE DAS MEDIÇÕES <i>IN SITU</i>	72
5.3.2. CONFORMIDADE COM A LEGISLAÇÃO NACIONAL (RRAE)	75
5.3.3. PREVISÃO DA SALA OCUPADA	76
5.3.4. ANÁLISE SEGUNDO VALORES CONSIDERADOS IDEAIS	78
5.3.5. RÁCIO DE BAIXOS (<i>BR</i>)	78
5.4. <i>SPEECH TRANSMISSION INDEX (STI)</i>	79
5.5. CLARIDADE (C_{80})	80
5.6. DEFINIÇÃO (D_{50})	82
5.7. TEMPO CENTRAL (t_s)	85
6. COMPARAÇÃO COM OUTRAS SALAS	87
6.1. INTRODUÇÃO	87

6.2. SALAS INTERNACIONAIS.....	89
6.2.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	89
6.2.2. CLARIDADE (C_{80})	94
6.3. SALAS NACIONAIS	95
6.3.1. SALA NACIONAL COM FORMATO “FERRADURA”	95
6.3.1.1. Tempo de Reverberação	95
6.3.1.2. Claridade (C_{80})	97
6.3.1.3. Tempo Central (t_s)	98
6.3.1.4. Definição (D_{50})	99
6.3.1.5. <i>Speech Transmission Index (STI)</i>	100
6.3.2. SALAS NACIONAIS COM OUTROS FORMATOS	101
6.3.2.1. Tempo de Reverberação	101
6.3.2.2. <i>Rapid Speech Transmission Index (RASTI)/ Speech Transmission Index (STI)</i>	105
 7. CONCLUSÃO	 108
7.1. CONCLUSÕES.....	108
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	111
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 113

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Esquema do ouvido humano [3]	4
Fig. 2.2 – Esquema do mecanismo de funcionamento acústico (em frequência) da membrana basilar [2]	4
Fig. 2.3 – Esquema da propagação do som (longitudinalmente) [5]	5
Fig. 2.4 – Relação entre silêncio e som/ruído devido a variação da pressão, P_{at} = pressão atmosférica e p_t =pressão sonora [1]	5
Fig. 2.5 – Exemplos de diferentes níveis de pressão sonora e a sua pressão [6]	6
Fig. 2.6 – Curvas de nível de audibilidade na audição humana [7]	7
Fig. 2.7 – Representação visual da Intensidade (I), da Potência sonora (W) e da Pressão (p) [1]	8
Fig. 2.8 – Espectro Sonoro de diversos animais [8]	9
Fig. 2.9 – Representação gráfica de sons de alta e baixa frequências (adaptado de [1]) ...	10
Fig. 2.10 – Curva de igual sensibilidade auditiva em fone [9]	11
Fig. 2.11 – Curvas de Ponderação (filtros) A, B, C e D [9]	12
Fig. 2.12 – Valores de coeficientes de absorção sonora de alguns materiais ou sistemas [1]	14
Fig. 2.13 – Comportamento em frequência dos três tipos de materiais e sistemas absorventes [1]	15
Fig. 2.14 – Esquema básico de ressoadores (esq.) e membranas (dir.) [1]	15
Fig. 2.15 – Som direto e som refletido [14]	16
Fig. 2.16 – Definição de tempo de reverberação (valor teórico, esq. e obtido por extrapolação do declive, dir.) [1]	17
Fig. 2.17 – Transmissão por via direta e por via marginal [17]	21
Fig. 2.18 – Esquema de situações de transmissão de ruídos aéreos (esq.) e de percussão (dir.) [1]	21
Fig. 2.19 – Curvas de incomodidade <i>NR</i> (<i>Noise Rating</i>) [18]	23
Fig. 2.20 –Curvas de incomodidade <i>NC</i> (<i>Noise Criterion</i>) [19]	23

Fig. 2.21 – Esquematisação da interação som/superfície: (a) transmissão, (b) absorção, (c) reflexão, (d) difusão [20]	24
Fig. 2.22 – Reflectograma (tempo vs. intensidade sonora) [1]	24
Fig. 2.23 – Efeito das reflexões sonoras em superfícies de diferente geometria [29]	25
Fig. 2.24 – Exemplos de formas côncavas prejudiciais [1]	25
Fig. 2.25 – Exemplo de refletores suspensos ou discos voadores no Royal Albert Hall, Londres [22] e [1]	25
Fig. 2.26 – Exemplo de absorventes sonoros suspensos (<i>Baffles</i>) da marca Trisoft [30] ...	26
Fig. 2.27 – Exemplos de sistemas de difusão do som: <i>Quadratic Residue Diffuser</i> (esq.) e <i>Art Diffuser</i> (dir.) [23] e [24]	26
Fig. 2.28 – Reflectograma com eco [1]	27
Fig. 2.29 – Exemplos de formas geométricas que propiciam o <i>flutter echo</i> [21]	27
Fig. 2.30 – Situação de espaços acoplados (salas de espetáculos) [1]	28
Fig. 3.1 – Planta do Teatro SS. Giovanni e Paolo, Veneza, Itália [5]	31
Fig. 3.2 – Esquema do Teatro SS. Giovanni e Paolo, Veneza, Itália [27]	32
Fig. 3.3 – Teatro San Carlo, Nápoles (esq.) e Teatro Alla Scala, Milão (dir.) [34] e [37]	33
Fig. 3.4 – Plantas da Ópera de Paris (esq.) e da Ópera de Bayreuth (dir.) [27]	33
Fig. 3.5 – Espectros do clarinete em sua faixa média (esq.) e da trompa francesa no seu registro inferior (dir.) [5]	36
Fig. 3.6 – Espectros do som orquestral e da voz cantada, mostrando o “ <i>singing formant</i> ” em torno de 3.000 Hz (adaptado de [5])	36
Fig. 3.7 – Padrão de diretividade para um cantor barítono [5]	37
Fig. 3.8 – Exemplo de formas utilizadas em teatros e salas de ópera: leque (esq.) e ferradura (dir.) [15]	37
Fig. 3.9 – O efeito do ângulo de visão na visibilidade do palco (adaptado de [5])	38
Fig. 3.10 – Teatro Colón, Buenos Aires (esq.) e Staatsoper de Viena (dir.) [35] e [36]	39
Fig. 3.11 – Exemplos de galerias/balcões mal concebidas [21]	39
Fig. 3.12 – Esquema da relação profundidade/altura (D/H) e da linha de visão das galerias para salas de óperas [15]	40

Fig. 3.13 – Pequeno ângulo a partir do qual o som tardio pode chegar aos lugares abaixo de uma saliência (balcões) (adaptado de [5])	40
Fig. 3.14 – Reflexões associadas à forma do projeto da ópera na planta (adaptado de [5])	41
Fig. 3.15 – Reflexões com um tecto inclinado do proscénio até o tecto plano (adaptado de [5])	41
Fig. 3.16 – Projeto de tecto proposto para a Deutsche Oper (esq.) e o projeto final do tecto utilizado (dir.) [5]	42
Fig. 3.17 – Volumes e tempos de reverberação ocupados em frequências médias de dez salas de ópera: B, Deutsche Oper, Berlim; C, Coliseu de Londres; D, Ópera Sempre, Dresden; F, Festspielhaus, Bayreuth; L, Covent Garden, Londres; M, La Scala, Milão; N, Metropolitan Opera House, Nova Iorque; S, Ópera de Sydney, Teatro de Ópera; V, Staatsoper, Viena; X, Ópera de Buxton [5]	44
Fig. 3.18 – Fosso de orquestra no Teatro Regio, Torino, Itália [10]	45
Fig. 3.19 – Dimensões típicas dos fossos de orquestra (adaptado de [15])	45
Fig. 3.20 – Redução do nível sonoro devido à difração ao redor do fosso, para duas inclinações da plateia (adaptado de [5])	46
Fig. 3.21 – Disposição típica num fosso da orquestra parcialmente coberto [5]	47
Fig. 3.22 – Cortinas retráteis com absorção sonora [25]	48
Fig. 3.23 – Superfícies deslizantes [25]	49
Fig. 3.24 – Painéis articulados [25]	49
Fig. 3.25 – Elementos rotativos [25]	49
Fig. 3.26 – Exemplo de uma solução sem (a) e com (b) a estrutura divisória [25]	50
Fig. 3.27 – Teatro Bruce Mason, Auckland, Nova Zelândia (exemplo de uma solução com uso de painéis suspensos no tecto) [25]	50
Fig. 3.28 – <i>Edwin Thomas Hall</i> adaptado para salas de concerto (3.000 lugares) [33]	51
Fig. 3.29 – <i>Edwin Thomas Hall</i> adaptado para salas de ópera (2.300 lugares) [33]	51
Fig. 3.30 – <i>Edwin Thomas Hall</i> adaptado para teatro dramático (900 lugares) [33]	51
Fig. 4.1 – Teatro Nacional São João [40]	55
Fig. 4.2 – Localização do Teatro Nacional São João [41]	56

Fig. 4.3 – Interior da sala e planta da posição dos lugares do Teatro Nacional São João [foto da autora] e [28]	57
Fig. 4.4 – Fosso de orquestra do Teatro Nacional São João [foto da autora]	57
Fig. 4.5 – Corte vertical com dimensões do fosso de orquestra do Teatro Nacional São João (adaptado de [47])	58
Fig. 4.6 – Assentos almofadados [fotos da autora]	58
Fig. 4.7 – Cortinas de veludo e paredes divisórias dos camarotes com revestimento de um tecido aveludado [foto da autora]	59
Fig. 4.8 – Tecido aveludado revestido nas paredes traseiras [fotos da autora]	59
Fig. 4.9 – Cúpula da sala principal do Teatro Nacional São João [foto da autora]	60
Fig. 4.10 – Planta do Teatro Nacional São João [47]	61
Fig. 4.11 – Corte longitudinal do Teatro Nacional São João [47]	61
Fig. 4.12 – Corte transversal do Teatro Nacional São João [47]	62
Fig. 4.13 – Equipamentos de medição: A – Fonte Sonora Brüel & Kjaer 4720, B – Sonómetro Brüel & Kjær 2260, C – Calibrador de microfone Brüel & Kjær 4231 e D – Microfone de 13mm Brüel & Kjær 4189 [43], [44], [45] e [46]	63
Fig. 4.14 – Sonómetro (Brüel & Kjær 2260) munido do tripé (Brüel & Kjær UA0049) no TNSJ [foto da autora]	64
Fig. 4.15 – Planta do TNSJ com a representação da fonte sonora (FS) e dos quatro pontos escolhidos para as medições do ruído de fundo: RF1 e RF2 situados na plateia, RF3 na tribuna e RF4 no balcão do primeiro nível (adaptado de [47])	65
Fig. 4.16 – Fonte sonora Brüel & Kjaer – <i>Echo Speech Source</i> instalado no centro do palco do TNSJ [foto da autora]	66
Fig. 4.17 – Planta do TNSJ com a representação da fonte sonora (FS) e dos nove pontos (P1 a P9) escolhidos para as medições do TR , ts , C_{80} , D_{50} e STI : P1, P2 e P3 situados na plateia, P4 e P5 na tribuna, P6 e P7 no balcão do primeiro nível e P8 e P9 nos camarotes do primeiro nível (adaptado de [47])	66
Fig. 5.1 – Valores dos níveis de pressão sonora dos pontos (RF1 a RF4) do ruído de fundo (dB) sem o filtro A em bandas de frequência de 1/3 de oitava do TNSJ	68
Fig. 5.2 – Valores médios dos níveis de pressão sonora de todos os pontos (RF1 a RF4) do ruído de fundo (dB), com e sem o filtro A, em bandas de frequência de 1/3 de oitava do TNSJ	69

Fig. 5.3 – Valores dos níveis de pressão sonora nos pontos (RF1 a RF4) do ruído de fundo (dB(A)) com o filtro A em bandas de frequência de 1/3 de oitava (25 a 20.000 Hz) do TSNJ	69
Fig. 5.4 – Valores do tempo de reverberação para os nove pontos medidos (P1 a P9) em bandas de frequência de 1/3 oitava do TNSJ.....	74
Fig. 5.5 – Valores do tempo de reverberação para os nove pontos medidos (P1 a P9) em bandas de frequência de 1/1 oitava do TNSJ.....	75
Fig. 5.6 – Valores do tempo de reverberação com a sala desocupada (0%), com metade da ocupação previsto (50%) e totalmente ocupada previsto (100%) em bandas de 1/1 oitava	77
Fig. 5.7 – Comparação dos valores do parâmetro STI para os nove pontos medidos (P1 a P9) e a média do TNSJ	80
Fig. 5.8 – Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os nove pontos medidos (P1 a P9) em bandas de frequência de 1/1 oitava do TNSJ.....	82
Fig. 5.9 – Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os nove pontos medidos (P1 a P9) em bandas de frequência de 1/1 oitava do TNSJ.....	84
Fig. 5.10 – Valores do parâmetro Definição média (D_{50} [500, 1.000 Hz]) para os nove pontos medidos (P1 a P9) em bandas de frequência de 1/1 oitava do TNSJ	84
Fig. 5.11 – Valores do parâmetro tempo central (t_s) para os nove pontos medidos (P1 a P9) em bandas de frequência de 1/1 oitava do TNSJ	86
Fig. 6.1 – Valores do tempo de reverberação (TR [500, 1.000 Hz]) desocupado e ocupado das cinco salas internacionais do TNSJ.....	90
Fig. 6.2 – Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] desocupado em função do volume das cinco salas internacionais e do TNSJ com linha de tendência (exponencial)	91
Fig. 6.3 – Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] ocupado em função do volume das cinco salas internacionais e do TNSJ com linha de tendência (exponencial)	91
Fig. 6.4 – Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] desocupado em função do número de lugares das cinco salas internacionais e do TNSJ com linha de tendência (exponencial) ...	92
Fig. 6.5 – Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] ocupado em função do número de lugares das cinco salas internacionais e do TNSJ com linha de tendência (exponencial) ...	92
Fig. 6.6 – Valores do tempo de reverberação em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4.000 Hz das cinco salas internacionais e do TNSJ [38]	93
Fig. 6.7 – Valores da claridade média (C_{80} [500, 1.000 Hz]) em função do volume com linha de tendência (linear) das cinco salas internacionais e do Teatro São João.....	94

Fig. 6.8 – Valores da claridade média (C_{80} [500, 1.000 Hz]) em função do número de lugares com linha de tendência (linear) das cinco salas internacionais e do Teatro São João	95
Fig. 6.9 – Valores do tempo de reverberação em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4.000 Hz do TSM e do TNSJ e seus valores médios [49]	96
Fig. 6.10 – Valores da Claridade (C_{80}) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz do TSM e do TNSJ e seus valores médios [49]	97
Fig. 6.11 – Valores do tempo central (t_s) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz do TSM e do TNSJ e seus valores médios [49]	98
Fig. 6.12 – Valores da Definição (D_{50}) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz do TSM e do TNSJ e seus valores médios [49]	99
Fig. 6.13 – Valores do STI máximo, médio e mínimo do TSM e do TNSJ [49]	100
Fig. 6.14 – Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] em função do volume das onze salas nacionais e do TNSJ com linha de tendência (logarítmica)	102
Fig. 6.15 – Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] em função do número de lugares das onze salas nacionais e do TNSJ com linha de tendência (logarítmica)	102
Fig. 6.16 – Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] em função do Volume/Número de lugares das onze salas nacionais e do TNSJ com linha de tendência (logarítmica).	103
Fig. 6.17 – Valores do parâmetro $RASTI/STI$ em função do TR médio (TR [500, 1.000 Hz]) das onze salas nacionais e do TNSJ com linha de tendência (potência)	106
Fig. 6.18 – Valores do parâmetro $RASTI/STI$ em função do nível sonoro equivalente do ruído de fundo ($L_{A_{eq}}$) das onze salas nacionais e do TNSJ com linha de tendência (linear)	106

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Valores numéricos (dB) das ponderações da curva A para bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava na gama do audível [1]	12
Quadro 2.2 – Valores ideais para o tempo de reverberação para algumas situações (adaptado de [1])	17
Quadro 2.3 – Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes (adaptado de [1])	19
Quadro 2.4 – Correspondência entre o parâmetro <i>Speech Transmission Index (STI)</i> e a inteligibilidade da palavra [16]	20
Quadro 2.5 – Correspondência entre o parâmetro <i>Articulation Index (AI)</i> e o grau de inteligibilidade e privacidade da palavra [1]	20
Quadro 2.6 – Exemplos de valores limites máximos de <i>NC</i> para algumas situações (adaptado de [32])	22
Quadro 2.7 – Exemplos de valores limites máximos de <i>NR</i> para algumas situações [5]	23
Quadro 2.8 – Valores ideais para a Claridade (C_{80}) para algumas situações (adaptado de [1])	28
Quadro 2.9 – Valores ideais para a Definição (D_{50}) para algumas situações [48]	29
Quadro 2.10 – Valores ideais para o tempo central (t_s) para palavra e música [1]	30
Quadro 3.1 – Características básicas de salas de ópera ou usadas para ópera [38]	43
Quadro 3.2 – Coeficientes de absorção sonora médios de assentos [15]	45
Quadro 4.1 – Valores da área, altura média e volume aproximados das zonas principais do Teatro Nacional São João	60
Quadro 5.1 – Valores dos Níveis de Pressão Sonora e Nível Sonoro nos pontos RF1 a RF4 para bandas de frequência de 1/3 de oitava, média logarítmica, nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}) e nível sonoro equivalente (L_{Aeq}) no TNSJ	70
Quadro 5.2 – Avaliação regulamentar (RRAE) do nível sonoro contínuo equivalente no interior do TNSJ	71
Quadro 5.3 – Cálculo do Índice de Articulação (<i>AI</i>) do TNSJ	72
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 P9 medidos do TNSJ; média e desvio padrão.....	73

Quadro 5.5 – Valores do parâmetro tempo de reverberação (T_{30}) em bandas de 1/1 de oitava de 125 a 4.000 Hz para os pontos P1 a P9 medidos do TNSJ; média e desvio padrão	74
Quadro 5.6 – Avaliação regulamentar (RRAE) do tempo de reverberação médio do TNSJ	76
Quadro 5.7 – Parâmetros utilizados para a previsão do tempo de reverberação com a sala 50% e 100% ocupada do TNSJ [38]	77
Quadro 5.8 – Cálculo do novo tempo de reverberação com a sala 50% e 100% ocupada para bandas de 1/1 oitava de 250 a 4.000 Hz do TNSJ	77
Quadro 5.9 – Verificação dos valores recomendados do parâmetro tempo de reverberação médio de acordo com o uso do TNSJ [1], [5], [38]	78
Quadro 5.10 – Valores do rácio de baixos (BR_{TR}) em bandas de 1/1 oitava nos nove pontos ensaiados (P1 a P9) do TSNJ.....	79
Quadro 5.11 – Valores do parâmetro STI para os pontos P1 a P9 medidos do TNSJ; média e desvio padrão	80
Quadro 5.12 – Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os pontos P1 a P9 medidos do TNSJ; média e desvio padrão	81
Quadro 5.13 – Verificação dos valores considerados ideais do parâmetro Claridade (C_{80}) do TNSJ de acordo com a função do espaço	82
Quadro 5.14 – Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os pontos P1 a P9 medidos do TNSJ; média e desvio padrão	83
Quadro 5.15 – Valores do parâmetro tempo central (t_s) para os nove pontos (P1 a P9) medidos do TNSJ; média e desvio padrão.....	85
Quadro 5.16 – Verificação dos valores recomendados do parâmetro tempo central médio de acordo com o uso do TNSJ [1]	86
Quadro 6.1 – Comparação das diversas funções das doze salas nacionais	88
Quadro 6.2 – Valores do tempo de reverberação médio, ocupado e desocupado, de cinco salas internacionais e do TNSJ com o respetivo volume e número de assentos (adaptado de [38])	89
Quadro 6.3 – Valores do tempo de reverberação em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4.000 Hz das cinco salas internacionais e do TNSJ, com desvio padrão (adaptado de [38])	93
Quadro 6.4 – Valores da claridade média ($C_{80}[500, 1.000 \text{ Hz}]$) de cinco salas internacionais e do Teatro São João com o respetivo volume e número de assentos (adaptado de [38]) .	95

Quadro 6.5 – Valores do tempo de reverberação em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4.000 Hz do TSM e do TNSJ e o valor médio [49]	96
Quadro 6.6 – Valores da Claridade (C_{80}) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz do TSM e do TNSJ e o valor médio [49]	97
Quadro 6.7 – Valores do tempo central (t_s) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz do TSM e do TNSJ e o valor médio [49]	98
Quadro 6.8 – Valores da definição (D_{50}) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz do TSM e do TNSJ e o valor médio [49]	99
Quadro 6.9 – Valor do STI máximo, mínimo e médio do TSM e do TNSJ [49]	100
Quadro 6.10 – Valores do Volume, Número de lugares, Volume por assento e TR médio das doze salas nacionais incluindo o TNSJ.....	101
Quadro 6.11 – Verificação dos valores recomendados do parâmetro tempo de reverberação médio de acordo com vários tipos de uso das doze salas nacionais [21], [29], [33], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56]	104
Quadro 6.12 – Valores do Volume, Número de lugares, $RASTI/STI$ médio e Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) sem AVAC das doze salas nacionais incluindo o TNSJ	105
Quadro 7.1 – Resumo de valores e avaliações dos parâmetros acústicos medidos no TNSJ e verificações regulamentares	108

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A – Absorção sonora equivalente (m^2)

AC – *Articulation Class*

AI - *Articulation Index* (Índice de Articulação)

BR – *Bass Ratio* (Rácio de Baixos)

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

D_{50} – Definição

r – Distância (m)

EDT – *Early Decay Time* (Tempo de Decaimento Curto) (ms)

E – Energia (J)

FS – Fonte Sonora

f – Frequência (Hz)

f_0 – Frequência central; valor médio (Hz)

f_1 – Frequência de limite inferior (Hz)

f_2 – Frequência de limite superior (Hz)

$ITDG$ – *Initial Time Delay Gap* (ms)

I – Intensidade Sonora (W/m^2)

I_0 – Intensidade Sonora de Referência (W/m^2)

B – Largura de banda (Hz)

ρ – Massa Volúmica (kg/m^3)

L_i – Nível de Intensidade Sonora (dB)

L_p – Nível de Pressão Sonora (dB)

L_w – Nível de Potência Sonora (dB)

L_{eq} – Nível de pressão sonora contínua equivalente (dB)

L_A – Nível Sonoro (dB)

NC – *Noise Criteria*

NR – *Noise Rating*

p – Pressão (Pa)

P_{at} – Pressão atmosférica (Pa)

p_0 – Pressão de Referência (Pa)

W – Potência Sonora (W)

W_0 – Potência Sonora de Referência (W)

RASTI – *Rapid Speech Transmission Index*

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

S – Superfície real do material (m²)

SIL – *Speech Interference Level*

STI – *Speech Transmission Index*

TNSJ – Teatro Nacional São João

TSM – Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo)

T – Temperatura (K)

t_s – Tempo central (ms)

TR – Tempo de reverberação (s)

θ – Temperatura (°C)

V – Volume do compartimento (m³)

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

A acústica é o ramo da física onde se analisa e estuda as ondas sonoras. A acústica de edifícios, tal como é conhecida hoje, a qual se estuda a resolução de problemas relacionados com o som, como a correção acústica e o isolamento sonoro, nasceu no século XX com o físico americano W. C. Sabine. Porém, nos anos das décadas de 1980 e 1990 as salas de espetáculos não tinham geralmente projeto acústico e os arquitetos concentravam-se principalmente na estética e no *design* interior dessas salas.

Entretanto, nos últimos anos a situação tem vindo a se alterar. Todas as grandes salas de espetáculos devem basear-se simultaneamente no visual e no acústico. Mas ninguém poderá sugerir que o comportamento no âmbito visual se deve sobrepor ao comportamento acústico. Numa sala para teatros por exemplo, é o som do espetáculo que trás a qualidade do ambiente e não o especto estético, portanto a falta de características acústica implementadas no local pode destruir por completo a experiência do evento [1].

Assim, na contemporaneidade, busca-se estabelecer uma coexistência harmoniosa entre os elementos acústicos e arquitetónicos, reconhecendo a necessidade de integrar ambos os campos de maneira equilibrada. Destaca-se que a Acústica constitui atualmente uma exigência legal em Portugal e em muitos outros países, resultando na conceção de edifícios significativamente mais eficazes e confortáveis acusticamente.

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Neste caso de estudo, o Teatro Nacional São João, a utilização do ambiente concentra-se nas áreas de ópera e teatro. Surge, portanto, o propósito deste trabalho, que se destina à caracterização acústica desse espaço. Isto é alcançado por meio de análises fundamentadas em parâmetros acústicos obtidos nos ensaios realizados *in situ*. A avaliação desses parâmetros revela a adaptação mais adequada para o tipo de eventos a serem realizados nesse espaço. Adicionalmente, o objetivo desta dissertação é também realizar a comparação desses parâmetros acústicos com outras salas portuguesas e internacionais de tipo semelhante.

1.3. ESTRUTURA DA TESE

A presente dissertação apresenta-se dividida em sete capítulos:

No primeiro capítulo “Introdução” é abordado o enquadramento geral da dissertação, os objetivos a serem atingidos e a estrutura global.

No segundo capítulo “Conceitos e Definições” é apresentada uma lista de conceitos e definições básicas de acústica que são imprescindíveis para a compreensão do trabalho.

O terceiro capítulo “Estado da Arte” compreende informações temporais e históricas que deram origem às salas de óperas e os seus diferentes tipos e exigências para um funcionamento ideal.

No quarto capítulo “Metodologia” é abordado a lógica e o procedimento por trás de cada ensaio realizado *in situ* e a descrição de cada material utilizado. Além disso, é conduzida uma breve introdução acerca das características arquitetónicas e geométricas do Teatro Nacional São João.

No quinto capítulo “Resultados” são expostos os resultados referentes aos ensaios indicados no capítulo anterior juntamente com análises e verificações regulamentares.

No sexto capítulo “Comparação com outras salas” é apresentado de forma suplementar mais análises e conclusões comparativas com salas semelhantes através de parâmetros acústicos relevantes.

No sétimo e último capítulo “Conclusão” encontra-se conclusões referentes aos resultados obtidos e de todo o trabalho realizado na dissertação, bem como os possíveis desenvolvimentos futuros que poderão ser realizados como aperfeiçoamento e continuação do estudo em questão.

Por fim, são listadas todas as referências bibliográficas que serviram para o conteúdo desta presente dissertação.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. INTRODUÇÃO

2.1.1. NATUREZA DO SOM

O som é uma sensação provocada no cérebro devida à captação pelo sistema auditivo de alterações de pressão que se propagam no ar, água ou outro meio elástico. Os microfones, por exemplo não detetam o som e sim, a variação de pressão gerada por uma fonte no meio circundante [1].

Esse distúrbio que ocorre no meio apresenta-se em forma de ondas e, para este fenómeno existir, necessita-se de três elementos num sistema: o emissor (responsável por produzir o distúrbio), o meio (espaço onde o distúrbio se propaga, influenciando diretamente a forma que as ondas propagam) e o recetor (responsável por captar o distúrbio) [2]. Entretanto, para o recetor, esta perturbação captada no meio pode distinguir-se em dois tipos [1]:

- **Som:** é processado de forma agradável ou com algum significado;
- **Ruído:** é recebido de forma desagradável ou sem sentido.

2.1.2. OUVIDO HUMANO

O ouvido humano é constituído por três grandes áreas (Fig. 2.1) [1], [2], [15]:

- **Ouvido externo:** fazem parte o pavilhão auricular, canal auditivo e o tímpano;
- **Ouvido médio:** formado pelos ossículos: estribo, martelo e bigorna;
- **Ouvido interno:** constitui a cóclea, formada pela membrana basilar e os cílios.

O ouvido externo é responsável pela captação das ondas sonoras através do pavilhão auricular e depois são encaminhadas pelo canal auditivo, um tubo de mais ou menos 3 cm de comprimento até ao tímpano. Este tem um tamanho de aproximadamente um círculo de 5 mm de raio que ao chegar as ondas sonoras, vibra com uma deslocação máxima de 2 mm.

A membrana do tímpano é fina e elástica, formando a divisão entre ouvido externo e ouvido médio. Ela converte as variações de pressão do ar, que constituem as ondas sonoras, em vibrações mecânicas no ouvido médio [1], [2].

Na parte interna, encontra-se o ouvido médio, que é conectado ao fundo da garganta pela Trompa de Eustáquio para equilibrar a pressão do ar. Nesta zona de cerca de 2 cm³, encontram-se os ossículos, os menores ossos do corpo humano, os quais são responsáveis pela amplificação das ondas sonoras possibilitando a passagem do meio aéreo para o líquido presente no ouvido interno. O martelo conecta-se com o tímpano para mover em conjunto, e do outro lado encontra-se o estribo ligado com a janela oval para realizar a passagem das ondas sonoras para o interior da cóclea [1], [2].

O ouvido interno consiste em uma parte da cavidade na estrutura óssea do crânio, chamada cóclea. Esta é uma espiral cônica com 2,6 voltas, que se esticada, atingiria um comprimento de 35 mm. As vibrações transmitidas através do ouvido médio são recebidas pela janela oval, e deslocam-se através de um fluido denominado perilíngua. A membrana basilar encontra-se no canal intermédio, onde existem cerca de 1,7 milhões de cílios que se movem ao ocorrer vibrações no líquido, provocando um fenómeno eletroquímico que é transferida ao cérebro (sensação auditiva) [1], [2].

Um aspecto importante da membrana basilar é o facto de que a sua extremidade próxima à base da cóclea é mais fina e estreita, sendo também sensível às frequências mais altas do espectro percebido pelos humanos. Torna-se mais grossa e mais larga ao longo de sua extensão em direção ao ápice da cóclea, sendo sensível às frequências mais graves (Fig. 2.2) [1], [2].

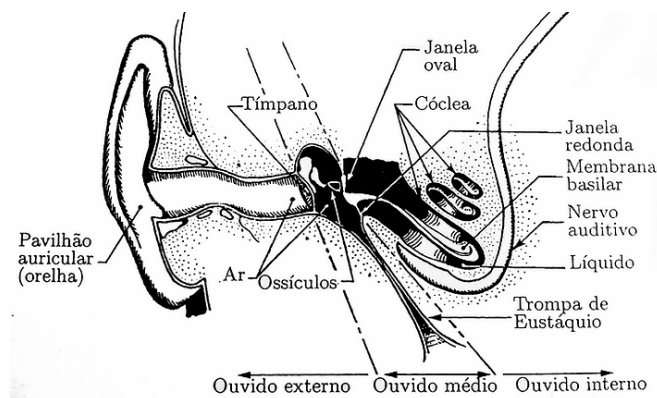


Figura 2.1 – Esquema do ouvido humano [3].

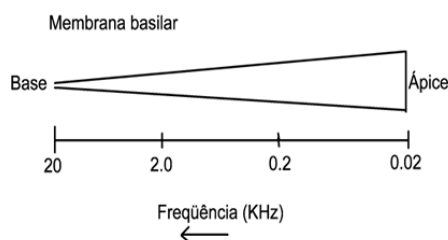


Figura 2.2 – Esquema do mecanismo de funcionamento acústico (em frequência) da membrana basilar [2].

2.2. CONCEITOS TEÓRICOS BÁSICOS

2.2.1. PRESSÃO

2.2.1.1. Propagação do Som

O fenómeno sonoro pode ser definido como uma onda mecânica e longitudinal que se propaga pelo ar ou qualquer outro fluido elástico. O termo “mecânica” diz respeito à necessidade de um meio (ou fluido) para que exista a propagação de uma onda sonora. O termo “longitudinal” está relacionado ao facto de que os elementos de volume do fluido se deslocam na mesma direção em que a perturbação se desloca [4], [5].

A propagação do som no ar é realizada sob a forma de ondas esféricas concêntricas tendo a fonte como o centro, local onde ocorre uma alteração de pressão. Essa alteração de pressão é propagada pela colisão de partículas do meio uns contras as outras, criando uma sequência de compressões (maior pressão) e rarefações (menor pressão) no meio (Fig. 2.3) [1].

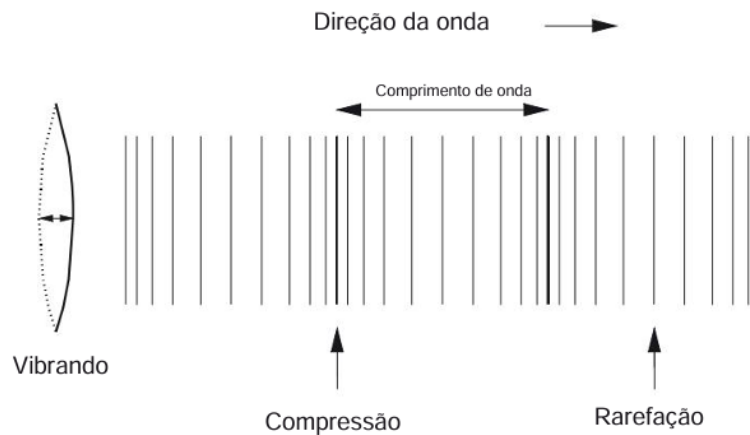


Figura 2.3 – Esquema da propagação do som (longitudinalmente) [5].

Chega-se, então, à conclusão de que o elemento mais importante a ser medido é a variação de pressão provocada pelas ondas sonoras. Deve-se considerar sempre a pressão atmosférica (P_{at}) como uma situação de referência, a qual valor aproximado no planeta Terra é de aproximadamente 101.400 Pa (Fig. 2.4) [1].

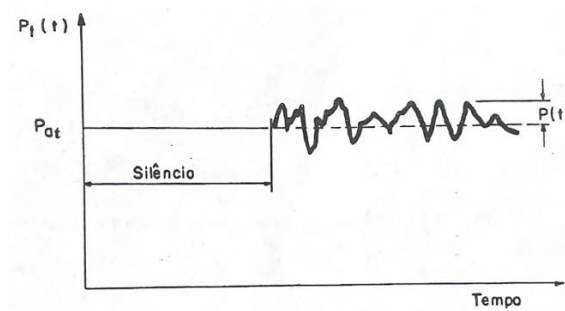


Figura 2.4 – Relação entre silêncio e som/ruído devido a variação da pressão, P_{at} = pressão atmosférica e p_t = pressão sonora [1].

2.2.1.2. Celeridade

A celeridade corresponde à velocidade de propagação da variação de pressão, ou seja, é a velocidade de propagação das ondas sonoras. Esta depende do meio onde se propaga e varia com a temperatura de acordo com a expressão 2.1 (válida apenas para ar seco e ao nível do mar) [1]:

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

$$T = 273,15 + \theta \quad (2.2)$$

Em que:

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

2.2.1.3. Níveis de Pressão Sonora

A gama de audibilidade humana no domínio da pressão é bastante extensa, sendo cerca de 10^7 Pa. Este encontra-se num intervalo entre o limiar da audição (valor mínimo da variação de pressão que um ser humano jovem pode ouvir), cerca de 10^{-5} Pa e o limiar da dor (valor máximo a partir do qual a sensação auditiva passa a ser dor), de aproximadamente 10^2 Pa. (Fig. 2.5 e 2.6). Adicionalmente, o ouvido não responde de forma linear aos estímulos e sim de modo quase logarítmico e é por esta razão que a unidade para avaliar a grandeza deixa de ser o **pascal** (Pa) e passa a ser o **decibel** (dB), em homenagem a Alexander Bell (1847-1922), uma medida de proporção de energias ou potências. A nova escala, portanto, está entre 0 dB (limiar da audição) e aproximadamente 130 dB (limiar da dor) [1], [5].

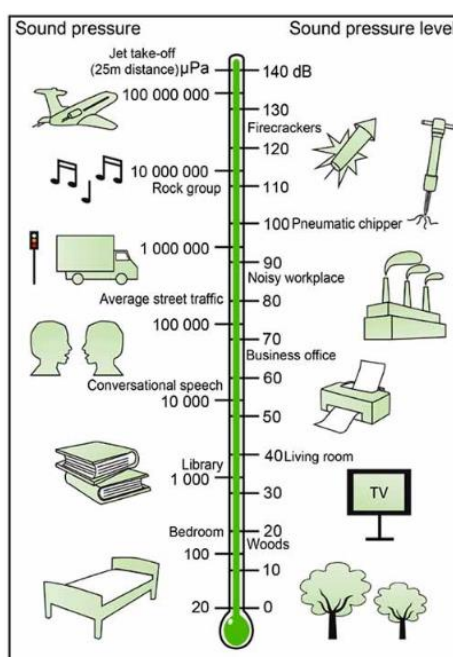


Figura 2.5 – Exemplos de diferentes níveis de pressão sonora e a sua pressão [6].

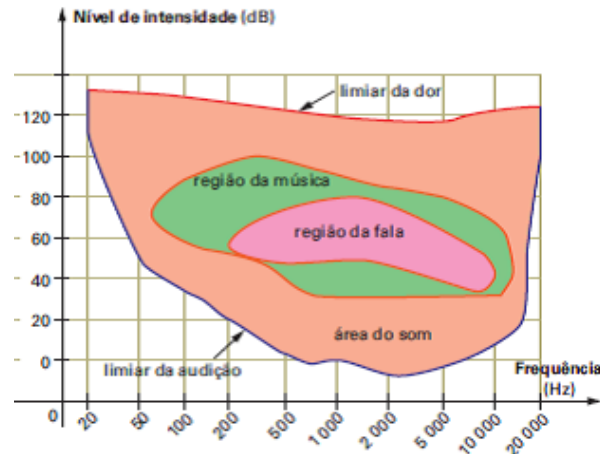


Figura 2.6 – Curvas de nível de audibilidade na audição humana [7].

Torna-se necessário, portanto, utilizar uma fórmula de conversão de pressão em *pascais* para níveis de pressão sonora em *decibéis* como mostra a equação 2.3 [1]:

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

Em que:

- L_p – Nível de pressão sonora (dB);
- p – Pressão (Pa);
- p_0 – Pressão de referência (Pa), ≈ 101.400 Pa.

Em casos que sejam necessários adicionar os níveis de pressão sonora, é realizado de forma logarítmica como mostra a equação 2.4 [1]:

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

2.2.1.4. Intensidade e Potência Sonora

Para além da pressão, existem outras duas grandezas que são importantes para a análise da propagação sonora, como a intensidade e a potência [1].

A intensidade sonora, numa dada direção, é a quantidade média de energia que atravessa por segundo uma área de 1 m^2 , normal a essa direção. Ou seja, ela permite avaliar a componente direcional do som, passando este a ser representado por uma grandeza vetorial. A partir do valor da intensidade é possível quantificar também o nível de intensidade sonora como mostra a equação 2.5 [1]:

$$L_i = 10 \times \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2.5)$$

Em que:

- L_i – Nível de intensidade sonora (dB);
- I – Intensidade sonora (W/m^2);
- I_0 – Intensidade sonora de referência (W/m^2), $10^{-12} \text{W}/\text{m}^2$.

Já a potência sonora é a energia total que num segundo atravessa uma esfera fictícia de raio qualquer centrada na fonte, ou seja, é uma característica da fonte e não do estímulo criado num dado ponto ou direção. A potência sonora é muito parecida com a potência de uma lâmpada, pois é uma caracterização direta da força da fonte. Semelhante à intensidade, é possível obter o nível de potência sonora a partir da potência de acordo com a equação 2.6 [1], [15].

$$L_w = 10 \times \log \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (2.6)$$

Em que:

- L_w – Nível de intensidade sonora (dB);
- W – Potência sonora (W);
- W_0 – Potência sonora de referência (W), 10^{-12} W .

Essas três grandezas (pressão, intensidade e potência) podem ser inter-relacionadas como mostra a equação 2.7 e uma representação visual na figura 2.7 [1].

$$I = \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (2.7)$$

Em que:

- I – Intensidade sonora (W/m^2);
- W – Potência sonora (W);
- r – Distância (m);
- p – Pressão sonora eficaz (Pa);
- ρ – Massa volúmica (kg/m^3), para o ar $\approx 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$;
- c – Celeridade (m/s).

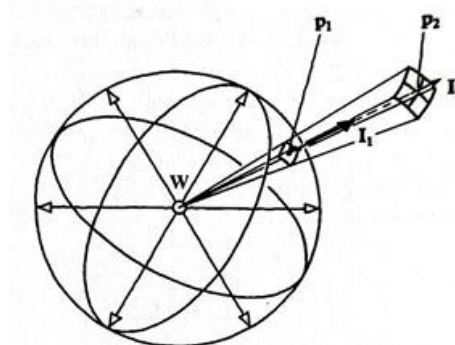


Figura 2.7 – Representação visual da Intensidade (I), da Potência sonora (W) e da Pressão (p) [1].

2.2.2. FREQUÊNCIA

2.2.2.1. Definição

A frequência, após a pressão sonora, é a segunda característica mais importante para descrever um sinal sonoro. Esta é medida em **hertz** (Hz), em honra ao físico alemão Heinrich Hertz, em que representa a taxa de ocorrência das flutuações completas de pressão por segundo, ou seja, número de ciclos por segundo [1].

Em acústica dos edifícios, é habitual distinguir três 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.

O ouvido humano em geral possui uma gama de sensibilidade em frequências de 20 a 20.000 Hz. Nota-se que existe uma variação de audição muito grande entre indivíduos, pois a medida que se envelhece, a capacidade de percepção reduz. Por exemplo, uma criança saudável tem um limiar agudo de 20.000 Hz, que ao completar 20 anos já pode ter reduzido para 16.000 Hz e até os 8.000 Hz até o fim da vida. Além disso, o limiar de audição varia com a frequência pois o ouvido é muito mais sensível na sua região média, entre os 2.300 a 2.800 Hz, que aos seus extremos. Já o limiar da dor é constante para todas as frequências [1], [2], [5].

Os sons de frequências inferiores 20 Hz são denominados de *infra-sons* e os de frequência superiores a 20.000 Hz são chamados de *ultra-sons*, ambas zonas em que o som é inaudível para o ser humano. Muitos animais ouvem até frequências muito superiores aos humanos (Fig. 2.8) [1].

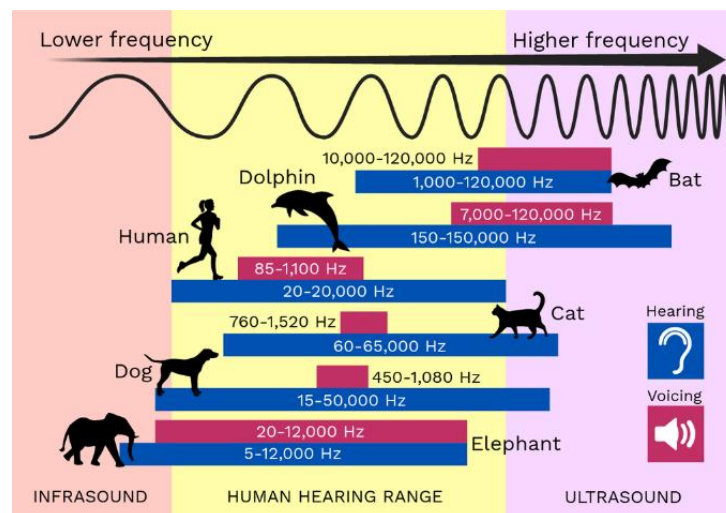


Figura 2.8 – Espectro Sonoro de diversos animais [8].

Se um som (ou ruído) é percebido como grave, isso ocorre devido à prevalência de baixas frequências, enquanto que, se for percebido como agudo, a predominância está nas altas frequências (Fig. 2.9). Estas últimas, quando comparadas com as frequências graves, resultam em um maior número de ciclos por segundo [1].

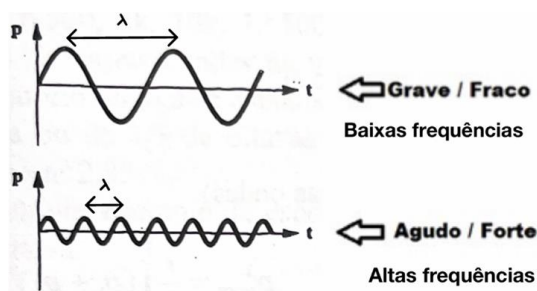


Figura 2.9 – Representação gráfica de sons de alta e baixa frequências (adaptado de [1]).

2.2.2.2. Comprimento de Onda

O comprimento de onda refere-se à distância entre dois pontos de características idênticas consecutivos da onda periódica. Este está relacionado com a velocidade da frente de onda e a frequência, através da equação 2.9 [1], [5], [15]:

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

Em que:

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

2.2.2.3. Bandas de Frequências

As bandas de frequências são agrupamentos de frequências entre um limite inferior e um superior com certa dimensão normalizada. Tornou-se necessário a criação destas pelo motivo de ser extremamente trabalhoso ter de analisar frequência a frequência, com milhares existentes para caracterizar um som/ruído [1].

As larguras dessas bandas é a diferença entre os limites superiores e inferiores, no entanto, existem bandas de diversas larguras, como: 1/1 oitava, 1/3 oitava e 1/12 oitava, etc. O cálculo da largura de uma banda é realizado de acordo com as equações 2.9 e 2.10 [1].

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

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

Em que:

- B – Largura de banda (Hz);
- f_1 – Frequência de limite inferior (Hz);
- f_2 – Frequência de limite superior (Hz);
- f_0 – 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

Como referido anteriormente, o ser humano possui uma sensibilidade auditiva variável diferentemente dos microfones ou equipamentos. Estes registram todas as frequências do som com igual fidelidade. Assim, surgiram as curvas de igual percepção subjetiva da intensidade sonora com a unidade *fone*. Essas foram obtidas determinando os valores de níveis de pressão sonora, em função da frequência para sons que soam com igual intensidade (Fig. 2.10) [1].

Essas curvas revelam características importantes da audição humana. Nota-se “picos” de sensibilidade após os 2.000 Hz, isto ocorre devido aos efeitos de ressonância do canal auditivo, com um lado aberto e o outro fechado, o que resulta num outro “pico” por volta dos 3.400 Hz e por ter uma forma regular, resulta num último “pico” cerca dos 13.000 Hz. Essas ressonâncias são responsáveis por causar maior sensibilidade a essas frequências no ouvido [2].

Outro especto importante é o facto da sensibilidade do ouvido não depender somente da frequência como também da amplitude. Isto é assinalável nas baixas frequências onde existe menor amplitude, portanto a sensibilidade também é menor. Assim, dois sons com diferentes frequências, mas com amplitudes idênticas, podem ser percebidos com volumes totalmente distintos. Por exemplo, um som a 20 Hz será percebido com consideravelmente menos sonoridade do que outro, de mesma amplitude, a 4.000 Hz. Consequentemente, sons de frequências diversas necessitarão de amplitudes de pressão distintas para serem percebidos como possuindo a mesma intensidade sonora [2].

Devido a essas grandes variações na audição, torna-se necessário corrigir os aparelhos de medição para exprimir a particularidade humana se assemelhando ao ouvido humano. Esta correção é realizada com filtros eletrónicos nos aparelhos de medida que corrigem os valores rastreados. Como resultado, surgem as curvas de ponderação, A, B, C e D (Fig. 2.11) [1], [15].

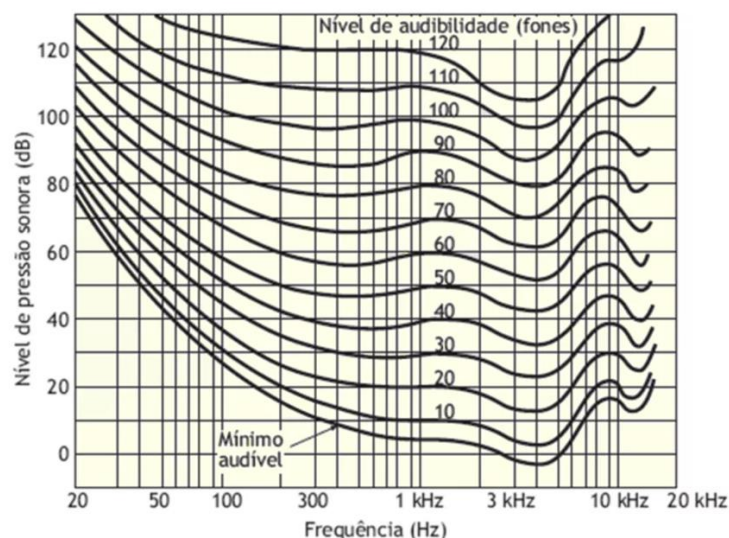


Figura 2.10 – Curva de igual sensibilidade auditiva em fone [9].

O filtro A é amplamente utilizado na Acústica de Edifícios e foi desenvolvido para aproximar os ruídos de baixa intensidade à percepção subjetiva humana. Este foi pensado de forma a ser mais sensível aos ruídos de fraca intensidade e por isso é sensivelmente o inverso da curva dos

40 fone. Existem outros filtros menos comuns, alguns em desuso, como o filtro B. O filtro C é semelhante ao A mas é utilizado apenas a ruídos de maior intensidade. Já o filtro D, é utilizado exclusivamente para quantificar os ruídos provenientes de aeronaves [1], [15]. Assim, para se obter os valores já com a correção “humana”, deve-se somar algebricamente os valores captados de níveis de pressão sonora linear (em dB) com as ponderações como mostra o quadro 2.1. Seguintemente, adicionam-se esses valores logaritmicamente e obtém-se o nível sonoro em dB(A) [1].

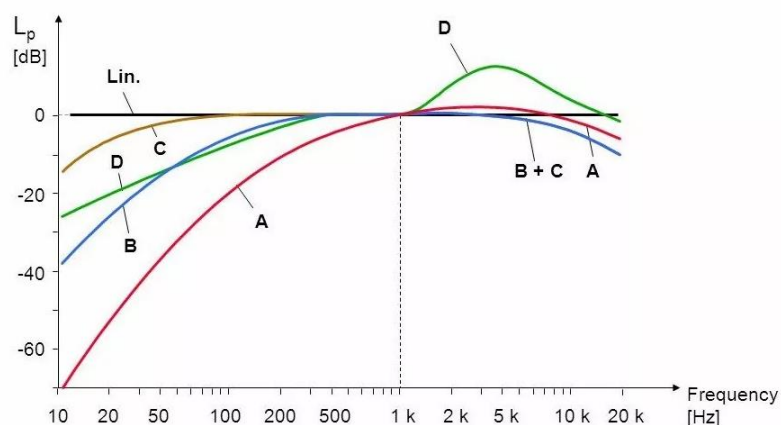


Figura 2.11 – Curvas de Ponderação (filtros) A, B, C e D [9].

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

Bandas 1/3 oitava	Ponderação A para 1/3 oitava	Bandas 1/1 oitava	Ponderação A para 1/1 oitava	Bandas 1/3 oitava	Ponderação A para 1/3 oitava	Bandas 1/1 oitava	Ponderação A para 1/1 oitava
12,5	-63,4	16	-57	800	-0,8	1.000	0
16	-56,7			1.000	0		
30	-50,5			1.250	0,6		
25	-44,7	31,5	-40	1.600	1	2.000	+1
31,5	-39,4			2.000	1,2		
40	-34,6			2.500	1,3		
50	-30,2	63	-26	3.150	1,2	4.000	+1
63	-26,2			4.000	1		
80	-22,5			5.000	0,5		
100	-19,1	125	-15,5	6.300	-0,1	8.000	-1
125	-16,1			8.000	-1,1		
160	-13,4			10.000	-2,5		
200	-10,9	150	-8,5	12.500	-4,3	16.000	-7
150	-8,6			16.000	-6,6		
315	-6,6			20.000	-9,3		
400	-4,8	500	-3				
500	-3,2						
630	-1,9						

2.2.3. TEMPO

O tempo é a terceira característica mais importante para descrever um sinal sonoro após a pressão e a frequência, as quais foram anteriormente descritas. A duração de um ruído pode variar, de uns quase instantâneos a outros mais prolongados. Tal característica levou à criação de dois parâmetros de medida utilizados no domínio do tempo: o nível de pressão sonora contínua equivalente (L_{eq}) e o nível de pressão sonora estatístico (L_N). É importante referir que o L_{eq} representa uma média e o L_{50} uma mediana (nota-se que o valor de N é a percentagem em que é excedido o intervalo de tempo de medição) [1].

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

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

O som é absorvido quando entra em contato com qualquer objeto físico. Isso acontece porque o objeto atingido tenderá a vibrar, dispersando energia da onda sonora, e também por conta da perda por fricção dentro do material [2].

A absorção sonora é uma propriedade característica dos materiais, em que consiste na transformação de parte da energia incidente em calor. Quando as ondas sonoras incidem sobre um objeto, parte dessa energia é absorvida e parte é refletida, portanto, para ser possível quantificar a energia incidente no material que é absorvida, surge o coeficiente de absorção na equação 2.12 [1], [4].

$$\alpha = \frac{E_{absorvida}}{E_{incidente}} \quad (2.12)$$

Em que:

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

Nota-se que o valor do coeficiente de absorção sonora varia entre 0 a 1, revelando a percentagem de energia que este absorve, em que valores muito próximos de 0 representa um material com absorção quase nula. Os materiais denominados absorventes são aqueles com valores de α superiores a 0,5, ou seja, dissipam mais do que 50% da energia sonora incidente. A figura 2.12 mostra exemplo de valores de α para diferentes materiais/sistemas em função de diversas frequências [1], [4].

Atualmente existem dois métodos normalizados para determinar o coeficiente de absorção sonora [1], [4]:

- **Tudo de ondas estacionárias:** consiste num tubo metálico longo e estreito, numa extremidade um altifalante e noutra a amostra a se testar. O princípio deste método é a propagação de ondas sonoras pelo tubo ao gerar um som. Parte desta onda é refletida pelas paredes do tubo e a outra é absorvida pelo material a ser testado. Criam-se ondas estacionárias devidas à interação da onda incidente com a refletida na amostra. A partir disto é possível medir a quantidade de energia sonora que foi absorvida. Nota-se que as ondas estacionárias não refletem a quantidade de energia absorvida. O processo é regulado pela norma EN ISO 10534-1 [12]. O ponto desfavorável desse método está na falta de consideração das incidências de outras direções que não sejam estritamente perpendiculares;
- **Câmara Reverberante:** este é um método mais eficaz que o anterior pois é considerado as incidências de todas as direções e não apenas perpendicularmente. A câmara é uma sala grande com todas as superfícies refletoras e com aparelhos difusores espalhados para a criação de um campo difuso, obtendo assim resultados mais próximos do real. Analisa-se o tempo de reverberação da sala vazia e o tempo de reverberação da sala com a amostra, aplicando a fórmula de Sabine (eq. 2.13). Este processo é regulado pela norma NP EN ISO 354 [13]. Um aspeto importante a referir é que os valores extraídos desse método podem ser maiores que 1,0 (uma impossibilidade física) para materiais altamente absorventes. Isto ocorre pela difração do som nos bordos da amostra fazendo parecer acusticamente maior e acrescentando no valor de α .

Frequência (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
Argamassa	0,14	0,10	0,06	0,05	0,04	0,03
Gesso cartonado, 2 placas (32 mm)	0,28	0,12	0,10	0,17	0,13	0,09
Madeira com caixa de ar de 25 mm	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05
Painéis de contraplacado fino	0,42	0,21	0,10	0,08	0,06	0,06
Blocos de betão com acabamento liso	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05
Vidro espesso	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Pavimento em betão	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Pavimento de betão armado revestido com mosaico ou mármore	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Tecto 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 (<i>parquet</i>) 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 colada sobre betão	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65
densa com base em borracha	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73
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
pesada	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Espelho de água (piscina ou similar)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Audiência						
Estofa espesso	0,76	0,83	0,88	0,91	0,91	0,89
Estofa médio	0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86
Estofa leve	0,56	0,68	0,79	0,83	0,86	0,86
Cadeiras vazias						
Estofa espesso	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79
Estofa médio	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
Estofa leve	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55

Figura 2.12 – Valores de coeficientes de absorção sonora de alguns materiais ou sistemas [1].

Os materiais e sistemas absorventes sonoros agrupam-se em três grandes categorias em função da eficácia de atuação numa gama de frequência (Fig. 2.13) [1], [4]:

- **Porosos e Fibrosos:** os mecanismos de absorção baseiam-se na existência de poros e interstícios, ou seja, quando a onda sonora incide nesse material, é transferida parte dessa energia no movimento das fibras que resistem por fricção e assim transformando em calor. Esses absorvem com melhor desempenho nas altas frequências. Fibras minerais (mantas e painéis), alcatifas e aglomerados de cortiça são alguns exemplos desses materiais;
- **Ressoadores:** são também conhecidos como **Ressoadores de Helmholtz** (Fig. 2.14 esq.), consiste num sistema formado por uma cavidade tendo numa única abertura estreita. Quando a frequência da onda sonora incidente coincide com a frequência natural de ressonância da cavidade, ocorre uma amplificação da energia dentro dela. Esse fenómeno deve-se ao facto da onda sonora entrar e sair da cavidade em fase, resultando em uma ressonância efetiva nessa frequência específica. A cavidade absorve a energia sonora na frequência de ressonância, resultando na redução da intensidade sonora nessa frequência específica. Estes absorvem com melhor desempenho nas médias frequências;
- **Membranas:** consiste num sistema formado por áreas grandes de painéis de pequenas espessuras (Fig. 2.14 dir.). A absorção das ondas sonoras ocorre pela vibração de toda a sua estrutura por meio da perda de calor por fricção das suas fibras quando o material entra em flexão, com melhor desempenho nas baixas frequências.

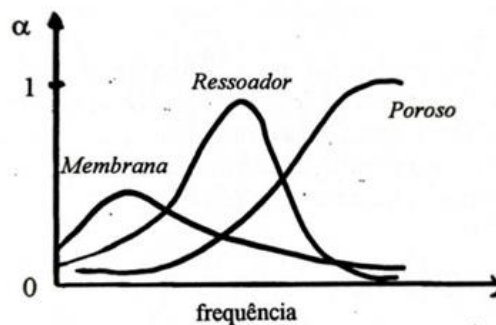


Figura 2.13 – Comportamento em frequência dos três tipos de materiais e sistemas absorventes [1].

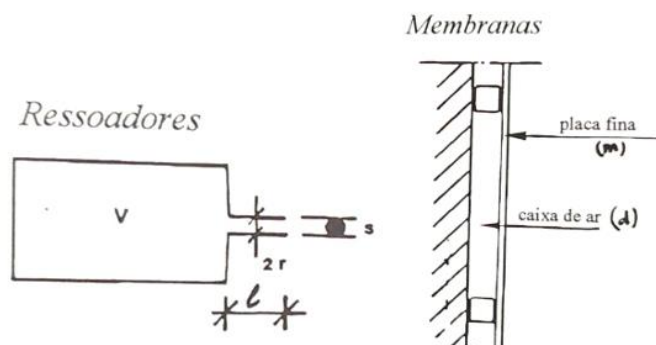


Figura 2.14 – Esquema básico de ressoadores (esq.) e membranas (dir.) [1].

2.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

2.4.1. DEFINIÇÃO

A reverberação natural é gerada pelas reflexões dos sons nas superfícies, as quais dispersam o som e o enriquecem pela sobreposição de suas reflexões. Vários fatores, como o volume e dimensões do espaço, juntamente com o tipo, forma e quantidade de superfícies encontradas, influenciam a quantidade e qualidade da reverberação em um ambiente natural [2].

Essas ondas sonoras que são criadas por fontes sonoras num compartimento podem ser de origem direta ou refletida. As ondas diretas atingem o recetor em um percurso em linha reta, enquanto que os sons refletidos atingem o ouvinte após reflexões (única ou múltiplas) em superfícies existentes na sala (Fig. 2.15) [1].

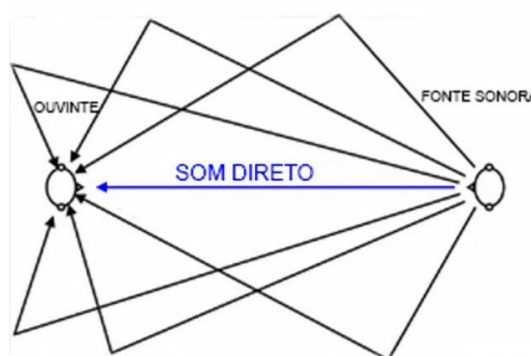


Figura 2.15 – Som direto e som refletido [14].

Essas inúmeras reflexões que chegam ao ouvinte aumentam o tempo em que o som é percebido, mas estas ondas refletidas vão perdendo a força pelas consecutivas absorções sonoras pelas superfícies que sofrem em cada reflexão [1], [2].

O intervalo de tempo em segundos que um som leva para se extinguir completamente após várias reflexões é chamado de tempo de reverberação (TR), ou seja, é o tempo em que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB a partir do momento em que a fonte sonora não emita mais ondas sonoras [1]. Essa circunstância está condicionada a diversos outros elementos, como a intensidade do som e a existência de outros sons. Quando o tempo de reverberação é consideravelmente extenso, o som sobrepõe-se às suas reflexões, gerando uma textura sonora densa [2].

Nas condições práticas, é raro obter um decaimento de 60 dB pois o ruído de fundo irá sobrepor-se antes do som emitido cessar. Portanto, é comum obter um decaimento de apenas 20 ou 30 dB e assim, extrapolar até os 60 dB com o declive da reta para se obter o tempo de reverberação (Fig. 2.16). Nos casos em que o tempo de reverberação foi obtido pela extrapolação do declive, denomina-se T_{20} ou T_{30} [1].

O interesse prático desses valores irá depender da funcionalidade da sala, por exemplo, em salas para música, o tempo de reverberação tem de ser um pouco superior aos das salas para a palavra. Isto deve-se ao facto de que um tempo de reverberação alto afeta a inteligibilidade da palavra, enquanto que para os instrumentos musicais, eles soam habitualmente melhor [1].

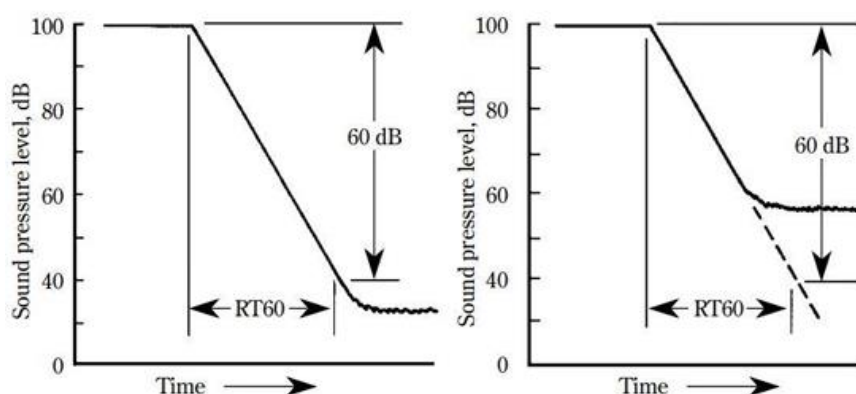


Figura 2.16 – Definição de tempo de reverberação (valor teórico, esq. e obtido por extrapolação do declive, dir.) [1].

O físico americano Wallace Clement Sabine, em 1898, determinou a relação entre tempo de reverberação, volume e absorção sonora, a qual ficou conhecida como a Fórmula de Sabine expressa na equação 2.13. Esta permite obter valores muito próximos dos reais para locais com campo sonoros difusos com um coeficiente de absorção sonora média inferior a 0,2. Existem ainda muitas outras formulações a qual se adequam para diferentes situações.

$$TR = \frac{0,16 \times V}{A} \quad (2.13)$$

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times S_i \quad (2.14)$$

Em que:

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

O quadro 2.2 mostra o tempo de reverberação ideal em função de cada utilização para as frequências médias (500 e 1.000 Hz).

Quadro 2.2 – Valores ideais para o tempo de reverberação para algumas situações (adaptado de [1]).

Tipo de ambiente	TR 500-1.000Hz (s)
Auditório (palavra)	0,7 - 0,8
Teatro	0,7 - 0,9
Ópera (não wagneriana)	1,3 - 1,7
Ópera wagneriana	1,8 - 1,9
Música de Órgão	2,5 - 3,5
Música Sinfónica Barroca	1,4 - 1,6
Música Sinfónica Clássica	1,6 - 1,8
Música Sinfónica Romântica	1,9 - 2,2
Música Sinfónica Moderna	1,4 - 1,9

2.4.2. TEMPO DE DECAIMENTO CURTO (*EDT*)

Early Decay Time (EDT) é um parâmetro acústico no qual o som decai inicialmente 10 dB medido em segundos. Quando o decaimento do som em um espaço é altamente difuso e linear, o tempo de reverberação e o tempo de decaimento curto são iguais [5].

Este é um parâmetro que pode variar conforme o local da sala pois depende da configuração fonte-recetor. Portanto, este se relaciona com a perceptibilidade da palavra e as notas tocadas em rápida sequência, destacando se em algum ponto da sala o som reverberante mascara a sílaba/nota que sucede [21].

2.4.3. RÁCIO DE BAIXOS (*BR*)

O *Bass Ratio (BR)* é utilizado para avaliar o balanço tonal por comparação dos tempos de reverberação para as baixas frequências (125 e 250 Hz) com os valores das altas frequências (500 e 1.000 Hz) de acordo com a expressão 2.15 [1].

$$BR = \frac{TR_{125} + TR_{250}}{TR_{500} + TR_{1.000}} \quad (2.15)$$

A partir desta fórmula conclui-se que altos valores de *BR* representam salas com elementos absorventes nas altas e refletores nas baixas, em contrapartida, baixos valores de *BR* indicam elementos absorventes nas baixas e refletores nas altas. Isto é, o *BR* avalia a capacidade do ambiente de reproduzir sons graves de forma equilibrada e com qualidade [2].

2.5. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

2.5.1. ABORDAGEM GERAL

A inteligibilidade da fala é uma medida direta de palavras ou frases compreendidas por um ouvinte. Trata-se de uma das principais características acústicas em espaços onde a percepção da palavra é fundamental, como por exemplo, auditórios, salas de aulas, etc. A perceptibilidade da comunicação é influenciada pelo ruído de fundo e pela reverberação existente em um espaço fechado, por exemplo, um sistema de ventilação ruidoso e um tempo de reverberação muito alto [5].

O grau em que o ruído diminui a inteligibilidade depende da relação sinal-ruído. Quando o ruído é superior ao nível da palavra, a relação sinal ruído é negativa. Mesmo quando a relação sinal-ruído é negativa a palavra ainda é inteligível, isto justifica-se pelo facto de que o cérebro pode, dentro de certos limites, seleccionar informações úteis e preencher as lacunas entre as palavras que entendemos. De acordo com pesquisas, se for possível compreender mais de 85-90% das palavras faladas, alcança-se uma compreensão muito boa e praticamente 100% das frases. Com uma compreensão de mais de 60% das palavras ainda se pode obter 90% das frases. Porém, se a compreensão for menor que 60% das palavras, a inteligibilidade diminui drasticamente [15].

Adicionalmente, o tempo de reverberação também influencia diretamente na inteligibilidade da palavra. Se o TR for demasiado longo, a inteligibilidade pode ser prejudicada. As reflexões tardias tornam a palavra incompreensível, exceto a curtas distâncias do orador. Vale ressaltar que as consoantes têm uma duração mais curta e uma intensidade mais baixa, ou seja, são facilmente sobrepujadas pelas vogais que são mais intensas e com alta duração, tornando ainda mais difícil a compreensão [1], [5].

2.5.2. CARACTERÍSTICAS DA EMISSÃO DA VOZ

As vogais desempenham um papel de elementos de ligação e são componentes no contínuo fluir da palavra. As consoantes estão associadas aos momentos transitórios entre as vogais. Estas exibem distintas características em termos de frequência, intensidade, duração e direccionalidade. Em virtude dessas variações, a inteligibilidade da palavra pode ser afetada [1].

No domínio da frequência, a gama do discurso está compreendida aproximadamente entre 150 e 7.000 Hz, em que nas mais baixas encontram-se as vogais e nas mais altas as consoantes. Em termos de nível de pressão sonora de emissão, a diferença é cerca de 21 a 28 dB entre as vogais (som mais intenso) e as consoantes (som menos intenso). Em relação a duração, as vogais duram mais do que as consoantes, cerca de 90 e 20 ms respetivamente. Por fim, no domínio da direccionalidade, as vogais propagam-se de uma maneira praticamente omnidireccional, por outro lado, as altas frequências perdem até quase 25 dB com a direção do ouvinte [1]. Essas diferenças da emissão da voz entre vogais e consoantes encontram-se esquematizadas no quadro 2.3.

É importante destacar que a inteligibilidade da palavra está significativamente vinculada à habilidade de discernir frequências elevadas, em particular, as relacionadas às consoantes, ou seja, essas têm uma maior contribuição e relevância que as vogais [5].

Quadro 2.3 – Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes (adaptado de [1]).

Tipo	Frequência	Intensidade	Duração	Direccionalidade	Contribuição para inteligibilidade da palavra
Vogais	baixas	elevado	≈90ms	-5dB p/ -180°	baixa
Consoantes	altas	baixo	≈20ms	-20dB p/ -180°	alta

2.5.3. PARÂMETROS ACÚSTICOS

Num projeto de acústica, é essencial analisar a inteligibilidade da palavra em um determinado espaço, sendo necessário determinar o nível de inteligibilidade por meio de parâmetros acústicos utilizando métodos subjetivos e/ou objetivos.

Os métodos subjetivos envolvem um orador que lê uma lista de palavras, enquanto uma audiência dispersa pela sala avalia a compreensão dessas palavras, indicando o que ouviu. Após essa etapa, as respostas são analisadas para classificar a inteligibilidade das palavras com base em critérios predefinidos, incluindo a percentagem de palavras reconhecidas pelo ouvinte. O grau de acerto é proporcional à inteligibilidade da palavra.

Os métodos objetivos não necessitam da intervenção subjetiva humana, sendo estes [1]:

- **Articulation Index (AI):** estabelece o nível médio de inteligibilidade percebido pelos ouvintes na presença de um ruído de fundo variando de zero a um;
- **Articulation Class (AC):** segue um método bastante semelhante àquele empregado na determinação do AI, no entanto, a análise é conduzida abrangendo uma faixa mais ampla de frequências;
- **Speech Interference Level (SIL):** é caracterizado como o cálculo da média aritmética dos níveis de pressão sonora dos ruídos de fundo em cada uma das bandas de oitava, de 500 a 2.000 Hz;
- **Speech Transmission Index (STI) e Rapid Speech Transmission Index (RASTI):** ambos representam o mesmo método, divergindo apenas na simplificação apresentada pelo RASTI. Estes variam de 0 (má inteligibilidade) a 1 (excelente inteligibilidade) como se observa no quadro 2.4. Este método é medido através da perda de qualidade na transmissão sonora pelo transmissor (o alto-falante) e o recetor. O sinal emitido está no intervalo de frequências e intensidades da voz humana.

Quadro 2.4 – Correspondência entre o parâmetro *Speech Transmission Index (STI)* e a inteligibilidade da palavra [16].

STI	Inteligibilidade da Palavra
[0,00 – 0,30[	Má
[0,30 – 0,45[	Medíocre
[0,45 – 0,60[	Suficiente
[0,60 – 0,75[	Boa
[0,75 – 1,00]	Excelente

Quadro 2.5 – Correspondência entre o parâmetro *Articulation Index (AI)* e o grau de inteligibilidade e privacidade da palavra [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 (conferências, aulas, etc.)

2.6. ISOLAMENTO SONORO

2.6.1. DEFINIÇÃO E CONCEITOS

O isolamento sonoro no âmbito da acústica dos edifícios, trata da capacidade de proteção aos ruídos exteriores ao espaço para não penetrarem nesse espaço ou vice-versa. O ruído em questão são os produzidos em ambientes exteriores da envolvente do local, como o tráfego

rodoviário ou de locais contíguos ao espaço em questão [1]. É importante ressaltar a diferença entre o “isolamento sonoro” e a “correção acústica”, em que o último trata de situações de correção de um compartimento para o som ali emitido.

O som pode se propagar por duas formas de transmissão, via direta ou marginal, existindo apenas uma via direta e doze possibilidades de transmissões marginais (Fig. 2.17).

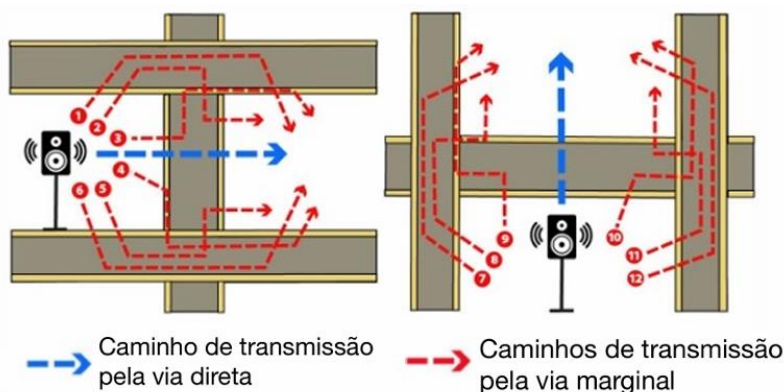


Figura 2.17 – Transmissão por via direta e por via marginal [17].

Adicionalmente, as ondas sonoras podem se propagar de forma distinta dependendo no meio, surgindo assim dois casos de ruídos (Fig. 2.18) [1]:

- **Ruídos de Percussão:** trata-se de ruídos onde existam solicitação mecânica direta da fonte de irradiação sobre os elementos de construção. Estes propagam-se pelos elementos construtivos com muita facilidade gerando um desconforto em zonas muito afastadas da fonte. É comum aplicar um revestimento de alcatifa nos pavimentos ou até descontinuidades ao longo de elementos em prol da minimização do ruído gerado;
- **Ruídos de Condução Aérea:** a transmissão é feita unicamente por vibração do ar. Diferentemente do ruído de percussão, eles não se propagam a longas distâncias e produzem menos desconforto. Para reduzir essa transmissão é comum agir sobre os elementos de separação aumentando a sua massa.

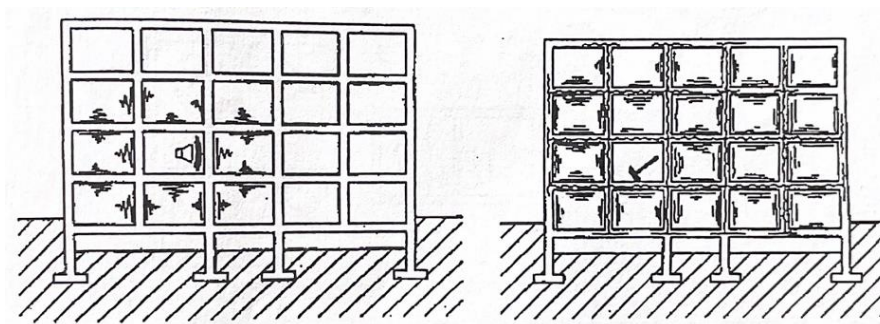


Figura 2.18 – Esquema de situações de transmissão de ruídos aéreos (esq.) e de percussão (dir.) [1].

2.6.2. RUÍDO DE FUNDO E INCOMODIDADE

Os auditórios, teatros, salas de concerto, dentre outros, apresentam-se como desafios significativos para os engenheiros, uma vez que a busca por uma experiência acústica de alta qualidade exige a redução extensiva do ruído de fundo [5].

Geralmente, o principal contribuinte para o ruído de fundo é o sistema de ventilação. Isso ocorre devido ao som do ventilador e ao ruído gerado pelo fluxo de ar em si. Para controlar o ruído, é essencial implementar uma considerável atenuação entre as unidades de ar condicionado e o auditório, além de garantir baixas velocidades de saída de ar [5].

Portanto, para avaliar a incomodidade causada por ruídos de fundo num espaço interior, é possível caracterizá-los através das “curvas de incomodidade”. Estas devem ser usadas em geral para sistemas de condicionamento termo-higrométrico e não para ruídos de atividades produzidos pelos ocupantes do local. Dentre muitas outras, existem a *Noise Criterion (NC)*, a qual é mais utilizada nos Estados Unidos e a *Noise Rating (NR)* na Europa [1], [5].

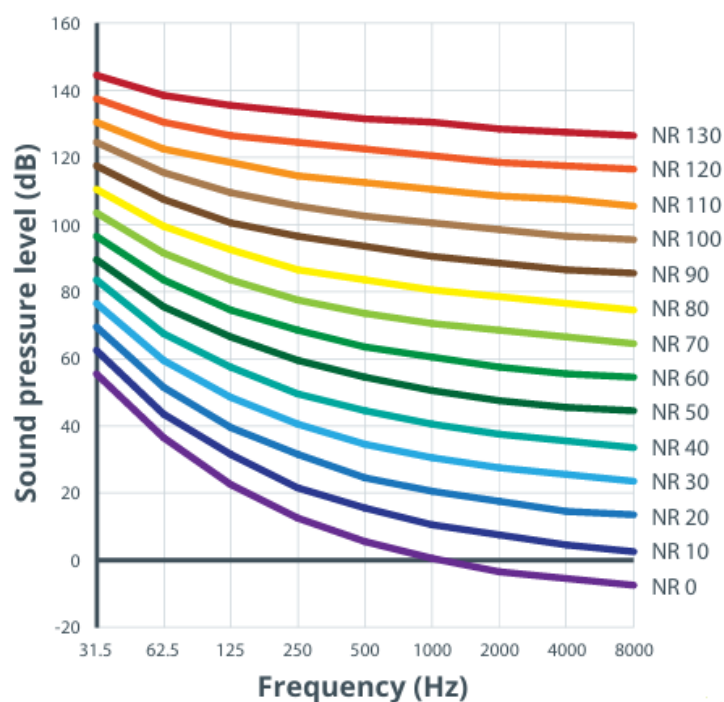
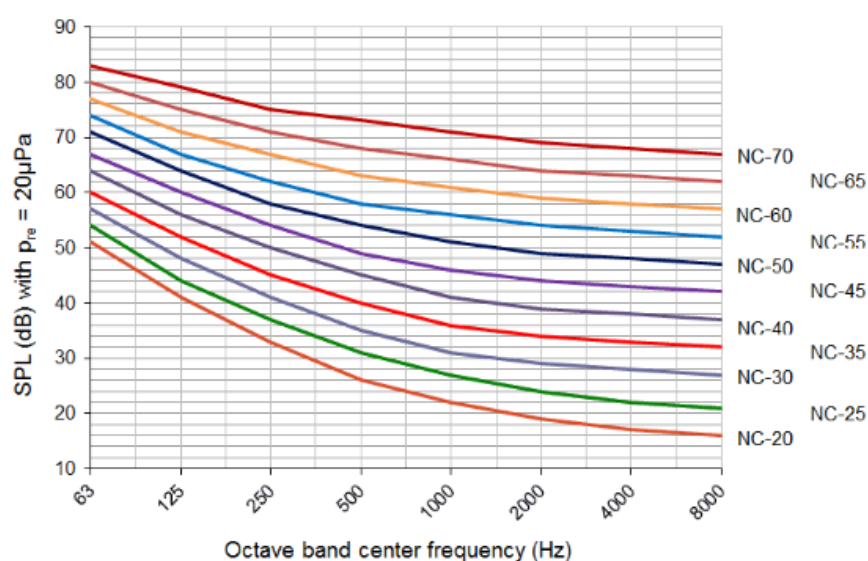
A curva *NC* foi proposta em 1957 por Leo Beranek (Fig 2.19). Cada curva *NC* é definida pelos seus níveis de pressão sonora para oito bandas de uma oitava entre 63 e 8.000 Hz. Esta varia valores entre *NC* 15 e 70. A classificação *NC* para uma dada situação significa o valor da menor curva que não é excedida por nenhum nível de pressão sonora das bandas de 1/1 oitava [1]. Já a curva *NR* foi proposta em 1962 por Kosten & Van (Fig 2.20) e institucionalizada por norma ISO. Esta utiliza bandas de frequências de 23 a 8.000 Hz obtendo valores entre *NR* 0 e 130 [1]. Os quadros 2.6 e 2.7 mostram valores limites máximos de *NC* e *NR* em função do tipo de espaço.

Quadro 2.6 – Exemplos de valores limites máximos de *NC* para algumas situações (adaptado de [32]).

Tipo de ambiente	Valor máximo NC	Condições de Audição
Salas de concerto, de ópera, estúdios de gravação, grandes auditórios, grandes igrejas	< 20	excelente
Pequenos auditórios, teatros, salas de música, grandes salas de reuniões, salas de teleconferência, salas audiovisuais, grandes salas de conferências, pequenas igrejas, tribunais	[20; 30]	muito boa
Quartos, hospitais, residências, apartamentos, hotéis	[25; 35]	dormir, descansar e relaxar
Escritórios privados, pequenas salas de conferência, salas de aula, livrarias	[30; 35]	boa
Grandes escritórios, recepções, lojas, cafés, restaurantes, ginásios	[35; 40]	moderada a boa
Lobbies, laboratórios, salas de engenharia, áreas de secretaria, oficinas de manutenção	[40; 45]	justo
Cozinhas, lavandarias, lojas industriais	[45; 55]	moderadamente justo

Quadro 2.7 – Exemplos de valores limites máximos de *NR* para algumas situações [5].

Tipo de ambiente	Valor máximo <i>NR</i>
Grandes salas de concerto	15
Salas de Ópera e Teatros	20
Auditórios pequenos (inferior a 500 lugares)	25

Figura 2.19 – Curvas de incomodidade *NR* (*Noise Rating*) [18].Figura 2.20 – Curvas de incomodidade *NC* (*Noise Criterion*) [19].

2.7. ACÚSTICA ARQUITETÓNICA

2.7.1. INTERAÇÃO SOM/SUPERFÍCIE

2.7.1.1. Diferenciação

Quando uma onda sonora incide sobre uma superfície, pode ocorrer uma reflexão (onda incide sobre a superfície e muda de direção no sentido oposto), uma absorção (o som é absorvido pela superfície sem transmitir e refletir), uma transmissão (passa de um lado para o outro) e por fim uma difusão (o som incide sobre a superfície e reflete em várias direções) como se mostra esquematicamente na figura 2.21 [20].

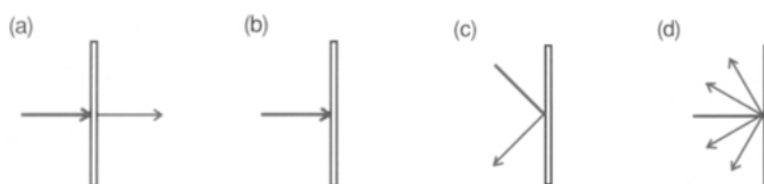


Figura 2.21 – Esquemática da interação som/superfície: (a) transmissão, (b) absorção, (c) reflexão, (d) difusão [20].

2.7.1.2. Reflexão

Numa grande sala, um ouvinte recebe cerca de 8.000 reflexões por segundo. Os primeiros 80 ms são considerados som inicial (*early sound*) e o restante é o som tardio (*late sound*). O intervalo de tempo entre a chegada do som direto e o da primeira reflexão denomina-se tempo de atraso inicial (*initial time delay gap*). Representa-se num gráfico chamado reflectograma (tempo vs. intensidade sonora) o conjunto dessas reflexões (Fig. 2.22) [1].

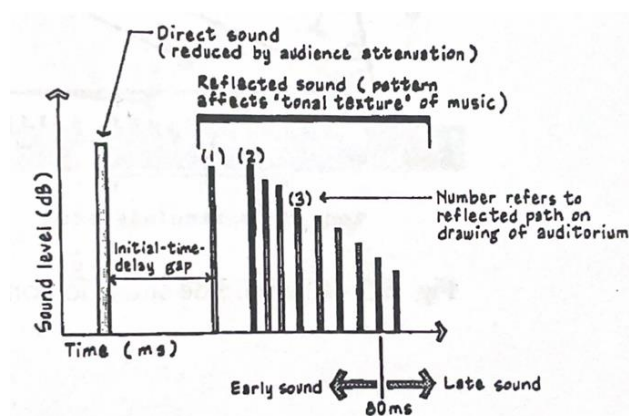


Figura 2.22 – Reflectograma (tempo vs. intensidade sonora) [1].

As reflexões também podem ser influenciadas por outro fator, como a geometria da superfície. Superfícies convexas dispersam as ondas sonoras incidentes, tornando-as desejáveis em situações que demandam uma reflexão sonora eficaz. Em contraste, superfícies planas refletem as ondas em direção oposta à sua incidência, assemelhando-se a um espelho acústico.

Por fim, em presença de superfícies côncavas, as ondas sonoras são refletidas de forma concêntrica, podendo resultar em reflexões que se encontram e se sobrepõem (Fig. 2.23) [29]. Essa última deve ter uma atenção especial quanto a sua forma, pois esta tem a capacidade de focalizar o som para uma única área, prejudicando outras zonas onde não recebem essas reflexões sonoras (Fig. 2.24) [1].

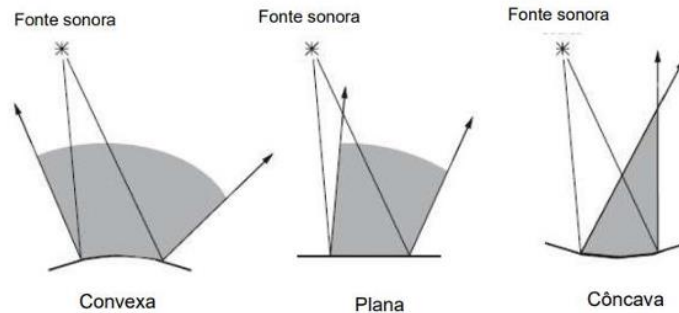


Figura 2.23 – Efeito das reflexões sonoras em superfícies de diferente geometria [29].

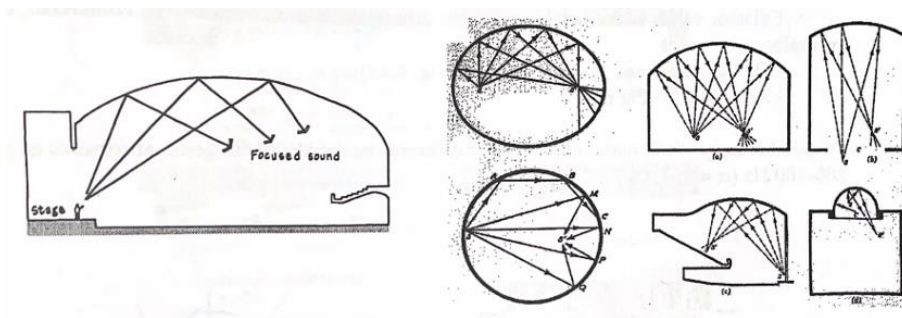


Figura 2.24 – Exemplos de formas côncavas prejudiciais [1].

Além da forma geométrica do espaço, é possível modificar as reflexões com simples objetos. Por exemplo, em salas de espetáculos que possuem tectos muito elevados, para evitar que o som direto proveniente do palco atinja o tecto ao invés da audiência, é comum a colocação de discos suspensos no tecto denominados discos voadores ou nuvens (Fig. 2.25). Estes bloqueiam as passagens das ondas sonoras ao tecto e fazem com que as reflexões cheguem mais rapidamente ao público [1].

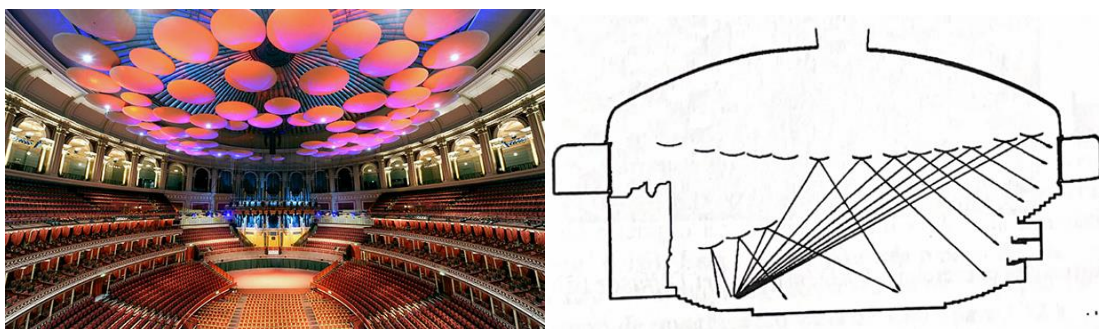


Figura 2.25 – Exemplo de refletores suspensos ou discos voadores no Royal Albert Hall, Londres [22] e [1].

2.7.1.3. Absorção

Como visto no capítulo 2.3, a absorção ocorre em todas as superfícies em que o som incide, divergindo apenas na medida em que tais superfícies apresentem baixa ou elevada capacidade de absorção. Para um maior controle acústico do espaço, é possível aumentar a absorção do local com a inserção de materiais absorventes dispostos de forma adequada. Habitualmente esses materiais são colocados para revestir tectos ou paredes, com ou sem caixa de ar. Existem outros modos de colocação, como por exemplos os *baffles* (Fig. 2.26). Estes são grandes “almofadas” de materiais porosos ou fibrosos, que são colocados no tecto de forma suspensa na vertical. Isto foi pensado de modo que a área de absorção disponível aumente (relativamente a opção de revestir o tecto na horizontal) e que cada material consiga atuar nas suas duas faces [1].

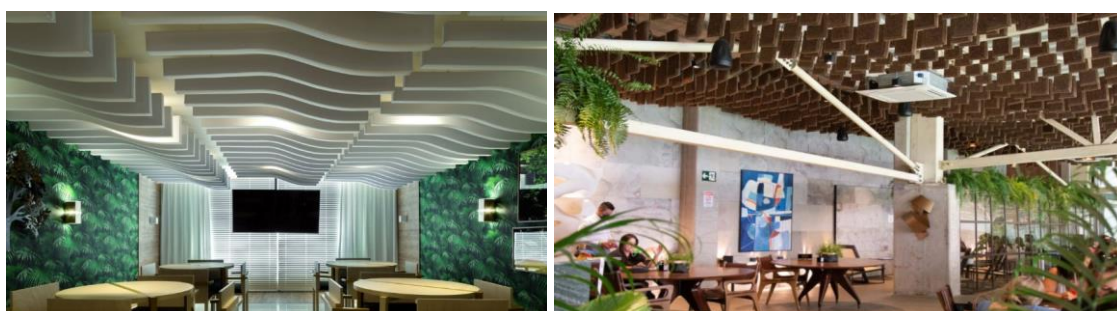


Figura 2.26 – Exemplo de absorventes sonoros suspensos (*Baffles*) da marca Trisoft [30].

2.7.1.4. Difusão

Para o fenómeno da difusão ocorrer, a superfície necessita ter irregularidades e algum relevo. O tamanho dessas irregularidades define quais serão as frequências de ondas refletidas, isto é, uma superfície com pequenos relevos será difusa a altas frequências. Essas são essenciais em salas de teatro ou música, pois garante que as reflexões são feitas em todas as direções, evitando a existência de pontos da sala com ausência das mesmas. Dois exemplos de sistemas de difusão do som são: *Quadratic Residue Diffuser* (Fig. 2.27 esq.) e *Art Diffusor* (Fig. 2.27 dir.) [1].

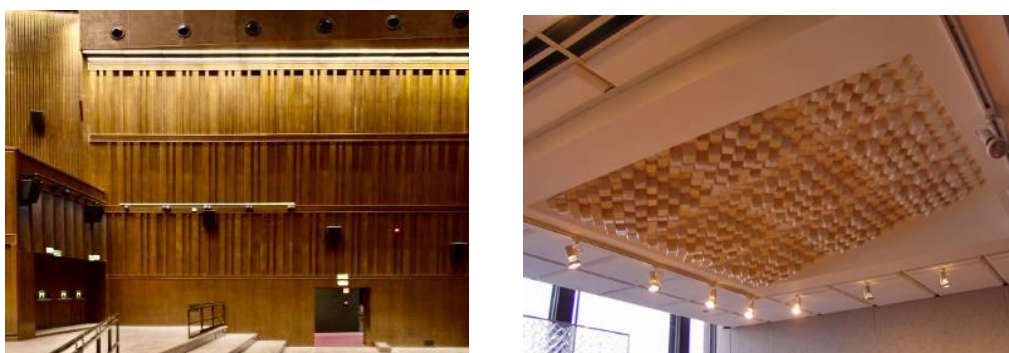


Figura 2.27 – Exemplos de sistemas de difusão do som: *Quadratic Residue Diffuser* (esq.) e *Art Diffusor* (dir.) [23] e [24].

2.7.2. Ecos

Nem todas as reflexões são favoráveis acusticamente. As reflexões tardias são percebidas como ecos perturbadores. Se a diferença de tempo de chegada entre o som direto e a sua primeira reflexão for muito grande (superior a 50 ms), então se ouvirá sons distintos, um eco (Fig. 2.28). Após a primeira reflexão, a densidade de ecos pode crescer rapidamente. Em grandes salas, esse efeito pode acontecer por reflexões em superfícies muito afastadas da origem do som [1], [2], [5].

Existem formas práticas de evitar com que este fenómeno ocorra, como por exemplo a colocação de materiais absorventes sonoros ou alteração do ângulo da superfície, reencaminhando as reflexões para uma zona não prejudicial [1].

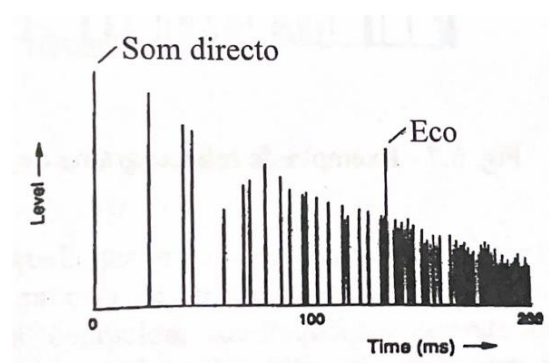


Figura 2.28 – Reflectograma com eco [1].

O eco pode também se repetir sucessivamente e criar um outro fenómeno denominado *flutter echo*, isto ocorre devido a geometria do espaço, a qual gera reflexões sem mudança de direção (Fig. 2.29) [1].

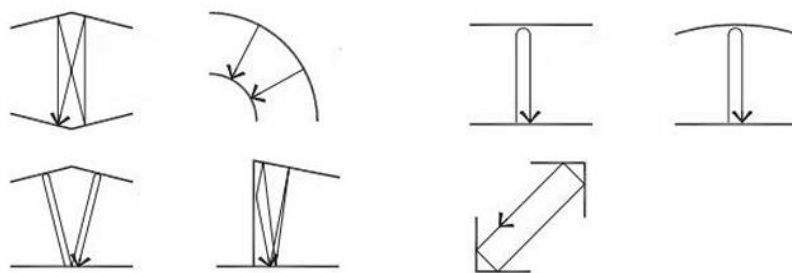


Figura 2.29 – Exemplos de formas geométricas que propiciam o *flutter echo* [21].

2.7.3. ESPAÇOS ACOPLADOS

Um caso particular de espaços acoplados (*coupled space*) acontece quando dois ou mais espaços adjacentes que partilham da mesma fonte sonora têm características acústicas distintas, como volume e absorção sonora. Isto gera um aspecto de decaimento na curva do tempo de reverberação como se pode observar na figura 2.30.

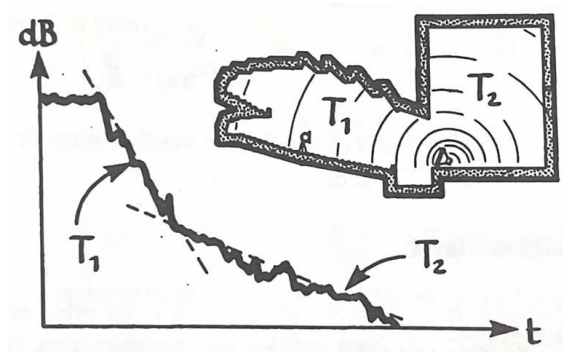


Figura 2.30 – Situação de espaços acoplados (salas de espetáculos) [1].

Esta figura exemplifica uma sala acusticamente absorvente com um TR correspondente a um decaimento T_1 e uma caixa de palco com superfícies refletoras com um TR mais elevado (T_2). Um ouvinte colocado próximo desta zona de abertura entre os dois espaços receberá uma reverberação com duplo decaimento sempre que T_1 for menor que T_2 , caso contrário a reverberação da sala 2 não será perceptível [1].

2.7.4. PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJETIVOS

2.7.4.1. Claridade (C_{80})

A claridade (C_{80}) é descrita como a capacidade de ouvir detalhes musicais. Em espaços como teatros e óperas, onde a inteligibilidade da palavra é importante, torna-se indispensável que os sons sejam ouvidos de maneira nítida e distintas. Em contrapartida, em salas de música, é aceitável permitir uma certa fusão entre as notas. O quadro 2.8 mostra valores ideais da Claridade (C_{80}) para diferentes tipos de uso do espaço.

O parâmetro C_{80} refere-se ao equilíbrio entre a clareza percebida e a reverberação [5]. Trata-se, portanto, da razão em dB, da energia recebido nos primeiros 80 ms do sinal recebido e a energia recebida posteriormente como pode observar na equação 2.16. Este foi proposto por Reichardt em 1975, em que 80 ms é considerado o limite de perceptibilidade para a música [1].

$$C_{80} = 10 \times \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.16)$$

Em que:

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

Quadro 2.8 – Valores ideais para a Claridade (C_{80}) para algumas situações (adaptado de [1]).

Tipo de ambiente	C_{80} (dB)
Auditório (palavra), Teatro	>6
Ópera (não wagneriana)	3 a 4
Ópera wagneriana	1 a 2
Música de Órgão	< -2
Música Sinfónica	-2 a 2

2.7.4.2. Definição (D_{50})

A Definição (D_{50}) é um parâmetro adimensional que relaciona a energia recebida nos primeiros 50 ms e a energia total recebida onde pode observar na equação 2.17. Este foi proposto por Thiele em 1953, em que 50 ms é considerado o limite de percepção da palavra variando entre 0 e 1,0. Quanto mais próximo à unidade, indica uma melhor definição do discurso num dado ambiente, como mostra o quadro 2.9 [1].

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.17)$$

Em que:

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

Quadro 2.9 – Valores ideais para a Definição (D_{50}) para algumas situações [48].

Definição (D_{50})	
Excelente	0,86 - 1,0
Boa	0,67 - 0,86
Suficiente	0,39 - 0,67
Medíocre	0,17 - 0,39
Má	0,06 - 0,17

2.7.4.3. Tempo Central (ts)

O tempo central (ts) é um parâmetro definido como o ponto no tempo em que a energia sonora recebida representa metade da energia total recebida pelo ouvinte, ou seja, o ponto em que a energia recebida anteriormente é igual à energia que ainda será recebida (eq. 2.18). Este foi proposto por Cremer e Muller em 1978 [1].

Um valor elevado desse parâmetro indica um ambiente bastante reverberante; já um valor baixo indica que, ao ocorrer um estímulo sonoro, a energia concentra-se principalmente nas primeiras reflexões [21]. É usual ter uma posição entre 140 e 180 ms em salas de concerto em frequências médias. Para a palavra um valor menor que 80 ms é considerado ideal, enquanto que para música, entre 80 a 230 ms, com limite inferior para ópera e superior para música do período romântico [1].

$$ts = \frac{\int_0^{\infty} t \times p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.18)$$

Em que:

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

Quadro 2.10 – Valores ideais para o tempo central (t_s) para palavra e música [1].

Função	t_s [500, 1.000 Hz] ideal (ms)
Música (ópera a período romântico)	80 a 230
Palavra	< 80

2.7.5. PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJETIVOS

Os parâmetros acústicos subjetivos referem-se a valores obtidos por meio de análises que dependem da opinião pessoal dos ouvintes. Atualmente os mais utilizados em grandes salas de espetáculos são os que avaliam [1], [15]:

- **Ruído de Fundo:** sons escutados no local não provenientes da fonte ou dos auditores;
- **Intensidade do Som:** volume do som que esta a ser sentido nesse espaço;
- **Clareza do discurso musical:** grau em que as notas são claramente separadas no tempo e distintamente ouvidas;
- **Reverberância:** permanência do som no ar;
- **Intimidade:** sensação auditiva de proximidade da fonte sonora;
- **Envolvimento:** sentimento de estar imerso no som ou rodeado por ele;
- **Brilho:** som brilhante, claro, sonoro, rico em harmônicos, com componentes de alta frequência decaindo lentamente;
- **Timbre:** distingue sons de diferentes tipos de instrumentos, mas com a mesma altura e intensidade;
- **Calor:** reverberação de baixa frequência entre 75 e 350 Hz.

3

ESTADO DA ARTE

3.1. SALAS DE ÓPERA

3.1.1. CONTEXTO HISTÓRICO

A ópera representa uma forma artística híbrida que abrange, entre outras coisas, música, literatura e artes dramáticas. Desenvolveu-se nos círculos da corte italiana no final do século XV e início do século XVI [5], [27]. A ópera pública teve início em 1637 em Veneza, com a inauguração do primeiro teatro de ópera: o Teatro SS. Giovanni e Paolo (Fig. 3.1). Esse teatro adotou uma disposição de assentos em forma de U, também conhecida como “ferradura”. Em 1654, passou por uma remodelação específica para ópera, ganhando cinco níveis de camarotes. Além disso, o palco profundo, capaz de criar efeitos dramáticos de perspectiva, tornou-se outra característica distintiva da época [5].

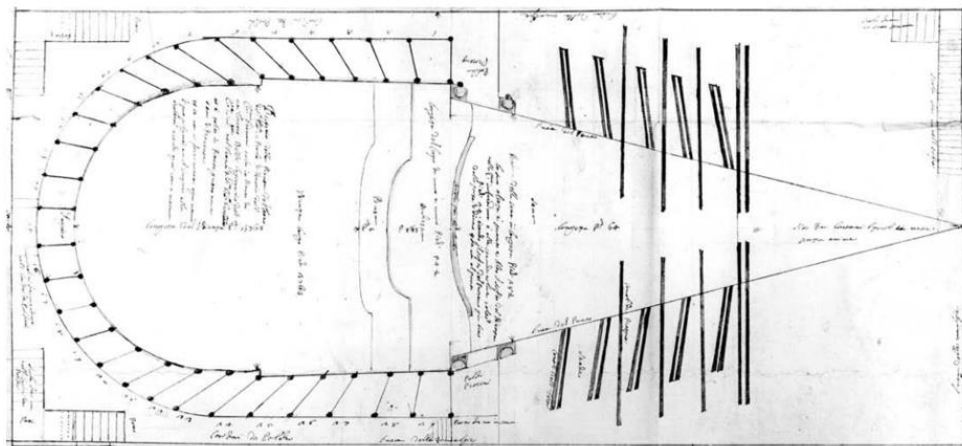


Figura 3.1 – Planta do Teatro SS. Giovanni e Paolo, Veneza, Itália [5].

O nível inferior da audiência, conhecido como *parterre* em francês, era destinado ao público que assistia aos eventos de pé. A audiência era separada do palco por um fosso, que era provavelmente um local de iluminação ou para algum mecanismo cênico.

Em frente a essa área, havia um espaço protegido por um peitoril, localizado ao nível da plateia e mais baixo que o palco, destinado aos músicos. Surgindo assim, a noção de uma área chamada “orquestra”, que difere em significado e uso da *orchestra* do teatro clássico, reservada ao coro (Fig. 3.2) [27].

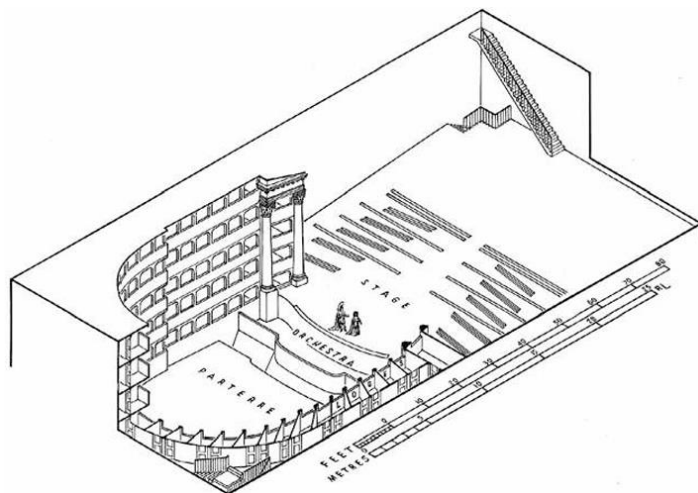


Figura 3.2 – Esquema do Teatro SS. Giovanni e Paolo, Veneza, Itália [27].

O palco, projetado com uma inclinação do fundo para a frente, apresentava um conjunto de painéis móveis que sustentavam a cenografia em perspectiva. Nesse contexto, a área de atuação era limitada ao prosccênio, com o cenário desempenhando principalmente o papel de um “pano de fundo” para a encenação [27].

Devido à separação física entre o palco e a plateia, a interação entre os atores e o público era bastante limitada, requerendo silêncio e atenção da audiência. O formato em U da plateia atendia eficazmente às necessidades acústicas, embora, segundo Barron, os balcões profundos e separados por paredes não favorecessem esse propósito [27].

Ao longo do tempo, o *layout* dos assentos passou para um formato elíptico truncado e a orquestra que inicialmente era posicionada na parte traseira do palco acabou sendo colocada abaixo do palco (fosso de orquestra), conforme nos dias atuais [15].

Esse modelo tornou-se a típica **sala de ópera barroca italiana**, estabelecendo-se como o padrão de *design* replicado em toda a Europa com poucas variações ao longo de dois séculos. A Itália emergiu como o epicentro da ópera na Europa, com um total de 388 óperas produzidas apenas em Veneza durante os anos entre 1637 e o final do século. A popularidade dessas óperas era tão significativa que os melhores cantores eram altamente requisitados, chegando a alternar entre os teatros durante as apresentações [15].

Nos projetos barrocos tradicionais, a diferença entre teatros dramáticos e salas de ópera era geralmente bem pequena. Havia uma distinção sutil no *design* da linha de visão, como por exemplo, para a ópera, todos os assentos exceto os da plateia, eram visíveis do fosso de orquestra. Nas salas de óperas também era usual a existência de camarotes, em que se adequava a clientela da elite, sendo a forma de *design* utilizada nas primeiras salas de grande escala: Teatro San Carlo (Nápoles), de 1737 e Teatro Alla Scala (Milão), de 1778 (Fig. 3.3) [5].



Figura 3.3 – Teatro San Carlo, Nápoles (esq.) e Teatro Alla Scala, Milão (dir.) [34] e [37].

A arquitetura teatral foi marcada por duas correntes tipológicas mais significativas do século XIX: A Ópera de Paris de Charles Garnier, concluída em 1875 e a Ópera de Bayreuth (Festspielhaus) de Richard Wagner e Otto Bruckwald, em 1876. Essas incorporaram em seus conceitos toda a tradição arquitetônica dos séculos anteriores. Enquanto que o primeiro era o principal edifício cultural da Paris de Haussmann, caracterizado por sua monumentalidade, apresentando escadarias e espaços abertos, o segundo foi projetado para acomodar eventos musicais temporários, com uma abordagem mais econômica de recursos [27].

Uma das grandes diferenças entre os dois edifícios, era a relação palco-plateia. No projeto de Garnier, a característica renascentista da rotura entre o palco e a plateia foi preservada, em que privilegiava o distanciamento e a passividade do observador. Uma evidência dessa separação era o arco de proscênio adornado com detalhes em ouro emoldurando o *background* cénico. Por outro lado, a Ópera de Bayreuth pretende uma relação cooperativa na construção dramática, em que ator e audiência são participantes do processo perceptivo. Isto dá-se pela adoção do “tipo wagneriano” em que a plateia tem formato de leque, com o palco localizado no centro como foco e com o proscênio sendo o elemento integrador entre o palco e a plateia. A figura 3.4 mostra comparativamente a planta desses dois edifícios para ilustrar a diferença da relação palco-plateia [27].

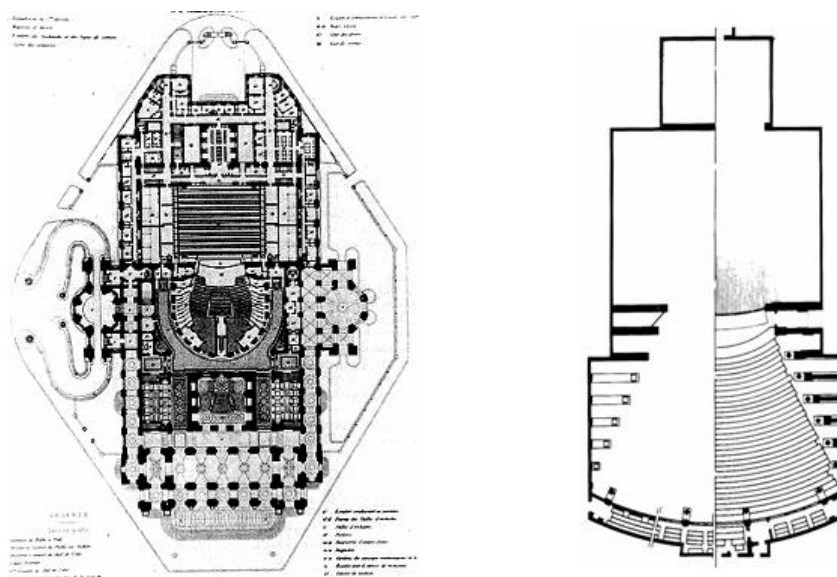


Figura 3.4 – Plantas da Ópera de Paris (esq.) e da Ópera de Bayreuth (dir.) [27].

3.1.2. ÓPERA (NÃO WAGNERIANA)

A ópera impõe diferentes requisitos acústicos comparativamente com os concertos de orquestra, isto é, a parte vocal deve ser considerada como alguma forma de comunicação não muito diferente da palavra. Para garantir a inteligibilidade, especialmente em composições de Mozart e Rossini com ritmos rápidos, é necessário um tempo de reverberação relativamente curto. Isso evita que as sílabas sucessivas sejam mascaradas pela reverberação dos sons imediatamente anteriores [38].

No entanto, em diferentes locais, a inteligibilidade da palavra em salas de óperas pode não ser totalmente essencial. Na Europa por exemplo, é comum apresentar óperas em uma língua compreensível para o público, sendo a compreensão das palavras valorizada pela maioria dos frequentadores de ópera. Por outro lado, na América, e possivelmente no Japão, a situação é diferente, pois a ópera raramente é executada na língua local, e os espectadores muitas vezes precisam recorrer a traduções para compreender a língua. Assim sendo, a ópera em outros lugares pode ser executada com tempos de reverberação mais longos do que as da Europa.

Com exceção das obras de Wagner, a ópera europeia encaixa-se bem em salas com acústica adequada ao concerto e à música do período barroco, ou seja, salas com alta definição e relativamente baixa plenitude de tom. Uns exemplos de salas de ópera que cumprem estes requisitos são: La Scala, em Veneza, San Carlo em Nápoles, Ópera de Paris Garnier, Royal Opera em Londres, Staatsoper em Viena e Academia de Música na Filadélfia. Nessas salas, as vozes dos cantores são projetadas para audiência com clareza e “volume” suficiente, além da orquestra soar limpa e sem distorções [38].

3.1.3. ÓPERA WAGNERIANA

Wagner rompeu com a tradição da ópera barroca e desenvolveu um estilo totalmente pessoal, mas que se inseria nas tradições do período romântico, chamadas de “dramas musicais”. Para alcançar um ambiente acústico perfeito para o seu próprio estilo musical, Wagner projetou o Festspielhaus em Bayreuth na Alemanha. Esta sala tem um tempo de reverberação bem longo de 1,6 segundos em frequências médias, totalmente ocupada.

As óperas de Wagner, com sua velocidade relativamente baixa, soam melhores em salas com um longo tempo de reverberação de aproximadamente 2 segundos em frequências médias. No entanto, para garantir a inteligibilidade da palavra, pode ser um pouco menor, por volta dos 1,6 segundos, ou até 1,8 se a proporção entre som precoce e reverberante for alta [38].

3.2. CONSIDERAÇÕES ACÚSTICAS PARA SALAS DE ÓPERA

3.2.1. ASPETOS GERAIS

Do ponto de vista subjetivo, os requisitos no *design* de um teatro de ópera envolvem garantir a inteligibilidade da palavra, clareza adequada no som da orquestra e proporcionar uma sensação adequada de reverberação. O equilíbrio entre a voz e o som da orquestra deve favorecer a voz, com ambos os elementos sendo suficientemente audíveis em todos os lugares.

Isso requer uma localização e orientação adequadas das superfícies da sala, juntamente com a escolha apropriada do tempo de reverberação, que serão abordados mais à frente [5].

O ambiente ideal para apreciar música ao vivo depende, em certa medida, do género musical apresentado. No entanto, há uma série de elementos comuns sobre os quais há um consenso geral [15]:

- O público deve sentir-se envolvido ou rodeado pelo som, ou seja, deve haver reflexões laterais com uma fração significativa da energia que chega lateralmente, particularmente após 80 ms desde a chegada do primeiro som;
- A sala deve oferecer suporte ao som instrumental, proporcionando um campo reverberante, cuja duração varia de acordo com o tipo de música executada;
- Para músicas mais rápidas, é importante existir clareza e definição para que possam ser apreciadas em detalhe. Isso implica na necessidade de reflexões de superfícies de suporte localizadas próximas à fonte ou ao recetor, garantindo assim um curto intervalo inicial de atraso;
- É essencial que o som tenha um “volume” apropriado, distribuído uniformemente por toda a sala. Quando o número de assentos ultrapassa um certo limite (mais de 2.600 assentos), tanto o “volume” quanto a definição podem ser prejudicados;
- O ruído proveniente de fontes externas e de equipamentos mecânicos deve ser controlado para que o som instrumental menos intenso possa ser ouvido;
- As características detalhadas de reverberação do espaço devem ser bem controladas sem ecos, sombras, ou outros defeitos;
- Os intérpretes precisam ter a capacidade de se ouvir uns aos outros de forma clara e receber um retorno reverberante semelhante ao experimentado pelo público.

3.2.2. A VOZ CANTADA

Uma grande questão para espetáculos de ópera é como os cantores se podem ouvir por uma orquestra. Geralmente uma grande ópera tem por volta de 100 músicos, em que seria impossível um cantor igualar a mesma potência sonora que esses instrumentos.

Primeiramente é importante perceber que o carácter sonoro ou timbre de diversos instrumentos musicais está ligado diretamente ao seu espectro de frequência. Em um som contínuo, o espectro se configura como uma série de frequências discretas. A mais baixa é denominada “**fundamental**” ou primeiro harmónico, enquanto que as mais altas consistem em múltiplos simples da frequência fundamental, identificadas como segundo, terceiro harmónico, e assim por diante. Os máximos no espectro que não mudam com a frequência fundamental são conhecidos como “**formantes**”, estes caracterizam ainda mais o som.

Para exemplificar, a figura 3.5 à esquerda representa o espectro de um clarinete com a sua frequência fundamental de 415 Hz, sendo este o harmónico mais forte. Já na figura 3.5 à direita encontra-se o espectro de uma trompa francesa, em que a região de frequência do harmónico mais alto é aproximadamente constante (formante de 310 Hz e fundamental de 123 Hz). Isto implica, por exemplo, que quando a trompa for tocada em seu registro mais grave, a fundamental será a mais fraca do que os harmónicos mais agudos.

Em conclusão, os ouvidos interpretam a combinação de frequências em relação ao seu tom, determinado pela frequência fundamental, ao mesmo tempo em que a força relativa dos harmônicos influenciam a qualidade do som ou timbre do instrumento [5].

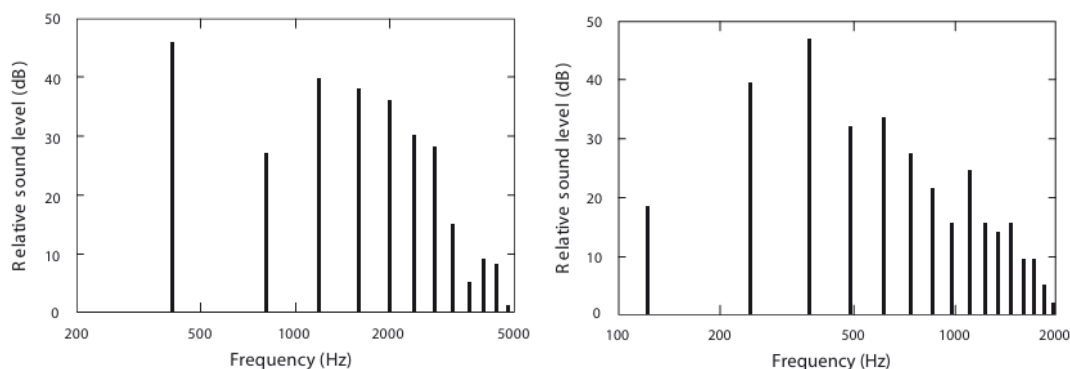


Figura 3.5 – Espectros do clarinete em sua faixa média (esq.) e da trompa francesa no seu registro inferior (dir.) [5].

A voz humana, por outro lado, é única em sua capacidade de variar a frequência do formante e utilizar isso para produzir diferentes sons vocálicos alterando a forma do trato vocal. Este atua como um ressonador que aumenta certas frequências e suprime outras (assemelha-se aos tubos nos instrumentos de sopro). Essa manipulação dos formantes da voz é o principal elemento dos cantores para aprimorar sua produção vocal e conseguir se sobressair aos instrumentos. Sundberg fez a descoberta de que um soprano pode aumentar sua produção vocal sem esforço adicional ao elevar a frequência do formante mais baixo para aproximá-lo da nota da frequência sendo cantada. Isto alcança-se apenas ao abrir mais a mandíbula [5].

Um outro ponto intrigante é a noção de “*singing formant*” em que Sundberg afirma ser típico de sons de cantores profissionais masculinos, em que a faixa do formante está entre 2.500 e 3.000 Hz. De acordo com a figura 3.6, nota-se que o espectro do som orquestral se encontra num valor bem baixo dentro desse intervalo de frequência, permitindo que cantor seja ouvido acima do som orquestral mais alto. Portanto, em termos arquitetônicos, a presença de um “*singing formant*” implica que o projeto deva melhorar a projeção dos cantores em frequências em torno de 3.000 Hz [5].

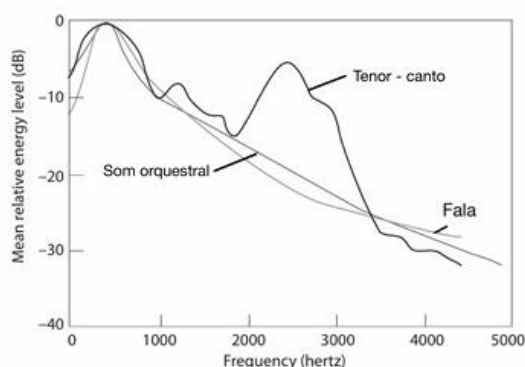


Figura 3.6 – Espectros do som orquestral e da voz cantada, mostrando o “*singing formant*” em torno de 3.000 Hz (adaptado de [5]).

Além do espectro de frequências, uma outra questão que influencia o coro, é o padrão direcional da saída sonora. Marshall e Meyer [5] fizeram uma medição sobre diretividade e potência de um canto barítono (voz masculina entre tenor e baixo) em planos horizontais e verticais presentes na figura 3.7. Eles concluíram:

- Ocorrem diferenças perceptíveis no timbre para cantores girando mais de 40° , o que se tornará prejudicial além de 80° . Portanto, reflexões, especialmente além do lado do prosccênio, devem ser utilizadas para minimizar esses efeitos;
- Uma reflexão do palco em frente ao cantor é especialmente valiosa e deve ser explorada sempre que possível;
- As reflexões laterais também são importantes e devem, sempre que possível, estar dentro de 60° da direção de visão do cantor;
- Os coros devem ser dispostos em degraus íngremes, com inclinação de pelo menos 45° .

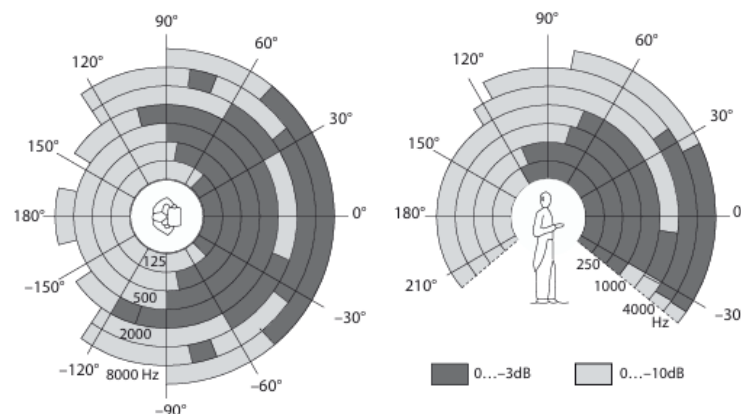


Figura 3.7 – Padrão de diretividade para um cantor barítono [5].

3.2.3. FORMA E TAMANHO

De todas as formas possíveis de auditório, a ópera é a mais restrita em termos de *design*. A necessidade dos cantores e a orquestra verem o maestro torna inevitável o palco do prosccênio, com a orquestra em um fosso entre o palco e os assentos da plateia. A maioria dos projetos de salas de ópera podem ser consideradas como intermediárias entre dois extremos de forma: o teatro barroco tradicional (ferradura) e a planta em forma de leque, introduzida inicialmente em Bayreuth por Wagner (Fig. 3.8).

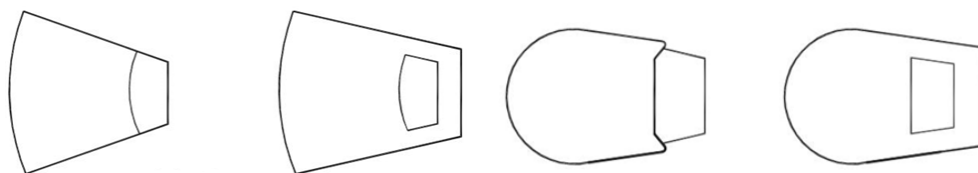


Figura 3.8 – Exemplo de formas utilizadas em teatros e salas de ópera: leque (esq.) e ferradura (dir.) [15].

A família Galli-Bibiena foi responsável pelo *design* de muitas salas de ópera do século XVIII. As plantas em forma de ferradura ou elíptica eram utilizadas tanto para ópera quanto para teatro nessa época. A diferença e importância dessas diversas formas de planta está mais relacionada à linha de visão do que à acústica, especialmente em espaços menores. A maior problemática acústica com essas formas curvas é o foco. No entanto, é provável que a inclinação acentuada do piso elimine esse problema, direcionando a área de foco acima das cabeças de qualquer público [5].

As considerações sobre a linha de visão estabelecem um ângulo máximo de visão em planta em relação ao palco, normalmente limitado a 30° (Fig. 3.9). A distância máxima do público ao palco é restrita tanto pela linha de visão quanto pela acústica, sendo comumente aplicado um valor de 30 metros para ópera [5].

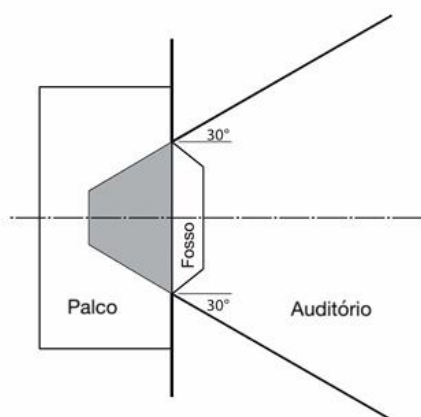


Figura 3.9 – O efeito do ângulo de visão na visibilidade do palco (adaptado de [5]).

Relativamente ao tamanho das salas, sabe-se que quanto menor, mais vantagens os cantores terão. Schoenberg escreveu no *The New York Times* em 1961: “É mais fácil cantar em uma casa pequena do que numa maior [...]. Cantores que soam de um jeito na Ópera Metropolitana tendem a soar diferente em teatros menores europeus. Eles dão a impressão de serem mais confortáveis e de facto são. Tudo isso torna a escuta mais relaxante.” [38].

3.2.4. GALERIAS/BALCÕES

Uma galeria ou balcões aproxima a audiência dos músicos e aprimora a visão, enquanto simultaneamente divide verticalmente a sala em espaços distintos. Tem a vantagem de garantir maior audiência sem aumentar em planta pois aproveita a distância vertical de um espaço tão alto.

Nas salas de ópera tradicionais existiam duas formas básicas de acomodação nos balcões: em camarotes (mais comum na Itália) ou em galerias abertas (comumente na Inglaterra). Dois exemplos são: o Teatro Colón, Buenos Aires (1908) com camarotes mais abertos que os famosos exemplares italianos e a Staatsoper de Viena (1869) com uma mistura de camarotes e galerias abertas como pode ser observado na figura 3.10.

Os camarotes eram uma característica comum nas salas de óperas dos séculos XVIII e XIX. Ao considerar a acústica em termos de ângulos de visão, tanto verticais quanto horizontais, torna-se evidente que qualquer sentido de reverberação diminui rapidamente à medida que o ouvinte se afasta da frente do camarote, não constituindo um bom *design* acústico [5].



Figura 3.10 – Teatro Colón, Buenos Aires (esq.) e Staatsoper de Viena (dir.) [35] e [36].

É fundamental, portanto, considerar cuidadosamente a geometria das galerias. Um desenho inadequado pode resultar em áreas de sombreamento, onde a reflexão das ondas sonoras é obstruída, ocasionando também bloqueios visuais. Isso pode impactar negativamente a experiência sensorial dos espectadores, conforme ilustrado na figura 3.11 [32].

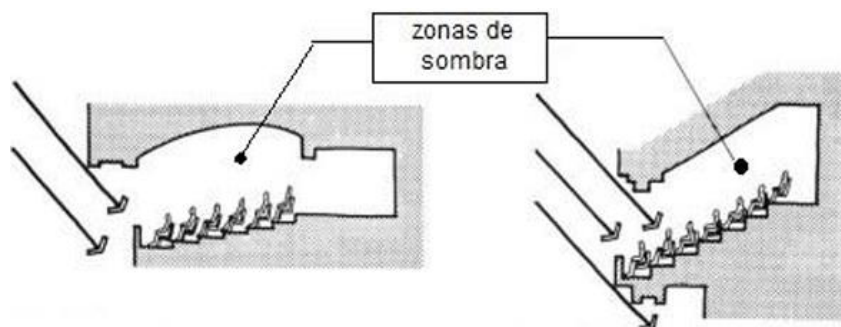


Figura 3.11 – Exemplos de galerias/balcões mal concebidas [21].

A profundidade da galeria, como mencionado acima é também um aspeto muito importante, pois quanto mais profunda, menor será a quantidade de energia reverberante, resultando em uma sensação reduzida de envolvimento e um tempo de reverberação menor para o ouvinte [5]. Beranek propõe, portanto, uma relação profundidade/altura (D/H) não superior a dois para salas de ópera. De acordo com Barron (1993), é recomendável estabelecer uma linha de visão direta entre o ouvinte mais distante e as superfícies refletoras superiores, garantindo que o ângulo entre o ouvinte e essas superfícies não seja inferior a 25 graus em salas de ópera (Fig. 3.12). Isto é, os espaços sob os balcões devem ser superficiais e com aberturas frontais mais altas [15].

É importante ressaltar as consequências acústicas que a adição de balcões repercutirá nas salas além do próprio *design*. Por exemplo, as frentes das galerias geram reflexões úteis pela sua superfície dura, porém como seu formato é curvo, é preciso que sejam ser inclinadas ou suficientemente difusas para evitar a focalização do som.

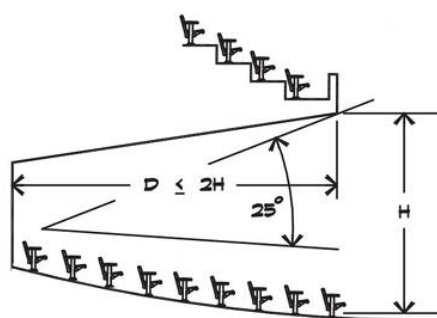


Figura 3.12 – Esquema da relação profundidade/altura (D/H) e da linha de visão das galerias para salas de óperas [15].

Uma outra questão acústica sobre os balcões são as regiões abaixo deles. O público sob esta saliência pode sentir-se isolado do volume principal do auditório (redução do nível sonoro) com perda de intimidade e sensação de distanciamento da acústica do espaço principal. Isto ocorre por conta de os cenários de palco serem geralmente acusticamente mais absorventes do que refletores, de modo que pouco som refletido chega ao público nesta direção, criando um pequeno ângulo de reflexões tardias (Fig. 3.13). Portanto, para melhorar o nível sonoro nesta zona, podem ser colocados sistemas reflexivos na parede traseira [5].

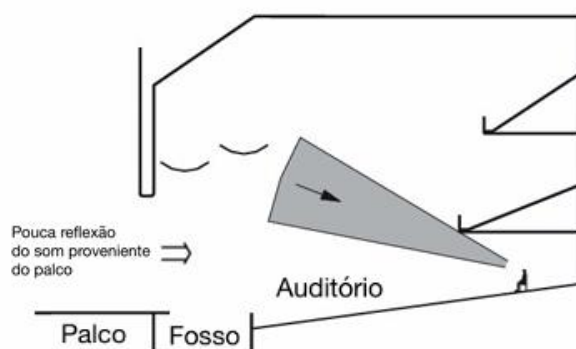


Figura 3.13 – Pequeno ângulo a partir do qual o som tardio pode chegar aos lugares abaixo de uma saliência (balcões) (adaptado de [5]).

3.2.4. PROSCÉNIO

Entende-se proscénio o sector da zona global de palco que se encontra mais próxima dos espectadores, isto é, o espaço entre a extremidade do palco e a primeira fileira de assentos [31].

Para grandes óperas, a largura do proscénio é normalmente de 14 m (também são encontrados tamanhos maiores de até 18 m) e a sua altura de até 9 m. O principal objetivo no projeto de uma sala de ópera é melhorar a qualidade sonora dos cantores em relação à orquestra. As superfícies imediatamente em frente ao proscénio estão mais próximas dos artistas e são capazes de desempenhar esse papel de maneira eficaz. Portanto, deve-se direcionar reflexões úteis do proscénio para o auditório através de uma orientação apropriada [5].

Na prática, prosccénios planos são pouco prováveis de serem os mais adequados. A presença de alguma difusão em níveis mais baixos tende a dispersar o som dos cantores, direcionando-o de volta para o palco e para o fosso. Justifica-se, assim, a introdução de pequenos elementos de dispersão no prosccénio para refletir uma parcela de energia de alta frequência da orquestra em direção à área de assentos da plateia como mostra a figura 3.14 [5].

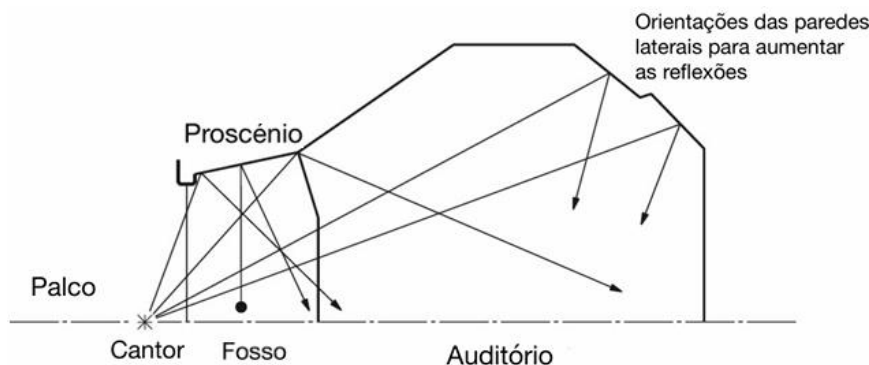


Figura 3.14 – Reflexões associadas à forma do projeto da ópera na planta (adaptado de [5]).

3.2.6. TECTO E PAREDES

O tecto é a principal superfície disponível para a reflexão acústica. Os tectos abobadados, que se tornaram populares no século XIX, tinham o efeito acústico de concentrar o som em direções inadequadas, muitas vezes privando aqueles que estão no nível mais alto dos assentos de uma reflexão proveniente do tecto.

A superfície imediatamente sobre o prosccénio, acima do fosso da orquestra, é potencialmente muito valiosa para realçar a voz dos cantores. Se o tecto se inclinar do prosccénio até ao tecto plano (Fig. 3.15), a voz do cantor será refletida maioritariamente nos balcões (que já recebem uma boa reflexão do tecto plano) e não na plateia onde são necessárias reflexões adicionais [5].

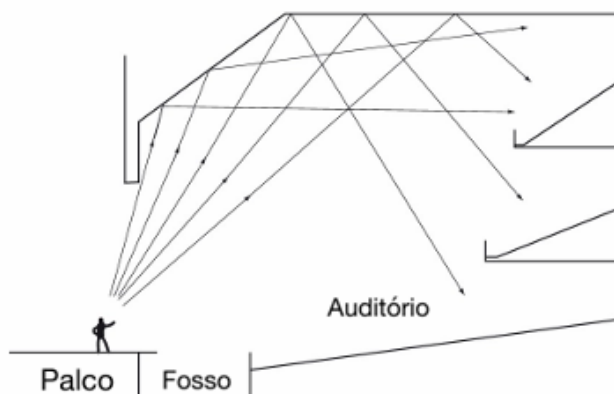


Figura 3.15 – Reflexões com um tecto inclinado do prosccénio até ao tecto plano (adaptado de [5]).

Entretanto, um projeto abrangente de tecto acústico foi proposto por Cremer, Nutsch e Zemke (1962), também discutido em Cremer e Müller (1982) para a Deutsche Oper em Berlim. Ao empregar um esquema de tecto inclinado reverso (Fig. 3.16), todas as zonas de audiência foram contempladas com reflexões provenientes do tecto. Os atrasos decorrentes dessas reflexões eram consistentemente inferiores a 50 ms, com a exceção do fosso [5].

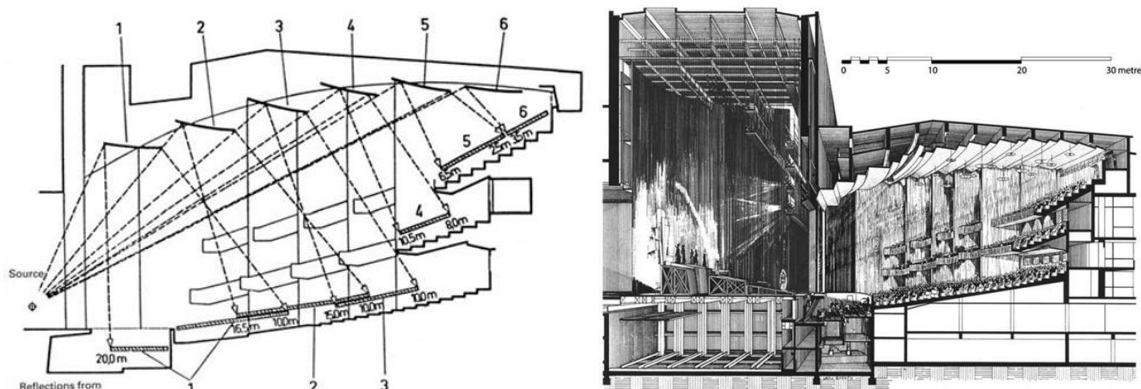


Figura 3.16 – Projeto de tecto proposto para a *Deutsche Oper* (esq.) e o projeto final do tecto utilizado (dir.) [5].

Quase todas as salas de ópera apresentam alguma forma de expansão nas paredes laterais principais da planta. Com um pequeno ângulo de abertura, pode ser necessário omitir quaisquer orientações especiais. Numa planta em forma de leque, a área de assentos mais fraca tende a ser a plateia central, a cerca de três quartos do caminho para trás do palco como pode ser observado na figura 3.14. No caso das paredes traseiras nas salas de óperas tradicionais, essas eram geralmente curvas, causando perturbações na focagem de áreas específicas de assentos na plateia, portanto nos *designs* mais modernos é preferível que essas paredes traseiras sejam superfícies planas [5].

3.2.7. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Os requisitos acústicos conflitantes para a **inteligibilidade da palavra** e o **desempenho musical** obviamente têm a ver com a questão do tempo de reverberação apropriado para salas de ópera. Teoricamente, deve-se melhorar as primeiras reflexões até ao ponto em que a palavra seja inteligível (isto acontece automaticamente para assentos abaixo das saliências dos balcões). As reflexões tardias traduzem um som inadequado, no entanto, na ópera, as reflexões extras são provavelmente mais aceitáveis e desejáveis [5].

Um tempo de reverberação de apenas 1,0 segundos é certamente inferior ao ideal para a música, enquanto que 1,8 segundos é considerado ideal para a música orquestral, mas é pouco provável que proporcione boa inteligibilidade à palavra. Por exemplo, as salas de ópera utilizadas nas estreias das óperas de Mozart apresentavam tempos de reverberação próximos a 1,0 segundos. No entanto, para a maioria das óperas românticas tardias, tempos mais prolongados são necessários, especialmente para obras de Wagner. Portanto, os tempos de reverberação para ópera entre 1,3 e 1,8 segundos parecem adequados [5].

Para além disso, deve-se levar em consideração as **propriedades de frequência** adequadas para um tempo de reverberação apropriado. Portanto, os tempos de reverberação entre 2.000 e 4.000 Hz devem ser maximizados sempre que possível devido à existência do “*singing formant*” [5].

Para exemplificação de valores de TR em salas internacionais, o quadro 3.1 mostra 16 salas de óperas com um TR médio de 1,5 segundos. As seis maiores salas (Costa Mesa, Nova Iorque, Tóquio, Paris Bastille, Rochester e São Francisco) tem os maiores TR entre 1,55 e 1,80 segundos, sendo balanceado com quatro casas menores (Londres, Milão, Paris Garnier e Viena) entre 1,1 e 1,3 segundos. Em salas de concertos o tempo médio de reverberação é cerca de 1,7 segundos (ocupados) e a média do rácio de baixos (*BR*) é de 1,10. Já para salas de ópera, de acordo com o quadro 3.2, a média de *BR* é maior (1,18). Essa diferença parece não ter nenhum significado, exceto o facto de gerar mais suporte às vozes masculinas. O parâmetro *ITDG* (*initial time delay gap*) é considerado a diferença entre o instante em que o som direto chega em determinado ponto de captação e o instante em que chega a primeira reflexão. Para salas de óperas este parâmetro é condicionado por frentes laterais dos balcões, painéis suspensos, ou paredes laterais, o que devolve as primeiras reflexões fortes ao centro do piso principal. Todas as salas de ópera altamente respeitadas têm o valor menor do que 30 ms, perto do ideal. As maiores salas, Rochester e São Francisco, fazem ultrapassar 42 ms. De acordo com Beranek, a faixa ideal de *ITDG* para salas de ópera pode se estender até 24 ms, apesar de cerca de 40 ms ser aceitável [38].

Quadro 3.1 – Características básicas de salas de ópera ou usadas para ópera [38].

Casas de Ópera	Nº assentos	Volume (m³)	TR ocupado [500, 1.000 Hz] (s)	EDT não ocupado (s)	BR ocupado	ITDG (ms)
Bayreuth, Festspielhaus	1.800	10.308	1,55	-	1,11	14
Bloomington, Univ. Auditorium	3.718	25.545	1,40	-	1,12	40
Buenos Aires, Teatro Colón	2.487	20.570	1,8*	-	-	19
Costa Mesa, Segerstrom Hall	2.994	27.800	1,60	2,15	1,32	31
Londres, Royal Opera House	2.120	12.250	1,10	1,05	1,07	18
Milão, Teatro Alla Scala	2.289	11.252	1,20	1,20	1,21	20
Nova Iorque, Met. Opera House	3.816	24.742	1,80	2,25	1,20	34
Paris, Opera Bastille	2.700	21.000	1,55	1,60	1,05	41
Paris, Opera Garnier	2.131	10.000	1,15*	1,20	-	17
Filadélfia, Academy of Music	2.827	15.100	1,20	1,20	1,12	19
Rochester, Eastman Theatre	3.347	23.970	1,65	-	1,26	55
Salzburg, Festspielhaus	2.158	14.020	1,50	1,90	1,10	23
São Francisco Opera House	3.252	20.900	1,50*	-	-	51
Tóquio, Orchard Hall	1.928	17.050	1,80	-	1,12	26
Viena, Staatsoper	1.709	10.665	1,30	1,40	1,10	15
Washington, Kennedy Opera House	2.142	13.027	1,50	-	1,30	-

*estimado

Existe um outro conflito em grandes salas de óperas, entre a necessidade de **reflexões precoces** e de um **grande volume no auditório** para proporcionar um tempo de reverberação relativamente longo. Entretanto, a utilização de superfícies refletoras suspensas, em frente ao prosaénio, são uma solução possível para esse requisito conflitante [5].

O **tecto** é uma outra característica arquitetónica que influencia o valor do tempo de reverberação. Se o tecto já for suficientemente alto, expandir esse volume central pode resultar em um aumento no tempo de reverberação. Um esquema alternativo foi empregado já em 1878 por Semper em Dresden, onde a sala incluía espaços reverberantes adicionais ao redor do nível superior dos balcões [5].

O volume dos **assentos** também é um outro fator com influência no tempo de reverberação e no “ganho” do ambiente (embora seja menos preciso do que o volume dividido pela área do público). Em espaços de baixa capacidade, é necessário um volume elevado por lugar para controlar o excesso de volume. Em contrapartida, em ambientes de maior capacidade, um volume reduzido por assento contribui para preservar a energia acústica [15].

Foi realizado um estudo em que se extraiu uma relação empírica entre o volume e tempos de reverberação ocupados em frequências médias com dez salas de óperas (Fig. 3.17). Com base na relação encontrada, por exemplo, para um tempo de reverberação, de frequência média, de 1,7 segundos, é necessário um volume de quase 10 m³ por lugar [5].

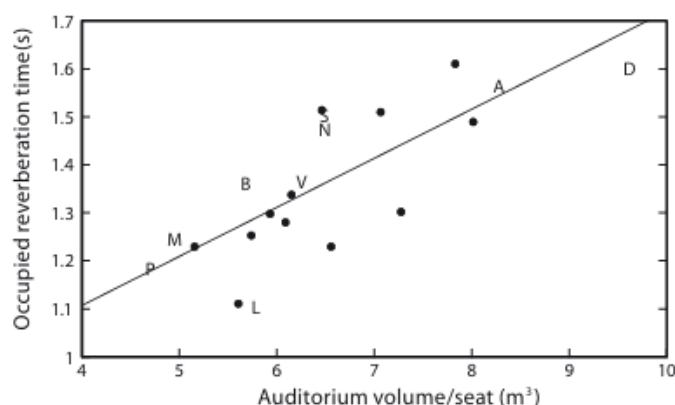


Figura 3.17 – Volumes e tempos de reverberação ocupados em frequências médias de dez salas de ópera: B, Deutsche Oper, Berlim; C, Coliseu de Londres; D, Ópera Sempre, Dresden; F, Festspielhaus, Bayreuth; L, Covent Garden, Londres; M, La Scala, Milão; N, Metropolitan Opera House, Nova Iorque; S, Ópera de Sydney, Teatro de Ópera; V, Staatsoper, Viena; X, Ópera de Buxton [5].

Em grandes salas, a principal superfície absorvente é o público sentado, alterando diretamente o campo reverberante. Torna-se, pois, indispensável a utilização de assentos com absorção sonora semelhantes à de um ocupante para manter um ambiente acústico consistente independente do número de pessoas. Nessas salas, é comum os assentos serem acolchoados, o que gera uma variação considerável dependendo da espessura do forro. Beranek e Hidaka realizaram um estudo dos coeficientes de absorção de assentos acolchoados em dez salas, antes e depois da instalação desses, variando no seu tipo de estarem ocupados ou desocupados (Quadro. 3.2) [15].

Quadro 3.2 – Coeficientes de absorção sonora médios de assentos [15].

Tipo de assento	Frequência central da banda de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Desocupado						
Pesado	0,70	0,76	0,81	0,84	0,84	0,81
Médio	0,54	0,62	0,68	0,70	0,68	0,66
Leve	0,36	0,47	0,57	0,62	0,62	0,60
Ocupado						
Pesado	0,72	0,80	0,86	0,89	0,90	0,90
Médio	0,62	0,72	0,80	0,83	0,84	0,85
Leve	0,51	0,64	0,75	0,80	0,82	0,83

3.2.8. A ORQUESTRA NO FOSSO

O fosso de orquestra, representa o espaço designado para posicionar a orquestra abaixo do palco, diferenciando-se da disposição habitual onde a orquestra se encontra atrás ou no palco (Fig. 3.18). Este componente desempenha um papel de destaque em salas de ópera diferentemente das salas de concertos tradicionais [15].



Figura 3.18 – Fosso de orquestra no Teatro Regio, Torino, Itália [10].

As dimensões típicas dos fossos estão representadas na figura 3.19. Esses podem ser abertos ($V=0$) ou parcialmente fechados (V entre 1 e 2 m apesar de existirem salas com maiores valores), altura (D) deve estar compreendida entre 2,5 e 3,5 m (valor suficiente para acomodar contrabaixos) e a altura da barreira, entre a orquestra e as primeiras filas (H), deve corresponder a uma altura de 1 m como mostra a figura 3.19. O tamanho do fosso será normalmente calculado com base no número de músicos a serem acomodados [15].

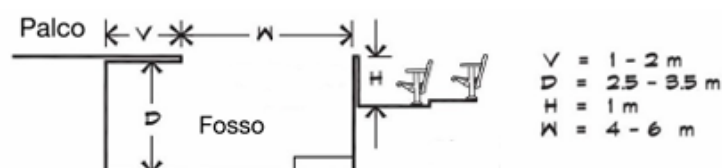


Figura 3.19 – Dimensões típicas dos fossos de orquestra (adaptado de [15]).

Colocar a orquestra num palco elevado numa sala de concertos tem como objetivo otimizar tanto as linhas de visão quanto a transmissão acústica, garantindo uma visibilidade adequada para o público e promovendo uma transmissão sonora mais direta. Por outro lado, ao colocar a orquestra num fosso, a comunicação sonora direta entre os músicos e a plateia é comprometida. Porém, a existência de um fosso diminui o “volume” da orquestra em relação aos cantores e oferece um espaço onde os músicos podem ser visualizados pelo maestro, mesmo se localizado fora do campo de visão do público [15].

Sabe-se que o som sofre difração nas arestas, porém esta depende da frequência. As baixas frequências refletem mais do que as altas, resultando em uma falta de brilho do som orquestral nas salas de óperas. Essa atenuação causada pela difração é uma função do caminho extra que o som deve percorrer. Isto pode ser reduzido com uma inclinação da plateia como se pode observar na figura 3.20. Para aumentar a reflexão das altas frequências, pode ser utilizada formas com poucas saliências nas superfícies adjacentes ao fosso e na frente dos balcões [5].

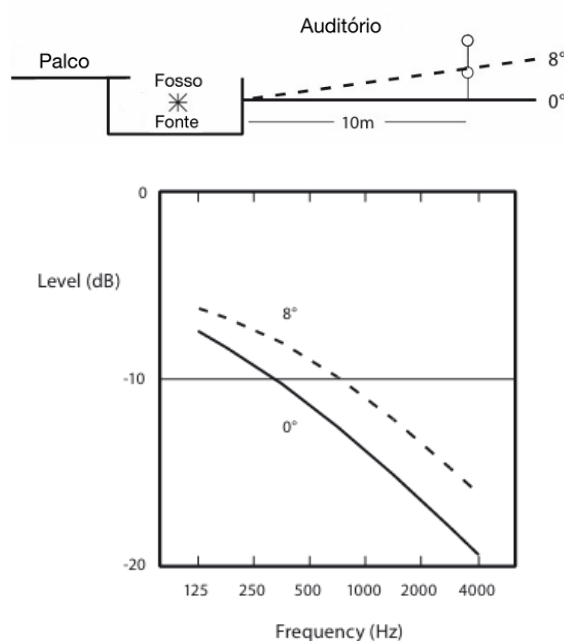


Figura 3.20 – Redução do nível sonoro devido à difração ao redor do fosso, para duas inclinações da plateia (adaptado de [5]).

Existem outros requisitos fundamentais para garantir um funcionamento eficiente e adequado. Por exemplo, os músicos no fosso devem ser capazes de se ouvir uns aos outros, assim como aos cantores. Os cantores, por sua vez, devem ser capazes de ouvir a orquestra para que cada um possa ajustar o seu nível sonoro, ou seja, não é desejável, por exemplo, que a orquestra sobressaia face aos cantores. Porém esses requisitos nem sempre são satisfeitos pois trata-se de desafios muito complexos de harmonizar [5], [15].

Em um questionário realizado com 5.000 espectadores de ópera foi descoberto que eles consideravam o nível sonoro da orquestra muito alta em relação ao dos cantores. Esta melhoria do equilíbrio pode ser alcançada por meio da utilização de um fosso parcialmente coberto (Fig. 3.21). No entanto, essa abordagem deve ser cuidadosamente considerada em relação à possível resistência dos músicos em se apresentarem nessas condições [5].

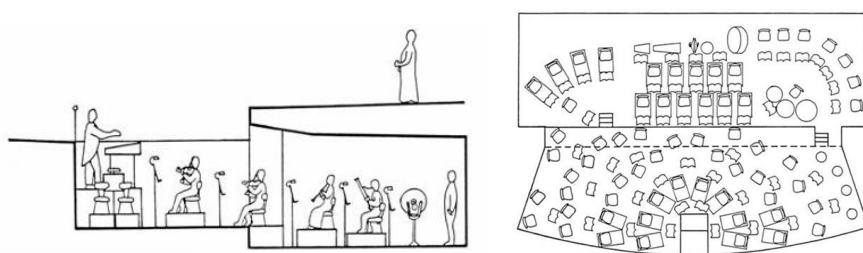


Figura 3.21 – Disposição típica num fosso da orquestra parcialmente coberto [5].

A causa das queixas dos músicos em relação aos fossos cobertos é bastante clara, como por exemplo, problemas de falta de espaço. A necessidade de manter a linha de visão com o maestro resulta num fosso inclinado com plataformas ou caixas para elevação no nível do piso, reduzindo substancialmente o espaço disponível. Para além do espaço, os níveis sonoros excessivos em fossos cobertos também são motivo de reclamações, pois geram um ambiente perturbador e perigoso. Naylor relata valores medidos para uma ópera de 86 a 92 dB(A) com picos de 105 a 110 dB(A) que ocorrem duas a três vezes por ópera. Esses valores podem ser comparados com valores limites europeus máximos de 87 dB(A) para um dia de trabalho de oito horas. Tal exposição constante a este nível sonoro pode levar a perdas auditivas. As superfícies do fosso podem ser tratadas com absorção ou difusão, para reduzir os níveis sonoros, mas também diminuirá a comunicação entre os músicos, e sem retorno suficiente, eles tendem a tocar mais alto, anulando a intenção do tratamento absorvente e até sobressaindo aos cantores.

A Ópera Real de Estocolmo conduziu uma pesquisa sobre a área média do fosso por músico para diversas salas de óperas com 46 respostas. A área média foi de 1,7 m² com um máximo de 2,1 m². Apenas os fossos com área útil de 2,1 m² por músico foram considerados como tendo níveis sonoros aceitáveis e melhor desempenho em conjunto.

Outra problemática é a comunicação a partir do palco, em que a maioria dos músicos comentou que não conseguia ouvir os cantores tão bem quanto gostaria, pois, a quantidade do som que retorna do auditório é muito pequena. Em termos acústicos, a secção suspensa de um fosso comporta-se como um espaço acoplado ao auditório, com duplo declive do decaimento do som reverberante. O primeiro declive é determinado pelas condições acústicas locais no fosso com taxas de decaimento correspondentes a tempos de reverberação de 0,35 a 0,70 segundos e o segundo decaimento corresponde a tempos de reverberação maiores no auditório. O resultado final é que o músico na parte coberta do fosso só consegue ouvir o som de retorno do auditório quando ninguém por perto estiver a tocar. De acordo com Blair, maximizar a altura dos fossos suspensos e ter um tecto inclinado ajuda nas reflexões tardias de volta ao fosso, provenientes de superfícies acima dele. Ele exemplifica com duas salas de ópera particularmente apreciadas por maestros e orquestras: a Ópera Garnier em Paris e o Teatro Colón de Buenos Aires.

Na maioria dos casos, encontrar uma solução para esses vários problemas não é uma tarefa fácil. As principais variáveis não acústicas incluem as dimensões físicas do fosso, o grau de cobertura e a altura da abertura, entretanto, em estudos mais recentes, o parâmetro que se considerou o mais importante é o tamanho da fossa. Embora grandes fossos possam favorecer os músicos, eles tendem a deixar um grande abismo entre o público e o palco. Portanto, conciliar estes vários conflitos é um grande desafio nas novas salas de ópera [5].

3.3. ACÚSTICA VARIÁVEL

Os ambientes com características polivalentes necessitam de soluções acústicas com alguma flexibilidade, ou seja, com distintas respostas acústicas para cada exigência de utilização. Nessa circunstância, faz sentido recorrer ao conceito de acústica variável, isto é, soluções acústicas que conseguem gerar distintos comportamentos acústicos do espaço dependendo do modo como se pretende utilizá-lo [25].

Existem diversas formas práticas de modificar as condições acústicas de um ambiente para atender a diferentes exigências, isto, graças a variação do tempo de reverberação. Na fórmula de Sabine (eq. 2.13) o TR varia em função de dois parâmetros, o volume do ambiente (influenciado pela geometria ou arquitetura do espaço) e a absorção sonora do espaço (relacionado com as superfícies envolventes do espaço). Portanto, utiliza-se dispositivos mecânicos ou manuais para variar a absorção sonora e/ou o volume de um espaço [1], [25].

A) Variação da Absorção Sonora

Para a variação da absorção sonora, existem sistemas que empregam painéis móveis que são refletores ou absorventes em função da sua colocação. No entanto, esses sistemas de acústica variável restringem-se a modificar apenas a área de absorção/difusão das superfícies laterais e/ou superiores de um ambiente [25].

Baseado no deslocamento reversível dos painéis de sua posição original, o princípio de funcionamento desta estratégia aproveita as características de absorção das faces expostas dos painéis. Dessa forma, quando for necessário reduzir o tempo de reverberação, a face absorvente dos painéis deve ser exposta. Por outro lado, para alcançar um valor mais elevado do tempo de reverberação, esses painéis podem apresentar a face refletora [1], [25].

Uns exemplos desses sistemas em pormenor são [32]:

- **Cortinas retráteis:** são cortinas densas de veludo ou têxtil que ficam 100% esticadas para uma função absorvente. Quando essas não são mais necessárias (por exemplo para situações de perceção musical) são resguardadas em um compartimento (Fig. 3.22);

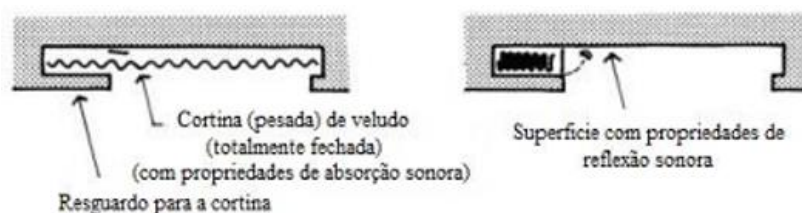


Figura 3.22 – Cortinas retráteis com absorção sonora [25].

- **Superfícies deslizantes:** esse sistema consiste em dois painéis de material refletor perfurado, utilizados para variar a absorção sonora de acordo com o alinhamento dos furos. Os painéis deslizam um na frente do outro em que ou mantém os furos alinhados (permite a passagem do som para o tratamento de absorção sonora por detrás dos painéis) ou escalonados (bloqueia este caminho garantido máxima reflexão) como mostra a figura 3.23;

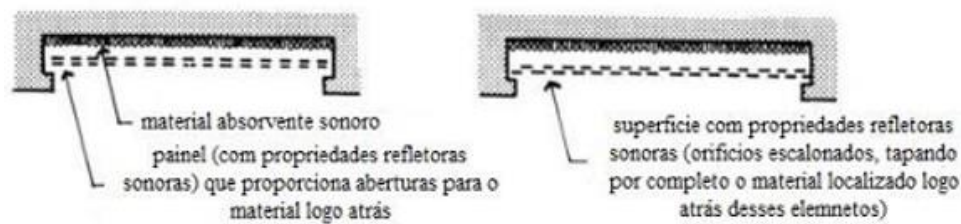


Figura 3.23 – Superfícies deslizantes [25].

- **Painéis articulados:** esse sistema consiste na movimentação de painéis refletores articulados de acordo com o uso pretendido da sala. Em casos de absorção sonora, o material absorvente instalado no verso dos painéis é exposto e, em situações contrárias, de maior reflexão, são articulados de forma que apenas a superfície refletora dos painéis sejam expostas (Fig. 3.24);

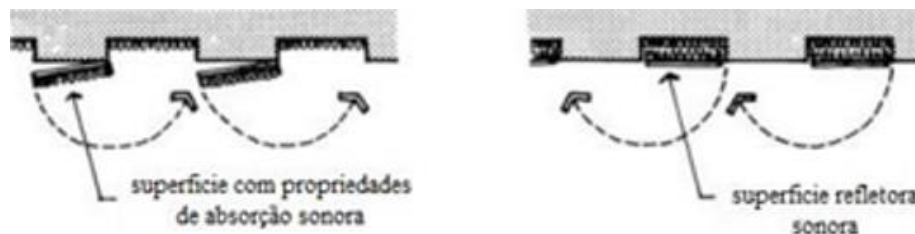


Figura 3.24 – Painéis articulados [25].

- **Elementos rotativos:** diferentemente dos anteriores referidos, este apresenta um sistema que gera, não apenas a reflexão, mas também a difusão devido a sua geometria particular. São dispositivos em forma de prisma triangular que rodam mediante a necessidade do espaço. Um dos lados é provido de material absorvente enquanto que o vértice permite a reflexão e difusão das ondas como pode ser observado na figura 3.25.

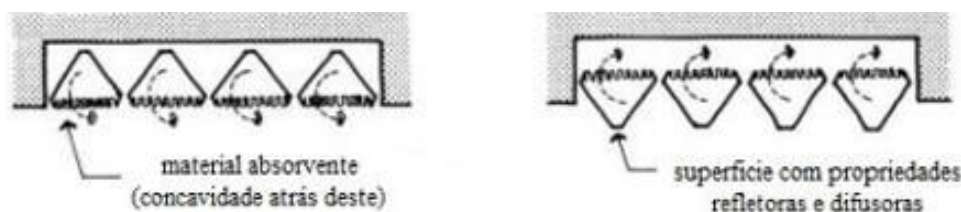


Figura 3.25 – Elementos rotativos [25].

B) Variação no Volume do Espaço

Apesar dos métodos de variação do volume do espaço não serem tão usuais quanto os anteriores, estes permitem diferentes configurações de salas e consequentemente diferentes usos. Essencialmente, os sistemas que se baseiam na modificação do volume do ambiente empregam quatro métodos principais [25]:

- **Subdivisão do espaço por meio de uma estrutura vertical:** é colocado uma estrutura vertical para encurtar o espaço como se pode observar na imagem à direita da figura 3.26, em que ocorre maior número de reflexões devido a diminuição da distância entre a fonte e as superfícies com a estrutura divisória;

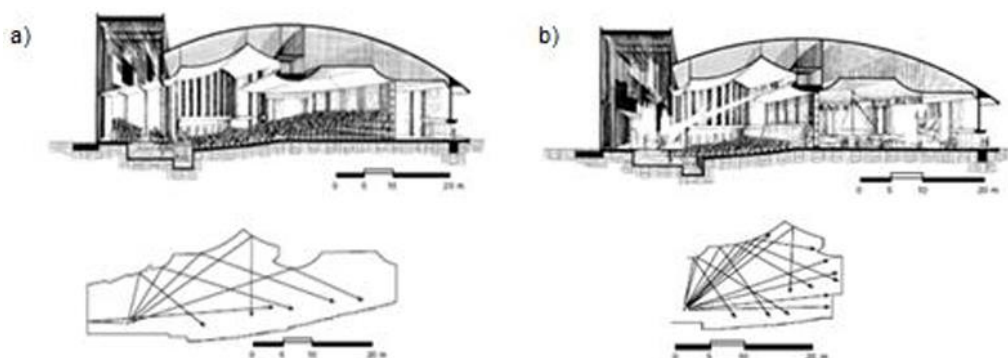


Figura 3.26 – Exemplo de uma solução sem (a) e com (b) a estrutura divisória [25].

- **Implementação de um tecto falso com um sistema de abertura e fechamento:** esta é uma solução de grande utilidade, pois é comum encontrar ductos e tubagens acima da sua estrutura, e assim, com esta adição de volume é possível ganhar um melhor tempo de reverberação. Nota-se que neste espaço é importante não adicionar materiais absorventes e sim manter um ambiente reverberante;
- **Uso de câmaras reverberantes acopladas à sala:** estas seriam acopladas à sala na zona perimetral e quando não se torna necessário mais o seu uso existe a possibilidade de serem fechados. Esses absorvem parte da energia do espaço e a liberam em um momento subsequente com um nível mais baixo.
- **Painéis móveis suspensos no tecto** (Fig. 3.27): esses têm como princípio diminuir o amplo volume da sala, podendo também ser utilizados para ocultar, por exemplo, cadeiras localizadas no fundo do recinto. Quando todos os painéis estão planos, geram fortes reflexões para uma melhor inteligibilidade da palavra, enquanto que apenas uma percentagem está aberta, proporciona reflexões gerais mais propícias para música.



Figura 3.27 – Teatro Bruce Mason, Auckland, Nova Zelândia (exemplo de uma solução com uso de painéis suspensos no tecto) [25].

Um exemplo real em que se atinge três diferentes usos em apenas um espaço, é o *Edwin Thomas Hall*, Universidade de Akron, Akron, Ohio. Na figura 3.28 está presente a configuração para salas de concerto de 3.000 lugares; na figura 3.29 para salas de óperas com 2.300 lugares e por fim na figura 3.30 uma configuração de salas de teatro dramático com apenas 900 lugares [32]. Consegue-se, ao reduzir o volume da sala, uma redução de 1,80 s para 1,12 s entra as duas situações extremas [33].

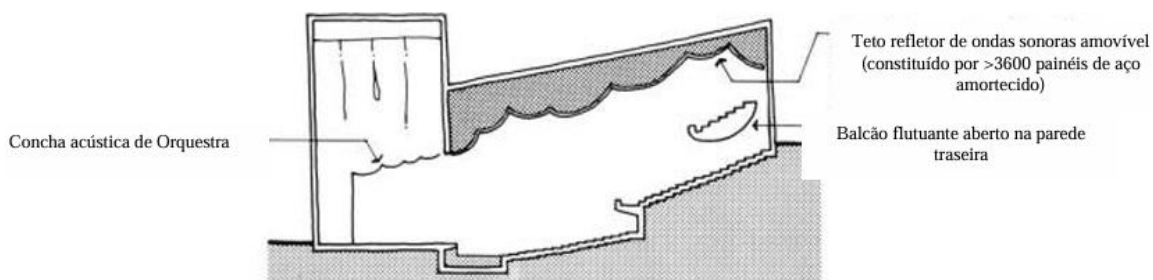


Figura 3.28 – *Edwin Thomas Hall* adaptado para salas de concerto (3.000 lugares) [33].

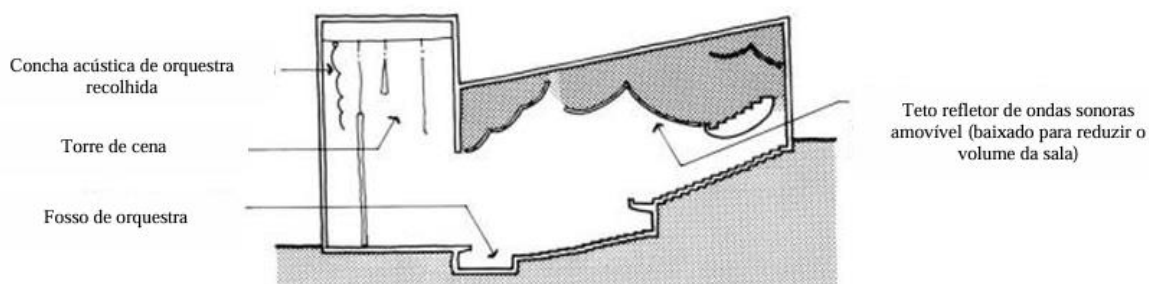


Figura 3.29 – *Edwin Thomas Hall* adaptado para salas de ópera (2.300 lugares) [33].

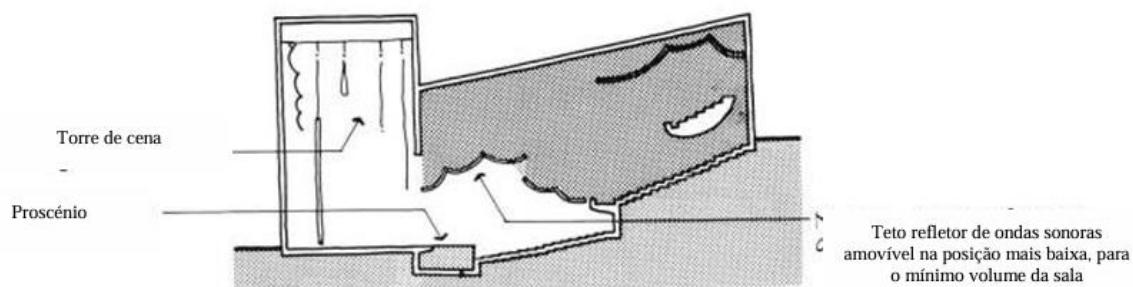


Figura 3.30 – *Edwin Thomas Hall* adaptado para teatro dramático (900 lugares) [33].

3.4. LEGISLAÇÃO PORTUGUESA

No momento desta presente dissertação, em Portugal, no que diz respeito à legislação que regula os requisitos acústicos nos edifícios, está em vigor o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), estabelecido originalmente em 2002 pelo Decreto-Lei n.º 129/2002, tendo sido posteriormente alterado em 2008 pelo Decreto-Lei n.º 96/2008. Essa alteração, no âmbito do RRAE, inclui critérios mínimos para os edifícios de unidades hoteleiras, auditórios, salas de espetáculo e cinemas de modo a evitar a necessidade de posteriores correções acústicas.

O RRAE visa regular a vertente do conforto acústico no regime da edificação e contribuir para a melhoria da qualidade do ambiente acústico e para o bem-estar e saúde da população, pela melhoria do projeto e construção dos edifícios. Ele inclui principalmente critérios para isolamento sonoro a ruídos aéreos e de percussão.

As determinações do presente Regulamento aplicam-se à construção, reconstrução, ampliação ou alteração dos seguintes tipos de edifícios, em função dos usos a que os mesmos se destinam [26]:

- Edifícios habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras (artº 5);
- Edifícios comerciais e de serviços, e partes similares em edifícios industriais (artº 6);
- Edifícios escolares e similares, e de investigação (artº 7);
- Edifícios hospitalares e similares (artº 8);
- Recintos desportivos (artº 9);
- Estações de transporte de passageiros (artº 10);
- Auditórios e salas (artº 10-A).

O Teatro Nacional São João é utilizado maioritariamente para ópera e teatro, portanto o artigo 10º-A (“Auditórios e salas”) apresenta os requisitos acústicos que este teatro deve cumprir [26], [28].

O ponto 1 do art. 10º-A refere-se a **recintos cuja principal valência corresponda a atividades assentes na oratória** (auditórios, salas de conferência/polivalentes e salas de cinema) com os seguintes requisitos:

- Um limite máximo para o **tempo de reverberação médio (T)**, nas bandas de oitava nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz considerando apenas o volume interior do recinto (V) em m^3 (quando mobilados normalmente e sem ocupação) de acordo com as expressões 3.1, 3.2 e 3.3:

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

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

$$T \leq 0,05 \times V^{\frac{1}{3}} \quad \text{se } V \geq 9.000 \, m^3 \quad (3.3)$$

- O projeto acústico destes espaços deve incluir um estudo que assegure uma reverberação adequada e uma boa inteligibilidade da palavra nos diversos locais do recinto

O ponto 2 refere-se a **recintos cuja principal valência não corresponda a atividades assentes na oratória** (auditórios para música e salas de espetáculo) onde o projeto acústico destes espaços deve incluir um estudo que assegure a conformação acústica adequada à sua utilização funcional.

De acordo com o ponto 3 a **fachada dos recintos** devem assegurar um valor do **nível sonoro contínuo equivalente (L_{Aeq})** do ruído ambiente no interior do teatro que satisfaça a expressão 3.4. Este é determinado a partir da média espacial de pontos representativos na ausência de funcionamento das instalações técnicas do edifício.

$$L_{Aeq} \leq 30dB \quad (3.4)$$

De acordo com o ponto 5 no **interior dos recintos** (exceção dos cinemas, em que este tem um limite maior) o **nível sonoro contínuo equivalente do ruído particular (L_{Aeq})** associado ao funcionamento dos equipamentos e instalações técnicas (instalações de aquecimento, ventilação e ar condicionado) deve satisfazer, com a sala desocupada, a expressão 3.5:

$$L_{Aeq} \leq 30dB \quad (3.5)$$

De acordo com os pontos 8 e 9, as avaliações realizadas *in situ* devem considerar um **fator de incerteza I**, relacionado com a determinação das grandezas em causa. Portanto, os valores do **tempo de reverberação médio (T)** devem ser reduzidos pelo fator I no valor percentual de acordo com o limite regulamentar nas expressões 3.6, 3.7 e 3.8.

$$25\% \quad se \quad V < 250 m^3 \quad (3.6)$$

$$35\% \quad se \quad 250 \leq V < 9.000 m^3 \quad (3.7)$$

$$40\% \quad se \quad V \geq 9.000 m^3 \quad (3.8)$$

Para além do tempo de reverberação, o valor obtido para o nível de ruído particular (L_{Aeq}) também deve ser diminuído do fator de incerteza I no valor de 3 dB e satisfazer o limite regulamentar.

4

METODOLOGIA

4.1. O TEATRO NACIONAL SÃO JOÃO

4.1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

O Teatro Nacional São João localiza-se ao lado Sul da Praça da Batalha, no centro histórico da cidade do Porto em Portugal (Fig. 4.1 e 4.2). Este foi denominado originalmente como “Real Teatro de São João”, a sua original edificação foi construída em 1794 por determinação de Francisco de Almada e Mendonça pelo arquitecto italiano Vicente Mazzoneschi [39].

Antes de receber o nome de “Real Teatro de São João”, esta instalação era inicialmente conhecida como “Teatro do Príncipe”, em virtude de sua inauguração, em 1798, com a peça teatral “A Vivandeira”, comemorativa do trigésimo primeiro aniversário do príncipe regente, o futuro D. João VI [39].



Figura 4.1 – Teatro Nacional São João [40].



Figura 4.2 – Localização do Teatro Nacional São João [41].

O arquitecto Vicente Mazzoneschi havia sido cenógrafo do Teatro de São Carlos em Lisboa, e por essa razão a estrutura do interior do original Real Teatro de São João era semelhante à do Teatro de São Carlos, em que ambos apresentavam um estilo de teatro italiano; considerado um estilo de sucesso na época.

Este teatro sofreu inúmeras remodelações nos anos seguintes, sendo destinado a ópera italiana e declamação portuguesa. Era constituído por quatro andares com várias janelas de peitoril, enquanto que na fachada principal exibia o brasão real. Interiormente, possuía frisas, três níveis de camarotes - superior, geral, balcão de primeira e segunda fila - e galerias. Apesar da falta de grandes comodidades, era o principal teatro do Porto em sua época, frequentado pela elite da sociedade.

Em 11 de Abril de 1908, o antigo teatro foi completamente devastado por um incêndio, levando imediatamente à formação de uma sociedade encarregada de impulsionar a reconstrução e a gestão do teatro lírico do Porto. Desta forma, as obras foram iniciadas em 1911 e concluídas em 1918, com o projeto do novo teatro elaborado pelo arquiteto Marques da Silva. As decorações internas da sala de espetáculos e dos principais salões, inspiradas em padrões italianos e franceses, foram realizadas pelos pintores Acácio Lino e José Brito, e pelos escultores Henrique Moreira, Diogo de Macedo e Sousa Caldas. Nas fachadas laterais, destacam-se máscaras e ornamentos com festões e frutos, esculpidos pelo artista Joaquim Gonçalves da Silva [39].

Em 1932 foi denominado de “São João Cine” em 1932, após doze anos da sua re-inauguração (7 de março de 1920), dedicando a maior parte de sua programação a exibição cinematográfica acompanhado por uma decadência da atividade teatral na cidade. Consequentemente, o prédio foi negligenciado e entrou em um processo gradual de deterioração. Em 8 de outubro de 1992, o estado adquiriu o edifício, que foi oficialmente inaugurado cerca de um mês depois, em 28 de novembro, com o nome de “Teatro Nacional São João”. Em 1993 e 1995 voltou a ter uma regular atividade artística após ser restaurado, remodelado e reequipado, segundo projeto do arquitecto João Carreira, essencialmente para teatros e óperas. Por fim, em 2012, o teatro foi reclassificado como monumento nacional [42].

4.1.2. CARACTERIZAÇÃO ARQUITETÔNICA E GEOMÉTRICA

O Teatro Nacional São João (TNSJ), em sua sala principal, é composto pela zona do palco, da plateia, da tribuna, de três níveis de balcões e de camarotes e um fosso de orquestra conforme ilustrado nas figuras 4.3. No total, a sala possui 614 lugares, sendo reservados quatro deles para pessoas com mobilidade reduzida. Desses 614 lugares, 256 são destinados à plateia e 92 à tribuna.

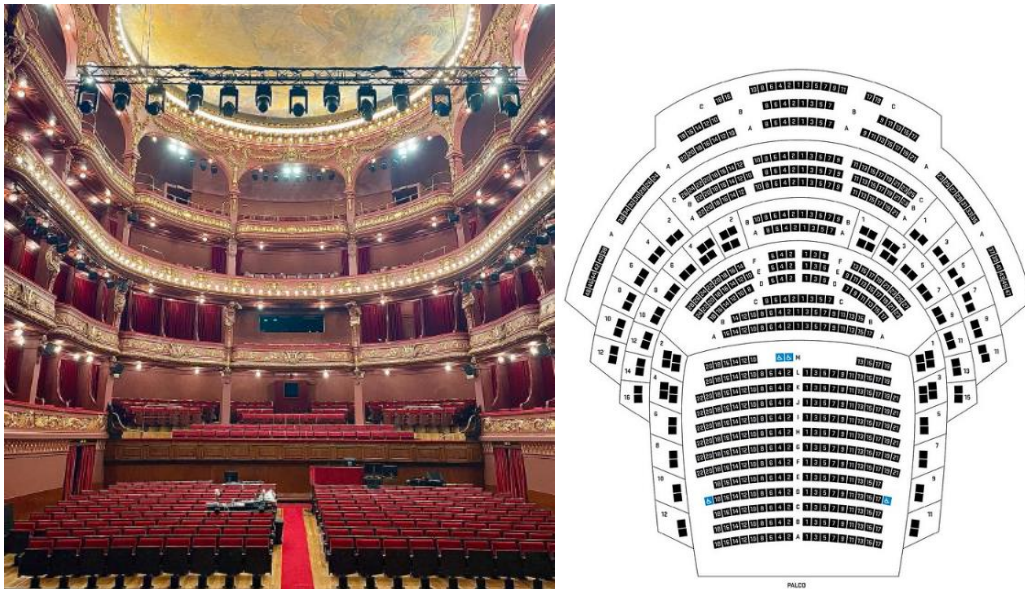


Figura 4.3 – Interior da sala e planta da posição dos lugares do Teatro Nacional São João [foto da autora] e [28].

É fundamental destacar que os assentos das três primeiras fileiras da plateia podem ser adicionados ou removidos por meio de um sistema de encaixe, conforme ilustrado na figura 4.4. Essa flexibilidade é necessária para acomodar variações de espaço de acordo com as demandas específicas de cada espetáculo, especialmente quando se requer a presença de um fosso para a orquestra. O piso da área em questão está equipado com um mecanismo de translação vertical, permitindo o recuo necessário para a colocação da orquestra, quando necessitado, ou possibilitar a inclusão de mais assentos, conforme a necessidade de acomodação do público. A figura 4.5 ilustra as dimensões do fosso e esclarece o mecanismo mencionado. Nota-se que este é um fosso do tipo coberto como visto no capítulo 3.

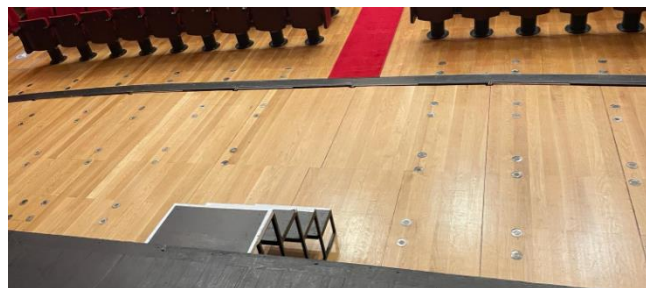


Figura 4.4 – Fosso de orquestra do Teatro Nacional São João [foto da autora].

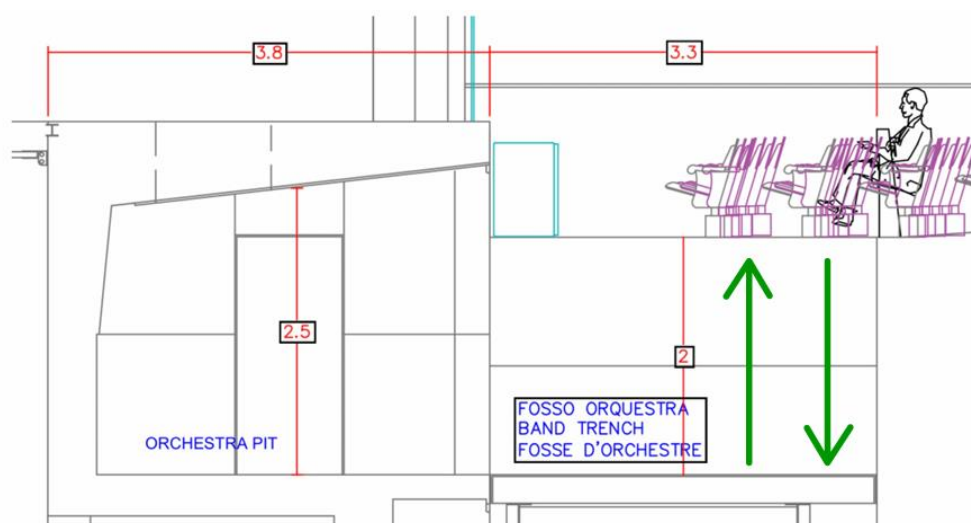


Figura 4.5 – Corte vertical com dimensões do fosso de orquestra do Teatro Nacional São João (adaptado de [47]).

A sala do TNSJ destaca-se pelos detalhes decorativos extremamente minuciosos e bem trabalhados, no entanto, não foi implementado nenhum projeto acústico específico. Apesar dessa ausência, há alguns aspectos importantes a serem considerados, pois eles contribuem para a absorção sonora influenciando diretamente o tempo de reverberação:

- Assentos almofadados (Fig. 4.6);
- Cortinas de veludo (Fig. 4.7);
- Paredes traseiras e de separação dos camarotes revestidos com um tecido aveludado (Fig. 4.7 e 4.8);



Figura 4.6 – Assentos almofadados [fotos da autora].



Figura 4.7 – Cortinas de veludo e paredes divisórias dos camarotes com revestimento de um tecido aveludado [foto da autora].



Figura 4.8 – Tecido aveludado revestido nas paredes traseiras [fotos da autora].

Os balcões também não possuem tratamento acústico, porém existem relevos/saliências bem pequenas nos detalhes dourados (Fig. 4.7 e 4.8), implicando minimamente na dispersão e difusão do som ao atingir essas superfícies.

Outro aspeto arquitetónico a considerar é o tecto do espaço. Este apresenta uma cúpula com aproximadamente treze metros de diâmetro (Fig. 4.9). A principal superfície para a reflexão acústica é o tecto, no entanto, devido à sua forma abobadada, o som tende a se concentrar em direções desfavoráveis. Isto resulta na privação das reflexões provenientes do tecto nos assentos mais elevados da sala.

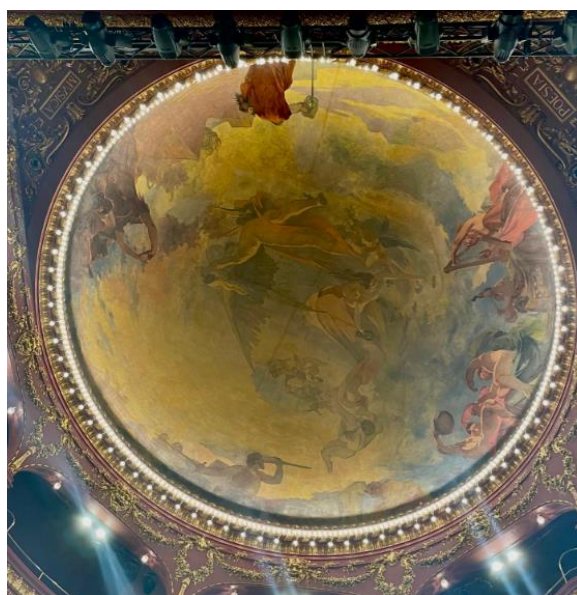


Figura 4.9 – Cúpula da sala principal do Teatro Nacional São João [foto da autora].

Na área acima do tecto, na plateia, foi identificado um fenómeno acústico conhecido como “flutter echo”. Observou-se que na região central da plateia este fenómeno é mais pronunciado e, à medida que se desloca em direção ao palco, ainda é perceptível, embora com menor intensidade. Como visto no capítulo 2.7.2, esse fenómeno ocorre devido à geometria do espaço, que gera reflexões sem mudança de direção em superfícies paralelas, possivelmente, neste caso, devido às paredes paralelas na plateia. No entanto, identificar exatamente a origem desse fenómeno é uma tarefa complexa, exigindo um estudo mais aprofundado.

É importante ressaltar que o teatro possui um sistema de ventilação (AVAC) que está implementado na base dos assentos da plateia (Fig. 4.6), com exceção daqueles que são removíveis para dar espaço ao fosso de orquestra. Infelizmente não foi possível realizar os ensaios com o sistema ligado por problemas técnicos que impossibilitou a ativação do sistema.

Quadro 4.1 – Valores da área, altura média e volume aproximados das zonas principais do Teatro Nacional São João.

Zona		Área aprox. (m ²)	Altura média aprox. (m)	Volume aprox. (m ³)
Palco		341	10,5	3577
Sala	Plateia	164	15,5	4557
	Tribuna	30		
	Balcões/Camarotes	100		
Fosso	Aberto	44	2,0	88
	Coberto	47	2,5	118
Serviço	Acima do palco	341	16,5	5622
	Atrás do palco	125	23,0	2875
	Abaixo do palco	270	8,0	2160

Os valores do quadro 4.1 foram retirados da planta (Fig. 4.10), do corte longitudinal (Fig. 4.11) e do corte transversal (Fig. 4.12), disponibilizados pelo TNSJ, através do software AutoCad

com ferramentas de medição de áreas e distâncias. É importante ressaltar que estes valores são aproximados. O volume da sala do teatro é de aproximadamente 4.560 m^3 enquanto que o volume do palco é cerca de 3580 m^3 . Para além dessas características, os cortes e desenhos indicam que a planta do teatro é do tipo “ferradura” como descrito no capítulo 3.

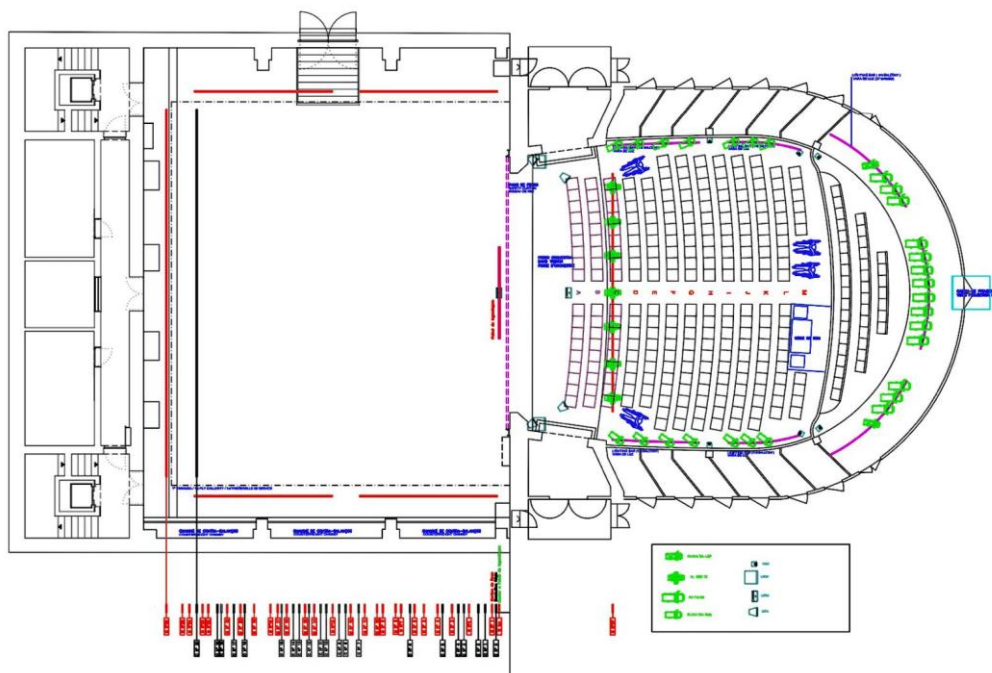


Figura 4.10 – Planta do Teatro Nacional São João [47].

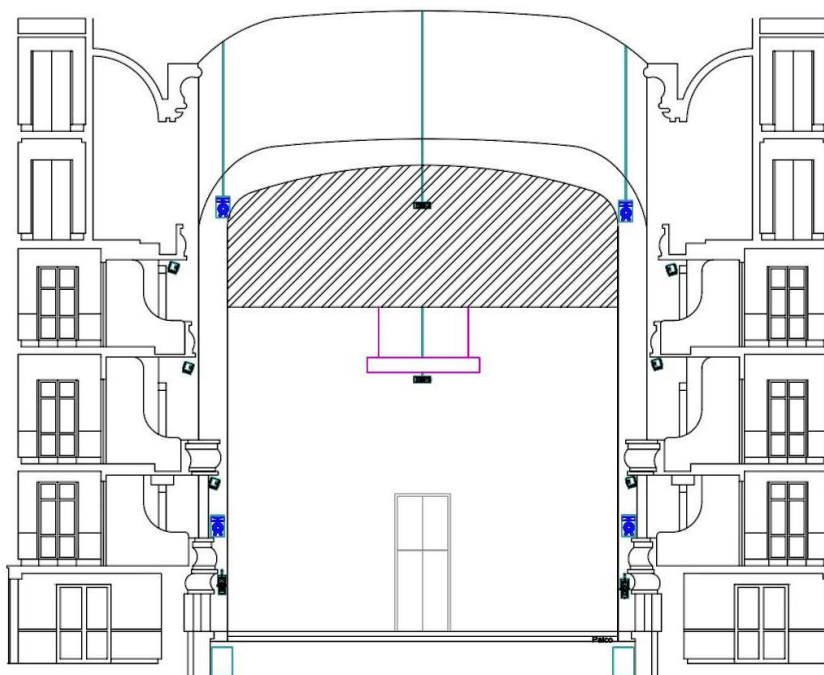


Figura 4.11 – Corte longitudinal do Teatro Nacional São João [47].

Foram seleccionados diversos pontos de ensaio para abranger toda a área de assentos, com o objetivo de compreender a variação dos valores de um local para outro. Devido à simetria do espaço, os ensaios foram conduzidos exclusivamente nos pontos do lado direito da sala, partindo do pressuposto de que os resultados no lado oposto seriam semelhantes. Em todas as posições, o sonómetro foi colocado a uma altura de aproximadamente 1,20 metros, utilizando-se um tripé portátil para fixar o aparelho. Essa altura foi escolhida de forma a simular a posição da cabeça de um espectador típico, garantindo uma medição representativa dos níveis sonoros percebidos pelo público.

Esses ensaios foram conduzidos em 23 de março de 2024 pelo Engenheiro António Eduardo Batista da Costa, com a assistência da autora. Consequentemente, a sala estava completamente desocupada, com exceção da presença da autora, do engenheiro e do técnico do teatro, Tiago Castro.

Os equipamentos e *software* de medições utilizados em todos os ensaios são propriedade do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e foram os seguintes:

- **Fonte sonora Brüel & Kjaer (Echo Speech Source), modelo 4720:** uma fonte de som que fornece um sinal para medir uma gama de parâmetros (Fig. 4.13);
- **Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260:** um medidor de nível sonoro alimentado por bateria que possui portabilidade. Ele é capaz de realizar análises detalhadas em oitava e banda de 1/3 de oitava, além de ser programável (Fig. 4.13);
- **Calibrador de microfone Brüel & Kjær, modelo 4231:** utilizado para garantir a confiança dos resultados de medição do sonómetro (Fig. 4.13);
- **Microfone de 13 mm Brüel & Kjær, modelo 4189:** possui uma alta precisão em campo livre com alta sensibilidade em uma gama de frequência de 6,3 a 20.000 Hz. (Fig. 4.13);
- **Tripé portátil Brüel & Kjaer, modelo UA0049:** é importante para garantir a estabilidade e precisão durante todas as medições; possui uma perna niveladora que varia sua altura de 0,40 m a 1,31 m;
- **Software DIRAC:** é uma ferramenta avançada para calcular diversos parâmetros acústicos de forma automatizada;

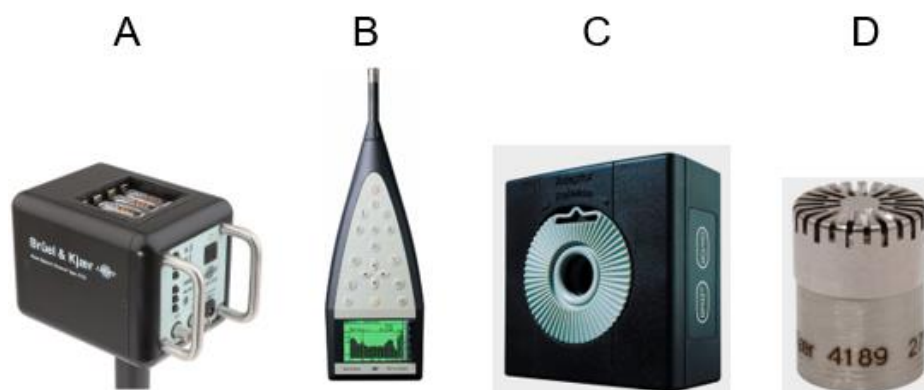


Figura 4.13 – Equipamentos de medição: A – Fonte Sonora Brüel & Kjaer 4720, B – Sonómetro Brüel & Kjær 2260, C – Calibrador de microfone Brüel & Kjær 4231 e D – Microfone de 13mm Brüel & Kjær 4189 [43], [44], [45] e [46].

4.2.2. RUÍDO DE FUNDO

Para o ensaio do ruído de fundo, o objetivo foi avaliar e descrever o ruído presente sem qualquer equipamento ligado ou presença de visitantes. Ou seja, este ensaio determina os níveis de pressão sonora (L) e níveis sonoros (L_A) resultantes exclusivamente do ruído externo, a fim de compreender se este interfere nos espectadores presentes na sala.

O equipamento utilizado neste ensaio foi o sonómetro (Brüel & Kjær modelo 2260) munido do tripé portátil (Brüel & Kjær modelo UA0049) (Fig. 4.14). Este manteve-se na altura de aproximadamente 1,2 metros, como mencionado anteriormente, em quatro pontos distintos da sala, RF1 e RF2 na plateia, RF3 na tribuna e RF4 no balcão do primeiro nível, com o sistema AVAC desligado (Fig. 4.15). No momento da medição, não foi possível desligar o sistema de iluminação, o qual produzia um ruído comprometendo a condução ideal do ensaio. Consequentemente, os resultados obtidos irão apresentar valores superiores aos padrões habituais.

Registou-se os respetivos espectros sonoros em bandas de frequência de 1/3 oitava de modo a obter os valores do nível de pressão sonora contínuo equivalente (L_{eq}) em dB, o qual é posteriormente ponderado utilizando o filtro A (L_{Aeq}) em dB para obter o nível sonoro equivalente.



Figura 4.14 – Sonómetro (Brüel & Kjær 2260) munido do tripé (Brüel & Kjær UA0049) no TNSJ [foto da autora].

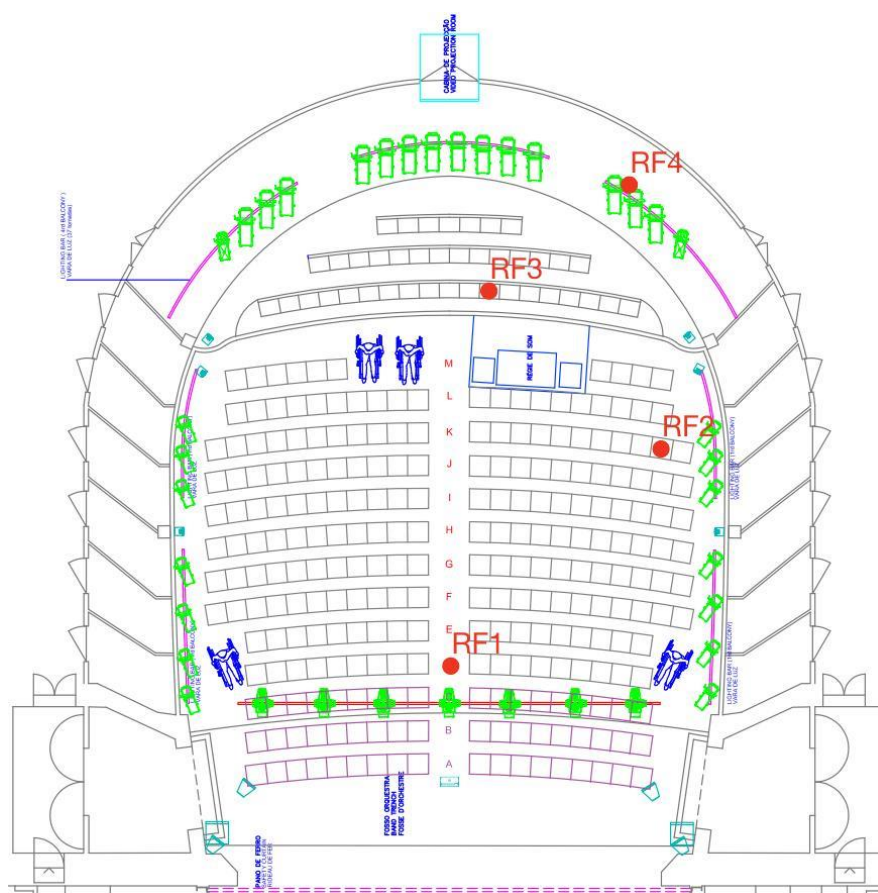


Figura 4.15 – Planta do TNSJ dos quatro pontos escolhidos para as medições do ruído de fundo: RF1 e RF2 situados na plateia, RF3 na tribuna e RF4 no balcão do primeiro nível (adaptado de [47]).

4.2.3. OUTROS PARÂMETROS

Neste ensaio foi medido o tempo de reverberação (TR), o tempo central (t_s), a Claridade (C_{80}), a Definição (D_{50}) e o *Speech Transmission Index* (STI). Posicionou-se a fonte sonora (Brüel & Kjaer – *Echo Speech Source*) no limite do palco de forma centrada, capaz de gerar um nível de pressão suficientemente alto afim de superar o ruído de fundo (Fig. 4.16). Para além da fonte sonora, foi utilizado um sonómetro (Brüel & Kjaer 2260) munido do tripé portátil (Brüel & Kjaer UA0049) com uma altura de aproximadamente 1,2 metros em nove posições distintas da sala (Fig. 4.17).

Foi conduzido o ensaio nos pontos P1, P2 e P3 que se situam na plateia, P4 e P5 na tribuna, P6 no balcão do primeiro nível e P7, P8 e P9 nos camarotes do primeiro nível. O ruído característico emitido pela fonte sonora é filtrado nas bandas de 1/1 de oitava pelo recetor. Todos esses parâmetros são calculados e processados automaticamente pelo *software* DIRAC.



Figura 4.16 – Fonte sonora Brüel & Kjaer – Echo Speech Source instalado no centro do palco do TNSJ [fotos da autora].

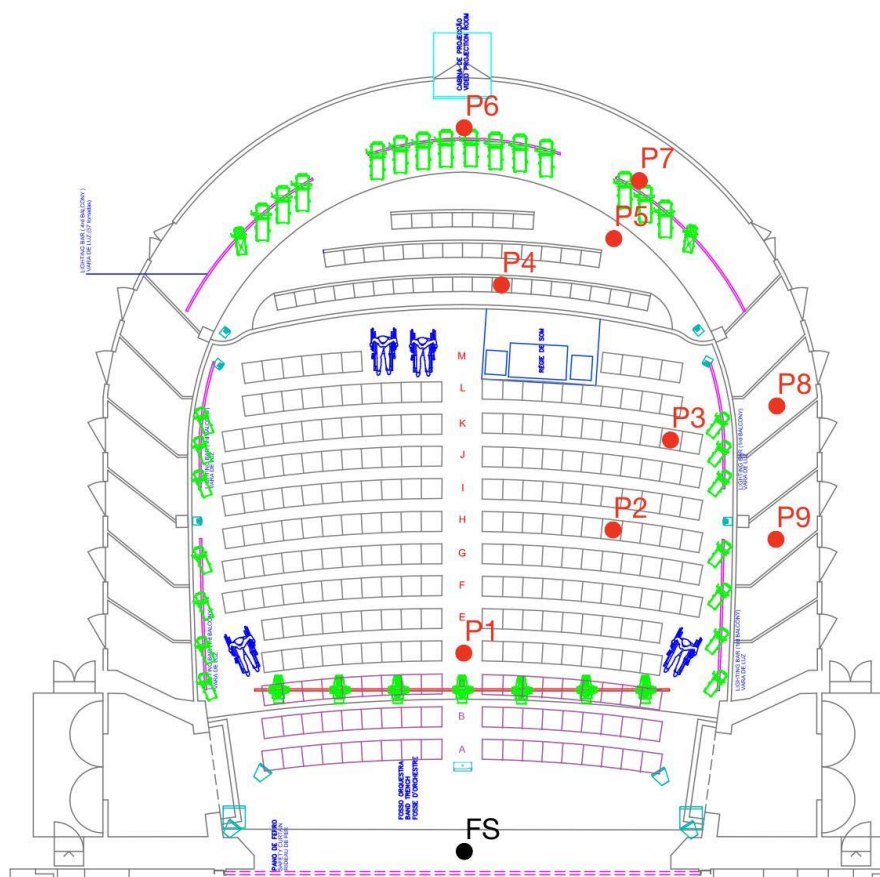


Figura 4.17 – Planta do TNSJ com a representação da fonte sonora (FS) e dos nove pontos (P1 a P9) escolhidos para as medições do TR , ts , C_{80} , D_{50} e STI : P1, P2 e P3 situados na plateia, P4 e P5 na tribuna, P6 e P7 no balcão do primeiro nível e P8 e P9 nos camarotes do primeiro nível (adaptado de [47]).

5

RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são discutidos os resultados das medições dos parâmetros conduzidas no Teatro Nacional São João (TNSJ) conforme descritas no capítulo 4. Esses resultados serão confrontados com valores regulamentares nacionais (RRAE) e com valores considerados ideais para a tipologia da sala em questão.

5.2. RUÍDO DE FUNDO

5.2.1. ANÁLISE DAS MEDIÇÕES *IN SITU*

O objetivo do ensaio do ruído de fundo é descrever e avaliar o ruído presente no espaço sem qualquer equipamento ligado ou a presença de visitantes. Avaliando, posteriormente, se este interfere nos espectadores presentes na sala. Por fim, será realizado uma análise para determinar se esses valores estão em conformidade com a legislação nacional (RRAE). No quadro 5.1 foram obtidos valores nas bandas de frequências de 1/3 de oitava (12,5 a 20.000 Hz) do nível de pressão sonora e nível sonoro com o sonómetro, em quatro pontos (RF1 a RF4) distintos da sala como descrito no capítulo 4.2.2. Todos os pontos foram medidos com uma duração de aproximadamente 10 minutos. Com esses valores foi possível obter valores globais como: **nível de pressão sonora equivalente (L_{eq})** e **nível sonoro equivalente (L_{Aeq})**. Foi também obtida a média logarítmica para cada frequência de todos os pontos e o seu respetivo desvio padrão. As figuras 5.1 a 5.3 são comparações gráficas dos valores extraídos do quadro 5.1 a fim de obter uma análise visual de como os valores se comportam à medida que a frequência aumenta e a diferença entre os resultados com e sem o filtro A para cada ponto.

No quadro 5.1 e na figura 5.1 observa-se um aumento do nível de pressão sonora nas baixas frequências, com valores entre 30 e 50 dB, chegando até 50,5 dB, e uma diminuição nas altas

frequências, com valores inferiores a 10 dB. Os valores de nível de pressão sonora variam muito pouco de um ponto para outro, apesar destes estarem bastante afastados, especialmente nas altas frequências, onde o desvio padrão máximo registrado foi de 1,0. Nas baixas frequências, por outro lado, é observado um maior desvio padrão, alcançando 3,5 na frequência de 25 Hz.

Os valores de L_{eq} dos pontos RF1 ao RF4 foram respetivamente: 55,2; 54,5; 54,8 e 57,2 dB. Nota-se uma proximidade entre os valores na zona da plateia e da tribuna, sendo o RF4 o mais disperso, com um valor de 57,2 dB. Essa dispersão pode ser explicada pela localização do camarote, onde houve influência dos ruídos exteriores provenientes de obras, devido à sua proximidade com a parede de fachada do edifício. De acordo com o quadro 5.1 o nível de pressão sonora equivalente médio (L_{eq}) é de 55,6 dB, enquanto que o nível sonoro equivalente global (L_{Aeq}) é de 30,5 dB. Esses valores aparentam ser bem maiores comparados com os outros teatros existentes, que registram valores de L_{Aeq} por volta dos 23 dB, representando um valor de aproximadamente 4 vezes menor (visto que adicionar 3 dB em acústica é equivalente ao dobro do valor) [29], [33].

Ao aplicar o filtro A (Fig. 5.2), é observado uma diminuição significativa nos valores obtidos nas baixas frequências, o que era esperado, visto que o objetivo do filtro A é ajustar esses valores para se aproximar da sensibilidade do ouvido humano como visto no capítulo 2.2.2.4. Na Figura 5.3, observam-se os maiores valores de nível sonoro nas frequências entre 125 e 1.000 Hz, abrangendo parte da faixa de frequências médias, onde o ouvinte percebe o ruído com maior sensibilidade/intensidade. No entanto, entre as frequências de 2.000 e 4.000 Hz, o nível sonoro regista-se em valores inferiores, o que é favorável, pois resulta em menor perturbação na faixa de frequência do “*singing formant*”. É de suma importância para os cantores de ópera que não haja perturbação nessa gama de frequência como comentado no capítulo 3.2.2.

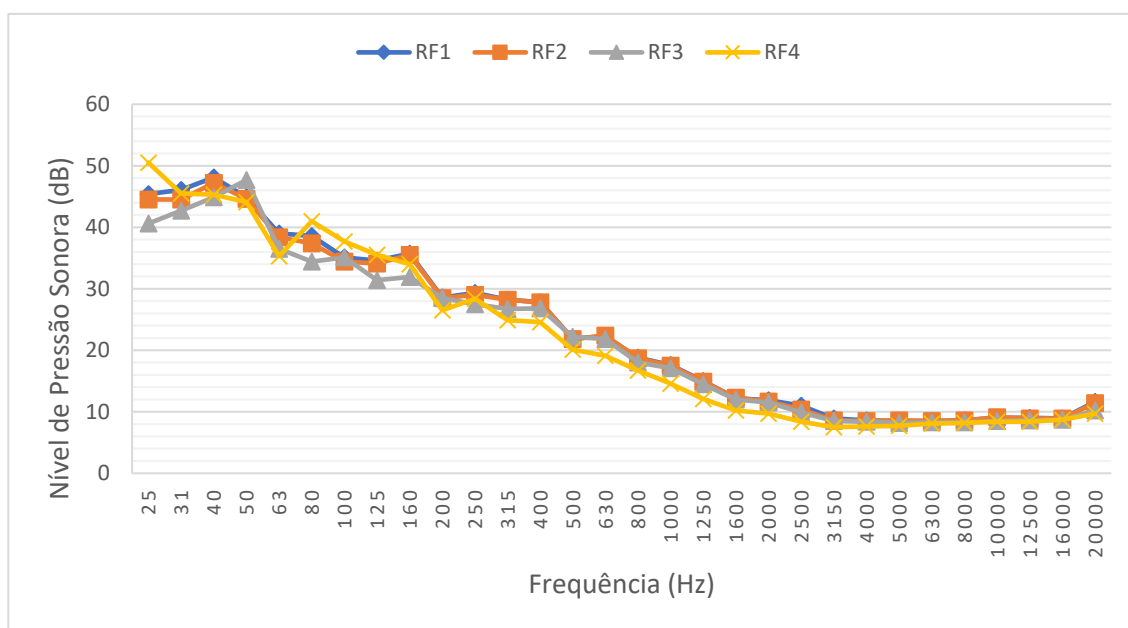


Figura 5.1 – Valores dos níveis de pressão sonora dos pontos (RF1 a RF4) do ruído de fundo (dB) sem o filtro A em bandas de frequência de 1/3 de oitava do TNSJ.

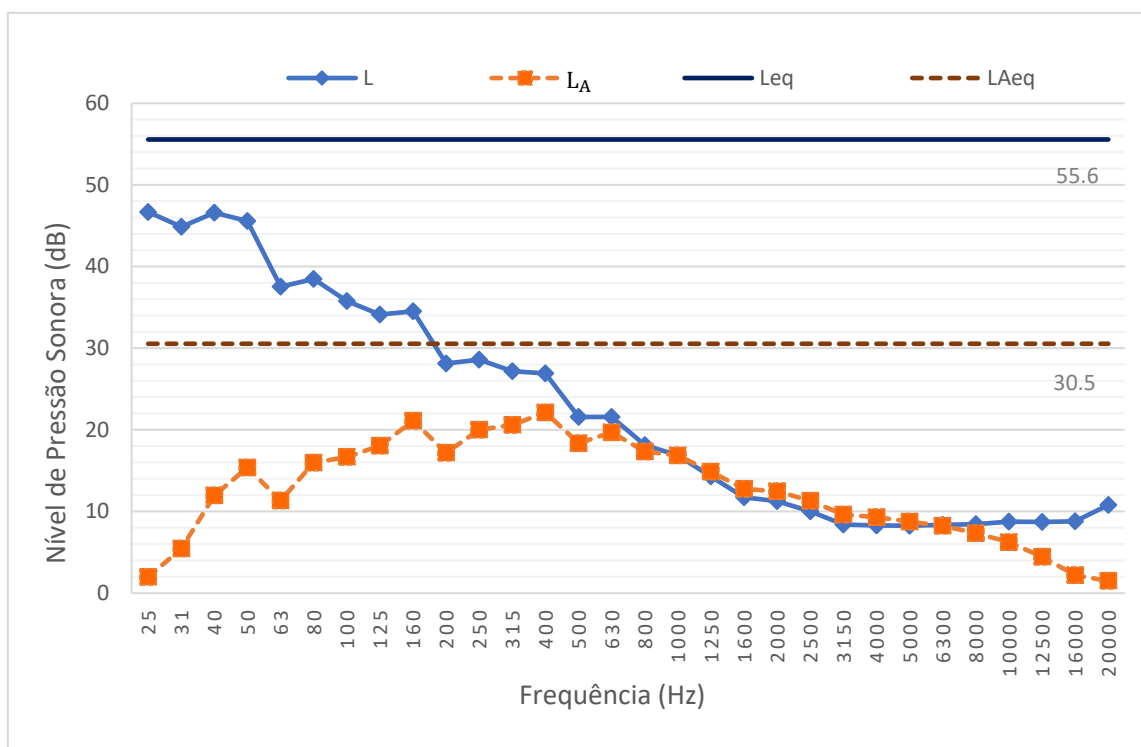


Figura 5.2 – Valores médios dos níveis de pressão sonora de todos os pontos (RF1 a RF4) do ruído de fundo (dB), com e sem o filtro A, em bandas de frequência de 1/3 de oitava do TNSJ.

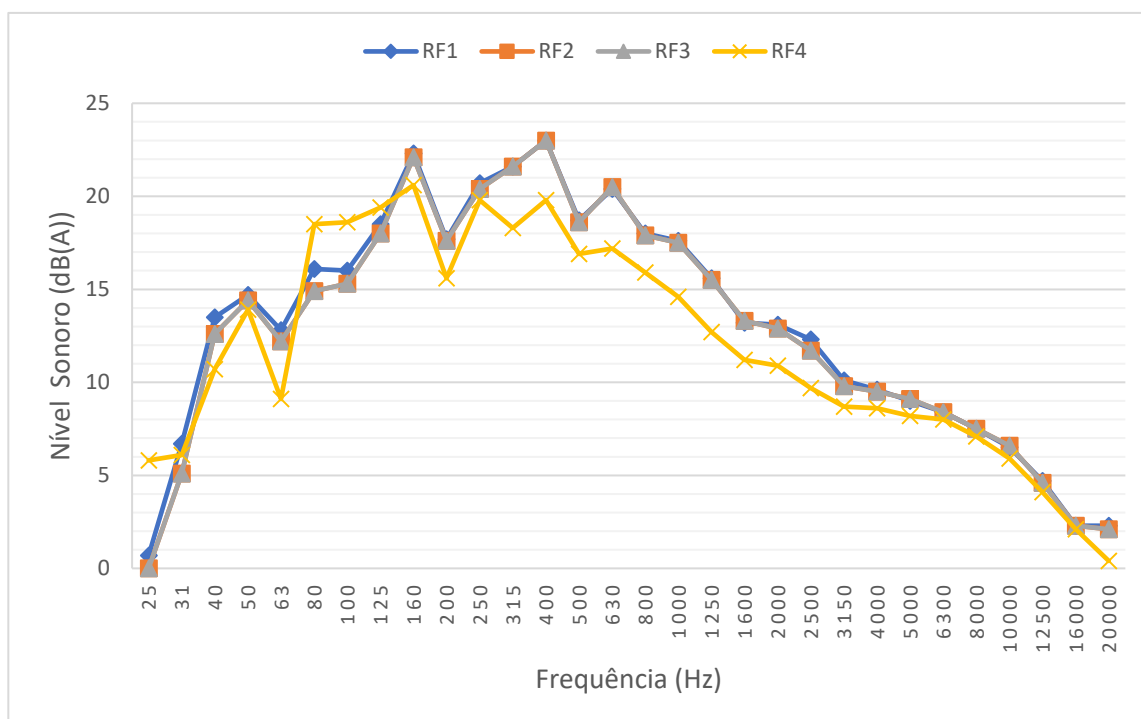


Figura 5.3 – Valores dos níveis de pressão sonora nos pontos (RF1 a RF4) do ruído de fundo (dB(A)) com o filtro A em bandas de frequência de 1/3 de oitava (25 a 20.000 Hz) do TSNJ.

Quadro 5.1 – Valores dos Níveis de Pressão Sonora e Nível Sonoro nos pontos RF1 a RF4 para bandas de frequência de 1/3 de oitava, média logarítmica, nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}) e nível sonoro equivalente (L_{Aeq}) no TNSJ.

Ruído de Fundo (L e L _A) (dB)												
Frequência (Hz)	Ponto (Posição)								Média Logarítmica		Desvio Padrão	
	RF1 (Plateia)		RF2 (Plateia)		RF3 (Tribuna)		RF4 (Balcão 1º nível)					
	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	sem filtro A	com filtro A
12,5	42,1	<0	42,5	<0	45,1	<0	46,4	<0	44,4	<0	1,8	0,0
16	40,0	<0	40,9	<0	41,0	<0	45,2	<0	42,3	<0	2,0	0,0
30	44,0	<0	42,9	<0	40,5	<0	46,7	<0	44,1	<0	2,2	0,0
25	45,4	0,7	44,5	<0	40,6	<0	50,5	5,8	46,7	2,0	3,5	2,6
31	46,1	6,7	44,5	5,1	42,7	3,3	45,5	6,1	44,9	5,5	1,3	1,3
40	48,1	13,5	47,2	12,6	44,9	10,3	45,3	10,7	46,6	12,0	1,3	1,3
50	44,9	14,7	44,6	14,4	47,7	17,5	44,1	13,9	45,6	15,4	1,4	1,4
63	39,0	12,8	38,4	12,2	36,5	10,3	35,3	9,1	37,5	11,3	1,5	1,5
80	38,6	16,1	37,4	14,9	34,4	11,9	41,0	18,5	38,5	16,0	2,4	2,4
100	35,1	16,0	34,4	15,3	35,1	16,0	37,7	18,6	35,8	16,7	1,3	1,3
125	34,6	18,5	34,1	18,0	31,4	15,3	35,5	19,4	34,1	18,0	1,5	1,5
160	35,7	22,3	35,5	22,1	31,9	18,5	34,0	20,6	34,5	21,1	1,5	1,5
200	28,6	17,7	28,5	17,6	28,5	17,6	26,5	15,6	28,1	17,2	0,9	0,9
250	29,3	20,7	29,0	20,4	27,5	18,9	28,4	19,8	28,6	20,0	0,7	0,7
315	28,2	21,6	28,2	21,6	26,7	20,1	24,9	18,3	27,2	20,6	1,4	1,4
400	27,8	23,0	27,8	23,0	26,8	22,0	24,6	19,8	26,9	22,1	1,3	1,3
500	21,9	18,7	21,8	18,6	22,2	19,0	20,1	16,9	21,6	18,4	0,8	0,8
630	22,3	20,4	22,4	20,5	21,8	19,9	19,1	17,2	21,6	19,7	1,3	1,3
800	18,8	18,0	18,7	17,9	18,0	17,2	16,7	15,9	18,1	17,3	0,8	0,8
1000	17,6	17,6	17,5	17,5	17,1	17,1	14,6	14,6	16,9	16,9	1,2	1,2
1250	15,0	15,6	14,9	15,5	14,5	15,1	12,1	12,7	14,3	14,9	1,2	1,2
1600	12,2	13,2	12,3	13,3	12,0	13,0	10,2	11,2	11,8	12,8	0,9	0,9
2000	11,9	13,1	11,7	12,9	11,5	12,7	9,7	10,9	11,3	12,5	0,9	0,9
2500	11,0	12,3	10,4	11,7	9,9	11,2	8,4	9,7	10,0	11,3	1,0	1,0
3150	8,9	10,1	8,6	9,8	8,5	9,7	7,5	8,7	8,4	9,6	0,5	0,5
4000	8,6	9,6	8,5	9,5	8,4	9,4	7,6	8,6	8,3	9,3	0,4	0,4
5000	8,5	9,0	8,6	9,1	8,2	8,7	7,7	8,2	8,3	8,8	0,4	0,4
6300	8,5	8,4	8,5	8,4	8,3	8,2	8,1	8,0	8,4	8,3	0,2	0,2
8000	8,6	7,5	8,6	7,5	8,3	7,2	8,2	7,1	8,4	7,3	0,2	0,2
10000	9,0	6,5	9,1	6,6	8,5	6,0	8,4	5,9	8,8	6,3	0,3	0,3
12500	9,0	4,7	8,9	4,6	8,6	4,3	8,4	4,1	8,7	4,4	0,2	0,2
16000	8,9	2,3	8,9	2,3	8,7	2,1	8,7	2,1	8,8	2,2	0,1	0,1
20000	11,6	2,3	11,4	2,1	10,2	0,9	9,7	0,4	10,8	1,5	0,8	0,8
L _{eq}	55,2	-	54,5	-	54,8	-	57,2	-	55,6	-	1,1	-
L _{Aeq}	-	31,2	-	31,0	-	30,1	-	29,7	-	30,5	-	0,6

5.2.2. CONFORMIDADE COM A LEGISLAÇÃO NACIONAL (RRAE)

Como visto no capítulo 3.4 (expressão 3.5), no interior dos recintos de espetáculos, com exceção dos cinemas, o nível sonoro contínuo equivalente (L_{Aeq}) associado ao funcionamento dos equipamentos e instalações, isto é, AVAC ligado, deve satisfazer um valor menor ou igual a 30 dB(A). Para além disto, o RRAE ainda prevê uma incerteza de 3 dB(A) a diminuir do valor medido. Portanto, o quadro 5.2 avalia esta exigência regulamentar.

É importante ressaltar que, por não ter sido possível realizar a medição do ruído de fundo com o sistema AVAC ligado, o quadro 5.2 avalia a exigência regulamentar utilizando valor do L_{Aeq} com o sistema desligado. Numa situação real, o valor do L_{Aeq} com o sistema AVAC ligado seria provavelmente maior, existindo a possibilidade de cumprir ou não com o limite regulamentar.

Quadro 5.2 – Avaliação regulamentar (RRAE) do nível sonoro contínuo equivalente no interior do TNSJ.

Uso	Valor do L_{Aeq} TNSJ sem AVAC (dB)	Fator Incerteza dB(A)	Valor L_{Aeq} do TNSJ com fator de incerteza (I) (dB)	Limite Máximo do RRAE do L_{Aeq} com AVAC (dB)	Parecer
Recintos de espetáculos (exceção cinema)	30,5	3	27,5	30	N.A.

5.2.3. ÍNDICE DE ARTICULAÇÃO (AI)

Como visto no capítulo 2.5.3, uma forma de analisar, tanto o grau de privacidade da palavra quanto a inteligibilidade, é utilizar o índice de articulação (AI). Este mede o nível médio de inteligibilidade percebido pelos ouvintes na presença de um ruído de fundo variando de zero a um, sendo zero representando um grau de inteligibilidade nula e um, uma excelente comunicação (quadro 2.5). Portanto, o quadro 5.3 realiza os cálculos necessários chegando a um valor de aproximadamente 1, indicando que a palavra do TNSJ tem um grau de inteligibilidade de “excelente comunicação” ($\geq 0,65$) para conferências, aulas etc.

É importante ressaltar dois aspetos para a análise completa deste índice. O primeiro ponto é a preferência ao realizar os cálculos com o sistema AVAC ligado, para medir de forma mais completa/correta os ruídos de fundo que o espectador experienciaria. Como não foi possível realizar este ensaio, os valores foram obtidos com o AVAC desligado. O segundo ponto é que ao calcular o *STI* (a qual será mostrado mais a frente), parâmetro este que também avalia a inteligibilidade da palavra, demonstrou ser “suficiente”, enquanto que o *AI* foi classificado como “excelente”. A diferença dessas conclusões é explicada pela distinção de como esses parâmetros avaliam a distância da fonte sonora. Enquanto que o *STI* considera a variação da distância da fonte sonora, o *AI* apenas considera a fonte sempre próxima e sempre com os mesmos valores de “nível de conversação”. Portanto, os valores de *AI* serviriam melhores nas primeiras fileiras, onde a fonte sonora é mais próxima. É importante notar que com a utilização de um reforço electroacústico, os valores de *AI* seriam mais corretos de se considerar no restante da sala e não apenas nas primeiras fileiras.

Quadro 5.3 – Cálculo do Índice de Articulação (AI) do TNSJ.

Frequência (Hz)	Nível de conversação (nc)	Peso (p)	Ruído de Fundo (RF) (dB)	$\Delta L = nc - RF$ (máximo 30)	$\Delta L * p$
200	67	4	28	30	120
250	68	10	29	30	300
315	69	10	27	30	300
400	70	14	27	30	420
500	68	14	22	30	420
630	66	20	22	30	600
800	65	20	18	30	600
1000	64	24	17	30	720
1250	62	30	14	30	900
1600	60	37	12	30	1110
2000	59	37	11	30	1110
2500	57	34	10	30	1020
3150	55	34	8	30	1020
4000	53	24	8	30	720
5000	51	20	8	30	600
$\Sigma =$					9960
$AI = \Sigma / 10.000$					1,00

5.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

5.3.1. ANÁLISE DAS MEDIÇÕES *IN SITU*

O ensaio do tempo de reverberação tem como objetivo principal analisar se o tempo de permanência do som no ambiente é adequado para o tipo de espaço em questão, conforme discutido no capítulo 2.4. Para este parâmetro, foram ensaiados nove pontos (P1 a P9) como descritos no capítulo 4.2.3. Os resultados do tempo de reverberação (TR_{30}) para bandas de 1/1 de oitava apresentam-se no quadro 5.4 e para bandas de 1/3 oitava no quadro 5.4. Foram calculados as médias para cada frequência e o seu respetivo desvio padrão. Para além disso, foi calculado o TR médio para as frequências médias (500 e 1.000 Hz) em cada ponto.

De acordo com o quadro 5.5 nota-se que para o tempo de reverberação médio das frequências médias (TR [500, 1.000 Hz]), o maior valor foi obtido no ponto P2, na zona da plateia de 1,25 segundos, e o menor valor foi o ponto P6 na área do balcão de 1,10 segundos, com uma diferença de 0,15 segundos. Nota-se que os valores do TR nos pontos ensaiados não revelam a existência de uma variabilidade considerável, como pode-se notar no valor do desvio padrão médio entre os pontos de 0,07. Isso reflete numa situação na qual, independentemente do local em que o espectador se sente, ele irá receber o som de maneira semelhante. Portanto, considera-se um aspeto positivo, uma vez que, idealmente, do ponto de vista acústico, seria desejável que todos os lugares da sala apresentassem um TR uniforme.

De forma a ser mais claro, foi realizado um gráfico em bandas de 1/3 de oitava do tempo de reverberação para os nove pontos medidos (Fig. 5.4) e em bandas de 1/1 de oitava (Fig. 5.5). A partir deste, pode-se notar uma dispersão maior de valores nas bandas de frequências de 125 e 2.000 Hz, enquanto que as restantes não apresentam grande variação. Na faixa de frequência de 2.000 a 4.000 Hz, observa-se um TR mais baixo, entre 1,04 e 1,19 segundos, o que representa um aspeto negativo para os cantores de ópera, que necessitam de um aumento do TR nessa faixa para se destacarem em relação aos instrumentos musicais. Nas frequências médias (maior sensibilidade auditiva) observa-se valores de TR “médios” comparados com as altas e baixas frequências. Por outro lado, nas baixas frequências há um aumento comparativamente com as altas, chegando a atingir 1,65 segundos na frequência de 100 Hz, aspeto este, que melhora qualidade dos espetáculos musicais. É importante referir que estes valores são tempos de reverberação com a sala desocupada, e que, eventualmente com a sala ocupada, os valores das frequências diminuiriam pela presença de espectadores, tornando o TR ainda menor.

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 P9 medidos do TNSJ; média e desvio padrão.

Tempo de Reverberação (T_{30}) (s)											
Frequência (Hz)	Pontos									Média	Desvio Padrão
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9		
100	2,21	1,81	1,85	1,59	2,18	1,52	1,08	1,39	1,22	1,65	0,40
125	1,81	1,55	1,73	1,25	1,40	1,38	1,23	1,38	1,24	1,44	0,21
160	1,25	1,30	1,50	1,49	1,30	1,10	1,20	1,25	1,33	1,30	0,13
200	1,11	1,18	1,30	1,20	1,25	1,17	0,90	1,13	1,22	1,16	0,11
250	1,15	1,20	1,22	1,03	1,49	1,11	1,36	1,23	1,18	1,22	0,14
315	1,14	1,32	1,08	1,38	1,08	1,35	1,11	1,24	1,32	1,22	0,12
400	1,01	1,32	1,02	0,96	1,36	0,96	0,93	0,99	0,91	1,05	0,17
500	1,20	1,32	1,03	1,20	1,15	1,27	1,17	1,07	1,04	1,16	0,10
630	1,08	1,13	1,26	0,94	1,11	1,02	1,21	1,14	1,23	1,12	0,10
800	1,13	1,26	1,14	1,16	1,24	1,08	1,31	1,25	1,07	1,18	0,09
1000	1,38	1,26	1,21	0,99	1,29	1,17	1,32	1,32	1,29	1,25	0,11
1250	1,30	1,20	1,25	1,48	1,20	1,09	1,12	1,29	1,11	1,23	0,12
1600	1,04	1,33	1,38	1,02	1,09	1,07	1,05	1,14	1,15	1,14	0,13
2000	1,20	1,38	0,98	0,97	1,08	1,02	1,15	1,13	1,13	1,12	0,13
2500	1,20	1,22	1,08	0,79	1,00	1,01	1,46	1,10	0,93	1,09	0,19
3150	1,17	1,36	1,10	1,19	0,97	1,42	0,99	1,31	1,18	1,19	0,16
4000	1,04	1,04	1,04	1,19	0,93	0,88	0,95	1,09	1,16	1,04	0,10
5000	0,90	0,91	1,05	0,82	0,88	0,84	0,86	0,88	1,15	0,92	0,11
TR [500, 1.000 Hz] (s)	1,18	1,25	1,15	1,12	1,23	1,10	1,18	1,18	1,11	1,17	0,07

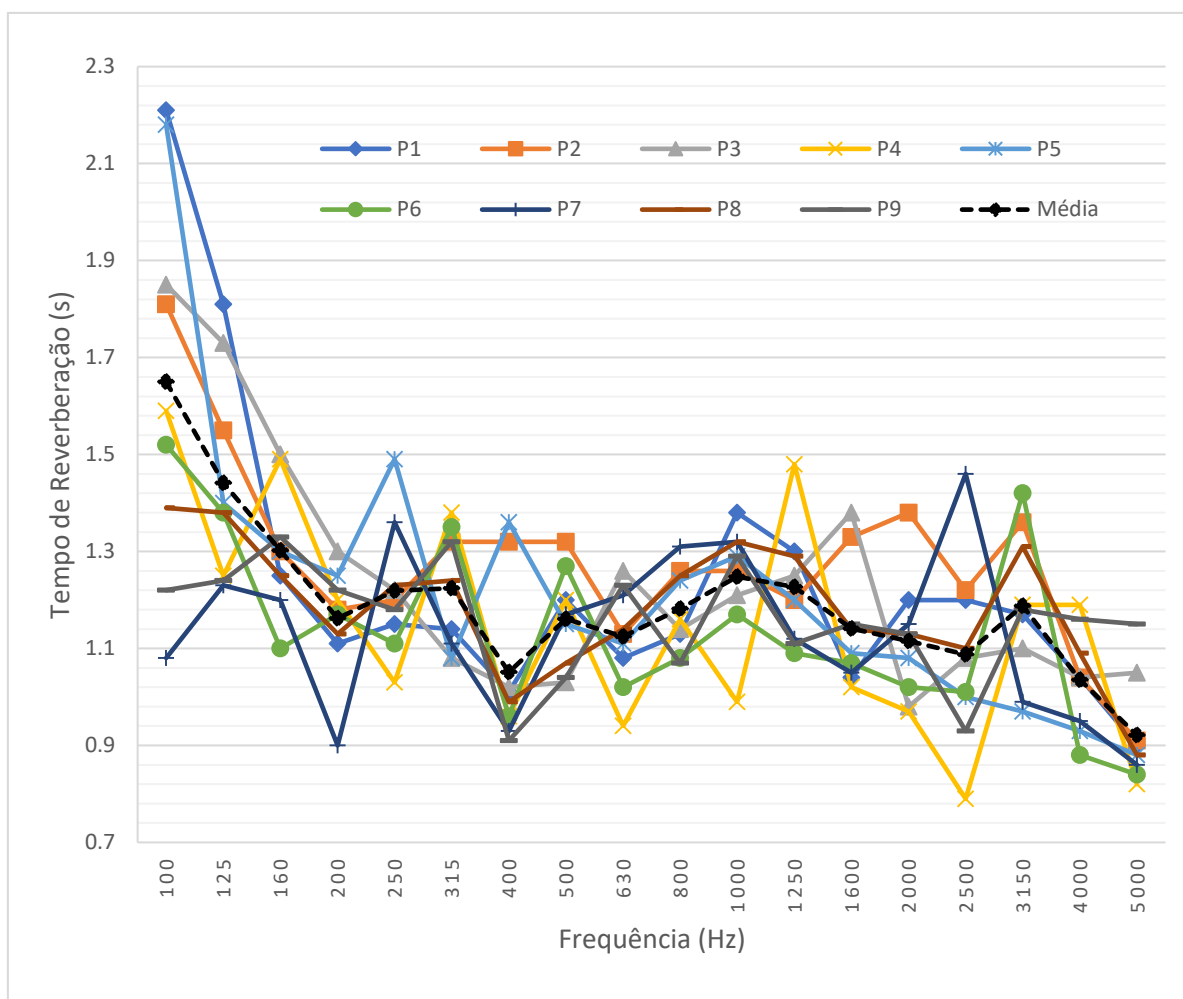


Figura 5.4 – Valores do tempo de reverberação para os nove pontos medidos (P1 a P9) em bandas de frequência de 1/3 oitava do TNSJ.

Quadro 5.5 – Valores do parâmetro tempo de reverberação (T_{30}) em bandas de 1/1 de oitava de 125 a 4.000 Hz para os pontos P1 a P9 medidos do TNSJ; média e desvio padrão.

Tempo de Reverberação (T_{30}) (s)											
Frequência (Hz)	Pontos									Média	Desvio Padrão
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9		
125	1,76	1,55	1,69	1,44	1,63	1,33	1,17	1,34	1,26	1,46	0,19
250	1,13	1,23	1,20	1,20	1,27	1,21	1,12	1,20	1,24	1,20	0,05
500	1,10	1,26	1,10	1,03	1,21	1,08	1,10	1,07	1,06	1,11	0,07
1000	1,27	1,24	1,20	1,21	1,24	1,11	1,25	1,29	1,16	1,22	0,05
2000	1,15	1,31	1,15	0,93	1,06	1,03	1,22	1,12	1,07	1,11	0,10
4000	1,04	1,10	1,06	1,07	0,93	1,05	0,93	1,09	1,16	1,05	0,07
TR [500, 1.000 Hz] (s)	1,18	1,25	1,15	1,12	1,23	1,10	1,18	1,18	1,11	1,17	0,05

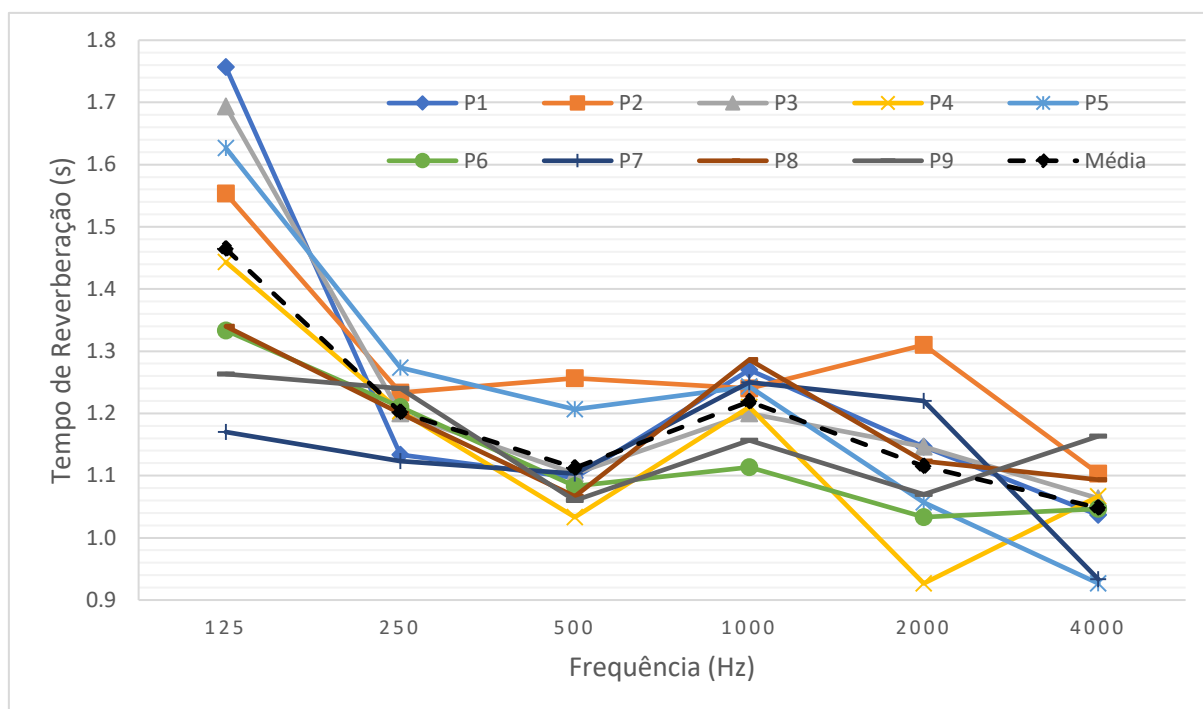


Figura 5.5 – Valores do tempo de reverberação para os nove pontos medidos (P1 a P9) em bandas de frequência de 1/1 oitava do TNSJ.

5.3.2. CONFORMIDADE COM A LEGISLAÇÃO NACIONAL (RRAE)

De acordo com o capítulo 3.4, o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) define um valor máximo para o TR em função do volume da sala (esta vazia), se esta a principal valência corresponder a atividades assentes na “oratória” (não sendo necessariamente o caso do TNSJ) como mostram as expressões 3.1 a 3.3. O regulamento ainda prevê uma Incerteza (I) igualmente em função do volume de acordo com as expressões 3.6 a 3.8. Como a sala do TNSJ possui um volume de aproximadamente 4.560 m³, este representa uma Incerteza de 35%.

O quadro 5.6 verifica este cumprimento com a regulamentação. O “TR médio” foi calculado com a média aritmética dos TR’s de 500, 1.000 e 2.000 Hz de 1/1 de oitava. Já o “TR médio com incerteza (I) de 35%” calculou-se através do “TR médio” a subtrair 35% de “TR máximo do RRAE”. Por fim, o “TR máximo do RRAE” utilizou-se a expressão 3.2 com o V sendo 4.560 m³.

De acordo com o quadro 5.6, o TNSJ cumpre com o limite máximo de 0,94 segundos com um TR com fator de incerteza de 0,82 segundos. No contexto desse teatro, a ênfase principal não reside na “oratória”, portanto, de acordo com as diretrizes regulamentares, para atividades que não envolvam discursos, o projeto acústico deve incorporar uma análise que garanta a acústica adequada à sua função específica, não estabelecendo valores ou parâmetros limitantes regulamentares para tal.

Quadro 5.6 – Avaliação regulamentar (RRAE) do tempo de reverberação médio do TNSJ.

Frequência em bandas de 1/1 oitavas (Hz)	TR medido (s)	TR médio (s)	TR médio com fator incerteza (I) (s)	TR máximo do RRAE (s)	Fator incerteza (I)	Parecer para "oratória"
500	1,11	1,15	0,82	0,94	35%	O.K.
1000	1,22					
2000	1,11					

5.3.3. PREVISÃO PARA SALA OCUPADA

Embora a verificação pelo regulamento nacional exija que a sala esteja desocupada, é fundamental compreender o impacto que a presença de pessoas na sala tem sobre a absorção sonora. O resultado é um aumento da absorção, consequentemente uma redução do tempo de reverberação. Em contextos reais, é improvável que uma sala esteja vazia durante um evento, tornando-se necessário considerar uma previsão do tempo de reverberação com a sala ocupada para uma compreensão mais precisa diante de uma situação real. Para viabilizar esse procedimento, foi essencial utilizar valores estimados do coeficiente de absorção (α) para as cadeiras ocupadas e vazias, conforme proposto por Beranek [38], a fim de obter os valores de ΔA , que representam a absorção adicional que ocorreria com a presença de espectadores na sala. A previsão foi realizada tanto para a sala totalmente ocupada (100% de ocupação) quanto para metade de sua capacidade (50% de ocupação).

Em situações de salas de ópera, o cálculo da área de absorção (S) é a soma da área dos assentos, do fosso (zona aberta) e do prosscénio. É importante referir que para os assentos, foi realizado uma faixa absorvente de 0,5 metros em todo o perímetro das cadeiras, com objetivo de replicar o efeito das laterais dos espectadores (apenas na zona da plateia e tribuna, uma vez que o balcão e o camarote foram calculados a sua área real sem assumir a faixa absorvente) como mostra o quadro 5.7. Uma vez que o volume da sala foi previamente estimado (4560 m³), através da fórmula de Sabine (eq. 2.13) é possível obter valores aproximados para o tempo de reverberação para as condições de ocupação como mostra o quadro 5.8.

A partir do Quadro 5.8 e da figura 5.6, é possível observar que a diferença no TR entre a sala vazia e com 50% de ocupação foi de 0,05 segundos, enquanto para a sala totalmente ocupada foi de 0,08 segundos. Essa diferença não é considerável, o que pode ser atribuído ao facto de que a sala já possui uma grande absorção devido às cadeiras serem almofadadas e à presença de uma grande quantidade de cortinas. Portanto, ao prever o valor do TR com a sala ocupada, era de se esperar um valor não muito distante do registado com a sala vazia.

É importante referir que esta abordagem pela fórmula de Sabine foi adotada com o objetivo de simplificar os cálculos, uma vez que esta análise carece de refinamento. Portanto, trata-se apenas de uma conclusão preliminar que se espera que um estudo mais detalhado venha a confirmar.

Quadro 5.7 – Parâmetros utilizados para a previsão do tempo de reverberação com a sala 50% e 100% ocupada do TNSJ [38].

Parâmetros					
Frequência (Hz)	250	500	1.000	2.000	4.000
α_o (cadeira ocupada)	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86
α_v (cadeira vazia)	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
$\Delta\alpha = \alpha_o - \alpha_v$	0,11	0,12	0,13	0,18	0,24
$\Delta A = \Delta\alpha * S$ (50% ocupado)	20	22	24	33	43
$\Delta A = \Delta\alpha * S$ (100% ocupado)	40	43	47	65	87
Área (m ²)	Ocupação de 100%	Ocupação de 50%			
Sa (assentos)	262	131			
Sf (fosso aberto)	44	22			
Sp (proscénio)	55	28			
S (total)	361	181			

Quadro 5.8 – Cálculo do novo tempo de reverberação com a sala 50% e 100% ocupada para bandas de 1/1 oitava de 250 a 4.000 Hz do TNSJ.

Frequência (Hz)	Ocupação								
	0%			50%			100%		
	TR (s)	A sala (m ²)	TR [500, 1.000 Hz] (s)	TR (s)	A sala (m ²)	TR [500, 1.000 Hz] (s)	TR (s)	A sala (m ²)	TR [500, 1.000 Hz] (s)
250	1,20	607	1,17	1,16	627	1,12	1,13	647	1,09
500	1,11	656		1,08	678		1,04	699	
1000	1,22	599		1,17	622		1,13	646	
2000	1,11	654		1,06	687		1,01	719	
4000	1,05	696		0,99	739		0,93	783	

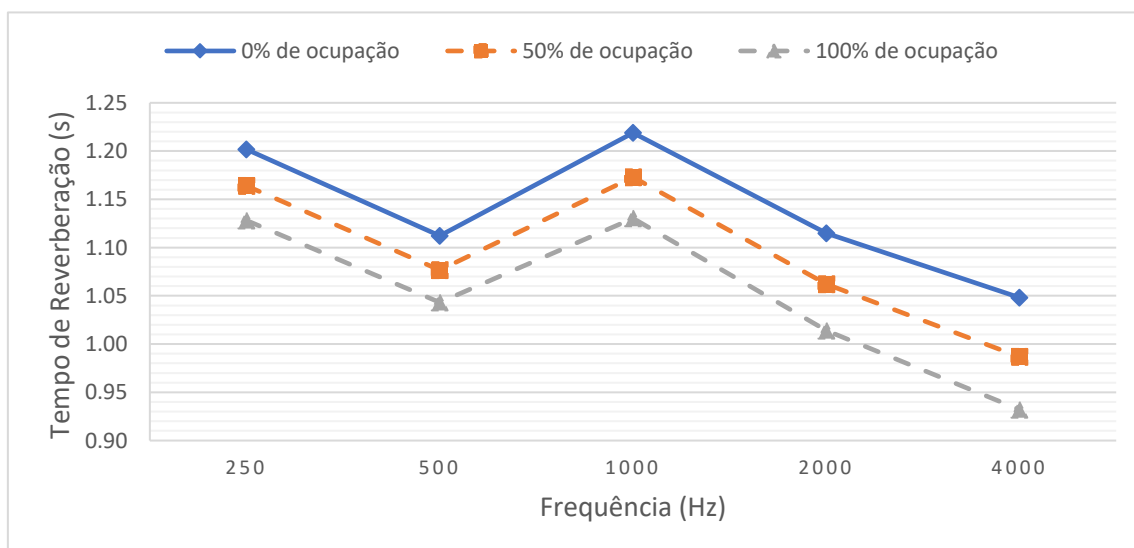


Figura 5.6 – Valores do tempo de reverberação com a sala desocupada (0%), com metade da ocupação previsto (50%) e totalmente ocupada previsto (100%) em bandas de 1/1 oitava.

5.3.4. ANÁLISE SEGUNDO VALORES CONSIDERADOS IDEAIS

Para além da análise regulamentar, como visto no capítulo 2.4 (quadro 2.2), existem intervalos de valores considerados ideais para cada tipo de função. O TNSJ é essencialmente para ópera e teatro, portanto o quadro 5.9 verifica os intervalos de TR da sala com os valores recomendados para estes tipos de uso e outros.

Verifica-se que o valor do TR da sala de 1,1/1,2 segundos não satisfaz totalmente nenhum dos limites ideais, embora estando muito próximo do limite para ópera (não wagneriana) e teatro. Num olhar geral, o tempo de reverberação médio do TSNJ apresenta um valor um pouco baixo para ópera, e totalmente desadequado para música sinfónica e de órgão. Assim, o TNSJ está posicionado em um intervalo em que não atende em pleno aos requisitos de nenhum dos tipos de ambiente em questão, mas pode ser considerado um compromisso bastante aceitável para algumas funções.

Quadro 5.9 – Verificação dos valores recomendados do parâmetro tempo de reverberação médio de acordo com o uso do TNSJ [1], [5], [38].

Função	TR [500, 1.000 Hz] ideal (s)	TR [500, 1.000 Hz] (s)	Avaliação
Ópera wagneriana	1,7 a 1,9	1,1	Desadequado
Ópera (não wagneriana)	1,3 a 1,7		Tolerável
Teatro	0,7 a 1,0		Tolerável
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

5.3.5. RÁCIO DE BAIXOS (BR)

Como visto no capítulo 2.4.3, o rácio de baixos para o TR (BR_{TR}) avalia o balanço tonal por comparação dos TR das baixas frequências com as altas frequências. Por meio da equação 2.15, foi possível calcular o BR do TNSJ como mostra o quadro 5.10. Em todos os pontos ensaiados foi obtido um BR maior do que 1,0, com exceção do P7, obtendo uma média global de 1,14. A partir disto, confirma-se o que foi visto anteriormente; as frequências mais baixas são mais presentes do que as mais altas, levando a concluir que o TNSJ possui elementos com maior absorção nas altas frequências e elementos refletores nas baixas. Para além disso, como visto no capítulo 3.2.7, para salas de ópera, obter um BR mais alto não tem grande significado, exceto pelo maior suporte gerado para as vozes masculinas. Segundo Beranek [38], o valor ideal de BR_{TR} para salas de ópera está entre 1,1 e 1,45, intervalo a qual o TNSJ se encontra. De acordo com o quadro 3.2, a média das grandes salas de ópera é de 1,18, sendo o TNSJ abaixo desta média com uma diferença pequena de 0,04.

Quadro 5.10 – Valores do rácio de baixos (BR_TR) em bandas de 1/1 oitava nos nove pontos ensaiados (P1 a P9) do TSNJ.

Tempo de Reverberação (T_{30}) (s)										
Frequência (Hz)	Pontos									Média
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	
125	1,76	1,55	1,69	1,44	1,63	1,33	1,17	1,34	1,26	1,46
250	1,13	1,23	1,20	1,20	1,27	1,21	1,12	1,20	1,24	1,20
500	1,10	1,26	1,10	1,03	1,21	1,08	1,10	1,07	1,06	1,11
1000	1,27	1,24	1,20	1,21	1,24	1,11	1,25	1,29	1,16	1,22
BR	1,22	1,12	1,26	1,18	1,18	1,16	0,97	1,08	1,13	1,14

5.4. SPEECH TRANSMISSION INDEX (STI)

Conforme descrito no capítulo 2.5.3, o parâmetro *STI* (*Speech Transmission Index*) avalia a degradação da qualidade da transmissão sonora entre o transmissor e o recetor, ou seja, a variação na clareza da interpretação do discurso à medida que o ouvinte se distancia da fonte emissora, a qual, neste contexto, está centrada no palco. Os valores variam de 0 (má inteligibilidade) a 1 (excelente inteligibilidade) como visto no quadro 2.4.

O ensaio foi realizado (sem uso de sistemas de reforço eletroacústico e sem AVAC) nos nove pontos (P1 a P9) anteriormente descritos no capítulo 4.2.3. No quadro 5.11, para cada ponto, o “*STI* médio” foi calculado pela média aritmética das leituras obtidas nos dispositivos de “*STI* masculino” e “*STI* feminino”. O “*STI* médio global” do teatro foi obtido através da média aritmética dos valores de “*STI* médio” para todos os pontos escolhidos.

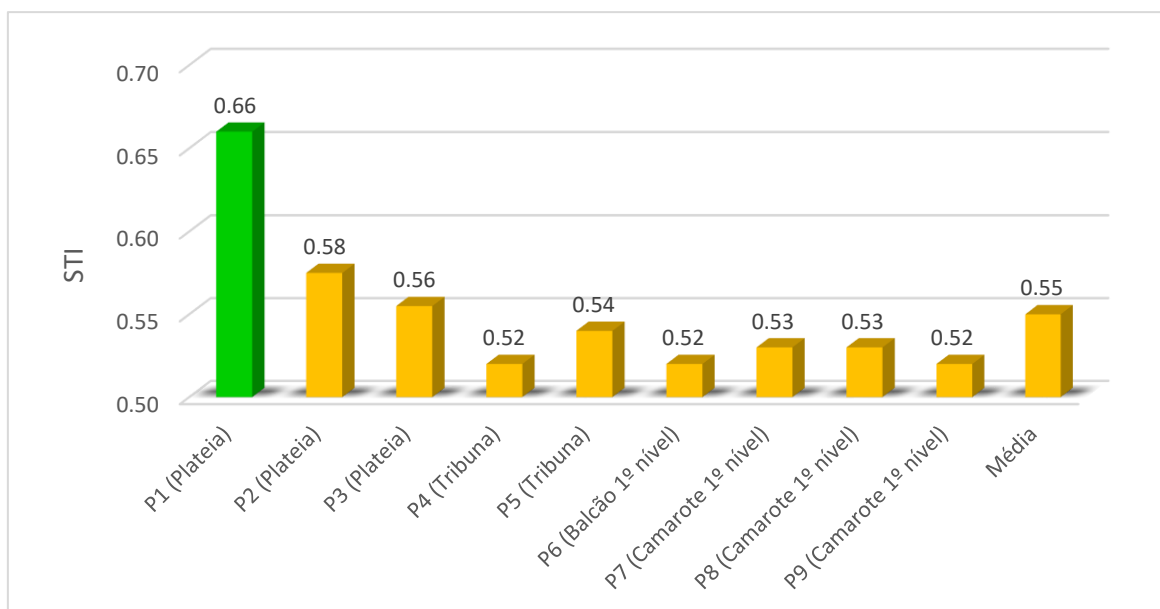
É fundamental que em todos os pontos de medição se mantenha uma alta inteligibilidade da palavra, com valores consistentes e satisfatórios. Conforme indicado no quadro 5.11 e na figura 5.7, observa-se que a inteligibilidade da palavra é maioritariamente classificada como “suficiente”, com a exceção do ponto P1 na plateia, onde é considerada “boa” por ser a zona mais próxima da fonte sonora. É notável que os valores globais exibem pouca variação, demonstrando uma **consistência** conforme desejado, com um desvio padrão de 0,05 para o “*STI* médio”. Isso sugere que, à medida que a localização na sala varia, a inteligibilidade da palavra não apresentará variação significativa.

Destaca-se que os melhores valores médios estão nas áreas da plateia, variando entre 0,56 e 0,66, enquanto os valores menos favoráveis estão localizados nos camarotes, no balcão e na tribuna, oscilando entre 0,52 e 0,54. Essa dinâmica ocorre devido à zona da plateia receber predominantemente ondas sonoras provenientes do campo direto, enquanto nas outras zonas mais afastadas da fonte sonora, a qualidade sonora é influenciada pelo campo reverberado. A média global do *STI* é, portanto, de 0,55, caracterizando-se como “suficiente” representando um resultado satisfatório para o TSNJ, uma vez e uma de suas funções é o espetáculo teatral.

Por conta de restrições técnicas e temporais, a avaliação da inteligibilidade da palavra foi conduzida apenas com o sistema de ventilação desligado. Reconhece-se a importância de realizar novas medições com o sistema AVAC ativado, a fim de compreender o seu impacto na compreensão auditiva dos espectadores.

Quadro 5.11 – Valores do parâmetro STI para os pontos P1 a P9 medidos do TNSJ; média e desvio padrão.

Ponto (Posição)	STI masculino	STI feminino	STI médio	Inteligibilidade da Palavra [16]	STI médio global
P1 (Plateia)	0,64	0,68	0,66	Boa (0,60-0,75) Suficiente (0,45-0,60)	0,55
P2 (Plateia)	0,56	0,59	0,58		
P3 (Plateia)	0,55	0,56	0,56		
P4 (Tribuna)	0,51	0,53	0,52		
P5 (Tribuna)	0,53	0,55	0,54		
P6 (Balcão 1º nível)	0,51	0,53	0,52		
P7 (Camarote 1º nível)	0,52	0,54	0,53		
P8 (Camarote 1º nível)	0,52	0,54	0,53		
P9 (Camarote 1º nível)	0,51	0,53	0,52		
Desvio Padrão	0,04	0,05	0,04	-	-

Figura 5.7 – Comparação dos valores do parâmetro *STI* para os nove pontos medidos (P1 a P9) e a média do TNSJ.

5.5. CLARIDADE (C_{80})

Conforme abordado no capítulo 2.7.4.1, a Claridade (C_{80}) é um parâmetro que descreve a capacidade de ouvir detalhes musicais, isto é, relaciona a energia recebida nos primeiros 80 ms (primeiras reflexões) e a energia posterior (cauda reverberante). Se as primeiras reflexões apresentarem muita energia o som direto irá se sobrepor ao reverberante (valor mais alto), e o inverso, o som reverberante mascarará o som direto (valor mais baixo). Portanto, torna-se um parâmetro de extrema importância para locais onde ocorrem espetáculos musicais, como é o caso em questão. Para este parâmetro, foram ensaiados nove pontos (P1 a P9) como descritos no capítulo 4.2.3.

O quadro 5.12 representa os valores de Claridade medidos nos pontos P1 a P9 nas bandas de frequência de 1/1 oitava entre 125 e 8.000 Hz; a média com as frequências de 500 e 1.000 Hz para cada ponto e para cada frequência e o seu respetivo desvio padrão. A figura 5.6 demonstra visualmente a variação da Claridade à medida que a frequência aumenta para cada ponto ensaiado. Este parâmetro pode apresentar variações consideráveis em seus valores, podendo ser tanto positivos quanto negativos. Devido a essa característica, no quadro 5.13, foi conduzida uma comparação entre os valores de Claridade obtidos no ensaio e os valores ideais considerados para diversas funções, os quais foram extraídos do quadro 2.7.

Como evidenciado na Figura 5.8 e no Quadro 5.12, a Claridade nas frequências médias, exhibe pouca variabilidade, com valores de desvio padrão baixos, de 0,8 e 1,3 dB. Em contraste, nas frequências altas e baixas, observa-se uma maior variação, com desvio padrão chegando a um máximo de 4,2 dB.

O valor médio da Claridade nas frequências médias do TNSJ é de 5,1 dB, sendo o maior valor registrado no ponto P1 de 7,1 dB, localizado na plateia, e o menor na zona do camarote, ponto P9, de 4,1 dB. Observa-se no quadro 5.13 que o TNSJ não atende restritamente aos limites estabelecidos para nenhum tipo de ambiente, sendo apenas tolerável para ópera (não wagneriana) e teatro. Apenas duas zonas específicas da sala satisfazem os valores estabelecidos para ópera ou teatro: o ponto P4 na tribuna, com um valor de 4 dB para ópera, dentro do limite de 3 a 4 dB (representando uma zona mais reverberante), e o ponto P1 na plateia, com um valor de 7,1 dB para teatro, superando o limite mínimo de 6 dB (representando uma zona de maior clareza do som). Conclui-se, a partir da média de 5,1 dB, que o TNSJ de uma forma geral, possui uma energia alta nos primeiros 80 ms sobrepondo-se à cauda reverberante. No entanto, é evidente que essa energia não é suficientemente alta para se enquadrar nos limites considerados formalmente ideais para o teatro e não baixa o suficiente para ópera.

Quadro 5.12 – Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os pontos P1 a P9 medidos do TNSJ; média e desvio padrão.

Ponto (Posição)	Frequência (Hz)							C_{80} [500, 1.000 Hz] (dB)
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
P1 (Plateia)	4,4	5,9	7,5	6,8	8,3	10,2	15,1	7,1
P2 (Plateia)	0,8	3,9	6,4	4,1	5,9	7,7	11,4	5,3
P3 (Plateia)	3,6	4,9	4,8	5,5	6,4	6,5	8,9	5,1
P4 (Tribuna)	0,7	4,1	3,4	4,6	7,0	8,3	11,7	4,0
P5 (Tribuna)	10,2	8,2	5,4	6,2	5,6	7,7	10,5	5,8
P6 (Balcão 1º nível)	1,5	3,1	4,6	5,3	6,4	6,1	9,0	4,9
P7 (Camarote 1º nível)	13,1	5,5	4,4	5,2	5,7	7,6	10,5	4,8
P8 (Camarote 1º nível)	2,8	2,8	3,9	5,1	5,5	7,4	10,8	4,5
P9 (Camarote 1º nível)	0,8	3,9	3,9	4,4	5,2	6,4	6,4	4,1
Média P1 a P9	4,2	4,7	4,9	5,2	6,2	7,5	10,5	5,1
Desvio Padrão	4,2	1,6	1,3	0,8	0,9	1,2	2,3	1,0

Quadro 5.13 – Verificação dos valores considerados ideais do parâmetro Claridade (C_{80}) do TNSJ de acordo com a função do espaço.

Função	C_{80} [500, 1.000 Hz] ideal (dB) [1]	C_{80} [500, 1.000 Hz] medido (dB)	Avaliação
Ópera wagneriana	1 a 2	5,1	Desadequado
Ópera (não wagneriana)	3 a 4		Tolerável
Teatro	>6		Tolerável
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

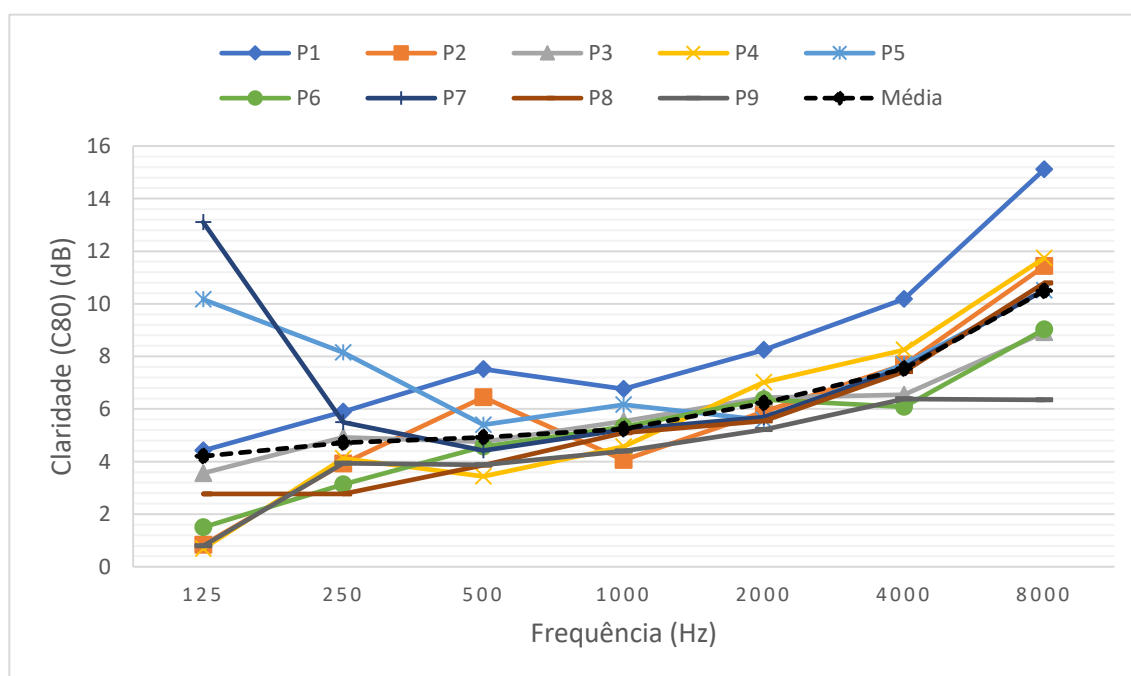


Figura 5.8 – Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os nove pontos medidos (P1 a P9) em bandas de frequência de 1/1 oitava do TNSJ.

5.6. DEFINIÇÃO (D_{50})

Conforme visto no capítulo 2.7.4.2, a Definição (D_{50}) é um parâmetro considerado adequado para a análise da percepção da palavra, ou seja, este relaciona a energia recebida nos primeiros 50 ms (primeiras reflexões) e a energia total recebida. Pode variar entre 1,0 (melhor definição do discurso) e 0 (pior definição do discurso). Para este parâmetro, foram ensaiados nove pontos (P1 a P9) como descritos no capítulo 4.2.3. O quadro 5.14 representa os valores de definição medidos nesses pontos nas bandas de frequência de 1/1 oitava entre 125 e 8.000 Hz; a média com as frequências de 500 e 1.000 Hz para cada ponto e para cada frequência e o seu respetivo desvio padrão.

Na figura 5.9, pode-se observar uma dispersão grande em praticamente toda a gama de frequências, sendo maior nas frequências 125 e 500 Hz, com desvios padrões de 0,11 e 0,09. Nas frequências médias (500 e 1.000 Hz), que realmente importam, nota-se uma variação grande entre a zona da plateia (P2) e da tribuna (P4). Sendo isto explicado pelo campo reverberante ter maior influência na zona da tribuna do que na plateia, interferindo na definição do discurso (menor valor).

Como se pode observar no quadro 5.14 e na figura 5.10, os valores médios do parâmetro revelam que a Definição no TNSJ, de uma forma global, é considerada “**suficiente**” em todos os pontos medidos. Sendo o maior valor de 0,69 na zona da plateia (P3) e o menor valor de 0,46 na zona da tribuna (P4). Em conclusão, os maiores valores estão situados na zona da plateia, com valores entre 0,66 e 0,69, os valores intermédios estão na zona dos camarotes e do balcão, num intervalo de 0,59 a 0,62, enquanto que os menores valores estão na área da tribuna, com 0,46 e 0,59. Isto se dá pela proximidade/distanciamento dos pontos em relação à fonte sonora, em que os mais próximos tendem a receber uma energia maior nos primeiros 50 ms. Conclui-se que a energia proveniente das primeiras reflexões é considerada média em comparação com a energia total recebida, o que torna o TNSJ um local com uma percepção da palavra considerada suficiente.

Quadro 5.14 – Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os pontos P1 a P9 medidos do TNSJ; média e desvio padrão.

Ponto (Posição)	Frequência (Hz)							D_{50} [500, 1.000 Hz]	Definição do discurso [48]
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
P1 (Plateia)	0,35	0,64	0,61	0,71	0,80	0,87	0,95	0,66	Suficiente (0,39 a 0,67)
P2 (Plateia)	0,39	0,58	0,74	0,59	0,70	0,77	0,86	0,67	
P3 (Plateia)	0,59	0,62	0,67	0,71	0,74	0,72	0,80	0,69	
P4 (Tribuna)	0,50	0,65	0,40	0,52	0,66	0,74	0,81	0,46	
P5 (Tribuna)	0,62	0,70	0,58	0,59	0,66	0,77	0,85	0,59	
P6 (Balcão 1º nível)	0,46	0,51	0,55	0,64	0,74	0,71	0,83	0,60	
P7 (Camarote 1º nível)	0,68	0,62	0,63	0,61	0,68	0,78	0,87	0,62	
P8 (Camarote 1º nível)	0,63	0,44	0,56	0,61	0,66	0,73	0,83	0,59	
P9 (Camarote 1º nível)	0,39	0,63	0,60	0,63	0,66	0,71	0,71	0,62	
Média P1 a P9	0,51	0,60	0,59	0,62	0,70	0,76	0,83	0,61	
Desvio Padrão	0,11	0,07	0,09	0,06	0,05	0,05	0,06	0,07	

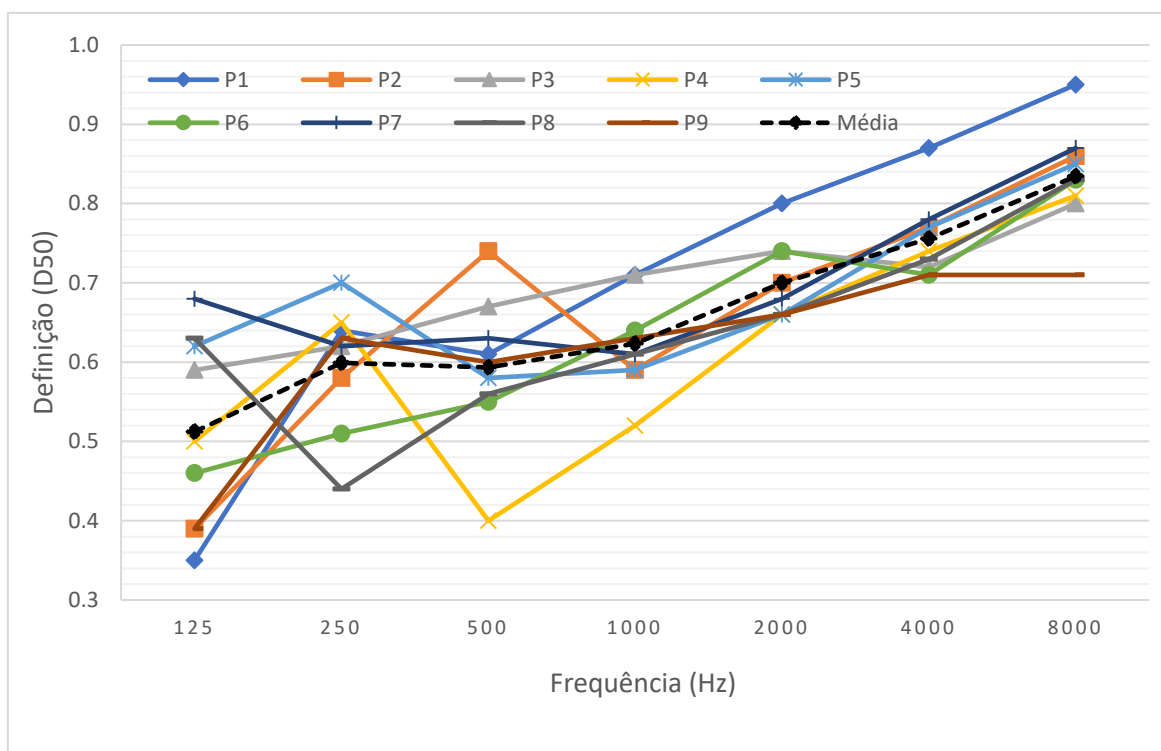


Figura 5.9 – Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os nove pontos medidos (P1 a P9) em bandas de frequência de 1/1 oitava do TNSJ.

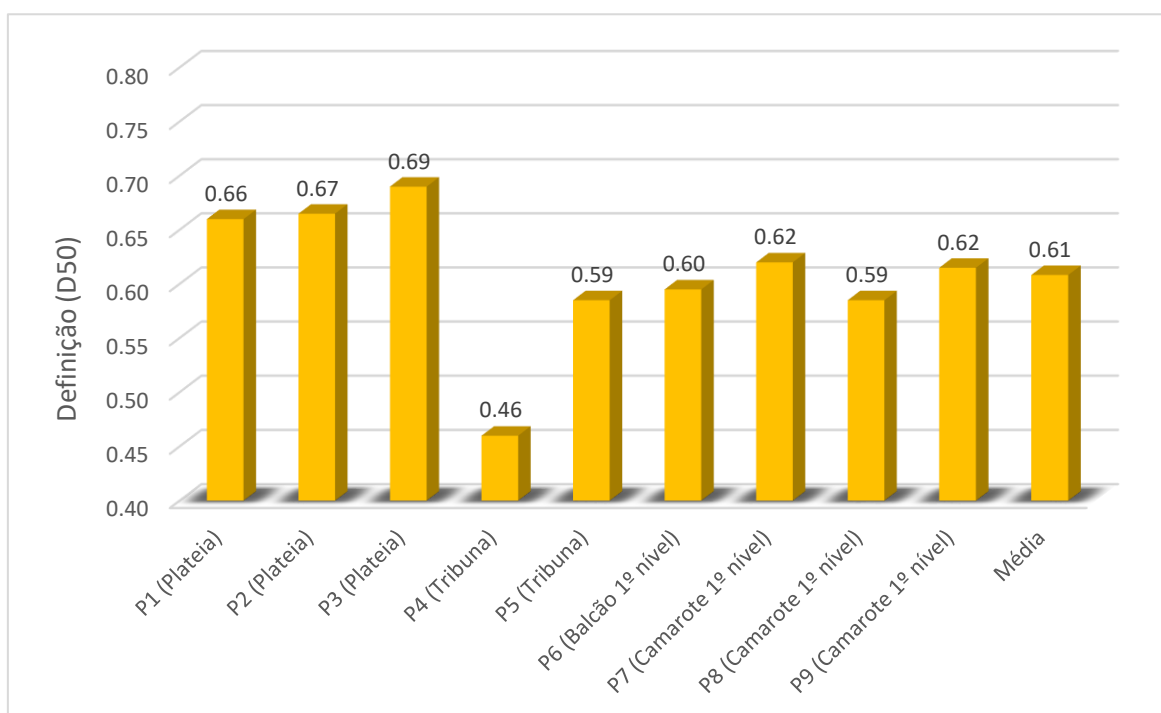


Figura 5.10 – Valores do parâmetro Definição média (D_{50} [500, 1.000 Hz]) para os nove pontos medidos (P1 a P9) em bandas de frequência de 1/1 oitava do TNSJ.

5.7. TEMPO CENTRAL (*ts*)

De acordo com o capítulo 2.7.4.3, o *tempo central* (*ts*) é um parâmetro que contabiliza o ponto médio no tempo da globalidade da energia acústica entre as primeiras reflexões e a cauda reverberante. Com outras palavras, este parâmetro determina se o ambiente é bastante reverberante (valor mais alto) ou se a energia do estímulo sonoro se concentra apenas nas primeiras reflexões, consequentemente, um som mais claro (valor mais baixo). Para este parâmetro, foram ensaiados nove pontos (P1 a P9) como descritos no capítulo 4.2.3. O quadro 5.15 representa os valores do tempo central medidos nesses pontos nas bandas de frequência de 1/1 oitava entre 125 e 8.000 Hz; valor médio com as frequências médias para cada ponto, a média para cada frequência e o seu respetivo desvio padrão.

Nota-se no quadro 5.15 que os valores do *tempo central* na zona da plateia são os valores mais baixos, entre 48 e 56 ms, o que se justifica por esses estarem mais próximos da fonte sonora, em que o campo direto chega com maior energia (situação semelhante do parâmetro *STI*). Já o restante das zonas (tribuna, balcão e camarotes) que se encontram mais afastadas da fonte sonora, obtêm um valor maior do *tempo central*, por volta dos 60 ms, em que a cauda reverberante tem maior energia, deixando o ambiente mais reverberante comparativamente com a plateia.

Como se pode observar na figura 5.11, nas altas frequências, há maior dispersão dos valores, com um desvio padrão de no máximo 25 ms. Em contrapartida, nas médias e altas frequências, o desvio padrão tem um valor próximo de 6 e 7 ms, o que mostra uma menor variabilidade entre os pontos ensaiados. Entretanto, as frequências médias (500 e 1.000 Hz) são as mais relevantes, registrando também um desvio não tão significativo, de 9,7 e 6,3 ms.

De acordo com o quadro 5.16 retirado do quadro 2.10, para música o intervalo ideal é de 80 a 230 ms (limite menor para ópera e limite maior para música do período romântico) e menor que 80 ms para a palavra. Os valores em todos os pontos medidos respeitam o limite inferior a 80 ms, obtendo uma média nas frequências de 500 e 1.000 Hz de 60 ms. Desta forma, o *ts* do TNSJ, mostra ser um ambiente ideal para palavra pois possui um som mais claro e pouco reverberante, como por exemplo, para funções como teatro.

Quadro 5.15 – Valores do parâmetro tempo central (*ts*) para os nove pontos (P1 a P9) medidos do TNSJ; média e desvio padrão.

Ponto (Posição)	Frequência (Hz)							<i>ts</i> [500, 1.000 Hz] (ms)
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	
P1 (Plateia)	108	56	50	46	31	20	10	48
P2 (Plateia)	120	70	47	65	49	36	19	56
P3 (Plateia)	78	76	57	53	48	45	29	55
P4 (Tribuna)	105	81	79	68	54	41	26	73
P5 (Tribuna)	46	49	66	57	53	38	24	62
P6 (Balcão 1º nível)	74	82	67	60	47	48	29	64
P7 (Camarote 1º nível)	53	60	63	60	51	37	22	61
P8 (Camarote 1º nível)	82	79	66	60	52	39	23	63
P9 (Camarote 1º nível)	92	69	66	58	50	39	31	62
Média	84	69	62	59	48	38	24	60
Desvio Padrão	23	11	9	6	6	7	6	7

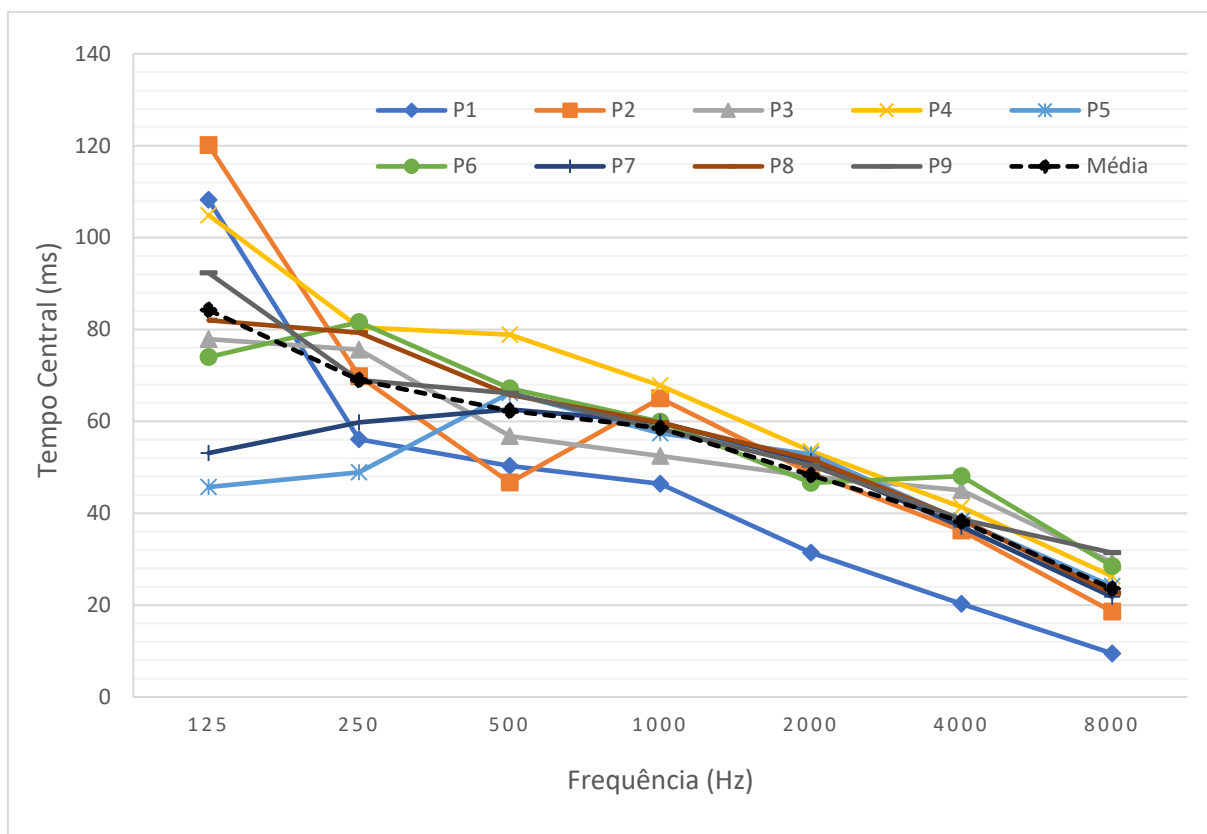


Figura 5.11 – Valores do parâmetro tempo central (t_s) para os nove pontos medidos (P1 a P9) em bandas de frequência de 1/1 oitava do TNSJ.

Quadro 5.16 – Verificação dos valores recomendados do parâmetro tempo central médio de acordo com o uso do TNSJ [1].

Função	t_s [500, 1.000 Hz] ideal (ms) [1]	t_s [500, 1.000 Hz] medido (ms)	Avaliação
Música	80 a 230	60	Desadequado
Palavra	< 80		Adequado

6

COMPARAÇÃO COM OUTRAS SALAS

6.1. INTRODUÇÃO

Para enquadrar o desempenho acústico medido no Teatro Nacional São João, neste capítulo é realizada uma análise comparativa com outras salas no panorama internacional e nacional. Para uma análise mais criteriosa, para as **internacionais** foram escolhidas salas com o mesmo tipo de formato, ou seja, salas em “ferradura”. Foram selecionadas cinco salas de ópera tradicionais:

- Royal Opera House, Londres;
- Teatro Alla Scala, Milão;
- Opera Garnier, Paris;
- Academy of Music, Filadélfia;
- Staatsoper, Viena.

Os parâmetros escolhidos foram:

- Tempo de reverberação médio (TR [500, 1.000 Hz]);
- Claridade média (C_{80} [500, 1.000 Hz]).

Para as salas nacionais, é realizada uma comparação com uma sala de formato “ferradura” e salas dos restantes formatos. Para a sala de formato “ferradura”, escolheu-se um único teatro: o Teatro Sá de Miranda (TSM), localizado em Viana do Castelo [49]. Este teatro é dedicado a espetáculos teatrais e possui um volume aproximado de 2.500 m³. São analisados cinco parâmetros, que são os mesmos utilizados para as salas internacionais, com a inclusão de três parâmetros adicionais:

- Definição média (D_{50} [500, 1.000 Hz]);
- Tempo central médio (t_s [500, 1.000 Hz]);
- *Speech Transmission Index* (STI).

Para as restantes salas de formatos variados, foram escolhidas onze salas portuguesas, retiradas de dissertações de mestrado, presentes no quadro 6.1. Nele, destacam-se as funções mais usuais de cada sala, as quais determinam um cenário acústico “ideal” para análise, focando-se principalmente na comunicação verbal (“palavra”) e/ou para apresentações musicais. É evidente que as salas são utilizadas para uma variedade de eventos distintos, cada um com suas próprias exigências acústicas específicas, levando a diferentes valores “ideais” dos parâmetros.

Quadro 6.1 – Comparação das diversas funções das doze salas nacionais.

Salas	Funções mais usuais	Palavra	Música
Cineteatro de Amarante [21]	Espectáculos		X
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares) [51]	Cinema, teatro, concertos e palestras	X	X
Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra) [53]	Eventos de música, teatro e entretenimento	X	X
Casa da Cultura de Ílhavo [56]	Espectáculos, congressos, seminários, convenções, eventos corporativos e sociais, cursos, exposições e apresentações	X	
Auditório FEUP [52]	Estabelecimento de ensino	X	
Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia [55]	Palavra e cinema	X	X
Centro de Artes de Águeda [54]	Dança clássica e contemporânea, música, teatro e cinema.	X	X
Grande Auditório do Altice Fórum Braga [50]	Conferências e seminários, espetáculos musicais, infantis, teatro, dança e <i>stand up comedy</i>	X	X
Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga [50]	Seminários, conferências, formações e debate	X	
Teatro Municipal de Ourém [33]	Teatro, cinema e eventos corporativos	X	X
Teatro Municipal da Covilhã [29]	Música e teatro	X	X
Teatro Nacional São João	Ópera e teatro	X	X

Os parâmetros escolhidos para a comparação dessas salas foram:

- Tempo de reverberação médio (TR [500, 1.000 Hz]);
- *Speech Transmission Index (STI)/ Rapid Speech Transmission Index (RASTI)*;
- Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}).

6.2. SALAS INTERNACIONAIS

6.2.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

De acordo com o quadro 6.2, estão as cinco salas internacionais tipo “ferradura” e o TNSJ com seus respectivos volumes, números de assentos e os valores do tempo de reverberação médio com as frequências de 500 e 1.000 Hz com a sala desocupada e ocupada.

Como pode ser observado no quadro 6.2 e na figura 6.1, o TNSJ apresenta um volume e número de assentos consideravelmente reduzidos em comparação com as demais salas, representando pouco menos da metade desses valores. Em relação ao tempo de reverberação médio, tanto desocupado quanto ocupado, o TNSJ registra o valor mais baixo entre essas cinco salas, o que era de se esperar pelo volume reduzido em comparação com as restantes salas.

Conforme mencionado anteriormente, o valor ideal de TR para ópera situa-se entre 1,3 e 1,7 segundos. Observa-se que, para o TR ocupado, apenas a Staatsoper está dentro dessa faixa ideal, enquanto que, para o TR desocupado, apenas o Teatro Alla Scala, Academy of Music e Staatsoper atingem o limite mínimo de 1,3 segundos.

É perceptível que algumas salas apresentam uma diferença significativa entre o TR ocupado e desocupado, enquanto outras não (entre 0,07 e 0,25 segundos). Essa disparidade decorre da variabilidade na capacidade de absorção dos elementos constituintes de cada sala, sendo que algumas possuem componentes mais absorventes do que outras.

Quadro 6.2 – Valores do tempo de reverberação médio (TR [500, 1.000 Hz]), ocupado e desocupado, de cinco salas internacionais tipo “ferradura” e do TNSJ, com o respetivo volume e número de assentos (adaptado de [38]).

Salas de Ópera	Nº de lugares	Volume (m³)	TR desocupado [500, 1.000 Hz] (s)	TR ocupado [500, 1.000 Hz] (s)	Δ TR
Royal Opera House, Londres	2.120	12.250	1,21	1,10	0,11
Teatro Alla Scala, Milão	2.289	11.252	1,36	1,20	0,16
Opera Garnier, Paris	2.131	10.000	1,22	1,15	0,07
Academy of Music, Filadélfia	2.827	15.100	1,55	1,40	0,15
Staatsoper, Viena	1.709	10.665	1,55	1,30	0,25
Teatro São João, Porto	614	4.560	1,17	1,09*	0,08

* valor previsto

De acordo com a fórmula de Sabine (eq. 2.13), existe uma relação entre o TR e o volume, em que se espera uma linha de tendência próxima de uma tendência crescente com um elevado coeficiente de correlação (R^2). Contudo, ao analisar os dados no quadro 6.2, constata-se que essa relação não se confirma, uma vez que a sala de maior volume (Academy of Music), embora apresente o maior tempo de reverberação, possui o mesmo TR que uma sala com volumetria menor (Staatsoper). A explicação para esse resultado reside principalmente na capacidade de absorção sonora das salas, que, conforme a fórmula de Sabine, é inversamente proporcional ao TR, mas também à geometria (reflexões) da sala.

Conclui-se, portanto, que a Academy of Music possui uma maior capacidade de absorção sonora do que a Staatsoper, devido às propriedades das diversas componentes da sala. É principalmente por esse motivo que a diferença entre o TR ocupado e desocupado da Academy of Music é menor do que o da Staatsoper.

As figuras 6.2 e 6.3 apresentam comparações gráficas dos valores de TR médios desocupado e ocupado (500, 1.000 Hz) em função do volume, acompanhadas por uma linha de regressão exponencial (o tipo que obteve o melhor valor de R^2). Os valores de R^2 obtidos foram de 0,39 para TR desocupado e 0,47 para TR ocupado, um valor consideravelmente distante de 1,0, representando pouca propensão (cerca de 43%) para essas equações justificarem com rigor o efeito do volume nos valores de TR.

As figuras 6.4 e 6.5, diferentemente das anteriores, são comparações gráficas dessas salas com os valores de TR médios desocupado e ocupado (500, 1.000 Hz) em função do número de assentos com uma linha de regressão exponencial. Ao contrário do que acontecia com o volume e o TR, de acordo com a fórmula de Sabine, é esperado que um maior número de lugares equivalha a uma maior absorção e consequentemente a um menor TR, ou seja, uma linha de tendência próxima de uma tendência linear decrescente com alto valor de R^2 . Os valores de R^2 obtidos foram de 0,26 para o TR desocupado e 0,37 para o TR ocupado, o que também sugere uma relação muito fraca entre o número de lugares e o TR. Nota-se uma correlação ligeiramente melhor do TR ocupado em comparação com o TR desocupado, pois nesse caso a comparação é feita com o mesmo número de assentos, porém com um valor de TR mais baixo devido ao aumento da absorção sonora do público.

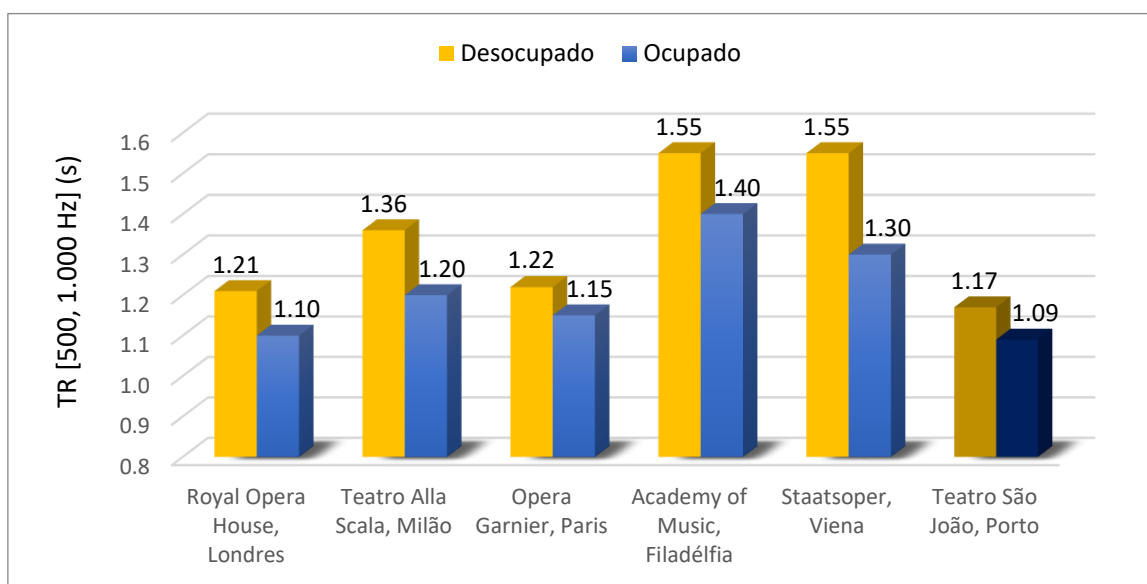


Figura 6.1 – Valores do tempo de reverberação (TR [500, 1.000 Hz]) desocupado e ocupado das cinco salas internacionais e do TNSJ.

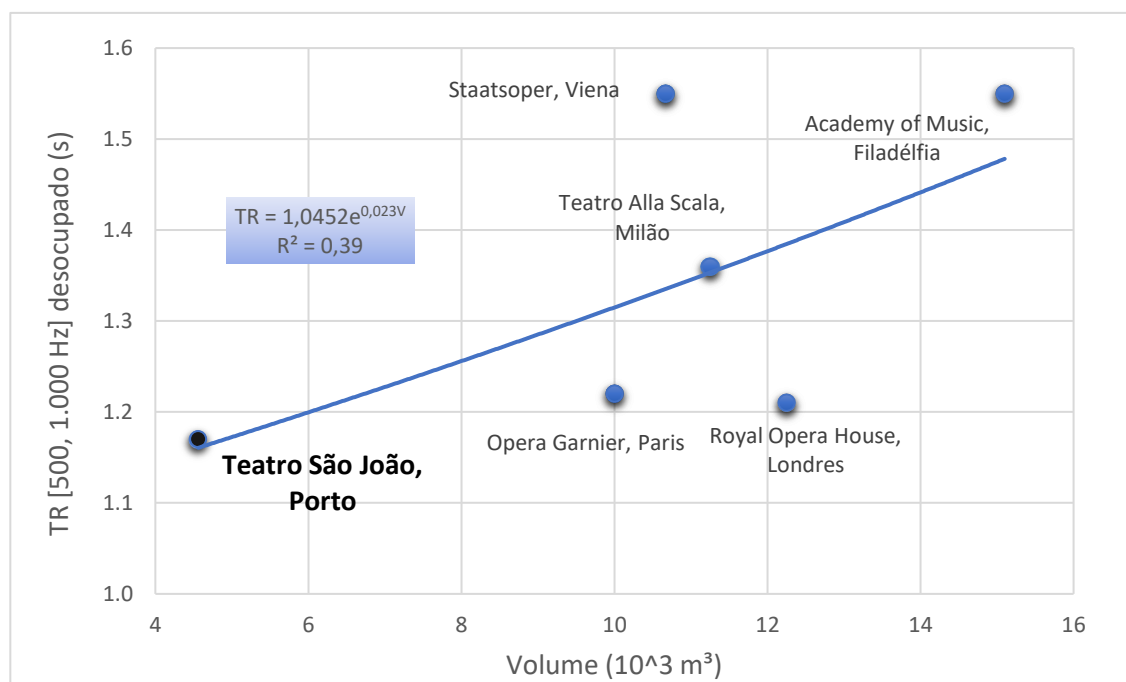


Figura 6.2 – Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] desocupado em função do volume das cinco salas internacionais tipo “ferradura” e do TNSJ com linha de tendência (exponencial).

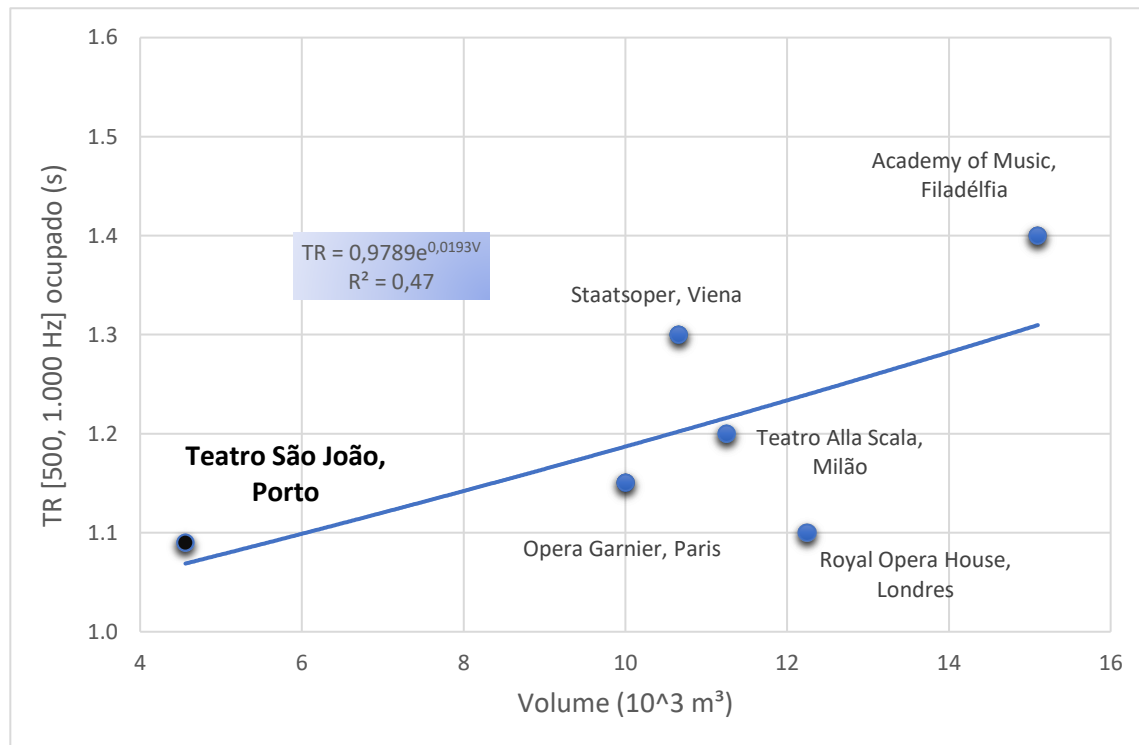


Figura 6.3 – Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] ocupado em função do volume das cinco salas internacionais e do TNSJ com linha de tendência (exponencial).

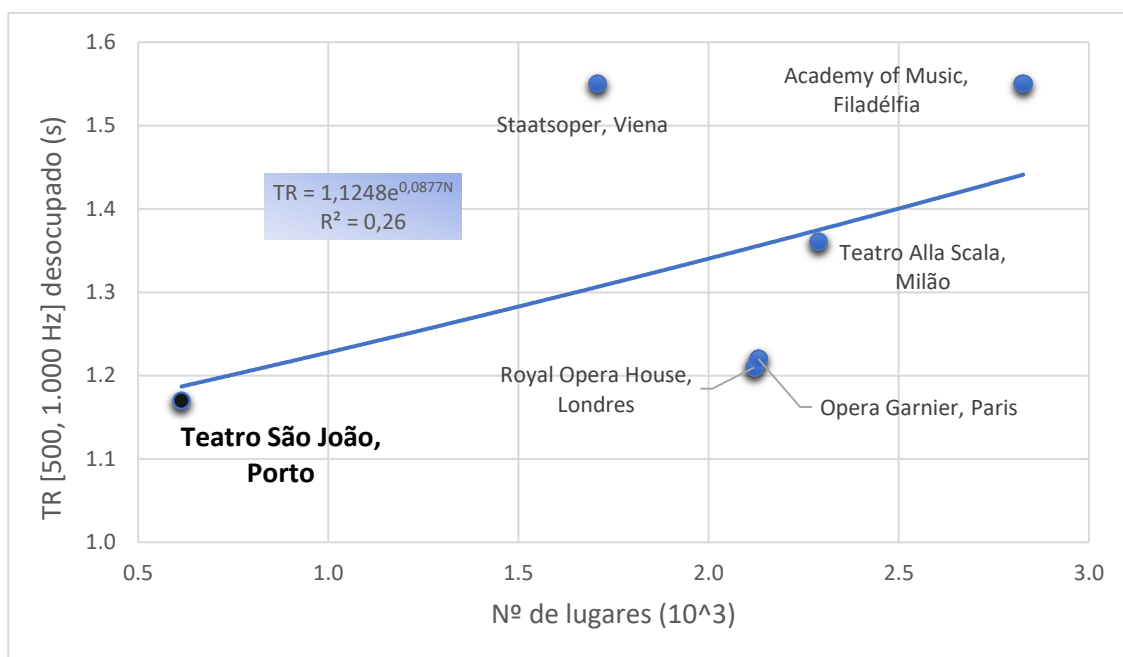


Figura 6.4 – Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] desocupado em função do número de lugares das cinco salas internacionais e do TNSJ com linha de tendência (exponencial).

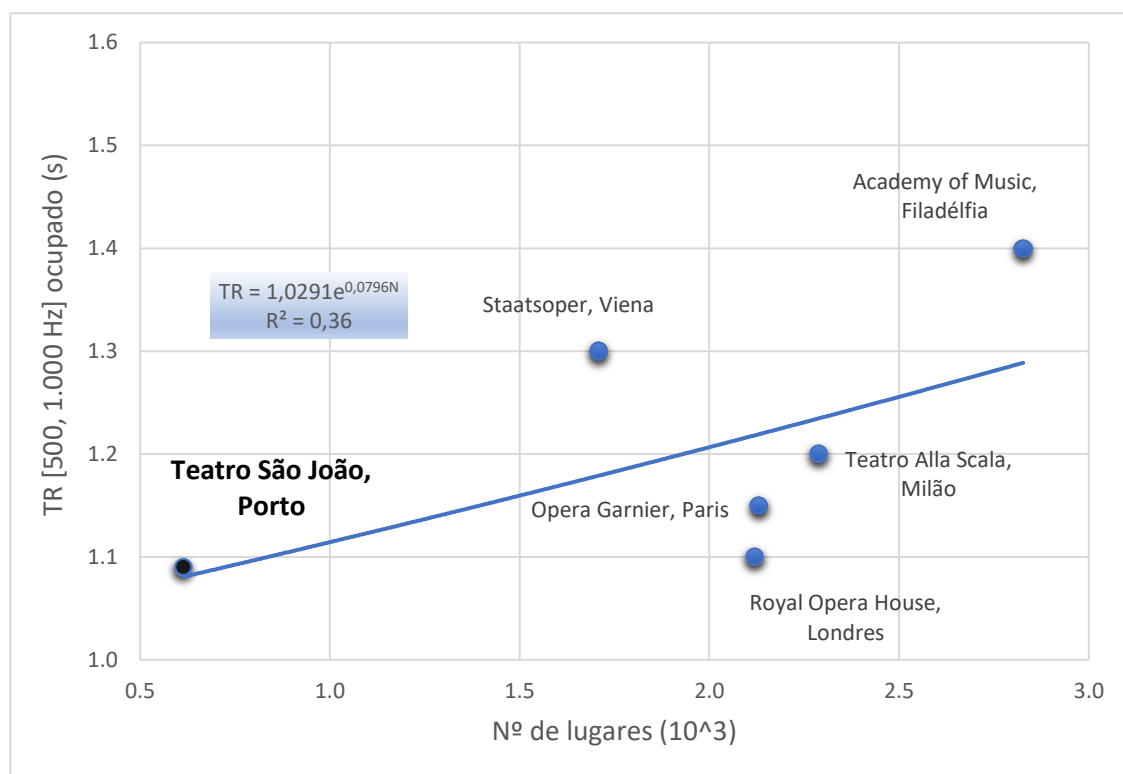


Figura 6.5 – Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] ocupado em função do número de lugares das cinco salas internacionais e do TNSJ com linha de tendência (exponencial).

O quadro 6.3 e a figura 6.6 mostram os valores do tempo de reverberação em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4.000 Hz das cinco salas internacionais e do TNSJ. Pode-se observar que os maiores valores do TR estão nas baixas frequências e os menores nas altas. Apesar de ser um aspeto positivo os maiores valores do TR estarem nas baixas frequências para os espetáculos musicais, é importante referir que as altas frequências, no caso 2.000 e 4.000 Hz, também devem se destacar para os espetáculos de ópera como referido anteriormente. De forma comparativa, o TNSJ também apresenta um gráfico decrescente (altos valores de TR nas baixas frequências e baixos valores nas altas), apesar de possuir um valor reduzido do TR em toda a gama de frequência. Nota-se também que os valores entre as seis salas são mais dispersos nas baixas frequências com desvios padrões de 0,21 e 0,24 s e com menor variabilidade nas médias e altas frequências, com desvios de 0,11 a 0,18 s. Portanto, conclui-se que, no que diz respeito à propriedade das frequências, o TNSJ se equipara às outras salas, com maiores valores de TR nas baixas frequências. No entanto, em termos médios, o tempo de reverberação do TNSJ está significativamente abaixo das outras salas.

Quadro 6.3 – Valores do tempo de reverberação em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4.000 Hz das cinco salas internacionais tipo “ferradura” e do TNSJ, com desvio padrão (adaptado de [38]).

Tempo de Reverberação desocupado (s)						
Salas de Ópera	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Royal Opera House, Londres	1,30	1,26	1,19	1,23	1,16	1,05
Teatro Alla Scala, Milão	1,81	1,57	1,40	1,31	1,22	1,11
Opera Garnier, Paris	1,84	1,40	1,26	1,18	1,14	1,02
Academy of Music, Filadélfia	2,00	1,80	1,60	1,50	1,40	1,30
Staatsoper, Viena	1,84	1,61	1,55	1,54	1,44	1,28
Teatro São João, Porto	1,46	1,20	1,11	1,22	1,11	1,05
Desvio padrão	0,24	0,21	0,18	0,14	0,13	0,11

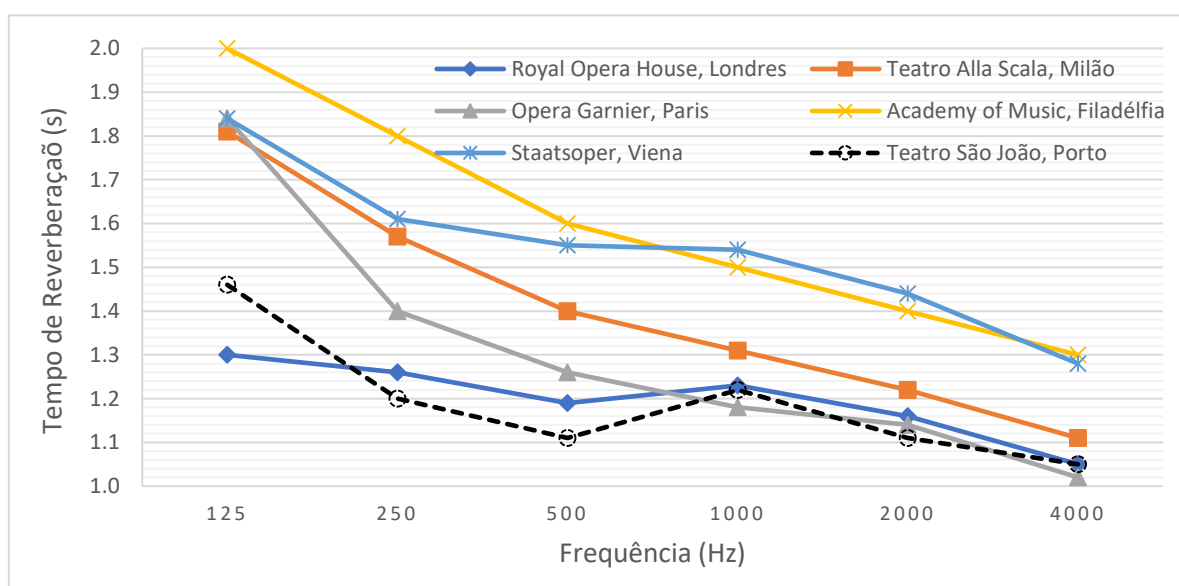


Figura 6.6 – Valores do tempo de reverberação em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4.000 Hz das cinco salas internacionais e do TNSJ [38].

6.2.2. CLARIDADE (C_{80})

No quadro 6.4, são apresentadas as cinco salas internacionais tipo “ferradura” e o TNSJ, exibindo seus respectivos volumes, números de assentos e os valores da Claridade média para as frequências de 500 e 1.000 Hz.

A figura 6.7 apresenta uma comparação gráfica da Claridade média, C_{80} [500, 1.000 Hz], em função do Volume, acompanhadas por uma linha de regressão linear. Para esta correlação, obtêm-se um R^2 de 0,51, que comparativamente com os outros coeficientes anteriormente obtidos, tem uma maior fiabilidade, apesar de ainda ser um valor distante de 1,0. Portanto, à medida que o volume aumenta, a Claridade diminui, tendo assim uma relação inversamente proporcional com uma dependência de aproximadamente 51%.

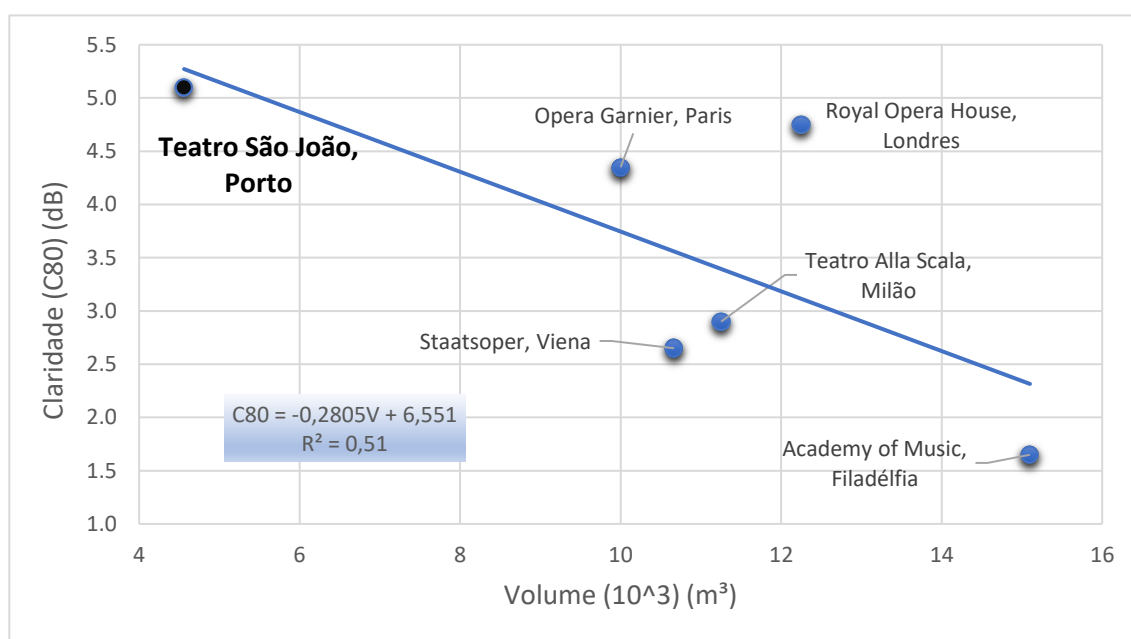


Figura 6.7 – Valores da Claridade média (C_{80} [500, 1.000 Hz]) em função do volume com linha de tendência (linear) das cinco salas internacionais e do Teatro São João.

A figura 6.8 apresenta uma comparação gráfica da Claridade média, C_{80} [500, 1.000 Hz], em função do número de assentos, acompanhadas por uma linha de regressão linear. Para esta correlação, obtêm-se um R^2 de 0,44, uma relação fraca entre os dois parâmetros de modo linear. De forma semelhante que ocorre com o volume, à medida que o número de assentos aumenta, a Claridade diminui, uma relação inversamente proporcional com uma dependência de 44%.

De acordo com os valores apresentados no quadro 6.4, observa-se que o TNSJ possui a maior Claridade em comparação com as outras salas, que apresentam valores mais baixos. Conforme discutido anteriormente, os valores ideais para ópera situam-se entre 1 e 4 dB, e apenas o TNSJ e o Royal Opera House estão fora deste intervalo. Isto é, as outras salas, de forma geral, possuem uma proporção maior da cauda reverberante em relação à energia nos primeiros 80 ms, enquanto que o TNSJ é a situação inversa, não favorecendo totalmente espetáculos de ópera. Portanto, para este tipo de apresentação, conclui-se que o TNSJ apresenta o valor do parâmetro C_{80} **menos adequado** relativamente a essas salas.

Quadro 6.4 – Valores da claridade média (C_{80} [500, 1.000 Hz]) de cinco salas internacionais e do Teatro São João com o respetivo volume e número de assentos (adaptado de [38]).

Salas de Ópera	Nº de lugares	Volume (m³)	C_{80} [500, 1.000 Hz] (dB)
Royal Opera House, Londres	2.120	12.250	4,75
Teatro Alla Scala, Milão	2.289	11.252	2,90
Opera Garnier, Paris	2.131	10.000	4,35
Academy of Music, Filadélfia	2.827	15.100	1,65
Staatsoper, Viena	1.709	10.665	2,65
Teatro São João, Porto	614	4.560	5,10

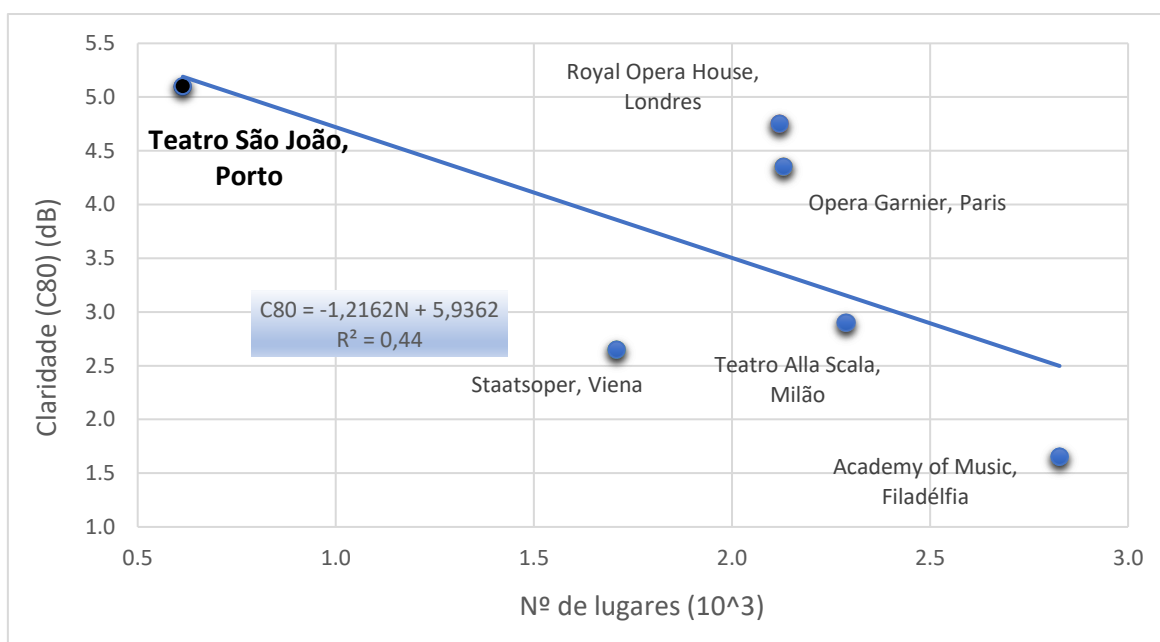


Figura 6.8 – Valores de Claridade média (C_{80} [500, 1.000 Hz]) em função do número de lugares com linha de tendência (linear) das cinco salas internacionais e do Teatro São João.

6.3. SALAS NACIONAIS

6.3.1. SALA NACIONAL COM FORMATO “FERRADURA”

6.3.1.1. Tempo de Reverberação

O quadro 6.5 exhibe os valores do tempo de reverberação em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4.000 Hz para o Teatro Nacional São João (TNSJ) e para o Teatro Sá de Miranda em Viana do Castelo (TSM), enquanto a figura 6.9 proporciona uma comparação gráfica desses valores. Segundo a fórmula de Sabine, espera-se que quanto maior o volume, maior seja o tempo de reverberação. No entanto, mesmo o TNSJ possuindo uma volumetria maior, observa-se um tempo de reverberação **inferior**, de 1,17 segundos, sugerindo uma capacidade de absorção sonora das componentes significativamente maior em comparação com o TSM.

É relevante destacar que o TSM é principalmente destinado a peças teatrais, o que demanda um tempo de reverberação (TR) mais baixo, idealmente entre 0,7 e 0,9 segundos. Por outro lado, o TNSJ poderia ter como foco os espetáculos de ópera, exigindo um TR maior, idealmente entre 1,3 e 1,7 segundos. No entanto, verifica-se que nenhum dos dois teatros atende a esses intervalos ideais de TR. A figura 6.9 revela que ambos os teatros apresentam tempos de reverberação mais longos nas baixas frequências e valores mais baixos nas altas frequências. Como referido anteriormente, tempos de reverberação mais prolongados nas baixas frequências, contribui para uma melhor qualidade dos espetáculos musicais, enquanto que valores elevados de TR nas frequências médias/altas, favorece a inteligibilidade da palavra (e dos “*singing formant*” para espetáculos de ópera). Conclui-se que, tanto o TNSJ quanto o TSM, parecem não ter um desempenho totalmente ideal tanto para *palavra* quanto para *música*, situando-se em um “meio termo” entre os valores ideais.

Quadro 6.5 – Valores do tempo de reverberação (salas desocupadas) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4.000 Hz do TSM e do TNSJ e o valor médio [49].

Tempo de Reverberação (s)							TR [500, 1.000 Hz] (s)
Salas	Frequência (Hz)						
	125	250	500	1000	2000	4000	
Teatro Sá de Miranda, Viana do Castelo	1,51	1,35	1,20	1,21	1,14	0,95	1,21
Teatro Nacional São João, Porto	1,46	1,20	1,11	1,22	1,11	1,05	1,17
ΔTR (TNSJ - TSM)	-0,05	-0,14	-0,09	0,01	-0,03	0,10	-0,04

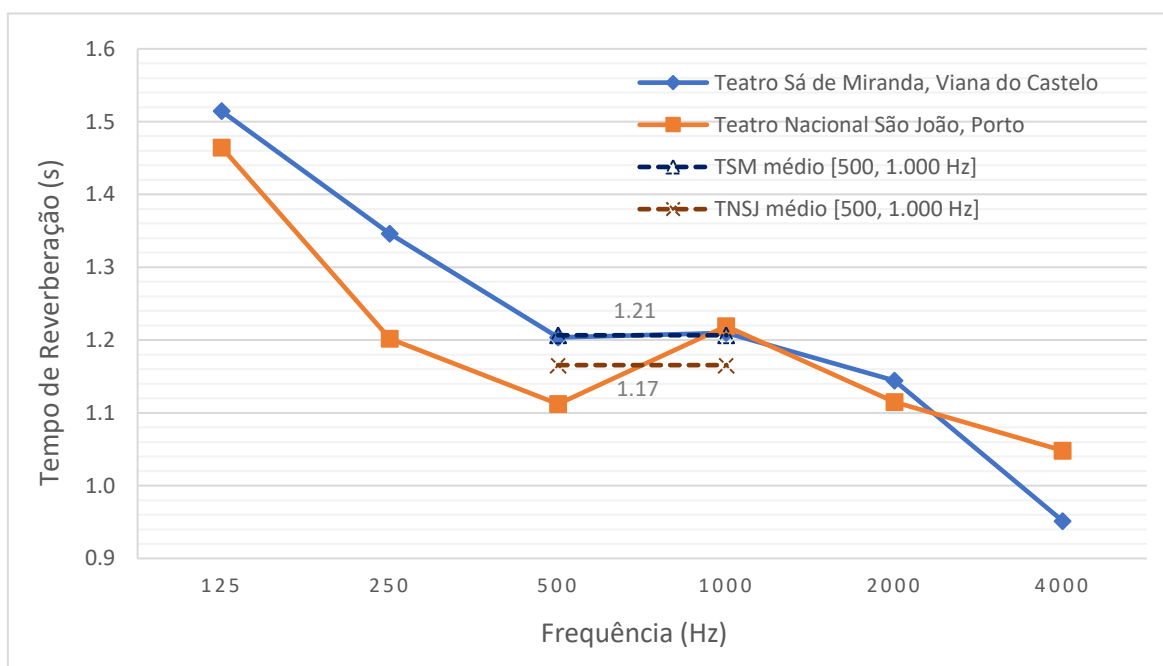


Figura 6.9 – Valores do tempo de reverberação (salas desocupadas) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4.000 Hz do TSM e do TNSJ e seus valores médios [49].

6.3.1.2. Claridade (C_{80})

O quadro 6.6 apresenta os valores da Claridade média, C_{80} [500, 1.000 Hz], em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz para o Teatro Nacional São João (TNSJ) e para o Teatro Sá de Miranda (TSM), enquanto a figura 6.10 fornece uma comparação gráfica desses valores. É importante destacar que, para espetáculos teatrais, o valor ideal de Claridade média deve ser superior a 6 dB, enquanto para ópera, situa-se entre 1 e 4 dB. Nenhum dos teatros avaliados está rigorosamente dentro desses limites ideais de acordo com essas funções (TSM com 3,4 dB menor que 6 dB para teatro e TNSJ com 5,1 dB maior que 4 dB para ópera).

Ao contrário do tempo de reverberação, o valor da Claridade aumenta com a frequência, indicando que os maiores valores estão nas altas frequências. Conclui-se que o TSM possui uma energia menor nos primeiros 80 ms do que o TSNJ, levando a ser mais adequado para espetáculos de ópera que o TNSJ.

Quadro 6.6 – Valores da Claridade (C_{80}) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz do TSM e do TNSJ e o valor médio [49].

Claridade (dB)								C_{80} [500, 1.000 Hz] (dB)
Salas	Frequência (Hz)							
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Teatro Sá de Miranda, Viana do Castelo	2,0	3,5	4,1	2,8	4,0	6,5	9,8	3,4
Teatro Nacional São João, Porto	4,2	4,7	4,9	5,2	6,2	7,5	10,5	5,1
ΔC_{80} (TNSJ - TSM)	2,2	1,3	0,9	2,4	2,2	1,0	0,7	1,7

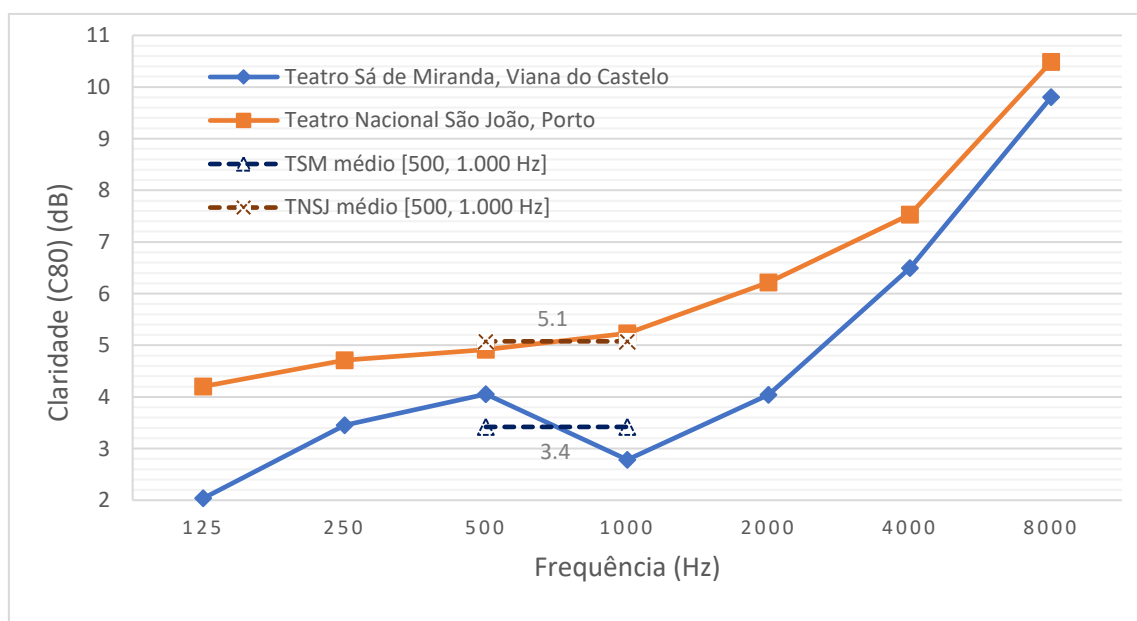


Figura 6.10 – Valores da Claridade (C_{80}) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz do TSM e do TNSJ e seus valores médios [49].

6.3.1.3. Tempo Central (t_s)

O quadro 6.7 apresenta os valores do *tempo central* em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz para o Teatro Nacional São João (TNSJ) e para o Teatro Sá de Miranda (TSM), enquanto a figura 6.11 fornece uma comparação gráfica desses valores. Assim como o tempo de reverberação, o *tempo central* diminui com a frequência, com os valores mais altos nas baixas frequências. Para esses parâmetros, os dois teatros demonstram resultados bastante próximos, com médias de 72 ms para o TSM e 60 ms para o TNSJ. É importante ressaltar que, para espetáculos centrados na palavra (teatro), o valor ideal é inferior a 80 ms, e ambos os teatros atendem a essa condição. Isso indica que em ambos os casos, a energia sonora se concentra nas primeiras reflexões, resultando em uma qualidade sonora mais clara para a palavra e nem tanto para a qualidade musical.

Quadro 6.7 – Valores do tempo central (t_s) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz do TSM e do TNSJ e o valor médio [49].

Tempo Central (ms)								ts [500, 1.000 Hz] (ms)
Salas	Frequência (Hz)							
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Teatro Sá de Miranda, Viana do Castelo	97	73	70	75	63	43	26	72
Teatro Nacional São João, Porto	84	69	62	59	48	38	24	60
Δts (TNSJ - TSM)	-13	-4	-8	-16	-15	-5	-2	-12

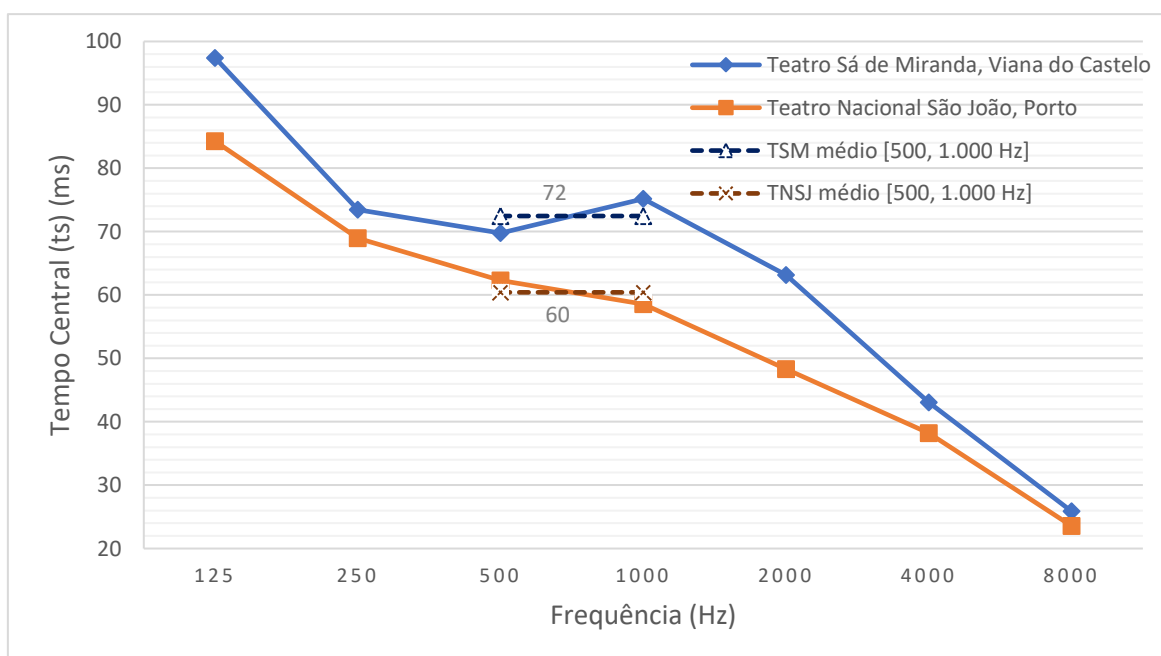


Figura 6.11 – Valores do tempo central (t_s) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz do TSM e do TNSJ e seus valores médios [49].

6.3.1.4. Definição (D_{50})

O quadro 6.8 apresenta os valores da Definição (D_{50}) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz para o Teatro Nacional São João (TNSJ) e para o Teatro Sá de Miranda (TSM), enquanto a figura 6.12 fornece uma comparação gráfica desses valores.

Este parâmetro é delimitado entre 0 e 1, onde valores mais próximos de 1 indicam uma melhor definição do discurso. Tal como para a Claridade, a Definição tem um ligeiro aumento à medida que a frequência aumenta, sendo os maiores (melhores) valores nas altas frequências. No entanto, tal como nos outros parâmetros, as frequências mais relevantes para analisar a Definição são as médias (500 e 1.000 Hz). De acordo com a figura 6.14, pode-se notar a proximidade de valores dos teatros em toda a gama de frequência, obtendo um resultado médio de 0,53 para o TSM e 0,61 para o TNSJ, ambos com valores considerados “satisfatórios”. Pode-se concluir que ambos os teatros mostram ter uma definição satisfatória do discurso para a prática de artes teatrais, sendo o TNSJ com **melhor** desempenho.

Quadro 6.8 – Valores da definição (D_{50}) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz do TSM e do TNSJ e o valor médio [49].

Definição								D_{50} [500, 1.000 Hz]
Salas	Frequência (Hz)							
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Teatro Sá de Miranda, Viana do Castelo	0,48	0,54	0,56	0,51	0,58	0,70	0,82	0,53
Teatro Nacional São João, Porto	0,51	0,60	0,59	0,62	0,70	0,76	0,83	0,61
ΔD_{50} (TNSJ - TSM)	0,03	0,06	0,03	0,11	0,12	0,06	0,01	0,08

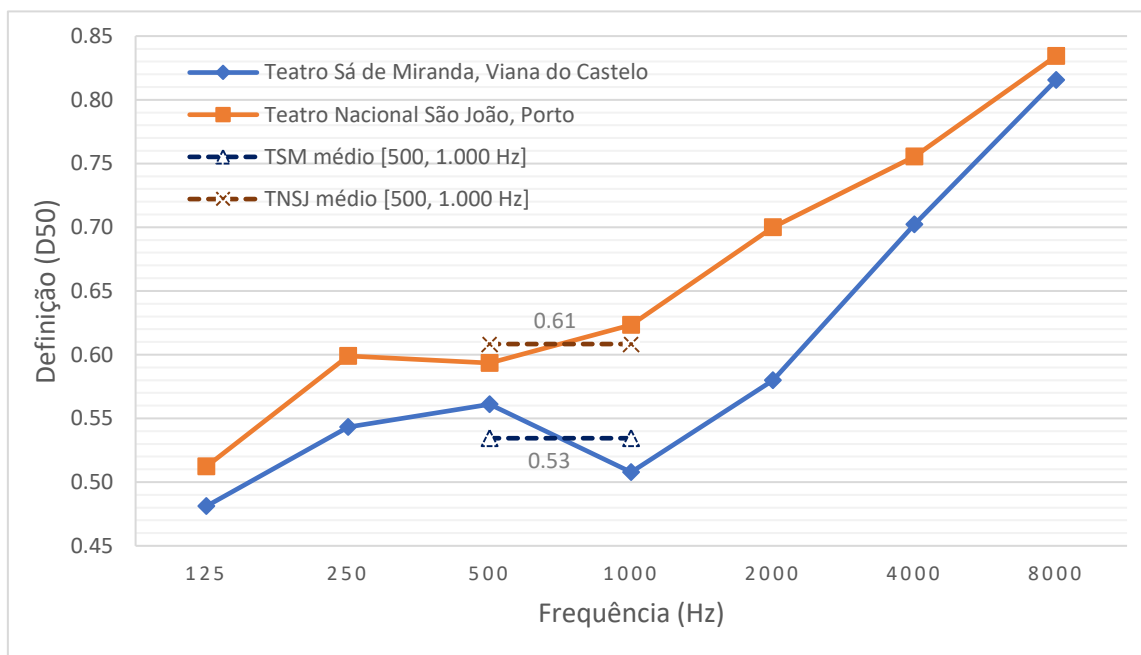


Figura 6.12 – Valores da Definição (D_{50}) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8.000 Hz do TSM e do TNSJ e seus valores médios [49].

6.3.1.5. *Speech Transmission Index (STI)*

O quadro 6.9 e a figura 6.13 mostram os valores de *STI* médio, máximo e mínimo do Teatro Nacional São João (TNSJ) e do Teatro Sá de Miranda (TSM). O TSM apresentou o maior (melhor) *STI* máximo de 0,71 e o menor (pior) *STI* mínimo de 0,46, enquanto que o TNSJ obteve o menor (pior) *STI* máximo e o maior (melhor) *STI* mínimo. Vale ressaltar que ambas as salas possuem um *STI* máximo considerado “bom” e um *STI* mínimo “suficiente”. Em relação a valores médios, o TNSJ apresentou a **melhor** inteligibilidade da palavra com 0,55 e o TSM com 0,53, uma pequena diferença de 0,02. Tal como para a Definição, ambos os teatros apresentam valores médios considerados “suficientes” para a palavra, sendo mais uma vez positivo para espetáculos teatrais.

Ao final da análise comparativa de ambos os teatros através desses parâmetros, pode-se concluir que os valores obtidos são bastante próximos sem grande dispersão, apresentando de modo geral, um resultado mais positivo para qualidade da palavra do que para a música.

Quadro 6.9 – Valor do *STI* máximo, mínimo e médio do TSM e do TNSJ [49].

Salas	<i>STI</i> máximo	<i>STI</i> mínimo	Amplitude	<i>STI</i> médio
Teatro Sá de Miranda, Viana do Castelo	0,71	0,46	0,25	0,53
Teatro Nacional São João, Porto	0,66	0,52	0,14	0,55
ΔSTI (TNSJ - TSM)	-0,05	0,06	-0,11	0,02

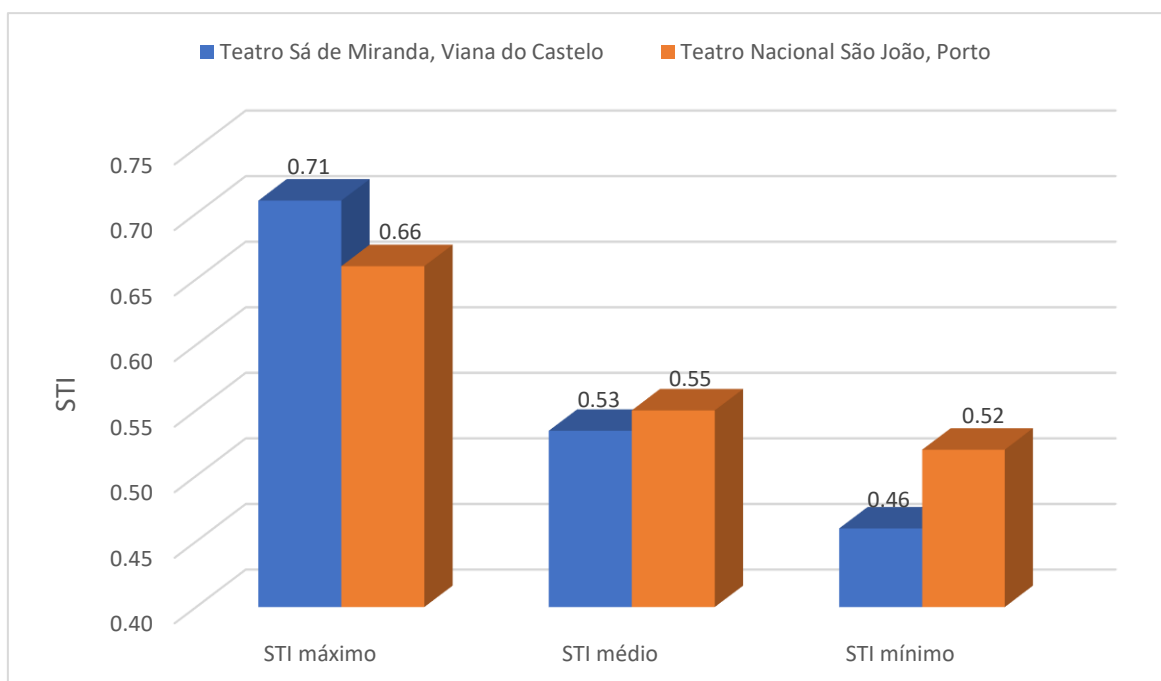


Figura 6.13 – Valores do *STI* máximo, médio e mínimo do TSM e do TNSJ [49].

6.3.2. SALAS NACIONAIS COM OUTROS FORMATOS

6.3.2.1. Tempo de Reverberação

O quadro 6.10 mostra o resumo dos valores do volume, número de lugares e tempo de reverberação médio (TR [500, 1.000 Hz]) das doze salas nacionais que são utilizados em base dos próximos gráficos. Em uma análise geral, fica evidente que o Teatro Nacional São João (TNSJ) se destaca pelo volume, classificando-se como o quarto **maior** nesse aspeto. Da mesma forma, em relação ao número de assentos, destaca-se como o terceiro **maior**. Quanto ao tempo de reverberação médio, encontra-se em quarto lugar, juntamente com o Cineteatro de Amarante, demonstrando uma reverberação um pouco acima da média dessas salas.

Quadro 6.10 – Valores do Volume, Número de lugares, Volume por assento e TR médio (500, 1.000 Hz) das doze salas nacionais incluindo o TNSJ.

Salas	Volume (m³)	Nº de lugares	Volume por assento	TR [500, 1.000 Hz] (s)
Cineteatro de Amarante [21]	2700	386	7,0	1,20
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares) [51]	2111	275	7,7	1,00
Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra) [53]	12000	1093	11,0	1,50
Casa da Cultura de Ílhavo [56]	3779	491	7,7	1,00
Auditório FEUP [52]	3317	500	6,6	1,50
Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia [55]	3219	330	9,8	0,80
Centro de Artes de Águeda [54]	5066	398	12,7	0,80
Grande Auditório do Altice Fórum Braga [50]	9150	998	9,2	1,00
Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga [50]	1320	254	5,2	0,50
Teatro Municipal de Ourém [33]	3915	441	8,9	1,00
Teatro Municipal da Covilhã [29]	4258	600	7,1	1,40
Teatro Nacional São João	4560	614	7,4	1,20
Média	4616	532	8,4	1,08

Como se pode observar na figura 6.14, o TR médio em função do volume gera uma linha de tendência (logarítmica) com R^2 de 0,26, valor este muito distante de 1,0. Isto é, à medida que o volume aumenta, o TR aumenta de forma logarítmica com uma dependência fraca de 26%. Como visto anteriormente, a fórmula de Sabine indica que essas duas variáveis são diretamente proporcionais, mas com se sabe, a fórmula também inclui a absorção sonora, a qual é inversamente proporcional ao TR, além disso, também não faz intervir a geometria da sala (por exemplo as reflexões). Isto faz com que a correlação diretamente proporcional do TR e Volume não apresente um R^2 tão alto. Ou seja, as salas com maiores Volumes e baixos TR, indicam altos valores de absorção sonora (ou um bom tratamento acústico), como por exemplo, o Grande Auditório do Altice Fórum Braga, com um grande volume de 9150 m³ apresenta um TR baixo de 1,0 s. No gráfico, as salas mais afastadas da linha de tendência representam maiores valores de absorção sonora (possivelmente a existência de um tratamento acústico) enquanto que as mais próximas, uma menor absorção.

Na figura 6.15, o TR médio está em função do número de lugares, em que apresenta uma tendência logarítmica com um R^2 de 0,40. Indicando também uma fraca relação do TR aumentar com o número de lugares de forma logarítmica e uma dependência de apenas 40%. Este gráfico segue o mesmo raciocínio que o anterior (Fig. 6.14), quanto mais lugares, maior é o volume do espaço e consequentemente uma linha de tendência crescente, em que o número de lugares cresce com o TR médio, porém com uma dependência fraca entre essas duas variáveis.

Na figura 6.16 está representada graficamente o TR médio em função do Volume por assento (Volume/Nº de lugares). Pode-se notar que esta correlação tem uma dependência de 1% com R^2 sendo 0,01. Apesar de ser uma correlação por vezes utilizada na acústica arquitetónica, neste caso mostra uma dependência praticamente nula das variáveis, o que pode ser resultado da diferença discrepante entre as salas, como por exemplo, forma, tamanho, funções principais (música e/ou palavra) e qualidade e/ou quantidade de sistemas acústicos utilizados.

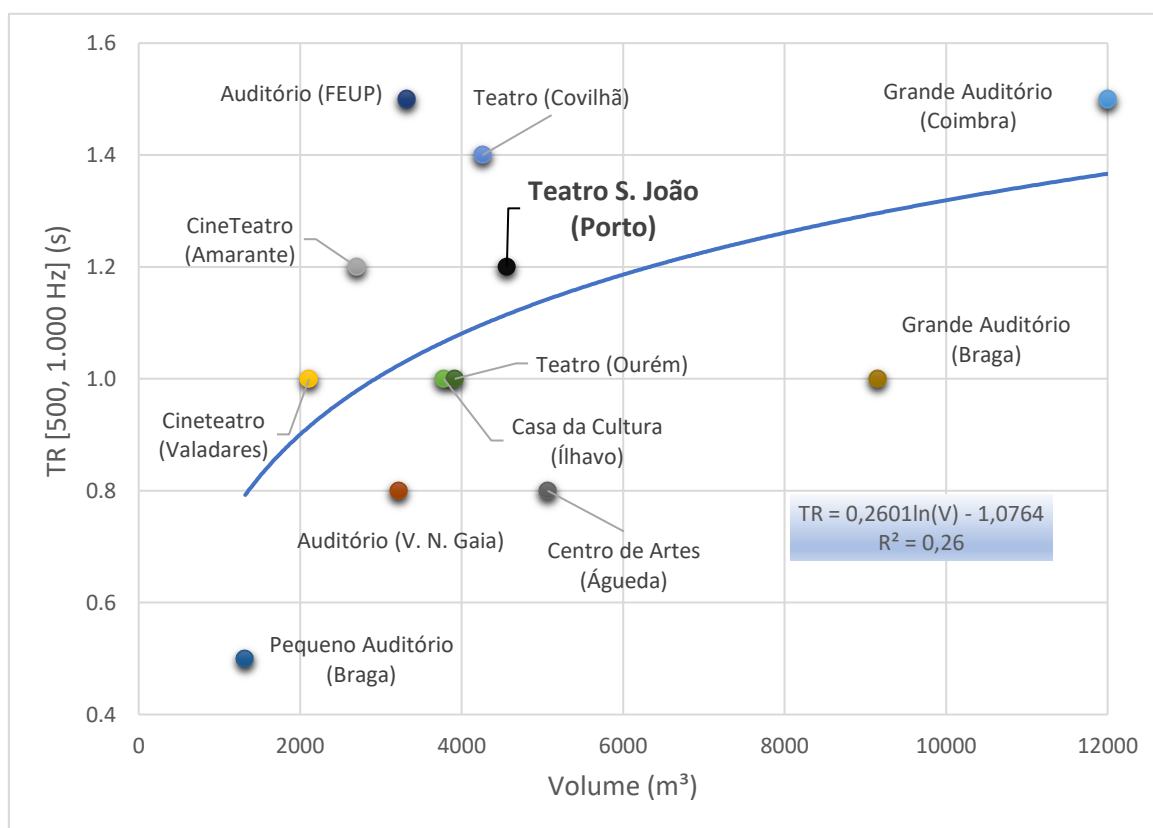


Figura 6.14 – Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] em função do Volume das onze salas nacionais e do TNSJ com linha de tendência (logarítmica).

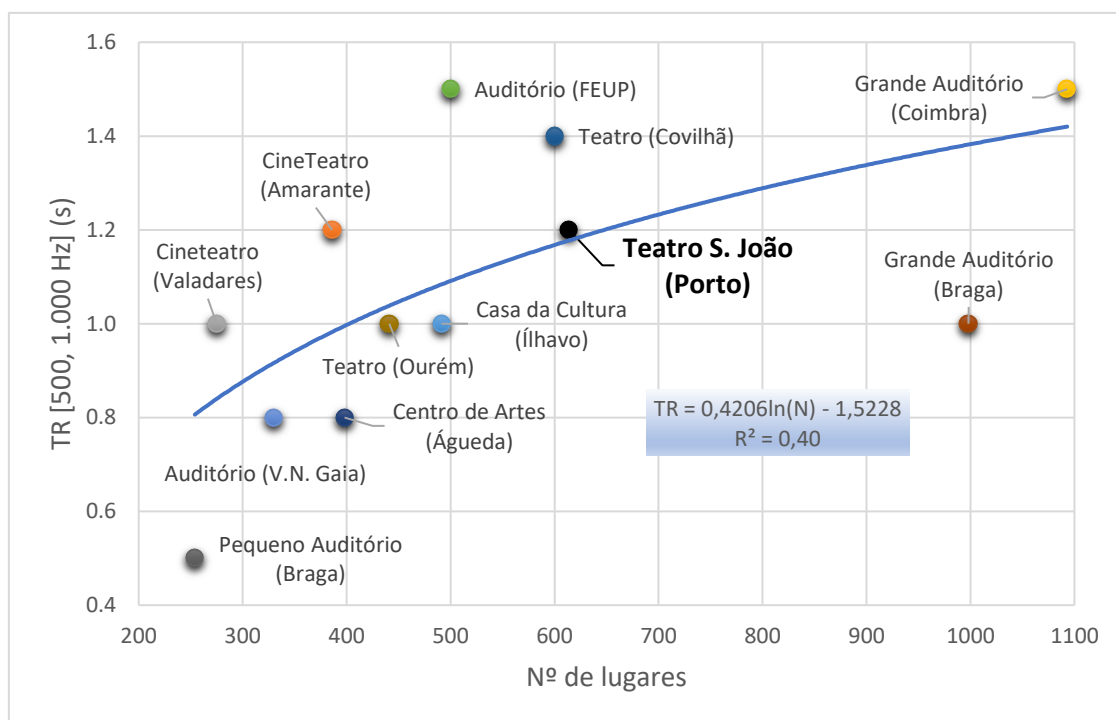


Figura 6.15 – Valores do parâmetro $TR [500, 1.000 \text{ Hz}]$ em função do Número de lugares das onze salas nacionais e do TNSJ com linha de tendência (logarítmica).

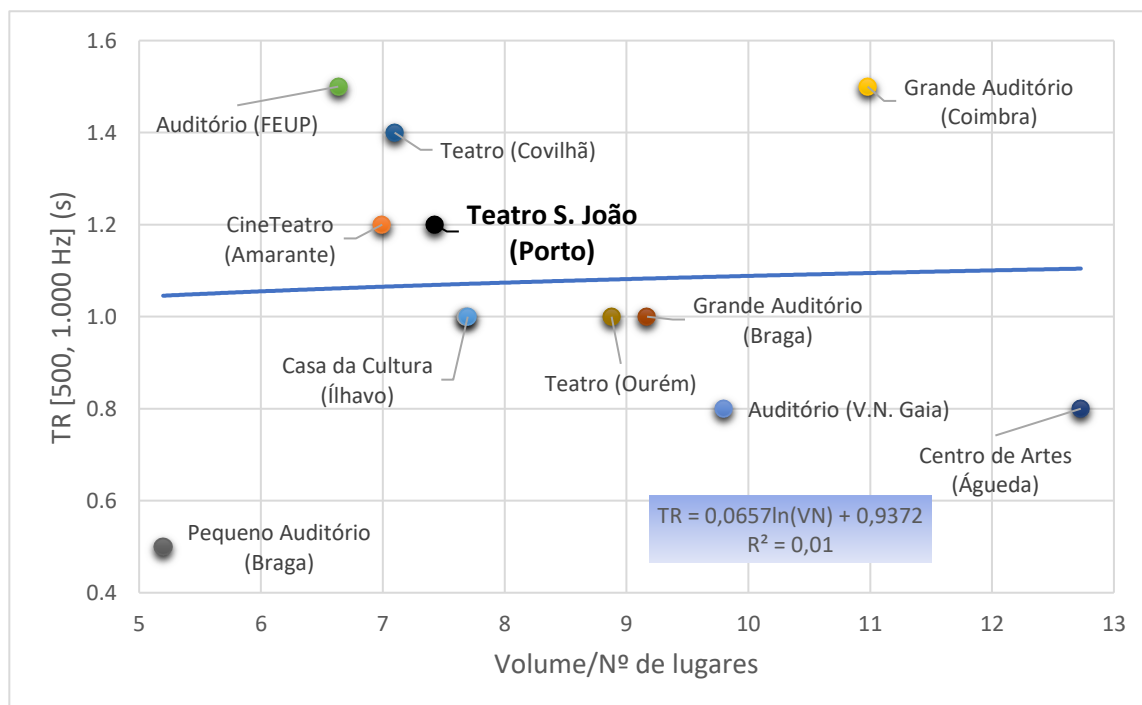


Figura 6.16 – Valores do parâmetro $TR [500, 1.000 \text{ Hz}]$ em função do Volume/Número de lugares das onze salas nacionais e do TNSJ com linha de tendência (logarítmica).

Uma outra forma de comparação entre as salas, é analisando em quais intervalos considerados ideais cada uma se verifica para funções como música e/ou palavra. De acordo com o quadro 6.11, para funções como ópera wagneriana, música de órgão e música sinfónica romântica e clássica, nenhuma das salas está rigorosamente dentro do intervalo ideal de TR médio. Porém, para funções como ópera (não wagneriana), música sinfónica (Barroco) e música de câmara, três salas corresponderam a este limite, sendo elas, o Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra), o Auditório FEUP (FEUP) e o Teatro Municipal da Covilhã (Covilhã). Por outro lado, para funções como “palavra”, apenas o Grande Auditório do Altice Fórum Braga (G.A. Braga), o Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia (VNG) e o Centro de Artes de Águeda (Águeda) apresentam-se dentro deste intervalo. Já para a música e palavra, como “teatro” e “cinema”, seis dessas salas encontram-se neste intervalo, como: Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares), Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia, Centro de Artes de Águeda, Grande Auditório do Altice Fórum Braga, Casa da Cultura de Ílhavo (Ílhavo) e Teatro Municipal de Ourém (Ourém). Como já visto anteriormente, o TNSJ não se apresenta rigorosamente dentro de nenhum desses intervalos considerados ideais, juntamente com o Cineteatro de Amarante e o Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga.

Nota-se que poucas das salas apresentam seus valores ideais a cumprir com as funções mais usais como visto anteriormente. Um caso bastante negativo, por exemplo, o Auditório da FEUP, em que sua função principal é a palavra e este se encontra no intervalo ideal para músicas, traduzindo um espaço bastante reverberante quando na verdade era necessário um foco na inteligibilidade da palavra, isto é, no campo direto/primeiras reflexões (sendo por este motivo a necessidade de possuir um reforço electroacústico para a “palavra”).

Quadro 6.11 – Verificação dos valores recomendados do parâmetro tempo de reverberação médio de acordo com vários tipos de uso das doze salas nacionais [21], [29], [33], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56].

Função	TR [500, 1.000 Hz] ideal (s) [1], [5], [38]	Salas
Música		
Ópera wagneriana	1,7 a 1,9	-
Ópera (não wagneriana)	1,3 a 1,7	Coimbra, FEUP, Covilhã
Música sinfónica (Romântica)	1,8 a 2,2	-
Música sinfónica (Barroco)	1,4 a 1,6	Coimbra, FEUP, Covilhã
Música sinfónica (Clássica)	1,6 a 1,8	-
Música de câmara	1,4 a 1,7	Coimbra, FEUP, Covilhã
Música de órgão	2,5 a 3,5	-
Palavra		
Auditório	0,7 a 0,8	G.A. Braga, VNG e Águeda
Música e Palavra		
Teatro	0,7 a 1,0	Valadares, VNG, Águeda, G.A. Braga, Ílhavo e Ourém
Cinema	0,8 a 1,0	Valadares, VNG, Águeda, G.A. Braga, Ílhavo e Ourém

6.3.2.2. Rapid Speech Transmission Index (RASTI)/ Speech Transmission Index (STI)

O quadro 6.12 mostra os valores do volume, número de lugares, *RASTI/STI* médios e o nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) das doze salas que serão utilizados em base dos próximos gráficos. O TNSJ apresentou o desempenho mais **fraco** para o *RASTI/STI* médio, indicando uma menor clareza na inteligibilidade da palavra. Além disso, registra-se um nível de pressão sonora do ruído de fundo relativamente alto, superado apenas pelo Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares).

Ao examinar o indicador de inteligibilidade da palavra (*RASTI/STI*), constata-se que nenhuma das salas apresentam valores “pobres” ou “más” de *RASTI/STI* médio, permitindo, na prática, um resultado positivo para funções que necessitam da inteligibilidade da palavra. A sala que obteve o maior *RASTI/STI* médio foi o Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga, uma sala com pequeno volume e baixo TR, o que favorece a inteligibilidade da palavra, já que predomina no ambiente as primeiras reflexões. Por outro lado, o menor (pior) valor obtido foi do TNSJ, que também apresentou um dos piores valores de L_{Aeq} e maiores de TR, dois parâmetros que interferem no *RASTI/STI*, neste caso, de forma negativa.

A figura 6.17 representa uma comparação gráfica dos valores de *RASTI/STI* médio em função do TR médio, acompanhada por uma linha de tendência em potência para as doze salas nacionais. Para esta correlação, obtêm-se um R^2 de 0,67, um valor bastante alto comparado com as restantes analisados e mais próximo de 1,0. Isso sugere que, à medida que o tempo de reverberação médio aumenta, o *RASTI/STI* diminui, demonstrando uma relação inversamente proporcional com uma dependência de 67%. Essa correlação é coerente, uma vez que o aumento do tempo de reverberação no ambiente faz com que a cauda reverberante se sobreponha as primeiras reflexões, tornado o ambiente mais reverberante e a compreensão da palavra mais desafiadora.

A figura 6.18 representa a comparação gráfica dos valores de *RASTI/STI* médio em função do L_{Aeq} com uma linha de tendência (linear) para as doze salas nacionais. O mesmo raciocínio se aplica ao ruído de fundo. É razoável esperar que o gráfico do *RASTI/STI* médio em função do L_{Aeq} seja inversamente proporcional. De facto, isso ocorre, mas com uma correlação consideravelmente mais fraca, apresentando um R^2 de 0,38. Para uma análise mais complexa/completa, era interessante realizar a mesma comparação com o sistema AVAC em funcionamento.

É importante referir que não se pode confirmar que todas as medições do parâmetro *RASTI/STI* realizadas foram com o sistema AVAC desligado, informação tal que se encontra omissa em alguns dos trabalhos de dissertação. No entanto, a autora prevê que estes foram realizados sem o sistema AVAC por parecer ser um ato recorrente em âmbito académico.

Quadro 6.12 – Valores do Volume, Número de lugares, $RASTI/STI$ médio e Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) sem AVAC das doze salas nacionais incluindo o TNSJ.

Salas	Volume (m ³)	Nº de lugares	$RASTI/STI$ médio	L_{Aeq} (sem AVAC) (dB)
Cineteatro de Amarante [21]	2700	386	0,62	23
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares) [51]	2111	275	0,60	32
Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra) [53]	12000	1093	0,61	27
Casa da Cultura de Ílhavo [56]	3779	491	0,68	25
Auditório FEUP [52]	3317	500	0,61	27
Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia [55]	3219	330	0,68	24
Centro de Artes de Águeda [54]	5066	398	0,67	26
Grande Auditório do Altice Fórum Braga [50]	9150	998	0,67	24
Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga [50]	1320	254	0,80	24
Teatro Municipal de Ourém [33]	3915	441	0,69	24
Teatro Municipal da Covilhã [29]	4258	600	0,64	23
Teatro Nacional São João	4560	614	0,55	31

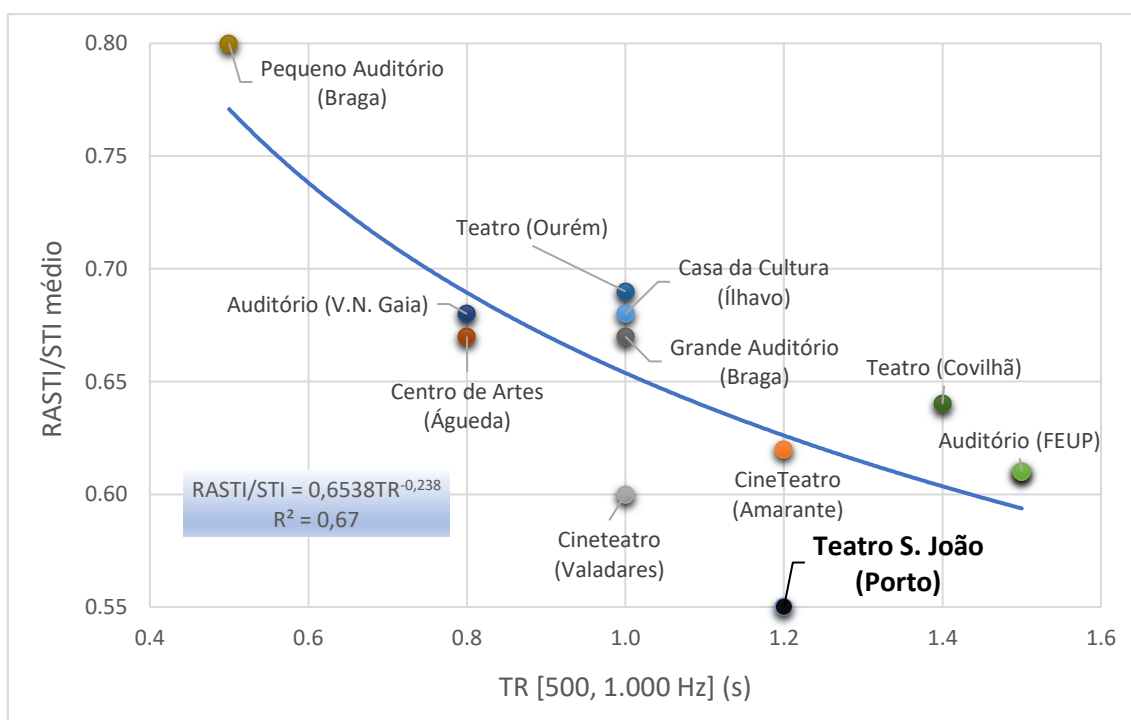


Figura 6.17 – Valores do parâmetro $RASTI/STI$ em função do TR médio (TR [500, 1.000 Hz]) das onze salas nacionais e do TNSJ com linha de tendência (potência).

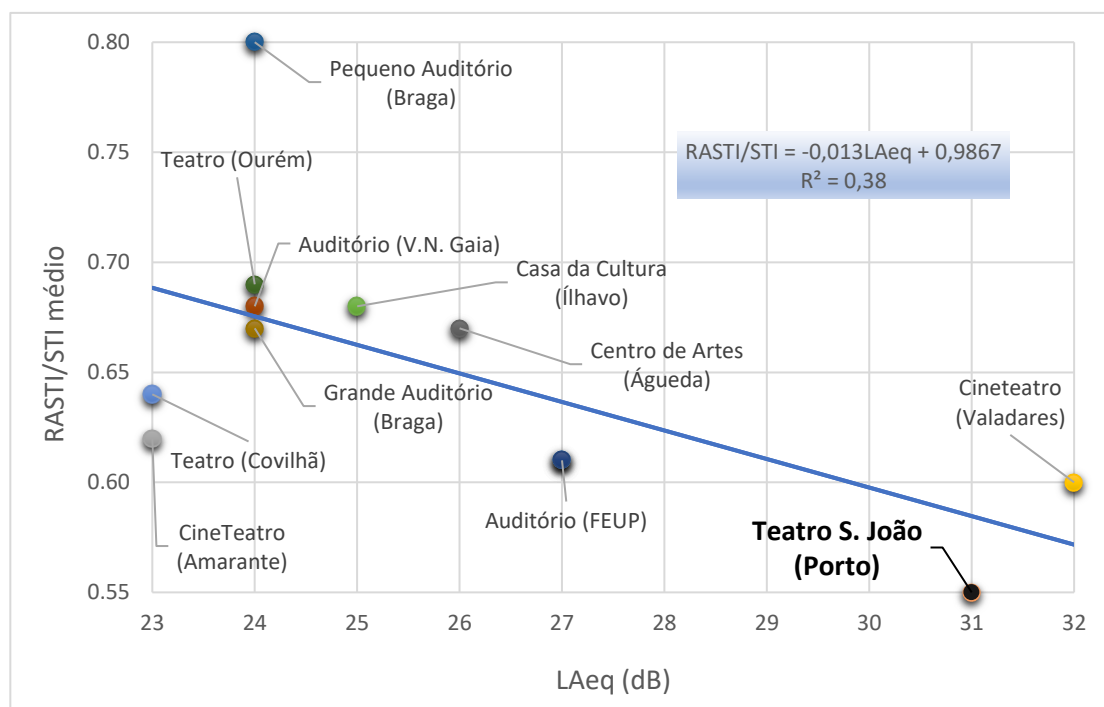


Figura 6.18 – Valores do parâmetro $RASTI/STI$ em função do Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) das onze salas nacionais e do TNSJ com linha de tendência (linear).

7

CONCLUSÃO

7.1. CONCLUSÕES

Nos últimos anos, a Acústica tornou-se cada vez mais relevante em Portugal. Isso deve-se a diversas razões, como a necessidade de garantir o conforto das pessoas, proteger a saúde auditiva e criar ambientes construídos de qualidade. Além disso, a cultura e o entretenimento têm contribuído significativamente para a valorização da Acústica no país. Com a realização de eventos musicais, teatrais e cinematográficos em locais variados, há uma demanda crescente por uma experiência sonora de alta qualidade, tanto por parte dos produtores quanto do público. Esse avanço tem sido viabilizado pelo desenvolvimento de novas tecnologias e ferramentas de medição e controlo de ruído, permitindo que os profissionais realizem projetos mais precisos e eficazes, proporcionando ambientes acusticamente adequados. Acredita-se e espera-se que essa valorização da Acústica continuará a crescer, à medida que a sociedade busca garantir ambientes sonoros mais saudáveis, confortáveis e envolventes para todos.

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre o cenário acústico em Portugal, procedeu-se à caracterização do Teatro Nacional São João por meio de medições de parâmetros acústicos realizadas *in situ*. Além disso, foi conduzida uma comparação com salas de formato e função semelhantes e variados, tanto a nível internacional quanto nacional, juntamente com uma análise em conformidade com os limites estabelecidos pela legislação nacional: Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE). As avaliações realizadas e dados obtidos no capítulo 5 estão resumidos no quadro 7.1.

Quanto ao ruído de fundo, obteve-se o valor médio de L_{eq} de 56 dB, e L_{Aeq} de 31 dB com sistema AVAC desligado. Reforça-se a relevância da medição com o sistema ligado (que não foi possível realizar neste trabalho), para compreender de que modo este ruído interfere na inteligibilidade da palavra e obter as curvas de incomodidade NC e NR . Importante referir novamente que o cumprimento com o valor máximo regulamentar deve ser com o sistema AVAC ligado e, por falta deste dado, realizou-se uma hipotética verificação com o sistema desligado o qual “cumpre” com o limite máximo.

Para o tempo de reverberação obteve-se um valor médio para as frequências de 500 e 1.000 Hz de 1,17 segundos. Para a sala com 100% de ocupação, foi previsto um valor de 1,09 segundos, enquanto que em 50% de ocupação foi de 1,12 segundos. Em todas as situações, os valores não alcançam totalmente um valor ideal tanto para ópera quanto para teatro, apresentando-se um pouco mais elevados do que o desejável para teatro e ligeiramente reduzidos para ópera. Com esses valores a sala mostra-se desadequada para alguns tipos de música sinfónica (em essencial do período romântico) que necessitam de uma superior reverberação.

Quadro 7.1 – Resumo de valores e avaliações dos parâmetros acústicos medidos no TNSJ e verificações regulamentares.

Parâmetros	Simbologia	Valor	Avaliação			Valor com fator de incerteza (I)	Limite Máximo do RRAE	Parecer
			Teatro	Ópera	MSR			
Ruído de Fundo (dB)	L_{eq} (sem AVAC)	56	-	-	-	-	-	-
	L_{Aeq} (sem AVAC)	31	-	-	-	28*	30*	Verifica*
Tempo de Reverberação (s)	TR [500, 1.000 Hz] desocupado	1,2	T	T	D	0,82	0,94 (oratória)	Verifica (oratória)
	TR [500, 1.000 Hz] ocupado previsto	1,1				-	-	-
Speech Transmission Index	STI máximo	0,66	Boa			-	-	-
	STI médio	0,55	Suficiente			-	-	-
	STI mínimo	0,52	Suficiente			-	-	-
Clareza (dB)	C_{80} [500, 1.000 Hz]	5,1	T	T	D	-	-	-
Definição	D_{50} [500, 1.000 Hz]	0,61	Suficiente			-	-	-
Tempo Central (ms)	t_s [500, 1.000 Hz]	60	A	D		-	-	-

* Deveria ser com AVAC ligado

MSR = Música Sinfónica Romântica

A = Adequado

T = Tolerável

D = Desadequado

Para os parâmetros que avaliam a qualidade da palavra, como o *STI*, o TNSJ demonstrou ser “suficiente” para a inteligibilidade da palavra, com um valor médio de 0,55 (máximo de 0,66 e mínimo de 0,52). Da mesma forma, para o parâmetro Definição média (D_{50} [500, 1.000 Hz]), o teatro alcançou um valor de 0,61, também considerado “suficiente” para a definição do discurso. No entanto, no que diz respeito ao parâmetro de Claridade média (C_{80} [500, 1.000 Hz]), o TNSJ obteve um resultado de 5,1 dB, o que não atende, por pouco, aos limites recomendados para ópera (1 a 4 dB) e teatro (>6 dB). Por fim, o *tempo central* médio (t_s [500, 1.000 Hz]), revelou-se adequado para a função teatral, com um valor de 60 ms (<80 ms) mas não totalmente adequado para ópera (>80 ms).

De uma forma comparativa entre os pontos ensaiados na sala, é possível confirmar que a zona da plateia é onde se tem um som mais claro por proveniência de maior energia do som direto e das primeiras reflexões. Nas zonas da tribuna, balcão e camarotes o som mais predominante é o reverberado, sendo explicado por valores mais baixos de Claridade e mais altos do tempo central. Quanto à inteligibilidade da palavra/definição do discurso, as zonas da plateia foram as que receberam maiores valores do *STI* e do D_{50} , enquanto que, novamente, a tribuna, o balcão e os camarotes registaram menores valores por afastamento da fonte sonora; menor energia proveniente do som direto, e maior intensidade da cauda reverberante.

Quanto aos valores médios obtidos, o *STI* e o D_{50} , indicam que o TNSJ é um espaço razoável/suficiente para a transmissão da palavra. De forma geral, de acordo com a análise dos intervalos de valores ideais, pode-se concluir que o TNSJ possui mais energia nas primeiras reflexões (mantendo um som mais claro e inteligível) do que o som reverberante, o que sugere que o espaço, de forma geral, é mais adequado para atividades que envolvam a palavra (espetáculos teatrais) em vez de atividades musicais (de notar que não foi testado qualquer tipo de reforço electroacústico).

Na análise comparativa com as salas internacionais de formato “ferradura”, o TNSJ apresentou o menor tempo de reverberação. É relevante notar que seu volume é inferior à metade em comparação com as demais salas, pelo que seria de se esperar um TR inferior. Além disso, registou o pior valor de Claridade para salas de ópera. Por outro lado, na comparação com a sala nacional do tipo “ferradura”, Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo), o TNSJ revelou ter maior valor da Claridade, tempo central, Definição e *STI*, apesar de apresentar o menor tempo de reverberação. Em suma, ambos os teatros se mostraram mais adequados para funções teatrais (palavra) do que para música em geral.

Quanto a análise com onze salas nacionais com diferentes formatos, o TNSJ apresentou um dos maiores volumes, TR médios e níveis sonoros equivalentes do ruído de fundo (L_{Aeq}), e constatou o pior (menor) valor do *STI* médio.

Globalmente, o Teatro Nacional São João (TNSJ) não demonstra valores muito distantes dos limites ideais. Pode-se concluir que, embora este não se apresente rigorosamente dentro dos parâmetros ideais, também não está significativamente distante deles. Esses resultados, não completamente satisfatórios, provam uma possível oportunidade para melhoria talvez com a implementação de projeto acústico reabilitador minimamente intrusivo. O teatro não possui dispositivos ou sistemas para potencializar as reflexões e/ou difusão do som para se atingir valores considerados ideais para um espetáculo de ópera ou teatro. Como mencionado no

capítulo 3, há uma variedade de técnicas acústicas que poderiam ser implementadas na sala para aprimorar o seu desempenho de acordo com sua função.

Considerando o Teatro Nacional São João como um monumento nacional, é de extrema importância preservar os aspetos arquitetónicos em toda a sala, caracterizados por uma beleza singular e rica em detalhes decorativos. No entanto, é igualmente importante integrar um projeto acústico de alta qualidade para garantir que a experiência auditiva dos espectadores seja condizente com a grandiosidade do ambiente. Assim, torna-se imprescindível conciliar a preservação da beleza do espaço com a implementação de soluções acústicas adequadas.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Para concluir, os resultados alcançados nesta dissertação proporcionam uma base sólida para análises e comparações futuras. No entanto, ao longo do desenvolvimento do estudo, deparou-se com alguns contratempos técnicos que limitaram a realização de ensaios adicionais para uma caracterização acústica mais abrangente e completa. Assim, abre-se uma oportunidade para aprofundar determinados temas em investigações posteriores sobre o local em estudo, como:

- Conduzir ensaios com o sistema AVAC ativado para registar os valores dos parâmetros STI , Definição e L_{eq} e L_{Aeq} do ruído de fundo, a fim de determinar se esse sistema impacta negativamente a sala;
- Um estudo de possíveis soluções para aprimorar a qualidade acústica da sala, concentrando-se numa análise detalhada de materiais e soluções construtivas. Isso poderia incluir uma avaliação económica, a fim de obter uma variedade de valores para as várias soluções identificadas, sem comprometer a autenticidade estética da sala;
- Realização de inquéritos de qualidade sonora aos utilizadores da sala, a fim de avaliar parâmetros acústicos subjetivos e estabelecer relações entre parâmetros objetivos e subjetivos;
- Conduzir uma investigação mais aprofundada sobre o fenómeno “flutter echo” na sala, visando identificar suas causas e possíveis soluções para tratamento acústico. Isso permitiria mitigar sua interferência na qualidade acústica da sala e melhorar a experiência dos utilizadores;
- Realizar a medição do tempo de reverberação com a sala ocupada recorrendo à lotação real afim de confirmar os valores previstos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – Carvalho, A.P. Oliveira. *Acústica Ambiental e de Edifícios*. Edição 8.19, FEUP, 2022.
- [2] – Lazzarini, Victor E.P. *Elementos de acústica*. Maynooth: Music Department of National University of Ireland, 1998.
- [3] – O básico sobre o ouvido humano, <https://www.concepcaoacustica.com/post/o-basico-sobre-o-ouvido-humano>, acessado a 13/02/2024.
- [4] – Brandão, Eric. *Acústica de Salas: projeto e modelagem*. Blucher, 1ª reimpressão, São Paulo, 2018.
- [5] – Barron, Michael. *Auditorium Acoustics and Architectural Design* – 2ª edição. Spon Press, Taylor & Francis Group, 2010.
- [6] – Volume e Nível, qual a diferença?, <https://www.mixingschool.ru/tpost/z4ndx6j58l-gromkost-i-uroven-v-chem-raznitsa>, acessado a 22/02/2024.
- [7] – Propriedades físicas da propagação ondulatória, <https://fisicacontextoaplicacoes.blogspot.com/2017/09/propriedades-fisicas-da-propagacao.html>, acessado a 15/02/2024.
- [8] – Hearing and Voicing Ranges, <https://theory.labster.com/hearing-range-dbs/>, acessado a 15/02/2024.
- [9] – Conceitos básicos da acústica, <https://portalacustica.info/conceitos-basicos-da-acustica-parte-ii/>, acessado a 15/02/2024.
- [10] – Orchestra pit, <https://alchetron.com/Orchestra-pit>, acessado a 07/03/2024.
- [11] – Portal acústica Materiais acústicos, o que são?, <https://portalacustica.info/materiais-acusticos-o-que-sao/>, acessado a 16/02/2024.
- [12] – EN ISO 10534-1:1996. European Norm Standard – Acoustics: Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes.
- [13] – NP EN ISO 354:2007. European Norm Standard – Acústica: Medição da absorção sonora em câmara reverberante.
- [14] – Tratamento Acústico de ambientes: algumas noções, <https://blog.santoangelo.com.br/tratamento-acustico-de-ambientes-algumas-nocoas/>, acessado a 19/02/2024.
- [15] – Long, Marshall. *Architectural Acoustics* – 2ª Edição. Academic Press, 2014.
- [16] – Norma IEC 60268-16:2011. Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.

- [17] – How to Measure ASTC ratings of Specific Sound Transmission Paths, <https://acoustical-consultants.com/built-environment/noise-investigations/how-to-measure-astc-ratings-of-specific-sound-transmission-paths/>, acedido a 20/02/2024.
- [18] – Noise Rating (NR), <https://acousticcomfort.co.uk/uploads/Noise%20Ratings.pdf>, acedido a 21/02/2024.
- [19] – Noise Criteria: A Background Noise Rating Standard, <https://altaintegra.com/201912a-noise-criteria/>, acedido a 21/02/2024.
- [20] – Benjamin, Seep *et al.*, *Acústica de salas de aula*. Acústica e Vibrações, 2002.
- [21] – Prada, Paulo. *Caracterização acústica do Renovado Cineteatro de Amarante*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [22] – Royal Albert Hall makes major auditorium upgrade, <https://www.fast-and-wide.com/faw-news/12563-royal-albert-hall-auditorium-upgrade>, acedido a 22/02/2024.
- [23] – Difusor Acústico, <https://www.inercoacustica.com/productos/ft-difusor/>, acedido a 22/02/2024.
- [24] – ArtDiffusor® Model C, <https://www.acousticsfirst.com/diffuser-art-diffusor-model-c.htm>, acedido a 22/02/2024.
- [25] – Gaspar, Ana. *Estudos de Estratégias Não-Convencionais de Acústica Variável*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra, 2018.
- [26] – RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de junho, Diário da República, 2008.
- [27] – Danckwardt, Voltaire P. O edifício teatral: resultado edificado da relação palco-platéia. Pós-Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- [28] – Teatro Nacional São João, <https://www.tnsj.pt/>, acedido a 29/02/2024.
- [29] – Tavares, Pedro. *Caracterização acústica do Teatro Municipal da Covilhã*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [30] – Baffles Trisof, <https://trisof.com.br/baffles-trisof>, acedido a 02/03/2024.
- [31] – Proscénio, <https://conceito.de/proscenio>, acedido a 07/03/2024.
- [32] – Egan, David. *Architectural Acoustics*. J. Ross Publishing Classics, 2007.
- [33] – Vieira, F. Miguel. *Caracterização acústica do Teatro Municipal de Ourém*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.

- [34] – Nápoles, o teatro San Carlo reabre para visitas guiadas: a viagem pela casa de ópera mais antiga da Europa recomeça, https://napoli.repubblica.it/cronaca/2021/02/04/news/napoli_il_teatro_di_san_carlo_riapre_al_le_visite_guidate_ricomincia_il_viaggio_nel_lirico_piu_antico_d_europa-285965373/, acedido a 11/03/2024.
- [35] – Palais Garnier in Paris, <https://www.hotels.cn/go/france/palais-garnier-paris>, acedido a 07/03/2024.
- [36] – A Ópera Estatal de Viena, <https://www.rtve.es/television/20181211/opera-estatal-viena/1850896.shtml>, acedido a 07/03/2024.
- [37] – Teatro La Scala, <https://www.lombardia.info/milano/cosa-vedere-milano/teatro-alla-scala/>, <https://www.lombardia.info/milano/cosa-vedere-milano/teatro-alla-scala/>, acedido a 11/03/2024.
- [38] – Beranek, Leo. *Concert and Opera Halls - How they Sound*. Acoustical Society of America, 1996.
- [39] – Porto: o imponente Teatro Nacional S. João, <https://ncultura.pt/porto-o-imponente-teatro-nacional-s-joao/>, acedido a 18/03/2024.
- [40] – Teatro Nacional São João, no Porto: 100 anos de história(s), <https://www.sabado.pt/gps/teatro/detalhe/teatro-nacional-sao-joao-no-porto-100-anos-de-historias>, acedido a 20/03/2024.
- [41] – Localização do Teatro Nacional São João, <https://www.google.com/maps>, acedido a 20/03/2024.
- [42] – Teatro Nacional São João, https://culturaportugal.gov.pt/pt/conhecer/local/_tnsj/teatro-nacional-sao-joao/, acedido a 25/03/2024.
- [43] – Echo Speech Source tipo 4720, <https://www.bksv.com/pt/transducers/acoustic/sound-sources/echo-speech-source-type-4720>, acedido a 25/03/2024.
- [44] – Modular Precision Sound Analyzer — 2260 Investigator™ including BZ7206 and BZ7210 Sound Analysis Software, <https://www.bksv.com/media/doc/bp1750.pdf>, acedido a 25/03/2024.
- [45] – Calibrador de Nível Sonoro tipo 4231, <https://www.bksv.com/pt/transducers/acoustic/calibrators/sound-calibrator-4231>, acedido a 25/03/2024.
- [46] – Microfone de campo livre pré-polarizado de 1/2" tipo 4189, <https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4189>, acedido a 25/03/2024.
- [47] – Contacto por email com o Teatro Nacional São João em 20/02/2024.

- [48] – Marshall, L. Gerald. “An acoustic measurement program for evaluating auditoriums and related spaces based on the early/late sound energy ratio.” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 92 (4), pp. 2469–2469, 1992.
- [49] – Forte, André. *Caracterização acústica do Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo)*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2024.
- [50] – Rocha, Gil. *Caraterização acústica do centro de congressos do Altice Fórum Braga*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2022.
- [51] – Silva, Diogo. *Caracterização acústica do CineTeatro Eduardo Brazão*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [52] – Barbosa, Sofia. *Caracterização Acústica de Grandes Auditórios. O caso do auditório da FEUP*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP, 2012.
- [53] – Miranda, Tiago. *Caracterização Acústica do Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra)*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 2023.
- [54] – Abelha, Helena. *Caracterização Acústica do Centro de Artes de Águeda*. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, FEUP, 2022.
- [55] – Hirayama, André. *Caracterização acústica do Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 2023.
- [56] – Ribas, Manuel. *Caraterização acústica da Casa da Cultura de Ílhavo*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 2023.