

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DO TEATRO SÁ DE MIRANDA (VIANA DO CASTELO)

ANDRÉ GONÇALO FERNANDES PORTELA FORTE

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

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2024

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2023/2024

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

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

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, deixar um forte agradecimento ao meu orientador, o professor António Oliveira de Carvalho, pela sua disponibilidade e toda a atenção a todos os detalhes ao longo da dissertação.

Gostaria de agradecer, igualmente, ao Engenheiro António Eduardo Costa por todo o auxílio prestado na deslocação e medições realizadas no caso de estudo.

Seguidamente, quero agradecer aos meus pais e irmão, não só por me terem motivado ao longo desta dissertação, mas também por terem sido sempre exemplo de dedicação e trabalho ao longo de todo o meu percurso académico.

Por último, quero agradecer a todos os meus amigos e namorada, cujos caminhos se cruzaram ao longo deste percurso académico e a eles devo muito por todos os conselhos, histórias e lembranças que levo comigo daqui para a frente. Agradecer, especialmente, a todos aqueles de quem me tornei próximo a trabalhar em prol de algo maior que todos nós, a AEFUEP e para esta grande associação dirijo o meu sincero agradecimento, por tudo o que me fez crescer enquanto pessoa.

A todos os mencionados,

Muito obrigado.

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo entender a complexidade acústica dos teatros, dado que, por vezes, este tipo de edificações não se encontra devidamente projetada acusticamente. Assim, neste trabalho, analisa-se o caso do Teatro Sá de Miranda, em Viana do Castelo.

Começando pela contextualização histórica, o Teatro Sá de Miranda foi aberto ao público em 1885. Conta com duas salas de espetáculo, uma sala de ensaios, um espaço de exposições e um café concerto. Na sala principal (na qual esta dissertação incide a sua análise) decorrem diversos tipos de eventos, como o teatro, música, dança ou cinema. Projetado pelo arquiteto José da Silva Sardinha, este teatro, de inspiração italiana, tem uma capacidade de 185 lugares na plateia em forma de ferradura e de mais 192 lugares nos restantes pisos, perfazendo um total de 377 lugares. O Teatro Sá de Miranda conta com um volume aproximado de 2491 m³. Alega-se que seja o quinto teatro mais antigo de Portugal em funcionamento, e mantém a integridade da sua arquitetura original. É também importante referir que, não houve ainda qualquer projeto acústico realizado para o Teatro em estudo.

No que diz respeito aos conceitos teóricos basilares para uma melhor compreensão da dissertação, fazem parte desse leque definições como: tempo de reverberação (TR), absorção sonora, inteligibilidade da palavra, tempo central (TS), Claridade (C₈₀), Definição (D₅₀), *Speech Transmission Index* (STI), entre outros.

Foram realizadas medições *in situ* de parâmetros (alguns mencionados anteriormente), como é o caso do ruído de fundo, tempo de reverberação, inteligibilidade da palavra (medida com recurso ao sistema STI), tempo central (TS), Definição (D₅₀) e Claridade (C₈₀).

Através da análise dos resultados das medições e em resumo obtiveram-se os seguintes valores: 1,2 s para o tempo de reverberação médio (500, 1000 e 2000 Hz), 26 dB para o LAeq do ruído de fundo global médio com o sistema de ventilação desligado e 32 dB com o sistema de ventilação ligado, 15 para a curva NC e 16 para a curva NR com o sistema de ventilação desligado, 20 para a curva NC e 22 para a curva NR com o sistema de ventilação ligado, valores de STI compreendidos entre 0,46 e 0,71 e valores médios [500, 1k Hz] de 4,7 para o C₈₀, 0,60 para o D₅₀ e 64 ms para o TS.

Após análise dos resultados obtidos, efetuou-se uma comparação com um teatro semelhante em Portugal, o Teatro de São João, no Porto, que foi também alvo de uma caracterização acústica. Dessa comparação, conclui-se que o Teatro Sá de Miranda apresenta um bom comportamento acústico para peças de teatro (principal arte para o qual foi projetado) e ópera.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Absorção sonora, Tempo de reverberação, Inteligibilidade da palavra

ABSTRACT

This dissertation aims to understand the acoustic complexity of theaters, given that sometimes this type of building is not properly acoustically designed. Thus, in this work, the case of the Sá de Miranda Theater, in Viana do Castelo is analyzed.

Beginning with historical context, the Sá de Miranda Theater was opened to the public in 1885. It features two performance halls, a rehearsal room, an exhibition space, and a café-concert. Various events such as theater, music, dance, or cinema take place in the main hall (which is the focus of this dissertation). Designed by architect José da Silva Sardinha, this theater, inspired by Italian architecture, has a capacity of 185 seats in the horseshoe-shaped audience area and an additional 192 seats on other floors, totaling 377 seats. The Sá de Miranda Theater has a volume of about 2491 m³. It is claimed to be the fifth oldest operating theater in Portugal and maintains the integrity of its original architecture. It is also important to note that there has been no acoustic project carried out for the theater under study.

Regarding the fundamental theoretical concepts for a better understanding of the dissertation, definitions such as reverberation time (RT), sound absorption, speech intelligibility, central time (TS), Clarity (C₈₀), Definition (D₅₀), Speech Transmission Index (STI), etc., are included.

Measurements of parameters (some mentioned above) were carried out on-site, such as background noise, reverberation time (RT), speech intelligibility (measured using the STI system), central time (TS), Definition (D₅₀), and Clarity (C₈₀).

Through the analysis of the measurement results, the following values were obtained: 1,2 s for the average reverberation time (500, 1000, and 2000 Hz), 26 dB for the LAeq of the average global background noise with the ventilation system off and 32 dB with the ventilation system on, 15 for the NC curve, 16 for the NR curve with the ventilation system off, 20 for the NC curve, 22 for the NR curve with the ventilation system on, STI values ranging from 0,46 to 0,71, a mean value [500, 1k Hz] of 4,7 dB for C₈₀, 0,60 for D₅₀, and 64 ms for TS.

After analyzing the measured results, a comparison was made with a similar horse-shaped theater in Portugal, the São João Theater in Porto, which also underwent acoustic characterization. From this comparison, it is concluded that the Sá de Miranda Theater exhibits good acoustic behavior for theater plays (the primary art form for which it was designed) and opera.

KEYWORDS: Acoustics, Sound absorption, Reverberation time, Speech intelligibility

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iv
ABSTRACT	vi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS	1
1.2. ESTRUTURA DA TESE	2
2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES	3
2.1. NOÇÕES TEÓRICAS BASILARES	3
2.1.1. COMPREENSÃO DO SOM	3
2.1.2. CELERIDADE	4
2.1.3. INTENSIDADE SONORA E POTÊNCIA SONORA	4
2.1.4. NÍVEL DE PRESSÃO SONORA	5
2.1.5. FREQUÊNCIA	7
2.1.6. COMPRIMENTO DE ONDA	9
2.2. ABSORÇÃO SONORA	9
2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	12
2.3.1. DEFINIÇÃO	12
2.2.2. TEMPO DE DECAIMENTO CURTO	12
2.2.3. FÓRMULAS DE PREVISÃO	13
2.4. RÁCIO DE BAIXOS	13
2.5. ISOLAMENTO SONORO	14

2.6. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	14
2.7. DEFINIÇÃO	15
2.8. CLARIDADE	16
2.9. TEMPO CENTRAL	16
2.10. RUÍDO DE FUNDO	16
2.11. CURVAS DE INCOMODIDADE (NC E NR)	17
3 ESTADO DA ARTE	19
3.1. CONTEXTO HISTÓRICO	19
3.1.1. PERÍODO GREGO E ROMANO	19
3.1.2. PERÍODO DO RENASCIMENTO	21
3.1.2. PERÍODO BARROCO	22
3.2. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS	23
3.2.1. PARÂMETROS GERAIS	23
3.2.2. EXIGÊNCIAS PARA A MÚSICA	24
3.2.3. EXIGÊNCIAS PARA O TEATRO E ÓPERA	25
3.3. LEGISLAÇÃO EM PORTUGAL	26
4 TEATRO SÁ DE MIRANDA	29
4.1. ENQUADRAMENTO GERAL	29
4.2. SALA PRINCIPAL	30
5 METODOLOGIA DOS ENSAIOS	35
5.1. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO	35
5.2. PARÂMETROS MEDIDOS	36
5.2.1. RUÍDO DE FUNDO	36
5.2.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	37
5.2.3. STI (SPEECH TRANSMISSION INDEX), CLARIDADE, DEFINIÇÃO E TEMPO CENTRAL	39

6 RESULTADOS	41
6.1. RUÍDO DE FUNDO	41
6.2. CURVAS DE INCOMODIDADE NC E NR.....	46
6.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	49
6.4. RÁCIO DE BAIXOS BASEADO NO TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	53
6.5. STI (SPEECH TRANSMISSION INDEX).....	53
6.6. DEFINIÇÃO (D_{50}).....	55
6.7. CLARIDADE (C_{80}).....	57
6.8. TEMPO CENTRAL (TS)	59
7 COMPARAÇÃO COM TEATRO SEMELHANTE	61
7.1. INTRODUÇÃO	61
7.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	62
7.3. STI (SPEECH TRANSMISSION INDEX).....	62
7.4. DEFINIÇÃO (D_{50}), CLARIDADE (C_{80}), TEMPO CENTRAL (TS)	63
7.5. SÍNTESE.....	64
8 CONCLUSÃO	65
8.1. CONCLUSÕES.....	65
8.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Compressão e rarefação numa onda sonora	3
Figura 2.2 Esquema do ouvido humano.....	4
Figura 2.3 Representação da intensidade sonora (I) e da potência sonora (W)	5
Figura 2.4 Níveis de pressão sonora.....	6
Figura 2.5 Som puro	7
Figura 2.6 Som complexo.....	7
Figura 2.7 Escala de frequências do som	8
Figura 2.8 Banda de frequência de uma oitava de centro de 500 Hz.....	8
Figura 2.9 Absorção sonora dos materiais.....	9
Figura 2.10 Comportamento de três tipos de materiais absorventes.....	11
Figura 2.11 Medição do tempo de reverberação (TR_{60})	12
Figura 2.12 Representação de ruídos de percussão (direita) e aéreos (esquerda)	14
Figura 2.13 Curvas NC (<i>Noise Criterion</i>).....	17
Figura 2.14 Curvas NR (<i>Noise Rating</i>).....	18
Figura 3.1 Teatro de Dionísio	20
Figura 3.2 Teatro de Aspendos.....	21
Figura 3.3 Teatro Olímpico (Vicenza).....	22
Figura 3.4 Teatro all'Antica (Sabbioneta).....	22
Figura 3.5 <i>Theatro Farnese</i> (Parma)	23
Figura 4.1 Localização do Teatro Municipal Sá de Miranda.....	29
Figura 4.2 Fachada principal do Teatro Sá de Miranda.....	30
Figura 4.3 Sala principal do Teatro Sá de Miranda	31
Figura 4.4 Disposição da plateia.....	31
Figura 4.5 Disposição das frisas	32

Figura 4.6 Disposição dos camarotes de 1ª ordem.....	33
Figura 4.7 Disposição dos camarotes de 2ª ordem.....	33
Figura 5.1 Sonómetro (em primeiro plano) e fonte sonora (em segundo plano)	35
Figura 5.2 Pontos de medição do ruído de fundo na plateia.....	36
Figura 5.3 Pontos de medição do ruído de fundo nos pisos de camarotes	37
Figura 5.4 Disposição dos equipamentos na medição do TR, STI, C ₈₀ , D ₅₀ e TS.....	38
Figura 6.1 Níveis de pressão sonora do ruído de fundo por bandas de frequência de 1/3 de oitava, com o sistema de ventilação desligado e sem ocupação.....	44
Figura 6.2 Níveis de pressão sonora do ruído de fundo por bandas de frequência de 1/3 de oitava, com o sistema de ventilação ligado e sem ocupação	45
Figura 6.3 Comparação entre os valores médios do nível de pressão sonora de ruído de fundo, em bandas de frequência de 1/3 de oitava com e sem o funcionamento do sistema de ventilação.....	45
Figura 6.4 Variação dos valores do nível sonoro equivalente com o filtro A entre o sistema de ventilação ligado e desligado.....	46
Figura 6.5 Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo com as curvas NC, com o sistema de ventilação desligado e ligado	48
Figura 6.6 Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo com as curvas NR, com o sistema de ventilação desligado e ligado.	48
Figura 6.7 Variação dos valores do Tempo de Reverberação para os nove pontos medidos.....	49
Figura 6.8 Valores médios do Tempo de Reverberação nos nove pontos do Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo).	49
Figura 6.9 Perímetro usado no cálculo das áreas dos assentos S _p e S _{frc}	51
Figura 6.10 Variação dos valores do Tempo de Reverberação para a sala vazia e ocupada do Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo).....	52
Figura 6.11 Variação do STI médio ao longo dos nove pontos de medição.	54
Figura 6.12 Variação dos valores de D ₅₀ , em função das frequências para os nove pontos medidos no Teatro Sá de Miranda.....	57
Figura 6.13 Variação dos valores de C ₈₀ em função da frequência para os nove pontos medidos, juntamente com a variação média, no Teatro Sá de Miranda	58

Figura 6.14 Variação do TS em função da frequência para os nove pontos medidos, juntamente com a variação média, no Teatro Sá de Miranda	60
Figura 7.1 Teatro Nacional São João, no Porto.....	61
Figura 7.2 Curvas médias do Tempo de Reverberação dos teatros Sá de Miranda e São João	62

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 Valores de coeficientes de absorção sonora de alguns materiais.....	10
Quadro 2.2 Classes de absorção sonora	11
Quadro 2.3 Conversão do valor do STI numa escala subjetiva de inteligibilidade da palavra.....	15
Quadro 3.1 Alguns parâmetros acústicos subjetivos e objetivos.....	24
Quadro 3.2 Valores ideais do TR e do C_{80} conforme o estilo musical	25
Quadro 4.1 Dimensões da sala principal.....	34
Quadro 6.1 Níveis de pressão sonora (dB) do ruído de fundo em bandas de 1/3 de oitava sem o sistema de ventilação ativo e valores globais do nível sonoro equivalente com e sem o filtro A	42
Quadro 6.2 Níveis de pressão sonora (dB) do ruído de fundo em bandas de 1/3 de oitava com o sistema de ventilação ativo e valores globais do nível sonoro equivalente com e sem o filtro A	43
Quadro 6.3 Variação dos valores globais do nível sonoro equivalente com e sem o filtro A entre o sistema de ventilação ligado e desligado	44
Quadro 6.4 Comparação dos valores obtidos de NC e NR com os valores máximos recomendados ..	47
Quadro 6.5 Valores do Tempo de Reverberação (TR) em s.....	50
Quadro 6.6 Valores utilizados no cálculo do Tempo de Reverberação para a sala 100% ocupada	51
Quadro 6.7 Cálculo do Tempo de Reverberação para a sala 100% ocupada	52
Quadro 6.8 Valores do STI para os nove pontos de medição	54
Quadro 6.9 Conversão de valores de STI numa escala subjetiva de inteligibilidade da palavra	55
Quadro 6.10 Valores do D_{50} nos nove pontos no Teatro Sá de Miranda	56
Quadro 6.11 Valores indicativos do D_{50}	56
Quadro 6.12 Valores do C_{80} nos nove pontos no Teatro Sá de Miranda	58
Quadro 6.13 Valores do TS (ms) medidos nos nove pontos do Teatro Sá de Miranda	59
Quadro 7.1 Valores mínimos e máximos de STI dos teatros Sá de Miranda (Viana do Castelo) e São João (Porto).....	63
Quadro 7.2 Valores médios de D_{50} , C_{80} e TS para o Teatro Sá de Miranda e o Teatro São João	63
Quadro 7.3 Resumo de todos os valores médios do Teatro Sá de Miranda e do Teatro São João.....	64

Quadro 8.1 Síntese dos valores obtidos para o Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo)..... 66

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α – Coeficiente de absorção sonora

ρ – Massa volúmica (kg/m^3)

λ – Comprimento de onda [m]

A – Absorção sonora equivalente [m^2]

BR_RT – Rácio de baixos baseado no tempo de reverberação

c – Celeridade [m/s]

C_{80} – Claridade [dB]

C_{80} [500, 1000 Hz] – Claridade média nas frequências 500 e 1000 Hz [dB]

D_{50} – Definição

D_{50} [500, 1000 Hz] – Definição média nas frequências 500 e 1000 Hz [dB]

EDT – Tempo de decaimento curto (*Early Decay Time*) [s]

f – Frequência [Hz]

FS – Fonte sonora

I – Intensidade sonora (W/m^2)

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

L_{Aeq} – Nível de pressão sonora equivalente (aplicado filtro A) [dB]

L_p – Nível de pressão sonora [dB]

NC – *Noise Criterion*

NR – *Noise Rating*

NRC – *Noise Reduction Coefficient*

p – Pressão Sonora [Pa]

r – Distância [m]

RRAE – Regulamento dos requisitos acústicos de edifícios

STI – *Speech Transmission Index*

S – Superfície real do material [m^2]

TR – Tempo de reverberação [s]

TR [500, 1000 Hz] – Tempo de reverberação médio nas frequências de 500 e 1000 Hz

TS – Tempo central [ms]

TS [500, 1000 Hz] – Tempo central médio nas frequências de 500 e 1000 Hz [ms]

V – Volume [m^3]

W – Potência sonora (W)

1

INTRODUÇÃO

1.1 - ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

A Acústica é o ramo científico que estuda as ondas sonoras e como elas interagem com o meio ambiente e o ser humano. Desde sempre que, o conhecimento e aplicação dos princípios acústicos são essenciais e evoluíram para desempenhar um papel fundamental na comunicação verbal na sociedade moderna.

Dado que o Teatro Sá de Miranda em Viana do Castelo não tem qualquer projeto acústico, este estudo surge-se com o objetivo de caracterizar acusticamente a sala principal deste teatro, pois é sempre necessário melhorar o conforto acústico e proporcionar uma boa experiência a todas as pessoas que assistam a uma peça de teatro ou um concerto de ópera neste espaço.

O som, ou mais concretamente as variações de pressão que existem no ar, e as suas interações com o ambiente construído são, na engenharia civil, o principal foco de análise acústica. O objetivo crucial é garantir o conforto acústico dos ouvintes, considerando fatores como tempo de reverberação (TR), tempo central (TS), Definição (D_{50}), inteligibilidade da palavra, Claridade (C_{80}) e o ruído de fundo.

Por forma a proceder à caracterização acústica do teatro, serão realizadas medições *in situ* para avaliar os diversos parâmetros, nos quais este estudo se vai suportar, com recurso a instrumentos de medida fornecidos pelo Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Esses dados foram comparados com um estudo realizado noutro teatro de arquitetura semelhante, o teatro de São João, no Porto. [27]

A análise dos dados recolhidos permitirá aferir a qualidade acústica da sala em questão e sugestões para possíveis melhorias futuras.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

A presente dissertação encontra-se dividida em oito capítulos.

No primeiro capítulo “Introdução”, é realizado um breve enquadramento e onde são estabelecidos os objetivos principais da análise efetuada ao longo da dissertação.

No segundo capítulo, “Conceitos e definições”, são compiladas diversas noções teóricas que são fundamentais para compreender alguns fatores estudados e aprofundados ao longo da dissertação.

No terceiro capítulo, “Estado da Arte”, é feito um enquadramento histórico e acústico de diversos teatros. Para além disso, são mencionadas as principais normas que estes devem seguir, de acordo com o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE).

No quarto capítulo, “Teatro Sá de Miranda”, é feito um estudo acústico e arquitetónico do teatro, onde são descritas as dimensões do espaço e onde são apresentadas fotos e plantas do edifício.

No quinto capítulo, “Metodologia dos Ensaios”, apresentam-se os procedimentos utilizados para obter os resultados pretendidos para análise.

No sexto capítulo, “Resultados”, são apresentados os valores obtidos nas medições realizadas e são efetuadas todas as considerações em relação a esses valores, nomeadamente, a nível regulamentar e face a valores ideais.

No sétimo capítulo, “Comparação com um teatro semelhante”, faz-se uma análise dos valores obtidos em comparação com os valores de um teatro semelhante, o Teatro de São João, no Porto.

No oitavo capítulo, “Conclusão”, expõe-se as conclusões a retirar de toda a dissertação, e são apresentados possíveis desenvolvimentos futuros e algumas medidas a aplicar no Teatro Sá de Miranda.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. NOÇÕES TEÓRICAS BASILARES

2.1.1. COMPREENSÃO DO SOM

O som é, desde logo, uma variação de pressão originada pela colisão de moléculas (ou partículas) que provocam a existência de zonas de compressão (elevada pressão) e zonas de rarefação (baixa pressão) (Figura 2.1). A propagação do som ocorre, devido ao meio em que se encontra, no caso desta dissertação, o ar. Neste meio a direção de propagação do som é semelhante à das partículas presentes no mesmo meio.[1]

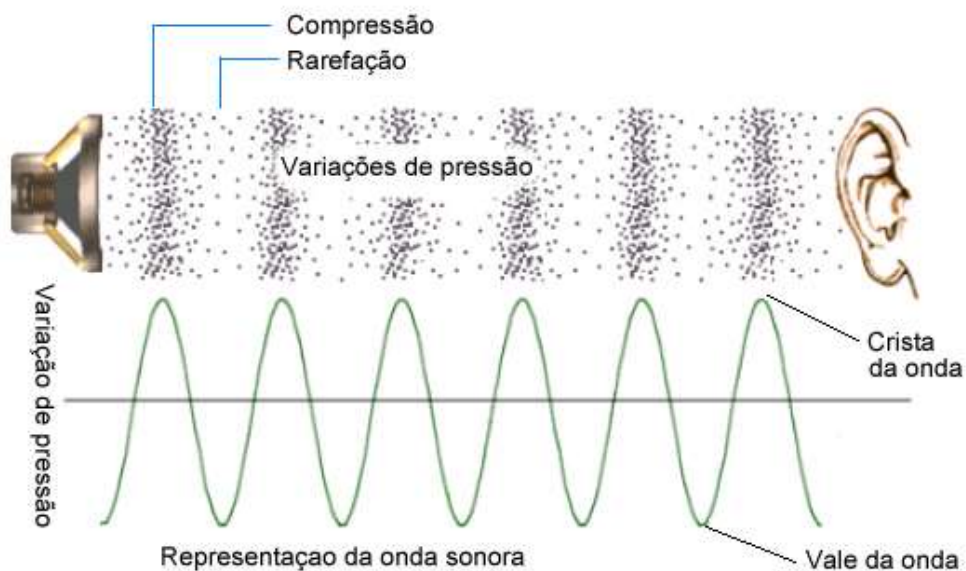


Figura 2.1- Compressão e rarefação numa onda sonora [2]

Para o ser humano, não teria muita utilidade o estudo da Acústica, se ele não tivesse a capacidade de captar as ondas sonoras e de as transmitir como informação para o nosso cérebro. Assim sendo, o ouvido do ser humano é um órgão especializado para essa função (Figura 2.2).

As ondas sonoras são captadas pelo ouvido externo que seguidamente as transporta até ao ouvido médio. É no ouvido médio que as ondas sonoras são transformadas em vibrações da estrutura óssea que originam uma onda de compressão no ouvido interno que é constituído pela cóclea que está preenchida com um fluido. A onda de compressão nesse fluido é transformada em impulsos nervosos que são depois transmitidos ao cérebro.[3][1]

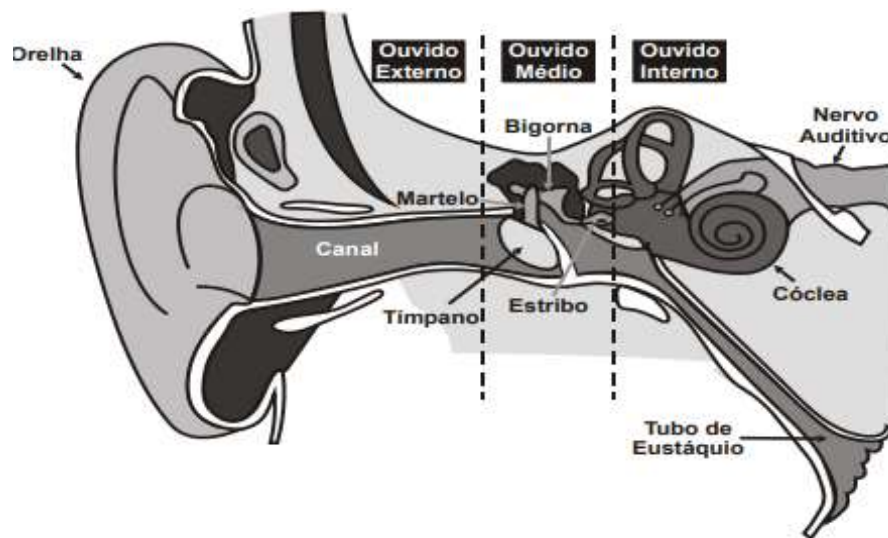


Figura 2.2- Esquema do ouvido humano [3]

2.1.2 CELERIDADE

A celeridade, ou a velocidade da propagação das ondas sonoras no ar está dependente da temperatura e pode ser calculada recorrendo à seguinte expressão:[1]

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

2.1.3. INTENSIDADE SONORA E POTÊNCIA SONORA

A intensidade sonora (I) é a quantidade média de energia (em W/m^2) que, numa dada direção, atravessa por segundo uma área de $1 m^2$. Este parâmetro permite avaliar a componente direcional do som, passando este, assim, a ser representado por uma grandeza vetorial ao contrário da pressão sonora (grandeza escalar).[1]

A intensidade sonora pode ser calculada através da seguinte expressão:

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

Em que I é a intensidade sonora (W/m^2), W a potência sonora em watt (W) (que é uma medida de quantidade de energia total emitida por uma fonte sonora por unidade de tempo), r a distância à fonte em metros (m), ρ a massa volúmica do ar que corresponde aproximadamente a $1,2 \text{ kg/m}^3$ e em que c é a celeridade em m/s.

Através desta fórmula, entende-se que caso a distância à fonte aumente para o dobro, o valor de I será quatro vezes menor, dado que é inversamente proporcional ao quadrado da distância r , ou seja, $I_2 = I_1/4$.

Na Figura 2.3 estão evidenciadas as principais diferenças entre intensidade sonora e potência sonora.

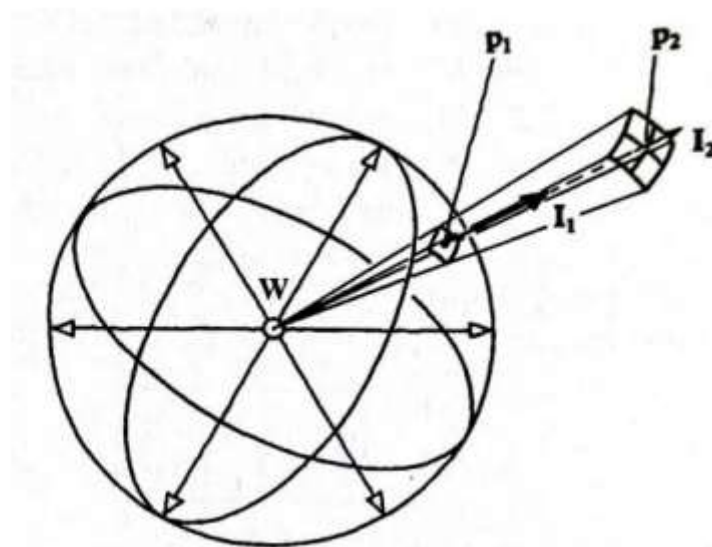


Figura 2.3- Representação da intensidade sonora (I) e da potência sonora (W) [1]

2.1.4 NÍVEL DE PRESSÃO SONORA

Para um ser humano jovem e saudável, existem dois limites de pressão sonora, em que um representa o limite mínimo para o qual é possível escutar (limiar da audição), correspondente a uma pressão sonora de $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$. Já o outro limite, denominado de limiar da dor corresponde a uma pressão sonora de 100 Pa , a partir do qual a sensação auditiva passa de ruído a dor. Como se pode verificar, estes valores de pressão em *pascal* conduzem ao uso de valores pouco práticos, daí se

utilizar a grandeza *decibel* que em muitas ocasiões é usada sempre que se pretenda comparar um nível de alguma quantidade em relação a um valor de referência.[1]

A fórmula utilizada para converter as pressões sonoras em níveis de pressão sonora é a seguinte:

$$L_p = 20 \log \frac{P}{P_0} \text{ ou análogamente } L_p = 10 \log \frac{P^2}{P_0^2} \quad (2.3)$$

Em que P_0 representa a pressão sonora de referência de 2×10^{-5} Pa.

Na Figura 2.4 encontra-se a escala do nível de pressão sonora com o aumento da respetiva pressão.

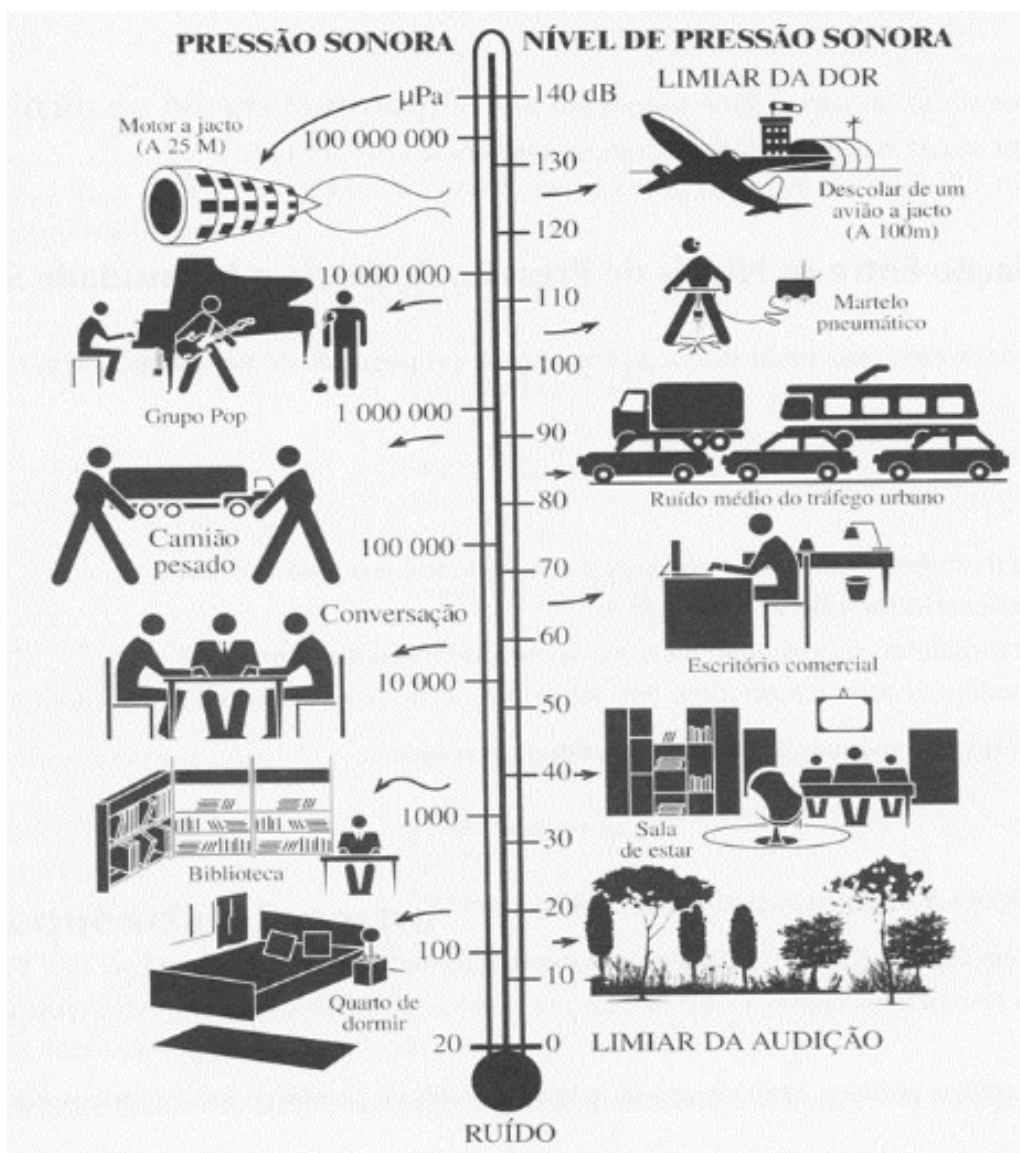


Figura 2.4 – Níveis de pressão sonora [4]

2.1.5. FREQUÊNCIA

A frequência é uma das características principais quando se define um sinal sonoro. Uma fonte sonora diferencia-se de outra pelas frequências que emite e praticamente todos os sons contêm frequências distintas. A frequência é medida em *hertz* (Hz) e entende-se por ser o número de ciclos por segundo.

Uma vibração sinusoidal provoca um som que é designado por som puro ou simples. O espectro acústico representa a distribuição das pressões sonoras ou intensidades medidas em função da frequência. Nas Figuras 2.5 e 2.6, podemos ver a representação de um som puro e de um som complexo, com a pressão sonora em ordenadas e a frequência em abcissas. [1][4]

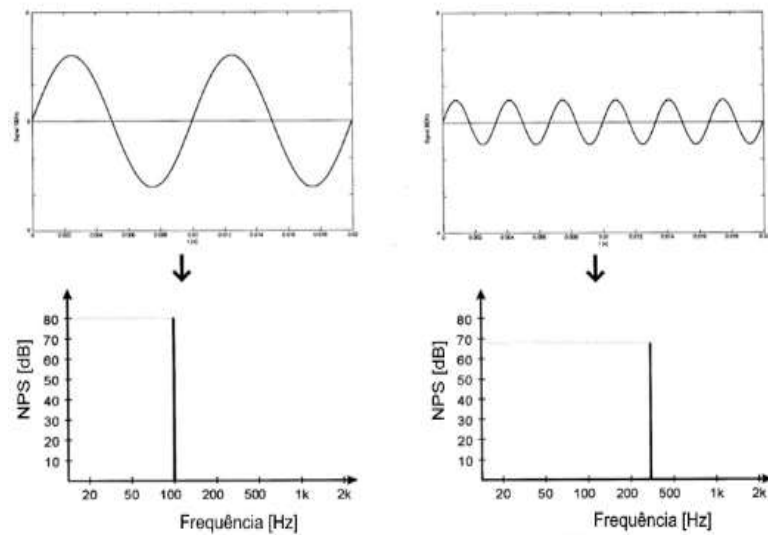


Figura 2.5 Som puro [4]

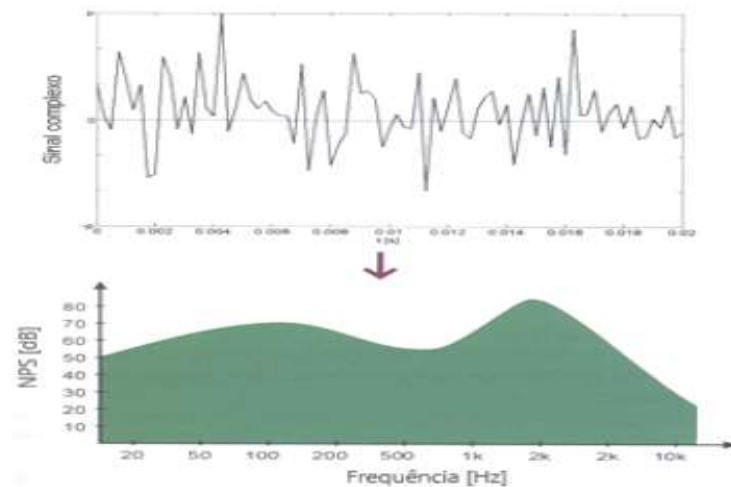


Figura 2.6 Som complexo [4]

Os sons podem classificar-se de acordo com as suas frequências, dividindo-se em 3 grupos distintos (Figura 2.7):

- 1) Infrassons (<20 Hz);
- 2) Gama de frequência audível (entre 20 e 20.000 Hz);
- 3) Ultrassons (>20.000 Hz).

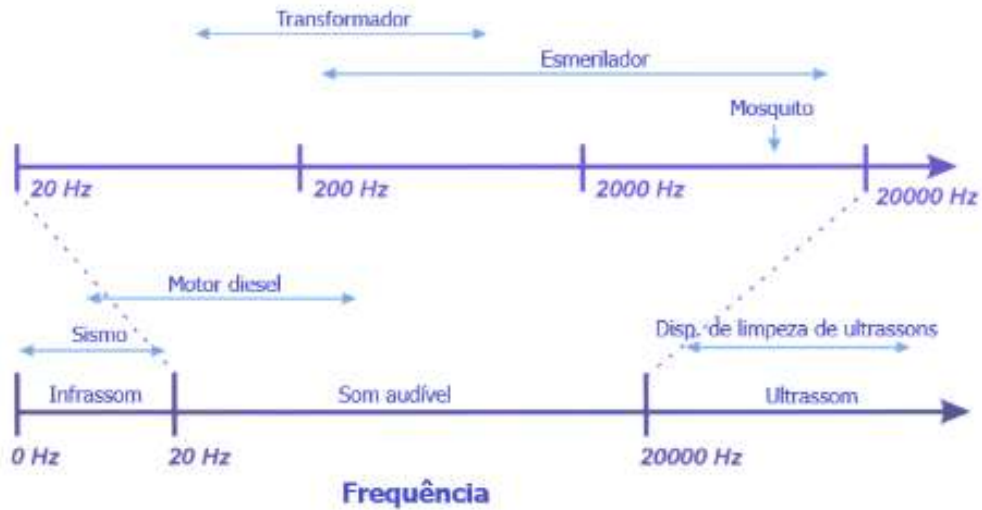


Figura 2.7- Escala de frequências do som [4]

A gama de frequência audível é a de principal interesse para este estudo. Esta gama encontra-se dividida em dez grupos de diferentes frequências, aos quais se dá nome de oitavas.

Cada oitava está subdividida em três terços de oitava, sendo que cada oitava corresponde à sua frequência central (Figura 2.8).[4]

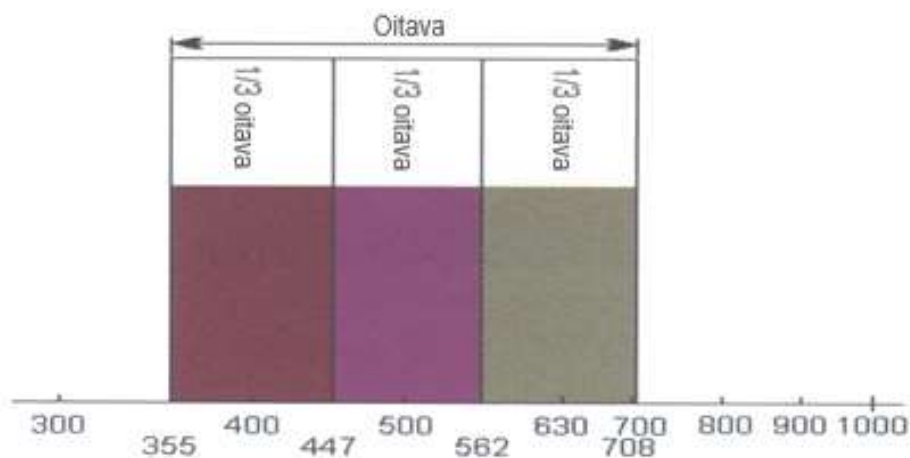


Figura 2.8.- Banda de frequência de uma oitava de centro de 500 Hz [4]

2.1.6. COMPRIMENTO DE ONDA

O comprimento de onda (λ) é a extensão das ondas sonoras. Representa a distância entre dois pontos consecutivos de uma onda periódica. O comprimento de onda expressa-se em metros e relaciona-se com a frequência (f) e com o período (T) da seguinte forma:

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \times T \quad (2.4)$$

Em que c é a celeridade ou a velocidade de propagação no ar (m/s). [4]

2.2. ABSORÇÃO SONORA

A absorção sonora é a capacidade que certos materiais têm de transformar a energia vibratória das partículas que o som representa, em qualquer outro tipo de energia, geralmente energia térmica.

O coeficiente de absorção sonora (α) representa a relação entre a energia sonora absorvida por um certo material e a energia total que sobre ele é emitida:

$$\alpha = \frac{E \text{ absorvida}}{E \text{ incidente}} \quad (2.5)$$

Na Figura 2.9 pode-se verificar uma explicação gráfica do fenómeno da absorção sonora dos materiais. O coeficiente de absorção sonora varia entre 0 e 1 e de acordo com o ângulo de incidência e com a frequência do som incidente. No Quadro 2.1 observam-se os valores do coeficiente de absorção sonora de alguns materiais e sistemas.

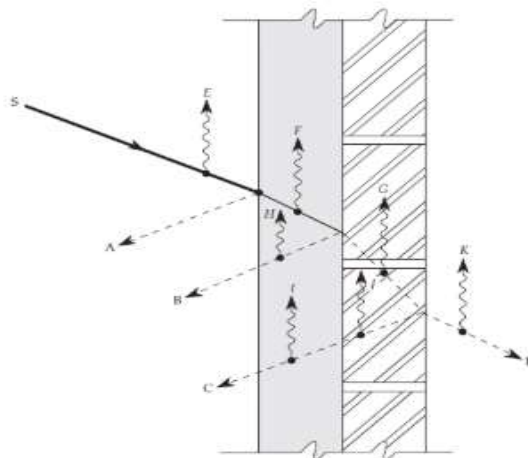


Figura 2.9 Absorção sonora dos materiais [4]

Quadro 2.1 Valores de coeficientes de absorção sonora de alguns materiais [4]

Frequência (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
Argamassa	0,14	0,1	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 em Betão armado revestido com mosaico ou mármore	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Teto de betão rebocado e estucado	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05
Linóleo sobre betão	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Soalho (<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 colocada sobre betão	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65
Alcatifa densa com base de borracha	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73
Alcatifa leve colada sobre betão	0,02	0,04	0,08	0,20	0,35	0,40
Cortina leve	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortina pesada	0,14	0,35	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
Audiência - Estofa médio	0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86
Audiência - 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
Cadeiras vazias - Estofa médio	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
Cadeiras vazias - Estofa leve	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55

No que diz respeito ao estudo da acústica em edifícios define-se o parâmetro NRC (*noise reduction coefficient*) que é calculado através da média aritmética dos valores de α nas bandas de oitava dos 250 aos 2000 Hz (Fórmula 2.6)

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad (2.6)$$

De acordo com a norma europeia EN ISO 11654 [21], define-se também o parâmetro α_w que representa a média ponderada dos valores de α nas frequências de oito bandas de terços de oitava entre 100 e 5000 Hz e define-se as diferentes classes de absorção sonora (Quadro 2.2) [4].

Quadro 2.2 Classes de absorção sonora [1]

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

Como o coeficiente de absorção sonora apresentam uma grande variação dependendo da banda de frequência sonora em que se encontram, é habitual agrupar os diferentes materiais em três categorias distintas: porosos e fibrosos; ressoadores; e membranas.

Os materiais porosos e fibrosos são mais eficazes em altas frequências, os ressoadores são mais eficazes nas médias, enquanto que as membranas têm maior eficácia em frequências baixas (Figura 2.10).

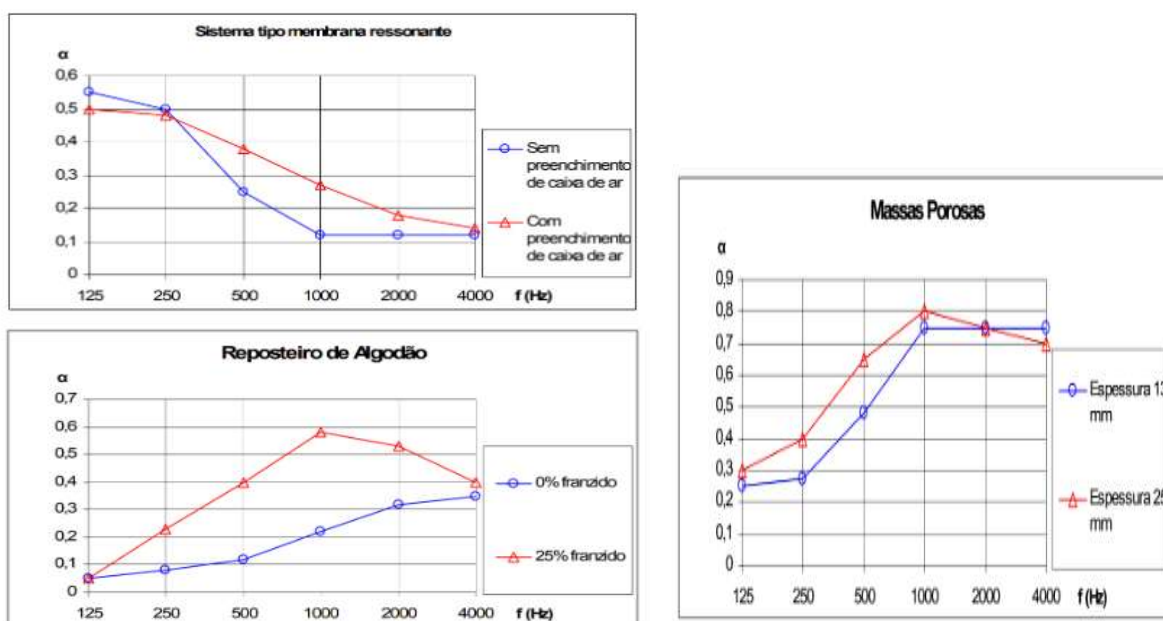


Figura 2.10- Comportamento de três tipos de materiais absorventes [4]

2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

2.3.1 DEFINIÇÃO

A reverberação é uma das propriedades acústicas mais importantes quando se faz uma caracterização acústica de uma sala.

Quando um som é produzido numa sala, esse irá ser refletido em diferentes superfícies refletoras da sala. Quando as reflexões se misturam, dá-se o fenómeno da reverberação.

O tempo de reverberação (TR) é o intervalo de tempo que é necessário para que um som desapareça por completo após todas as reflexões. Define-se como o tempo necessário para que a energia sonora de um espaço diminua em 60 dB (TR_{60}), após o fim da emissão sonora (Figura 2.11). Por vezes, são também utilizados outros níveis de decaimento como 30 dB (TR_{30}) ou 20 dB (TR_{20}), quando num determinado espaço existem vários ruídos de fundo elevados onde não seria tão fácil verificar um decaimento de 60 dB. [1][4]

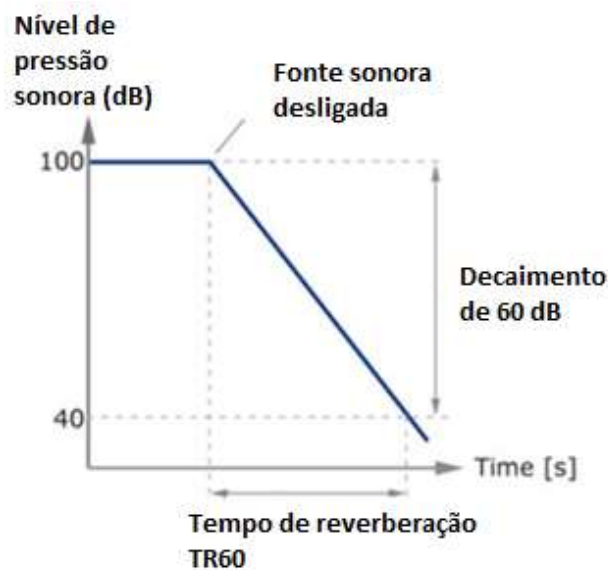


Figura 2.11- Medição do tempo de reverberação (TR_{60}) [22]

2.3.2. TEMPO DE DECAIMENTO CURTO (EDT)

Muito semelhante ao tempo de reverberação, o tempo de decaimento curto (EDT) é um parâmetro que contabiliza somente o decaimento inicial de 10 dB. Para ambientes altamente difusos, em que o decaimento é linear o tempo de reverberação e o tempo de decaimento curto seriam iguais. [5]

2.3.3. FÓRMULAS DE PREVISÃO

Vários indivíduos desenvolveram métodos e fórmulas de prever o valor aproximado do tempo de reverberação relacionando o volume do espaço e a absorção sonora. Três fórmulas bastante utilizadas são as de Sabine, Eyring e Millington-Sette.

A fórmula de Sabine obtém valores próximos dos reais para ambiente sonoros difusos e em que o coeficiente de absorção sonora média é inferior a 0,2. [1]

$$T = \frac{0,16 \times V}{A} \quad (2.7)$$

Em que:

T - Tempo de reverberação (s);

V - Volume do espaço (m³);

A - Absorção sonora equivalente (m²).

A fórmula de Norris-Eyring é a mais indicada para espaços em que todas as superfícies que constituem a sua envolvente têm coeficientes de absorção sonora idênticos.

$$T = \frac{0,16 \times V}{-S \times \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (2.8)$$

Em que:

$\bar{\alpha}$ – Média pesada pelas superfícies S_i , coeficientes de absorção sonora α_i , das superfícies envolventes e $S = \sum S_i$

A fórmula de Millington-Sette é a mais indicada para espaços em que as diversas superfícies que constituem a sua envolvente têm coeficientes de absorção sonora bastante diferentes. [1]

$$T = \frac{0,16 \times V}{-\sum_{i=1}^N S_i \times \ln(1 - \alpha_i)} \quad (2.9)$$

2.4. RÁCIO DE BAIXOS

Proposto por Beranek em 1962, o rácio de baixos para o tempo de reverberação é, geralmente, usado para avaliar o balanço tonal, comparando os valores dos tempos de reverberação (TR) (Fórmula 2.13) para baixas frequências com os valores para altas frequências.

BR_RT – *Bass Ratio* baseado no tempo de reverberação:

$$BR_{RT} = \frac{TR(125) + TR(250)}{TR(500) + TR(1000)} \quad (2.13)$$

Dependendo da funcionalidade do espaço, os valores ideais de BR serão diferentes. Em espaços onde se pretende um som mais “quente” e suave, o rácio de baixos será superior ao rácio de baixos presente num espaço que está principalmente otimizado para a inteligibilidade da palavra. [8]

2.5 ISOLAMENTO SONORO

Entende-se por isolamento sonoro a capacidade de um certo elemento de impedir a penetração de ruídos exteriores. Esses ruídos exteriores são geralmente classificados em ruídos de percussão ou ruídos aéreos (Figura 2.12).

Os ruídos de percussão acontecem quando existe uma solicitação mecânica sobre os elementos de construção. Já os ruídos aéreos ocorrem apenas quando à transmissão por vibração do ar.

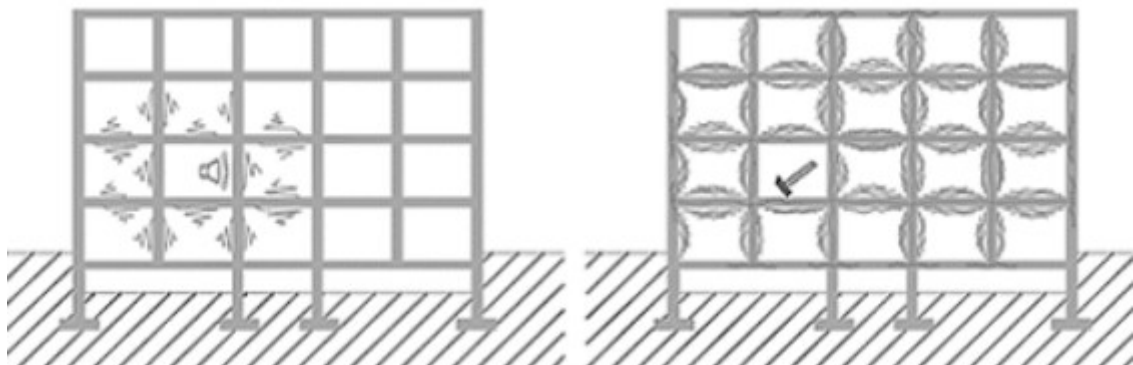


Figura 2.12- Representação de ruídos de percussão (direita) e aéreos (esquerda) [6]

2.6 INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

Por inteligibilidade da palavra, entende-se como sendo a capacidade de compreender e distinguir as palavras ditas numa fala. Em espaços como salas de aula, teatros, igrejas, etc, a inteligibilidade da palavra é um parâmetro que assume extrema importância. [1]

As diferentes palavras são compostas por vogais e consoantes que têm diferenças a nível acústico. As vogais oscilam a sua frequência entre os 150 e os 300 Hz. Já as consoantes, que têm frequências mais elevadas, oscilam os seus valores entre os 3500 e os 7000 Hz. [7]

A inteligibilidade da palavra pode ser avaliada através de equipamento. Um dos métodos mais eficazes, e geralmente utilizado, é o método *RASTI* (*Rapid Speech Transmission Index*), que é uma simplificação do método *STI* (*Speech Transmission Index*). Neste estudo será utilizado o método *STI*. Este método de determinação da qualidade de recepção das palavras no que diz respeito à inteligibilidade, consiste na diminuição da taxa de modulação de um sinal, que simula acusticamente a voz do ser humano. A análise no método *STI* cinge-se a duas bandas de 1/1 oitava, de frequências centrais de 500 e 2000 Hz e a quatro ou cinco frequências de modulação dessas bandas. Recorre-se a este método para comparar a qualidade de transmissão em vários pontos de uma mesma sala ou para comparar o grau de inteligibilidade da palavra em diferentes salas. No Quadro 2.3 está presente uma conversão dos valores obtidos através do método *STI* numa escala subjetiva de inteligibilidade da palavra

Para além deste método objetivo, a inteligibilidade da palavra pode também ser avaliada subjetivamente, recorrendo a um orador e a diversos espetadores. O orador enuncia várias palavras e os diversos espetadores, distribuídos por vários pontos da sala, avaliam, de acordo com certos critérios, a compreensão do que foi pronunciado pelo orador. [1] [7]

Quadro 2.3 Conversão do valor do STI numa escala subjetiva de inteligibilidade da palavra [1]

STI	Inteligibilidade da palavra
[0,00 – 0,30[<i>Má</i>
[0,30 – 0,45[<i>Medíocre</i>
[0,45 – 0,60[<i>Suficiente</i>
[0,60 – 0,75[<i>Boa</i>
[0,75 – 1,00]	<i>Excelente</i>

2.7. DEFINIÇÃO

A Definição (D_{50}) é o quociente entre a energia recebida nos primeiros 50 milissegundos e a energia total recebida ao longo do decaimento. O valor de 50 milissegundos é geralmente considerado o limite de perçetibilidade no que diz respeito à palavra e a fórmula de cálculo proposta por Thiele em 1953 é a seguinte: [1]

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.10)$$

Em que $p(t)$ é a resposta impulsiva da sala num certo ponto.

2.8. CLARIDADE

A Claridade (C_{80}) é o quociente entre a energia recebida nos primeiros 80 milissegundos e a energia recebida posteriormente. O valor de 80 milissegundos foi o limite definido como sendo o limite de perceptibilidade para a música e a fórmula proposta por Reichardt em 1975 é a seguinte: [1]

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (dB) \quad (2.11)$$

2.9. TEMPO CENTRAL

O tempo central (TS) é o ponto no tempo onde a energia recebida antes deste ponto é igual à energia recebida depois daquele ponto. A fórmula proposta por Cremer e Müller tem, geralmente, uma posição entre 140 e 180 milissegundos e a expressão é a seguinte: [1]

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} t \times p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (ms) \quad (2.12)$$

2.10. RUÍDO DE FUNDO

O ruído de fundo consiste no nível de ruído ambiente ou sons que não são desejados, mas que estão presentes num determinado espaço mesmo na ausência de fontes sonoras. O ruído de fundo é o ruído provocado, por exemplo, pela atividade humana que existe no espaço, ou por fontes exteriores ao edifício, tais como tráfego rodoviário, ferroviário, etc. Pode também ser provocado por fontes inerentes do edifício, como por exemplo, sistemas de ar condicionado (AVAC), sistemas de aquecimento, tubagens, etc.

É importante considerar o ruído de fundo, principalmente no estudo de um teatro onde a inteligibilidade da palavra é fundamental. Assim, é fundamental reduzir o ruído de fundo em projetos de isolamento sonoro, para garantir que determinado ambiente cumpre critérios de conforto acústico e funcionalidade. [1]

2.11 CURVAS DE INCOMODIDADE (NC E NR)

Os gráficos das curvas de incomodidade são representações visuais que mostram como diferentes níveis de ruído, especialmente de sistemas de ventilação e/ou ar condicionado (AVAC), afetam o conforto das pessoas em diversos ambientes, como salas de concerto, teatros e igrejas. Estas curvas são usadas na área da Acústica para avaliar o impacto do ruído de fundo no bem-estar das pessoas.

Existem vários tipos de curvas que podem ser utilizadas para esse propósito, sendo as mais comuns as curvas NC (*Noise Criterion*) (Figura 2.13), desenvolvidas por Leo Beranek em 1957, e as curvas NR (*Noise Rating*) (Figura 2.14), propostas por Kosten e Van Os em 1962. As curvas NC definem o nível de pressão sonora para oito faixas de frequência entre 63 e 8000 Hz, enquanto as curvas NR cobrem faixas de frequência de 32 a 8000 Hz. Ambas as curvas utilizam o método da tangente para sua análise. [1]

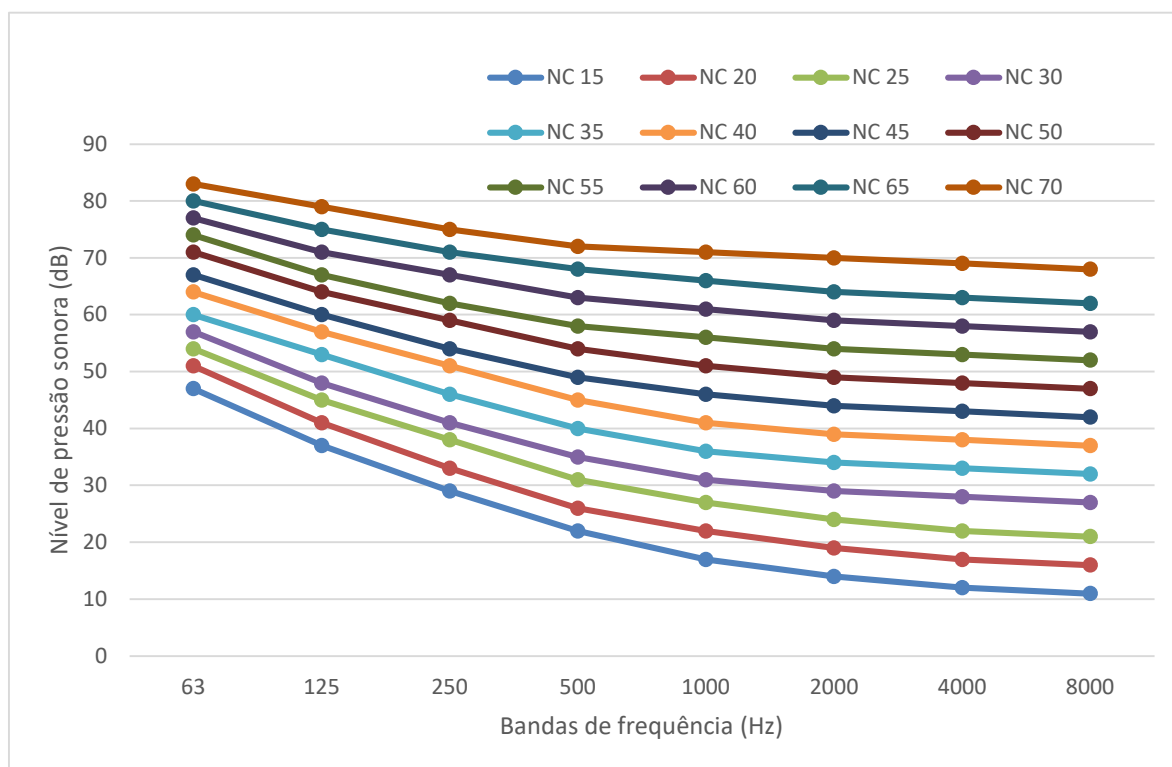


Figura 2.13 Curvas NC (*Noise Criterion*) [26]

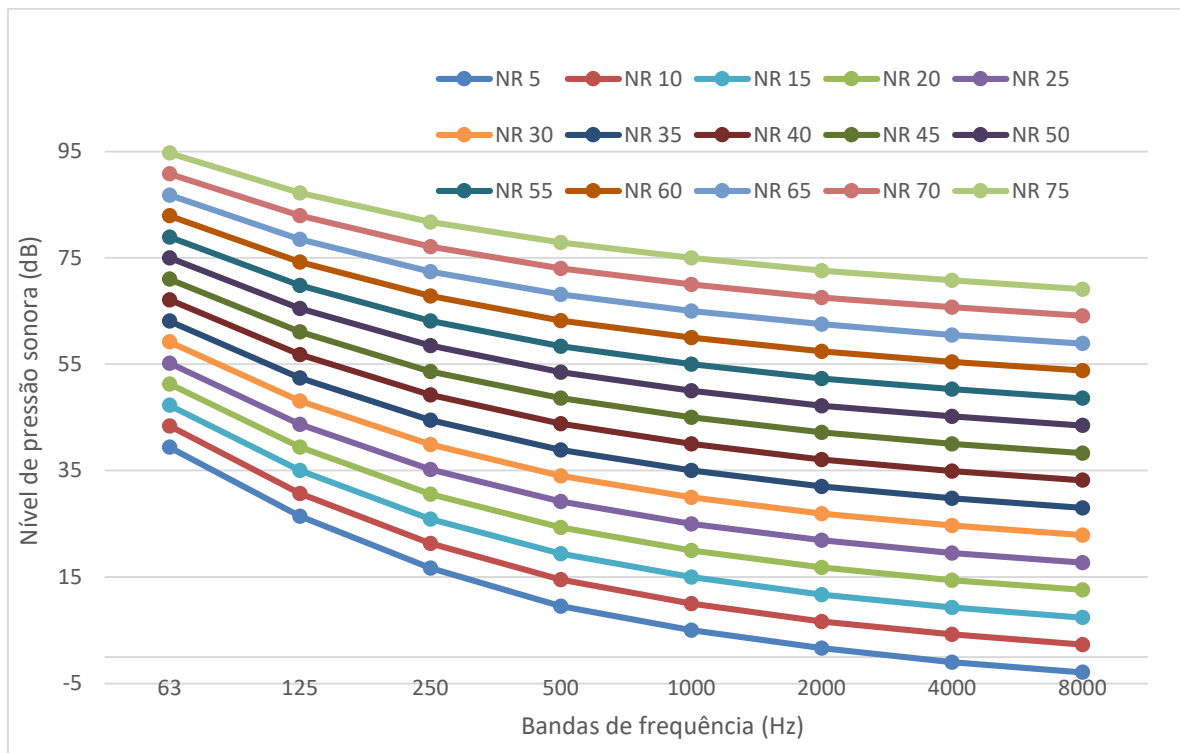


Figura 2.14 Curvas NR (*Noise Rating*) [26]

3

ESTADO DA ARTE

3.1 CONTEXTO HISTÓRICO

3.1.1. PERÍODO GREGO E ROMANO

A palavra “teatro” vem do grego e significa, literalmente, “lugar alto de onde se vê”. O teatro é uma arte cénico-dramática que tem como objetivo representar uma história, ao vivo, através de atores para uma plateia presente. A definição de teatro dos pensadores do século XVIII contém três elementos essenciais para a concretização desta Arte: o ator, o espetador e o espaço, pois é para esses três elementos que converge todo o foco de atenção desta atividade. [9]

Os teatros gregos foram das primeiras salas de espetáculos da História. Esses locais eram principalmente utilizados para apresentações de teatro e música e estavam preparados para receber grandes audiências que foram sempre aumentando ao longo do tempo. Um exemplo de um teatro da Grécia antiga é o Teatro de Dionísio em Atenas (Figura 3.1), construído no século V a.C. e considerado o berço do teatro ocidental, tinha uma planta em forma de ferradura e uma lotação de cerca de 17.000 espetadores. A planta do teatro foi pensada na altura para permitir uma boa visibilidade e uma boa experiência acústica para a plateia.[9]

O teatro grego, construído numa encosta natural, tirava proveito da inclinação do terreno para minimizar custos de construção e para melhorar a acústica. Ademais, o teatro contava com materiais absorventes de som, como cortinas e tapetes, para melhorar a qualidade acústica. [9]

As bancadas do teatro subiam escalonadamente ao longo do terreno, permitindo uma visão clara do palco que ficava no centro do teatro, e da “orchestra”, que significa “dança” em grego antigo. Os lugares eram divididos de acordo com a hierarquia social da altura, sendo a parte inferior reservada para a hierarquia mais importante e a parte superior para as mulheres e escravos.[9]



Figura 3.1- Teatro de Dionísio [10]

As peças de teatro grego eram realizadas em grandes espaços abertos, em que a projeção da voz era fulcral para que a plateia pudesse compreender as atuações. Os próprios atores eram preparados para usar técnicas de projeção vocal, tais como a respiração diafragmática e a ressonância da voz.[11]

O teatro grego antigo contava com um semicírculo de assentos à volta do palco (o “*koilon*”). Este sistema de amplificação acústica contribuía para o aumento da clareza das vozes dos atores. [9][11]

As preocupações das construções dos teatros não se cingiam apenas pela escolha geográfica. De acordo com Marcos Vitrúvio, a qualidade acústica dos teatros era também devida à presença de vasos circulares sob os assentos, que possibilitavam uma melhor expansão do som e um aumento da clareza do mesmo. Para além disso, os atores utilizavam máscaras munidas de um “amplificador” interno, que favoreciam a audibilidade nos teatros. [11]

O colapso da Grécia Antiga marcou uma viragem na história da cultura mundial, dando espaço para o desenvolvimento do Império Romano. No que diz respeito ao teatro, este apresenta diversas diferenças significativas em relação ao teatro grego. Com o conhecimento das técnicas de construção de abóbadas, posteriormente facilitado pelo uso de betão, os teatros podiam ser erguidos como estruturas independentes em terrenos planos. Os romanos desenvolveram um sistema de acesso e evacuação altamente eficaz sob os níveis superiores de assentos, com passagens que

levavam ao auditório. O plano do teatro incluía um palco elevado, ligado estruturalmente ao auditório semicircular. A própria orquestra, embora também semicircular, já não tinha uma função acústica significativa, uma vez que era normalmente ocupada por senadores. Isso exigia um nível de palco mais baixo para garantir boas condições visuais para os espectadores na orquestra. Tanto o ângulo íngreme dos assentos (geralmente entre 30° e 34°) quanto o tamanho menor em comparação com os grandes teatros gregos explicam o porquê da reflexão da orquestra não ser necessária nos teatros romanos. O exemplo melhor preservado é o de *Aspendos* (Figura 3.2), perto da costa sul do Mediterrâneo na Turquia. Este teatro tinha capacidade para 7000 espectadores, com uma distância de 53 metros entre o palco e o assento mais distante. Em *Aspendos* e noutros teatros romanos, há evidências de que um *velarium* (cortina de lona) podia ser puxado sobre o teatro para proteger o público do sol. Embora a lona fosse ligeiramente reflexiva em termos acústicos, esta não provocaria muita reverberação. [5][11]



Figura 3.2. – Teatro Aspendos [12]

3.1.2 PERÍODO DO RENASCIMENTO

A construção de teatros começou novamente em Itália durante o início do Renascimento, retomando aproximadamente do ponto onde os Romanos haviam parado, mil anos antes. Em 1580, Palladio ergueu o Teatro Olímpico de Vicenza (Figura 3.3.), o primeiro desde os tempos dos Romanos. O plano de assentos seguia uma forma semi-elíptica, em conformidade com o padrão clássico, e o palco apresentava uma configuração semelhante à das antigas orquestras e proscênios dos teatros romanos

e gregos. Atrás da plateia, havia um pórtico de colunas com estátuas posicionadas acima. A técnica da perspectiva (descoberta por volta desse tempo), levou à criação de palcos que incluíam um piso elevatório e uma perspectiva de ponto único. Os termos *upstage* e *downstage* surgiram a partir desta prática inicial de *design*. [13]

Em 1588, Scamozzi realizou mais modificações no plano romano ao construir um novo teatro, o all'Antica em Sabbioneta (Figura 3.4). O plano de assentos semi-elíptico foi reconfigurado numa forma de U, a parede do palco foi removida. A sua capacidade de assentos era reduzida e havia pouco suporte acústico proveniente das reflexões no teto.

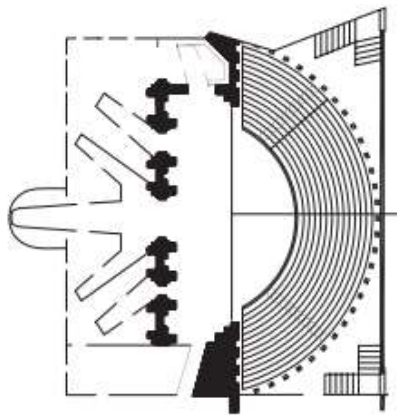


Figura 3.3.- Teatro Olímpico (Vicenza) [13]

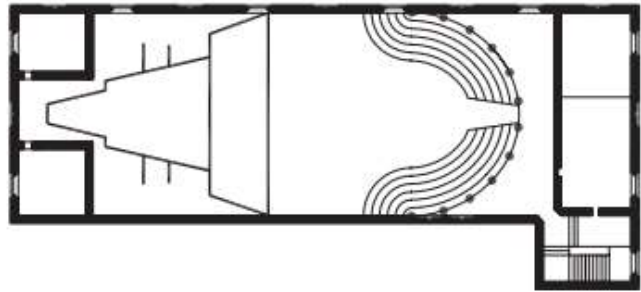


Figura 3.4.- Teatro all'Antica (Sabbioneta) [13]

Na Inglaterra de meados do século XVI, grupos de atores ambulantes colocavam tábuas para cobrir os pátios enlameados das estalagens, enquanto o público se aglomerava ao redor ou se posicionava nas galerias que rodeavam o pátio principal. O estilo do primeiro teatro permanente, construído em 1576 por James Burbage (chamado *O Teatro*), tornou-se o modelo para muitos teatros públicos. As galerias em torno do pátio central eram compostas por três níveis de altura, com um palco coberto por um telhado. As apresentações ocorriam durante o dia, sem cortina ou com o cenário pintado. A acústica desses primeiros teatros provavelmente era adequada, em que as paredes laterais proporcionavam reflexões úteis e as galerias ofereciam ótimas linhas de visão. [13]

3.1.3. PERÍODO BARROCO

O desenvolvimento da construção de teatros no Norte da Itália ocorreu de forma rápida. Os palcos tradicionais deram lugar a auditórios mais modernos, equipados com placas deslizantes horizontais e maquinaria de palco móvel. Um exemplo notável desse avanço é o *Theatro Farnese* (Figura 3.5) em Parma, construído entre 1618 e 1628 por Giovanni Aleotti. Este teatro possuía características

inovadoras, como peças de cenário horizontais que exigiam paredes laterais para escondê-las. Além disso, a disposição dos assentos em forma de U permitia aos espectadores uma visão tanto do palco quanto do príncipe, cujo camarote ficava no centro. Enquanto isso, em Florença, o cenário cultural estava a mudar com o aparecimento das óperas. A primeira ópera conhecida foi "Dafne", composta por Peri entre 1594 e 1598.

Em 1637, quando o primeiro teatro de ópera público foi construído em Veneza, o estilo de teatro operístico havia mudado para o arranjo de assentos em forma de U de vários andares como no *Theatro Farnese*, substituindo os assentos em fileiras por camarotes. Posteriormente, a disposição dos assentos deixou de ser em forma de U para se tornar uma forma elíptica truncada e, mais tarde, no fim do período clássico e início do período romântico surgiria a forma de ferradura. [13]

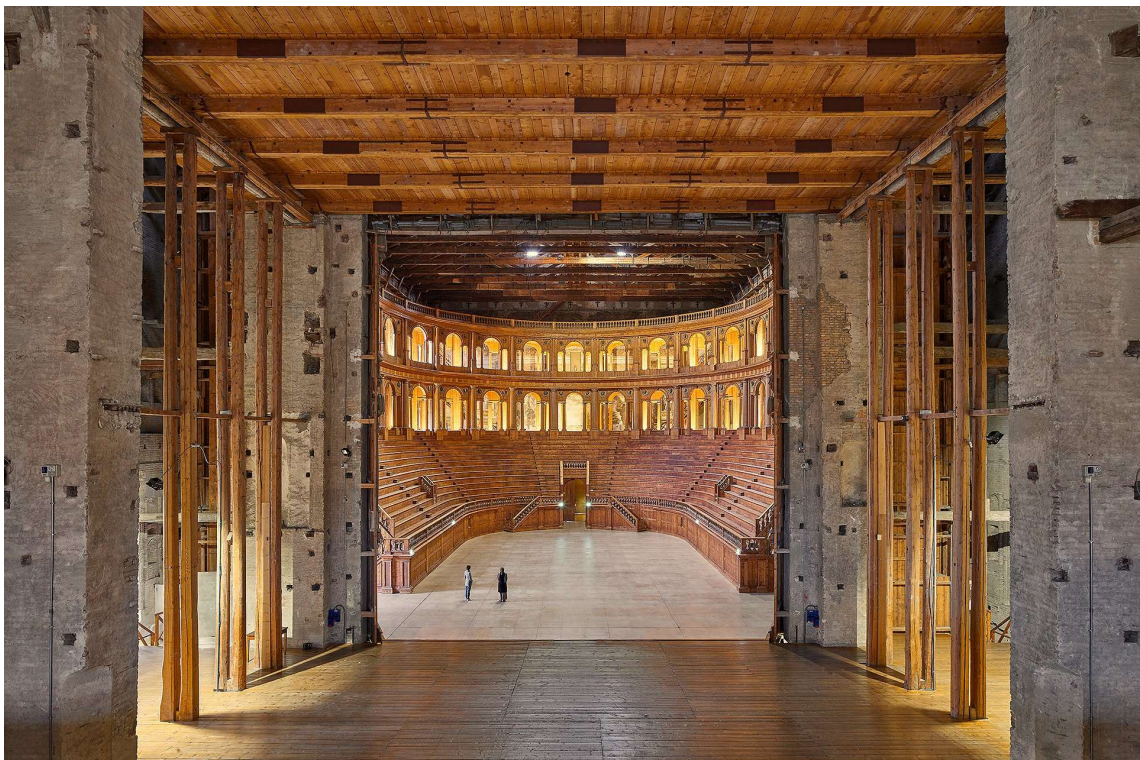


Figura 3.5. – *Theatro Farnese* (Parma) [14]

3.2. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS

3.2.1. PARÂMETROS GERAIS

Beneficiando dos avanços tecnológicos, Leo Beranek adotou uma nova abordagem para estudar a acústica de salas. Além de considerar o tempo de reverberação, que já havia sido analisado por

Sabine, Beranek propôs e adaptou uma ampla gama de parâmetros acústicos adicionais para caracterizar adequadamente o som em diferentes ambientes. Ele conduziu diversas pesquisas em salas ao redor do mundo para identificar esses parâmetros (Quadro 3.1), comparando as diferenças e semelhanças observadas e incorporando avaliações subjetivas obtidas por meio de entrevistas. O resultado foi a definição de um conjunto fundamental de critérios para avaliar a acústica das salas, uma contribuição que continua relevante até hoje. [15]

Quadro 3.1 – Alguns parâmetros acústicos subjetivos e objetivos [15]

Parâmetro Subjetivo	Parâmetro Objetivo	Expressão Física
Reverberação	TR ₆₀	Schroeder (1965)
Calor	BR_TR	$\frac{TR_{125} + TR_{250}}{TR_{500} + TR_{1000}}$
Brilho	TR	$\frac{TR_{2000} + TR_{4000}}{TR_{500} + TR_{1000}}$
Clareza	C ₈₀	$10\log\left[\frac{\int_0^{80\text{ ms}} p^2(t)dt}{\int_{80\text{ ms}}^{t_f} p^2(t)dt}\right]$
Definição	D ₅₀	$\frac{\int_0^{50\text{ ms}} p^2(t)dt}{\int_0^{t_f} p^2(t)dt}$

3.2.2. EXIGÊNCIAS PARA A MÚSICA

O tempo de reverberação é um fator muito importante na análise da qualidade acústica de qualquer espaço, especialmente em salas de música, onde os valores ideais variam conforme o estilo musical. No Quadro 3.2, são apresentados os intervalos recomendados para o Tempo de Reverberação (medidos nas frequências de 500 e 1000 Hz) e a Clareza (C80), dependendo do gênero musical. No âmbito do estudo do Teatro Sá de Miranda, os valores a ter mais em conta são os indicados para Teatro e Ópera.

Quadro 3.2 Valores ideais do TR e do C_{80} conforme o estilo musical [1]

Tipo de música	Tempo de reverberação (s) [500, 1000 Hz]	Claridade (dB) C_{80}
Música popular	0,8 até 1,0	>6
Ópera	1,3 até 1,7	1 a 4
Música sinfónica Barroca	1,4 até 1,6	0 a 2
Música sinfónica Clássica	1,6 até 1,8	-1 a 0
Música sinfónica Romântica	1,9 até 2,2	-2 a -1
Música Sinfónica Moderna	1,4 até 1,9	-1 a 0
Teatro	0,7 até 0,9	>6
Música de câmara	1,4 até 1,7	-1 a 1

3.2.3. EXIGÊNCIAS PARA O TEATRO E ÓPERA

As necessidades fundamentais para o bom funcionamento de uma sala de espetáculos, especialmente para teatro e ópera, abrangem três áreas principais: garantir a boa inteligibilidade da palavra (para teatro), criar uma acústica adequada para os momentos musicais (ópera) e respeitar limitações de tamanho, evitando que os assentos estejam a uma distância superior a 20 metros do palco para manter a boa visibilidade para os espectadores. Alguns problemas comuns em salas de espetáculos podem surgir devido a valores inadequados do Tempo de Decaimento Inicial (EDT), especialmente nos assentos do meio, que geralmente requerem intervenções para melhorar a qualidade acústica nesses lugares. Soluções práticas incluem o uso de superfícies refletoras no teto ou nas paredes. A geometria do teatro tem um papel crucial no seu desempenho acústico, com a abertura do palco a ser um parâmetro que tem grande influência nesse desempenho. Os dois tipos de palcos com aberturas claramente distintas são os palcos dos teatros proscénios e dos teatros de arena. O volume das salas também é algo que tem grande influência no desempenho acústico, pois diferentes volumes geram valores muito distintos para o tempo de reverberação. Assim sendo, teatros com volumes menores (mais compactos) e com superfícies refletoras no teto são as características mais indicadas para um bom resultado acústico.

Além da geometria e do volume do teatro, é essencial controlar o ruído de fundo, especialmente durante momentos de silêncio, com um limite máximo recomendado de NC/NR20 para a classificação de ruído de AVAC. [5]

3.3 LEGISLAÇÃO EM PORTUGAL

Em Portugal, os requisitos acústicos em edifícios são regulamentados pelo Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), estabelecido pelo Decreto-Lei n.º 129/2002, que foi, depois, alterado pelo Decreto-Lei n.º 96/2008. [16]

As diversas utilizações tipo contempladas neste regulamento e que devem ser distinguidas são as seguintes:

- 1) Edifícios habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras;
- 2) Edifícios comerciais e de serviços, e partes similares em edifícios industriais;
- 3) Edifícios escolares e similares, e de investigação;
- 4) Edifícios hospitalares e similares;
- 5) Recintos desportivos;
- 6) Estações de transporte de passageiros;
- 7) Auditórios e salas.

O Teatro Sá de Miranda encontra-se parcialmente abrangido pelo artigo 10º-A do RRAE, que diz respeito a edifícios com tipologia de “Auditórios e salas de espetáculo”. O artigo mencionado diz o seguinte:

1 - Os recintos cuja principal valência corresponda a atividades assentes na oratória, nomeadamente de auditórios, salas de conferência e salas polivalentes, e nas salas de cinema, estão sujeitos aos seguintes requisitos: (ou seja, não se aplica o ponto 1a para o Teatro Sá de Miranda)

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

Em que V é o volume do interior do recinto, em metros cúbicos;

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

2 - Nos auditórios e salas cuja principal valência não corresponda a actividades assentes na oratória, nomeadamente de auditórios para música ou salas de espectáculo, o projecto de condicionamento acústico destes espaços deve incluir um estudo específico destinado a assegurar a conformação acústica adequada à sua utilização funcional (ou seja, não se aplica o ponto 1a para o Teatro Sá de Miranda)

3 - As fachadas dos recintos referidos nos números 1 e 2 devem assegurar que os valores do índice de isolamento a sons aéreos, $D_{2m, nT, w}$, corrigido do termo de adaptação aplicável, C ou C_{tr} , sejam os necessários para que o nível sonoro contínuo equivalente do ruído ambiente no interior do recinto, determinado a partir da média espacial de pontos representativos, na ausência de funcionamento das instalações técnicas do edifício, L_{Aeq} , satisfaça o seguinte:

$$L_{Aeq} \leq 30 \text{ dB}$$

O ponto 4 diz respeito a salas de cinema, pelo que a sua análise não é relevante para este estudo.

5 - No interior dos recintos, o nível sonoro contínuo equivalente do ruído particular, L_{Aeq} , associado ao funcionamento dos equipamentos e instalações técnicas, designadamente de instalações de aquecimento, ventilação e ar condicionado, deve, com a sala desocupada, satisfazer o seguinte:

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

6 - Os requisitos enunciados nos números 1 a 5 são aplicáveis aos recintos que constituem o uso principal do edifício em que se inserem e aos que se integram em edifícios com outros usos.

7 - A determinação do tempo de reverberação, T , deve ser efectuada em conformidade com o disposto na normalização portuguesa aplicável ou, caso não exista, na normalização europeia ou internacional.

8 - Nas avaliações *in situ* destinadas a verificar o cumprimento dos requisitos acústicos dos edifícios deve ser tido em conta um fator de incerteza, I , associado à determinação das grandezas em causa.

9 - O edifício, ou qualquer das suas partes, é considerado conforme aos requisitos acústicos aplicáveis, quando, cumulativamente:

- a) O valor obtido para o tempo de reverberação, T , diminuído do factor I no valor percentual do limite regulamentar, de acordo com o seguinte, satisfaça o limite regulamentar:

- i) 25 %, se $V < 250 \text{ m}^3$;
 - ii) 35 %, se $250 \leq V < 9000 \text{ m}^3$;
 - iii) 40 %, se $V \geq 9000 \text{ m}^3$.
-
- b) O valor obtido para o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{2m, nT, w}$ acrescido do fator I no valor de 3 dB, satisfaça o limite regulamentar;
 - c) O valor obtido para o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nT, w}$, acrescido do fator I no valor do 3 dB, e a diferença $D_{nT, \text{oit.63 Hz}}$, acrescida do fator I no valor de 5 dB, satisfaçam o limite regulamentar;
 - d) O valor obtido para o nível do ruído particular, L_{Aeq} , diminuído do fator I no valor de 3 dB, satisfaça o limite regulamentar.

4

TEATRO SÁ DE MIRANDA

4.1 ENQUADRAMENTO GERAL

O Teatro Sá de Miranda situa-se na Rua de Sá de Miranda, no centro de Viana do Castelo (Figura 4.1). Conta com quase cento e quarenta anos de existência, tendo sido inaugurado no dia 29 de abril de 1885. [24]



Figura 4.1 Localização do Teatro Municipal Sá de Miranda [adaptado de [23]]

A edificação foi realizada graças ao trabalho conjunto de algumas figuras proeminentes de Viana do Castelo, que fundaram a Companhia Fomentadora Vianense em 1879. O propósito era erguer um "edifício civilizador" destinado à cidade e à área circundante. [24]

O Teatro Municipal Sá de Miranda (Figura 4.2), equipado com duas salas para espetáculos, uma sala para ensaios, uma galeria de exposições e um café-concerto, desenvolve anualmente uma programação em colaboração entre a Câmara Municipal de Viana do Castelo e o Teatro do Noroeste - Centro Dramático de Viana. [24]



Figura 4.2 Fachada principal do Teatro Sá de Miranda [foto do autor]

4.2 SALA PRINCIPAL

A sala principal do teatro alvo de estudo desta dissertação é o local principal para diversas formas de arte cénica, como teatro, música e dança. Além disso, esta sala dá também lugar a cinema e outros eventos. Conta com uma plateia em formato de ferradura, que inclui três fileiras de camarotes (Figura 4.3), oferecendo um total de 378 lugares. [24]

Desenhada pelo arquiteto José da Silva Sardinha, a sala apresenta uma nave "à italiana", culminando num palco que é enquadrado por um imponente arco de proscénio. O teto da sala, pintado por João Baptista do Rio, retrata um céu onde estão representados os dramaturgos

William Shakespeare, Gil Vicente, Molière, Pierre Corneille, Calderón de la Barca, Almeida Garrett, Friedrich Schiller e Vittorio Alfieri. [24]

A plateia (Figura 4.4) conta com doze filas de bancos em estofado, separadas por um corredor central e com uma régie de som no topo direito da plateia, totalizando-se 185 lugares.

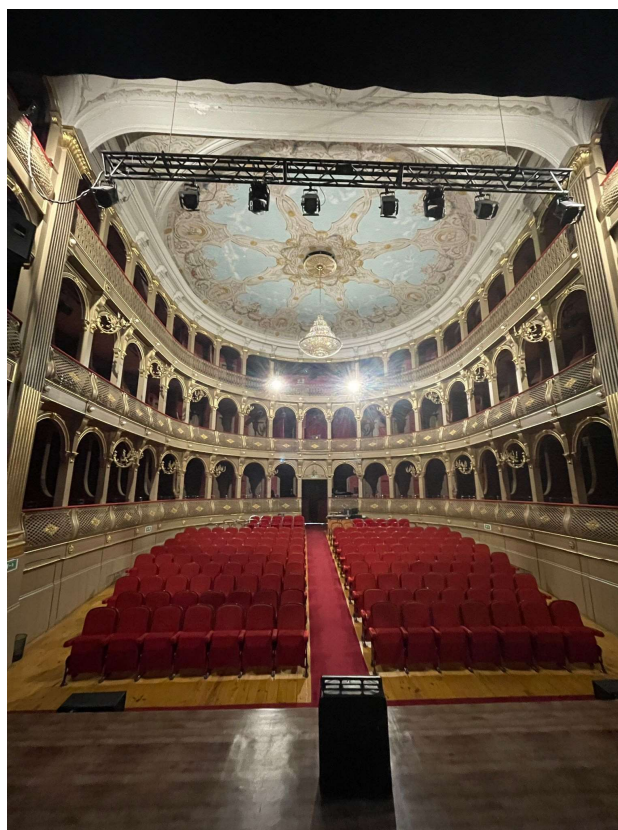
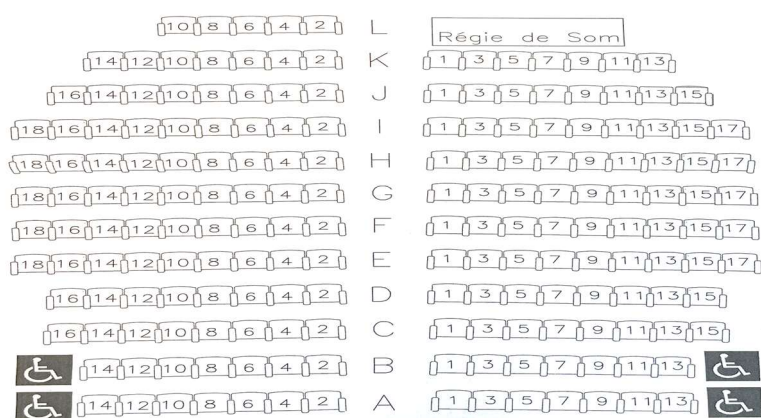


Figura 4.3 Sala principal do Teatro Sá de Miranda [foto do autor]

Plateia
(185 lugares)



Palco

Figura 4.4 Disposição da plateia [24]

Nas duas primeiras filas, encontram-se também quatro lugares destinados a pessoas com mobilidade reduzida.

Nas frisas (1º piso de camarotes), contabilizam-se 20 cabines, sendo que três destas são reservadas para áreas técnicas e uma delas para a régie de luz. (Figura 4.5). No total dispõe de 64 lugares.

Nos camarotes de 1ª ordem (2º piso de camarotes), existem 19 cabines, em que duas delas são utilizadas como áreas técnicas e uma delas tem dimensões maiores que as restantes, tratando-se de um camarote presidencial (Figura 4.6). Em conformidade com as frisas, perfazem-se 64 lugares.

Nos camarotes de 2ª ordem (3º piso de camarotes), dão espaço a três áreas técnicas, tal como nas frisas, totalizando-se 19 cabines e 64 lugares. (Figura 4.7).

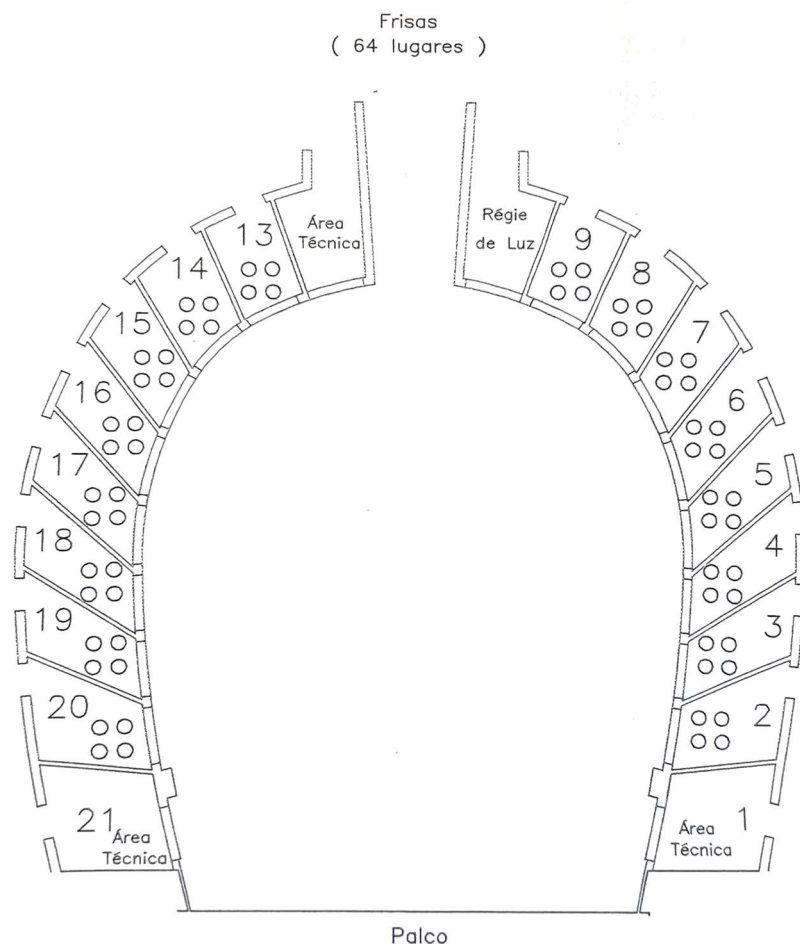


Figura 4.5 Disposição das frisas [24]

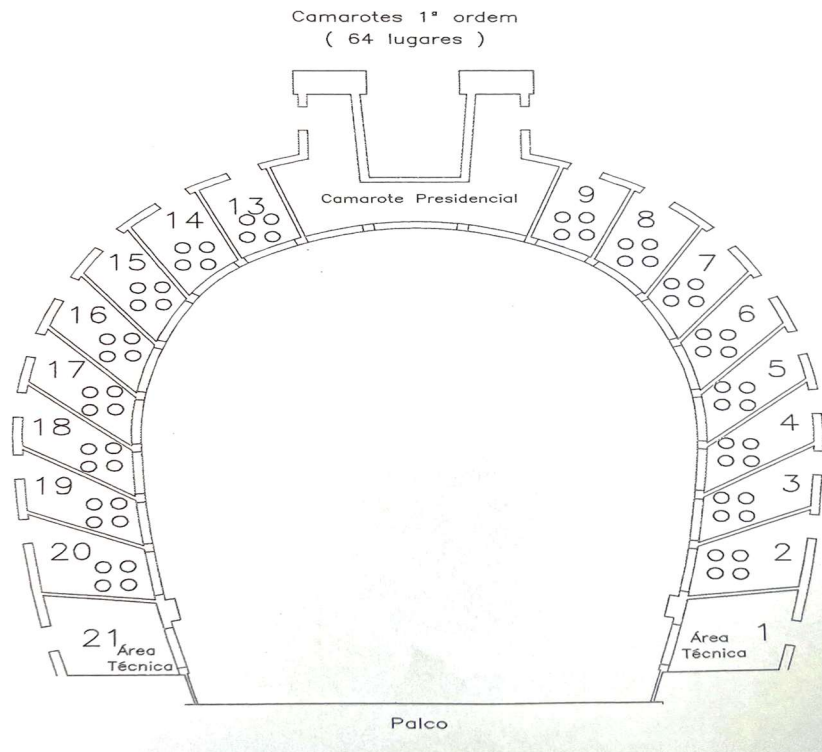


Figura 4.6 Disposição dos camarotes de 1ª ordem [24]

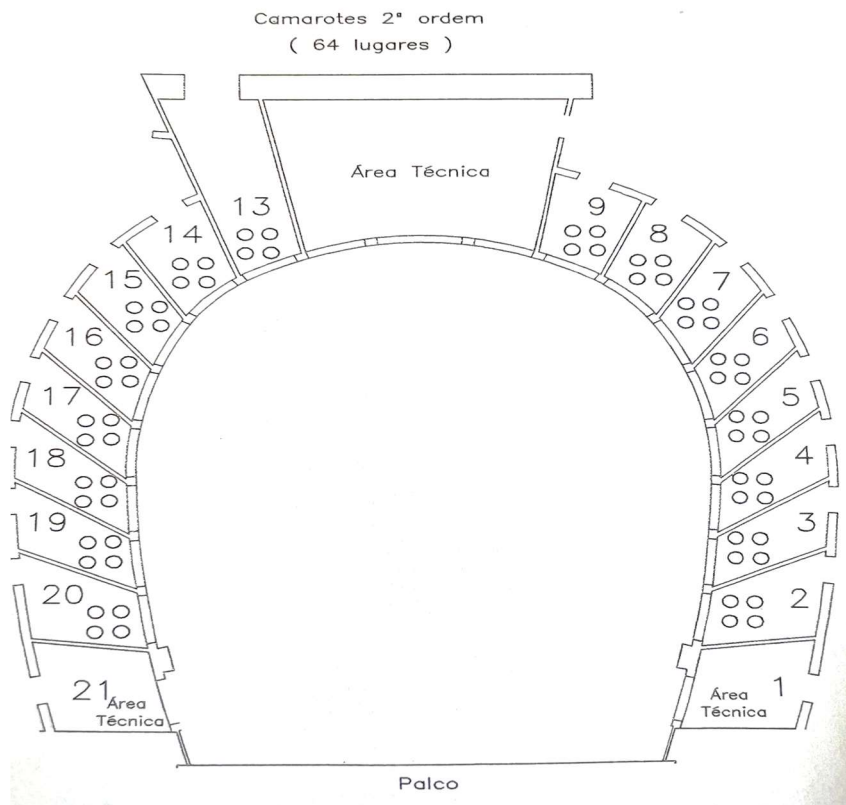


Figura 4.7 Disposição dos camarotes de 2ª ordem [24]

As dimensões da sala principal foram calculadas através da ferramenta de medição de áreas e distâncias do programa AutoCAD (Quadro 4.1).

Note-se que todos os assentos da sala são almofadados e as paredes de todos os camarotes são revestidas com veludo. Já o pavimento do palco e da plateia é em madeira.

Quadro 4.1 Dimensões da sala principal

Secção	Área total aproximada (m ²)	Área útil aproximada (m ²)	Volume aproximado (m ³)
Palco (total)	402	266	--
Plateia	158	156	1951
Frisas	88	66	167
Camarotes de 1 ^a ordem	91	80	173
Camarotes de 2 ^a ordem	105	72	200
Volume total:			2491

5

METODOLOGIA DOS ENSAIOS

5.1 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

Os equipamentos de medição utilizados nos ensaios acústicos, que foram cedidos pelo Laboratório de Acústica da FEUP, foram os seguintes:

- 1) Fonte sonora Brüel & Kjær modelo 4720 (Figura 5.1);
- 2) Sonómetro Brüel & Kjær modelo 2260 (Figura 5.1);
- 3) Computador portátil com o *software* DIRAC.



Figura 5.1 Sonómetro (em primeiro plano) e fonte sonora (em segundo plano) [foto do autor]

5.2 PARÂMETROS MEDIDOS

5.2.1 RUÍDO DE FUNDO

Utilizando um sonómetro, foram conduzidas avaliações dos níveis de pressão sonora em nove pontos distintos (Figuras 5.2 e 5.3). Optou-se por medir três pontos na plateia e dois pontos em cada piso de camarotes. Estas avaliações ocorreram em condições de silêncio absoluto, ou seja, sem a presença de público ou fontes de ruído internas. Seguidamente, foram realizadas novas medições, nas mesmas posições, desta vez com o sistema de ventilação em funcionamento, a fim de identificar o ruído gerado por esse equipamento específico. As medições foram realizadas para cada ponto com uma duração de aproximadamente dez minutos e para bandas de frequência de 1/3 de oitava (de 16 a 16000 Hz).

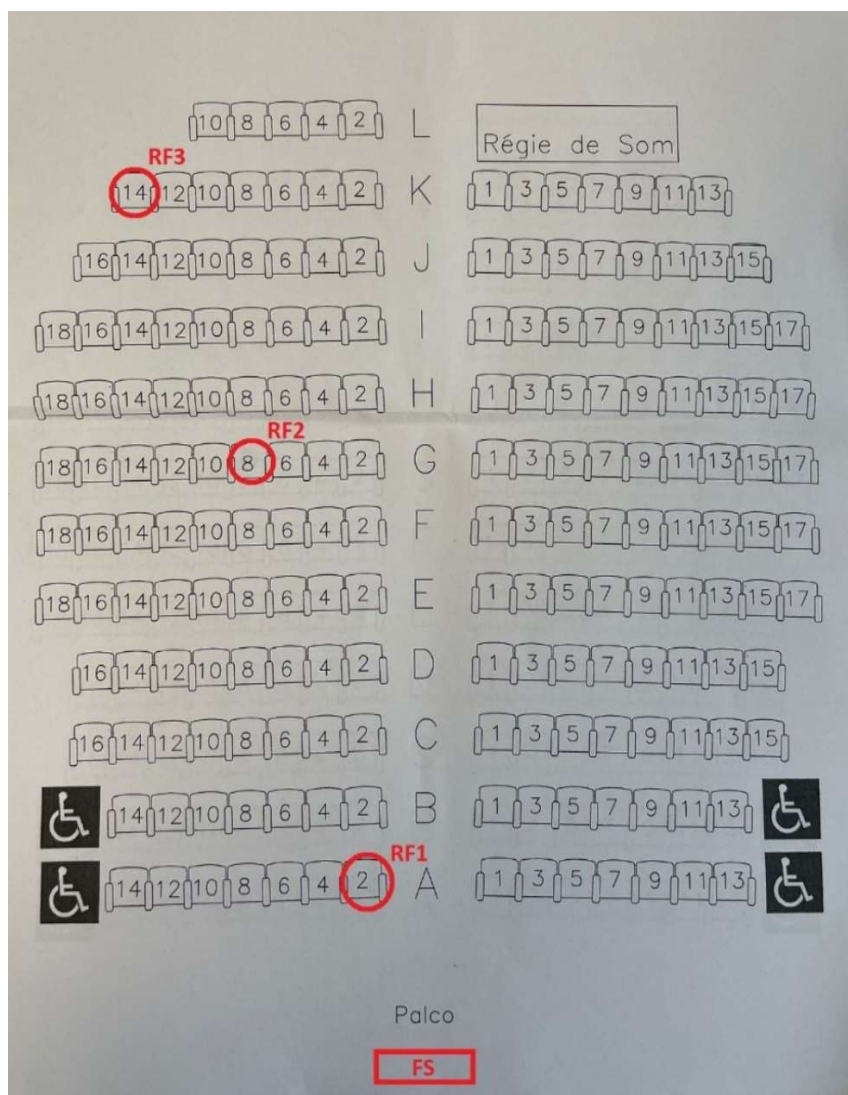


Figura 5.2 Pontos de medição do ruído de fundo na plateia [adaptado de 24]



Figura 5.3 Pontos de medição do ruído de fundo nos pisos de camarotes [foto do autor]

5.2.2 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Como mencionado anteriormente, o tempo de reverberação é um fator crucial para a qualidade acústica de qualquer ambiente. Utilizando uma fonte de ruído e um sonómetro, foram realizadas medições do tempo de reverberação em nove pontos diferentes da sala, os mesmos que para o ruído de fundo (Figura 5.2 e Figura 5.3). O tempo de reverberação é definido como o tempo necessário, em segundos, para que o som decaia 60 dB.

A avaliação do tempo de reverberação envolve a emissão de um ruído rosa com amplitude suficientemente alta para minimizar as interferências do ruído de fundo. A fonte sonora foi colocada no centro do palco (Figura 5.3) para simular as condições normais de funcionamento, enquanto o sonómetro foi posicionado nos nove pontos conforme mostrado, anteriormente, na Figura 5.2.

No entanto, devido às limitações na compatibilidade entre o ruído de fundo (30-40 dB) e o nível máximo de ruído que a fonte de ruído poderia produzir, os parâmetros medidos foram os tempos de reverberação correspondentes a decaimentos de 20 e 30 dB (T_{20} e T_{30} , respetivamente). Conforme discutido no Capítulo 2.3, é possível extrapolar o valor do tempo de reverberação para um decaimento de 60 dB (T_{60}), assumindo um comportamento linear no decaimento do som. Para este estudo, o tempo de reverberação medido diretamente foi o T_{30} . [1]

A medição do tempo de reverberação envolveu também o recurso a um computador portátil, no qual se utilizou o *software* Dirac para efetuar a leitura das medições provenientes do sonómetro (Figura 5.4). Contrariamente ao processo efetuado para a medição do ruído de fundo, na medição do TR, o sistema de ventilação encontrava-se desligado, dado que, durante os espetáculos a organização do Teatro Sá de Miranda, opta sempre por manter o sistema de ventilação desligado.

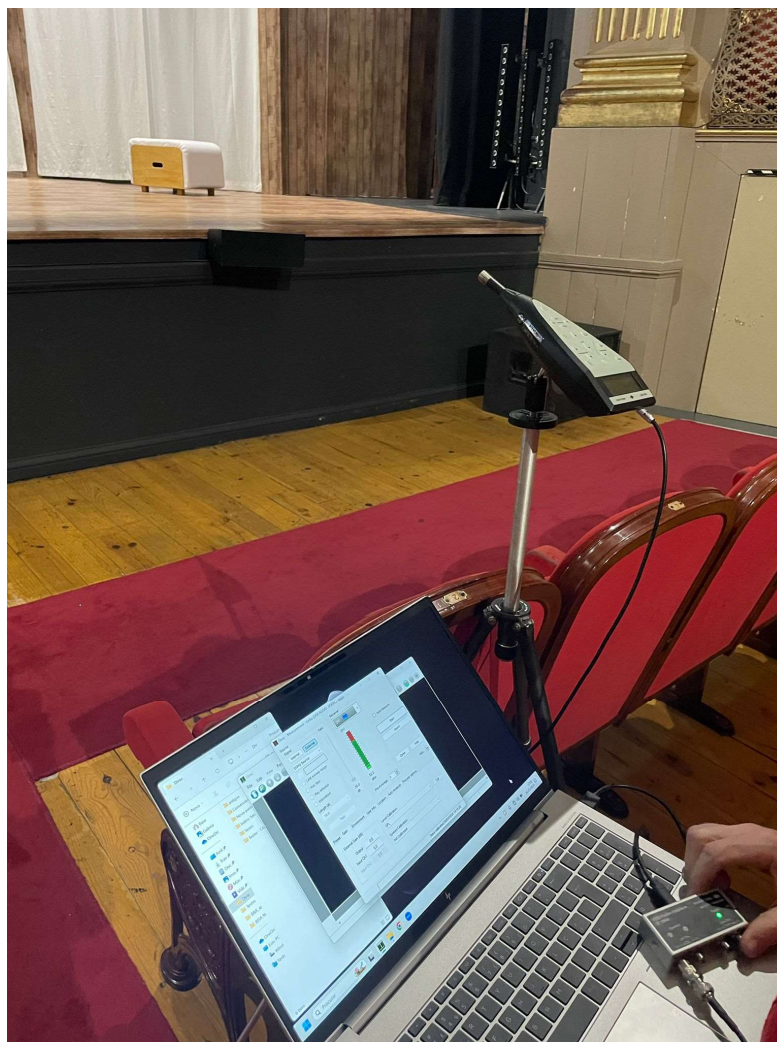


Figura 5.4. Disposição dos equipamentos na medição do TR, STI, C_{80} , D_{50} e TS [foto do autor]

5.2.3 STI (SPEECH TRANSMISSION INDEX), CLARIDADE, DEFINIÇÃO E TEMPO CENTRAL

Neste ensaio foram medidos o STI, Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}) e Tempo central (TS). Utilizaram-se dois dispositivos: uma fonte sonora Brüel & Kjaer e um recetor sonómetro Brüel & Kjaer.

O ruído característico emitido pela fonte sonora é filtrado nas bandas de oitava entre 125 e 8000 Hz, pelo recetor que realiza uma medição de aproximadamente 8 segundos. A fonte sonora foi colocada, tal como na medição do TR, no centro do palco. O equipamento recetor foi colocado, nos mesmos nove pontos utilizados nas medições do TR e do ruído de fundo (Figura 5.2) a uma altura de aproximadamente 1,20 m correspondendo à altura aproximada da cabeça de uma pessoa sentada. Para a medição destes parâmetros, recorreu-se, tal como na medição do TR, a um computador portátil com o *software* Dirac. Todas estas medições decorreram no dia 26 de março de 2024 desde as 14:30 até as 17:30h.

6

RESULTADOS

6.1 RUÍDO DE FUNDO

Os valores do ruído de fundo (Quadros 6.1 e 6.2) foram registados por bandas de frequência de 1/3 de oitava para os nove pontos escolhidos com o sistema de ventilação desligado e ligado, respetivamente. Para além disso, os valores apresentados não contam com a utilização de qualquer filtro e são para a sala sem ocupação.

Foi também calculada a média dos valores para cada banda de frequência, o valor global do nível sonoro equivalente com o filtro A (LAeq), em dB e o valor global do nível de pressão sonora Leq em dB. Todos os valores do ruído de fundo são para medições com uma duração aproximada de dez minutos.

Numa análise abrangente destes quadros, pode-se concluir que o sistema de ventilação presente na sala provoca um aumento a rondar os 7 dB no valor do LAeq, ou seja, mais do “dobro” (energeticamente) do nível de ruído presente sem o sistema de ventilação. No Quadro 6.3 verifica-se essa diferença dos valores para o sistema de ventilação ligado e desligado.

Nas Figuras 6.1 e 6.2 encontram-se representados graficamente os valores dos níveis de pressão sonora de ruído de fundo em função da frequência, com o sistema de ventilação ligado e desligado. Na Figura 6.1, com o sistema de ventilação inativo, observa-se que o nível de ruído de fundo varia conforme a posição, isto é, o ruído de fundo vai aumentando à medida que a distância ao palco aumenta e à medida que se aumenta de piso de camarotes.

Já na Figura 6.2, onde o sistema de ventilação se encontra ativo, verifica-se um aumento significativo nos valores dos níveis de pressão. Para além disso, observa-se também que os lugares nos pisos mais altos têm os menores valores de ruído de fundo, dado que as grelhas de ventilação se encontram ao nível da plateia.

Quadro 6.1 Níveis de pressão sonora (dB) do ruído de fundo em bandas de 1/3 de oitava sem o sistema de ventilação ativo e valores globais do nível sonoro equivalente com e sem o filtro A

Bandas de frequência (Hz)	L RF1	L RF2	L RF3	L RF4	L RF5	L RF6	L RF7	L RF8	L RF9	L Média aritmética
16	41,0	44,3	45,6	46,7	46,2	45,9	46,9	47,5	48,0	45,8
20	40,6	42,5	44,1	46,5	46,0	45,6	49,8	49,7	49,5	46,0
25	42,0	42,4	44,2	45,6	45,1	45,1	47,6	47,3	47,3	45,2
31,5	39,6	41,6	41,8	41,8	42,0	42,3	46,0	45,9	45,9	43,0
40	39,9	41,3	42,8	40,3	39,8	39,7	44,4	44,0	44,0	41,8
50	34,9	37,1	40,3	37,3	36,7	36,2	37,3	37,1	36,6	37,1
63	33,2	37,6	38,0	35,4	35,2	34,9	33,7	33,2	32,8	34,9
80	28,1	31,4	32,0	33,1	33,4	33,6	32,8	33,0	32,8	32,2
100	29,1	29,5	29,4	29,0	28,5	28,7	28,3	28,6	28,4	28,8
125	30,5	30,6	30,5	29,0	28,8	28,9	28,1	28,3	28,3	29,2
160	28,9	29,6	30,2	28,5	28,1	28,4	27,5	27,5	27,4	28,5
200	26,9	27,2	26,9	25,3	24,9	26,0	25,1	24,7	24,4	25,7
250	24,7	24,5	24,2	22,8	22,7	23,0	22,3	22,6	22,5	23,3
315	21,6	21,3	21,1	19,9	19,8	20,0	19,4	19,6	19,5	20,2
400	17,8	17,8	17,7	16,4	16,1	16,6	15,8	15,9	15,8	16,7
500	18,2	17,9	17,0	15,6	15,4	17,0	17,2	17,3	17,0	17,0
630	15,5	15,1	14,6	13,5	13,5	14,4	13,7	13,4	13,2	14,1
800	13,1	13,0	12,6	12,2	12,1	12,5	11,9	11,7	11,6	12,3
1k	13,5	13,2	12,9	13,0	13,0	12,9	12,3	12,0	11,9	12,7
1,25k	12,3	12,1	12,3	12,0	11,8	11,9	11,4	11,2	11,2	11,8
1,6k	10,3	10,6	10,8	10,8	10,6	10,6	10,1	10,0	10,1	10,4
2k	9,3	9,4	9,9	10,0	9,8	9,7	9,2	9,1	9,2	9,5
2,5k	8,2	8,2	8,2	8,1	8,0	7,9	7,6	7,4	7,5	7,9
3,15k	8,1	8,3	8,0	7,7	7,5	7,6	7,3	7,1	7,2	7,6
4k	8,1	8,1	7,8	7,6	7,5	7,5	7,3	7,2	7,3	7,6
5k	8,2	8,1	8,0	7,7	7,7	7,7	7,6	7,5	7,5	7,8
6,3k	8,4	8,3	8,1	7,9	7,9	7,9	7,8	7,8	7,8	8,0
8k	8,4	8,3	8,3	8,2	8,2	8,1	8,2	8,1	8,1	8,2
10k	8,8	8,8	8,8	8,7	8,7	8,6	8,7	8,7	8,7	8,7
12,5k	8,6	8,6	8,5	8,5	8,5	8,5	9,0	9,0	9,1	8,7
16k	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,9	8,9	8,9	8,8
Leq (dB)	49,8	51,6	53,0	53,6	53,3	53,1	55,4	55,4	55,4	53,4
LAeq (dB)	26,1	26,3	26,3	25,3	25,2	25,5	25,1	25,0	24,9	25,5

Quadro 6.2 Níveis de pressão sonora (dB) do ruído de fundo em bandas de 1/3 de oitava com o sistema de ventilação ativo e valores globais do nível sonoro equivalente com e sem o filtro A

Bandas de frequência (Hz)	L RF1	L RF2	L RF3	L RF4	L RF5	L RF6	L RF7	L RF8	L RF9	L Média aritmética
16	55,3	55,6	55,9	55,8	54,8	52,2	52,8	53,0	53,0	54,3
20	51,8	52,2	52,9	52,9	53,1	53,7	54,5	47,9	47,7	51,9
25	50,0	50,2	50,9	51,0	51,3	51,9	52,3	47,9	47,6	50,3
31,5	47,8	48,0	48,3	48,5	48,8	49,2	49,5	44,2	44,2	47,6
40	46,2	46,0	46,3	46,0	46,5	47,2	48,1	42,6	42,7	45,7
50	41,6	41,6	40,9	39,9	40,3	41,1	42,1	38,1	38,3	40,4
63	37,2	37,0	36,5	36,2	36,3	35,5	35,8	38,0	38,2	36,7
80	34,9	35,0	35,2	35,3	35,1	35,0	34,7	36,0	35,1	35,1
100	32,1	32,0	31,9	31,5	31,6	32,1	32,1	32,8	32,3	32,0
125	32,5	32,3	32,1	31,3	31,4	31,1	31,6	32,4	32,0	31,9
160	31,5	31,2	31,2	30,4	30,3	30,1	30,4	30,8	30,2	30,7
200	31,2	31,2	31,3	30,5	29,9	28,9	28,5	28,9	28,3	29,9
250	31,7	31,9	32,1	31,7	31,2	29,8	30,1	30,4	30,2	31,0
315	28,9	29,0	29,0	28,8	28,6	28,0	28,1	28,4	28,4	28,6
400	26,5	26,6	26,7	26,4	26,1	25,8	26,0	26,0	25,9	26,2
500	25,8	25,8	25,4	25,1	24,9	24,5	24,7	24,8	24,8	25,1
630	21,7	21,7	21,4	21,0	20,7	20,4	20,6	20,7	20,6	21,0
800	22,2	22,1	21,5	21,1	20,7	20,1	20,2	19,9	19,8	20,8
1k	24,6	24,7	24,2	23,1	22,4	21,2	21,1	20,5	20,6	22,5
1,25k	22,0	22,2	22,3	22,0	20,8	17,8	17,8	17,4	17,5	20,0
1,6k	17,6	17,6	17,1	16,5	16,3	15,5	15,5	14,7	14,7	16,2
2k	16,6	16,7	16,6	16,3	15,7	14,6	14,6	13,6	13,6	15,4
2,5k	17,6	17,9	18,4	18,6	16,7	12,5	12,4	11,4	11,4	15,2
3,15k	13,7	13,9	14,3	14,4	13,8	11,1	10,9	9,8	9,8	12,4
4k	12,4	12,5	12,9	12,9	12,6	10,3	10,2	8,9	9,0	11,3
5k	11,8	12,0	12,4	12,5	12,3	10,0	10,2	8,4	8,4	10,9
6,3k	9,5	9,4	9,7	9,6	9,7	8,6	8,6	8,3	8,3	9,1
8k	9,4	9,3	9,4	9,4	9,5	8,6	8,8	8,8	8,8	9,1
10k	9,7	9,5	9,5	9,6	9,7	9,0	9,1	9,1	9,2	9,4
12,5k	9,6	9,7	9,8	9,9	10,0	9,6	9,9	10,0	10,0	9,8
16k	9,3	9,4	9,4	9,5	9,6	9,2	9,3	9,5	9,5	9,4
Leq (dB)	59,0	59,2	59,6	59,5	59,3	59,0	59,6	57,0	56,7	58,8
LAeq (dB)	33,0	33,1	33,0	32,6	32,1	31,1	31,2	31,1	30,9	32,0

Quadro 6.3 Variação dos valores globais do nível sonoro equivalente com e sem o filtro A entre o sistema de ventilação ligado e desligado

Pontos	RF1	RF2	RF3	RF4	RF5	RF6	RF7	RF8	RF9	Média
ΔL_{eq} = com ventilação - sem ventilação (dB)	9,2	7,6	6,6	5,9	6,0	5,9	4,2	1,6	1,3	5,4
ΔL_{Aeq} = com ventilação - sem ventilação (dB)	6,9	6,8	6,7	7,3	6,9	5,6	6,1	6,1	6,0	6,5

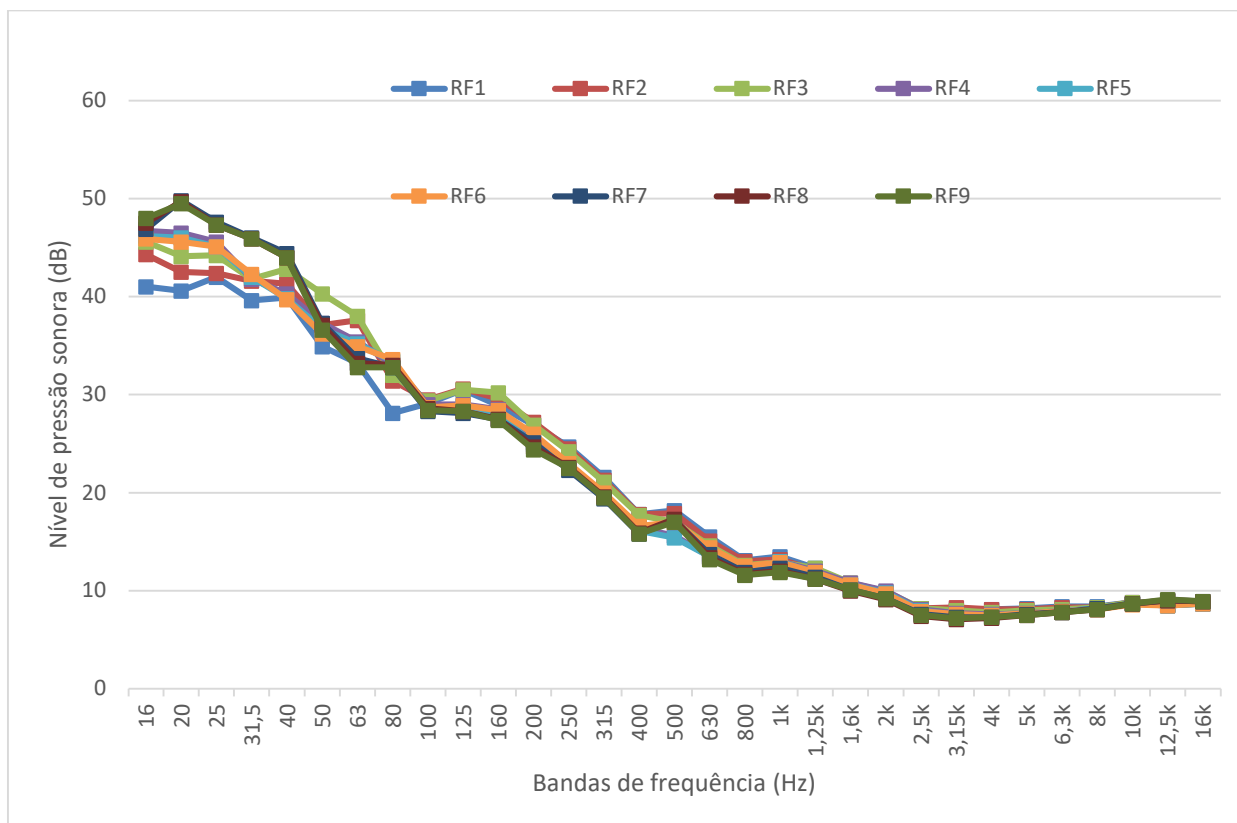


Figura 6.1. Níveis de pressão sonora do ruído de fundo por bandas de frequência de 1/3 de oitava, com o sistema de ventilação desligado e sem ocupação.

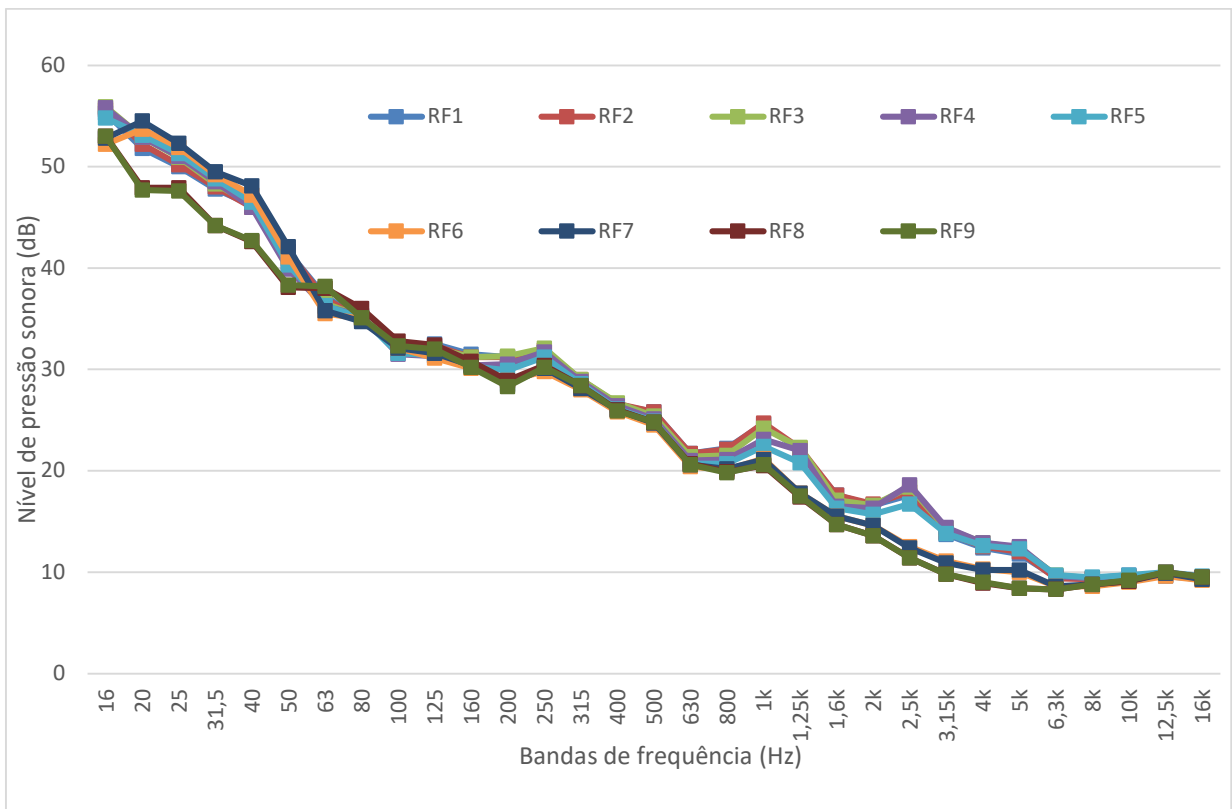


Figura 6.2 Níveis de pressão sonora do ruído de fundo em por bandas de frequência de 1/3 de oitava, com o sistema de ventilação ligado e sem ocupação

A Figura 6.3 demonstra a variação do nível de pressão sonora quando o sistema de ventilação é ligado. Para algumas frequências, o aumento do nível de pressão sonora atinge valores de quase 10 dB, algo que pode ser um entrave à boa audibilidade do auditório.

De referir também, que existe um aumento nas gamas de frequência compreendidas entre 16 e os 25 Hz, ou seja, fora do intervalo audível para o ser humano.

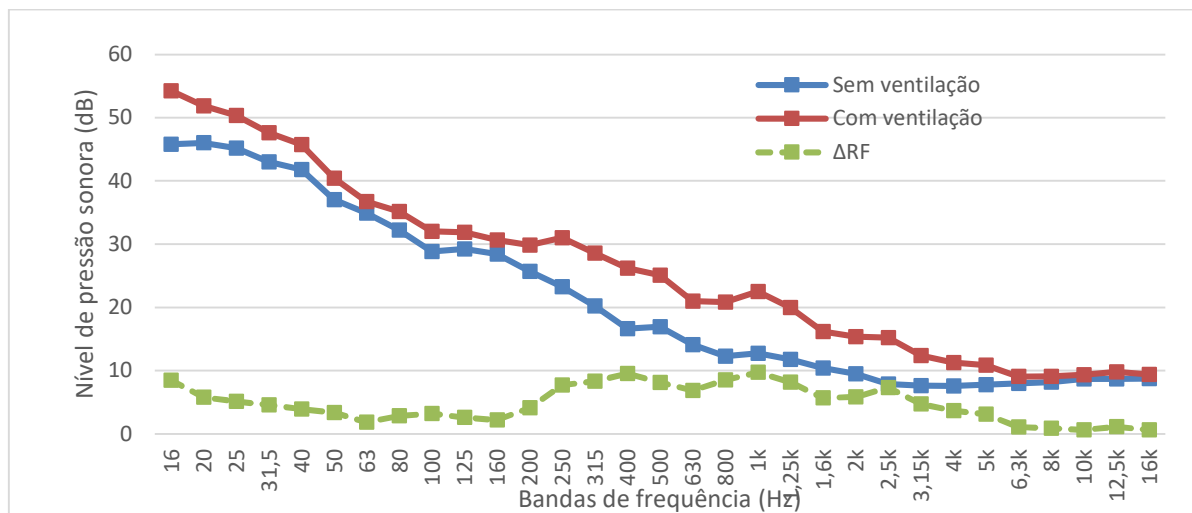


Figura 6.3 Comparação entre os valores médios do nível de pressão sonora de ruído de fundo, em bandas de frequência de 1/3 de oitava com e sem o funcionamento do sistema de ventilação.

A Figura 6.4 mostra a variação dos valores do nível sonoro equivalente com o filtro A entre o sistema de ventilação ligado e desligado, verificando-se assim que a diferença em dB entre o sistema de ventilação ligado e desligado se mantém constante a rondar os 6 e 7 dB.

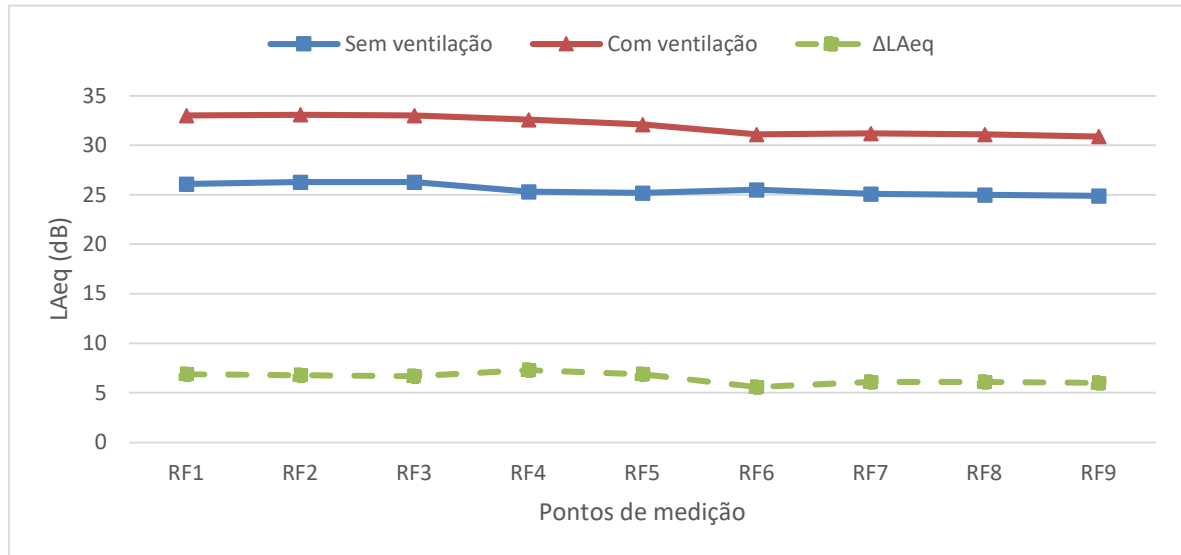


Figura 6.4 Variação dos valores do nível sonoro equivalente com o filtro A entre o sistema de ventilação ligado e desligado

O Teatro Sá de Miranda é abrangido parcialmente pelo artigo 10º do RRAE que especifica entre outros parâmetros, valores máximos para o nível sonoro do ruído de fundo no interior da edificação de forma a garantir a integridade acústica. O nível sonoro do ruído de fundo máximo com ausência de funcionamento de equipamentos e sem audiência definido pelo regulamento são 30 dB(A). O valor máximo do ruído de fundo do auditório foi, com o filtro A, de 26 dB, cumprindo, assim, o estipulado no regulamento. [16]

O RRAE define valores máximos para o nível sonoro contínuo equivalente associado ao funcionamento de equipamentos e instalações técnicas. Para salas onde a principal utilização não é o cinema, o valor máximo mantém-se em 30 dB(A). O Teatro Sá de Miranda não cumpre esta restrição, pois o valor máximo do ruído de fundo calculado com o sistema de ventilação em funcionamento e com a sala vazia é de, aproximadamente 33 dB(A). Contudo se for aplicada a incerteza (I) de 3 dB a sala “cumpre” os requisitos do regulamento.[16]

6.2 CURVAS DE INCOMODIDADE NC E NR

Desde logo, dois dos principais critérios de análise da incomodidade e influência de um determinado equipamento na inteligibilidade da palavra são as curvas NC (*Noise Criterion*) e NR (*Noise Rating*). Estas curvas permitem atribuir uma determinada classificação ao local com base nas medições do

ruído de fundo presente em diferentes frequências entre as bandas de frequência de 62 e 8000 Hz,. Já o NR, engloba as frequências entre as bandas de 31 e 8000 Hz. O NR, dos dois critérios, é o mais utilizado na Europa. A Figura 6.5 foi obtida através da sobreposição entre as curvas gerais do NC e a curva dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo em bandas de frequência de 1/1 oitavas sem e com o sistema de ventilação ligado, respetivamente. [1]

Analisando a Figura 6.5, conclui-se que, aquando da não utilização do sistema de ventilação, o valor obtido é NC 15, o que, tratando-se de um teatro, em que a oratória é essencial, está-se perante um valor bastante aceitável. Para além disso, conclui-se que quando o sistema de ventilação se encontra ligado o valor para este critério é NC 20, um valor bastante satisfatório, dado que se encontra abaixo do máximo recomendado (Quadro 6.4), NC 30. [17]

De igual forma, analisando a Figura 6.6 encontram-se representadas as curvas NR sobrepostas com a curva do nível de pressão sonora do ruído de fundo com e sem o sistema de ventilação a funcionar. A figura permite concluir que o *Noise Rating*, quando o sistema de ventilação está desligado, tem o valor de NR 16. Por outro lado, quando o sistema de ventilação está em funcionamento, a classificação é NR 23. Analisando o Quadro 6.4, observa-se que os valores de NR, quer com o sistema de ventilação ligado, quer com o sistema de ventilação desligado, cumprem com os valores máximos recomendados. [17]

Quadro 6.4 Comparação dos valores obtidos de NC e NR com os valores máximos recomendados

	Valores máximos recomendados [17]		Valores obtidos			
			Sem ventilação		Com ventilação	
Tipo de Utilização	NC	NR	NC	NR	NC	NR
Teatro e música	20 a 30	20 a 30	15	16	20	22
					$\Delta NR = +6$	
					$\Delta NC = +5$	

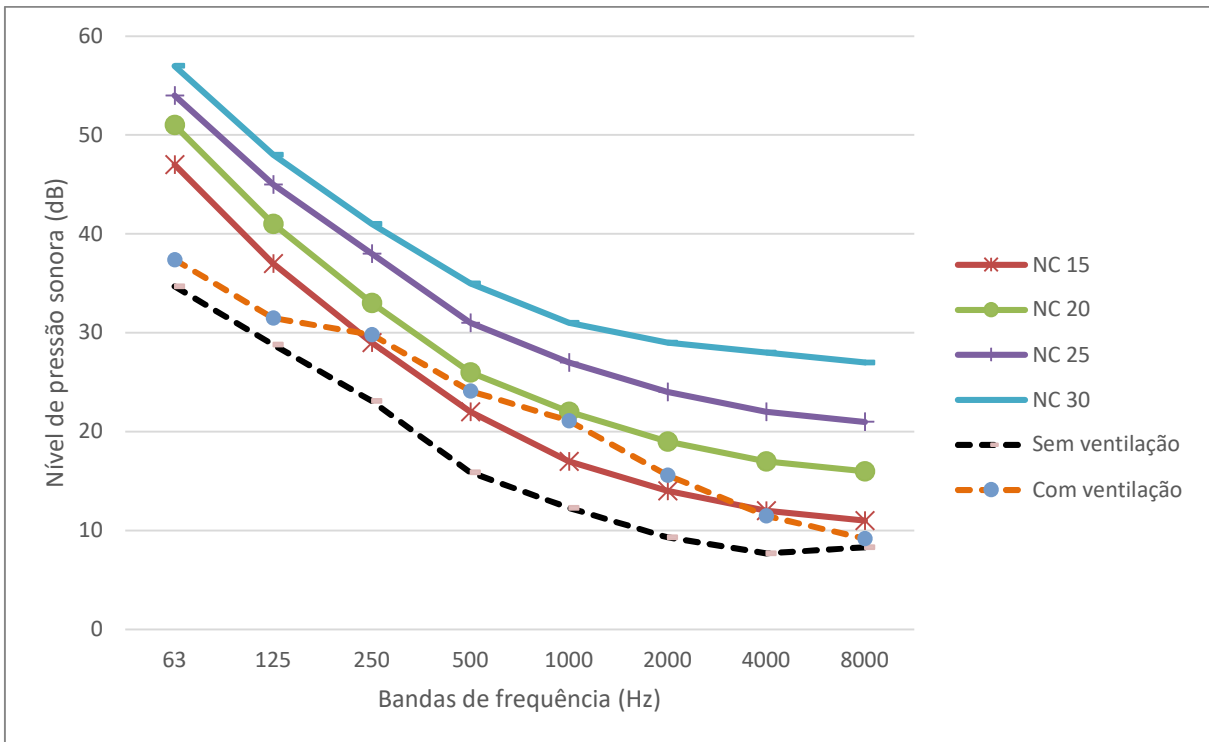


Figura 6.5 – Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo com as curvas NC, com o sistema de ventilação desligado e ligado

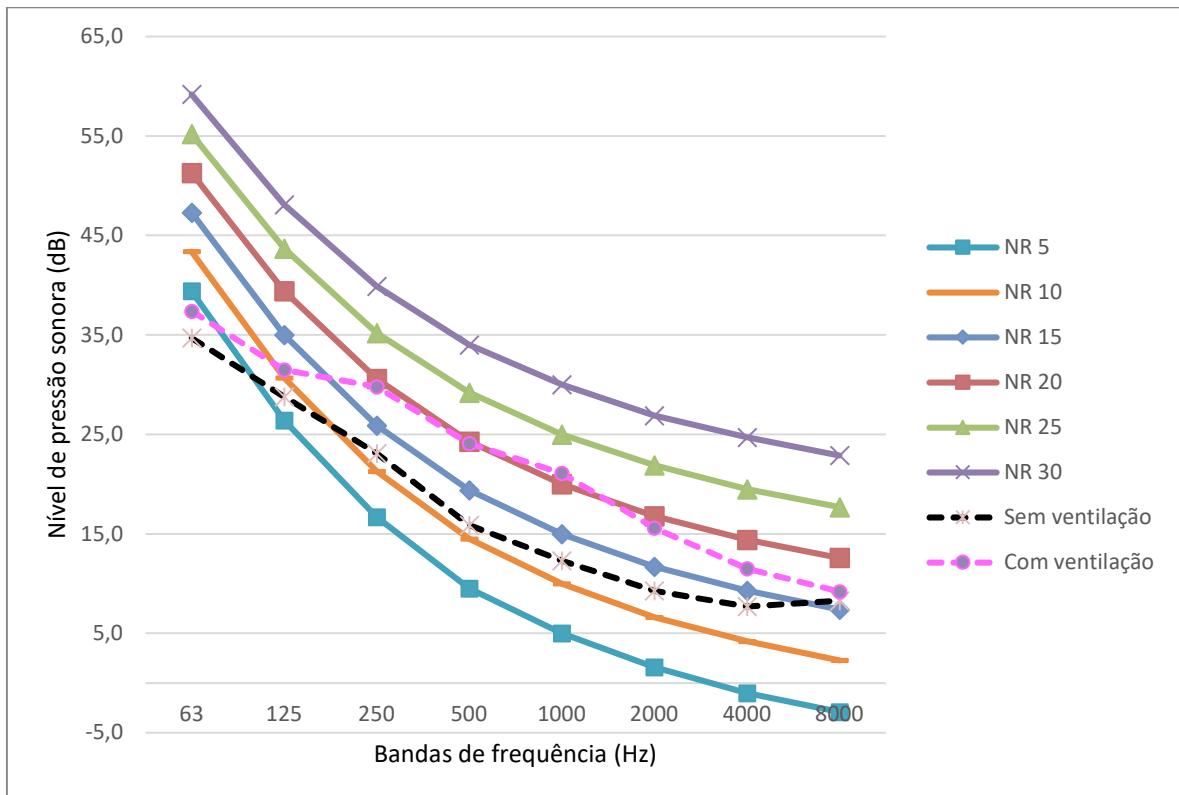


Figura 6.6 Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo com as curvas NR, com o sistema de ventilação desligado e ligado

6.3 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Para os nove pontos de medição, apontou-se os valores do tempo de reverberação (TR_{30}), por bandas de frequência de 1/3 de oitava, entre os 100 e os 5000 Hz. O Quadro 6.5 e a Figura 6.7 apresentam os resultados para cada ponto e a respetiva média das medições dos nove pontos para cada banda de frequência. Já a Figura 6.8 apresenta a curva média dos valores do tempo de reverberação. Assim, verifica-se que, o tempo de reverberação médio para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz é de 1,18 s.

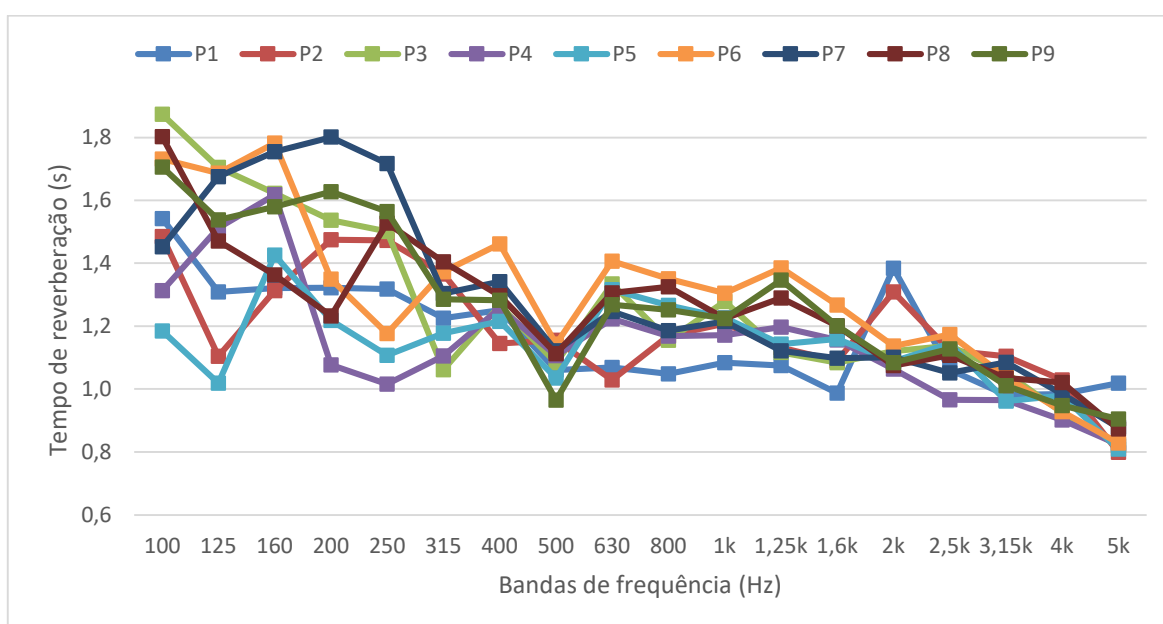


Figura 6.7 Variação dos valores do Tempo de Reverberação para os nove pontos medidos

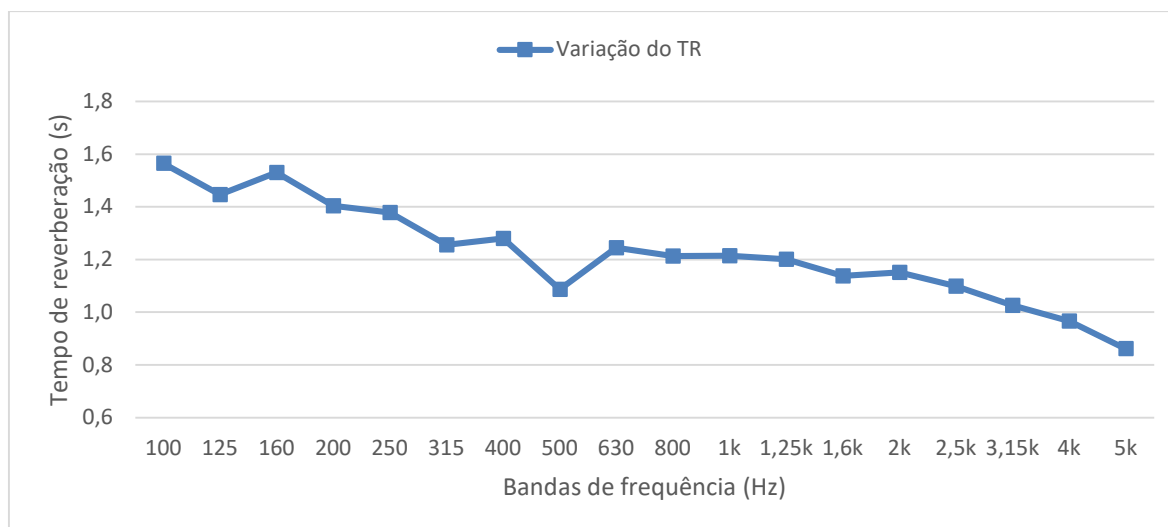


Figura 6.8 Valores médios do Tempo de Reverberação nos nove pontos do Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo)

Quadro 6.5 Valores do Tempo de Reverberação (TR) em s

Frequências (Hz)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	Média	Desvio padrão
100	1,54	1,49	1,87	1,31	1,19	1,73	1,45	1,80	1,71	1,57	0,22
125	1,31	1,10	1,71	1,51	1,02	1,69	1,68	1,47	1,54	1,45	0,24
160	1,32	1,31	1,62	1,62	1,43	1,78	1,75	1,36	1,58	1,53	0,17
200	1,32	1,48	1,54	1,08	1,22	1,35	1,80	1,23	1,63	1,40	0,21
250	1,32	1,47	1,50	1,02	1,11	1,18	1,72	1,53	1,56	1,38	0,22
315	1,23	1,37	1,06	1,11	1,18	1,37	1,30	1,40	1,29	1,26	0,11
400	1,25	1,15	1,27	1,26	1,22	1,46	1,34	1,30	1,28	1,28	0,08
500	1,06	1,16	1,08	1,11	1,04	1,14	1,12	1,11	0,97	1,09	0,06
630	1,07	1,03	1,33	1,22	1,32	1,41	1,25	1,31	1,27	1,24	0,12
800	1,05	1,17	1,16	1,17	1,27	1,35	1,19	1,33	1,25	1,21	0,09
1000	1,08	1,21	1,28	1,17	1,23	1,31	1,22	1,22	1,22	1,22	0,06
1250	1,08	1,13	1,12	1,20	1,14	1,39	1,12	1,29	1,35	1,20	0,11
1600	0,99	1,09	1,08	1,16	1,16	1,27	1,10	1,20	1,20	1,14	0,08
2000	1,38	1,31	1,12	1,06	1,09	1,14	1,10	1,08	1,08	1,15	0,11
2500	1,06	1,12	1,14	0,97	1,15	1,17	1,05	1,11	1,13	1,10	0,06
3150	0,98	1,10	1,05	0,97	0,96	1,04	1,09	1,04	1,01	1,03	0,05
4000	0,98	1,03	0,93	0,90	0,98	0,93	0,98	1,02	0,95	0,97	0,04
5000	1,02	0,80	0,82	0,82	0,81	0,83	0,88	0,87	0,91	0,86	0,07

De referir que, o valor médio [500, 1k Hz] do TR para a sala vazia e em bandas de frequência de 1/1 oitava é, aproximadamente, 1,21 s.

Com isto, procedeu-se ao cálculo do tempo de reverberação com a sala de espetáculos ocupada, algo que é também de extrema importância, dado que se obtém valores mais adequados a uma situação de funcionamento. Assim, calcula-se os novos valores considerando que todos os 377 lugares da sala se encontram ocupados. Para tal, recorre-se à fórmula de Sabine, presente no capítulo 2.3.3.

Foram obtidos os seguintes valores de áreas através do uso da ferramenta de medição de áreas do *software* AutoCAD:

- 1) Área dos assentos da plateia: 79,54 m² (S_p);
- 2) Área dos assentos das frisas + camarotes: 99,2 m² (S_{f+c});

3) Volume total da sala: 2491 m³.

De referir que os valores para as áreas dos assentos, foram obtidos considerando um perímetro de mais 0,5m de cada lado dos assentos (Figura 6.9)

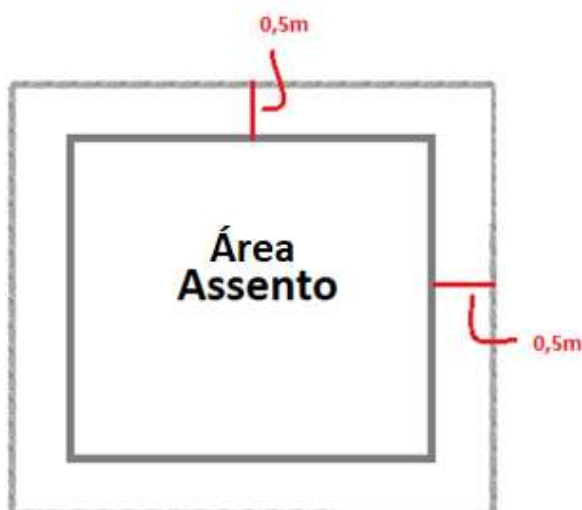


Figura 6.9 Perímetro usado no cálculo das áreas dos assentos S_p e S_{f+c}

Os valores dos coeficientes de absorção sonora (α) para bandas de frequência de 1/1 oitava, para a sala vazia e com audiência, estão expostos no Quadro 6.6. Para além disso, estão também presentes os valores de TR com a sala vazia e os dados necessários para calcular o TR para a sala com 100% de ocupação no Quadro 6.7.

Quadro 6.6 Valores utilizados no cálculo do Tempo de Reverberação para a sala 100% ocupada

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α (assentos com a sala ocupada)	0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86
α (assentos com a sala vazia)	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
$\Delta \alpha$	0,12	0,11	0,12	0,13	0,18	0,24
$\Delta A = \Delta \alpha * (S_p + S_{f+c})$ (m ²)	21,45	19,66	21,45	23,24	32,17	42,90

Quadro 6.7 Cálculo do Tempo de Reverberação para a sala 100% ocupada

Frequência (Hz)	Média TR Sala vazia (s)	A Sala vazia (m ²)	Previsão de A Sala 100% ocupada (m ²)	Previsão de TR Sala 100% ocupada (s)
125	1,51	263,95	284,65	1,40
250	1,35	296,12	315,78	1,26
500	1,20	331,16	352,61	1,13
1000	1,21	329,49	352,73	1,13
2000	1,13	352,85	385,02	1,04
4000	0,95	418,92	461,82	0,86
Novo TR médio [500, 1000 Hz]				1,13

Conclui-se então, como era de prever, que o TR médio com a sala ocupada é inferior 0,1 s ao da sala vazia, passando de 1,23 para 1,13 s. Na Figura 6.10, observam-se as duas curvas dos valores de TR para a sala vazia e ocupada e onde se pode evidenciar a ligeira descida dos valores do tempo de reverberação.

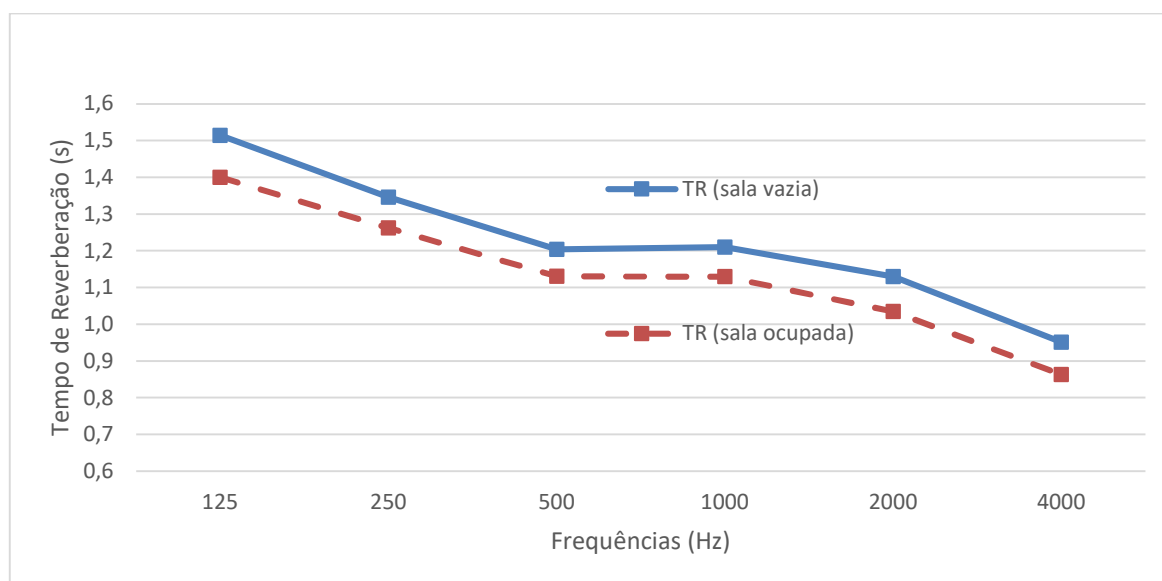


Figura 6.10 Variação dos valores do Tempo de Reverberação para a sala vazia e ocupada do Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo)

6.4 RÁCIO DE BAIXOS BASEADO NO TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Tal como mencionado no capítulo 2.4, o rácio de baixos para o tempo de reverberação é geralmente usado para avaliar o balanço tonal, comparando-se os valores do tempo de reverberação para as baixas frequências com os valores das altas frequências. Aplicando a fórmula proposta por Beranek [1] aos valores medidos no Teatro Sá de Miranda, obtém-se o seguinte valor do rácio de baixos:

$$BR_{RT} = \frac{1,51 + 1,35}{1,20 + 1,21} \approx 1,19$$

Para órgão de tubos ou a maioria das músicas corais, é preferível um valor do BR_{RT} mais alto. Para discurso, um valor o mais próximo de um é desejável. [28]

6.5 STI (SPEECH TRANSMISSION INDEX)

Na medição do STI, registaram-se valores também para nove pontos distintos. Para cada ponto, obtiveram-se leituras de STI masculino e STI feminino, para os quais foi obtido um valor médio (Quadro 6.8). Já o STI global foi obtido através do cálculo da média de todos os valores para todos os pontos.

Na Figura 6.11 está traduzida a variação do STI médio ao longo dos nove pontos de medição. Através da análise desse gráfico, verifica-se que o melhor valor de STI médio (0,71), ou seja, o mais próximo de 1,0 é para o P1, dado que é o ponto de medição mais próximo da fonte sonora, logo o mais próximo do palco. Por oposição, o ponto mais longe do palco, P9, é o que evidencia o pior valor de STI (0,46).

O valor de STI médio global, ou seja, a média de todos os valores medidos é de 0,53, o que conforme o Quadro 6.9, que representa a conversão de valores de STI para uma escala subjetiva de inteligibilidade da palavra, é um valor *suficiente*, contudo ainda longe da *boa* inteligibilidade. De notar que, apenas o melhor valor de STI médio de 0,71 para o ponto P1 (o mais próximo do palco) apresenta uma *boa* inteligibilidade.

Quadro 6.8 Valores do STI para os nove pontos de medição

Pontos	STI Masculino	STI Feminino	STI Médio
P1	0,69	0,73	0,71
P2	0,50	0,52	0,51
P3	0,50	0,53	0,51
P4	0,49	0,52	0,51
P5	0,50	0,53	0,52
P6	0,52	0,54	0,53
P7	0,50	0,53	0,52
P8	0,51	0,53	0,52
P9	0,45	0,47	0,46
STI Médio Global			0,53

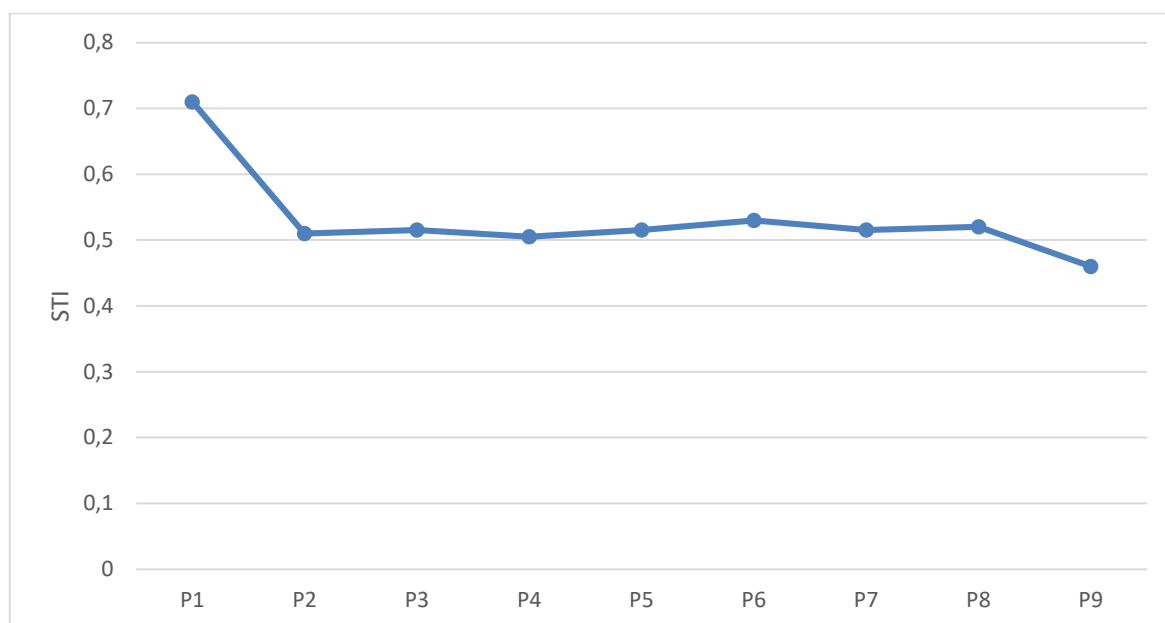


Figura 6.11 Variação do STI médio ao longo dos nove pontos de medição

Quadro 6.9 Conversão de valores de STI numa escala subjetiva de inteligibilidade da palavra [1]

STI	Inteligibilidade da palavra
[0,00 – 0,30[<i>Má</i>
[0,30 – 0,45[<i>Medíocre</i>
[0,45 – 0,60[<i>Suficiente</i>
[0,60 – 0,75[<i>Boa</i>
[0,75 – 1,00]	<i>Excelente</i>

6.6 DEFINIÇÃO (D_{50})

A Definição (D_{50}), como foi mencionado no capítulo 2.6, é o quociente entre a energia recebida nos primeiros 50 milissegundos e a energia total recebida ao longo do decaimento. Os valores obtidos estão expressos no Quadro 6.10, bem como a média para cada frequência e o valor médio global, que resulta da média aritmética entre todos os resultados obtidos. [1]

Os valores recomendados por Marshall [19] encontram-se representados no Quadro 6.11 e serviram para avaliar a definição numa escala subjetiva, sendo que o valor médio global é de 0,60, logo, de acordo com a escala, é um valor “suficiente”, tal como assinalado no Quadro 6.11.

De referir igualmente que, tal como no STI, os valores situam-se num intervalo de 0 a 1, sendo que quanto mais perto da unidade, melhor será a definição do discurso.

Na Figura 6.12, observa-se a variação dos valores de D_{50} em função da frequência para todos os pontos medidos. Com isto, verifica-se que a curva com os melhores valores de Definição é para o ponto mais próximo do palco (P1), enquanto que os piores valores (mais próximos de zero), são para os pontos mais longe do palco (P3 e P9), ou seja, mais afastados da fonte sonora.

Quadro 6.10 Valores médios do D_{50} nos nove pontos no Teatro Sá de Miranda

Pontos	Frequência (Hz)							
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1	0,75	0,86	0,8	0,78	0,85	0,91	0,96	
P2	0,49	0,48	0,54	0,54	0,59	0,74	0,87	
P3	0,18	0,36	0,51	0,45	0,52	0,69	0,81	
P4	0,40	0,54	0,46	0,43	0,51	0,67	0,78	
P5	0,50	0,58	0,54	0,48	0,53	0,66	0,76	
P6	0,58	0,66	0,55	0,48	0,6	0,70	0,78	
P7	0,53	0,44	0,48	0,50	0,61	0,71	0,77	
P8	0,59	0,6	0,62	0,50	0,57	0,68	0,81	
P9	0,31	0,37	0,55	0,41	0,44	0,56	0,80	Média Global
Média	0,48	0,54	0,56	0,51	0,58	0,70	0,82	0,60

Quadro 6.11 Valores indicativos do D_{50} [19]

Escala subjetiva	D_{50}
Excelente	0,86 a 1
Boa	0,67 a 0,86
Suficiente	0,39 a 0,67
Medíocre	0,17 a 0,39
Má	0,06 a 0,17

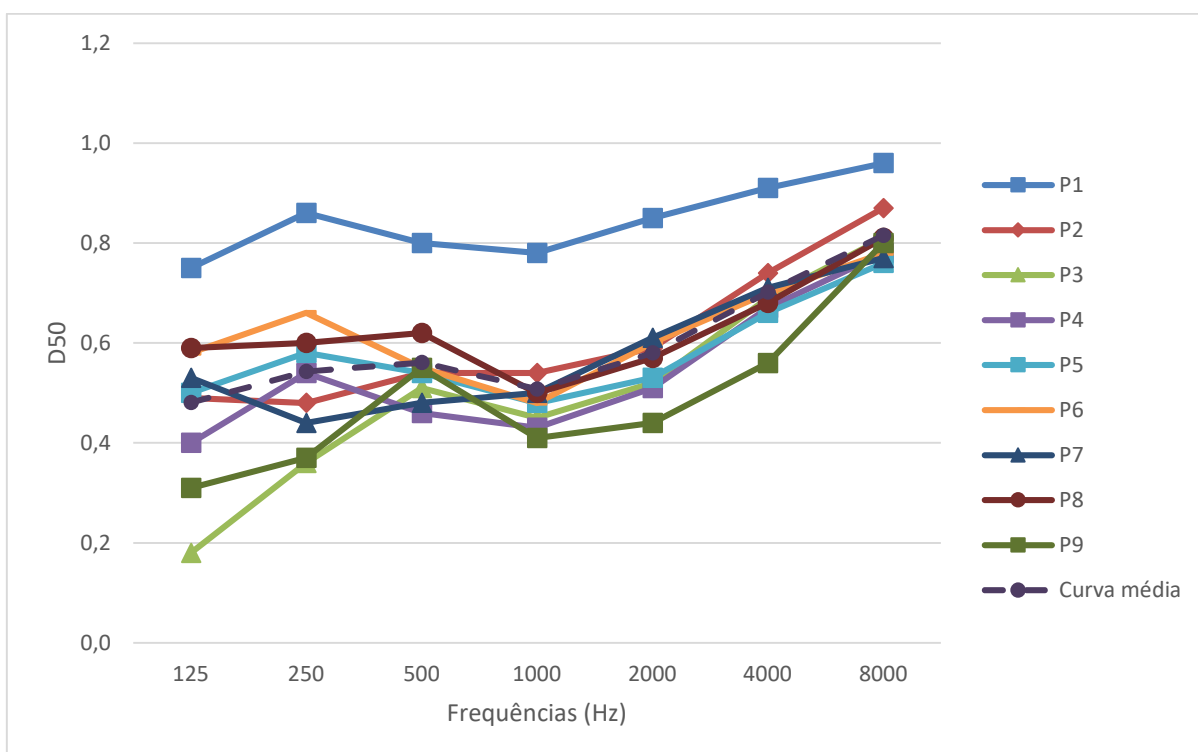


Figura 6.12 Variação dos valores de D_{50} , em função das bandas de frequências para os nove pontos medidos no Teatro Sá de Miranda

6.7 CLARIDADE (C_{80})

A Claridade (C_{80}), tal como mencionado no capítulo 2.7, é a razão em dB entre a energia recebida nos primeiros 80 ms do sinal recebido e energia recebida posteriormente. Os valores obtidos estão expressos no Quadro 6.12, bem como a média para cada frequência e o valor médio global, que resulta da média aritmética entre todos os resultados obtidos.

Para a utilização tipo em estudo, ou seja, teatro e ópera, o valor recomendado para a Claridade são todos os valores maiores que 6 dB (para teatro) e os valores entre 3 e 4 dB (para ópera). [1] Assim, olhando para o valor médio global, o Teatro Sá de Miranda apresenta um valor indesejado para o parâmetro em causa (4,7 dB).

Na Figura 6.13 observa-se a variação dos valores de C_{80} , em função da frequência para todos os pontos medidos. Note-se que, novamente, a curva com os melhores valores trata-se da curva P1, ou seja, do ponto mais próximo da fonte sonora, na plateia.

Quadro 6.12 Valores do C_{80} (dB) medidos no Teatro Sá de Miranda

Pontos	Frequência (Hz)							Média Global
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1	6,4	8,8	7,6	7,3	8,7	11,3	15,4	
P2	1,3	1,9	4,0	3,3	3,8	6,9	10,5	
P3	1,3	2,1	3,2	2,0	3,1	6,1	9,8	
P4	0,5	3,4	2,7	1,2	3,3	6,5	9,2	
P5	0,6	3,0	2,9	2,0	3,5	5,5	8,3	
P6	2,7	5,5	5,5	2,7	4,4	5,8	8,3	
P7	1,5	1,7	3,6	1,8	3,6	6,0	8,3	
P8	3,8	4,2	4,5	3,5	3,8	6,4	9,3	
P9	0,3	0,4	2,5	1,4	2,2	4,1	9,1	
Média aritmética	0,5	0,5	4,0	2,8	4,0	6,5	9,8	4,7

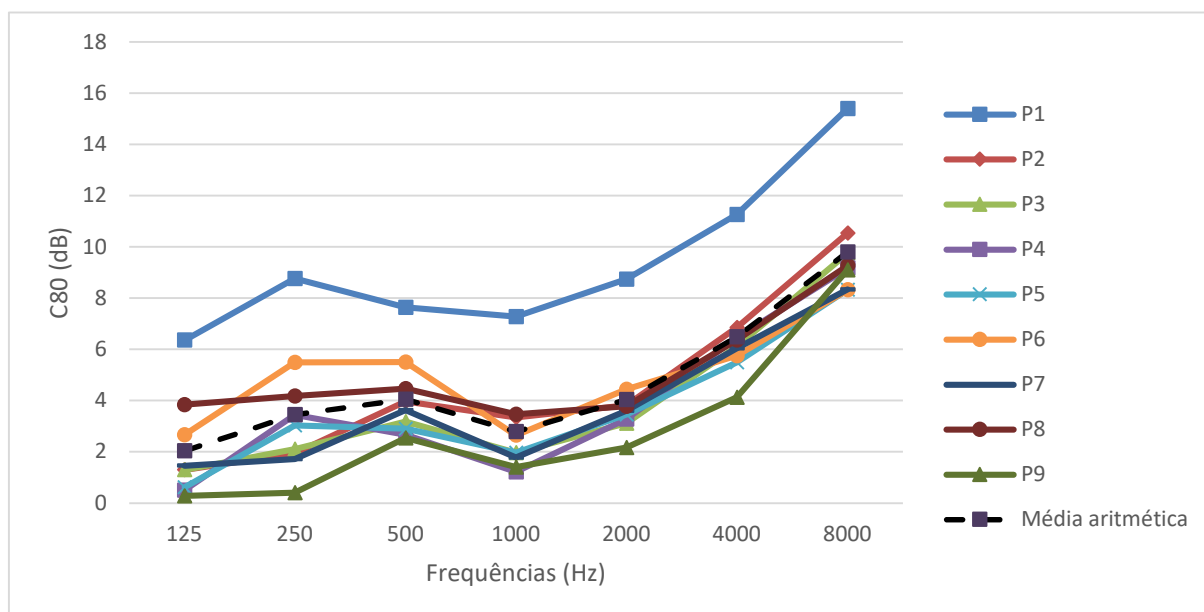


Figura 6.13 Variação dos valores de C_{80} em função da banda de frequência para os nove pontos medidos, juntamente com a variação média, no Teatro Sá de Miranda

6.8 TEMPO CENTRAL (TS)

Nas medições do Tempo Central (TS), foram feitas medições nos nove pontos e os valores obtidos encontram-se no Quadro 6.13, bem como a média para cada frequência e o valor médio global, que resulta da média aritmética entre todos os resultados obtidos.

Na Figura 6.14 apresentam-se os resultados em forma de gráficos dos nove pontos medidos, para cada banda de frequência de 1/1 oitava. Em geral, um tempo central menor é considerado melhor em muitos contextos de caracterização acústica de teatros. Isso ocorre porque um tempo central menor significa que o som chega mais rapidamente e de maneira mais direta aos ouvintes na plateia, criando uma sensação de clareza e presença sonora. Contudo, um tempo central muito curto pode resultar numa acústica excessivamente “seca”. [18]

O valor médio de aproximadamente 64 ms está dentro do intervalo recomendado, de acordo com a norma EN ISO 3382-1, que define os valores do tempo central de 60 a 260 ms para salas de concerto ou salas com diversos usos. [25]

Através da análise da Figura 6.14, observa-se que a curva P1 (ponto mais perto do palco) é a curva com os menores valores de TS, chegando mesmo a ter valores extremamente baixos na frequência de 8000 Hz, o que torna o ambiente acústico excessivamente “seco”.

Quadro 6.13 Valores do TS (ms) medidos nos nove pontos do Teatro Sá de Miranda

Pontos	Frequência (Hz)							
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1	68	35	36	36	26	14	6	
P2	100	82	68	72	60	36	18	
P3	103	84	74	78	69	45	25	
P4	113	66	78	87	68	45	30	
P5	97	74	77	76	67	46	30	
P6	98	64	68	80	63	50	32	
P7	106	86	75	80	64	44	30	
P8	89	74	72	78	70	47	31	
P9	104	97	80	90	81	60	31	Média Global
Média (ms)	97	73	70	75	63	43	26	64

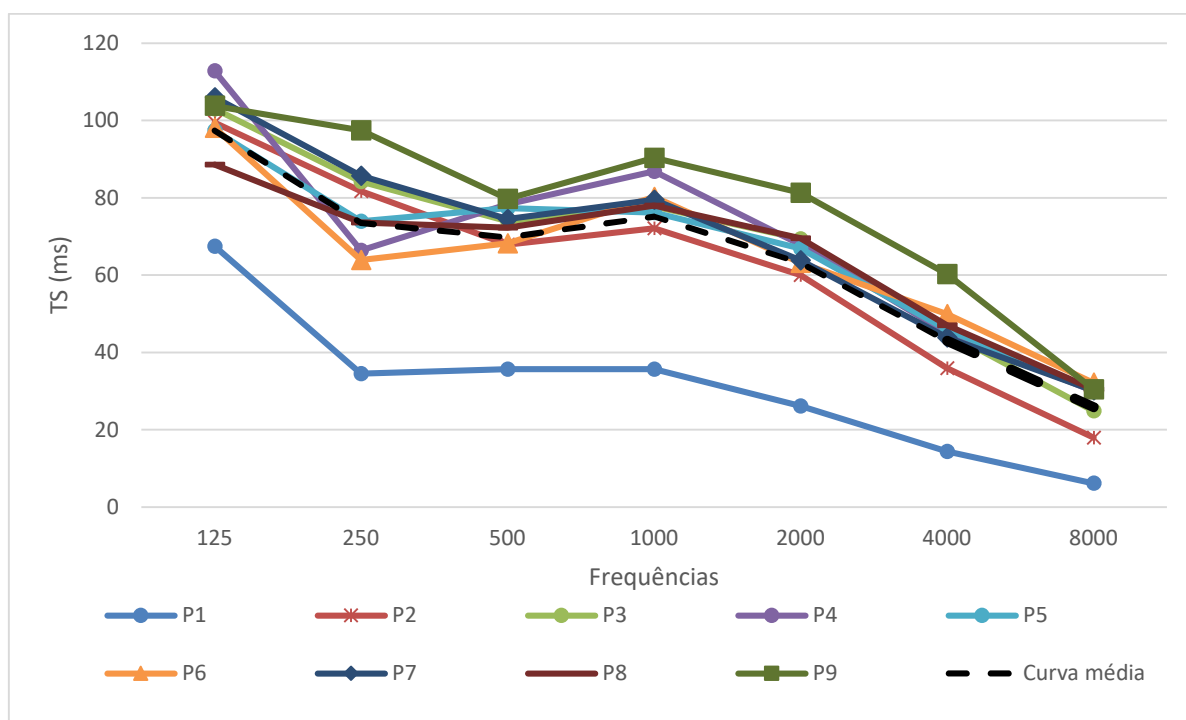


Figura 6.14 Variação do TS em função da frequência para os nove pontos medidos, juntamente com a variação média, no Teatro Sá de Miranda

7

COMPARAÇÃO COM TEATRO SEMELHANTE

7.1. INTRODUÇÃO

Para enquadrar o desempenho acústico do Teatro Sá de Miranda (TSM) realizou-se uma análise comparativa com outra dissertação que analisou os mesmos parâmetros noutra teatro semelhante em Portugal, o Teatro Nacional São João (TSJ) (Figura 7.1), localizado no Porto.[27] Os parâmetros que foram comparados são o Tempo de Reverberação (TR), o STI (*Speech Transmission Index*), a Claridade (C_{80}), a Definição (D_{50}) e o Tempo Central (TS).



Figura 7.1 Teatro Nacional São João, no Porto [20]

No que diz respeito à arquitetura, o teatro São João (Porto), conta, à semelhança do teatro Sá de Miranda com uma plateia em formato de ferradura, contudo a diferença de pé direito é bastante significativa o que, conseqüentemente, provoca uma diferença de volumes acentuada, contando o teatro da cidade invicta com um volume de aproximadamente 4500 m³.

7.2 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

No que diz respeito ao Tempo de Reverberação, os teatros apresentam valores com diferenças pouco significativas, como se pode observar pela Figura 7.2, que mostra as duas curvas de valores médios do tempo de reverberação.

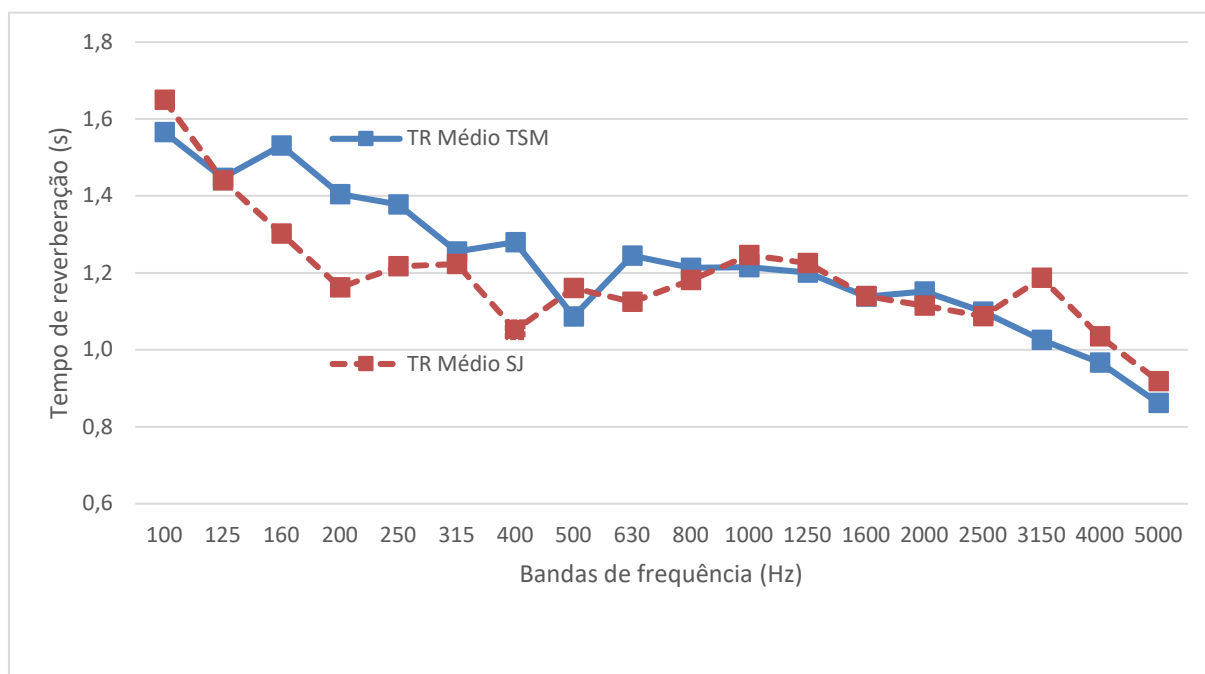


Figura 7.2 Curvas médias do Tempo de Reverberação dos teatros Sá de Miranda e São João [27]

7.3 STI (SPEECH TRANSMISSION INDEX)

No que diz respeito à inteligibilidade da palavra, comparou-se os valores médios mínimo e máximo do STI de cada um dos teatros (Quadro 7.1). Analisando os valores, conclui-se que ambos os teatros contam com valores de inteligibilidade da palavra fora do intervalo subjetivo *excelente* (0,75 a 1,0), sendo que o teatro de São João tem um valor médio de 0,55, enquanto o teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo) tem um valor médio de 0,53, ou seja, ambos os teatros estão no intervalo de valores “*Suficiente*”, na escala subjetiva de inteligibilidade da palavra.

Quadro 7.1 Valores mínimos e máximos de STI dos teatros Sá de Miranda (Viana do Castelo) e São João (Porto)

Teatro	STI mínimo	STI máximo	STI médio
Teatro São João (Porto) [27]	0,52	0,66	0,55
Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo)	0,46	0,71	0,53
$\Delta(\text{TSM} - \text{TSJ})$	-0,06	+0,05	-0,02

7.4 DEFINIÇÃO (D_{50}), CLARIDADE (C_{80}) E TEMPO CENTRAL (TS)

Na comparação dos parâmetros, D_{50} , C_{80} e TS sintetizou-se os valores médios das bandas de frequência [500;1000 Hz] no Quadro 7.2, onde se verifica que os melhores valores para teatro e ópera são, em todos os parâmetros, os do Teatro São João.

Para a Definição (D_{50}), ambos os teatros encontram-se na escala subjetiva “*Suficiente*” (de 0,39 a 0,67). No parâmetro da Claridade (C_{80}), ambos estão um pouco abaixo do limite mínimo de 6dB recomendado para teatro, embora o Teatro São João esteja bastante mais próximo desse valor. Já para Ópera, cujos valores recomendados são de 1 a 4, apenas o Teatro Sá de Miranda cumpre esse limite. No que diz respeito ao Tempo Central, quanto mais baixo o valor, melhor (para palavra), desde que não seja bastante baixo, algo que torna a acústica da sala “seca”. Sendo assim, o valor do Teatro de São João é um valor melhor que o do Teatro Sá de Miranda para o parâmetro do Tempo Central.

Quadro 7.2. Valores médios de D_{50} , C_{80} e TS para o Teatro Sá de Miranda e o Teatro São João

Teatro \ Parâmetro	Teatro Sá de Miranda [500;1000 Hz]	Teatro São João [27] [500;1000 Hz]
Definição (D_{50})	0,53	0,61
Claridade (C_{80})	3,4 dB	5,1 dB
Tempo Central (TS)	72 ms	60 ms

7.5 SÍNTESE

No Quadro 7.3 encontram-se todos os valores médios das frequências [500;1000 Hz] medidos em bandas de frequência de 1/1 oitava para os dois teatros em análise.

Quadro 7.3 Resumo de todos os valores médios do Teatro Sá de Miranda e do Teatro São João

Parâmetro	TR (s)	C80 (dB)	D50	TS (ms)	STI
Teatro	[500, 1k Hz]	[500, 1k Hz]	[500, 1k Hz]	[500, 1k Hz]	
Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo)	1,21	3,4	0,53	72	0,53
Teatro São João (Porto) [27]	1,17	5,1	0,61	60	0,55
Δ (TSM – TSJ)	+0,04	-1,7	-0,08	+12	-0,02
Δ (TSM – TSJ) Variação percentual (%)	+3	---	-15	+17	-4

8

CONCLUSÃO

8.1. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi caracterizar acusticamente a sala principal do Teatro Sá de Miranda em Viana do Castelo, recorrendo a seis parâmetros objetivos. Foram realizadas medições *in situ* no dia 26 de março de 2024. Os parâmetros acústicos em estudo nesta dissertação foram os seguintes:

- 1) Ruído de fundo, avaliado através do L_{eq} e L_{Aeq} ;
- 2) Inteligibilidade da palavra, avaliada através do STI;
- 3) Reverberação, avaliada através do TR;
- 4) Claridade, avaliada através do C_{80} ;
- 5) Definição, avaliada através do D_{50} ;
- 6) Tempo Central, avaliado através do TS.

Os valores obtidos para os parâmetros mencionados encontram-se no Quadro 8.1 e servem como compilação dos resultados dos testes desempenhados ao longo deste trabalho.

Analisando o Quadro 8.1 pode-se então concluir que o Teatro Sá de Miranda, com o sistema de ventilação desligado apresenta um ruído de fundo adequado (26 dBA), já que o limite máximo definido regulamentarmente é de 30 dBA. Contudo, quando o sistema de ventilação se encontra em funcionamento, apenas aplicando a Incerteza de 3 dB, prevista regulamentarmente, é que a sala “cumpre” os requisitos para o ruído de fundo.

Ao avaliar o STI, obteve-se o valor médio de 0,53. Assim, o Teatro Sá de Miranda classifica-se, segundo a escala subjetiva de inteligibilidade da palavra, como "*Suficiente*".

Relativamente ao Tempo de Reverberação (TR), o Teatro Sá de Miranda obteve um valor médio de 1,2 s, que está bastante próximo do intervalo recomendado de 1,3 a 1,7 s para Ópera e, embora não tanto para Teatro, de 0,7 a 0,9 s (como referido no capítulo “Estado da Arte” no Quadro 3.2).

Analisando o valor de 3,4 dB obtido para a Claridade (C_{80}), conclui-se que para Ópera é um valor ótimo, situado no intervalo recomendado de 1 até 4 dB, enquanto para Teatro se trata de um valor aquém do ideal que seria superior a 6 dB.

No que diz respeito à Definição (D_{50}), o Teatro Sá de Miranda obteve o valor de 0,53 que se encontra na escala subjetiva “Suficiente”, cujo intervalo é de 0,39 a 0,67.

Quadro 8.1 Síntese dos valores obtidos para o Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo)

Parâmetros	Valores obtidos
Ruído de fundo (L_{eq}/L_{Aeq})	53/26 dB (sem ventilação)
	59/32 dB (com ventilação)
Inteligibilidade da palavra (STI)	0,53
Tempo de reverberação (TR [500, 1k Hz])	1,2/1,1 s (sem ocupação / com ocupação)
Claridade (C_{80} [500, 1k Hz])	3,4 dB
Definição (D_{50} [500, 1k Hz])	0,53
Tempo Central (TS [500, 1k Hz])	72 ms

Desde logo, todos os parâmetros estudados ao longo do trabalho, tratam-se de parâmetros objetivos. Assim, optou-se também por incluir a opinião subjetiva do autor que, recorrendo à ajuda de técnicos presentes no dia das medições que se iam sentando em diversos locais diferentes, constatou-se que a comunicação com os mesmos era bastante perceptível. No que diz respeito ao ruído de fundo, por vezes era possível ouvir algumas ambulâncias que passavam numa rua exterior e era facilmente audível essa passagem do veículo de emergência. Contudo outros veículos ligeiros já não eram audíveis. Para além disso, aquando da ativação do sistema de ventilação, este também era facilmente audível na zona da plateia, contudo para o desempenho acústico durante os espetáculos, este aspeto é irrelevante, dado que o sistema de ventilação se encontra sempre desligado durante atuações, como salientado pelos técnicos do Teatro Sá de Miranda.

8.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Quanto a possíveis desenvolvimentos futuros, de forma a desenvolver este estudo, seria relevante analisar outros parâmetros complementares, tal como o EDT (*Early Decay Time*), dado que alguns problemas comuns em salas de espetáculos podem surgir devido a valores inadequados do EDT, nomeadamente nos assentos do meio, que geralmente necessitam de intervenções para melhorar a qualidade acústica nesses lugares. De forma a melhorar a acústica do espaço, poderia ser interessante aplicar a refletometria, incluindo o uso de superfícies refletoras no teto ou na parede.

Para além disso, e concluindo, a única componente de opinião subjetiva foi a fornecida pelo autor, pelo que também seria pertinente fazer um estudo subjetivo englobando uma amostra maior de pessoas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, A.P.O. *Acústica Ambiental e de Edifícios*. FEUP, 2022.
- [2] *Propagação do som*. <https://www.fq.pt/som/propagacao-do-som>, acessido em fevereiro de 2024.
- [3] Spada, A.L. *O ouvido humano*. <https://www.attack.com.br/repositorio/artigos-tecnicos/o-ouvido-humano.pdf>, acessido em 5 de fevereiro de 2024.
- [4] *Ruído Laboral: Parâmetros de Descrição do Som*. <https://www.apopartner.pt/ruído-laboral-parametros-de-descricao-do-som/>, acessido em 5 de fevereiro de 2024.
- [5] Barron, M., *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Spon Press Londres e Nova Iorque, 2010.
- [6] *Sons Aéreos e de Percussão* - <https://www.imperialum.com/plataforma-imperialum/solucoes-imperialum-2/solucoes-de-isolamento-acustico/sons-aereos-e-de-percussao/> acessido em 7 de fevereiro de 2024
- [7] Loureiro, J.P.G. *Metodologia Multi-Critério para Análise da Qualidade Acústica em Igrejas*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 2008.
- [8] *Rácio de Baixos* https://www.concerthalls.org/?page_id=90, acessido em 7 de fevereiro de 2024.
- [9] Ortolan, Edson Tadeu. *História do teatro*. Clube de Autores, 2020.
- [10] *Teatro de Dionísio* <https://abrasoffa.org.br/pontos-turisticos/teatro-de-dionisio/>, acessido em 14 de março de 2024.
- [11] Kothe, Flávio R. *Vitrúvio revisto*. Revista Estética e Semiótica 6.1, 2016.
- [12] *Teatro de Aspendos*, <https://www.trt.net.tr/portuguese/programas/2021/01/27/a-antiga-cidade-de-aspendos-que-faz-historia-tanto-com-seu-aqueduto-como-com-o-seu-teatro-1571692>, acessido em 14 de março de 2024.
- [13] Long, Marshall. *Architectural acoustics*. Elsevier, 2005.
- [14] *Farnese Theatre* <https://complessopilotta.it/en/the-farnese-theatre/>, acessido em 14 de março de 2024.

- [15] Figueiredo, F. L.. *Parâmetros acústicos subjetivos: critérios para avaliação da qualidade acústica de salas de música*. Dissertação de Mestrado em Musicologia, Universidade de São Paulo, 2005.
- [16] Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), DL 95/2019, 18 de julho de 2019.
- [17] *Curvas de incomodidade* <https://www.buildingcalculators.com/nc-level-nr-level-calculator>, acessido em 20 de março de 2024.
- [18] Kuttruff, Heinrich *Room acoustics*.—4ª edição, Spon Press, Londres, 2000.
- [19] Marshall LG. *An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio*. Journal of the Acoustical Society of America, 96 (1994) 2251-2261.
- [20] Teatro de São João no Porto https://www.porto.pt/_next/image?url=https%3A%2F%2Fmedia.porto.pt%2Foriginal_images%2FJC_Dia_Centros_Historicos_09.jpg&w=1460&q=85, acessido em 27 de abril de 2024.
- [21] EN ISO 11654 *Acoustics — Sound absorbers for use in buildings — Rating of sound absorption*, acessido em 6 de abril de 2024.
- [22] *Medição do tempo de reverberação* <https://www.nti-audio.com/pt/aplicacoes/acustica-de-salas-e-edificios/tempo-de-reverberacao-medicao>, acessido em 6 de abril de 2024.
- [23] *Vista satélite do Teatro Sá de Miranda* <https://www.google.pt/maps/preview>, acessido em 5 de abril de 2024.
- [24] *Plantas do Teatro Sá de Miranda* <https://tmsm.pt/>, acessido em 1 de abril de 2024.
- [25] *Measurement of room acoustic parameters* EN ISO 3382-1, acessido em 17 de abril de 2024.
- [26] *Curvas de incomodidade* <https://noisetools.net/dbmacros>, acessido em 17 de abril de 2024.
- [27] Mocarzel, Hannah *Caracterização Acústica do Teatro Nacional São João (Porto)*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 2024.
- [28] *Rácio de baixos* <https://www.prosoundtraining.com/2019/09/27/rt-versus-frequency-is-there-an-ideal-target/>, acessido a 24 de maio de 2024.