

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DO AUDITÓRIO MUNICIPAL DE VILA NOVA DE GAIA

ANDRÉ JOSÉ QUEIRÓS HIRAYAMA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL – ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES CIVIS

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2023

AGRADECIMENTOS

Na conclusão deste trabalho, manifesto o meu carinho por todos aqueles que possibilitaram a realização do mesmo.

Em especial, agradeço ao meu orientador Prof. Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, que para além de ser bastante paciente e um ótimo profissional, é organizado e bastante competente na forma como orienta e explica os procedimentos.

Agradeço também ao Engenheiro António Eduardo Batista da Costa, pela ajuda e contribuição na execução dos ensaios no Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia, assim como na ajuda e apoio no presente trabalho.

Referente à minha família, agradeço a eles todos por todo o suporte e motivação, não só nesta dissertação, mas também ao longo do meu percurso académico.

Os meus amigos mais próximos, que, de certa forma, sempre me apoiaram em todas as condicionantes para a realização de um melhor trabalho.

RESUMO

A presente dissertação tem como intuito a caracterização acústica do Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia.

O Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia foi usado como caso de estudo. É uma sala para variadas funcionalidades. É alvo de variados espetáculos, sendo o maior foco na inteligibilidade da palavra, cinemas e música, portanto, será de elevada importância que as características e disposição dos materiais de absorção sonora e da sua reverberação, sirvam de isolamento acústico em relação aos espaços exteriores.

Iniciando este trabalho, é feito um enquadramento histórico de Acústica, seguido de uma descrição de alguns conceitos teóricos que serão necessários para compreensão da temática da tese.

Vários autores indicam valores recomendados para este tipo de caracterizações no sentido de melhorar os parâmetros acústicos. Estes valores foram conseguidos após várias experiências e erros, sucessivamente, realizados no projeto dos mesmos.

Utilizando certos parâmetros acústicos, como o tempo de reverberação, o nível de pressão sonora do ruído de fundo e o RASTI foi possível realizar a caracterização acústica. O nível de pressão sonora do ruído de fundo foi avaliado com o sistema de climatização ligado e desligado, a fim de determinar se alguma delas causa desconforto aos usuários. Em relação à inteligibilidade da palavra, o parâmetro RASTI foi analisado em várias disposições, com o objetivo de avaliar o efeito dos sistemas de amplificação sonora existentes no local. Com base no diagnóstico da condição acústica do auditório, são aconselhadas algumas propostas de melhoria para alcançar um melhor desempenho acústico do espaço.

Desta forma, consegue-se analisar da melhor forma se o espaço em causa possuirá as condições adequadas para as funcionalidades.

No final, alguns temas de ampliação desta temática são aconselhados para futuros desenvolvimentos a aplicar nas salas de espetáculos, tendo em conta as conclusões retiradas da análise comparativa dos valores obtidos.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Salas de Espetáculo, Absorção, Reverberação, RASTI, Auditórios.

ABSTRACT

This dissertation aims at the acoustic characterization of the Municipal Auditorium of Vila Nova de Gaia.

Municipal Auditorium of Vila Nova de Gaia. was used as a case study. It is a room for multiple functions. It is the target of several shows, with the focus being the intelligibility of speech, cinema and music, so it will be of great importance that the characteristics and disposition of the sound absorption materials and their reverberation, serve as acoustic insulation in relation to the external spaces.

From this work a historical framework of Acoustics is made, followed by a description of some theoretical concepts that will be necessary for the understanding of the theme of the thesis.

It was recognized, the history of acoustics and knowledge in concert halls in recent centuries.

Several authors indicate recommended values for this type of division in order to improve the acoustic parameters. These values were reached after several experiments and errors, successively, made in its design.

Instead of in situ measurements, measurements were made to characterize the auditorium under study, using some acoustic parameters, such as reverberation time, background noise sound pressure level and RASTI. The sound pressure level of background noise was evaluated with the air conditioning system on and off, in order to verify if any of them cause discomfort to users. As for the intelligibility of the word, the RASTI parameter was analyzed in several dispositions, with the objective of evaluating the effect of the sound amplification systems existing in the place. Based on the diagnosis of the acoustic state of the auditorium, some improvement proposals were made for a better acoustic performance of the space.

In this way, we will be able to better analyze whether the space in question will have the appropriate conditions for the functionalities.

At the end, some topics are suggested for extending this thesis to future developments to be applied in concert halls, taking into account the conclusions drawn from the comparative analysis of the values obtained.

KEYWORDS: Acoustics, Concert Halls, Absorption, Reverberation, RASTI, Auditoriums.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	xv
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xvii

1. INTRODUÇÃO

1

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS	1
---	---

1.2. ESTRUTURA DA TESE	1
-------------------------------------	---

2. CONCEITOS ACÚSTICOS

3

2.1. INTRODUÇÃO	3
------------------------------	---

2.2. PROPRIEDADES DO SOM	3
---------------------------------------	---

2.3. REFLEXÕES	9
-----------------------------	---

2.4. ABSORÇÃO SONORA	11
-----------------------------------	----

2.4.1. GENERALIDADES	11
----------------------------	----

2.4.2. MATERIAIS E SISTEMAS DE ABSORÇÃO SONOROS	13
---	----

2.5. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	14
---	----

2.5.1. PRINCÍPIOS GERAIS	14
--------------------------------	----

2.5.2. TEMPO DE DECAIMENTO CURTO (EDT)	16
--	----

2.5.3. RÁCIOS DE BAIXOS (TR)	16
------------------------------------	----

2.6. ISOLAMENTO SONORO	17
-------------------------------------	----

2.6.1. GENERALIDADES	17
----------------------------	----

2.6.2. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS	18
--	----

2.6.3. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO	19
--	----

2.7. RUÍDO DE FUNDO E INCOMODIDADE	19
---	----

2.8. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	22
---	----

2.8.1. ABORDAGEM GERAL	22
------------------------------	----

2.8.2. CARACTERÍSTICAS DA EMISSÃO DA VOZ	22
--	----

2.8.3. RELAÇÃO ENTRE TEMPO DE REVERBERAÇÃO E INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	23
---	----

2.8.4. RELAÇÃO ENTRE SINAL/RUÍDO E INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	23
2.8.5. PARÂMETROS DE MEDIDA – RASTI	23
2.9. PARÂMETROS ACÚSTICOS ENERGÉTICOS	25
2.9.1. CLARIDADE (C80)	25
2.9.2. DEFINIÇÃO (D50)	25
2.9.3. TEMPO CENTRAL (TS)	26
 3. ACÚSTICA DE SALAS DE ESPETÁCULOS	 27
3.1. A ORIGEM DA SALA DE ESPETÁCULO	27
3.2. ESTADO ATUAL DA ACÚSTICA DE SALAS DE ESPETÁCULOS	30
3.3. SALAS DE ESPETÁCULOS E SUAS EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS	32
3.3.1. SALAS DE ESPETÁCULOS PARA PALAVRA	32
3.3.2. SALAS DE ESPETÁCULOS PARA TEATRO	33
3.3.3. SALAS DE ESPETÁCULOS PARA MÚSICA	34
 4. ESTUDO DE CASO	 36
4.1. AUDITÓRIO MUNICIPAL DE VILA NOVA DE GAIA	36
4.1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	36
4.1.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E ARQUITETÓNICA	39
4.2. METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS	40
4.2.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS MEDIDOS	40
4.2.2. EQUIPAMENTO UTILIZADO	42
4.2.3. METODOLOGIA DO TRABALHO	44
4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS	47
4.3.1. PREÂMBULO	47
4.3.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	47
4.3.3. TIPOS DE RUÍDO	50
4.3.3.1. Ruído de Fundo	50
4.3.3.2. Ruído de Equipamentos – Sistema de Climatização (AVAC)	52
4.3.3.3. Curvas de Incomodidade	54
4.3.4. RASTI	57
4.3.4.1. Preâmbulo	57

4.3.4.2. RASTI sem o sistema de climatização ligado (AVAC).....	57
4.3.4.3. RASTI com o sistema de climatização ligado (AVAC)	58
4.3.4.4. Conclusões.....	58

5. COMPARAÇÃO COM OUTRAS SALAS

62

5.1. INTRODUÇÃO.....	62
----------------------	----

5.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	62
----------------------------------	----

5.3. RUÍDO DE FUNDO	63
---------------------------	----

5.4. RASTI.....	64
-----------------	----

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

66

6.1. CONCLUSÕES.....	66
----------------------	----

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	67
-------------------------------------	----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....

69

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Propagação da onda sonora (analogia a 2D)	3
Fig. 2.2 – Propagação das Ondas (Adaptado de [3])	4
Fig. 2.3 - Propagação do som no ar (a energia é distribuída ao longo de superfícies esféricas) [20]	5
Fig. 2.4 – Propagação Diagrama de audibilidade (valores de intensidade sonora e de frequência, normalmente audíveis (voz, música, etc.) e não audíveis) [3]	8
Fig. 2.5 – Curvas de ponderação	9
Fig. 2.6 – Reflexão de ondas sonoras [21]	9
Fig. 2.7 – Resposta ao impulso com um eco [4]	10
Fig. 2.8 - Eco do som com origem de fonte sonora do palco [9]	11
Fig. 2.9 – Propagação Diagrama de audibilidade (valores de intensidade sonora e de frequência, normalmente audíveis (voz, música, etc.) e não audíveis) [3]	11
Fig. 2.10 – <i>Esquema do tubo de ondas estacionárias</i> [11]	12
Fig. 2.11 – Câmara anecoica [12]	13
Fig. 2.12 – Coeficientes de absorção de material poroso e de painéis absorventes em função da frequência [5]	13
Fig. 2.13 – Lã de rocha (fibras de minerais) [13]	14
Fig. 2.14 - Definição do tempo de reverberação com uma amostra decair. A inclinação do decaimento é, na prática, medida entre -5 dB e -35 dB do nível inicial [5]	14
Fig. 2.15 – Tempos de reverberação em função do uso [15]	15
Fig. 2.16 – Via direta e via marginal de transmissão de ruído [22]	18
Fig. 2.17 - Curvas para determinação do parâmetro NR [29]	21
Fig. 3.1 – Teatro de Dionísio em Acropólis	28
Fig. 3.2 – Planta Teatro Romano [36]	29
Fig. 3.3 – Ópera de Viena [42]	30
Fig. 3.4 – Reflexão Acústica de Ondas Sonoras usando Painéis Difusores [44]	31
Fig. 3.5 – Reflexões Acústicas: Direta, Parede do Palco, Parede Lateral e Teto [44]	31
Fig. 4.1 – - Localização do Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia	36
Fig. 4.2 – Sala de espetáculos do Auditório Municipal de Gaia (foto do autor)	37
Fig. 4.3 – Planta do Auditório Municipal de Gaia (fornecido pela empresa INACOUSTICS - Engenharia Acústica, Vibrações e Ambiente Lda.)	38
Fig. 4.4 – Reflexões Acústicas: Direta, Parede do Palco, Parede Lateral e Teto [44]	38
Fig. 4.5 e 4.6 – Cadeiras da sala de espetáculo da marca FIGUEIRAS (fotos do autor)	39
Fig. 4.7 e 4.8 – Sala de espetáculos do Auditório Municipal de Gaia (foto do autor)	39

Fig. 4.9 e 4.10 – Parede em Painéis TOPAKUSTIK em Nogueira com ranhuras interrompidas no topo (fotos do autor)	40
Fig. 4.11 e 4.12 – Reflexões Acústicas: Direta, Parede do Palco, Parede Lateral e Teto [44]	41
Fig. 4.13 – Fonte sonora Brüel & Kjær, modelo 4224 (foto do autor)	42
Fig. 4.14 e 4.15 – Parede em Painéis TOPAKUSTIK em Nogueira com ranhuras interrompidas no topo (fotos do autor)	43
Fig. 4.16 – Tripé portátil Brüel & Kjær, modelo UA0049.....	43
Fig. 4.17 – Planta do auditório com a localização dos três pontos de medição do tempo de reverberação e fonte sonora (FS) [adaptado da figura 4.3]	44
Fig. 4.18 – -- Planta do auditório com a localização dos dois pontos de medição nível de pressão sonora do ruído de fundo e dos equipamentos de climatização (AVAC) e fonte sonora (FS) [adaptado da figura 4.3].....	45
Fig. 4.19 – Planta do auditório com a localização dos 10 pontos de medição do RASTI e fonte sonora (FS) [adaptado da figura 4.3]	46
Fig. 4.20 – Tempo de reverberação médio, em três pontos de medição diferentes, por bandas de frequência de oitava.....	48
Fig. 4.21 – Esquema dos tempos de reverberação regulamentar, aplicado para o auditório em causa e valores ideais	48
Fig. 4.22 – Níveis de pressão sonora do ruído de fundo, em dB, por banda de frequência de oitava, dos 31 Hz a 16000 Hz, nos dois pontos de medição	51
Fig. 4.23 – Variação dos níveis de pressão sonora, LAeq, em dB, por banda de frequência de oitava, dos 31 Hz a 16000 Hz, nos dois pontos de medição	52
Fig. 4.24 – Curvas da média dos níveis de pressão sonora do ruído AVAC nos dois pontos de medição, sem e com ponderação do Filtro A	53
Fig. 4.25 – Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo nos dois pontos com as curvas NR	54
Fig. 4.26 – Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo nos dois pontos com as curvas NC	55
Fig. 4.27 – Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de equipamentos de AVAC nos dois pontos com as curvas NC.....	55
Fig. 4.28 – Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de equipamentos de AVAC nos dois pontos com as curvas NR.....	56
Fig. 4.29 – Curvas das médias das medições do RASTI nos pontos correspondentes: Sem AVAC ligado (linha azul) e com AVAC ligado (linha laranja)	59
Fig. 4.30 – Variação do RASTI com a distância à fonte sonora, nos pontos 1,3,5,7 e 9 (zona central).....	60
Fig. 4.31 – Variação do RASTI com a distância à fonte sonora, nos pontos 2,4,6 e 8 (zona lateral).....	61
Fig. 5.2.1 – Tempo de reverberação para as bandas de frequência de oitava	62

Fig. 5.2.2 – Comparação do tempo de reverberação médio para as bandas de frequência de 1/1 oitava entre os 500 e os 2.000 Hz em relação com o volume das salas	63
Fig. 5.3.1 – Valores de medições médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) por bandas de frequência de oitava, dos 16 aos 8000 Hz (AVAC desligado)	63
Fig. 5.3.2 – Valores de medições médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) por bandas de frequência de oitava, dos 16 aos 8000 Hz (AVAC desligado)	63
Fig. 5.4.1 – Valor médio do parâmetro RASTI nas salas referidas em relação com a média energética do L_{Aeq}	64
Fig. 5.4.2 – Valor médio do parâmetro RASTI nas salas referidas em relação com o tempo de reverberação médio das frequências 500 a 2000 Hz.....	65

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Limiares de audição.....	6
Quadro 2.2 – Frequência central com os limites das bandas de frequência de terços de oitava e de oitava.....	7
Quadro 2.3 - Valores numéricos (dB) das ponderações da curva A para bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava na gama do audível [1].....	7
Quadro 2.4 – Valores de BR e TR [18]	17
Quadro 2.5 – Na avaliação de ambientes acústicos, valores máximos de indicador NC (adaptado de [28])	21
Quadro 2.6 – Valores máximos do parâmetro NR para ruído de fundo [4].....	9
Quadro 2.7 – Resposta ao impulso com um eco [4]	10
Quadro 2.8 - Relação qualificada dos valores do RASTI [1]	24
Quadro 2.9 – Valores característicos de C80 [30].....	25
Quadro 3.1 – <i>Valores ideais para o Tempo de reverberação de espaços dedicados à palavra [45]</i>	33
Quadro 3.2 – Valores máximo ideias de NR [4] e NC [26].....	33
Quadro 3.3 – Valores ideais para tempo de reverberação em espaços de teatro [46]	34
Quadro 4.1 – Medição do tempo de reverberação médio, em três pontos de medição diferentes, por bandas de frequência de oitava.....	47
Quadro 4.2 - Comparação dos valores ideais do tempo de reverberação (500 – 1000 Hz) em função do tipo de utilização [46] com o valor obtido no auditório de Gaia (0,80 s)	49
Quadro 4.3 – Comparação dos valores ideais do tempo de reverberação (500 – 1000 Hz) em função do tipo de utilização [1] com o valor obtido no auditório de Gaia (0,8 s)	50
Quadro 4.4 – Níveis de pressão sonora do ruído de fundo, em dB, em cada ponto de medição, para as bandas de frequência dos 16 a 16000 Hz, e nível sonoro equivalente, sem e com filtro A.....	51
Quadro 4.5 – Níveis de pressão sonora do ruído de AVAC, em dB, em cada ponto de medição, para as bandas de frequência dos 16 a 16000 Hz, e nível sonoro equivalente, sem e com filtro A.....	53
Quadro 4.6 - Variação dos níveis de pressão sonora do ruído, L e LA, correspondente à introdução do sistema AVAC	53
Quadro 4.7 – Valores dos parâmetros NC e NR para as diferentes medições efetuadas...	56
Quadro 4.8 – Valores máximos recomendados dos níveis de NC e NR [4], [6] e [47]	57
Quadro 4.9 - Valores de RASTI, sem o equipamento de climatização ligado (AVAC)	58
Quadro 4.10 - Valores de RASTI, com o equipamento de climatização ligado (AVAC).....	59
Quadro 6.1 - Resumo dos principais parâmetros acústicos do Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia	67

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α – Coeficiente de absorção sonora

δ – Coeficiente de transmissão sonora

A – Absorção sonora equivalente [m^2]

AVAC – Sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado

AS – Amplificação sonora

BR – *Bass ratio*

C_t – Claridade [dB]

D – Isolamento sonoro bruto a ruídos de condução aérea [dB]

D_{50} – Definição (50ms) [dB]

$D_{nT,w}$ – Índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado [dB]

EDT – *Early decay time*

I – Intensidade sonora (W/m^2)

I_0 – Intensidade sonora de referência [$10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$]

L_e – Nível de pressão sonora no espaço emissor [dB]

L_r – Nível de pressão sonora no espaço recetor [dB]

L_A – Nível sonoro contínuo equivalente do equipamento, medido durante um intervalo de tempo específico no compartimento recetor (com um tempo de reverberação T)

$L_{ar,nT}$ – Nível de avaliação do ruído particular de equipamentos [dB]

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

L'_{nT} – Nível de pressão sonora padronizado [dB/oit]

L_i – Nível de pressão sonora média no compartimento recetor [dB/oit]

L_I – Nível de intensidade sonora [dB]

L_p – Nível de pressão sonora [dB]

L_W – Nível de potência sonora [dB]

NC – *Noise Criteria*

NCB – *Balanced Noise Criteria*

NR – *Noise Rating*

p – Pressão Sonora [Pa]

p_0 – Pressão sonora de referência [$2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$]

r – Distância [m]

R – Redução sonora [dB]

RASTI – *Rapid Speech Transmission Index*

RC – *Room Criteria*

S – Superfície real do material [m^2]

S/N – Relação sinal/ruído

STI – *Speech Transmission Index*

T_0 – Tempo de reverberação de referência [0,5 s]

TR – Tempo de reverberação [s]

TS – Tempo central [ms]

V – Volume [m^3]

W – Potência sonora [W]

W_0 – Potência sonora de referência [10^{-12}]

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

Ao longo dos tempos, o ser humano foi compreendendo a importância da acústica, especialmente, em salas de espetáculos. Neste caso em estudo, um auditório, onde se realizam também espetáculos, conferências, peças de teatro, música e até palestras, é de máxima importância para a audiência ouvir, claramente, as palavras que estão a ser ditas.

No tempo mais antigo, o objetivo das salas de espetáculos era apenas dirigido à eficiência acústica. Por essa razão, algumas das melhores salas de espetáculos têm milhares de anos.

O foco, na antiguidade mais recente, por parte dos arquitetos, seria mais para a estética e *design* do interior da sala, não prestando qualquer relevância a uma intervenção acústica, por falta de conhecimento. Daí ter surgido o tema da Acústica Arquitetónica, no interesse de ambas acústica e arquitetura, puderem coexistir.

Felizmente, atualmente, a Acústica já é uma exigência e necessidade para o bom funcionamento de qualquer sala de espetáculo ou auditório, daí a maior parte destas salas puderem ser ótimas acusticamente para qualquer tipo de comunicação a uma audiência.

É de máxima importância que o tempo de reverberação e outros parâmetros sejam adequados.

Tendo estes conceitos em consideração, o objetivo essencial desta dissertação é caracterizar acusticamente salas de espetáculo, neste caso, vai ser caso de estudo o Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia.

Para tal, vão ser realizadas algumas medições *in situ* para obter diferentes parâmetros acústicos. Os parâmetros a serem analisados serão o tempo de reverberação (TR), *Rapid Speech Transmission Index* (RASTI) e o nível de pressão sonora do ruído de fundo.

Desta forma, consegue-se no final, após análise, determinar a qualidade acústica do auditório.

1.2. ESTRUTURA

Este trabalho encontra-se dividida em seis capítulos.

No primeiro capítulo, “Introdução”, faz-se uma breve abordagem ao tema, realizando-se um enquadramento do tema do trabalho, apresentando-se os objetivos e explicação da estrutura.

No segundo capítulo, “Conceitos Acústicos”, são abordados conceitos básicos de acústica que foram aprofundados na elaboração da tese e que, realmente, serão bastante relevantes para a compreensão destes conteúdos.

No terceiro capítulo, “Acústica de Salas de Espetáculos”, dispõe da história que deu origem às salas de espetáculos e apresenta-se diferentes tipos das mesmas, em termos de funcionalidades e características.

No quarto capítulo, “Estudo de Caso”, apresenta-se a sala em estudo, neste caso, o Auditório da FEUP, sendo feito um enquadramento geral e uma caracterização a nível geométrico e arquitetónico.

No quinto capítulo, “Comparação com outras salas de espetáculo”, são comparados alguns dos resultados obtidos, a fim de retirar mais algumas conclusões.

No sexto capítulo, “Conclusões e Desenvolvimentos Futuros”, após análise, expõe-se as conclusões a retirar de todo o trabalho realizado na dissertação, mediante os valores obtidos e comparados. São propostos, também, estudos a realizar em futuro, de maneira a dar desenvolvimento ou a, de certa forma, completar o tema desenvolvido.

2

CONCEITOS ACÚSTICOS

2.1. INTRODUÇÃO

No sentido de melhor compreender os temas que irão ser apresentados no decorrer desta tese, é necessário reter alguns dos conceitos mais básicos da acústica, nomeadamente, as propriedades do som (frequência, tempo e pressão), e como estes se propagam.

2.2. PROPRIEDADES DO SOM

O som é uma onda mecânica em movimento, que se propaga em um meio sob a forma de ondas esféricas concêntricas [1].

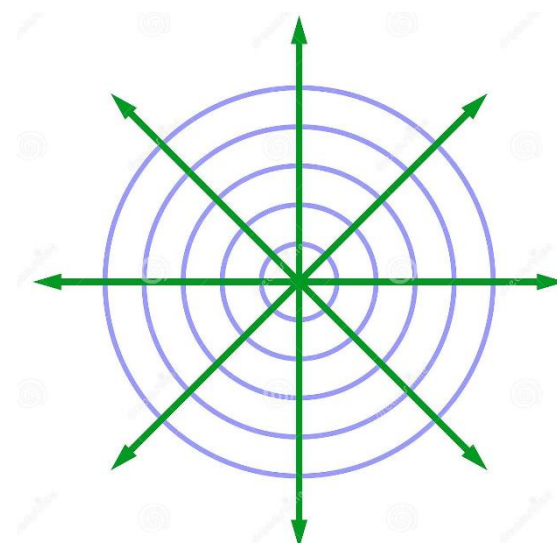


Figura 2.1 - Propagação de uma Onda Sonora (Analogia a 2D)
[19]

Para garantir a transmissão acústica, três elementos fundamentais são necessários: um ou vários emissores ou fontes, um recetor e um meio de propagação. O princípio da transmissão baseia-se na existência de “partículas” cuja posição no equilíbrio pode ser modificada [2].

Como mostrado na figura 2.1, a passagem de uma onda sonora causa partículas de ar mover-se para frente e para trás paralelamente à direção do movimento da onda. As ondas sonoras são, portanto, longitudinais, ao invés de transversais como ondas que se propagam ao longo de uma corda, na qual se movem em ângulos retos com a direção do aceno. Para uma onda sonora, o movimento do ar partículas causam áreas localizadas de compressão ou rarefação;

compressão implica uma pressão mais alta, rarefação para um inferior. Regiões de compressão (e rarefação) viajam a uma velocidade fixa, a velocidade de som, que a 20°C é 343 m/s [3].

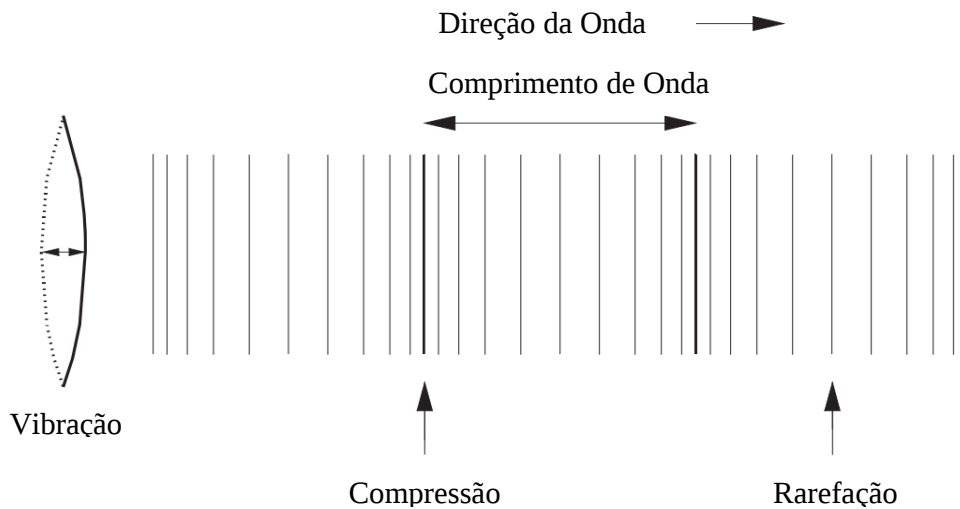


Figura 2.2 - Propagação das Ondas (Adaptado de [3])

A amplitude de uma onda sonora é determinada pela magnitude da flutuação de pressão.

Mas a gama de pressões a que ouvidos podem responder excede uma proporção de um para um milhão e a resposta não é linear. Daí o onipresente decibel, chamado depois de Alexander Bell (1847-1922). Existem dois aspetos principais do decibel: é uma medida de razão de energias e é logarítmico.

O decibel pode ser usado de duas maneiras: para medir diferenças ou para medir amplitudes sonoras (ou outras). Em ambos os casos, a escolha de um logarítmico escala supera o problema de grandes números.

A **intensidade sonora** (I), numa dada direção, traduz a quantidade média de energia que atravessa por segunda uma área de 1 m², perpendicular a essa direção e quantifica-se em W/m².

Em relação à **potência sonora** (W), sendo uma característica da fonte e não do estímulo produzido num dado ponto por essa fonte, é a energia total que num segundo atravessa uma esfera fictícia de raio qualquer centrada na fonte sonora, o qual é dado em watt (W).

As grandezas de intensidade sonora, potência sonora e **pressão sonora** (p), relacionam-se entre si através da seguinte expressão 2.1 [1].

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c} \quad (2.1)$$

Em que:

- I - Intensidade sonora (W/m²);
- W - Potencia sonora (W);

- r - Distância (m);
- p - Pressão sonora (Pa);
- ρ - Massa volúmica do meio envolvente (ar) $\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$;
- c - Celeridade (m/s).
-

No caso de uma fonte sonora se encontrar no exterior, a propagação da energia acústica no espaço livre, no decorrer de uma superfície esférica (Fig. 2.3).

Se se duplicar a distância à fonte, verifica-se um decaimento de 6 dB [5].

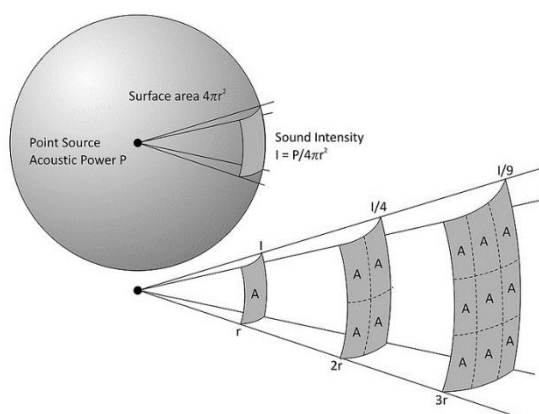


Figura 2.3 - Propagação do som no ar (a energia é distribuída ao longo de superfícies esféricas) [20]

A **frequência** (f), sendo a segunda característica mais importante a seguir à pressão sonora quando se pretende descrever um sinal sonoro, é medida em hertz (Hz).

Os sons “emitem” frequências e, a maior parte das vezes, é distinguível um som, pela diferença de frequência que emite. No caso de um som, ser composto por apenas uma frequência, trata-se de um som puro. Já os sons que são, comumente, ouvidos no dia-a-dia em geral, como música, um ruído ou até o falar de uma palavra ou frase, trata-se de sons complexos, resultantes da sobreposição de dois ou mais sons puros [1].

Na Acústica de Edifícios é distinguível três zonas de frequências:

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

Em relação a **níveis**, a pressão sonora torna-se o aspeto limitativo para a gama audível. Onde os limites inferiores e superiores representam, respetivamente, os limiares da audição e da dor.

O **decibel** (dB) é a unidade dos níveis, em escala logarítmica, correspondendo a 1/10 do *bel*, a qual denominação foi atribuída em honra ao cientista Alexander Graham Bell [1].

A fórmula 2.2, representa a conversão de pressões (p) para níveis de pressão sonora (L_p) [1]:

$$L_p = 10 \times \log \frac{p^2}{p_o^2} = 20 \times \log \frac{p}{p_o} \quad (2.2)$$

Em que:

- p - Pressão sonora (Pa);
- p_o – Pressão sonora de referência (2×10^{-5} Pa).

O valor mínimo de pressão que o ouvido humano consegue ouvir é de cerca de 10^{-5} Pa, sendo o máximo de aproximadamente 100 Pa.

De forma a transformar intensidades (I) em níveis de intensidade sonora (L_I), utiliza-se:

$$L_I = 10 \times \log \frac{I}{I_o} \quad (2.3)$$

Onde:

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

Para se converter potências (W) em níveis de potência sonora (L_w), usa-se:

$$L_w = 10 \times \log \frac{W}{W_o} \quad (2.4)$$

Quadro 2.1 - Limiares de audição

Limiar	Intensidade Sonora (W/m^2)	Nível de intensidade sonora (dB)	Pressão sonora (Pa)	Nível de pressão sonora (dB)
da Audição	$I = 10^{-12}$	$L_I = 0$	$p = 10^{-5}$	$L_p = 14$
da Dor	$I \approx 1$	$L_I \approx 120$	$p = 100$	$L_p = 134$

A adição de níveis, é realizada da seguinte forma, no caso de ser um conjunto de duas ou mais fontes sonoras:

$$L_{soma} = 10 \times \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (2.5)$$

Separam-se os ruídos em agrupamentos de frequências denominados de “bandas” de frequência correspondentes a intervalos de frequência de certa dimensão normalizada, pois a análise detalhada singular de centenas ou milhares de frequências seria demasiado trabalhoso [1].

O valor médio (f_0) de cada banda corresponde à frequência central:

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

A largura da banda (B) é conseguida através da diferença entre o limite superior e inferior dessa mesma banda. Apesar de existirem diversas bandas de frequência, para acústica de edifícios apenas irão ser utilizadas as bandas de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava [1].

$$B = f_2 - f_1 \quad (2.7)$$

Quadro 2.2 – Frequência central com os limites das bandas de frequência de terços de oitava e de oitava

Frequência Central (Hz)	Banda de terços de oitava (Hz)	Bandas de oitava (Hz)
100	89,1-112	89,1-178
125	112-141	
160	141-178	
200	178-224	178-355
250	224-282	
315	282-355	
400	355-447	355-708
500	447-562	
630	562-708	
800	708-891	708-1.410
1.000	891-1.120	
1.250	1.120-1.410	
1.600	1.410-1.780	1.410-2.820
2.000	1.780-2.240	
2.500	2.240-2.820	
3.150	2.820-3.550	2.820-5.620
4.000	3.550-4.470	
5.000	4.470-5.620	

Quadro 2.3 - Valores numéricos (dB) das ponderações da curva A para bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava na gama do audível [1]

Banda de Frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 oitava	Ponderação A para 1/1 oitava	Banda de Frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 oitava	Ponderação A para 1/1 oitava
12,5	-63,4	-57	800	- 0,8	0
16	-56,7		1.000	0	
30	-50,5		1.250	0,6	
25	-44,7	-40	1.600	1,0	+1
31,5	-39,4		2.000	1,2	
40	-34,6		2.500	1,3	
50	-30,2	-26	3.150	1,2	+1
63	-26,2		4.000	1,0	

80	-22,5		5.000	0,5	
100	-19,1	-15,5	6.300	- 0,1	-1
125	-16,1		8.000	-1,1	
160	-13,4		10.000	-2,5	
200	-10,9	-8,5	12.500	-4,3	-7
250	-8,6		16.000	-6,6	
315	-6,6		20.000	-9,3	
400	-4,8	-3			
500	-3,2				
630	-1,9				

A noção de frequência é essencial em acústica; está relacionado com a repetição de um movimento num conjunto. As características das ondas sonoras relacionadas com a frequência (no ar) são dadas na Figura 7 [3].

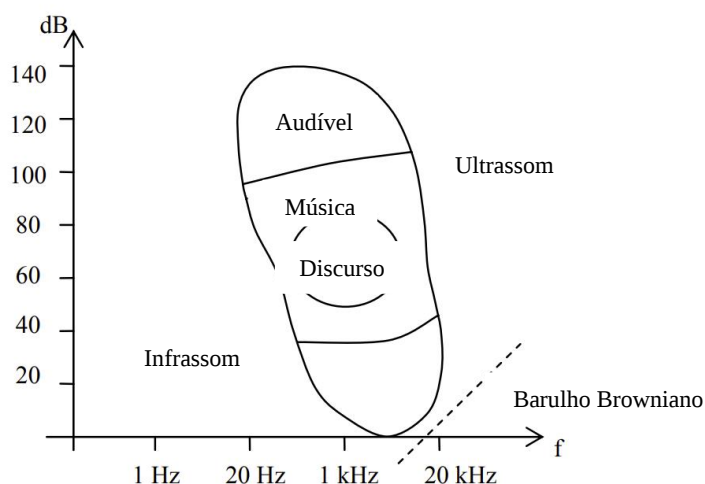


Figura 2.4 - Diagrama de audibilidade (valores de intensidade sonora e de frequência, normalmente audíveis (voz, música, etc.) e não audíveis) [3]

No sentido de aproximar os níveis de pressão sonora captados por equipamentos à sensibilidade de ouvidos dos humanos, foi necessário introduzir-se filtros eletrónicos nos aparelhos.

As curvas que representam as correções efetuadas em função da frequência são as denominadas curvas de ponderação. Nas normas internacionais estão definidas quatro curvas, designadas pelas letras A, B, C e D (Fig. 2.5) [7].

A curva A foi pensada para aproximar à resposta humana ruídos até cerca de 90 dB de intensidade, sendo sensivelmente o inverso da curva dos 40 fone [10]. As curvas B e C foram pensadas para ruídos de maior intensidade. A curva D é de uso mais restrito (para sons com nível de intensidade superior a 120 dB). É utilizada em especial com os ruídos de equipamentos e dos aviões [6].

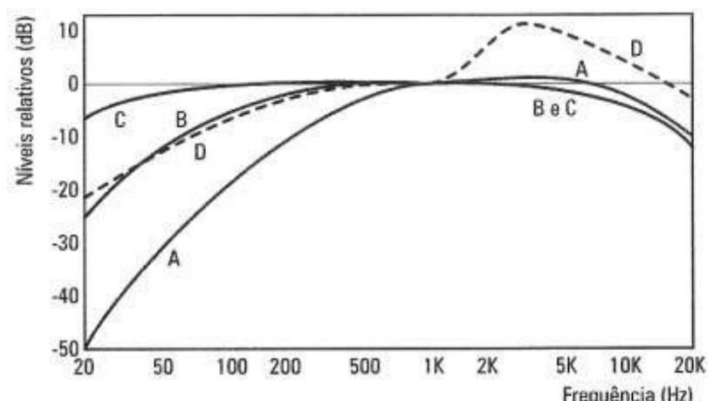


Figura 2.5 - Curvas de ponderação

2.3. REFLEXÕES

O som é influenciado pelas condições atmosféricas, ao percorrer longas distâncias no ambiente exterior. Nos teatros clássicos gregos, com distâncias características máximas de 50m, é óbvio que os efeitos ambientais influenciam a acústica destes recintos (e o ruído de fundo que aumenta com a ação do vento) [4].

O **som direto** atinge o recetor sem ser previamente refletido. As ondas provenientes de uma fonte sonora quando encontram uma superfície rígida, refletem para trás – **reflexão** [8].

No caso de espaços fechados, para uma audiência, a maioria da energia sonora recebida é resultado de reflexões provenientes das superfícies envolventes (teto, paredes, etc.). A forma e geometria da reflexão da luz é igual à do som, com a diferença de que o som prossegue a ser refletido entre as superfícies da divisão até que seja dissipado pela absorção.

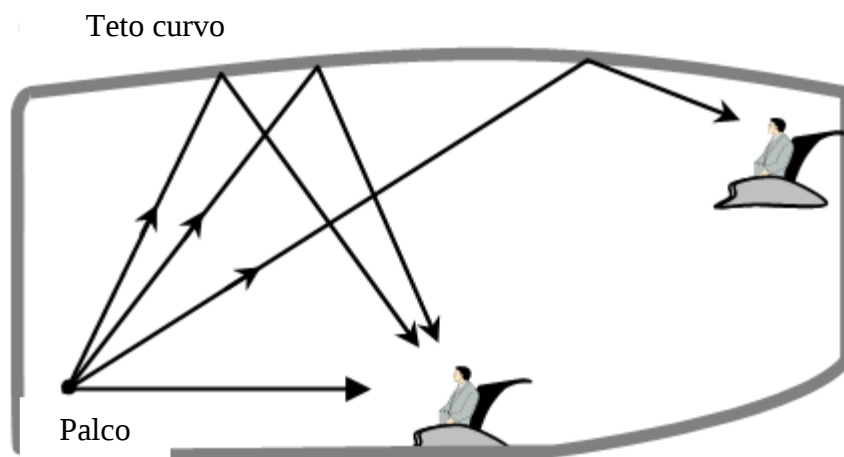


Figura 2.6 - Reflexão de ondas sonoras [21]

Numa sala espaçosa, as pessoas ainda podem ouvir o som refletido nas superfícies um ou mais segundos depois que a fonte de som é desligada [4]. Em média, uma pessoa sentada em uma sala de concertos pode receber cerca de 8.000 reflexões por segundo [1].

O primeiro som que chega aos ouvidos do recetor é o som direto, que vem direto da fonte sonora. Isto é seguido por uma série de reflexões, e se essas reflexões chegarem aos ouvidos

do recetor dentro de 50 ms após o som direto, chamam-se de **reflexões iniciais** (*early reflections*). O som restante é referido como som tardio [1]. Como o som refletido tem de percorrer uma distância maior que o som direto, ele chega mais tarde e com menos intensidade.

Em salas com um volume elevado, existem numerosas reflexões a chegar após 100 ms, depois do som direto ao ponto que se misturam e não podem ser distinguidos como sons individuais. Em salas com menor volume, esse limite pode ser menor. Após cerca de 100 ms, o som restante é chamado de **som reverberado**, que diminui linearmente em decibéis e é chamado de **reverberação**. A reverberação é muito perceptível em grandes locais de culto, como igrejas ou catedrais [5].

Se uma onda sonora chega mais de 50 ms após o som direto, é razoavelmente forte e pode ser facilmente distinguida pelo ouvido humano, é chamada de **eco** (Fig. 2.7) [1]. Um eco é uma repetição inteligível do som e não deve ser confundido com a reverberação, que não é perceptível. Se a parede refletora estiver muito próxima, o atraso de tempo pode ser muito pequeno para permitir que um eco seja percebido.

Quando a parede refletora é curva, os ecos podem ser muito mais pronunciados porque o som pode ficar concentrado. Independentemente de onde esteja localizada na sala, uma parede curva é quase sempre uma ameaça à boa acústica [9].

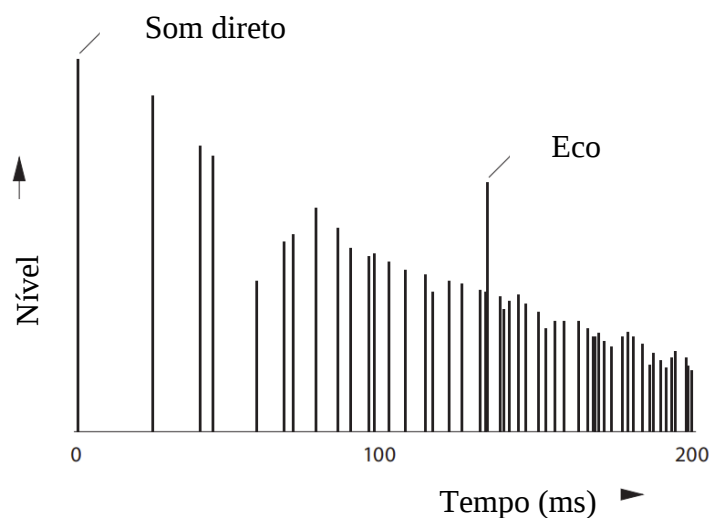


Figura 2.7 - Resposta ao impulso com um eco [4]

Um eco é definido como uma onda sonora razoavelmente forte que chega mais de 50 ms após o som direto e pode ser facilmente distinguida pelo ouvido humano. Não deve ser confundido com reverberação, que não é perceptível. No entanto, se a parede refletora estiver muito próxima, o atraso de tempo pode ser muito pequeno para permitir que um eco seja percebido.

Se a parede refletora for curva, os ecos podem se tornar muito mais proeminentes devido à concentração do som. Vale ressaltar que uma parede curva, independentemente da sua localização na sala, pode ser um fator relevante para uma má acústica [9].

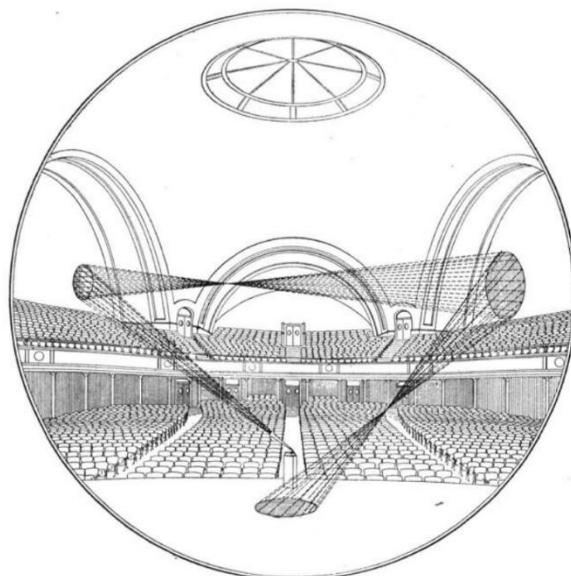


Figura 2.8 - Eco do som com origem de fonte sonora do palco [9]

2.4. ABSORÇÃO SONORA

2.4.1. GENERALIDADES

Dependendo da especificidade da sala, diferentes características de reverberação são pretendidas: em salas de aula e salas de cinema, pretende-se que o som dure pouco tempo no ar, portanto um som com baixa reverberação; já nas salas de concerto é necessária alguma reverberação, para que o som não se dissipe rapidamente.

A percentagem de energia sentida pode ser alterada, pois varia em função do material que constitui a superfície (fig. 2.9). Todos os materiais absorvem uma certa quantidade de energia, mas são chamados de adsorsores quando a sua principal função é criar condições de conforto acústico através da sua absorção sonora.

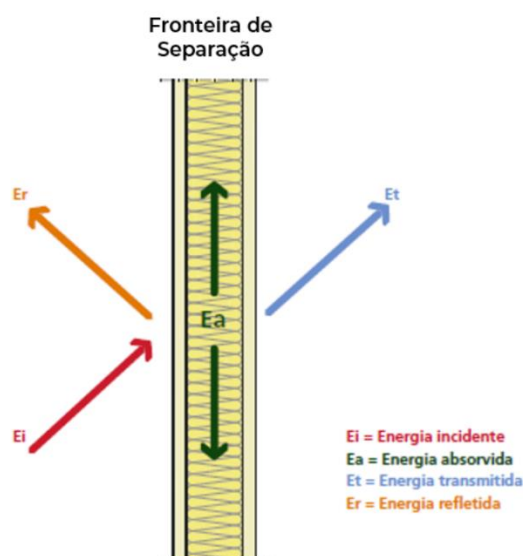


Figura 2.9 – Esquema do mecanismo de absorção sonora [10]

O **coeficiente de absorção sonora** (α) é traduzido pela razão entre a energia acústica absorvida e a energia acústica incidente:

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.8)$$

O coeficiente de absorção sonora mede a capacidade de um material de absorver a energia sonora. Esse valor varia de zero a um, com zero indicando reflexão completa e um indicando absorção completa. Por exemplo, um material com coeficiente de absorção de 0,3 absorve 30% da energia sonora enquanto reflete e/ou transmite os 70% restantes. Um bom material absorvente deve ter um coeficiente maior que 0,5 [1].

Existem dois métodos para determinar o coeficiente de absorção sonora: o método do tubo de ondas estacionárias e o método da câmara reverberante:

- O **método do tubo de ondas estacionárias** envolve um longo tubo metálico com uma amostra em uma extremidade e um altifalante pequeno na outra. A amostra apresenta dimensões reduzidas (0,03 m²). Ondas estacionárias são criadas e o microfone mede o som, estando ligado ao sistema (Fig.2.9).
- O **método da câmara reverberante** é mais eficaz e mede o coeficiente de absorção (α) para uma incidência difusa. Neste método utiliza-se uma sala com superfícies refletoras e mede-se o tempo de reverberação com e sem a amostra (amostra maior que no método anterior, 10 m²), calculando o coeficiente de absorção com a fórmula de Sabine [1]. A norma portuguesa NP EN ISO 717-1:2009 [23] é utilizada para derivar valores para a média dos resultados em condições de campo difuso.

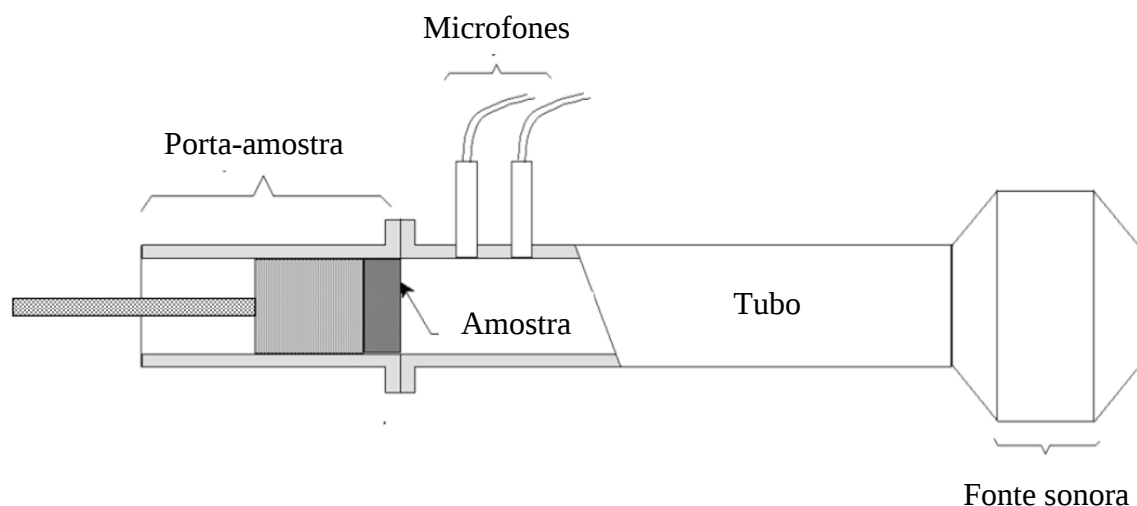


Figura 2.10 - Esquema do tubo de ondas estacionárias [11]

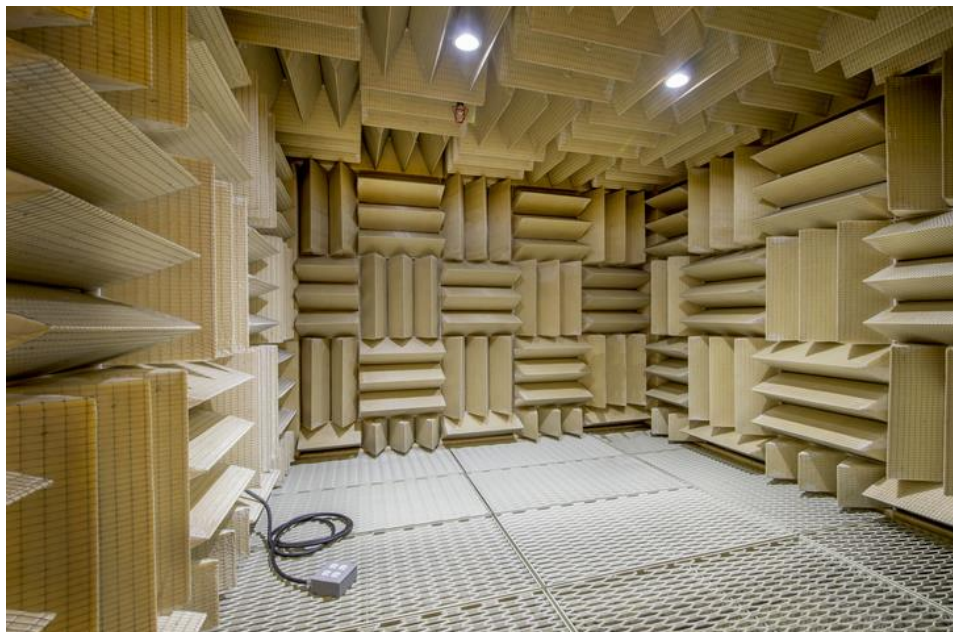


Figura 2.11 - Câmara anecoica [12]

2.4.2. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS

A energia acústica pode ser removida através de três mecanismos: **absorção porosa**, **absorção de membrana** e **ressoadores**.

A absorção porosa ocorre com qualquer material poroso e é muitas vezes usada em auditórios, por exemplo a roupa do público atua como um eficiente absorvente poroso. Absorventes porosos são eficazes em frequências altas que podem ser amplificados aumentando a espessura do material. No entanto, isso torna-se impraticável quando a absorção em toda a faixa de frequência é necessária. Uma solução mais económica é posicionar o material poroso sobre um espaço de ar, que é quase tão eficaz quanto o material poroso contínuo. Painéis finos também podem absorver energia em baixas frequências, convertendo energia acústica em calor por meio da vibração do painel. Painéis absorventes são construídos, especificamente, para alcançar este efeito [5].

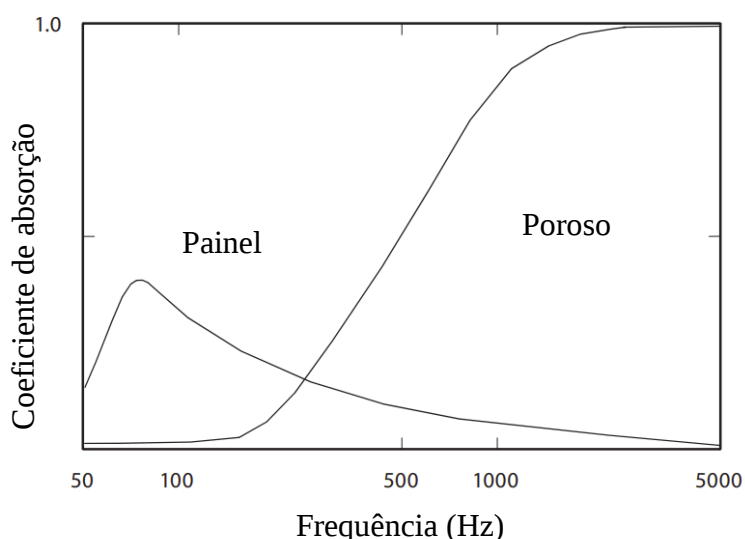


Figura 2.12 - Coeficientes de absorção de material poroso e de painéis absorventes em função da frequência [5]

Ao selecionar a massa do painel e a profundidade do espaço, a frequência de absorção máxima pode ser ajustada. Tradicionalmente, acreditava-se que os acabamentos de madeira realçavam o tom musical por ressonância, mas, na realidade, os painéis absorvem a energia acústica. A característica de absorção é mostrada na Fig. 2.12. Painéis absorventes podem ser usados juntamente com absorventes porosos para fornecer absorção em toda a faixa de frequência, mas o coeficiente máximo de absorção dos absorvedores de painel é limitado. A absorção do painel tem um impacto significativo no tempo de reverberação de baixa frequência [5].

Fibras de minerais como lã de rocha e lã de vidro, carpetes, tecidos, materiais plásticos como poliuretano e poliestireno e aglomerados de cortiça são exemplos de materiais que se enquadram na categoria de material com bom coeficiente de absorção (Ver Fig. 2.13 para uma ilustração de fibras minerais).



Figura 2.13 - Lã de rocha (fibras de minerais) [13]

2.5. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

2.5.1. PRINCÍPIOS GERAIS

Quando há uma fonte sonora numa sala, as ondas sonoras resultantes podem ser categorizadas como diretas ou refletidas. Ondas diretas viajam em linha reta da fonte sonora até o ouvinte. As ondas refletidas, por outro lado, rebatem em uma ou mais superfícies da sala antes de atingir o ouvinte. Como resultado, depois que a onda direta atinge o ouvinte, as ondas refletidas chegam sucessivamente e tornam-se mais fracas devido a reflexões múltiplas, absorção por alguns dos materiais que encontram e absorção inerente do próprio meio. [1].

O **tempo de reverberação (TR)** refere-se ao tempo que demora para o nível de pressão sonora diminuir em 60 dB, uma vez que a fonte sonora foi desligada abruptamente. As abreviações T ou RT60 são, geralmente, usadas para se referir ao tempo de reverberação [14].

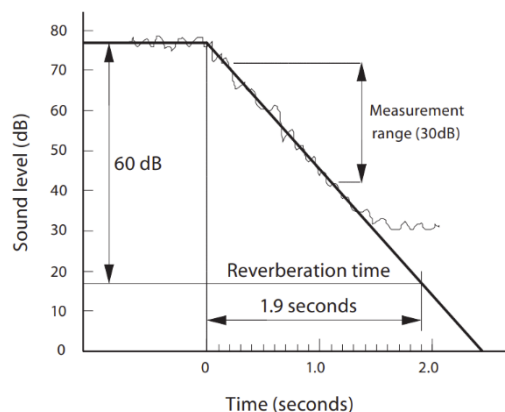


Figura 2.14 - Definição do tempo de reverberação com uma amostra decair. A inclinação do decaimento é, na prática, medida entre -5 dB e -35 dB do nível inicial [5]

Wallace Clement Sabine, realizou uma expressão (2.9) que combinava os parâmetros de tempo de reverberação, absorção sonora e volume. Esta expressão é amplamente reconhecida como a *Fórmula de Sabine*:

$$TR = \frac{0,16 \times V}{A} \quad (2.9)$$

No qual:

- TR - tempo de reverberação (s);
- V - volume (m³);
- A - absorção sonora equivalente (m²).

Onde:

$$A = \sum_{i=1}^n a_i \times S_i \quad (2.10)$$

- α - coeficiente de absorção sonora do material;
- S - superfície real do material absorvente (m²).

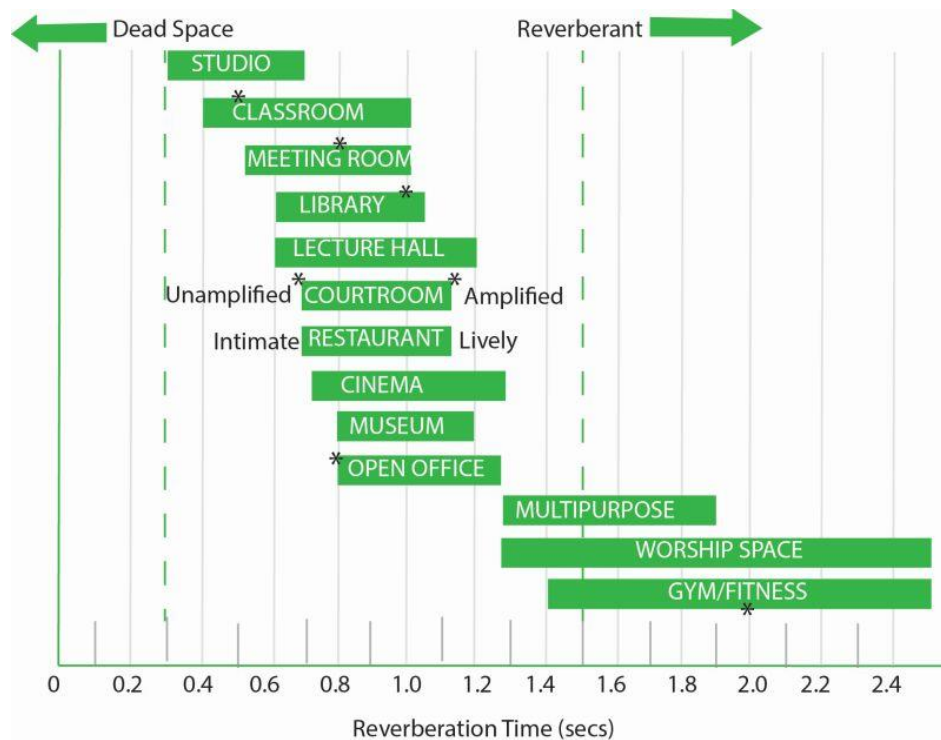


Figura 2.15 - Tempos de reverberação em função do uso [15]

O RRAE especifica que auditórios, salas de reunião, salas polivalentes e salas de cinema, que são usadas principalmente para atividades de oratória, devem aderir a determinadas exigências relativas ao tempo médio de reverberação das bandas de oitava centralizadas nas frequências de 500, 1.000 e 2.000 Hz para atender a critérios específicos:

- a) Para esses tipos de recintos, é necessário que o tempo médio de reverberação para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500, 1.000 e 2.000 Hz atenda a certos padrões:

1. $T \leq 0,12 V^{1/3}$, se $V < 250 \text{ m}^3$;
2. $T \leq 0,32 + 0,17 \log V$, se $250 \leq V \leq 9000 \text{ m}^3$;
3. $T \leq 0,05 V^{1/3}$, se $V \geq 9000 \text{ m}^3$.

o qual V é o volume interior do recinto em m^3 .

O RRAE também exige que as avaliações in situ considerem um fator de incerteza, denotado como I , que está vinculado à precisão das medições realizadas. Os valores registados do tempo de reverberação podem ser reduzidos por um fator de I , expresso em percentual do limite regulamentar, conforme especificado abaixo:

- $I = 25 \%$, se $V < 250 \text{ m}^3$;
- $I = 35 \%$, se $250 \leq V < 9000 \text{ m}^3$;
- $I = 40 \%$, se $V \geq 9000 \text{ m}^3$.

2.5.2. TEMPO DE DECAIMENTO CURTO (EDT)

O **tempo de decaimento curto** (EDT – *Early Decay Time*) é o tempo no qual o som decai, expresso da mesma maneira que o tempo de reverberação, mas com base em apenas nos primeiros 10 decibéis de decaimento em vez de 30 decibéis para TR . Quando o decaimento do som em um espaço é altamente difuso e linear, TR e EDT seriam os mesmos. Estudos têm demonstrado que o EDT está mais relacionado com a percepção subjetiva da reverberação em comparação com a medição tradicional do tempo de reverberação (Atal, Schroeder e Sessler, 1965) [5].

2.5.3. RÁCIOS DE BAIXOS (BR)

Beranek introduziu o parâmetro conhecido como **rácios de baixos** (BR - *Bass Ratios*) em 1962, como um meio de medir o calor interpretado de uma sala. Essa percepção de calor está ligada à proeminência das frequências graves em comparação com as frequências médias, o que é de natureza subjetiva.

O parâmetro **rácios de baixos** (BR) é determinado pela divisão dos tempos totais de reverberação das bandas de oitava centradas em 125 e 250 Hz pelos tempos totais de reverberação das bandas de oitava centradas em 500 e 1000 Hz [16]. Este parâmetro pode ser expresso usando a equação (2.11):

$$BR = \frac{TR_{125} + TR_{250}}{TR_{500} + TR_{1k}} \quad (2.11)$$

Um baixo valor de *bass ratio* é obtido quando uma sala é constituída com materiais que absorvem sons de alta frequência e refletem sons de baixa frequência. Por outro lado, um alto valor para este parâmetro pode ser alcançado usando materiais absorventes em baixas frequências e refletores em altas frequências.

Beranek sugeriu que os valores ideais de *bass ratio* estão ligados ao tempo de reverberação da sala e se enquadram em faixas específicas [17]:

- Para tempos de reverberação altos (na ordem dos 2,2 s): $1,1 \text{ s} < \text{BR} < 1,25 \text{ s}$;
- Para tempos de reverberação até 1,8 s: $1,1 \text{ s} < \text{BR} < 1,45 \text{ s}$.

O quadro 2.4 seguinte apresenta uma compilação dos resultados obtidos a partir da análise dessa característica em diferentes salas de concerto, juntamente com seus respectivos tempos de reverberação:

Quadro 2.4 - Valores de BR e TR [18]

Salas de Concertos	BR(s)	TR(s)
Amesterdão, Concertgebouw	1,08	2,0
Boston, Symphony Hall	1,03	1,9
Viena, Gr. Musikvereinssaal	1,11	2,0
Basileia, Stadt-Casino	1,17	1,8
Berlim, Konzerthaus	1,23	2,1
Cardiff, Gales, St. David's Hall	0,96	2,0
Nova Iorque, Carnegie Hall	-	1,8
Tóquio, Hamarikyu Asahi	-	1,7
Zurique, Großer Tonhallsaal	1,23	2,1

2.6. ISOLAMENTO SONORO

2.6.1. GENERALIDADES

O **isolamento sonoro** é definido como uma medida de proteção que impede a entrada de ruídos de um local externo em um determinado espaço. Enquanto a correção acústica visa melhorar o som dentro de um espaço específico, o isolamento sonoro é focado em impedir a propagação de ruídos entre espaços adjacentes [1].

No sentido de compreender melhor este isolamento, é necessário compreender dois tipos diferentes de ruído:

- Ruído de condução aérea;
- Ruído de percussão.

Além de serem refletidas e absorvidas, as ondas sonoras que encontram obstáculos podem ter parte da sua energia transmitida através dos elementos construtivos. Existem duas formas de transmissão que podem ocorrer (Fig. 2.16):

- Via direta;
- Via marginal.

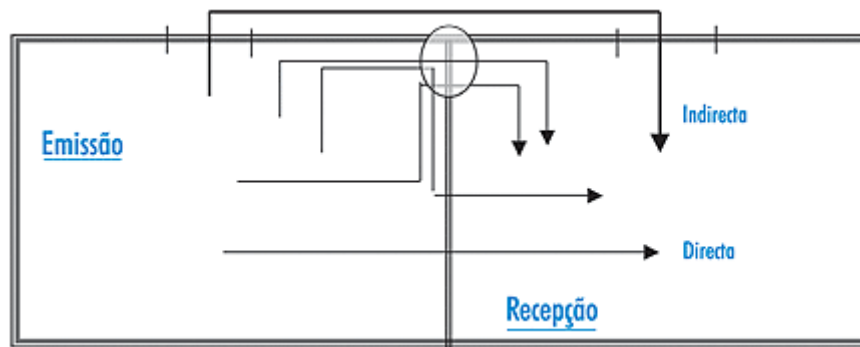


Figura 2.16 - Via direta e via marginal de transmissão de ruído [22]

Em relação aos ruídos aéreos, é de destacar que podem ser distinguidos pela origem das suas fontes:

- Interior do edifício;
- Exterior do edifício.

2.6.2. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

As fontes de **ruídos aéreos**, como conversas, música, tráfego rodoviário, ferroviário ou aéreo, resultam da excitação direta do ar por uma fonte sonora.

A transmissão desses sons ocorre quando as ondas de pressão deformam o elemento de separação. Para isolar os ruídos aéreos, é preciso considerar três propriedades: inércia, massa e características elásticas, incluindo rigidez e amortecimento interno.

Para reduzir essa transmissão, é possível agir sobre o elemento de separação, aumentando a sua massa ou duplicando fisicamente o elemento com uma caixa de volume.

O parâmetro que mede o isolamento sonoro de um elemento construtivo em relação a ruídos aéreos é a **redução sonora** (R) em dB, e é calculado usando a fórmula 2.12. Quanto maior for o valor da redução sonora, mais eficiente será o elemento no isolamento de ruídos.

$$R = 10 \log(1/\tau) \quad (2.12)$$

O **coeficiente de transmissão** (τ) é função da redução sonora e é determinado como a relação entre a energia sonora transmitida e a energia sonora incidente [1].

$$\tau = \frac{E_{transmitida}}{E_{incidente}} \quad (2.13)$$

O conceito de **isolamento sonoro bruto** (D) surge neste contexto, o qual representa o isolamento sonoro percebido entre dois compartimentos e é medido *in situ* pela diferença nos níveis de pressão sonora entre o espaço emissor e o espaço recetor, conforme a Fórmula 2.14.

$$D = L_e - L_r \quad (2.14)$$

Onde:

- D - isolamento sonoro bruto a ruídos de condução aérea (dB);
- L_e - nível de pressão sonora no espaço emissor (dB);
- L_r - nível de pressão sonora no espaço recetor (dB).

Em termos regulamentares (RRAE), o **índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado**, $D_{nT,w}$, é limitado. Esse índice é obtido a partir dos valores de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea para cada banda de frequências, D_{nT} (Fórmula 2.15), e é ajustado conforme a Norma NP EN ISO 717-1 [23], resultando em um único valor, o $D_{nT,w}$.

$$D_{nT} = D + 10 \log(T/T_0) \quad (2.15)$$

Onde:

- D – definido em 2.15;
- T – tempo de reverberação existente no compartimento recetor (s);
- T_0 – tempo de reverberação de referência (geralmente igual a 0,5 s).

2.6.3. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO

Enquanto a transmissão sonora por via aérea afeta mais as áreas próximas à fonte sonora, o ruído de percussão pode ser percebido em locais distantes da fonte [24].

Os ruídos de percussão são causados por fontes de impacto, tais como queda de objetos, pessoas a deslocarem-se e arrastar de móveis. Além disso, fontes estáticas, como sistemas de ar condicionado, sistemas onde tem uso de bombas e máquinas de lavar, também podem gerar esse tipo de ruído [1]. Geralmente, locais como cozinhas e casas de banho são mais propensos a ter esses tipos de ruído.

Considerando que a maioria das ações de impacto ocorrem quase que exclusivamente nos pavimentos, a regulamentação do isolamento sonoro a ruídos de percussão é aplicada apenas a esses elementos, ou seja, aos ruídos que se propagam na direção vertical. O **índice de isolamento sonoro para ruídos de percussão** é chamado de $L'_{nT,w}$. Esse índice representa o isolamento sonoro fornecido pelo elemento de separação, e é considerado melhor quanto menor for o seu valor. O $L'_{nT,w}$ é obtido a partir dos valores de L'_{nT} para cada banda de frequências (Fórmula 2.16), e é ajustado de acordo com a Norma NP EN ISO 717-2:2009 [25].

$$L'_{nT} = L_i + 10 \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (2.16)$$

Sendo:

- L'_{nT} - nível de pressão padronizado (dB/oit. Ou dB/terço de oitava);
- L_i – nível de pressão sonora média no compartimento recetor (dB/oit. Ou dB/terço de oitava).

2.7. RUÍDO DE FUNDO E INCOMODIDADE

Como mencionado anteriormente, o ruído é um som indesejável ou sem informação útil para o ouvinte. Isso mostra que o ruído está relacionado aos sentimentos das pessoas e reflete as condições ambientais. As diferentes intensidades do ruído geram sensações que podem ser classificadas como desconforto [26].

Para obter uma experiência auditiva ideal em qualquer auditório, três condições essenciais devem ser consideradas. Em primeiro lugar, o nível de som deve ser suficientemente elevado para permitir uma receção clara e audível. Em segundo lugar, o equilíbrio entre os componentes de um som complexo devem ser mantidos, garantindo que cada um seja ouvido em sua intensidade adequada. Por fim, para palavra ou música em movimento rápido, clareza e distinção entre sons sucessivos são cruciais, sem interferência de ruídos estranhos. Essas três condições não são apenas necessárias, mas também suficientes para garantir uma boa audição em qualquer ambiente [5].

Neste contexto, o termo **ruído de fundo** refere-se a qualquer som indesejado presente num determinado local [34]. No caso dos auditórios, o ruído de fundo refere-se a todos os sons que não são produzidos pelos oradores/intérpretes.

O sistema de ventilação é uma das principais fontes de ruído de fundo. Esses sistemas produzem ruído não apenas por movimentos mecânicos, mas também pelo fluxo de ar criado. Para controlar esse tipo de ruído, é necessário reduzir a velocidade de saída do ar [4]. No entanto, o sistema de ventilação não é a única fonte de ruído de fundo. Todos os tipos de equipamentos e instalações prediais também produzem ruído. Em termos de ruído dos equipamentos, além do sistema de ventilação, elevadores e sistemas de bombagem são exemplos de fontes desse tipo de ruído [27].

O ruído de equipamentos, em Portugal, é limitado no RRAE pela seguinte fórmula (2.17):

$$L_{Ar,nT} = L_A + K_{tonal} - 10 \log(T/T_0) \quad (2.17)$$

Onde:

- $L_{Ar,nT}$ – nível de avaliação padronizado do ruído particular de equipamentos (dB);
- L_A – nível sonoro contínuo equivalente do equipamento, medido durante um intervalo de tempo específico no compartimento recetor (com um tempo de reverberação T);
- K_{tonal} – penalização (em 3 dB) devida à tonalidade (se pelo menos uma banda de 1/3 de oitava sobressair em pelo menos 5 dB em relação às duas bandas adjacentes, na gama aos 50 aos 8000 Hz, avaliado com o filtro A);
- $T_0 = 0,5$ s (em geral).

O regulamento estabelece ainda os valores máximos legais para os níveis sonoros contínuos equivalentes de ruído de fundo em auditórios, na presença de sistemas de ar condicionado, com a sala vazia:

- $L_{Aeq} \leq 38$ dB – salas de cinema;
- $L_{Aeq} \leq 30$ dB – outras salas.

Ambos os valores limite superior e inferior levam em consideração uma margem de incerteza de 3 dB(A) que deve ser subtraída dos valores medidos [1].

Quando se trata de avaliar o incómodo do ruído de fundo e garantir o conforto acústico, existem vários critérios a ter em conta, sobretudo quando o ruído é estável e contínuo. Os critérios mais utilizados são o *Noise Rating* (NR) e o *Noise Criterion* (NC), bem como suas versões atualizadas, *Preferred Noise Criterion* (PNC) e, mais recentemente, *Room Criteria* (RC) [4].

Em 1962, Kosten e Van Os desenvolveram um novo conjunto de curvas chamado **Noise Rating** (NR), que se tornou um método amplamente utilizado na Europa. Essa abordagem é semelhante à NC, pois também emprega o método da tangente e usa faixas de frequência que variam de 31 a 8k Hz. A norma ISO reconheceu este critério em 1971 [1].

Quadro 2.5 - Na avaliação de ambientes acústicos, valores máximos de indicador NC (adaptado de [28])

Tipo de recinto	Valor do indicador NC
Estúdios radiofónicos	20
Salas de concertos	20
Teatros (500 lugares, sem aplicação de som)	25
Salas de aulas	25
Estúdios de televisão	25
Quartos em hotéis	30
Salas de reunião (com aplicação de som)	35
Salas de cinema	30
Hospitais	40
Igrejas (sem amplificação de som)	25
Salas de audiência (sem aplicação de som)	25
Bibliotecas	25
Restaurantes	40

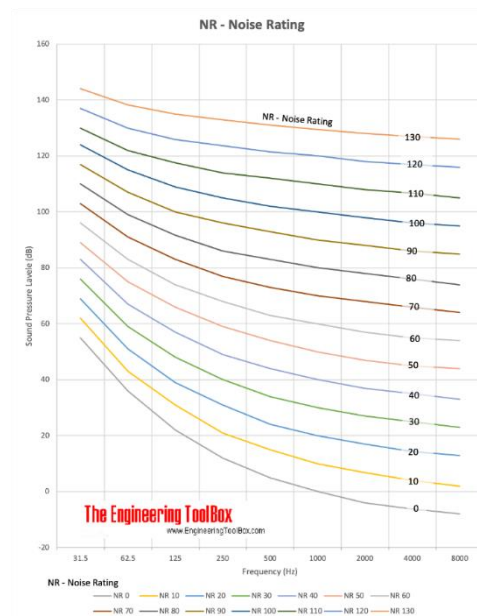


Fig. 2.17 - Curvas para determinação do parâmetro NR [29]

Quadro 2.6 - Valores máximos do parâmetro NR para ruído de fundo [4]

Tipo de sala	NR máximo
Salas de concerto de grandes dimensões	NR 15
Salas de opera e teatros	NR 20
Pequenos auditórios (menos de 500 lugares)	NR 25

2.8. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

2.8.1. ABORDAGEM GERAL

Quando o tempo de reverberação é muito longo, a inteligibilidade da palavra é prejudicada, sendo este o efeito mais importante [1].

A compreensão dos sons é encapsulada pelo conceito de inteligibilidade, que pode ser entendida como a quantidade de palavras ou frases que um ouvinte é capaz de entender de forma direta ou relativa. Em suma, a inteligibilidade é uma medida da compreensão dos sons [16].

2.8.2. CARACTERÍSTICAS DA EMISSÃO DA VOZ

Ao falar, as pessoas alocam uma quantidade maior de tempo para produzir vogais em comparação com consoantes. As vogais servem como elementos de conexão e são parte integrante do fluxo constante da palavra, enquanto as consoantes estão ligadas aos intervalos transitórios entre as vogais [1].

Em relação à duração, as vogais tendem a durar mais tempo, cerca de 90 ms em média, enquanto as consoantes são muito mais curtas, durando apenas cerca de 20 ms [30]. Além disso, as vogais produzem **níveis de pressão sonora** mais elevados, geralmente cerca de 12 a 28 dB mais altos que as consoantes. Em termos de **frequência**, as vogais estão associadas a faixas de frequência mais baixas, enquanto as consoantes estão associadas a faixas de frequência mais altas [1].

A inteligibilidade das palavras faladas depende fortemente da capacidade de perceber altas frequências, especificamente consoantes [4]. Estudos demonstraram que, se um ouvinte puder compreender de 85 a 90% das palavras que lhe são ditas, terá um bom entendimento de praticamente todas as frases ditas. Se o ouvinte puder compreender mais de 60% das palavras, ele ainda poderá entender cerca de 90% das frases, o que ainda é considerado um bom entendimento. No entanto, se menos de 60% das palavras forem compreendidas, a inteligibilidade cai rapidamente [16]. A capacidade do cérebro de compreender a palavra depende em grande parte da compreensão das consoantes, pois elas permitem o reconhecimento de sílabas inteligíveis.

Quadro 2.7 - Características relevantes da mensagem oral [31]

Palavras	Duração (ms)	Conteúdo em frequência	Nível de pressão sonora	Contribuição para a inteligibilidade da palavra
Vogais	90	Baixas frequências	Nível das consoantes	Baixa
Consoantes	20	Altas frequências		Alta

A direccionalidade da emissão de voz tem um grande impacto no som produzido. As ondas sonoras não são irradiadas com igual potência em todas as direções; há sempre uma direção onde o som é mais forte. No caso da palavra humana, a voz tende a ser emitida para frente, o que é determinado tanto pelo sistema fonatório quanto pelo formato da cabeça de quem produz o som. Essa variabilidade direcional depende da frequência, pois as frequências mais baixas não apresentam instabilidade direcional significativa. No entanto, frequências mais altas podem perder até 25 dB na intensidade sonora quando emitidas em diferentes direções [1].

2.8.3. RELAÇÃO ENTRE TEMPO DE REVERBERAÇÃO E INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

O tempo excessivo de reverberação numa sala pode reduzir muito o grau de inteligibilidade da fala. Isso ocorre porque as consoantes têm um nível sonoro mais baixo e duração mais curta, tornando-as mais facilmente suplantadas pelo “rasto sonoro” das vogais anteriores que têm duração mais longa e nível sonoro mais alto [1].

O efeito de mascaramento causado pelas vogais é ainda agravado pelo alto tempo de reverberação, onde a simultaneidade temporal, os níveis de som correspondentes e as características espectrais dos sons das vogais e consoantes desempenham um papel no mascaramento dos sons das consoantes.

Segundo Fernandez [36], existe uma clara relação entre reverberação e inteligibilidade de palavra, onde a inteligibilidade diminui com o quadrado do tempo de reverberação. Para garantir uma boa inteligibilidade da palavra, o tempo de reverberação deve ser idealmente inferior a 1 segundo. Em algumas avaliações de inteligibilidade de palavra, o parâmetro EDT (*Early Decay Time*) é utilizado como medida do desempenho acústico da sala.

2.8.4. RELAÇÃO ENTRE SINAL/RUÍDO E INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

O grau no qual um ruído inibe a inteligibilidade depende da **relação Sinal/Ruído (S/N)**. Essa relação é simplesmente a diferença entre o nível de som da fonte e o ruído de fundo, em dB. À partida, quanto maior o valor do S/N, maior a inteligibilidade da palavra. É possível que o ruído de fundo seja maior que o ruído da fonte, caso em que o S/N assuma um valor negativo. A inteligibilidade ainda é possível nessa situação (até alguns limites), devido à capacidade do cérebro, já mencionada, de não precisar de entender tudo o que é emitido para compreender parcialmente ou totalmente a mensagem [16].

Normalmente, a relação S/N tem um valor menor quando:

- A distância até à fonte sonora for maior;
- A distância até à fonte de ruído for menor.

Fernandez [32] estabelece uma relação entre a inteligibilidade e o ruído, destacando os seguintes pontos:

- A inteligibilidade é dependente da relação Sinal/Ruído (S/N);
- A direção em que o ruído mascarante chega ao ouvido é relevante, pois o mascaramento será maior quando a direção for a mesma do som primário;
- O mascaramento de ruído é maior quando o espectro de ruído é mais intenso na banda de transmissão de informações (1 a 4 kHz).

2.8.5. PARÂMETROS DE MEDIDA

Para o projeto acústico de um espaço, é fundamental avaliar como as palavras podem ser compreendidas em diferentes locais. Realizando medições específicas, é possível determinar a inteligibilidade da palavra em cada ponto.

O método mais comum para medir a inteligibilidade da palavra de forma subjetiva é utilizar frases contendo palavras individuais ou sílabas sem sentido, que são lidas para ouvintes que devem identificá-las. Este método pode ser realizado em ambientes com diferentes níveis de

ruído e tempo de reverberação. Vozes diretas ou gravações podem ser utilizadas, sendo que as gravações são geralmente mais confiáveis e controláveis [16].

Existem diferentes métodos objetivos para avaliar a inteligibilidade da palavra, entre eles destacam-se o Índice de Transmissão da Palavra (**STI** - *Speech Transmission Index*) e o Índice de Transmissão Rápida da Palavra (**RASTI** - *Rapid Speech Transmission Index*).

Ambos indicadores são similares, sendo o RASTI uma simplificação do STI.

O **STI** foi criado com o objetivo de avaliar de forma objetiva a inteligibilidade da palavra em situações de comunicação direta e amplificada, como em sistemas de som PA (*Public Address System*). O STI considera várias distorções irregulares do som, incluindo ecos.

O **RASTI** é uma versão simplificada do STI e é mais adequado a situações sem distorções do som não lineares. O ruído de fundo e a reverberação não devem depender muito da frequência e o ruído de fundo não deve ser impulsivo [30].

Em ambos os métodos, a **função de transferência de modulação** (MTF – *Modulation Transfer Function*) é calculada para determinar a redução da modulação do sinal entre o ponto de emissão e o de receção. A MTF é afetada pelas características de reverberação da sala e pela relação Sinal/Ruído. O teste é realizado com um altifalante no local do orador e um microfone na posição do ouvinte. A redução da modulação do sinal é detetada comparando o sinal transmitido e recebido.

No cálculo do STI, a MTF é medida em sete bandas de oitava, desde 125 a 8000 Hz, com 14 frequências de modulação em bandas de terço de oitava, desde 0,63 a 12,5 Hz. São obtidos 98 fatores de redução da modulação, tornando o método bastante complexo e exigindo muitas medições para cada situação.

Por outro lado, o RASTI é calculado com base em apenas duas bandas de frequência: 500 e 2000 Hz, com quatro frequências de modulação. Após serem transformados em relações Sinal/Ruído, a média dos nove valores obtidos é convertida em um único valor em uma escala de 0 a 1. Como apenas duas bandas de frequência são usadas no RASTI, é necessário que o ruído de fundo e a reverberação da sala não dependam fortemente da frequência [30].

Quadro 2.8 - Relação qualificada dos valores do RASTI [1]

RASTI	[0,00 - 0,30]	]0,30 – 0,45]	]0,45 – 0,60]	]0,60 – 0,75]	]0,75- 1,00]
	Mau	Pobre	Razoável	Bom	Excelente

2.9. PARÂMETROS ACÚSTICOS ENERGÉTICOS

2.9.1. CLARIDADE

Para locais onde a inteligibilidade da palavra é primordial, como em teatro e óperas, é essencial que as notas sejam ouvidas de forma clara e distintas. Já para salas de música, é aceitável haver uma certa mistura entre as notas.

A **claridade**, C_t (*early to late sound index*), é um parâmetro acústico medido pelo índice de som do início ao fim, representado em dB, que expressa a relação entre a energia sonora recebida pelo ouvinte nos primeiros "t" milissegundos e a energia sonora recebida após este período, conforme a fórmula 2.18.

$$C_t = 10 \log\left(\frac{\int_0^t p^2(t) dt}{\int_1^\infty p^2(t) dt}\right) \quad (2.18)$$

- C_{50} (t = 50 ms) – claridade para a voz, quantifica a inteligibilidade, devendo ser superior a 0 dB;
- C_{80} (t = 80 ms) – claridade para a música, traduz o grau de separação entre os estímulos musicais.

O C_{80} é o parâmetro amplamente utilizado para a análise acústica de auditórios. A claridade, assim como muitos outros parâmetros acústicos, varia dependendo da frequência. Portanto, o C_{80} foi desenvolvido para fornecer uma visão geral da clareza geral da sala. É calculado como a média dos valores C_{80} nas bandas de frequência centradas em 500, 1000 e 2000 Hz.

Quadro 2.9 - Valores característicos de C_{80} [30]

Salas de concerto	C_{80} – Sala vazia (dB)
Amsterdão, Concertgebouw	- 3,3
Boston, Symphony Hall	- 2,7
Viena, Gr. Musikvereinssaal	-3,7
Basileia, Stadt-Casino	-2,3
Berlim, Konzerthaus	-2,5
Cardiff, Gales, St. David's Hall	-0,9
Nova Iorque, Carnegie Hall	-
Tóquio, Hamarikyu Asahi	-0,2
Zurique, Großer Tonhalleaal	-3,6

2.9.2. DEFINIÇÃO

Outro parâmetro acústico objetivo, a **Definição** (D_{50}) é a relação entre a energia recebida nos primeiros 50 ms e a energia total recebida. Este é o parâmetro usado para determinar o limite de percepção da palavra. A sua definição é dada pela Fórmula 2.19 [33].

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_0^\infty p^2(t) dt} \quad (2.19)$$

2.9.3. TEMPO CENTRAL

O **tempo central** (TS) é um parâmetro acústico (em ms) objetivo que pode ser usado para quantificar as condições acústicas de uma sala. É definido como o ponto no tempo em que a energia sonora recebida representa metade da energia total recebida pelo ouvinte, ou seja, o ponto em que a energia recebida anteriormente é igual à energia que ainda será recebida. Em

salas de concertos, valores típicos para o tempo central variam de 140 a 180 ms. Este conceito é descrito pela Fórmula 2.20, que é expressa em ms [1].

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} t \times p^2(t) dt}{\int_t^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.20)$$

3

ACÚSTICA DE SALAS DE ESPETÁCULOS

3.1. A ORIGEM DA SALA DE ESPETÁCULO

As salas de espetáculos têm uma longa história, remontando aos teatros e anfiteatros da Grécia antiga, como o Teatro de Dionísio em Atenas, construído no século V a.C. Esses locais eram usados para apresentações de teatro e música, e foram adaptados para acomodar audiências cada vez maiores ao longo do tempo. Durante o Renascimento, novos tipos de espaços para espetáculos começaram a surgir, incluindo óperas e teatros elisabetanos, como o famoso The Globe, em Londres.

No século XVII, a França tornou-se o centro da cultura teatral europeia e muitos teatros luxuosos foram construídos em Paris, incluindo o *Théâtre des Tuileries* e o *Opéra Garnier*. Essas salas de espetáculos eram frequentemente financiadas pela nobreza e apresentavam decorações elaboradas e acústica cuidadosa.

Com o tempo, as salas de espetáculos evoluíram para acomodar diferentes tipos de apresentações, incluindo música clássica, ópera, ballet e teatro. Atualmente, existem salas de espetáculos em todo o mundo, que variam em tamanho e estilo, desde pequenos clubes de música até grandes arenas e teatros históricos.

O Teatro de Dionísio em Atenas, construído no século V a.C., tinha uma planta em forma de ferradura, com uma capacidade para acomodar cerca de 17.000 espectadores. A planta do teatro foi desenhada para permitir uma ótima visibilidade e acústica para a audiência.

O palco ficava no centro do teatro, numa área circular chamada de "*orchestra*", que significa "dança" em grego antigo. A orquestra era cercada por uma parede semicircular chamada de "*skene*", que servia como cenário para as apresentações. As paredes da *skene* eram frequentemente decoradas com pinturas e esculturas elaboradas, que ajudavam a contar a história da peça.

A audiência ficava em bancadas de pedra em torno da orquestra, onde subia em terraços escalonados permitindo uma visão clara do palco. A área de assentos era dividida em seções para diferentes grupos sociais, com a parte inferior reservada para os cidadãos mais importantes e a parte superior para as mulheres e escravos.

O teatro foi construído numa encosta natural, tirando proveito da inclinação no sentido de melhorar a acústica. Para além disso, o projeto incluía o uso de materiais absorventes de som, como cortinas e tapeçarias, para melhorar a qualidade sonora.

Em suma, a planta do Teatro de Dionísio em Atenas foi projetada de maneira a permitir acomodar uma grande audiência com ideais acústicos e uma boa visibilidade, no qual

continha um palco central cercado por uma parede semicircular e uma área de assentos em arquibancadas escalonadas em torno da orquestra [39].



Figura 3.1 - Teatro de Dionisio em Acropópolis

O teatro grego antigo era realizado em grandes espaços abertos, por isso, a projeção vocal era indispensável para que o público pudesse ouvir as *performances*. Os atores eram treinados para usar técnicas como a respiração diafragmática e a ressonância vocal para projetarem as vozes de forma clara e forte.

Além disso, o teatro grego antigo contava com um sistema de amplificação acústica conhecido como "*koilon*", que consistia num semicírculo de assentos em torno do palco para refletir o som de volta para a plateia. Essa disposição acústica ajudava a aumentar a clareza e a audibilidade das vozes dos atores, garantindo que todos na plateia pudessem ouvir claramente.

O teatro romano surgiu como uma evolução do teatro grego antigo durante o Império Romano, sendo uma forma de arte cênica popular. Os teatros romanos apresentavam diferenças significativas em relação aos teatros gregos, incluindo o uso de arcos e abóbadas, bem como tecnologias de construção mais avançadas, como o betão.

Assim como no teatro grego, a projeção vocal era fundamental para garantir que as atuações fossem ouvidas por todo o público em grandes espaços abertos.

No entanto, os teatros romanos tinham uma acústica naturalmente melhorada devido à sua arquitetura distinta. Os arcos e abóbadas ajudavam a amplificar e direcionar o som em direção ao público, e as paredes curvas e assentos com inclinação ajudavam a melhorar ainda mais a acústica.

Além disso, os romanos também faziam uso da tecnologia da "*scaenae frons*", uma parede de fundo do palco que refletia e amplificava o som de forma ainda mais eficaz [35].

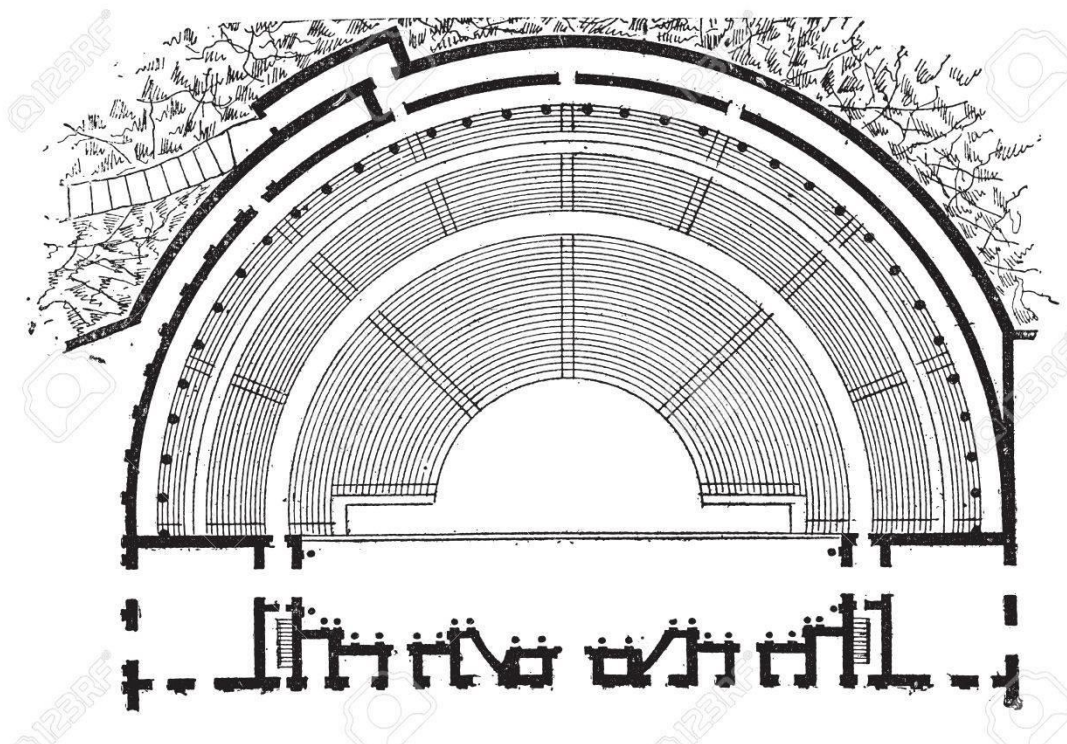


Figura 3.2 – Planta Teatro Romano [36]

No século XI, houve um marco importante na história do teatro europeu com o surgimento de materiais acusticamente reflexivos na construção de teatros.

Com a introdução de materiais como pedra e tijolo, os espaços de teatro tornaram-se mais controlados e fechados, permitindo que os artistas controlassem melhor a acústica e a iluminação, o que proporcionou uma experiência mais imersiva para o público. Os materiais reflexivos melhoraram a qualidade do som, permitindo que a música e a fala fossem ouvidas com mais clareza [37].

O surgimento de teatros permanentes, no século XI, permitiu que as produções teatrais se tornassem mais elaboradas e complexas, com a possibilidade de explorar novas técnicas de encenação e usar recursos cênicos como cenários, figurinos e adereços. Isso levou a uma melhoria na qualidade e na variedade das produções teatrais, contribuindo para o desenvolvimento do teatro como uma forma de arte importante na Europa [38].

Com o crescente interesse pela música erudita entre a nobreza e a burguesia no século XVII, a acústica começou a ser desenvolvida para acomodar audiências maiores em espaços fechados. Arquitetos enfrentaram o desafio de criar esses espaços, estudando como o som se propagava em recintos fechados e como reforçar a acústica através de reflexões.

No decorrer dos séculos XVIII e XIX, os espaços para concertos multiplicaram-se na Europa, mas os problemas de acústica ficaram mais evidentes. Certos construtores agiram de forma intuitiva e com base em experiências anteriores para melhorar a qualidade do som nesses

espaços fechados. O desenvolvimento da acústica reflete a evolução da música e a necessidade de criar espaços adequados para a apreciação da música erudita [40].

3.2. ESTADO ATUAL DA ACÚSTICA DE SALAS DE ESPETÁCULOS

Sabine, pioneiro na aplicação da ciência da acústica na arquitetura, destacou a importância da interseção entre essas duas áreas para garantir uma boa percepção sonora em auditórios. Ele sublinha que a solução para uma boa qualidade sonora deve ser pensada antes da construção do edifício, e que é necessário que o som seja forte o suficiente, isto é, as diferentes componentes do som complexo mantenham as suas intensidades relativas e que os sons sucessivos sejam claros e diferenciados, sem ruídos alheios. As ideias de Sabine tiveram um impacto significativo no design de auditórios e salas de concertos ao longo do século XX [41].

Leo Beranek desempenhou um papel crucial no desenvolvimento da acústica arquitetônica e na melhoria da qualidade do som em ambientes fechados, especialmente em auditórios de música. Ele foi um engenheiro de acústica norte-americano que fundou a Bolt, Beranek and Newman (BBN), empresa responsável por projetar muitos dos principais auditórios de música em todo o mundo.

Além disso, Beranek é autor de vários livros sobre acústica, incluindo o aclamado “*Acoustics*”. Ele também desenvolveu várias técnicas inovadoras para medir e analisar salas de concertos e outros espaços, como o uso de microfones direcionais e modelos matemáticos avançados para prever a qualidade sonora em diferentes ambientes.

Beranek também deixou sua marca na restauração e remodelação de salas de concertos históricas, como a Ópera de Viena e o Teatro *Bolshoi* em Moscou, demonstrando o seu compromisso em preservar e melhorar a qualidade sonora desses espaços icônicos [17].



Figura 3.3 - Ópera de Viena [42]

O processo de projeto de arquitetura de um auditório começa com o estudo da geometria e volumetria da sala. A forma do auditório é um dos aspetos mais importantes na fase de projeto, pois afeta diretamente a qualidade do som no espaço. Por isso, é essencial que a

forma seja determinada com base na função a que o auditório se destina, em vez de ser uma adaptação da arquitetura existente. Isso é especialmente importante para espaços semelhantes, como salas de concertos.

O tamanho do auditório deve ser selecionado com base no uso que será dado ao espaço. Para concertos, é recomendável um grande espaço para permitir uma melhor dispersão sonora. Para discursos e outras apresentações de baixa intensidade sonora, é recomendado um espaço menor. Caso contrário, sistemas de amplificação sonora podem ser usados para garantir que o som seja ouvido em todo o auditório.

A forma e o tamanho do auditório, bem como os materiais utilizados na sua construção, afetam a propagação do som dentro do espaço e, portanto, a qualidade acústica do ambiente. Para garantir a melhor qualidade de som possível, a arquitetura do espaço deve ser moldada em torno dos objetivos específicos do auditório. Superfícies refletoras podem ser usadas para aumentar a intensidade sonora e distribuir o som uniformemente por todo o espaço, especialmente em áreas mais distantes do palco [43].

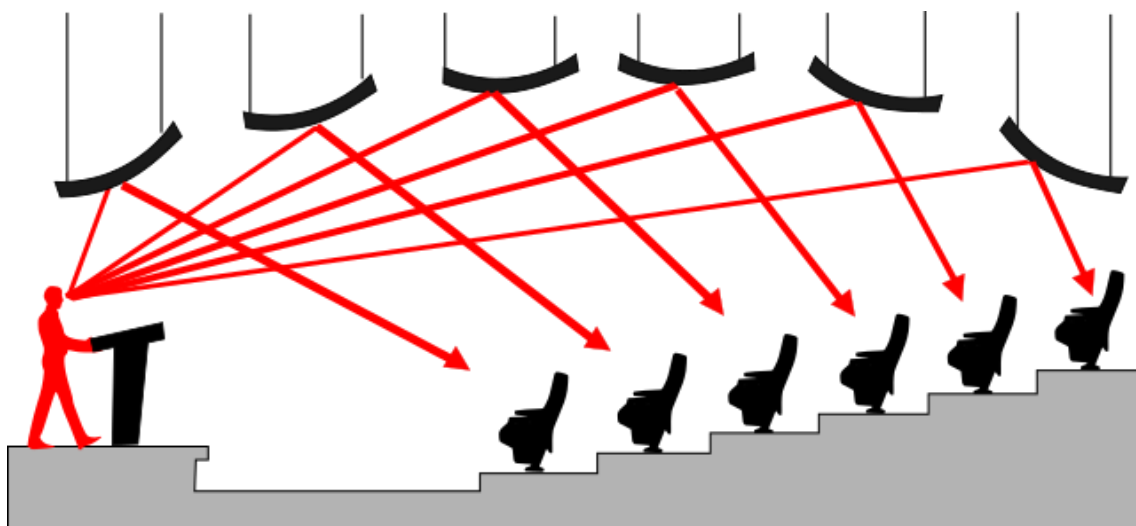


Figura 3.4 - Reflexão Acústica de Ondas Sonoras usando Painéis Difusores [44]

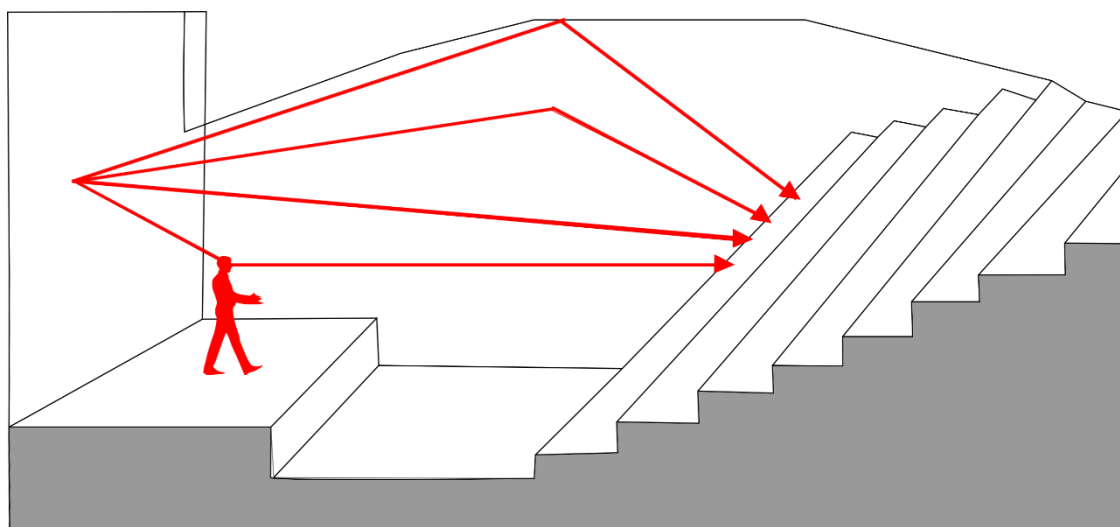


Figura 3.5 - Reflexões Acústicas: Direta, Parede do Palco, Parede Lateral e Teto [44]

As seguintes etapas explicam o processo de um projeto acústico para um auditório:

- **Estudo Preliminar:** Nesta fase, é necessário compreender as necessidades do espaço, as restrições arquitetônicas e os objetivos do projeto. A equipa de projetistas acústicos deve entender o tipo de eventos que serão realizados no auditório, a quantidade de espectadores, as dimensões da plateia e do palco, e outros fatores que possam afetar a acústica do ambiente.
- **Análise acústica:** Com base nas informações coletadas na fase de estudo preliminar, é realizada uma análise detalhada da acústica do ambiente. Isso inclui a medição e análise da reverberação, ruído de fundo, tempo de reverberação, direccionalidade do som, e outras características acústicas que influenciam a qualidade do som no auditório.
- **Design acústico:** Com base na análise acústica, a equipa de projetistas acústicos desenvolve um plano para melhorar a acústica do espaço. Isso pode incluir a especificação de materiais absorventes de som, posicionamento de caixas acústicas, seleção de sistemas de amplificação de som, e outras soluções para melhorar a qualidade do som no auditório.
- **Modelagem e simulação:** Nesta fase, é utilizada tecnologia de modelagem e simulação acústica para testar e otimizar o design acústico. Isso permite que a equipa de projetistas verifique o desempenho acústico do auditório antes mesmo da construção começar identificando possíveis problemas e ajustando o design para maximizar a qualidade do som.
- **Construção e instalação:** Finalmente, o projeto acústico é implementado no auditório, incluindo a instalação de materiais absorventes de som, caixas acústicas, sistemas de amplificação de som e outros equipamentos necessários para garantir a qualidade acústica do espaço. A equipa de projetistas acústicos deve supervisionar a instalação e garantir que o design seja implementado corretamente.

Essas são as principais etapas do processo de projeto acústico para um auditório. Cada projeto é único e pode exigir abordagens específicas, mas essas etapas fornecem uma base sólida para garantir a qualidade acústica do espaço [45].

3.3. SALAS DE ESPETÁCULOS E SUAS EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS

3.3.1. AUDITÓRIOS PARA PALAVRA

Em particular, Barron destaca a importância de projetar a acústica de auditórios destinados à fala para garantir uma inteligibilidade clara da palavra, independentemente da localização do ouvinte na plateia. O autor enfatiza que a qualidade acústica de um auditório para a fala é determinada por vários fatores, incluindo o tempo de reverberação, a clareza do som e a uniformidade da distribuição sonora.

O autor também discute as várias estratégias que podem ser utilizadas para melhorar a acústica de auditórios para a fala, tais como a utilização de materiais absorventes, a implementação de sistemas de reforço sonoro e a disposição adequada dos assentos. A referência de Michael Barron destaca, neste âmbito, a importância de considerar cuidadosamente as necessidades acústicas específicas de um espaço destinado à fala durante o processo de projeto de um auditório.

Em recintos fechados, a propagação do som é diferente e precisa ser considerada no perfil acústico do espaço, incluindo o tempo de reverberação. Para garantir uma boa inteligibilidade, é necessário ter uma grande quantidade de energia sonora inicial e uma quantidade reduzida de energia sonora tardia. A energia sonora inicial é composta pelo som direto e pelas primeiras reflexões. Se as superfícies do ambiente forem direcionadas para refletir o som em direção à audiência, será possível aumentar a energia inicial e diminuir a energia tardia, o que torna essa técnica duplamente útil [4].

Os intervalos ideais mais curtos apresentados por António Carvalho [1]:

- Auditório (palavra) – $0,7 < TR < 0,8$ (s);
- Cinema – $0,8 < TR < 1,0$ (s).

Quadro 3.1 – Valores ideais para o Tempo de reverberação de espaços dedicados à palavra [45]

Função	TR recomendado (s)		
	Limite mínimo	Ideal	Limite máximo
Salas de leitura e de conferências	0,6	0,9 - 1,1	1,4
Cinema	0,7	0,8 - 1,2	1,3
Auditórios escolares	1,3	1,5 - 1,8	1,9

O ruído de fundo é um fator crucial na qualidade acústica de um auditório para discursos. Altos níveis de pressão sonora podem ser perturbadores para o orador e ter um impacto negativo na clareza da fala. A incomodidade é avaliada através de curvas específicas e é importante limitar os valores de NC e NR para atividades baseadas em discursos. O quadro seguinte fornece valores ideais máximos para esses parâmetros.

Quadro 3.2 - Valores máximo ideais de NR [4] e NC [26]

Tipo de Espaço	Máximo ideal	
	NC [26]	NR [4]
Salas de cinema	30	-
Salas de conferências	30	30
Pequenos auditórios (até 500 lugares)	-	25

3.3.2. AUDITÓRIOS PARA TEATRO

A visibilidade no interior dos auditórios é um fator fundamental, especialmente em teatros onde é ainda mais importante. Contudo, isso requer várias limitações no projeto, juntamente com a introdução do cenário no palco, que reduzem as opções para o design do teatro. É essencial manter uma distância adequada entre o palco e o público, a fim de permitir a captura de expressões faciais e gestos dos atores. No entanto, as pressões comerciais muitas vezes levam a projetos com uma plateia maior, resultando em erros. Portanto, a ênfase deve ser na minimização ou eliminação desses erros.

Um teatro deve garantir uma boa inteligibilidade da palavra, o que depende principalmente da proporção de energia sonora inicial e da relação entre sinal e ruído. A energia sonora inicial é mais crítica e problemas com a relação sinal/ruído geralmente só ocorrem quando as reflexões iniciais não são adequadas [4].

Quadro 3.3 - Valores ideais para tempo de reverberação em espaços de teatro [46]

Função	TR recomendado (s)		
	Limite mínimo	Ideal	Limite máximo
Drama	0,8	0,9 - 1,1	1,2
Pequenos Teatros	1,1	1,2-1,4	1,5

Há várias maneiras de organizar o espaço do teatro em relação aos, podendo ser em um ou mais níveis. É crucial que a relação entre o palco e a audiência seja considerada com prioridade no planeamento arquitetónico de um auditório. Dessa forma, existem diferentes tipologias de configuração disponíveis para envolver a área destinada ao teatro.

Nessas diversas tipologias existentes, podem destacar-se as seguintes:

- Teatro de arena – o palco encontra-se num nível inferior ao da plateia, estando esta disposta;
- em todos os lados ou ao longo de toda a circunferência do palco;
- Teatro Isabelino – a plateia envolve o palco em três lados (frente e laterais);
- Teatro com prosccénio – o palco situa-se num nível superior e a plateia tem uma disposição frontal;
- Teatro múltiplo – possibilita a montagem do palco em diversas posições.

A qualidade acústica de um teatro é fortemente influenciada pelo tipo de configuração, especialmente em relação ao grau de envolvimento com a plateia. Há diferentes ângulos de envolvimento, que variam desde os pequenos ângulos do teatro com prosccénio até aos 360° do teatro de arena. Devido à natureza direcional da voz humana, quanto maior for o ângulo de envolvimento de palco com plateia, menor deve ser a distância entre o palco e o lugar mais distante. Apesar do teatro com prosccénio ter a maior capacidade de audiência entre todos os tipos de teatros mencionados, problemas podem surgir em caso de volume excessivo. Uma solução simples é a colocação de superfícies refletoras perto dos lugares mais distantes do palco, para garantir uma boa acústica [4].

3.3.3. AUDITÓRIOS PARA MÚSICA

Para projetar uma sala de música, é necessário mais do que apenas habilidades técnicas ou científicas, é preciso uma abordagem artística. Além de garantir as melhores condições para a execução musical, é essencial que o espaço possibilite a transmissão adequada do som para a plateia. De modo geral, um auditório deve oferecer ao público conforto, segurança, iluminação adequada, uma boa vista do palco e excelentes condições acústicas [47].

No passado, acreditava-se que o tempo de reverberação deveria aumentar com o volume da sala para compensar a diminuição da intensidade do som em espaços maiores. No entanto, atualmente, acredita-se que o tempo de reverberação ideal não está diretamente ligado ao volume da sala. Um estudo de Kuhl [48] mostrou que o tempo de reverberação ideal é praticamente independente do volume, após análise de salas com volumes entre 200 m³ e 1400 m³.

O tempo de reverberação pode dar uma indicação inicial da qualidade acústica de um auditório, mas não é suficiente para garantir uma boa qualidade. Uma difusão uniforme e a diminuição harmoniosa das reflexões são importantes para uma boa acústica. Um tempo de reverberação inferior a 1,6 segundos para as frequências de 500 Hz e 1000 Hz pode resultar em um auditório pouco vivo, de acordo com Silva [47]. A diferença de tempo entre o som

direto e a primeira reflexão é importante para a intimidade acústica, sendo que um intervalo superior a 20 milissegundos pode afetar a qualidade do som em auditórios musicais. A utilização de superfícies refletoras pode ajudar a melhorar essa qualidade. A razão entre os tempos de reverberação nas baixas e médias frequências, conhecida como "calor", também é importante para a acústica. O uso de superfícies absorventes nas baixas frequências pode reduzir o calor, e a razão ideal entre os tempos de reverberação é de cerca de 1,25.

4

ESTUDO DE CASO

4.1. AUDITÓRIO MUNICIPAL DE VILA NOVA DE GAIA

4.1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

O local de estudo é o Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia, localizado na rua de Moçambique, na freguesia de Mafamude e Vilar do Paraíso, formando com a Biblioteca Pública Municipal um complexo cultural.

O Auditório foi aberto ao público no dia 13 de junho de 1997, onde a Orquestra *Gulbenkian*, sob a direção do maestro Max Rabinovitsj, realizou o concerto de abertura.

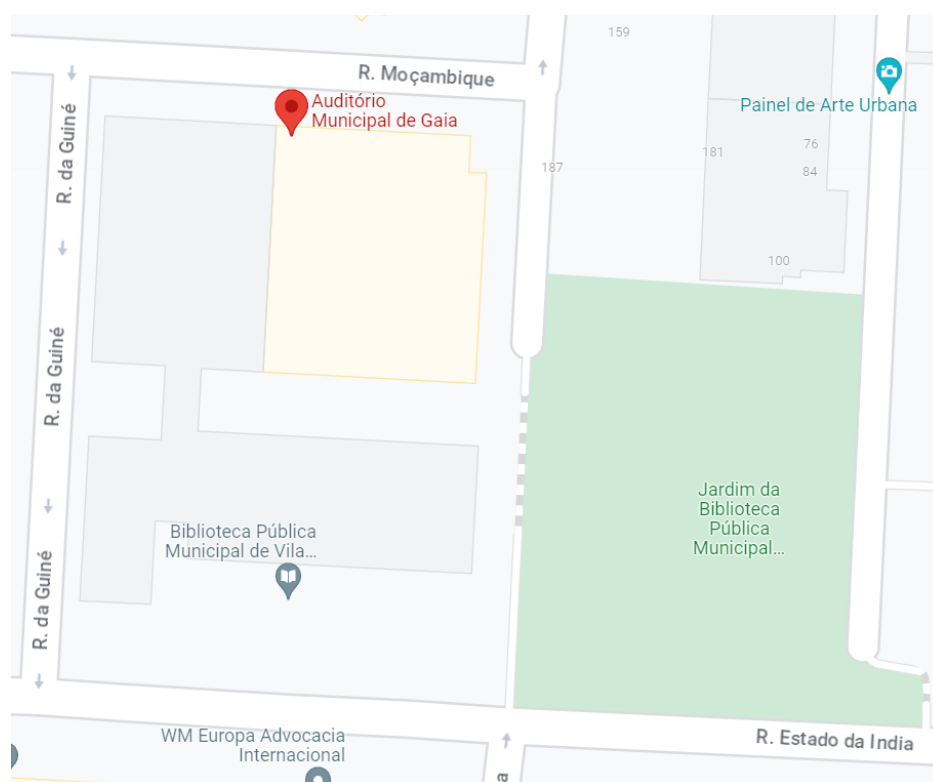


Figura 4.1 - Localização do Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia

Passados 20 anos, a 9 de setembro de 2017, o Auditório sofreu uma intervenção estética e técnica, que o requalificou, passando a constituir uma referência na zona envolvente.

O espaço possui uma área pública de aproximadamente 200 m², uma sala de espetáculos com 324 cadeiras, um palco com cerca de 110 m² de área de representação e cerca de 3218 m³ de volume.

Foi referido que o projeto, inicialmente, seria mais focado na acústica para inteligibilidade da palavra e cinema.



Figura 4.2 - Sala de espetáculos do Auditório Municipal de Gaia (foto do autor)

Segundo a planta na Fig. 4.3, a sala apresenta 12 fileiras de assentos com uma coxia central e três saídas.

A sala apresenta também um fosso de orquestra que é substituído manualmente.

Não existindo painéis difusores, representa-se no corte da Fig. 4.4, que o teto apresenta uma longa curvatura de maneira que exista maior reflexão acústica para a audiência.

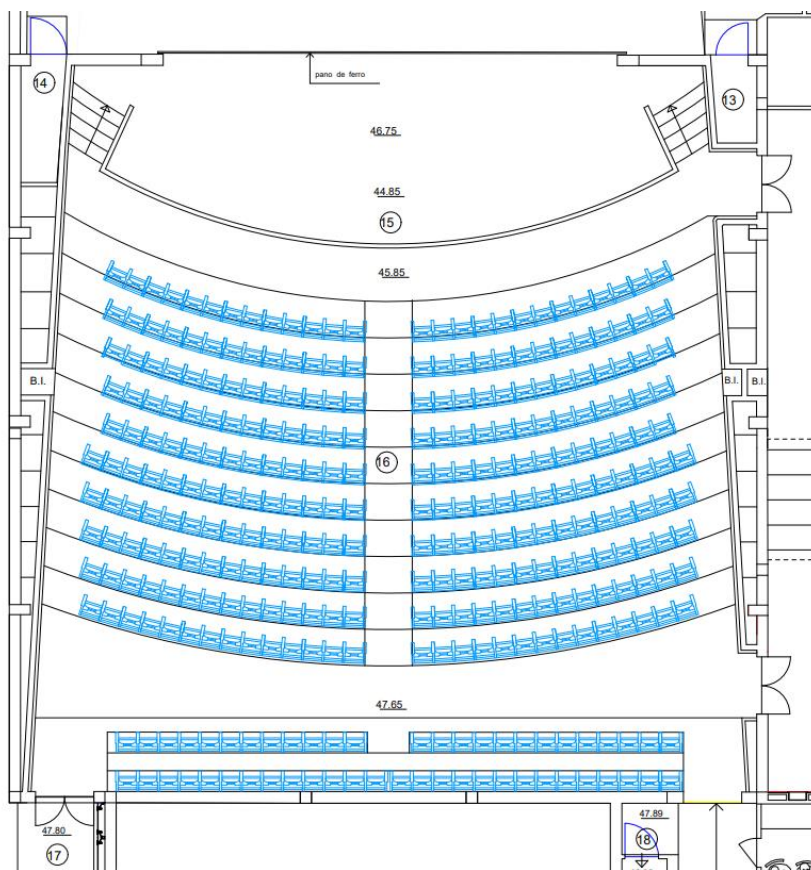


Figura 4.3 – Planta do Auditório Municipal de Gaia (fornecido pela empresa INACOUSTICS - Engenharia Acústica, Vibrações e Ambiente Lda.)

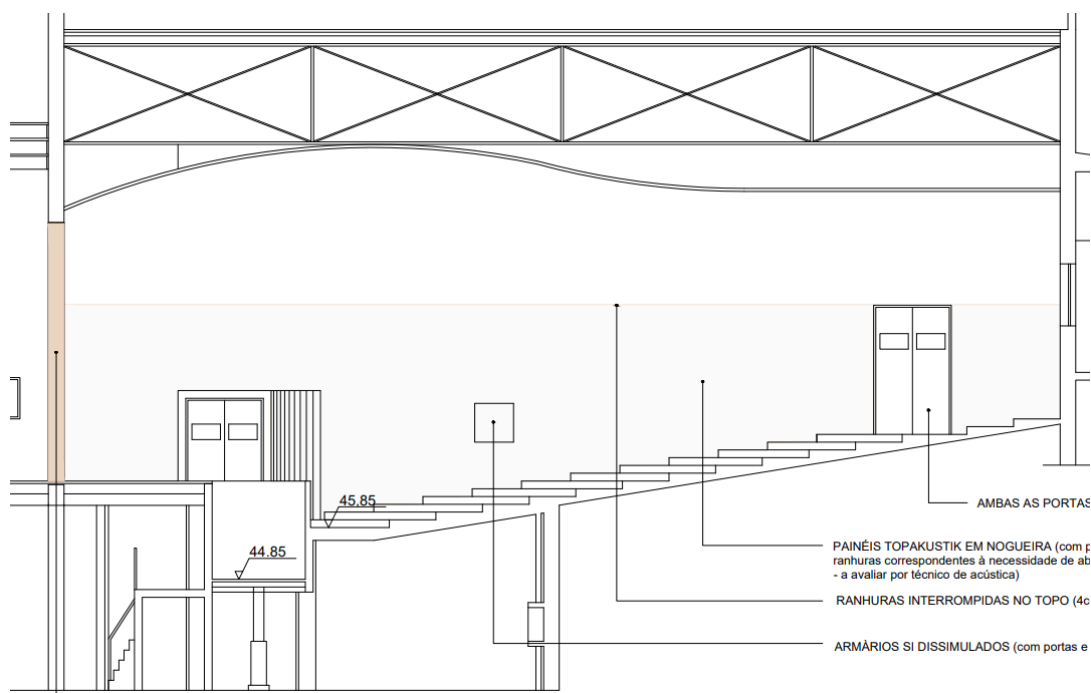


Figura 4.4 - Corte do Auditório Municipal de Gaia (fornecido pela empresa INACOUSTICS - Engenharia Acústica, Vibrações e Ambiente Lda.)

4.1.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E ARQUITETÓNICA

A sala contém ressoadores agrupados nas paredes (apresentado nas figuras 4.7 e 4.8) e cadeiras bastante confortáveis (da firma espanhola FIGUERAS) e muito estofadas (muito absorventes) com furação por baixo dos assentos que promovem absorção (as quais são observadas nas figuras 4.5 e 4.6).



Figura 4.5 e 4.6 - Cadeiras da sala de espetáculo da marca FIGUEIRAS (fotos do autor)



Figura 4.7 e 4.8 – Ressonadores de som (fotos do autor)

As paredes são feitas de Painéis TOPAKUSTIK em Nogueira (com perfurações e espaçamentos de ranhuras correspondentes à necessidade de absorção acústica, que neste caso é mais focado na inteligibilidade da palavra e cinema), pode ser observado na figura 4.9.

É de salientar que existe, no topo dos painéis, umas ranhuras interrompidas no topo, de 4 cm.

Na figura 4.9, é notória a furação nos painéis de madeira na parede.

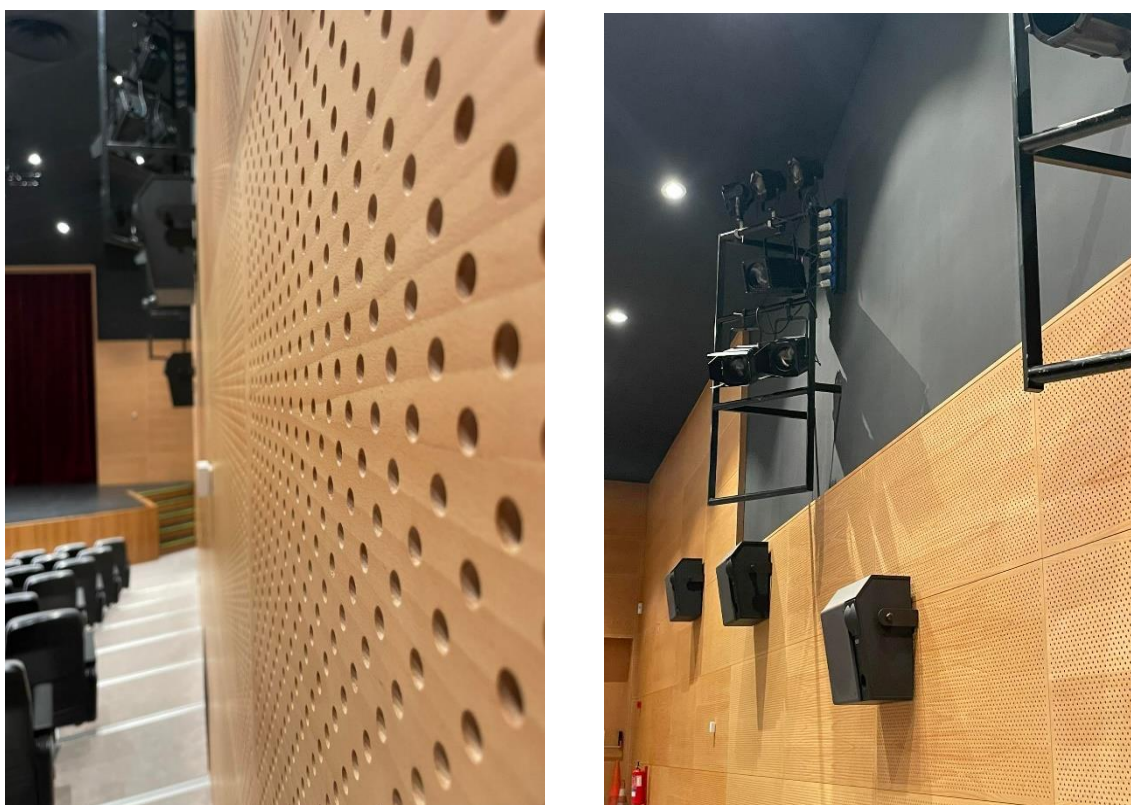


Figura 4.9 e 4.10 – Parede em Painéis TOPAKUSTIK em Nogueira com furação (fotos do autor)

4.2. METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS

4.2.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS MEDIDOS

Para caracterizar a sala do Auditório Municipal de Gaia em termos acústicos, é essencial recolher o conhecimento de parâmetros acústicos objetivos específicos. Com o intuito de realizar essa caracterização, o Engenheiro António Eduardo Batista da Costa utilizou os equipamentos fornecidos pelo Laboratório de Acústica da FEUP para efetuar medições dos referidos parâmetros acústicos:

- Tempo de Reverberação;
- Nível de pressão sonora do ruído de fundo;
- Nível de pressão sonora do ruído de equipamentos;
- RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*).

O tempo de reverberação (TR), como foi referido no capítulo 2 de “Conceitos Acústicos”, refere-se ao tempo que demora para o nível de pressão sonora diminuir em 60 dB, onde é realizado decaimentos de 20 dB ou 30 dB (T_{20} e T_{30}), uma vez que a fonte sonora foi desligada abruptamente.

O tempo reverberação relaciona-se diretamente com a absorção do auditório e a sua geometria.

É possível avaliar o ruído de fundo no interior do auditório, excluindo a ocupação e desligando os sistemas de climatização, a fim de determinar os níveis de pressão sonora resultantes exclusivamente do ruído externo. A medição desse parâmetro é realizada por meio da obtenção do nível de pressão sonora contínuo equivalente (L_{eq}) em dB, o qual é posteriormente ponderado utilizando o filtro A – L_{Aeq} (em dB). Essa ponderação envolve correções que visam igualar a sensibilidade dos equipamentos à do ouvido humano.

Realizou-se a medição do ruído proveniente dos equipamentos de climatização (AVAC) enquanto estes se encontravam em funcionamento, com o objetivo de avaliar os níveis de pressão sonora presentes no auditório e determinar se o seu uso se torna incômodo ou não para o público. Da mesma forma, foram obtidos o nível de pressão sonora contínuo equivalente (L_{eq}) em dB e o mesmo valor com a aplicação da ponderação do filtro A.

Os técnicos do Auditório Municipal de Gaia referiram que a insuflação do ar do sistema de climatização (AVAC) está a ser realizado por baixo e a saída por cima, conseguimos observar nas figuras 4.11 e 4.12, o que resulta num incremento nos níveis de pressão sonora produzidos por estes equipamentos.

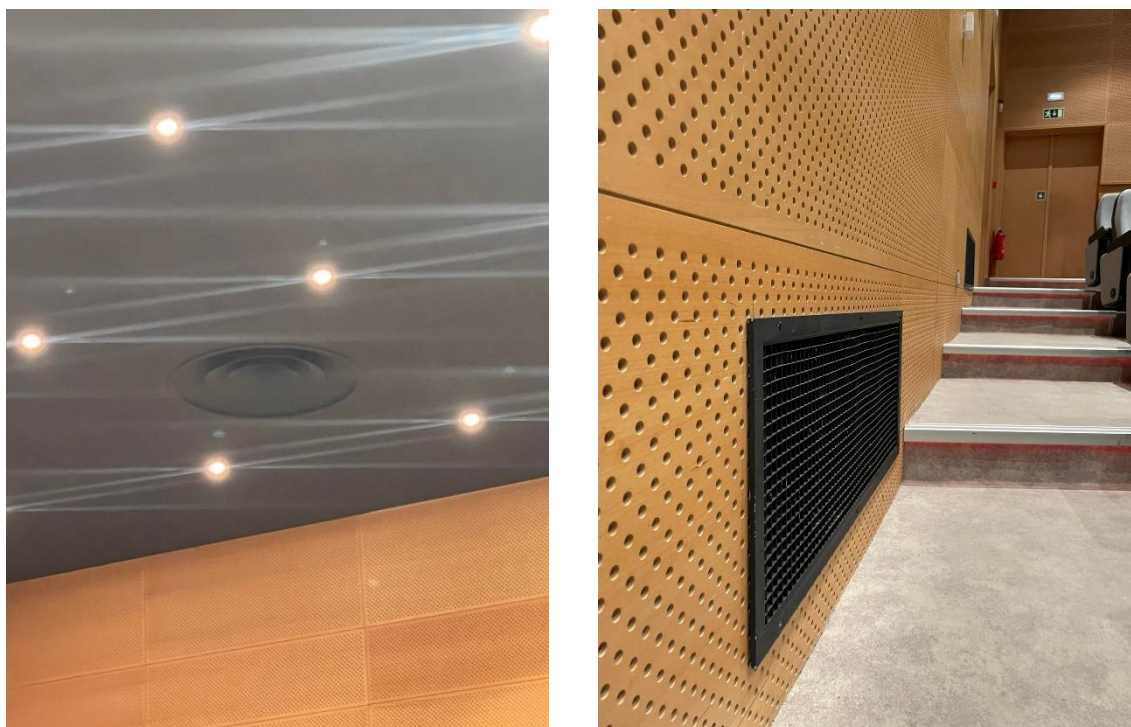


Figura 4.11 e 4.12 - Sistema de Climatização (AVAC) – (fotos do autor)

Tendo em consideração que a principal ênfase do estudo do auditório é a palavra, a inteligibilidade da palavra desempenha um papel crucial. O parâmetro RASTI é utilizado para

obter conclusões sobre essa característica do ambiente. As características do som emitido por uma fonte sonora são alteradas ao serem percebidas pelo recetor devido a distorções, interferências do ruído de fundo e às características reverberantes do ambiente.

4.2.2. EQUIPAMENTO UTILIZADO

A medição realizada nos ensaios acústicos foi empregue usando os equipamentos seguintes (os quais pertencem ao Laboratório de Acústica da FEUP):

- Fonte sonora Brüel & Kjær, modelo 4224 (Fig. 4.13);
- Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260 (Fig. 4.14);
- Equipamento de RASTI Brüel & Kjær (Fig. 4.15) - Emissor, modelo 4225 e recetor, modelo 4419;
- Microfone de 13 mm Brüel & Kjær, modelo 4189;
- Tripé portátil Brüel & Kjær, modelo UA0049 (Fig.4.16);
- Medidor de distância Bosch DLE-40.



Figura 4.13 - Fonte sonora Brüel & Kjær, modelo 4224 (foto do autor)

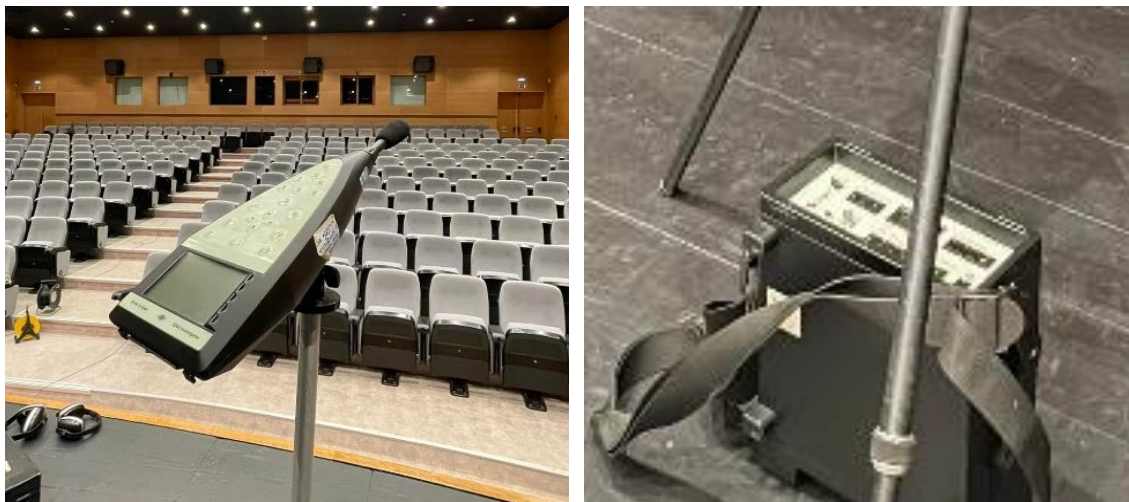


Figura 4.14 e 4.15 - Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260 e Equipamento de RASTI Brüel & Kjær - Emissor, modelo 4225



Figura 4.16 - Tripé portátil Brüel & Kjær, modelo UA0049

4.2.3. EQUIPAMENTO UTILIZADO

Para avaliar o **tempo de reverberação**, foi usado uma fonte sonora (FS) capaz de gerar um nível de pressão sonora suficientemente alta para evitar a influência do ruído de fundo, juntamente com um recetor, um sonómetro. A fonte foi posicionada na área central do palco, enquanto o medidor foi colocado a aproximadamente 1,30 metros de altura.

No estudo realizado, o ruído emitido pela fonte possui características semelhantes a um ruído rosa e tem uma duração de 10 segundos. O medidor regista tanto o nível de pressão sonora quanto o tempo de decaimento de 30 dB nas bandas de frequência de oitava, abrangendo o intervalo de 63 a 8000 Hz. No entanto, para este estudo em particular, serão consideradas apenas as bandas de frequência que variam de 125 a 4000 Hz.

Na execução destes parâmetros, foram realizadas medições em três pontos diferentes da sala, os quais podem ser visualizados na figura 4.17.

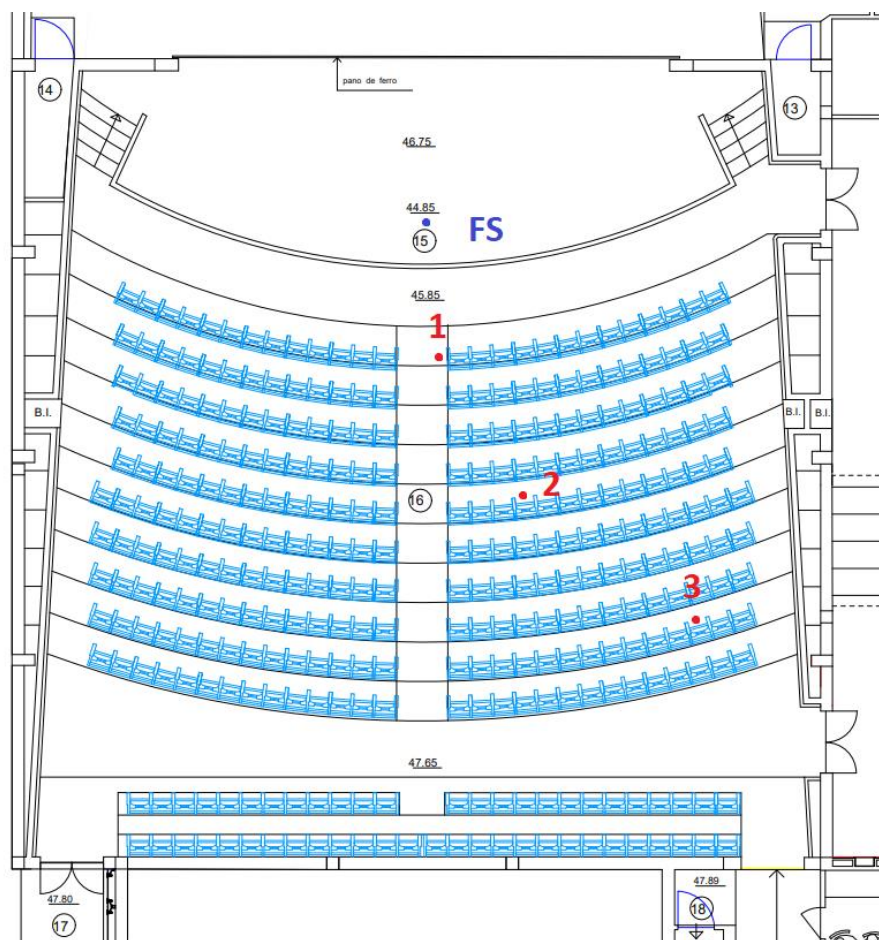


Figura 4.17 - Planta do auditório com a localização dos três pontos de medição do tempo de reverberação e fonte sonora (FS) [adaptado da figura 4.3]

Foram realizadas avaliações dos **níveis de pressão sonora do ruído de fundo** e dos **equipamentos de climatização (AVAC)** em dois diferentes locais do auditório, conforme representado na figura 4.18, pois, serão os pontos mais críticos a avaliar na sala em questão. O ponto de medição 1 corresponde a uma posição situada na área da coxa central e o ponto 2 num local perto de uma das saídas da sala e junto de um dos pontos de climatização (saída de ar). Utilizando o sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260, juntamente com um tripé portátil Brüel & Kjær, modelo UA0049, foram feitas medições dos níveis de pressão sonora nos respetivos pontos. Para cada ponto, foram registados os valores das bandas de frequência de oitava, abrangendo de 16 Hz a 16 kHz. Foi calculado o nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}) e também o valor com a

aplicação do filtro A (L_{Aeq}). As medições foram registadas com e sem o funcionamento do equipamento de climatização (AVAC).

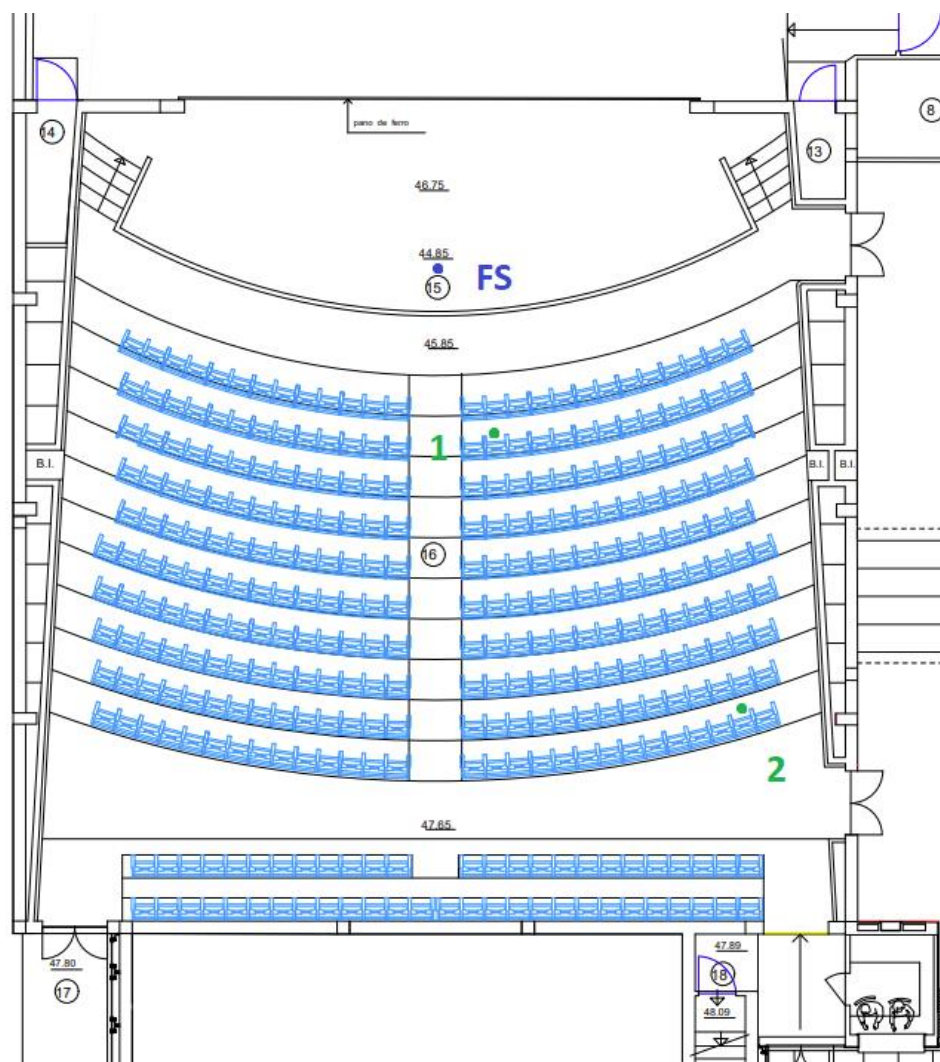


Figura 4.18 -- Planta do auditório com a localização dos dois pontos de medição nível de pressão sonora do ruído de fundo e dos equipamentos de climatização (AVAC) e fonte sonora (FS) [adaptado da figura 4.3]

Para obter os valores do parâmetro **RASTI**, foram realizadas medições em dez pontos diferentes do espaço, conforme indicado na figura 4.19, onde não se justificou medir nas filas do meio pois é nas extremidades onde ocorre maior variância acústica e onde será mais crítico. Os equipamentos utilizados foram um emissor (FS) e um recetor da marca Brüel & Kjær, especificamente os modelos 4225 e 4419, respetivamente. O emissor foi posicionado de forma fixa no mesmo local da fonte sonora utilizada em outras medições, ou seja, na região central do palco. Já o recetor foi utilizado de forma móvel, sendo deslocado pelo engenheiro António Eduardo Costa durante os testes.

Nesta análise, o recetor filtra o ruído proveniente da fonte sonora exclusivamente nas bandas de frequência de oitava entre 500 Hz e 2000 Hz. A medição é feita de forma simples, através de um processo de "single", com duração de 8 segundos cada. Os níveis de pressão sonora de referência podem ser de 59 dB na banda de 500 Hz e 50 dB na faixa de 2000 Hz. Porém,

levando em consideração o tamanho do auditório, utilizou-se o modo "Ref. + 10 d", que implica um aumento de 10 dB nos níveis de pressão sonora.

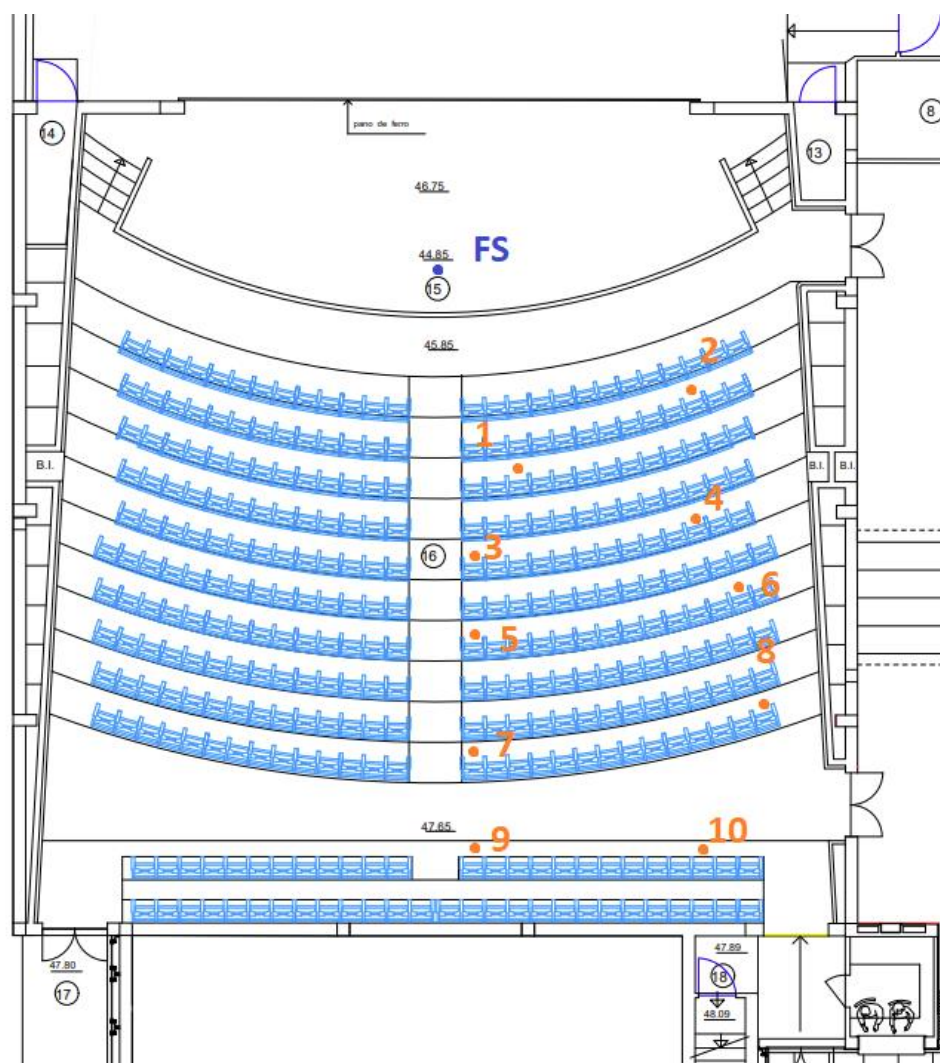


Figura 4.19 - Planta do auditório com a localização dos 10 pontos de medição do RASTI e fonte sonora (FS) [adaptado da figura 4.3]

A uma altura aproximada de 1,30 m, o emissor de RASTI é colocado num tripé e direciona o ruído ao longo do eixo longitudinal do auditório. Em todos os dez pontos de medição, o recetor posicionou-se a uma altura de aproximadamente 0,80 m, equivalente à altura dos ouvidos do público, sentados na plateia. São realizadas repetidamente cinco leituras em cada ponto, e a média aritmética é calculada a partir delas.

Na interpretação dos resultados, é possível avaliar a inteligibilidade da palavra e a qualidade acústica do ambiente. Valores mais altos do RASTI, próximos de 1, indicam uma melhor inteligibilidade da fala. Por outro lado, valores mais baixos revelam uma maior degradação da inteligibilidade devido à presença de reverberação excessiva e/ou interferência de ruído.

4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.3.1. PREÂMBULO

Discutiu-se os resultados das medições realizadas no Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia. Esses resultados serão comparados com os valores regulamentares, permitindo-nos tirar conclusões sobre a qualidade acústica do espaço em análise.

Além dos valores mencionados, também serão apresentados valores ideais para todos os parâmetros analisados, bem como comparações com espaços similares ao caso em estudo.

No que diz respeito ao ruído de fundo, serão levadas em consideração as curvas NC e NR, de maneira a classificar o ambiente sonoro do auditório em termos de desconforto.

4.3.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O TR foi medido através do sonómetro, nos três pontos referidos anteriormente. O quadro 4.1 abaixo, apresenta os valores registados e a sua correspondente média, por banda de frequência.

Quadro 4.1 - Medição do tempo de reverberação médio, em três pontos de medição diferentes, por bandas de frequência de 1/1 de oitava

TR ₃₀ médio (s)					
Freq.(Hz)	Posição			Média	
	1	2	3		
	P1	P2	P3		
125	1,45	1,10	1,18	1,20	
250	0,94	0,63	0,71	0,80	
500	0,81	0,70	0,70	0,74	0,83
1k	0,84	0,86	0,81	0,84	
2k	0,90	0,94	0,92	0,92	
4k	0,85	0,85	0,86	0,85	

Consegue-se constatar, avaliando o quadro 4.1, que os maiores valores de TR são alcançados na banda de frequência de oitava de 125 Hz.

O RRAE refere, para a palavra, o tempo de reverberação máximo, tendo por base a sua volumetria. Com base na planta e corte que foi fornecido, calculou-se a volumetria aproximada da sala, a qual corresponde ao volume de 3219 m³. Ao utilizar o valor do volume fornecido na equação prescrita pelo RRAE para calcular o tempo de reverberação em auditórios com volumes entre 250 e 9000 m³, obtemos um resultado de 0,92 segundos para o tempo de reverberação máximo. O RRAE estabelece que, para o cálculo do TR, deve-se considerar apenas os valores obtidos nas bandas de frequência de 500 a 2000 Hz (conforme indicado no quadro 4.1, na parte sombreada). Portanto, o valor do TR obtido para o auditório em questão é de 0,83 segundos. Assim, analisando esta aplicação do regulamento conforme o esquema da figura 4.21, há indicações de conformidade com o RRAE nesta situação.

Na figura 4.20, demonstra-se o TR nas três posições diferentes, valores do quadro 4.1.

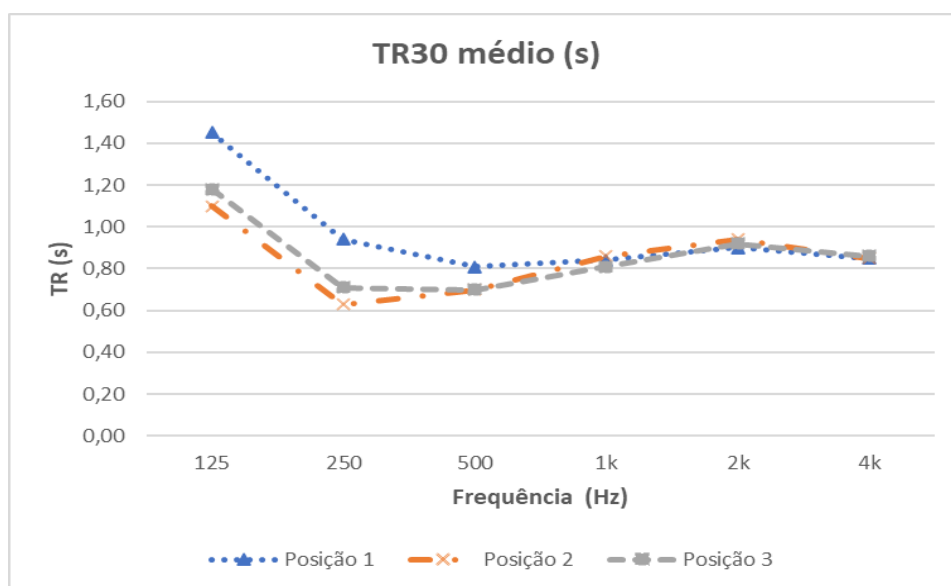


Figura 4.20 - Tempo de reverberação médio, em três pontos de medição diferentes, por bandas de frequência 1/1 de oitava

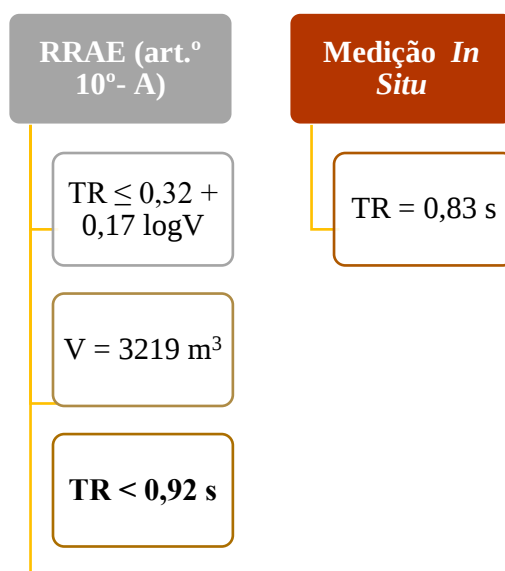


Figura 4.21 - Esquema dos tempos de reverberação regulamentar, aplicado para o auditório em causa

Os valores ideais de tempo de reverberação variam de acordo com diferentes tipos de atividades que ocorrem, e esses valores são mencionados por vários autores em suas obras. *Cavanaugh* [46] fornece valores ideais de tempo de reverberação com base no uso específico, para as frequências de 500 e 1000 Hz. No presente trabalho, os valores mais relevantes foram reunidos no quadro 4.3. Em *Acústica Ambiental e de Edifícios*, também são mencionados como ideais, para as bandas de frequência de oitava de 500 e 1000 Hz, os tempos de reverberação indicados no quadro 4.3 [1].

O tempo de reverberação obtido no Auditório Municipal de Gaia, para as mesmas frequências dos valores é de 0,83 segundos (valor usado nas comparações feitas com os valores ideais nos quadros 4.2 e 4.3).

Quadro 4.2 - Comparação dos valores ideais do tempo de reverberação (500 – 1000 Hz) em função do tipo de utilização [46] com o valor obtido no auditório de Gaia (0,83 s)

Função		TR recomendado (s)			Comparação com o Auditório Municipal de Gaia
		Limite mínimo	Ideal	Limite máximo	
Drama		0,8	0,9-1,1	1,2	✓
Salas de leitura e de conferências		0,6	0,9-1,1	1,4	✓
Cinema		0,7	0,8-1,2	1,3	✓ ✓
Pequenos teatros		1,1	1,2-1,4	1,5	×
Auditórios escolares		1,3	1,5-1,8	1,9	×
Auditórios com fins múltiplos		1,4	1,6-1,8	1,9	×
Grupos musicais de dança, com sistema de amplificação sonora		0,8	1,0 - 1,2	1,3	✓
Música	Comédia musical tipo <i>Broadway</i>, operetas	1,0	1,2-1,4	1,5	×
	Concertos semi-clássicos com sistema de amplificação sonora	1,1	1,2-1,6	1,9	×
	de Câmara	1,2	1,4-1,7	1,9	×
	Ópera	1,3	1,5-1,8	1,9	×
	Coros	1,6	1,7-2,0	2,2	×
	Sinfónica (romântica)	1,6	1,7-2,1	2,2	×
	Orquestra	1,9	2,0-3,4	-	×
✓ ✓ - o TR do Auditório Municipal de Gaia é ideal para a função					
✓ - o TR do Auditório Municipal de Gaia encontra-se dentro dos limites recomendados para a função					
× - o TR do Auditório Municipal de Gaia não é adequado para a função					

Ao analisar os quadros apresentados, pode-se observar algumas semelhanças. Uma delas é o fato de que atividades como conferências, teatros e cinemas exigem um tempo de reverberação reduzido, enquanto a música requer valores mais elevados. No entanto, é importante ressaltar que os valores de tempo de reverberação na música variam consideravelmente, dependendo do gênero musical em questão.

O Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia, como mencionado anteriormente, é utilizado para uma ampla variedade de eventos, incluindo cinema e concertos de diversos tipos musicais.

Devido a essa diversidade de atividades, uma análise discriminada para cada uma delas é mais apropriada. Isso permite concluir quais atividades apresentam um desempenho acústico mais adequado no espaço em estudo.

Quadro 4.3 – Comparação dos valores ideais do tempo de reverberação (500 – 1000 Hz) em função do tipo de utilização [1] com o valor obtido no auditório de Gaia (0,83 s)

Função		TR ideal (s)	Comparação com o Auditório Municipal de Gaia
Auditório (palavra)		0,7-0,8	✓
Teatro		0,7-0,9	✓
Cinema		0,8-1,0	✓
Música	de câmara	1,4-1,7	×
	Sinfónica	1,4-2,2	×
	de Órgão	2,5-3,5	×
	Coros gregorianos	3,0-4,0	×
✓ - o TR do Auditório Municipal de Gaia é ideal para a função			
× - o TR do Auditório Municipal de Gaia não é adequado para a função			

É importante destacar, inicialmente, que o limite estabelecido pelo RRAE ($TR < 0,92$ s) é cumprido devido aos resultados das medições ($TR = 0,83$ s). Uma análise qualitativa mais apropriada e rigorosa sugere que os valores ideais propostos por vários autores sejam considerados em vez do limite máximo imposto pelo RRAE. Nesse seguimento, o Auditório Municipal de Gaia será analisado separadamente em relação à palavra, ao cinema e à música, a fim de se obter conclusões sobre seu comportamento acústico específico.

Contudo, considerou-se que o valor da incerteza mencionada no regulamento (de 35% para o volume em questão) é excessivamente "generoso". Portanto, acreditou-se que seja mais prudente adotar como valor de estudo a média real medida, que é igual a 0,80 s.

Nessa perspetiva, observa-se que o tempo de reverberação do auditório não corresponde aos valores ideais para atividades que exigem um parâmetro maior, como no caso da música e dentro de todos os seus diferentes tipos.

Ao comparar com o quadro 4.2, podemos concluir que o auditório em estudo é adequado para funções como salas de leitura, conferências, cinema e para atuação de grupos musicais de dança, com sistema de amplificação sonora. De acordo com o quadro 4.3, o auditório em estudo apresenta valores ideais para atividades baseadas na *palavra*. No entanto, necessitaria de maiores valores para ter as condições ideais para música. Irá ser abordado posteriormente no subcapítulo 4.3.4, onde o parâmetro RASTI será analisado para avaliar o nível de inteligibilidade alcançado no estudo de caso.

4.3.3. TIPOS DE RUÍDO

4.3.3.1. Ruído de Fundo

Este fator foi medido através do sonómetro, nos dois pontos referidos anteriormente. O quadro 4.1 abaixo, apresenta os valores registados e a sua correspondente média, por banda de frequência.

No quadro 4.4, estão registados os valores das medições realizadas para os níveis de pressão sonora do ruído de fundo no Auditório Municipal de Gaia. Também são fornecidos os parâmetros L_{eq} (nível de pressão sonora equivalente, em dB, que é uma medida energética

utilizada para avaliar o nível de ruído em um local específico durante um determinado intervalo de tempo) e L_{Aeq} (em dB, que representa o mesmo parâmetro, mas desta vez com a ponderação do filtro A).

Quadro 4.4 – Níveis de pressão sonora do ruído de fundo, em dB, em cada ponto de medição, para as bandas de frequência dos 16 a 16000 Hz, e nível sonoro equivalente, sem e com filtro A

Lruído de Fundo (dB)				
Ponto		1	2	Média Energética
Posição		P1	P2	
Freq. (Hz)	16	39,10	43,00	41,47
	31,5	40,30	40,80	40,56
	63	30,70	31,50	31,12
	125	19,50	21,50	20,61
	250	15,50	15,70	15,60
	500	11,10	12,00	11,57
	1k	11,20	13,90	12,76
	2k	9,70	13,50	12,00
	4k	8,30	9,80	9,11
	8k	8,60	9,30	8,96
	16k	8,80	8,90	8,85
L_{eq}		51,10	52,30	51,74
L_{Aeq}		22,60	24,60	23,71

A Figura 4.22 apresenta um gráfico dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo em dois pontos de medição, nas bandas de frequência de oitava que variam de 31 Hz a 16000 Hz. É evidente que os maiores valores de níveis sonoros do ruído de fundo estão nas frequências graves, chegando a 43 dB, e é notável que a variação dos valores ao longo das diferentes bandas de frequência é decrescente e bastante semelhante.

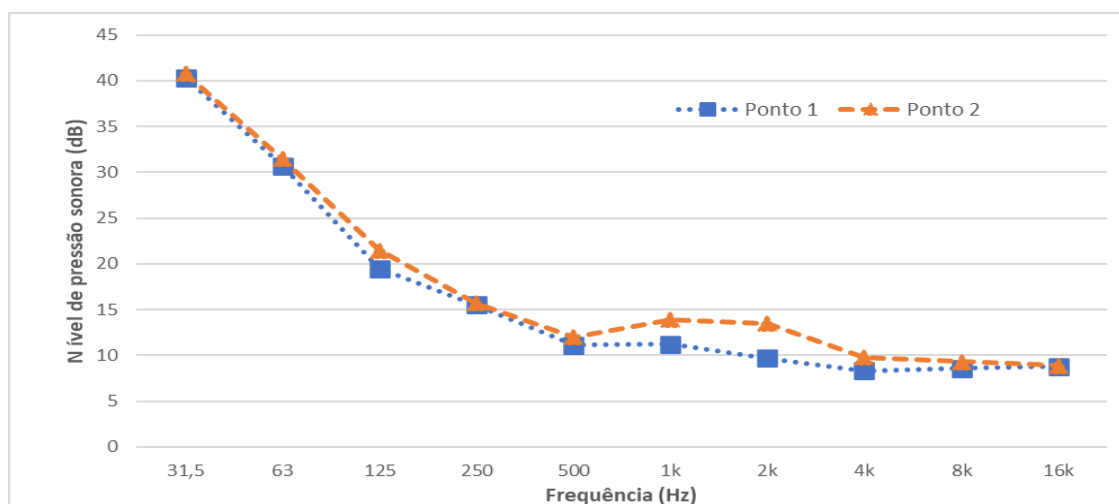


Figura 4.22 - Níveis de pressão sonora do ruído de fundo, em dB, por banda de frequência de oitava, dos 31 a 16000 Hz, nos dois pontos de medição

Na Figura 4.23, é mostrada a aplicação do filtro A aos valores dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo. Os maiores valores são observados nas frequências médias, que são as bandas de frequência mais audíveis, e os níveis mais altos estão na banda de oitava de 2000 Hz. Portanto, embora os valores mais elevados tenham sido registados para as frequências mais baixas, é nas frequências médias, de 500 Hz a 2000 Hz, que o ouvinte sente o ruído com maior intensidade.

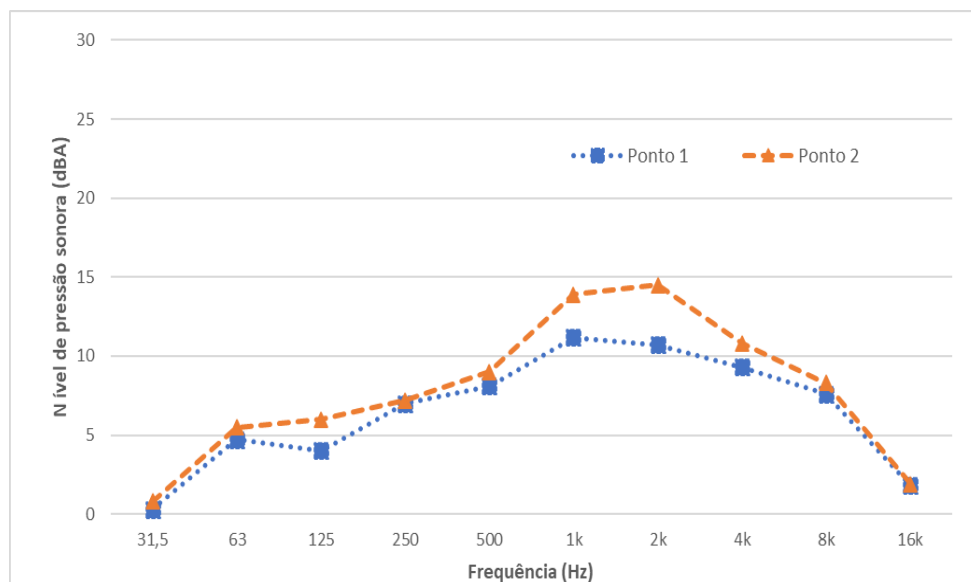


Figura 4.23 -Variação dos níveis de pressão sonora, L_{Aeq} , em dB, por banda de frequência de oitava, dos 31 a 16000 Hz, nos dois pontos de medição

Posteriormente, o ruído de fundo será analisado novamente neste trabalho, usando as curvas de incomodidade NC e NR, a fim de obter conclusões sobre a qualidade acústica do auditório em termos de ruído de fundo e até que ponto esse ruído poderá ser incomodo para quem assiste.

4.3.3.2. Ruído de Equipamentos – Sistema de Climatização (AVAC)

O Auditório Municipal de Gaia contém um sistema de climatização (AVAC). Será expectável existir aumento dos níveis de pressão sonora em comparação com o ruído de fundo.

O quadro 4.5, em baixo referido, demonstra-se as medições do nível de pressão sonora com o AVAC em funcionamento.

As curvas da figura 4.24 representam os valores do quadro 4.5, que correspondem às oitavas de frequência de 125 a 16000 Hz. Da mesma forma que ocorre com o ruído de fundo, observa-se uma tendência decrescente dos níveis de pressão sonora nessa faixa, à medida que a frequência aumenta.

Os valores mais altos são registados nas frequências mais baixas, ultrapassando os 50 dB desta vez. No entanto, é nas oitavas de frequência de 1000 Hz e 2000 Hz que o ruído se torna mais incômodo para o ouvinte.

Quadro 4.5 – Níveis de pressão sonora do ruído de AVAC, em dB, em cada ponto de medição, para as bandas de frequência dos 16 a 16000 Hz, e nível sonoro equivalente, sem e com filtro A

Lruído AVAC (dB)				
Ponto	1	2	Média Energética	
Posição	P1	P2		
Freq. (Hz)	16	48,00	53,90	51,88
	31,5	49,50	45,70	48,00
	63	48,40	49,60	49,04
	125	46,00	47,60	46,87
	250	39,20	39,60	39,40
	500	40,40	39,30	39,88
	1k	37,20	38,00	37,62
	2k	29,40	33,30	31,77
	4k	20,70	26,70	24,66
	8k	12,70	17,80	15,96
	16k	9,60	10,50	10,07
L_{eq}		62,70	66,40	64,93
L_{Aeq}		46,20	47,10	46,67

Ao analisar o quadro 4.6, consegue-se constatar que o envolvimento do sistema AVAC eleva o nível sonora em 23,60 dB(A), valor o qual é bastante significativo.

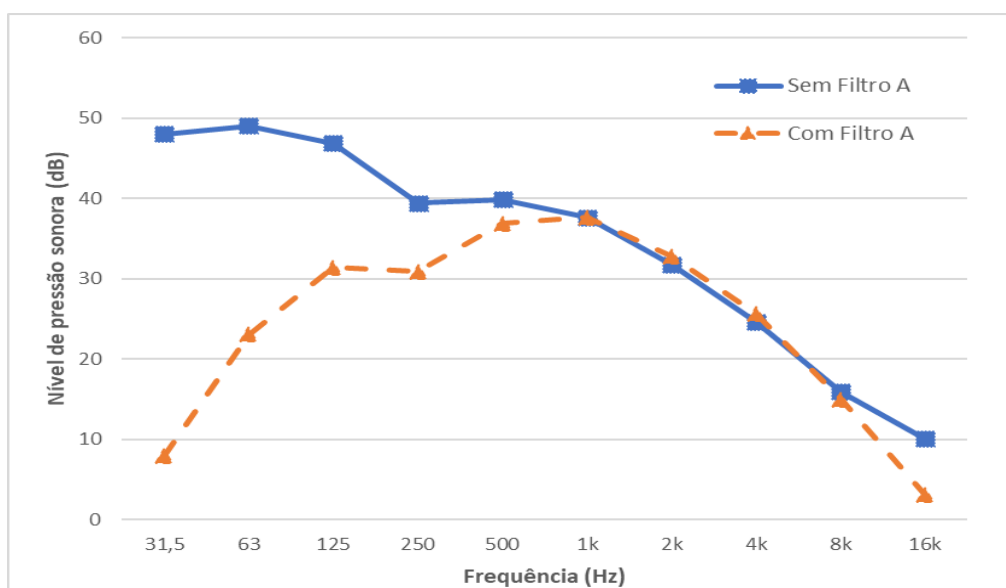


Figura 4.24 - Curvas da média dos níveis de pressão sonora do ruído AVAC nos dois pontos de medição, sem e com ponderação do Filtro A

Quadro 4.6 - Variação dos níveis de pressão sonora do ruído, L e L_A , correspondente à introdução do sistema AVAC

Variação devido ao equipamento AVAC			
Ponto		1	2
Variação com AVAC (dB)	ΔL	11,6	14,1
	ΔL_A	23,7	22,5

4.3.3.3. Curvas de Incomodidade

Os critérios de conforto acústico, conhecidos como curvas NC e NR (*Noise Rating* e *Noise Criterion*) permitem avaliar o desconforto causado pelo ruído de fundo ou equipamentos num determinado espaço. Realizou-se a sobreposição das curvas dos níveis de pressão sonora, para as diferentes condições mencionadas anteriormente, com as curvas NC e NR, possibilitando a obtenção dos respetivos valores dos parâmetros e a sua comparação com os valores recomendados.

As curvas NC são definidas para as bandas de frequência entre 63 e 8000 Hz, enquanto as curvas NR incluem, além dessas bandas, a banda de 31 Hz. As figuras 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28 apresentam as sobreposições das curvas de níveis de pressão sonora nos dois pontos onde as medições foram realizadas, com as curvas NC e NR. As figuras 4.25 e 4.26 mostram a curva de níveis de pressão sonora do ruído de fundo, as figuras 4.27 e 4.28 correspondem ao AVAC.

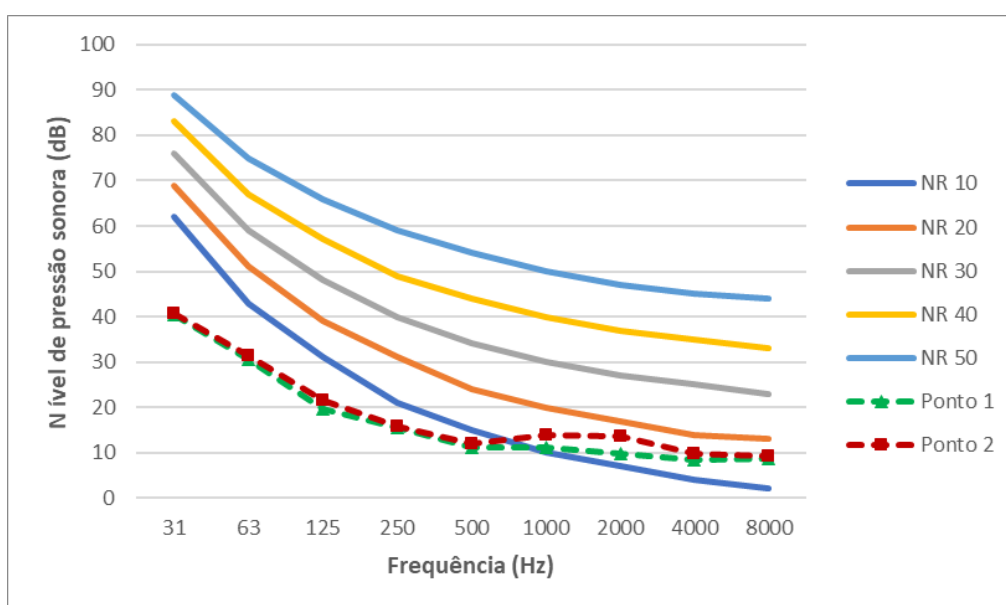


Figura 4.25 - Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo nos dois pontos com as curvas NR

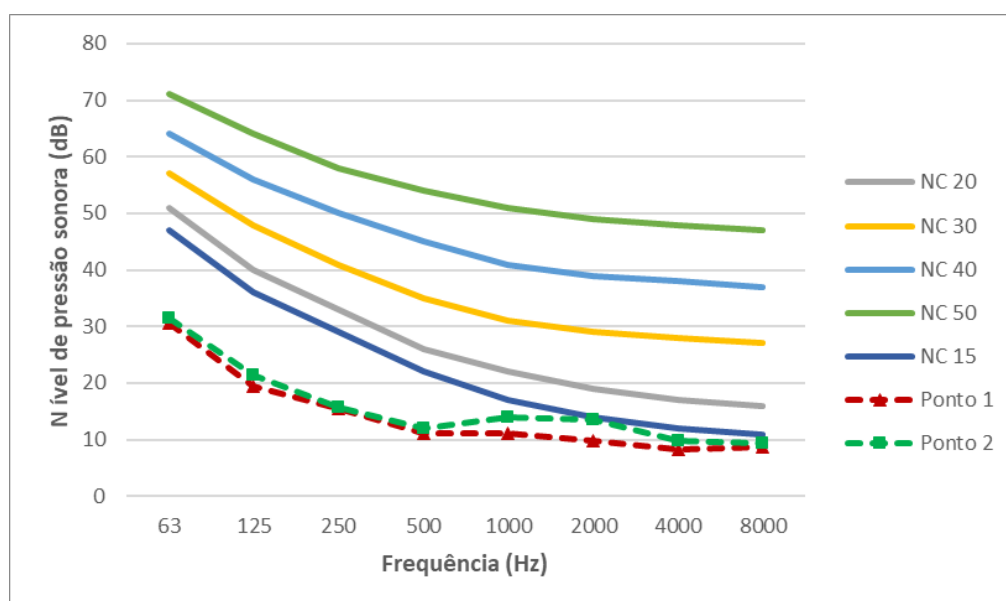


Figura 4.26 - Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo nos dois pontos com as curvas NC

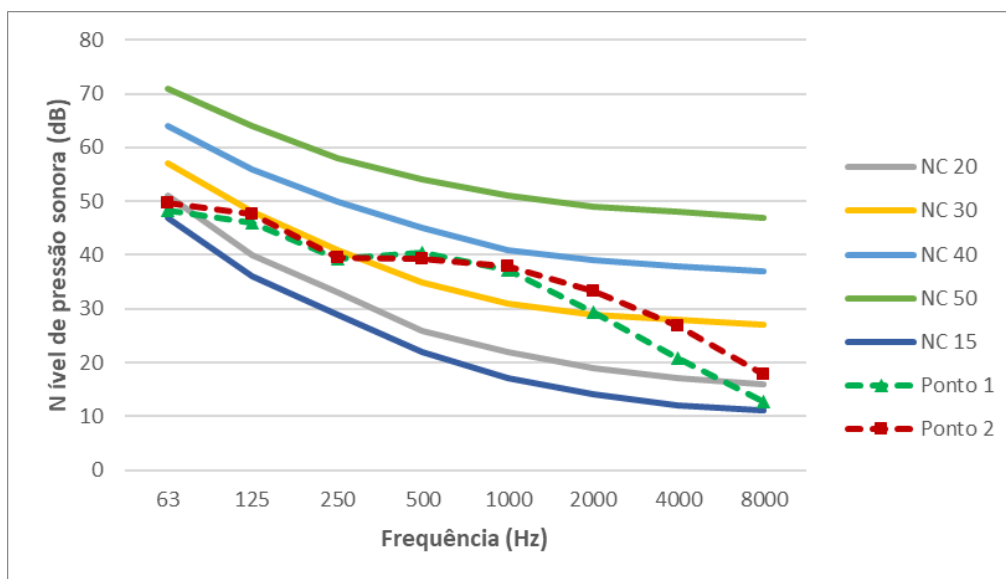


Figura 4.27 - Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de equipamentos de AVAC nos dois pontos com as curvas NC

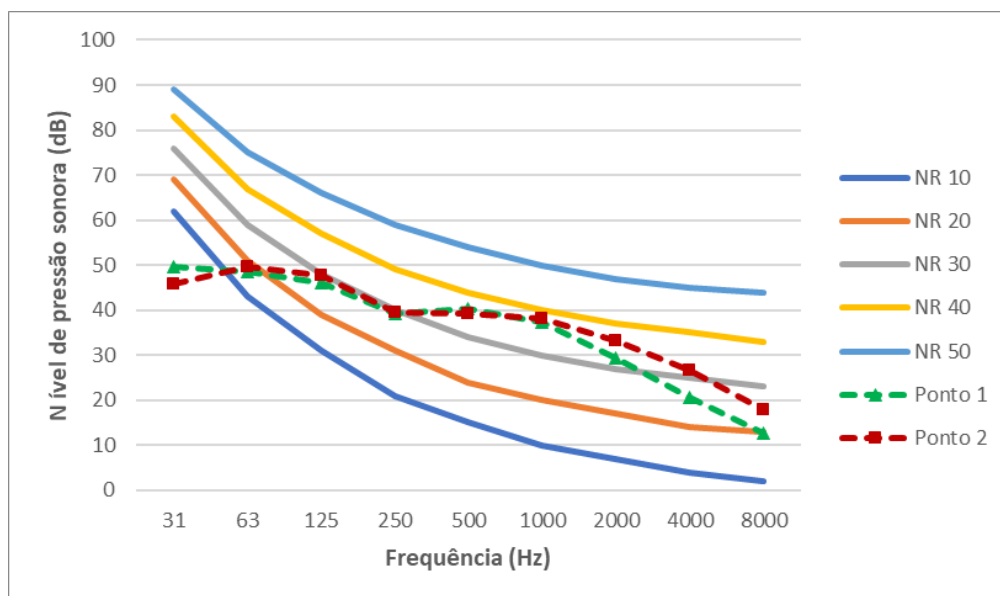


Figura 4.28 - Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de equipamentos de AVAC nos dois pontos com as curvas NR

Após examinar cuidadosamente os gráficos, foi viável extrair os dados destacados no quadro 4.7. Esses valores representam os picos alcançados pelas curvas NC e NR nas sobreposições com as curvas de níveis de pressão sonora.

Fica claramente evidente que os valores associados à ausência de sistema de AVAC são os mais baixos, enquanto os valores relacionados ao AVAC são os mais elevados.

Quadro 4.7 – Valores dos parâmetros NC e NR para as diferentes medições efetuadas

Ruído	NC			NR		
	Pontos		Gama de variação	Pontos		Gama de variação
	1	2		1	2	
Sem AVAC	20	16	16-20	17	13	13-17
Com AVAC	36	38	36-38	37	38	37-38

Os valores máximos recomendados, para os níveis de NR e NC, para diversas funções no tipo de espaço, são representados no quadro 4.8, onde estão considerados os valores propostos por Barron [4] e Silva [47].

Quadro 4.8 – Valores máximos recomendados dos níveis de NC e NR [4], [6] e [47]

Tipo de Espaço	Máximo Ideal	
	NC	NR
Salas de cinema	30	-
Teatros (500 lugares, sem amplificação sonora)	25	-
Salas de concertos	20	-
Salas de conferencias	30	30
Pequenos auditórios (até 500 lugares)	-	25
Salas de ópera e teatros	-	20

Comparando os valores tabelados no quadro 4.8 e os valores dos parâmetros NC e NR obtidos no quadro 4.7, é de salientar que se consegue atingir os valores mínimos recomendados para que o Auditório Municipal de Gaia, idealmente, exerça uma boa acústica para a função de sala de cinema, teatro, sala de concerto (no limite ideal), sala de conferência, pequeno auditório e sala de ópera e teatro.

No entanto, com o uso do AVAC, estes parâmetros sobem, impossibilitando uma boa acústica para qualquer tipo de espaço.

Os técnicos do Auditório Municipal de Gaia referiram que, para “resolver” este problema, anteriormente ao início de qualquer evento, fazem a climatização da sala e desligam antes de começar o espetáculo para conseguir a acústica necessária para o espetáculo.

4.3.4. RASTI

4.3.4.1. Preâmbulo

No decorrer desta avaliação, foram realizadas dez medições considerando as diferentes opções disponíveis no auditório. Foi necessário mais pontos de medição que nos outros casos pois, no caso do RASTI, como se trata de avaliação de um parâmetro focado na palavra, é necessário obter a maior amostra espacial possível da sala. Inicialmente, a fonte sonora foi avaliada sem sistema de climatização ligado (AVAC). Em seguida, testado com esse sistema ligado, em pontos que se considerou mais relevantes para o parâmetro avaliado.

4.3.4.2. RASTI sem o sistema de climatização ligado (AVAC)

No quadro 4.9, estão apresentados os valores registados do parâmetro RASTI sem o AVAC ligado, sendo realizadas três medições em cada ponto e calculada a média aritmética como valor relevante para a análise.

Os valores obtidos são semelhantes, variando entre 0,63 e 0,74, destacados como mínimo e máximo, respetivamente. O valor máximo é observado A13 (ponto 1), que corresponde à fila mais próxima do palco dentre as analisadas e ao local central mais próximo da fonte sonora.

É compreensível que nesse local a inteligibilidade da palavra seja percebida de forma mais clara. Por outro lado, o local com a menor inteligibilidade é A4 (ponto 2), situado na mesma fila que o ponto máximo valor observado, mas mais afastado da zona central (mais próximo da parede lateral). É relevante salientar que o ponto 2 se encontra perto de uma saída.

É interessante notar que o local mais afastado não apresenta o valor mais baixo de RASTI, provavelmente devido à sua localização em uma área mais confinada, com a altura sendo aproximadamente a mesma que a da fonte sonora. Essa característica resulta em um maior número de reflexões que alcançam esse local, aumentando ligeiramente o valor do RASTI.

Quadro 4.9 - Valores de RASTI, sem o equipamento de climatização ligado (AVAC)

RASTI sem AVAC					
Posição		Medição			
Lugar	Ponto	1	2	3	Média
A13	1	0,74	0,74	0,73	0,74
A4	2	0,63	0,63	0,63	0,63
C13	3	0,70	0,70	0,70	0,70
C4	4	0,69	0,68	0,68	0,68
F14	5	0,72	0,71	0,70	0,71
F4	6	0,67	0,66	0,65	0,66
I14	7	0,68	0,66	0,67	0,67
I4	8	0,66	0,65	0,64	0,65
K13	9	0,69	0,68	0,68	0,68
K4	10	0,64	0,65	0,66	0,65
Média					0,68

Ao analisar os resultados, é evidente que há uma variação considerável no valor de RASTI, e consequentemente na inteligibilidade, em diferentes áreas do auditório. O valor máximo de RASTI é cerca de 15% maior em comparação com o valor mínimo observado. Isso indica que a clareza e compreensão da palavra podem variar significativamente ao longo do espaço do auditório.

4.3.4.3. RASTI com o sistema de climatização ligado (AVAC)

No quadro 4.10, estão apresentados os resultados da medição do RASTI com o sistema de climatização ligado.

Nessa avaliação, observa-se que nem todos os pontos recebem a mesma informação de forma consistente, pois o valor do RASTI varia de acordo com o local de medição. São quatro valores que apresentam uma diminuição mais acentuada, sendo dois deles os pontos que tinham o valor mais alto e mais baixo na avaliação anterior. É compreensível que o ponto

com o maior valor de RASTI nessa avaliação seja A13 (ponto 1), pois está no ponto mais próximo da fonte sonora.

Nos lugares A4 (ponto 2) e K4 (ponto 10), é onde se verifica maior diminuição nos valores, o que se iria de esperar pois se encontram junto a grelhas de climatização e também junto a saídas da sala.

Em relação aos outros locais de avaliação, em geral, ocorre uma leve diminuição no valor do RASTI.

Quadro 4.10 - Valores de RASTI, com o equipamento de climatização ligado (AVAC)

RASTI com AVAC						
Posição		Medição				Variação sem AVAC
Lugar	Ponto	1	2	3	Média	
A13	1	0,69	0,70	0,71	0,70	-0,04
A4	2	0,58	0,59	0,58	0,58	-0,05
C13	3	0,69	0,69	0,68	0,69	-0,01
C4	4	0,67	0,67	0,68	0,67	-0,01
F14	5	0,68	0,68	0,69	0,68	-0,03
F4	6	0,64	0,65	0,65	0,65	-0,01
I14	7	0,66	0,65	0,64	0,65	-0,02
I4	8	0,63	0,62	0,63	0,63	-0,02
K13	9	0,65	0,64	0,64	0,64	-0,04
K4	10	0,60	0,61	0,59	0,60	-0,05
Média					0,65	-0,03

4.3.4.4. Conclusões

As curvas dos valores médios do RASTI para cada uma das situações analisadas são mostradas na figura 4.29. Em geral, as curvas correspondentes às situações com o sistema de climatização (AVAC) ligado são mais reduzidas.

Os valores com o sistema de climatização (AVAC) ligado demonstram-se inferiores aos valores sem estar ligado (com uma média de decréscimo de 0,03), o que sugere que este poderá ser relevante em termos de inteligibilidade.

A inteligibilidade da palavra é afetada por vários fatores, como as características de absorção do espaço e a intensidade do som. No entanto, a inteligibilidade não é influenciada apenas por essas características, como pode ser observado nos gráficos das figuras 4.30 e 4.31. Conseguimos observar que a distância entre a fonte sonora e o recetor causa uma variação considerável no valor do RASTI.

Na figura 4.31, são apresentados os valores do RASTI nos pontos 1, 3 e 5, na zona central do auditório, para cada opção de emissão sonora. Na figura 4.32, estão representados os pontos 2, 4 e 6, na zona lateral. Cada ponto é identificado pela sua distância à fonte sonora, em metros.

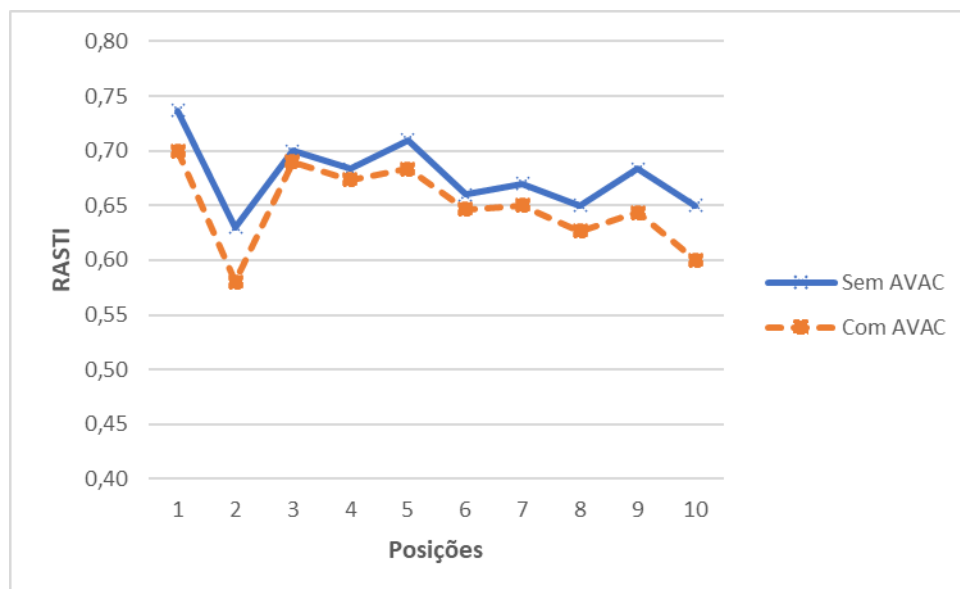


Figura 4.29 – Curvas das médias das medições do RASTI nos pontos correspondentes: Sem AVAC ligado (linha azul) e com AVAC ligado (linha tracejada laranja)

Em relação aos pontos da zona central, observa-se que a diminuição da inteligibilidade com o aumento da distância ocorre, a destacar dois pontos que a diminuição é mais acentuada (por se encontrar junto a uma porta de saída) e o ponto final (mais distante) aumenta ligeiramente, possivelmente, por se encontrar à mesma cota que a fonte sonora.

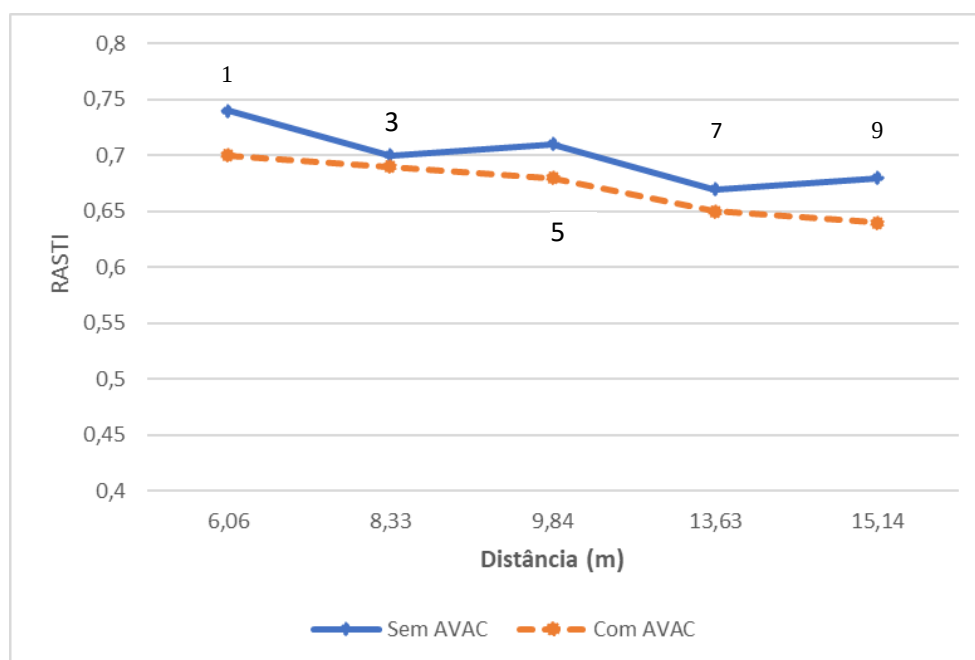


Figura 4.30 – Variação do RASTI com a distância à fonte sonora, nos pontos 1,3,5,7 e 9 (zona central)

Realizando uma análise do gráfico, conseguimos perceber que sem o AVAC ligado, existe uma variação mais brusca nos pontos 3 e 7, possivelmente, não só pela distância da fonte sonora, mas também pela diferença de cotas existente de ponto para ponto. É notória a subida do ponto 5 e 9 (o qual se encontra à cota da fonte sonora).

Com o AVAC ligado, apesar de ter existido diminuição, com a atenuação do ruído proveniente do mesmo, foi muito mais constante a sua descida.

Salienta-se o ponto 3, que, sem o AVAC ligado, se verificou uma descida mais abrupta, e que com o AVAC ligado, se manteve praticamente constante.

Comparando o ponto 5 e 9, sem o AVAC ligado, consegue-se concluir que a diferença mais relevante entre os seus valores é devida à distância, pois, apesar de o ponto 9 se encontrar mais semelhante em termos de cota com a fonte sonora, apresenta uma diferença de distância para o ponto 5 em relação à fonte sonora de 5,30 m.

Nas posições mais laterais, analisando a figura 4.31, percebe-se que onde existirá menor inteligibilidade será no ponto 2, possivelmente, porque se encontra a uma cota mais baixa, apesar da sua distância na lateral ser o mais próximo da fonte sonora. Este ponto é aquele que também apresenta mais proximidade a um local de saída e a uma grelha de climatização (AVAC). Poderá também ser influente para este fator o ângulo da projeção.

A brusca subida do ponto 2 para 4, poderá ser devido à melhor cota e ângulo de projeção do ponto 4. A distância aparenta não ter influência nesta passagem.

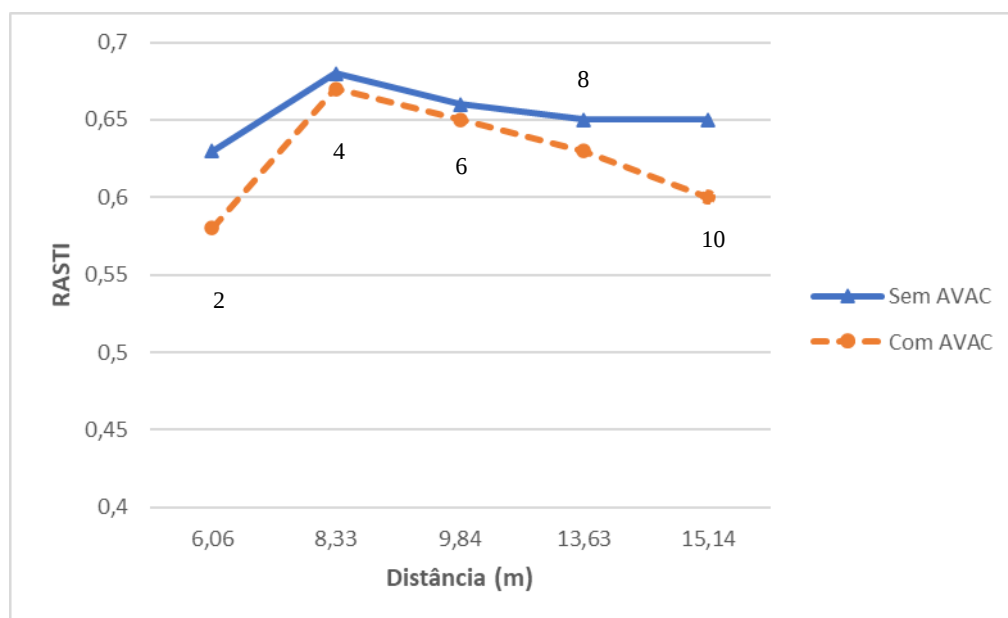


Figura 4.31 – Variação do RASTI com a distância à fonte sonora, nos pontos 2, 4, 6, 8 e 10 (zona lateral)

Comparando o gráfico das posições centrais com as laterais, os pontos laterais apresentam maior diferença nos valores entre sem AVAC e com AVAC, o que se conclui que vai de acordo com o facto de nas laterais da sala terem mais grelhas de climatização (AVAC), o que por sua vez, fará diminuir mais a inteligibilidade da palavra.

5

COMPARAÇÃO COM OUTRAS SALAS

5.1. INTRODUÇÃO

Na comparação de salas, vamos comparar o Auditório Municipal de Gaia com o Auditório da FEUP, Cineteatro Eduardo Brazão e do Grande Auditório do Convento de S. Francisco.

5.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

No gráfico 5.1, podemos comparar como o tempo de reverberação varia de acordo com as diferentes bandas de frequência de oitava do AMG em relação a outras salas que foram previamente estudadas, como o Auditório FEUP, Cineteatro Eduardo Brazão e o Grande Auditório do Convento de S. Francisco. O Cineteatro de Esmoriz, apesar de ser focado no cinema, apresentava um tempo de reverberação bastante acima do esperado para a função porque ainda estava em construção na altura que foi realizado as medições.

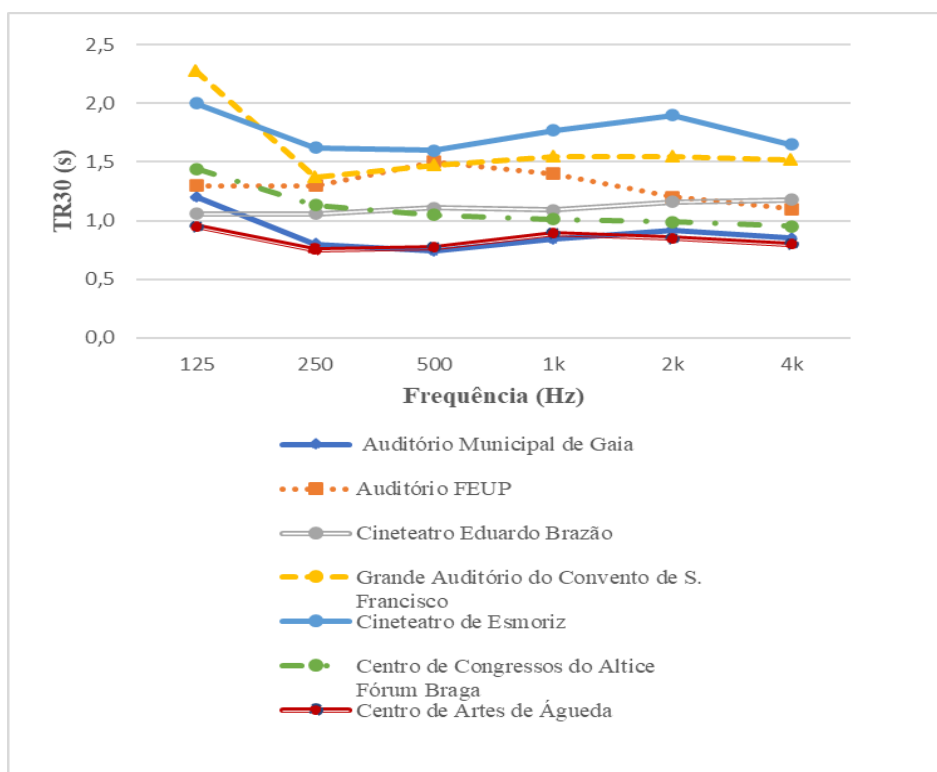


Figura 5.2.1 - Tempo de reverberação para as bandas de frequência de 1/1 oitava

É de salientar que o tempo de reverberação no AMG, comparando com as outras salas, é mais baixo nas frequências de 500 a 2000 Hz. O que seria de esperar de uma sala mais adequada para a função de inteligibilidade de palavra.

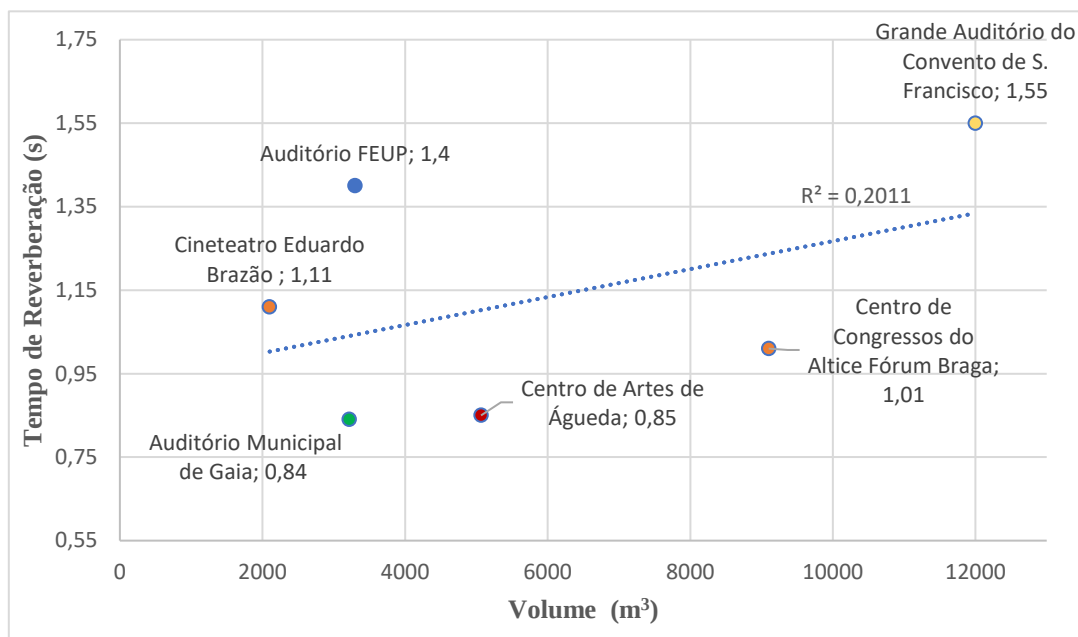


Figura 5.2.2 - Comparação do tempo de reverberação médio para as bandas de frequência de 1/1 oitava entre os 500 e os 2.000 Hz em relação com o volume das salas

Analisando a fig. 5.2.2, concluímos que, apesar de o Auditório Municipal de Gaia apresentar uma volumetria semelhante à do Auditório da FEUP, apresentam tempos de reverberação bastante diferentes devido à diferença da escolha dos materiais usados na sua construção.

5.3. RUÍDO DE FUNDO

Na figura 5.3.1 e 5.3.2, são realizadas as comparações entre os valores médios das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo em diferentes tipos de salas, com o sistema de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) desligado e ligado, respetivamente.

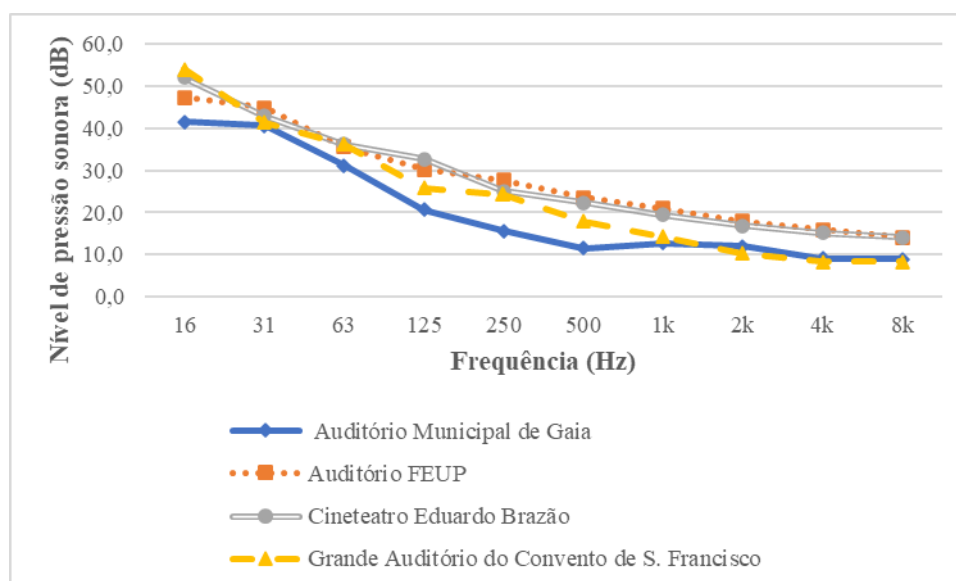


Figura 5.3.1 – Valores de medições médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) por bandas de frequência de oitava, dos 16 aos 8000 Hz (AVAC desligado)

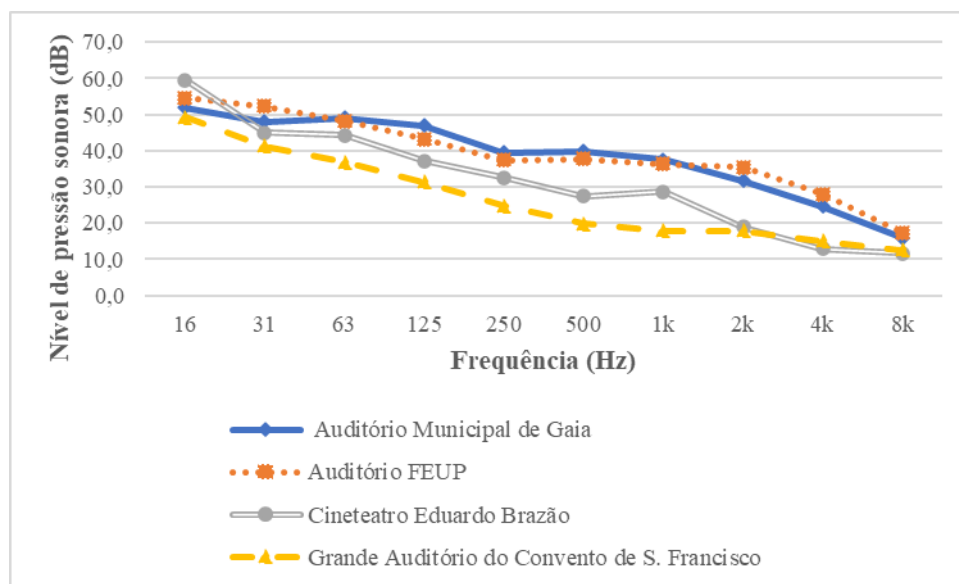


Figura 5.3.2 – Valores de medições médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) por bandas de frequência de oitava, dos 16 aos 8000 Hz (AVAC desligado)

Ao analisar a figura 5.3.2, quando o sistema de AVAC está ligado, observa-se que, comparando o AMG com o Auditório da FEUP, os quais foram projetados para funções similares, observamos que sem AVAC ligado, a média dos valores é menor no AMG, mas com o AVAC ligado, fica praticamente com os mesmos valores que o Auditório da FEUP. Extraindo daqui o peso no ruído de fundo da má adaptação do sistema AVAC no AMG. Comparando agora com o cineteatro Eduardo Brazão, pode-se observar que o valor médio do nível de pressão sonora do ruído de fundo é, em geral, maior. Isso pode ser atribuído ao facto de que a sala pode ter sido projetada levando em consideração os limites regulamentares para cinemas, enquanto as outras duas salas foram dimensionadas com base nos limites regulamentares para outros tipos de espaços.

5.4. RASTI

Diferentes fatores podem afetar o valor do parâmetro RASTI, como exemplificado a seguir:

- Um ruído de fundo com maior nível de pressão sonora pode dificultar a clareza da percepção do discurso. Na figura 5.4.1, é analisado o impacto da média energética do L_{Aeq} sem AVAC no valor do parâmetro RASTI;
- Um tempo de reverberação mais longo também pode prejudicar a clareza do discurso e, consequentemente, resultar em valores mais baixos do parâmetro RASTI. Na figura 5.4.2, é possível observar como o tempo de reverberação médio de cada sala afeta o valor do RASTI;

Ao analisar a figura 5.4.1, conclui-se que, na maioria dos casos, um ruído de fundo mais alto está associado a um valor mais baixo do parâmetro RASTI.

Na figura 5.4.2, estabelece-se uma relação de quase proporcionalidade direta entre o valor do parâmetro RASTI e o tempo de reverberação médio, considerado bastante elevado. Isso indica que um menor tempo de reverberação está relacionado a um maior valor de RASTI.

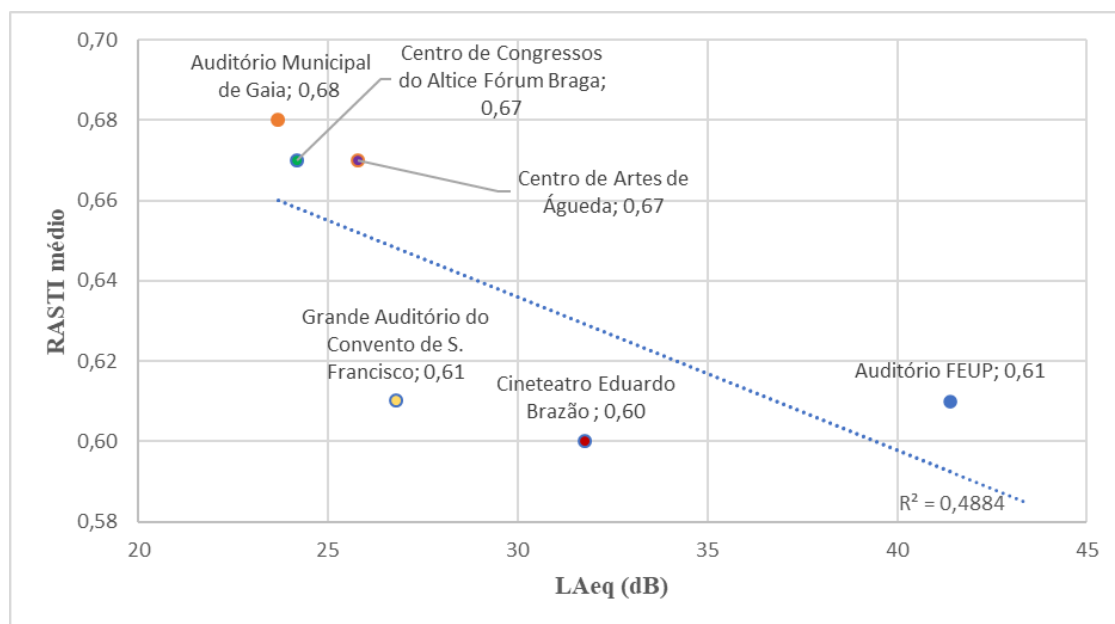


Figura 5.4.1 – Valor médio do parâmetro RASTI nas salas referidas em relação com a média energética do L_{Aeq}

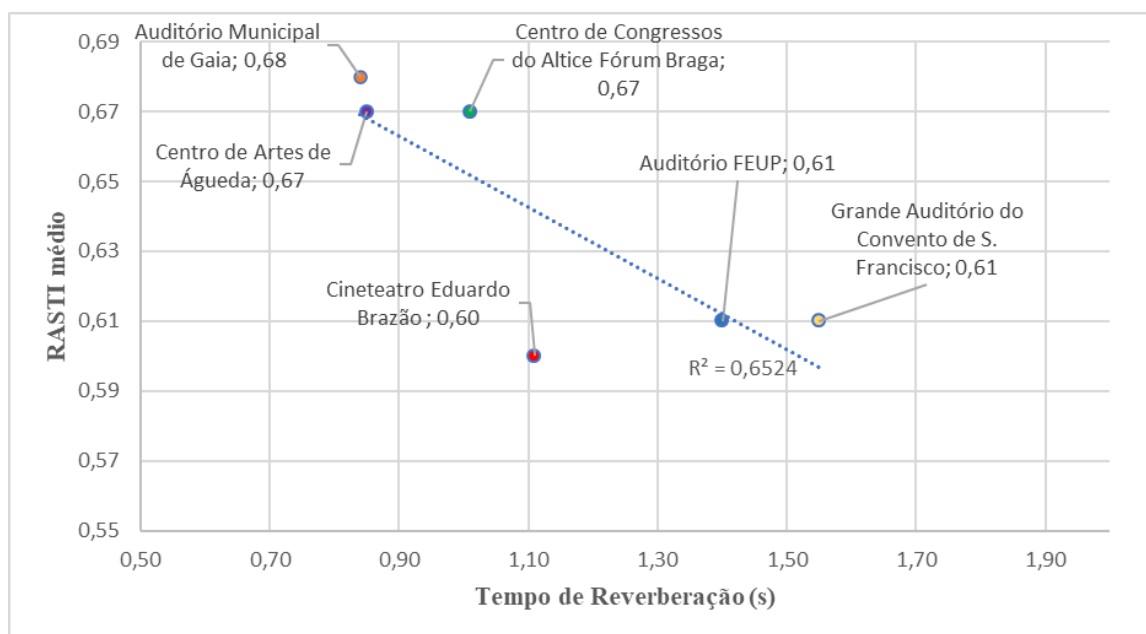


Figura 5.4.2 – Valor médio do parâmetro RASTI nas salas referidas em relação com o tempo de reverberação médio das frequências 500 a 2000 Hz

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

A fim de caracterizar acusticamente o Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia, foi conduzida uma avaliação de diferentes parâmetros acústicos objetivos, de forma a determinar a qualidade do som no espaço.

Os valores obtidos foram comparados com os valores recomendados por diferentes autores e com um valor retirado de referência, que funcionou como um valor ideal (não legal).

O auditório em estudo é um espaço utilizado para uma ampla variedade de atividades, portanto, é classificado como um auditório multiuso. Devido à falta de elementos que permitam ajustar sua acústica, é natural que o tempo de reverberação seja adequado para algumas atividades e menos adequado para outras. A média dos valores registados para as frequências de 500, 1000 e 2000 Hz, que é de 0,83 segundos, está dentro dos limites aceitáveis para atividades que dependem da palavra (embora para alguns autores seja considerado excessivo), mas é inadequado para atividades musicais que requerem um tempo de reverberação mais longo para uma boa qualidade de som. O facto de o tempo de reverberação no auditório ser curto, o que é mais favorável para a clareza da fala, tornaria inviável a realização de atividades que exigem o oposto.

No estudo realizado, o nível de pressão sonora do ruído de fundo foi medido em duas configurações diferentes. Foi constatado que o ruído de fundo presente no auditório não é prejudicial ao conforto dos ouvintes, mas a situação inverteu-se quando o sistema de climatização (AVAC) foi ligado. O nível sonoro aumentou cerca de 23 dB(A) quando foi ativado o AVAC. A análise das curvas de incômodo revelou que a presença desses equipamentos causa bastante desconforto para o público.

Também foi avaliada a inteligibilidade da palavra através da medição do parâmetro acústico RASTI. Para este estudo, foram realizadas medições em duas configurações: uma sem o uso de sistema de climatização (AVAC) e uma com o sistema de climatização (AVAC) ligado. O auditório apresentou um valor médio de RASTI igual a 0,68, o que indica uma boa inteligibilidade. Com o AVAC ligado, resultou em um decréscimo médio de 0,03 nesse parâmetro.

Os resultados dos principais parâmetros acústicos medidos no Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia estão resumidos na Quadro 6.1.

Quadro 6.1 - Resumo dos principais parâmetros acústicos do Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia

Parâmetro		Medições	Recomendado	Avaliação
TR (s)		0,8	≤ 0,92	✓
L _{Aeq} (dB)	RF	23,7	≤ 30	✓
	AVAC	46,7		×
RASTI	Sem AVAC	0,68	≥ 0,60	✓
	Com AVAC	0,65		✓
NC	RF	20	≤ 25	✓
	AVAC	38		×
NR	RF	17	≤ 25	✓
	AVAC	48		×
✓ - o resultado cumpre o valor recomendado				
× - o resultado não cumpre o valor recomendado				

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que o desempenho acústico do auditório é adequado, mas não com o sistema de climatização ligado (AVAC) portanto, seria interessante considerar a implementação de algumas soluções de forma a cancelar o agravamento acústico das instalações mecânicas.

Para garantir a adequação do tempo de reverberação, seria valioso realizar um estudo mais aprofundado sobre equipamentos e materiais que possibilitem ajustar a acústica do auditório, a fim de alcançar condições adequadas para as diversas atividades realizadas no local.

A fim de reduzir o ruído gerado pelo sistema de climatização, que pode causar desconforto ao ouvinte e comprometer a qualidade da experiência sonora, seria recomendável analisar as condições de operação e suporte dos equipamentos de AVAC presentes no Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia.

Em futuros desenvolvimentos, seria interessante realizar pesquisas de avaliação subjetiva com o público do auditório, a fim de analisar o nível de desconforto causado pelo uso multifuncional do espaço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, A. P. – *Acústica Ambiental e de Edifícios, Edição 8.1*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.
- [2] Chadwick, D. L. *Music and hearing. Proceedings of the Royal Society of Medicine*, v. 66, p. 1078 – 1082, nov. 1973.
- [3] [3] Bruneau, M. – *Fundamentals of Acoustics*, 2ª edição, Londres, 2006.
- [4] Barron, M. – *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, 2ª edição, Spon Press, Taylor & Francis Group, 2010.
- [5] Barron, M. – *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, 2ª edição, Spon Press, Taylor & Francis Group, 2010.
- [6] Acoustics - http://www.engineeringtoolbox.com/acoustics-noise-decibels-t_27.html, acedido em junho de 2023
- [7] Almeida, in Lança, P. – *Física dos Edifícios*, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja, Beja, 2007
- [8] Lazzarini, V. E. P. – *Elementos de Acústica*, Music Department, National University of Ireland, Maynooth, 1998
- [9] Watson, F. R. – *Acoustics of Auditoriums*, University of Illinois, Urbana, EUA, 1914
- [10] Pladur - <https://corporativo.pladur.com/pt-pt/solucoes/absorcao-acustica/>, acedido em junho de 2023
- [11] University of Kentucky - http://vac.engr.uky.edu/sites/vac/files/Webinars/05_VAC_Impedance_Tube_Measurements.pdf, acedido em junho de 2023
- [12] Nidec - <https://acim.nidec.com/motors/usmotors/news-and-media/driving-force-blog/may-2021-driving-force-blog>, acedido em junho de 2023
- [13] Termolan - <https://termolan.pt/>, acedido em junho de 2023
- [14] NTi Audio - <https://www.nti-audio.com/pt/medicao-do-tempo-de-reverberacao>, acedido em junho de 2023
- [15] Commercial Acoustics - <https://commercial-acoustics.com/reverberation-time-graphic/>, acedido em junho de 2023
- [16] Long, M. – *Architectural Acoustics*, Elsevier Academic Press, Oxford, 2006
- [17] Beranek, L. L. – *Music, Acoustics and Architecture*, John Wiley & Sons, Inc, EUA, 1962
- [18] Beranek, L. L. – *Concert and Opera Halls: How They Sound*, Woodbury, Acoustical Society of America, Nova Iorque, 1996
- [19] Dreamstime - <https://www.dreamstime.com/spherical-wave-propagation-available-high-resolution-several-sizes-to-fit-needs-your-project-image144091579>, acedido em junho de 2023
- [20] Sound on Sound - <https://www.soundonsound.com/sound-advice/q-does-strength-proximity-effect-depend-volume-source>, acedido em junho de 2023

- [21] AplusTopper - <https://www.aplustopper.com/multiple-reflection-of-sound/>, acedido em junho de 2023
- [22] Imperialum - <https://www.imperialum.com/plataforma-imperialum/solucoes-imperialum-2/solucoes-de-isolamento-acustico/transmissao-marginal/>, acedido em junho de 2023
- [23] NP EN ISO 717-1:2009 – Medição *in situ* do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos e determinação do índice de isolamento sonoro
- [24] Moreira, A. – *Acústica nos Edifícios*, Escola Superior de Tecnologia de Tomar, 2011
- [25] NP EN ISO 717-2:2009 – Medição *in situ* do isolamento sonoro a sons de percussão sobre pavimentos e determinação do índice de isolamento sonoro
- [26] Silva, P. M. – *Projecto de condicionamento acústico de edifícios*, LNEC, Lisboa, 2006
- [27] Patrício, J. – *Acústica nos Edifícios*, 2ª edição, Lisboa, 2004
- [29] Engineering Toolbox - https://www.engineeringtoolbox.com/noise-rating-nr-d_1609.html, acedido em junho de 2023
- [30] Larm, P.; Hongisto, V. – *Experimental comparison between speech transmission index, rapid speech transmission index, and speech intelligibility index*, Journal of the Acoustical Society of America, 119 (2), pp. 1106-1117, Fevereiro, 2006
- [31] Simões, F. – *Acústica Arquitetónica*, PROCEL EDIFICA – Eficiência energética em edificações, Rio de Janeiro, 2011
- [32] Fernandez, S.; Feijóo, S. – *Acoustic cues to perception of vowel quality*, Beijing, China, 2000
- [33] Patrício, J. – *Acústica nos Edifícios*, 2ª edição, Lisboa, 2004
- [34] Dreamstime - <https://pt.dreamstime.com/teatro-de-dion%C3%ADsio-abaixo-da-acrop%C3%B3polis-em-atenas-gr%C3%A9cia-vista-sobre-o-do-dion%C3%ADso-acropolis-image226746980>, acedido em junho de 2023
- [35] Artculturas - <https://artculturas.com/2017/04/12/teatro-romano/>, acedido em junho de 2023
- [36] 123RF. (s.d.). Roman Theater, Orange, France - Vintage Engraved Illustration. Recuperado de https://www.123rf.com/photo_35185417_roman-theater-orange-france-vintage-engraved-illustration-dictionary-of-words-and-things-larive-and-.html [37]
- [37] Brown, P. - *The World of Late Antiquity*, W. W. Norton & Company, 1968
- [38] Carlson, M. - *Theories of the Theatre: A Historical and Critical Survey from the Greeks to the Present*, Cornell University, 1993
- [39] Banham, M.- *Cambridge Guide to Theatre*, Cambridge University, 1995
- [40] Beranek, L. - *Music, Acoustics, and Architecture*. Wiley, 1996
- [41] Sabine, W. C - *Collected Papers on Acoustics*, Harvard University, Cambridge, 1922
- [42] Wikimedia Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vienna_Opera_House_Interior.JPG, acedido em junho de 2023
- [43] Watson, F.R. – *Acoustics of building including acoustics of auditoriums and soundproofing of rooms*, JohnWiley & Sons, Londres, 1948

- [44] Live Acoustics - https://www.liveacoustics.co.za/auditorium_design.php, acedido em junho de 2023
- [45] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. - *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley & Sons, Londres, 2000
- [46] Cavanaugh, W. J.; Wilkes, J. – *Architectural Acoustics: Principles and Practice*. 2^a edição, J.W. & Sons, Inc., 1999
- [47] Silva, P. M. – *Acústica de auditórios para música*, Lisboa, 1975
- [48] Kuhl, W. – *Ueber Versuche zur Ermittlung der Gunstigsten Nachhallzeit Grosser Musikstudios*, Genebra, 1954