

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DO TEATRO MUNICIPAL DA COVILHÃ

JOÃO PEDRO TAVARES LEMOS

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

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2023

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2022/2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil – 2022/2023 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2023*.

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

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

Aos meus avós

Strive not to be a success, but rather to be of value

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Depois de seis anos finda um ciclo muito bonito na minha vida. Seis anos de esforço e dedicação, culminando nesta dissertação, à qual dediquei vários dias e noites, e que obviamente, sem apoio, não a conseguiria realizar da forma que consegui, por isso, demonstro um sincero agradecimento a todos os envolvidos, em especial:

Ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, pelo apoio prestado ao longo da dissertação, mas também à sua exigência e metodologia de trabalho, que contribuíram para um trabalho contínuo e consistente ao longo do semestre. Por ter também influenciado o meu interesse pela área da Acústica.

Ao Eng.º António Eduardo Costa pela disponibilidade aquando da realização dos ensaios no Teatro Municipal da Covilhã e pelas dicas e apoio que forneceu, para uma melhor organização dos resultados e dos dados recolhidos.

Ao Teatro Municipal da Covilhã, por permitir a realização dos ensaios necessários para este estudo, e em especial ao responsável e Diretor Técnico do Teatro Municipal da Covilhã, o Sr. José Martins, pela amabilidade com que nos recebeu no dia da realização dos ensaios, assim como a disponibilidade que demonstrou, para tirar qualquer dúvida e fornecer qualquer ajuda.

À empresa *InAcoustics* por todo o material fornecido, essencial para o desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus pais e ao meu irmão, por serem um pilar importante e um exemplo na minha vida, e por sempre me apoiarem em toda a duração da minha vida académica, e me incentivarem a continuar a estudar, e seguir os meus objetivos, apesar de qualquer adversidade.

À minha namorada, pela companhia e apoio durante todos estes anos.

A todos os familiares e amigos próximos que sempre se preocuparam com esta etapa importante da minha vida.

A todos os meus amigos, com quem tive a sorte de me cruzar, que sempre me apoiaram e acompanharam nesta longa etapa, e acima de tudo, me ajudaram a tornar uma melhor pessoa.

RESUMO

O presente trabalho tem como propósito a caracterização acústica do Teatro Municipal da Covilhã. Tal caracterização surge devido à avaliação da qualidade acústica de locais deste género, que se destacam por acomodar grandes audiências em espetáculos de várias temáticas que exigem certo desempenho, quer do lado do espetador, quer do lado do artista, sendo, deste modo, assunto de grande relevância.

Este Teatro foi reabilitado em 2021 com o apoio da empresa *InAcoustics* que auxiliou no projeto de acústica deste teatro que tem uma plateia para 600 lugares e serve essencialmente para desempenhos musicais, mas também para espetáculos de dança e de artes dramáticas, pelo que é essencial o estudo das características acústicas deste local para estes tipos de uso.

No início deste trabalho, é feita uma abordagem genérica de alguns conceitos teóricos na área da acústica para melhor compreensão dos conteúdos da tese, seguido de uma exposição da evolução dos espaços dedicados à palavra, nomeadamente auditórios e das diretivas legislativas existentes para estes espaços.

De modo a realizar uma caracterização acústica deste espaço, foram executados vários ensaios *in situ* no dia 28 de março de 2023, onde se efetuaram medições de parâmetros acústicos, nomeadamente o Tempo de Reverberação (TR), RASTI e Ruído de Fundo com o sistema de AVAC desligado e ligado, com análise posterior de curvas de incomodidade *Noise Criterion* (NC) e *Noise Rating* (NR). Obtiveram-se valores médios de Tempo de Reverberação, no intervalo de frequências [500;2.000] Hz em bandas de 1/3 de oitava, compreendidos entre os 1,27 e 1,44 s, com um Tempo de Reverberação médio [500,1k,2k] Hz total de 1,38 s. Quanto ao RASTI, os valores obtidos variam entre os 0,59 e os 0,72, com o valor médio global de 0,64. Os valores de ruído do fundo médios globais (L_{Aeq}) obtidos foram 23 dB sem sistema de AVAC e 41 dB com sistema de AVAC, não cumprindo o valor limite máximo de 30 dB imposto pela legislação do RRAE. As curvas NC e NR obtidas para esta sala, tendo em conta o nível sonoro de ruído de fundo com o sistema AVAC, foram, respetivamente, NC38 e NR38, não verificando todos limites aconselháveis para este parâmetro, podendo denotar algum desconforto.

Para obter uma melhor perspetiva dos valores obtidos nos resultados, fez-se uma análise comparativa destes com os valores obtidos das mesmas medições, em seis salas estudadas anteriormente noutros trabalho (Cineteatro Eduardo Brazão, Centro de Artes de Águeda, Convento de S.Francisco, Auditório da FEUP e dois auditórios do Centro de Congressos do Fórum de Braga).

Finalmente, após análise dos resultados obtidos e do estudo do local, é retirada uma conclusão do trabalho e feita uma breve introdução de possíveis tópicos para desenvolvimentos futuros do estudo e aprofundamento da caracterização acústica deste local, tendo como ponto de partida este trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Reverberação, RASTI, AVAC, Teatro, Acústica

ABSTRACT

The purpose of this study is the acoustic characterization of the Municipal Theatre of Covilhã. This characterization arises from the evaluation of the acoustic quality of venues of this kind, which stand out for accommodating large audiences in performances of various themes that require a certain performance from both the spectator and the artist, making it a matter of great relevance.

This Theatre was renovated in 2021 with the support of the company InAcoustics, which assisted in the acoustic design of this theatre that has a 600-seat auditorium and is primarily used for dramatic arts performances, as well as amplified dance and music shows, making it essential to study the acoustic characteristics of this venue for these types of uses.

At the beginning of this work, a generic approach to some theoretical concepts in the field of acoustics is made to better understand the contents of the thesis, followed by an exposition of the evolution of spaces dedicated to speech, namely auditoriums, and the existing legislative directives for these spaces.

To carry out an acoustic characterization of this space, several in-situ tests were performed on March 28, 2023, where measurements were made on acoustic parameters, namely Reverberation Time (RT), RASTI, and Background Noise, with the HVAC system off and on, with subsequent analysis of the annoyance curves Noise Criterion (NC) and Noise Rating (NR). Average values of Reverberation Time were obtained in the frequency range [500;2,000] Hz in 1/3 octave bands, ranging from 1.27 to 1.44 s, with an overall average Reverberation Time [500,1k,2k] in 1/3 octave bands of 1.38 s. Regarding RASTI, the average obtained ranged between 0,59 and 0,72, with the global average being 0,64. The average global background noise (LAeq) values obtained were 24 dB without the HVAC system and 41 dB with the HVAC system, not complying with the maximum limit of 30 dB imposed by the RRAE laws. The NC and NR curves obtained for this room, considering the background noise level with the HVAC system, were NC38 and NR38, respectively, not verifying all the advisable limitations desired for this parameter.

To gain a better perspective on the values obtained in the results, a comparative analysis was made with the values obtained from the same measurements in six rooms previously studied in other works (Cineteatro Eduardo Brazão, Centro de Artes de Águeda, Convento de S.Francisco, Auditorium of FEUP, and two auditoriums of the Congress Center of Fórum Braga).

Finally, after analysing the obtained results, a conclusion is drawn from the work and a brief introduction is made to possible topics for future developments of the study and further characterization of the acoustic properties of this hall, taking this work as a starting point.

KEYWORDS: Reverberation, RASTI, HVAC, Theatre, Acoustics.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE QUADROS	xv
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	xvii

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2

2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. ANÁLISE DA PRESSÃO	5
2.2.1. O SOM	5
2.2.2. PRESSÃO ATMOSFÉRICA	6
2.2.3. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA	6
2.2.3. NÍVEIS DE PRESSÃO SONORA	7
2.3. ANÁLISE EM FREQUÊNCIA	9
2.3.1. DEFINIÇÃO	9
2.3.2. BANDAS DE FREQUÊNCIAS	9
2.3.3. CURVAS DE PONDERAÇÃO	9
2.3.3. COMPRIMENTO DE ONDA	12
2.4. SISTEMA AUDITIVO	12
2.5. ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS	13
2.5.1. ABSORÇÃO SONORA	13
2.5.2. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO	14

2.5.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	14
2.5.3.1. CONCEITO.....	14
2.5.3.2. EFEITOS	15
2.5.3.3. FÓRMULAS DE PREVISÃO	15
2.5.4. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS	16
2.5.4.1. CONCEITOS	16
2.5.4.2. MATERIAIS POROSOS E FIBROSOS	16
2.5.4.1. RESSOADORES	17
2.5.5. ISOLAMENTO SONORO	18
2.5.6. RUÍDOS DE EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES.....	18
2.5.6.1. ABORDAGEM GERAL.....	18
2.5.6.2. CURVAS DE INCOMODIDADE	18
2.5.7. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	20
2.5.7.1. TEORIA.....	20
2.5.7.2. PARÂMETROS DE MEDIDA.....	21
2.6. ACÚSTICA ARQUITETÓNICA	21
2.6.1. CONCEITOS BÁSICOS	21
2.6.1.1. REFLEXÕES E ECOS.....	21
2.6.1.2. DIFUSÃO	23
2.6.1.3. ACÚSTICA VARIÁVEL	23
2.6.2. PARÂMETROS ACÚSTICOS.....	25
2.6.2.1. INTRODUÇÃO	25
2.6.2.2. PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJETIVOS.....	25
2.6.2.3. PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJETIVOS	26
 3. ESTADO DE ARTE.....	 27
3.1. ORIGEM DO TEATRO	27
3.2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS TEATROS	27
3.2.1. INFLUÊNCIA GREGO-ROMANA	27
3.2.2. RENASCIMENTO	29
3.2.3. BARROCO	29
3.2.4. PERÍODO CLÁSSICO	30

3.2.5. INÍCIO DA ACÚSTICA MODERNA	31
3.2.6. SÉCULO XX	31
3.3. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS	32
3.3.1. SALAS PARA A PALAVRA	32
3.3.2. SALAS PARA A MÚSICA	32
3.4. LEGISLAÇÃO	32

4. MEDIÇÕES	35
4.1. LOCAL DE ESTUDO	35
4.1.1. HISTÓRIA	35
4.1.2. CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO	36
4.2. PREPARAÇÃO DAS MEDIÇÕES	40
4.2.1. PARÂMETROS	40
4.2.2. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO	40
4.3. METODOLOGIA DAS MEDIÇÕES	40
4.3.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	40
4.3.2. RASTI	42
4.3.3. RUÍDO DE FUNDO	44

5. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES	47
5.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	47
5.1.1. MEDIÇÕES	47
5.1.2. PREVISÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO PARA A SALA OCUPADA	50
5.2. RASTI	51
5.3. RUÍDO DE FUNDO	54
5.4. CURVAS DE INCOMODIDADE	60
5.5. COMPARAÇÃO COM OUTRAS SALAS	62
5.6.1. INTRODUÇÃO	62
5.6.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	62
5.6.3. RUÍDO DE FUNDO	65
5.6.4. RASTI	68

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	73
6.1. CONCLUSÕES.....	73
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1. – Propagação do som através de uma fonte pontual, onde se verifica que se trata de uma onda longitudinal [1].	5
Fig. 2.2. – Comparação da variação de uma pressão sonora $p(t)$ com situação de referência de pressão atmosférica (P_{at}) [17].	6
Fig. 2.3. – Relação entre a potência sonora (W) e a intensidade sonora (I) [6].	7
Fig. 2.4. – Níveis de pressão sonora da escala de dB de várias situações do quotidiano [43].	8
Fig. 2.5. – Curvas de ponderação (filtros), em especial detalhe para a curva A que representa a curva de correção do ouvido humano. É possível ver o valor de correção de nível sonoro deste filtro, ao longo da banda de frequência audível pelo ser humano [5].	10
Fig. 2.6. – Comprimento de onda (λ) de uma onda sonora [7]	12
Fig. 2.7. – Constituição do ouvido humano, onde “e”, “m” e “i” representam, respetivamente, ouvido externo, ouvido médio e ouvido interno [9]	13
Fig. 2.8. – Funcionamento da transmissão de energia incidente [8].	14
Fig. 2.9. – O tempo de Reverberação explicado graficamente (adaptado de [15]).	15
Fig. 2.10. – Comportamento destes três grupos de materiais em função da sua gama de frequência [1].	16
Fig. 2.11. – Esquema de funcionamento do funcionamento dos ressoadores(esquerda) e de membranas(direita) (adaptado de [1])	17
Fig. 2.12. – Curvas de Incomodidade NC (adaptado de [18])	19
Fig. 2.13. – Curvas de Incomodidade NR (adaptado de [19])	20
Fig. 2.14. – Contornos da emissão da palavra para a gama de frequências de 500 a 4.000Hz em bandas de 1/1 oitava. [adaptado de 2].	21
Fig. 2.15. – Efeito das reflexões sonoras num auditório [16].	22
Fig. 2.16. – Efeito das reflexões sonoras em superfícies de diferente geometria [adaptado de 16].	22
Fig. 2.17. – Efeito do eco repetido ou <i>flutter echo</i> entre duas paredes paralelas [adaptado de 16].	23
Fig. 2.18. – Esquema do Efeito da difusão e comparação com a reflexão [adaptado de 16].	23
Fig. 2.19. – Mecanismos de acústica variável, variação de absorção sonora do <i>Hong Kong Academy for Performing Arts</i> , onde o esquema de arranjo da parede muda consoante a sua necessidade de maior ou menor absorção sonora. À esquerda, com as abas refletoras fechadas, originando poucas reflexões e um tempo de reverberação longo, no meio com as abas meio abertas, originando muitas reflexões e um tempo de reverberação médio e à direita, com as abas totalmente abertas, originando poucas reflexões e um tempo de reverberação muito baixo. [adaptado de 16].	24
Fig. 2.20. – Mecanismo de absorção variável [adaptado de 2].	25
Fig. 3.1. – Teatro de Epidauros à esquerda e esquema em planta do teatro à esquerda [23]	28

Fig. 3.2. – Teatro de Epidauros à esquerda e esquema em planta do teatro à direita [adaptado de 8]	28
Fig. 3.3. – Esquema em planta do Teatro Romano de <i>Aspendus</i> à esquerda e foto retirada do espaço atualmente à direita [adaptado de 8]	28
Fig. 3.4. – Esquema em planta do Teatro Romano de <i>Aspendus</i> à esquerda e foto retirada do espaço atualmente à direita [retirado do Google Maps]	28
Fig. 3.5. – Teatro Olimpico, Vicenza, Itália [25].	29
Fig. 3.6. – Esquema do Teatro Olimpico, Vicenza, Itália [adaptado de 8].	29
Fig. 3.7. – Esquema do Teatro Farnese, Parma, Itália [adaptado de 8].	29
Fig. 3.8. – Corte ilustrativo do Teatro Farnese [26].	29
Fig. 3.9. – Planta do <i>Altes Gewandhaus</i> , Leipzig, Alemanha [adaptado de 8].	30
Fig. 3.10. – Ilustração em secção do <i>Altes Gewandhaus</i> , onde se pode ver a orquestra como foco principal do edifício [27]	30
Fig. 3.11. – Planta e corte em secção do <i>Boston Music Hall</i> [adaptado de 8].	31
Fig. 3.12. – Fotografia do <i>Symphony Hall</i> [29].	31
Fig. 4.1. – Localização do Teatro Municipal da Covilhã. [32]	35
Fig. 4.2. – Teatro Cine da Covilhã, 1967. [32]	36
Fig. 4.3. – Planta do Piso 1 da sala principal. [33]	37
Fig. 4.4. – Planta do Piso 2 da sala principal. [33]	37
Fig. 4.5. – Corte A' dos dois pisos da sala principal. [33]	38
Fig. 4.6. – Vista interior da sala principal do Teatro Municipal da Covilhã [34]	38
Fig. 4.7. – Cadeira presente na sala do Teatro Municipal da Covilhã. [foto do autor].	39
Fig. 4.8. – Pormenor da parede frontal ao palco, à esquerda [foto do autor] e difusor <i>Art Diffusor</i> , à direita [35]	39
Fig. 4.9. – Fonte sonora Brüel & Kjaer, modelo 4224, inclinada 45°, à esquerda e Sonómetro Brüel & Kjaer, modelo 2260, à direita. [foto do autor]	41
Fig. 4.10. – Malha de pontos escolhida para a medição do tempo de reverberação, na plateia (fonte sonora corresponde à fonte utilizada e os TRi correspondem aos pontos de colocação do sonómetro) [adaptado de 33]	41
Fig. 4.11. – Malha de pontos escolhida para a medição do tempo de reverberação, no balcão (Fonte sonora localizada no palco e os TRi correspondem aos pontos de colocação do sonómetro) [adaptado de 33]	42
Fig. 4.12. – Emissor RASTI Brüel & Kjaer, modelo 4225, à direita, e recetor RASTI Brüel & Kjaer, modelo 4419, à esquerda [foto do autor].	43
Fig. 4.13. – – Malha de pontos escolhida para a medição do RASTI, na bancada principal (emissor RASTI localizado no palco e os Ri correspondem aos pontos de colocação do recetor RASTI) [adaptado de 33]	43

Fig. 4.14. – Malha de pontos escolhida para a medição do RASTI, no balcão do piso superior (emissor RASTI localizado no palco e os Ri correspondem aos pontos de colocação do recetor RASTI) [adaptado de 33].....	44
Fig. 4.15. – Sonómetro Brüel & Kjaer, modelo 2260 [foto do autor].	44
Fig. 4.16. – Malha de pontos escolhida para a medição do Ruído de Fundo, na plateia (RFi corresponde aos pontos de colocação do sonómetro) [adaptado de 33].....	45
Fig. 4.17. – Malha de pontos escolhida para a medição do Ruído de Fundo, no balcão (RFi corresponde aos pontos de colocação do sonómetro) [adaptado de 33].....	45
Fig. 5.1. – Comparação dos valores de tempo de reverberação nas situações de sala vazia (a azul) e de sala ocupada (a vermelho). [foto do autor]	51
Fig. 5.2. – Mapa de linhas de igual RASTI do piso 1 (plateia). [foto do autor]	53
Fig. 5.3. – Mapa de linhas de igual RASTI do piso 2 (balcão). [foto do autor]	53
Fig. 5.4. – Valores das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) de todos os pontos, na situação de não funcionamento do sistema AVAC. [foto do autor].....	57
Fig. 5.5. – Valores das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) de todos os pontos, na situação de funcionamento do sistema AVAC. [foto do autor].....	58
Fig. 5.6. – Valores das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) da média logarítmica dos quatro pontos de medição, em bandas de 1/3 de oitava (Hz) para as duas situações do funcionamento do sistema AVAC. [foto do autor]	58
Fig. 5.7. – Valores das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dBA) da média logarítmica dos quatro pontos de medição, em bandas de 1/3 de oitava (Hz) para as duas situações do funcionamento do sistema AVAC com aplicação do filtro A. [foto do autor].....	59
Fig. 5.8. – Valores das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) da média logarítmica dos quatro pontos de medição, em bandas de 1/3 de oitava (Hz) para as duas situações do funcionamento do sistema AVAC com aplicação do filtro A. [foto do autor]	59
Fig. 5.9. – Comparação das curvas NC com os valores de níveis de pressão sonora de ruído de fundo no ponto RF4, nas duas situações de funcionamento do sistema AVAC em bandas de 1/1 de oitava [foto do autor]	61
Fig. 5.10. – Comparação das curvas NR com os valores de níveis de pressão sonora de ruído de fundo no ponto RF4, nas duas situações de funcionamento do sistema AVAC em bandas de 1/1 de oitava [foto do autor]	61
Fig. 5.11. – Comparação dos valores obtidos de Tempo de Reverberação médios das diferentes salas, em bandas de 1/3 de oitava, no intervalo de frequências 100 a 5000 Hz. [foto do autor]	64
Fig. 5.12. – Comparação dos valores obtidos da média do valor de tempo de reverberação de todos os pontos das diferentes salas, em bandas de 1/1 de oitava (no intervalo de frequências 500 a 2000 Hz) com o volume total da sala correspondente [foto do autor]	64
Fig. 5.13. – Comparação dos valores obtidos da média do valor de tempo de reverberação de todos os pontos das diferentes salas, em bandas de 1/1 de oitava (no intervalo de frequências 500 a 2000 Hz) com os valores ideais para as utilizações de música sinfónica moderna e teatro.....	65

Fig. 5.14. – Comparação dos valores de níveis de pressão sonora obtidos médios na situação do sistema AVAC desligado em bandas de 1/3 de oitava, na gama de frequência de 100 a 5.000 Hz, das várias salas analisadas [foto do autor].....	66
Fig. 5.15. – Comparação dos valores de níveis de pressão sonora obtidos médios na situação do sistema AVAC ligado em bandas de 1/3 de oitava, na gama de frequência de 100 a 5.000 Hz, das várias salas analisadas [foto do autor].....	67
Fig. 5.16. – Comparação dos valores de níveis de pressão sonora obtidos médios na situação do sistema AVAC desligado em bandas de 1/3 de oitava, na gama de frequência de 100 a 5.000 Hz, das várias salas analisadas com aplicação do filtro de ponderação A.....	67
Fig. 5.17. – Comparação dos valores de níveis de pressão sonora obtidos médios na situação do sistema AVAC ligado em bandas de 1/3 de oitava, na gama de frequência de 100 a 5.000 Hz, das várias salas analisadas com aplicação do filtro de ponderação A.	68
Fig. 5.18. – Relação do valor de RASTI médio obtido com o valor de tempo de reverberação médio da gama de frequências 500 a 2.000 Hz em bandas de 1/1 oitava.....	69
Fig. 5.19. – Relação do valor de RASTI médio obtido em cada sala com o respetivo valor médio de ruído de fundo LAeq obtido(dBA).....	70
Fig. 5.20. – Relação do valor de RASTI mínimo obtido com o valor de tempo de reverberação médio da gama de frequências 500 a 2.000 Hz em bandas de 1/1 oitava.....	70
Fig. 5.21. – Relação do valor de RASTI mínimo obtido em cada sala com o respetivo valor médio de ruído de fundo LAeq obtido(dBA).....	71
Fig. 5.22. – Relação do valor de RASTI máximo obtido com o valor de tempo de reverberação médio da gama de frequências 500 a 2.000 Hz em bandas de 1/1 oitava.....	71
Fig. 5.23. Relação do valor de RASTI máximo obtido em cada sala com o respetivo valor médio de ruído de fundo LAeq obtido(dBA).].....	72

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Quadro 2.1 - Valores numéricos em dB resultantes da curva de ponderação A para bandas de frequência 1/1 oitava e 1/3 oitava.[1]	11
Quadro 2.2 - Diferença dos parâmetros da emissão da voz entre vogais e consoantes [1].	20
Quadro 4.1. - Valores da área e pé direito bruto das zonas principais do teatro	36
Quadro 4.2. - Relação do parâmetro acústico objetivo RASTI com o parâmetro subjetivo da inteligibilidade da palavra [37].	42
Quadro 5.1. - Resultado das medições do Tempo de Reverberação(T_{30}) na sala principal do Teatro Municipal da Covilhã, em bandas de frequência de 1/3 de oitava, e a respetiva média aritmética, de acordo com a malha de pontos escolhida.....	48
Quadro 5.2. - Resultado das medições do tempo de reverberação em bandas de 1/1 oitava para as frequências de 500 a 2000 Hz, os valores das médias obtidos e aplicação de uma incerteza de 35% e a verificação do cumprimento do RRAE para a função “palavra”	49
Quadro 5.3. - Intervalos dos valores de tempo de reverberação recomendados para cada tipo de utilização da sala e a comparação com o valor de tempo de reverberação obtido para as frequências 500 e 1000 Hz em bandas de 1/1 oitava [1].	49
Quadro 5.4. - Parâmetros utilizados para o cálculo do tempo de reverberação para a situação de sala ocupada. [1].....	50
Quadro 5.5. - Previsão dos resultados de tempo de reverberação para situação de sala ocupada para as gamas de frequência de 500 – 2.000 Hz em bandas de 1/1 oitava.....	51
Quadro 5.6. - Resultado das medições do RASTI na malha de pontos escolhida e a respetiva média aritmética desses valores.	52
Quadro 5.7. - Resultados das medições do ruído de fundo com o sistema de AVAC desligado, nos pontos selecionados, numa banda de frequência de 1/3 de oitava, com as respetivas médias energéticas.	55
Quadro 5.8. - Resultados das medições do ruído de fundo com o sistema de AVAC acionado, nos pontos selecionados, numa banda de frequência de 1/3 de oitava, com as respetivas médias energéticas em cada frequência.	56
Quadro 5.9. - Valores obtidos do nível de pressão sonora contínuo equivalente nas duas situações, nos pontos selecionados, sem ponderação do filtro a (L_{eq}), e com a ponderação do filtro A (L_{Aeq}) e verificação de conformidade com o RRAE.	57
Quadro 5.10. - Valores recomendados de <i>Noise Rating</i> e <i>Noise Criterion</i> e verificação dos limites de acordo com os resultados obtidos pelas medições e respetivas curvas correspondentes associadas NC33 e NR33.[1] [19].	60
Quadro 6.1. - Quadro resumo dos valores obtidos nas medições dos parâmetros mais relevantes abordados neste trabalho (Tempo de reverberação, RASTI, Níveis de ruído de fundo, Curvas de incomodidade NC e NR) e a respetiva comparação com valores ideais e valores regulamentares do RRAE.....	75

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A	– Absorção sonora equivalente
AC	– <i>Articulation Class</i>
AI	– <i>Articulation Index</i>
a.C	– Antes de Cristo
A _j	– Absorção sonora localizadas
AVAC	– Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado
B	– Largura da banda
c	– Celeridade (m/s)
C ₈₀	– Claridade (dB)
D ₅₀	– Definição
DS(T)	– Decaimento sonoro em função do tempo
EDT	– <i>Early Decay Time</i>
E _i	– Energia incidente
E _a	– Energia absorvida
E _t	– Energia transmitida
E _r	– Energia Refletida
f	– Frequência (Hz)
I	– Intensidade sonora (W/m ²)
I ₀	– Intensidade sonora de referência (W/m ²)
L _{Aeq}	– Nível sonoro equivalente (dB)
L _{eq}	– Nível de pressão sonora contínuo equivalente (dB)
L _i	– Nível de intensidade sonora (dB)
L _p	– Nível de pressão sonora (dB)
L _w	– Nível de potência sonora (dB)
m	– Absorção sonora do ar relativa (m ⁻¹)
p	– Pressão (Pa)
p _{at}	– Pressão atmosférica (Pa)
p ₀	– Pressão sonora de referência [2*10 ⁻⁵ Pa]
Q	– Coeficiente de direccionalidade

r – Distância (m)

R^2 - Coeficiente de definição

RASTI - *Rapid Speech Transmission Index*

RRAE - Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

S – Superfície real do material (m^2)

SIL – *Speech Interference Levels* (dB)

STI – *Speech Transmission Index*

NC – *Noise Criterion*

NR – *Noise Rating*

TR – Tempo de reverberação (s)

T- Temperatura ($^{\circ}C$)

t – Tempo (s)

T- Período (s)

W – Potência (W)

W_0 – Potência sonora de referência (W)

α – Coeficiente de absorção sonora

λ – Comprimento de onda (m)

ρ – Massa volúmica do meio (kg/m^3)

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Desde sempre, o ser humano destaca-se de todos os outros seres vivos em várias características, sendo uma delas a capacidade de comunicar entre si através do uso da palavra, tendo a capacidade de criar variações de pressão, ou mais casualmente chamadas de som e de as captar. Esta característica é de grande importância pois potenciou o desenvolvimento da humanidade, que com o decorrer dos anos foi inventando novas formas de comunicação e de expressão que exigiam a existência de locais próprios para tal efeito.

No entanto, na construção de locais de espetáculo nem sempre a acústica foi uma matéria a ter em conta, porque não era uma matéria ainda muito aprofundada, e porque na construção destes locais o conforto e o aspeto visual eram colocados como principais aspetos a considerar, deixando assim a acústica para segundo plano.

No decorrer deste trabalho é analisado um local destinado a espetáculos, nomeadamente o Teatro Municipal da Covilhã que é um edifício que foi reabilitado em 2021 com apoio acústico da empresa da *InAcoustics* e tem como principais usos os espetáculos musicais e artes dramáticas.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação é a caracterização acústica do Teatro Municipal da Covilhã, verificando se após a sua reabilitação, os parâmetros acústicos relevantes cumprem com valores desejáveis e os regulamentares, tendo em conta todos os usos deste local para que os espectadores consigam ter uma experiência positiva e usufruir dos espetáculos. De forma a analisar estes parâmetros acústicos, foram realizadas medições *in situ*, com equipamentos próprios para tal, e com os resultados das medições, possível retirar as devidas conclusões. Os parâmetros a são:

- *Rapid Speech Transmission Index* (RASTI);
- Níveis de pressão sonora do ruído de fundo;
- Tempo de reverberação;
- Curvas de incomodidade NC e NR.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para obter uma organização estruturada da dissertação, esta divide-se em seis capítulos.

O Capítulo 1, Introdução, corresponde a uma breve introdução dos temas e aspetos essenciais abordados nesta dissertação. Para além disso, são apresentados os objetivos que são propostos a atingir no decorrer deste estudo e uma breve indicação da estrutura da dissertação.

No Capítulo 2, Conceitos e Definições, são expostos os conceitos acústicos principais que se utilizaram no decorrer deste estudo e na redação deste documento, de forma a facilitar a compreensão do mesmo e é feita uma apresentação de todos os parâmetros relevantes para medição.

No Capítulo 3, Estado de Arte, introduz-se o conhecimento do tema já trabalhado em outras obras e procede-se a uma contextualização histórica e acústica dos teatros e análise e as exigências acústicas presentes nos regulamentos e legislativas a cumprir.

O Capítulo 4, Medições, é feita uma breve caracterização da sala e da sua evolução ao longo do tempo e apresenta-se todos os procedimentos aplicados para a realização das medições *in situ* dos parâmetros a estudar, nomeadamente do tempo de reverberação, nível de pressão sonora de ruído de fundo, RASTI e curvas de incomodidade.

No capítulo 5, Resultados das Medições, faz-se uma análise dos resultados obtidos com as medições explicadas no capítulo anterior e são apresentadas algumas considerações sobre os parâmetros medidos provenientes desta análise, de modo a realizar uma caracterização acústica do Teatro Municipal da Covilhã e faz-se uma comparação destes resultados com os resultados obtidos de outras seis salas que foram analisadas anteriormente em outros trabalhos.

No capítulo 6, Conclusões, é feito um balanço de todo o conteúdo que se encontra exposto ao longo deste trabalho e tiram-se as devidas conclusões, tendo em conta os valores dos parâmetros estudados de referência, de forma que estes sejam respeitados, para assegurar que o uso deste espaço seja adequado às suas finalidades. É feita também uma breve reflexão no sentido de outros trabalhos que possam ser explorados no seguimento desta dissertação, com o objetivo de aumentar o conhecimento na área da acústica deste tipo de locais.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. INTRODUÇÃO

A acústica é o ramo da física que estuda o som, a sua propagação e a sua aplicação em várias áreas do conhecimento, tais como a medicina, a psicologia e a música [1].

Como o tema desta dissertação é a caracterização acústica do teatro municipal da Covilhã, é essencial ter uma ideia clara de alguns conceitos teóricos básicos do espaço de conhecimento da acústica, que serão abordados ao longo deste documento, de forma a compreender melhor o conteúdo do mesmo.

2.2. ANÁLISE DA PRESSÃO

2.2.1. O SOM

Seguindo uma visão mais objetiva, o som é uma perturbação mecânica, partindo de um estado de equilíbrio, que se propaga por meios elásticos, tais como o ar e a água. Esta propagação é dada partindo de uma fonte, sob a forma de onda longitudinal, ou seja, a sua direção de propagação é a mesma que a direção da vibração mecânica [3]. É esta vibração que quando chega ao sistema auditivo, origina no que habitualmente e de forma mais subjetiva se refere a som,

Quando uma fonte é estimulada, criam-se choques entre partículas do meio, que originam variações de pressão da envolvente onde se propagam, formando zonas de pressão alta e zonas de pressão baixa, ou seja, zonas de compressão e de rarefação (Fig. 2.1.) [1].

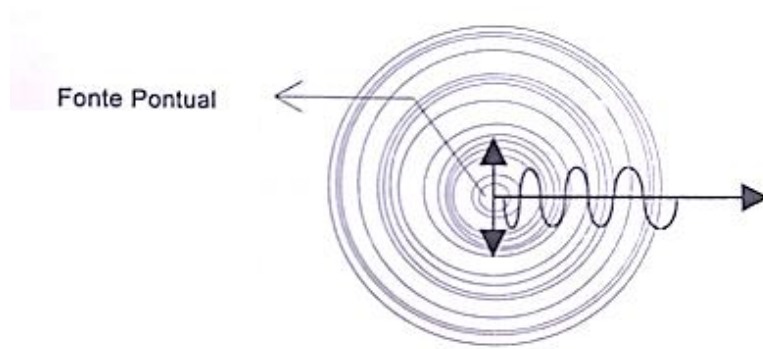


Fig. 2.1. – Propagação do som através de uma fonte pontual, onde se verifica que se trata de uma onda longitudinal [1].

2.2.2. PRESSÃO ATMOSFÉRICA

A pressão sonora necessita de um meio para se propagar, caso contrário, não existiria o som. Por isso, para medir uma variação de pressão provocada por ondas sonoras, é essencial ter em conta que, no caso da terra, o meio de propagação é a atmosfera, que tem como valor de referência de pressão sonora (p_0 ou P_{at}) de valor 101.400 Pa, arredondado habitualmente para 10^5 Pa (Fig. 2.2.) [1].

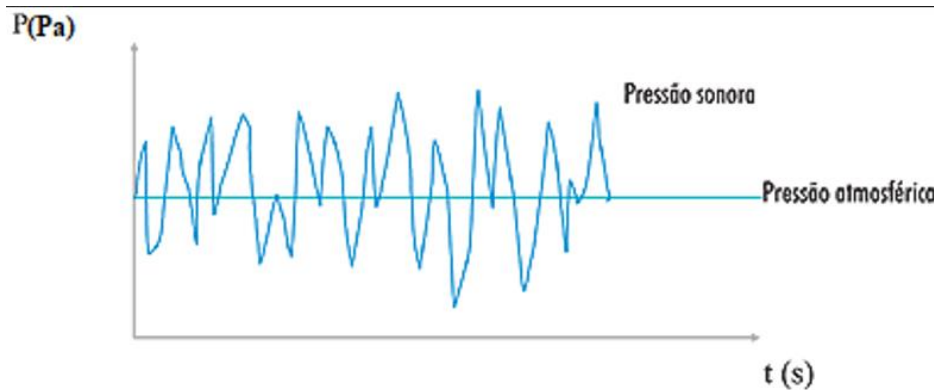


Fig. 2.2. – Comparação da variação de uma pressão sonora $p(t)$ com situação de referência de pressão atmosférica (P_{at}) [17].

A expressão de propagação de ondas de pressão sonora pode ser deduzida e escrita matematicamente exata usando alguns princípios fundamentais da física. No fim de todas estas deduções surge a *lei geral de propagação das ondas de pressão sonora* (2.1.) [1].

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

Onde c representa a celeridade ou velocidade de propagação das ondas no meio. Para o seu cálculo utiliza-se a expressão (2.2.), verificando-se que esta depende da temperatura do meio [17].

$$c = 20,045\sqrt{T} \text{ com } T(K) = 273,15 + \theta(^{\circ}C) \quad (2.2)$$

Em que θ representa a temperatura em $^{\circ}C$ que deve ser transformada na unidade *kelvin* (K).

2.2.3. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA

A intensidade sonora e potência sonora são duas grandezas relevantes para análise da propagação sonora.

A Intensidade sonora (I) define-se como a quantidade média de energia que atravessa por unidade de tempo uma área correspondente a 1 m^2 , perpendicular a essa direção e é expressa em W/m^2 . É, por isso, uma forma de analisar a componente direcional do som visto que este passa-se a representar por uma grandeza vetorial (Fig. 2.3.) [1] [3].

Potência sonora (W) é uma característica associada à fonte sonora e define-se como sendo a energia total num segundo que atravessa uma esfera fictícia de raio variável e expressa-se em W [1] [4].

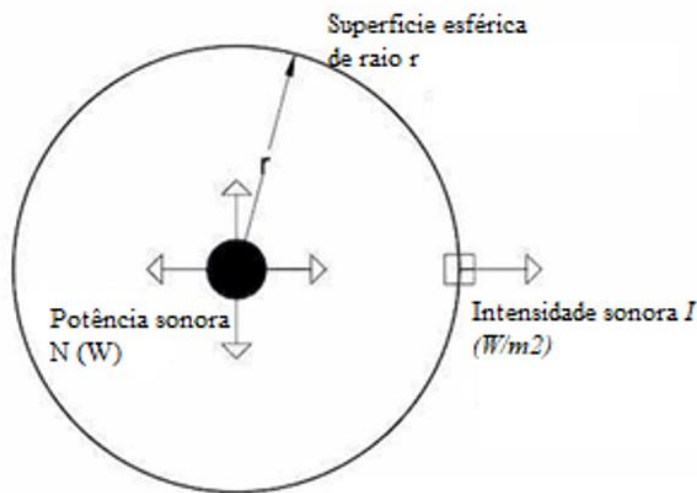


Fig. 2.3. – Relação entre a potência sonora (W) e a intensidade sonora (I) [6].

Estas grandezas (I e W) relacionam-se entre si pela expressão (2.3.).

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c} \quad (2.3)$$

Em que:

- I – Intensidade sonora (W/m^2);
- W – Potência sonora (W);
- r – Raio ou distância (m);
- p – Pressão sonora (Pa);
- ρ – Massa volúmica do ar $\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$;
- c – celeridade (m/s) $\approx 340 \text{ m/s}$.

2.2.4. NÍVEIS DE PRESSÃO SONORA

O ser humano é capaz de ouvir numa gama de pressões que varia entre 10^{-5} Pa , habitualmente referido como limiar da audição e 10^2 Pa , habitualmente referido como limiar da dor. A diferença entre estes dois valores extremos é cerca de 10^7 Pa , sendo assim esta a gama de audibilidade humana. Como esta gama tem um valor muito elevado de diferença, ou seja, o valor máximo e mínimo são muito díspares, seria impensável utilizar esta escala linear em *pascal* para o tratamento de valores de medições de pressões sonoras, como tal foi introduzida uma nova grandeza, que avalia o nível de pressão sonora, o decibel (dB) que se traduz numa nova escala em que o limiar da audição é cerca de 0 dB e o limiar da dor cerca de 130 dB (Fig. 2.4.) [1] [2].

De modo a realizar a conversão de pressões (p) para níveis de pressão sonora (L_p) utiliza-se a expressão (2.4.).

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} \quad (2.4)$$

Onde,

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

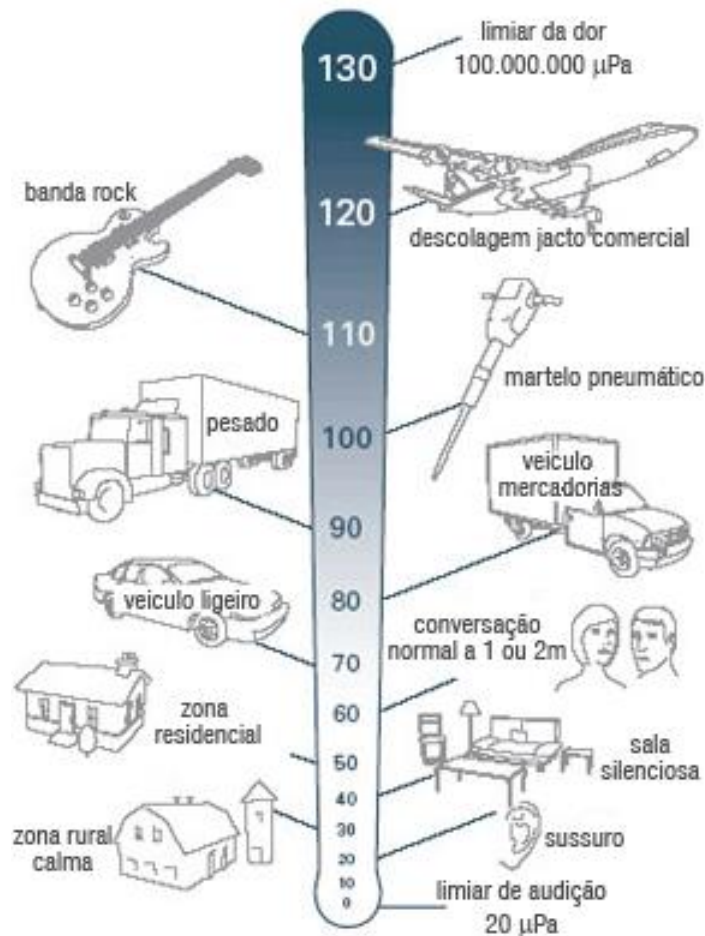


Fig. 2.4. – Níveis de pressão sonora da escala de dB de várias situações do quotidiano [43].

Da mesma forma, é possível representar um fenómeno sonoro através de outras grandezas, também medidas na escala de dB. Existem os níveis de intensidade sonora (L_I) e níveis de potência sonora (L_W) que estão relacionados com os fenómenos de intensidade sonora e potência sonora descritos anteriormente [1]. Podem ser obtidos através das expressões (2.5.) e (2.6.), análogas à expressão (2.4.).

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (2.5.)$$

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (2.6.)$$

De onde,

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

2.3. ANÁLISE EM FREQUÊNCIA

2.3.1. DEFINIÇÃO

Frequência é uma grandeza física que indica a quantidade de vezes que uma certa ocorrência se deu num determinado intervalo de tempo [2]. Como explicado anteriormente, o som propaga-se através de variações de pressões num meio gerado por vibrações de partículas, por isso a frequência de um som é determinada pela ocorrência dessas variações completas de pressão por segundo, ou seja, o seu número de ciclos por segundo e exprime-se em *hertz (Hz)* [1][2].

O aparelho auditivo humano só consegue discernir frequências compreendidas entre os 20 e os 20000 Hz, sendo que os valores abaixo deste intervalo são os infrassons e os valores acima deste intervalo os ultrassons [1].

As frequências podem ainda ser divididas em três zonas [1]:

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

2.3.2. BANDAS DE FREQUÊNCIAS

O ser humano é capaz de distinguir frequências num intervalo grande de valores, que dificulta uma análise muito detalhada desses valores em separado, por isso, de modo a facilitar o trabalho neste âmbito, separam-se os ruídos em grupos de frequências apelidados de “bandas” de frequência e correspondem a intervalos de frequência de uma certa dimensão [1].

Uma banda é o agrupamento de um valor de frequência de limite inferior (f_1) e um valor de limite superior (f_2). O valor médio destes dois valores é chamado de frequência central (f_0) e é determinado pela expressão (2.7.) [1].

$$(2.7) \quad f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$$

A largura de banda (B) é a propriedade que exprime a diferença entre os valores numéricos do limite superior e inferior dessa banda e é calculado pela expressão (2.8.) [1].

$$(2.8) \quad B = f_2 - f_1$$

2.3.3. CURVAS DE PONDERAÇÃO

Existem equipamentos que conseguem registar pressões sonoras com total precisão, seja qual for a frequência, que não se verifica para o caso do ser humano e do ouvido, pois este tem uma sensibilidade auditiva que varia com a frequência, tendo mais sensibilidade para algumas bandas em comparação com outras [1].

Como resposta a isto, foram criados filtros para ajudar na determinação de valores de nível de pressão sonora, que corrigem os valores obtidos de uma certa medição, adaptando-os a esta capacidade, ou falta dela, do ser humano identificar as frequências [1]. Esta correção é representada na forma de curvas de ponderação, em que a mais habitualmente utilizada é a curva de ponderação ou filtro A. Como consequência obtém-se o nível sonoro em dB(A) como um valor global que se traduz pela aplicação do filtro A qualquer ruído, expresso por uma soma algébrica dos valores de níveis de pressão com os valores representados pela curva de ponderação (Fig. 2.5.) (Quadro 2.1.) [1].

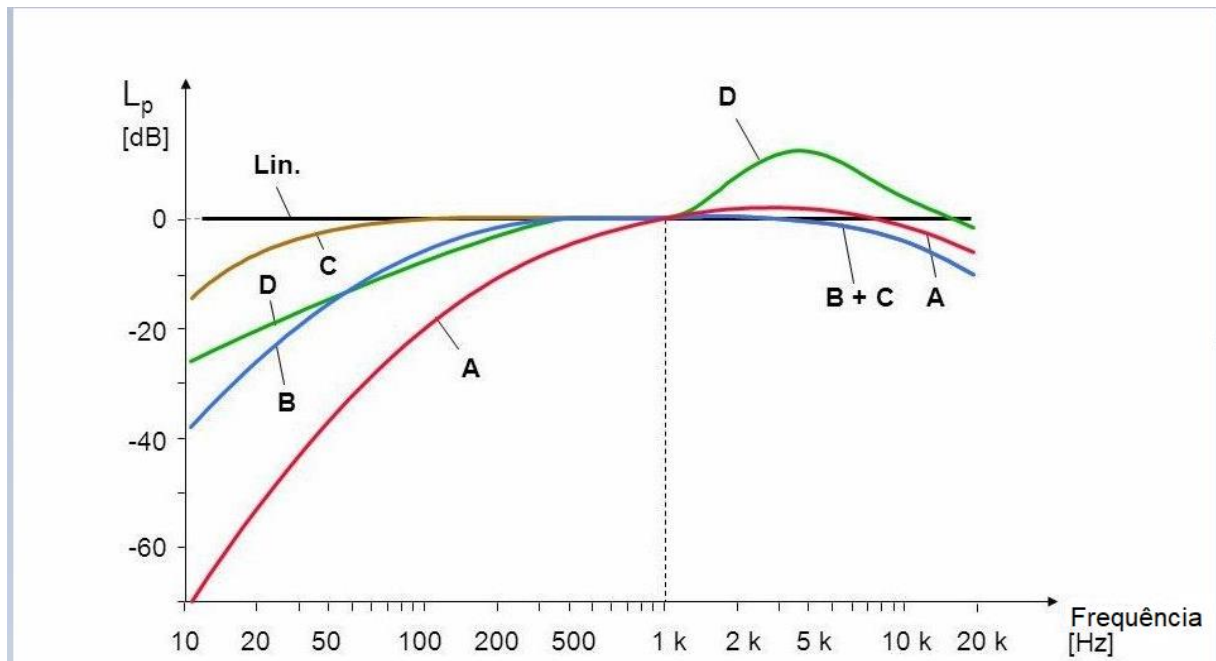


Fig. 2.5. – Curvas de ponderação (filtros), em especial detalhe para a curva A que representa a curva de correção do ouvido humano. É possível ver o valor de correção de nível sonoro deste filtro, ao longo da banda de frequência audível pelo ser humano [5].

Quadro 2.1 – Valores numéricos em dB resultantes da curva de ponderação A para bandas de frequência de 1/1 oitava e 1/3 oitava.[1]

Banda de frequência (Hz)	Ponderação do filtro A para 1/3 oitava (dB)	Ponderação do filtro A para 1/1 oitava (dB)
12,5	-63,4	-57
16	-56,7	
30	-50,5	
25	-44,7	-40
31,5	-39,4	
40	-34,6	
50	-30,2	-26
63	-26,2	
80	-22,5	
100	-19,1	-15,5
125	-16,1	
160	-13,4	
200	-10,9	-8,5
250	-8,6	
315	-6,6	
400	-4,8	-3
500	-3,2	
630	-1,9	
800	-0,8	0
1000	0	
1.250	0,6	
1.600	1,0	+1
2.000	1,2	
2.500	1,3	
3.150	1,2	+1
4.000	1,0	
5.000	0,5	
6.300	-0,1	-1
8.000	-1,1	
10.000	-2,5	
12.500	-4,3	-7
16.000	-6,6	
20.000	-9,3	

2.3.4. COMPRIMENTO DE ONDA

Uma outra característica das ondas sonoras é o comprimento de onda λ , que na sua génese é a distância entre dois pontos iguais consecutivos de uma onda sonora periódica, ou seja, trata-se de uma grandeza que indica a dimensão da onda entre um ciclo de propagação da onda completo (Fig. 2.6.). Exprime-se em metros (m) e é calculada pela expressão (2.9) [1].

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (2.9)$$

Onde,

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

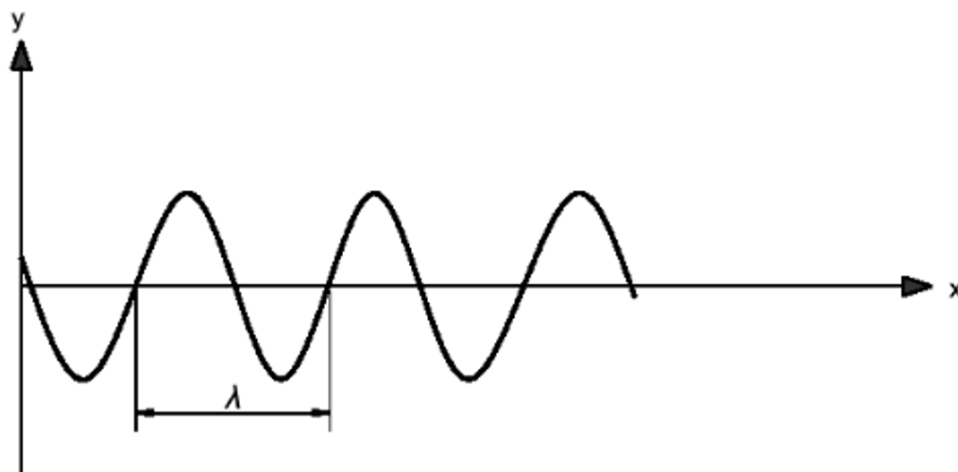


Fig. 2.6. – Comprimento de onda (λ) de uma onda sonora [7].

2.4. SISTEMA AUDITIVO

O ser humano é dotado de um sistema auditivo muito sofisticado, que permite então a captação e processamento das variações de pressão existentes que se propagam pelo ar. Tal não seria possível sem o ouvido humano e toda a sua anatomia que se pode separar em três divisões importantes (Fig. 2.7.):

- Ouvido externo, onde se encontram o pavilhão da orelha que capta as ondas sonoras e as reencaminha através do canal auditivo para o tímpano;
- Ouvido médio, onde se localizam os ossículos que servem como um mecanismo de passagem das ondas sonoras, que se encontram em meio aéreo, para o meio líquido numa zona mais posterior do ouvido. Estes ossículos têm como nome martelo, bigorna e estribo;
- Ouvido interno, onde se encontra a cóclea que é uma espiral cônica que protege no seu interior um líquido chamado perilinfa, que quando sujeito a estímulos vibratórios, faz acionar uma reação eletroquímica que é depois enviada para o cérebro.

Todo este mecanismo de audição é dado em intervalos de tempo de baixíssima grandeza, fazendo, portanto, parecer ao ser humano uma reação quase instantânea a qualquer onda sonora [1] [2].

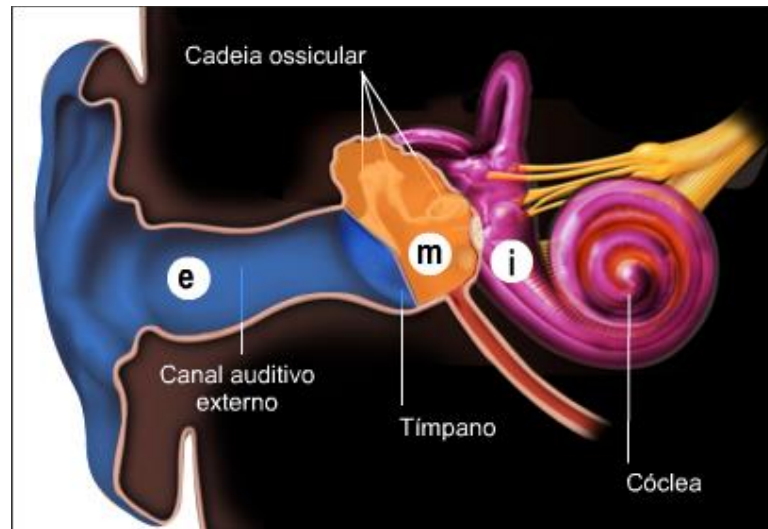


Fig. 2.7. –Constituição do ouvido humano, onde “e”, “m” e “i” representam, respetivamente, ouvido externo, ouvido médio e ouvido interno [9].

2.5. ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS

2.5.1. ABSORÇÃO SONORA

Por definição, absorção sonora é uma propriedade que os materiais possuem de poder transformar uma parte da energia sonora incidente em outro tipo de energia, nomeadamente em energia térmica. Trata-se de um fenómeno físico que é dependente das propriedades dos materiais e é quantificado através do *coeficiente de absorção sonora* (α) e representa uma relação entre a quantidade de energia sonora absorvida por cada material e a energia sonora que incide sobre este como se verifica na expressão (2.10.) (Fig. 2.8.) [1][10].

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvente}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.10.)$$

Como se trata de uma relação, o *coeficiente de absorção sonora* não tem unidades e tem o seu valor compreendido entre 0 e 1, podendo ser expresso também em percentagem (%), funcionando assim como uma escala. Quanto menor o valor deste coeficiente, menos absorvente é o material e por isso denomina-se como material refletor, quanto maior o valor, estamos perante um material com características mais absorventes. Como forma de exemplo, se um certo material tem um α igual a 0,5, podemos afirmar que este absorve 50% da energia incidente [1].

Importante referir também que este valor depende também do ângulo de incidência da energia sonora e da frequência do seu som (Fig. 2.8.) [10].

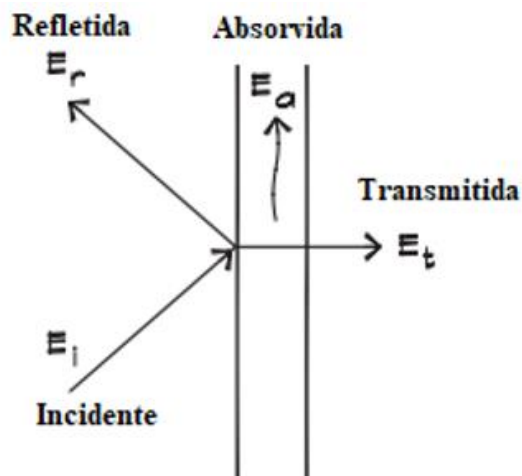


Fig. 2.8. – Funcionamento da transmissão de energia incidente [8].

2.5.2 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO

Atualmente, existem dois métodos devidamente normalizados para determinação do coeficiente de absorção sonora denominado método do tubo de ondas estacionárias ou tubo de Kundt e o método da câmara reverberante [1].

O método da câmara reverberante é o mais eficaz dos dois e baseia-se no uso de uma grande sala com as suas superfícies refletoras, resultando num certo valor de tempo de reverberação medido e fazendo a comparação desse resultado com um novo obtido, mas desta vez, adicionando uma grande amostra de material absorvente (10 a 12m^2) à sala, alterando assim as suas características, o que resulta num valor de tempo de reverberação diferente. Com estes dois valores obtidos é possível então calcular o α através da *fórmula de Sabine* que é evidenciada na expressão (2.11.) [1].

2.5.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

2.5.3.1. CONCEITO

Supondo uma fonte sonora em funcionamento, dentro de um compartimento fechado, verifica-se que as ondas sonoras se dividem tendo em conta a sua origem, refletida ou direta. As ondas sonoras de origem refletida advêm de sucessivas reflexões nas várias superfícies que delimitam o compartimento, tornando-se constantemente mais fracas, não só devido à sua absorção a cada reflexão, mas também à propriedade de absorção do ar. As ondas sonoras de origem direta são um conjunto da emissão diretamente da fonte, acompanhadas com uma série de ondas refletidas ou reverberadas que chegam ao recetor [1][11].

O tempo de reverberação (T) é o conceito proveniente da explicação anterior e é definido como o intervalo de tempo (em segundos), que após múltiplas reflexões, um som demora a dissipar-se por completo [12]. Em termos mais práticos, é o tempo necessário para a diminuição de 60 dB de pressão sonora desde que uma qualquer fonte sonora deixa de estar em emissão (Fig. 2.9.) [11].

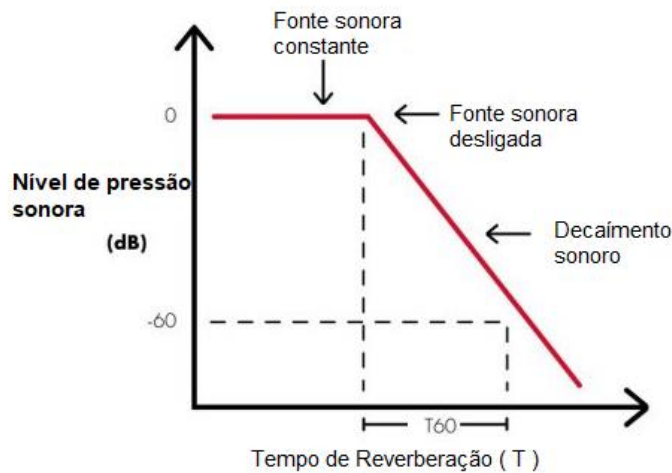


Fig. 2.9. – O tempo de Reverberação explicado graficamente (adaptado de [15]).

2.5.3.2. EFEITOS

Há dois efeitos que surgem com o tempo de reverberação, um deles é o aumento do nível sonoro, causado pelo acréscimo das várias reflexões sonoras ao som direto, que tem uma influência favorável, o outro é o encobrimento dos sons diretos, porque as reflexões vão-se sobrepor ao som direto, que tem uma influência negativa em alguns casos. Para além disso, o tempo de reverberação tem interferência em vários domínios. [1]:

- Palavra – um tempo de reverberação elevado pode originar uma redução da inteligibilidade da palavra, devido à diferença do nível sonoro de emissão e de duração de diferentes consoantes em comparação com a emissão de vogais;
- Música – a música exige salas com características próprias, em que o tempo de reverberação tem de ser superior a salas para uso comum de palavra e, para além disso, há um intervalo de valores ideais deste parâmetro para cada estilo e período musical existente, que exige naturalmente valores diferentes.

2.5.3.3. FÓRMULAS DE PREVISÃO

O tempo de reverberação foi primeiramente estudado pelo físico por Wallace Clement Sabine nos finais do século XIX, surgindo então a expressão (2.11.) conhecida hoje por *Fórmula de Sabine*.

$$T = \frac{0,16 \times V}{A} \quad (2.11)$$

Onde,

- T – Tempo de reverberação (s);
- V – Volume do compartimento (m^3);
- A – Absorção sonora equivalente (m^2).

Em que A é obtida através da expressão:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i + \sum A_j + mV \quad (2.12.)$$

Onde,

- α_i – Coeficiente de absorção sonora do material;

- S – Superfície do material(m^2);
- A_j – Absorções sonoras localizadas;
- m – absorção sonora do ar em função da humidade relativa (m^{-1})

Esta fórmula fornece valores próximos da realidade, mas apresenta algumas limitações, o seu funcionamento exclusivo em locais com campos sonoros difusos e a condição do coeficiente de absorção sonora médio ter um valor inferior a 0,20. Para além disso, esta fórmula é idealizada para um compartimento uniforme com a mesma capacidade absorvente, o que não se verifica na maior parte dos compartimentos, devido à diferença de materiais de revestimento existente nas faces destes e à existência de portas e janelas, que os tornam pouco regulares em termos de absorção sonora em toda a sua extensão[13], daí a existência da segunda parcela na fórmula apresentada na expressão 2.12..

2.5.4. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS

2.5.4.1 CONCEITOS

Tendo em conta as suas características básicas, é possível agrupar os materiais e sistemas absorventes sonoros em três divisões. Cada um destes tipos de materiais atua principalmente numa gama de frequência que lhe é específica (Fig. 2.10.) [1].

- Porosos e fibrosos (por vezes referido como texturados) – atuam em altas frequências;
- Ressonadores – atuam mais em médias frequências;
- Membranas ou membranas ressonantes – atuam mais em baixas frequências.

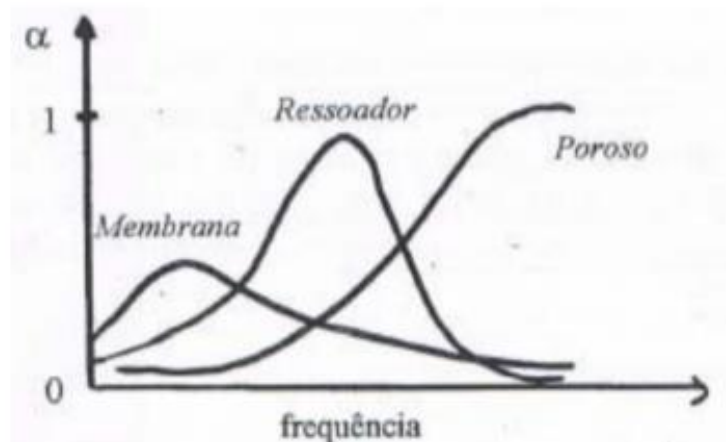


Fig. 2.10. – Comportamento destes três grupos de materiais em função da sua gama de frequência [1].

2.5.4.2. MATERIAIS POROSOS E FIBROSOS

Os materiais porosos e fibrosos têm maior capacidade de absorção sonora para um gama de frequências mais altas. O seu funcionamento tem como base a existência de poros e interstícios nestes materiais que quando recebem as ondas sonoras transferem parte da sua energia para o movimento dessas fibras que criam uma reação de fricção, transformando a energia sonora em calor. Um bom absorvente poroso é aquele que contém espaço ideal entre as suas fibras para que esta transferência de energia ocorra e é de elevada importância preservar a superfície porosa destes materiais de modo a obter um maior rendimento possível [1].

Estes materiais podem dividir-se em vários tipos de acordo com as suas características:

- Tecidos e alcatifas;
- Aglomerados e fibras de madeira;
- Fibras minerais;
- Materiais plásticos (poliuretano expandido, poliestireno expandido);
- Aglomerados de cortiça.

2.5.4.3. RESSOADORES

Os ressoadores separam-se em dois tipos, os ressoadores isolados e os ressoadores agrupados. Os primeiros, também conhecidos como ressoadores de Helmholtz, são menos comuns e atuam com melhor eficiência em médias frequências. Consistem num sistema formado por paredes rígidas, com uma única abertura muito estreita numa das extremidades (Fig. 2.11.). O seu funcionamento pode ser exemplificado com o caso prático de soprar ou falar para dentro de uma garrafa de água vazia, em que o ar no gargalo é colocado em vibração quando recebe ondas sonoras, e por se tratar de um espaço estreito, cria enorme pressão no interior da garrafa. Também pode ser feito um paralelismo do funcionamento dos ressoadores com o efeito de compressão de um sistema mecânico massa e mola, em que quando é aplicada uma força na massa (ar contido no gargalo), a mola entra em compressão (volume de ar do interior) [1].

2.5.3.4. MEMBRANAS

As membranas podem também ser referidas como *membranas ressonantes* ou *painéis vibrantes* e são sistemas com enorme utilidade para atuar em gamas de baixas frequências. Quando uma onda sonora atinge estes sistemas, dá-se uma absorção através da vibração de toda a estrutura, que é constituída por painéis de pequena espessura que criam perdas de calor quando as fibras destes entram em fricção devido ao movimento vibratório da estrutura (Fig. 2.11.) [1].

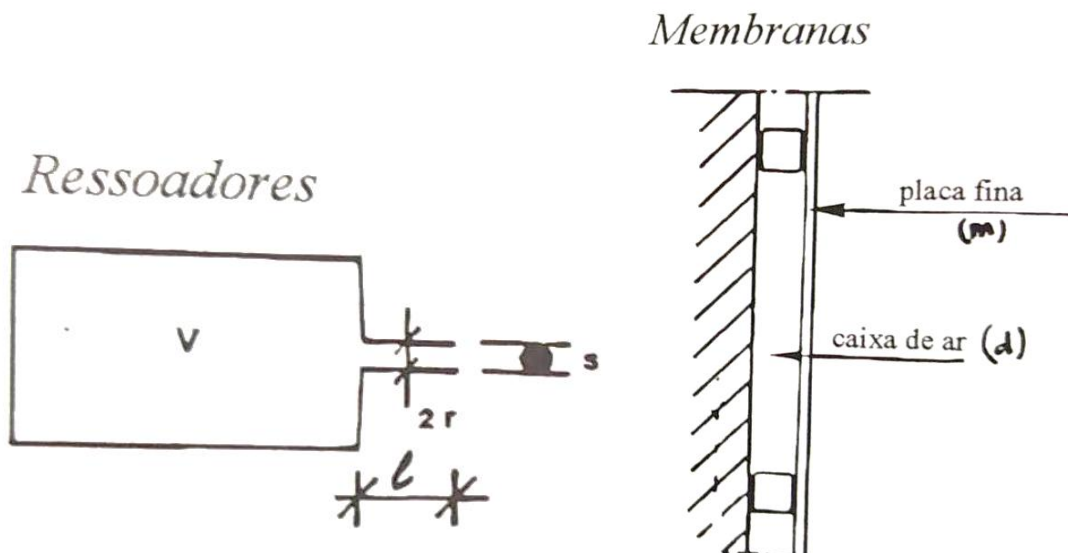


Fig. 2.11. – Esquema de funcionamento do funcionamento dos ressoadores (esquerda) e de membranas (direita) (adaptado de [1]).

2.5.5. ISOLAMENTO SONORO

O isolamento sonoro não será um tema muito aprofundado, pois não será avaliado nas medições *in situ*, porém é importante fazer uma referência porque há diversos trabalhos que abordam este tema mais profundamente, e pode ser separado em dois casos distintos [1]:

- Isolamento a *Ruídos de percussão*, onde há transmissão mecânica direta da fonte sonora nos elementos construtivos.
- Isolamento a *Ruídos de condução aérea*, onde a transmissão sonora é feita exclusivamente por vibração do ar.

2.5.6. RUÍDOS DE EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES

2.5.6.1. ABORDAGEM GERAL

Todas as salas de espetáculo têm, na sua constituição, equipamentos e instalações que podem causar ruído através de percussão ou condução aérea. Estes tipos de instalação são: [1]

- Canalizações, que muitas vezes se encontram ligadas ou embutidas nas paredes, causando um ruído excessivo de percussão devido às vibrações causadas pelo escoamento de água. Por isso, neste tipo de equipamentos é essencial desligar as suas ligações com elementos construtivos, ou então, isolar adequadamente de modo a causar o menos ruído possível. É também importante respeitar regras de traçado e as regras das características das tubagens, tais como velocidade de escoamento relativamente baixa, diâmetros não excessivos, entre outros; [1]
- Instalações elétricas, devendo ser seladas as passagens de cabos e ter em atenção às caixas elétricas e o seu posicionamento; [1]
- Elevadores, que são um grande problema especialmente a nível de edifícios multifamiliares com vários pisos, por se tratar de um mecanismo que exige a existência de uma sala de máquinas e por ser movido por motores, causando muito ruído indesejado. Para estes equipamentos, as regras são isolar a casa das máquinas e afastá-la de locais onde o ruído não é desejado e também tentar isolar o motor do elevador, para evitar ruídos de percussão; [1]
- Equipamentos de aquecimento e climatização, sendo essencial uma atenção especial em fases de projeto para estes tipos de equipamentos, assegurando que estes não prejudiquem o funcionamento do edifício onde se inserem. No caso de sistemas de condicionamento do ar interior, como bombas de calor, é necessário ter em atenção a sua implantação, aplicando medidas de isolamento como dessolidarização da máquina com a tubagem e da tubagem com as paredes e apoios e suportes anti vibráteis para não serem causados ruídos de percussão [1].

2.5.6.2. CURVAS DE INCOMODIDADE

Para a análise da incomodidade de locais como auditórios, salas de concerto, teatros ou cineteatros face ao ruído produzido por equipamentos referidos no subcapítulo anterior, existem as *Curvas de Incomodidade*. Estas curvas servem de ferramenta de análise da incomodidade, através da medição dos níveis de pressão sonora em locais com mais ruído de uma sala e devem ser, de

modo geral, utilizadas apenas para ruídos contínuos como é o caso de sistemas de refrigeração e aquecimento (AVAC). Há um vasto número de curvas estudadas e inventadas para o propósito da análise de incomodidade, em que as principais para o estudo deste trabalho são as NC e NR [1]:

- NC (*Noise Criterion*) – As curvas de NC são definidas pelos seus níveis de pressão sonora para bandas de 1/1 oitava entre a gama de frequência dos 63 e os 8.000 Hz. A sua representação gráfica é feita com o método da tangente (Fig. 2.12.);
- NR (*Noise Rating*) – As curvas de NR são muito parecidas com as curvas NC, com a diferença da gama de frequência utilizada, que neste caso é 32 a 8.000 Hz, representada com a ajuda do método da tangente (Fig. 2.13);
- RC (*Room Criterion*) – Curva de incomodidade de resposta aos ruídos de ar condicionado. Utiliza uma banda de frequências de 16 a 4.000 Hz e utiliza o método da média com zonas de vibração;
- NCB (*Balanced Noise Criterion*) – Uma proposta de melhoramento das curvas NC, utilizando uma gama de frequências diferentes, de 16 até 8.000 Hz, e o método da média com zonas de vibração.

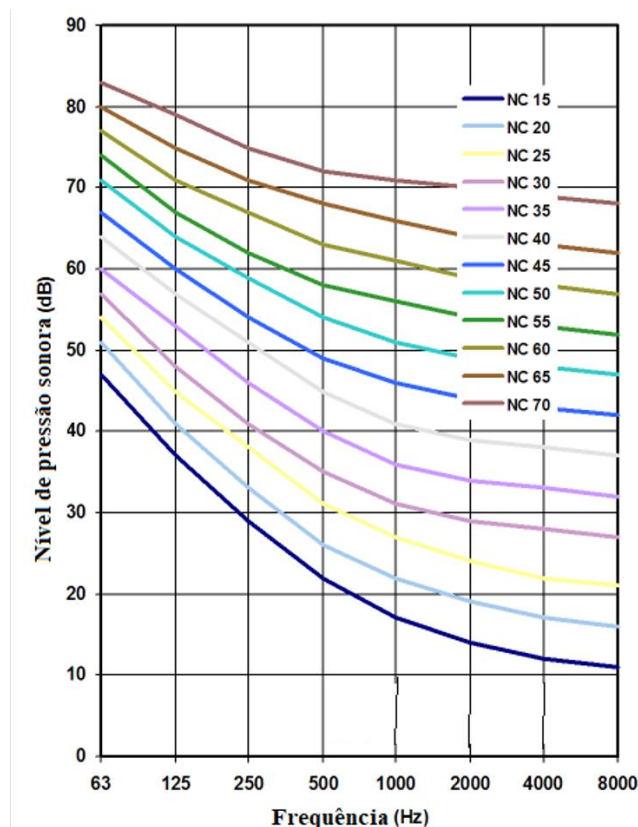


Fig. 2.12. – Curvas de Incomodidade NC (adaptado de [18]).

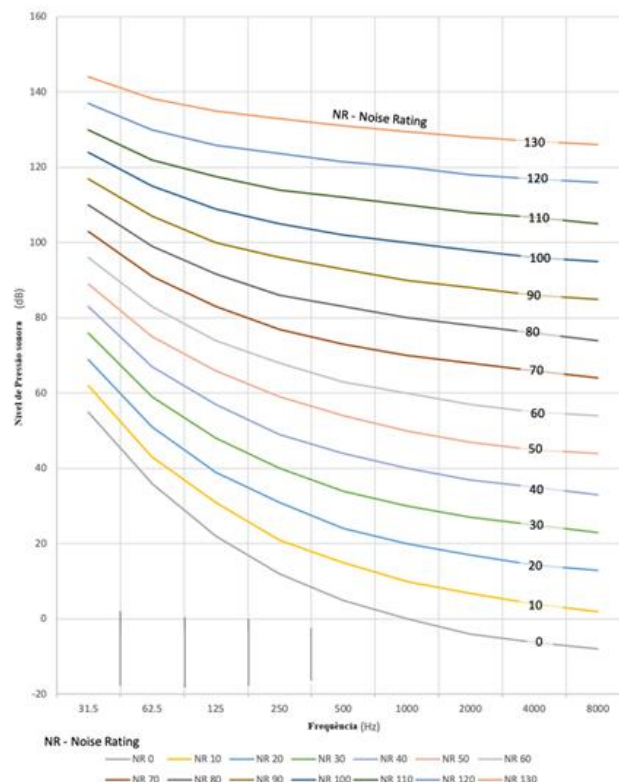


Fig. 2.13. – Curvas de Incomodidade *NR* (adaptado de [19]).

2.5.7. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

2.5.7.1. TEORIA

A palavra desde sempre teve um papel fundamental na evolução do ser humano, mas que só mais tarde foi valorizado. A inteligibilidade da palavra é a capacidade de compreensão das palavras, e tem uma função preponderante na análise do comportamento acústico de um local. Para sua determinação é essencial não só conhecer as características do local, mas também a variabilidade da emissão da voz, e que esta pode ser analisada pela sua frequência, intensidade, duração e direccionalidade (Quadro 2.3.) [1].

Em termos de frequência, os sons proferidos nas palavras abrangem uma gama de frequências vasta, em que as vogais, de um modo geral, utilizam as frequências mais baixas e as consoantes as frequências mais altas. Esta gama varia desde a vogal de menor frequência, u e a consoante de maior frequência, s, com valores compreendidos entre 150 e 300 Hz e 3500 e 7000 Hz, respetivamente. Esta diferença entre vogais e consoantes é também notória em níveis de pressão sonora da emissão, onde as primeiras emitem um som mais fraco e as segundas um som mais intenso, existindo diferenças de cerca de 28 dB entre os seus valores (Quadro 2.3.) [1].

A duração é também diferente para o tipo de palavras, em que as vogais têm uma duração de 90 ms de emissão em média e as consoantes 20 ms de emissão em média. A voz é emitida com diferentes intensidades dependendo da direção no espaço, sendo que é emitida principalmente para a frente de cada pessoa, mas com uma variabilidade direccional que é obtida em função da frequência (Fig. 2.14.) [1].

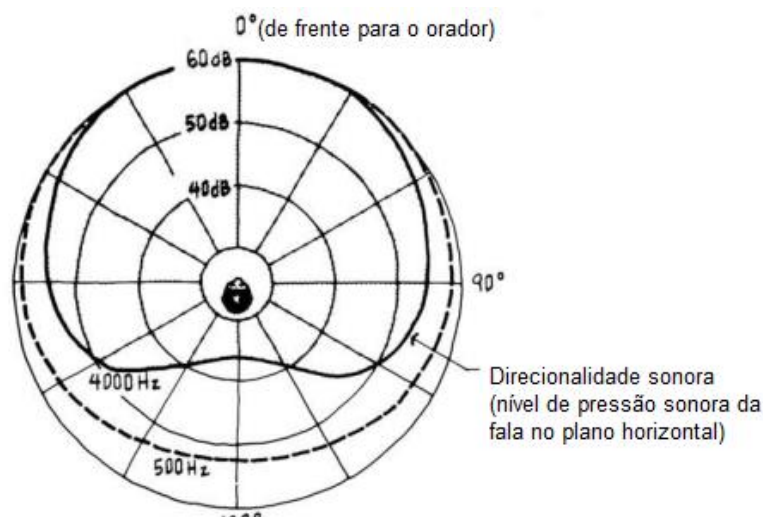


Fig. 2.14. – Contornos da emissão da palavra para a gama de frequências de 500 e 4.000 Hz em bandas de 1/1 oitava. [adaptado de 2]

Quadro 2.2 – Diferença dos parâmetros da emissão da voz entre vogais e consoantes [1].

Tipo	Frequência	Intensidade	Duração	Direccionalidade
Consoantes	baixas	baixo	≈ 20 ms	-20 dB p/ -180°
Vogais	altas	elevado	≈ 90 ms	-5 dB p/ -180°

2.5.7.2. PARÂMETROS DE MEDIDA

Os parâmetros de medida da inteligibilidade da palavra separam-se em dois tipos de testes, Objetivos e Subjetivos. Os mais relevantes para o desenvolver desta dissertação são os testes Objetivos, devidamente normalizados [1]:

- *AI (Articulation Index)*;
- *SIL (Speech Interference Levels)*;
- *AC (Articulation Class)*;
- *STI e RASTI (Speed Transmission Index e Rapid Speech Transmission Index)*.

Com especial relevância para o método RASTI que será um parâmetro determinante no desenvolvimento da dissertação, pois fará parte do capítulo das medições, onde será aprofundado o seu estudo e para o método STI que apesar de não ser abordado no decorrer deste trabalho, era o parâmetro inicialmente proposto, mas que foi desconsiderado após falhas técnicas que impediram a sua correta utilização.

2.6. ACÚSTICA ARQUITETÓNICA

2.6.1. CONCEITOS BÁSICOS

2.6.1.1. REFLEXÕES E ECOS

A envolvente de uma sala é o parâmetro mais influente para a sua caracterização acústica. A sua forma e o tipo de materiais servem de base para um funcionamento acústico eficiente. Um dos

elementos atuantes na envolvente são as ondas sonoras e as suas reflexões. Inicialmente, uma onda sonora emitida atinge o recetor sob forma de som direto, segue-se depois a receção das várias reflexões provenientes da sala. As primeiras reflexões denominam-se como som inicial, e as restantes como som tardio (Fig. 2.15.) [2].

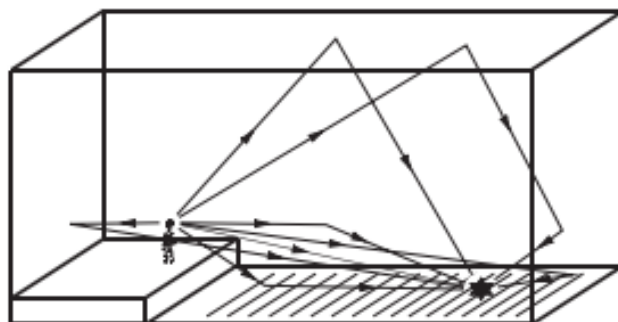


Fig. 2.15. – Efeito das reflexões sonoras num auditório [16].

As reflexões podem ser influenciadas por vários fatores, entre os quais a distância da fonte a uma parede, o tipo de material da parede e a geometria da superfície da parede. Este último, é especialmente relevante porque tem uma grande influência na orientação e na direção que as reflexões seguem. As superfícies convexas, dispersam as ondas sonoras nelas incidentes, sendo por isso uma geometria desejável em situações que necessitem uma boa reflexão sonora. Quando a superfície é plana, as ondas são refletidas em direção contrária à da sua incidência, como se de um espelho se tratasse. Finalmente, quando há superfícies circulares presentes, as ondas sonoras são refletidas em sentido concêntrico, acabando muitas vezes por existirem reflexões que se encontram e se sobrepõem (Fig. 2.16.).[16]

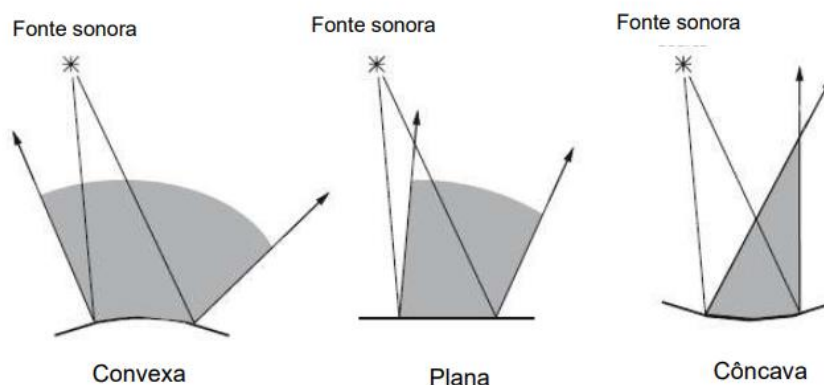


Fig. 2.16. – Efeito das reflexões sonoras em superfícies de diferente geometria [adaptado de 16].

Porém, apesar das reflexões serem muitas vezes favoráveis na criação de uma envolvente com características acústicas satisfatórias, há casos em que estas têm um efeito negativo e são referidas habitualmente como ecos. O eco é uma reflexão que chega ao recetor tarde, mas com grande intensidade, o que origina uma distinção clara por meio do ouvido humano, mais concretamente quando a diferença temporal entre reflexões atinge o valor superior de 50 ms, que se agrava quanto maior for a dimensão da envolvente [1].

Outro defeito acústico, relacionado com o eco é o fenómeno do eco repetido ou *flutter echo*, que é um efeito que surge quando há duas paredes paralelas muito refletoras e relativamente próximas, que refletem uma emissão sonora múltiplas vezes entre elas (Fig. 2.16.) [1]

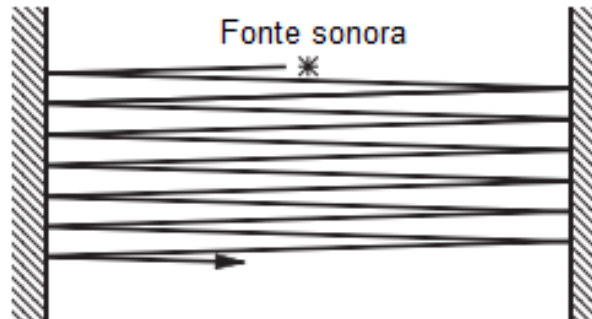


Fig. 2.17. – Efeito do eco repetido ou *flutter echo* entre duas paredes paralelas [adaptado de 16].

2.6.1.2. DIFUSÃO

Como o próprio nome indica, um material difusor ou uma superfície difusora, é aquele que reflete as ondas sonoras em todas as direções. Esta capacidade é influenciada pelo relevo e irregularidade dos materiais da superfície difusora, e, dependendo destas características, há uma gama de frequências para qual a difusão tem efeito, ou seja, as irregularidades e o formato da superfície difusora afeta para quais frequências ocorre difusão. Como forma de exemplo, uma superfície com pouca texturização só difunde ondas sonoras emitidas em altas frequências [16].

A difusão é essencial para um bom funcionamento de uma sala de teatro ou música, pois garante que as reflexões são feitas em todas as direções, não existindo locais da sala com ausência das mesmas. (Fig.2.18) [16].

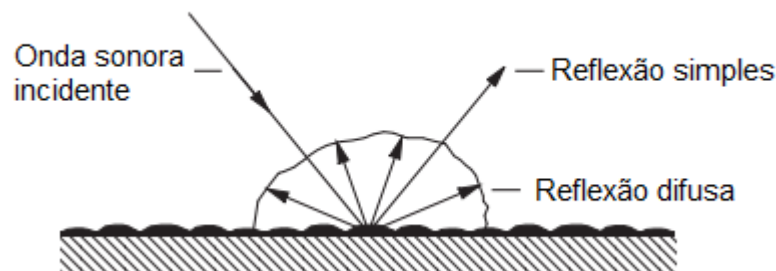


Fig. 2.18. – Esquema do efeito da difusão e comparação com a reflexão [adaptado de 16].

2.6.1.3. ACÚSTICA VARIÁVEL

As salas de espetáculo podem ser palco de diversas atividades no ramo musical, de artes dramáticas ou então para usos da palavra. Na maior parte das vezes uma sala não tem um fim único, ou seja, não é específica para a prática de certa atividade, e por isso é necessário haver uma adaptação desse local de acordo com os diferentes usos da mesma. A acústica variável, como conceito, funciona como essa adaptação, na medida em que fornece a uma sala a capacidade de

alterar as suas características acústicas para receber atividades que exigem comportamentos acústicos distintos [16].

Este princípio baseia-se no tempo de reverberação e na *fórmula de Sabine*, nomeadamente em parâmetros muito influentes nessa fórmula:

- Variação no Volume – Uma das formas de fazer variar o valor do tempo de reverberação de uma sala é realizando uma variação do volume da mesma. Não é uma solução muito utilizada devido à sua dificuldade de implementação, apesar disso, há exemplos de algumas salas com esta característica como o *Jesse Jones Hall* em Houston, Texas [2][16];
- Variação na absorção sonora – Solução mais comum que a anterior, a variação da absorção sonora de uma sala influencia o tempo de reverberação da mesma. Estas soluções aparecem com variadas técnicas, entre as quais, a utilização de absorventes suspensos (*baffles*) pendurados livremente, uma solução muito utilizada em salões modernos, ou através de absorventes fixados na parede, que consoante o tipo de utilização da sala, têm a capacidade de alterar a sua capacidade absorvente, através de mecanismos de rotação do material absorvente, como é o exemplo do *Hong Kong Academy for Performing Arts*. Nesta sala, é possível alterar a forma como o material absorvente fixado na parede (abas) são dispostas, em três formas diferentes, proporcionando assim uma sala com três características diferentes conforme a necessidade. (Fig. 2.22.) [16]. Outro exemplo de absorção variável está esquematizado na Figura 2.22 onde se verifica um mecanismo que altera a superfície de uma parte da parede conforme a necessidade da sala existente no *l'Espace de Projection*, Paris, França [2].

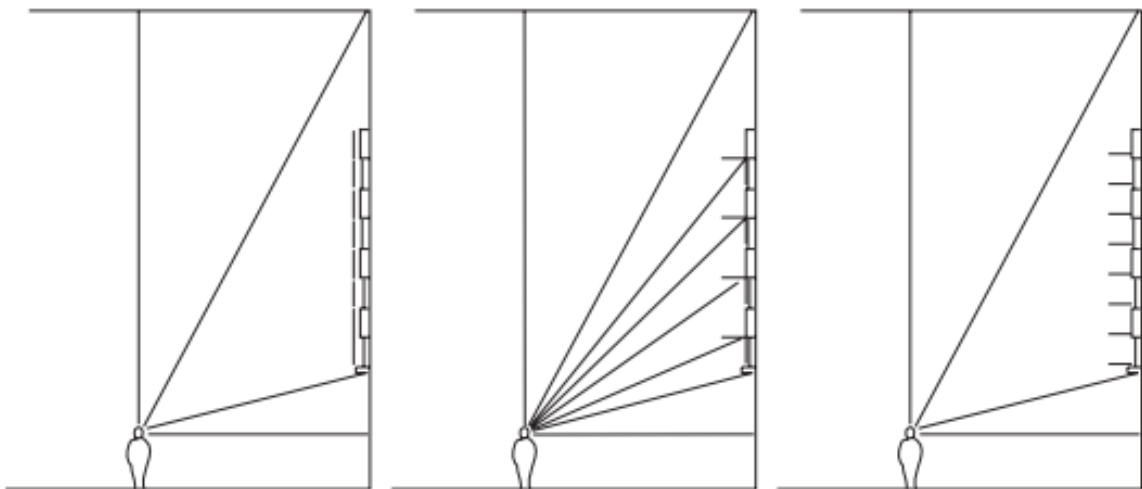


Fig. 2.19. – Mecanismos de acústica variável, variação de absorção sonora do *Hong Kong Academy for Performing Arts*, onde o esquema de arranjo da parede muda consoante a sua necessidade de maior ou menor absorção sonora. À esquerda, com as abas refletoras fechadas, originando poucas reflexões e um tempo de reverberação longo, no meio com as abas meio abertas, originando em muitas reflexões e um tempo de reverberação médio e à direita, com as abas totalmente abertas, originando poucas reflexões e um tempo de reverberação muito baixo. [adaptado de 16].

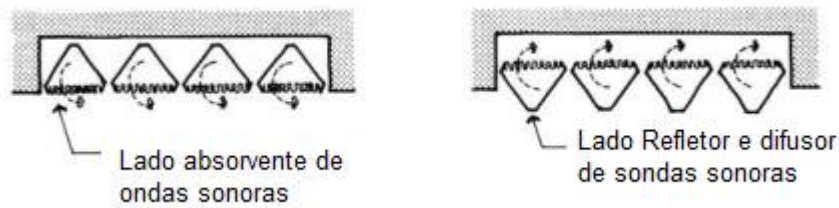


Fig. 2.20. – Mecanismo de absorção variável [adaptado de 2].

2.6.2. PARÂMETROS ACÚSTICOS

2.6.2.1 INTRODUÇÃO

Para quantificar as condições acústicas de uma sala, pode-se dar uso a parâmetros acústicos que se separam em objetivos e subjetivos. Os objetivos são obtidos com uso de equipamentos que medem relações energéticas e/ou temporais das ondas sonoras, ao contrário dos subjetivos que são valores obtidos com análises subjetivas de cada indivíduo, dependendo por isso, da sua opinião pessoal [1].

2.6.2.2. PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJETIVOS

Estes parâmetros são os mais relevantes, de um modo geral, para a análise do desempenho acústico de uma grande sala e para a quantificação potencial da música e da palavra [1]:

- *Tempo de reverberação (TR)* – Conceito explicado no subcapítulo 2.5.2, sucintamente é o tempo que qualquer som demora a dissipar 60 dB, que é geralmente medido com o enfraquecimento de um sinal de 20 ou 30 dB e posteriormente multiplicado por um fator que serve para extrapolar este decaimento para os 60 dB. É obtido pela seguinte expressão (2.14.) [1];

$$TR_{20} = 3[DS^{-1}(25) - DS^{-1}(5)](s) \quad (2.14.)$$

$$TR_{30} = 2[DS^{-1}(35) - DS^{-1}(5)](s)$$

- *Early Decay Time (EDT)* – Conceito idêntico ao anterior, só que desta vez é feita uma adaptação e medido o enfraquecimento de um sinal de 10 dB que posteriormente é multiplicado por um fator de 6 para obtermos uma extrapolação para os 60 dB. Para a sua determinação usa-se a expressão (2.15.) [1];

$$EDT = 6[DS^{-1}(10) - DS^{-1}(0)](s) \quad (2.15.)$$

- *Clareza (C_{80})* – Também referido como *early to late sound index*, é uma razão entre a energia recebida nos primeiros 80ms de um sinal emitido e energia que é recebida posteriormente este intervalo de tempo. Os 80 ms foram assumidos como limite de perceptibilidade da música. Calcula-se através da seguinte expressão (2.16.) [1];

$$C_{80} = 10 \text{ LOG } \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} (s) \quad (2.16.)$$

- *Definição (D_{50})* – Também referido como *early energu fraction* ou *early to total sound index* é a razão entre a energia recebida nos primeiros 50 ms de um sinal e a totalidade de energia recebida deste. Tem uma expressão (2.17.) análoga á anterior [1].

$$D_{50} = 10 \text{ LOG } \frac{\int_0^{50} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt} (s) \quad (2.17.)$$

2.6.2.3. PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJETIVOS.

Estes parâmetros não são tão relevantes no decorrer deste trabalho, porém, como referência, consistem no *ruído de fundo*, *intensidade do som*, *reverberância*, *eco*, *intimidade*, *envolvimento*, *equilíbrio tímbrico*, entre outros [1].

3

ESTADO DA ARTE

3.1. ORIGEM DO TEATRO

O ser humano desde cedo teve a necessidade de exprimir os seus sentimentos, pensamentos e emoções e fê-lo de várias formas desde o início da sua existência e continua a fazer até aos dias de hoje. Surge assim o teatro, que é uma forma de arte colaborativa que utiliza artistas ao vivo, habitualmente denominados atores e envolve o uso de linguagem, da voz, do movimento e de elementos visuais, na busca de exprimir uma experiência real ou fictícia de um evento, perante uma audiência, num local específico [20].

Como se sabe, esse local específico é também denominado de “teatro”, e surgiu de uma forma natural de modo a haver uma necessidade de desenvolver a qualidade das atuações e a sua perceção, para além de criar um local de cultura para as pessoas [21]. Inicialmente, estes espaços começaram por ser arcaicos, mas evoluíram bastante até aos tempos de hoje, visto que existe uma grande dependência de elementos artísticos exteriores para o funcionamento do teatro, sendo estes os cenários, adereços físicos dos intervenientes e todos os aspetos de encenação técnica, entre os quais se destaca a manipulação da luz [22].

3.2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS TEATROS

3.2.1. INFLUÊNCIA GRECO-ROMANA

A necessidade de locais para a abordagem de um grande número de pessoas surgiu naturalmente, em zonas geralmente amplos e abertos. Rapidamente se percebeu a tendência do público se distribuir de uma forma concêntrica à volta do orador, que assumia o papel de foco do som. Como a voz humana tem a propriedade de ser direcional e ser mais perceptível na direção frontal ao orador, verificou-se que o público se movia em busca das zonas de melhor audibilidade, originando assim uma organização de semicírculo em torno deste [8].

O Teatro de *Epidaurus* [Fig. 3.1 e 3.2.], localizado na Grécia foi um dos primeiros teatros ao ar livre a ser construído e conhecido pelo ser humano, datando 330 anos a.C. Tem uma forma de semicírculo com pouco mais de 180° de ângulo com lugar para cerca de 17.000 pessoas e encontra-se embutido numa montanha. Esta construção é totalmente funcional e acusticamente muito evoluída, tendo em conta a data da sua construção, e é possível ainda visitar e assistir a eventos que se realizam nos dias de hoje. A sua capacidade funcional deve-se essencialmente ao

local escolhido para a construção e à qualidade do material e das técnicas construtivas utilizadas [22].

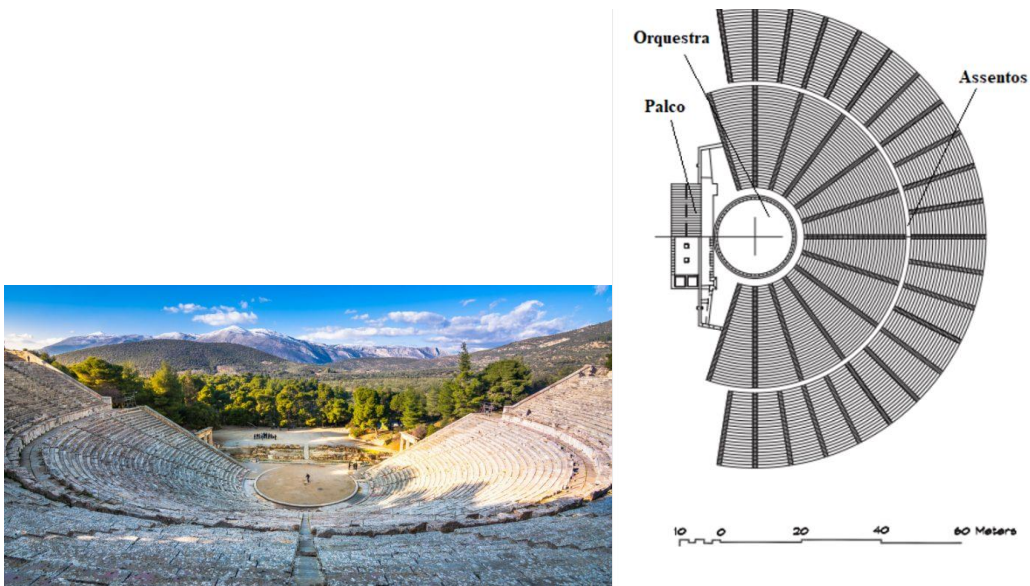


Fig. 3.1. e 3.2. – Teatro de Epidauros à esquerda e esquema em planta do teatro à direita [23][adaptado de 8].

Mais à frente, os romanos utilizaram estes exemplos deixados pela civilização grega e adaptaram estes teatros, fixando o ângulo do semicírculo a 180° e adicionando uma zona de bastidores e uma zona de atuação elevada que se expandia até a plateia. Para além disso, o local para a orquestra passou de ser elevado para um local abaixo do nível do palco e adotou-se o nome de fosso de orquestra para esta zona. Um exemplo é o Teatro Romano de *Aspendus*, localizado na Turquia (Fig. 3.3. e 3.4.) [8].

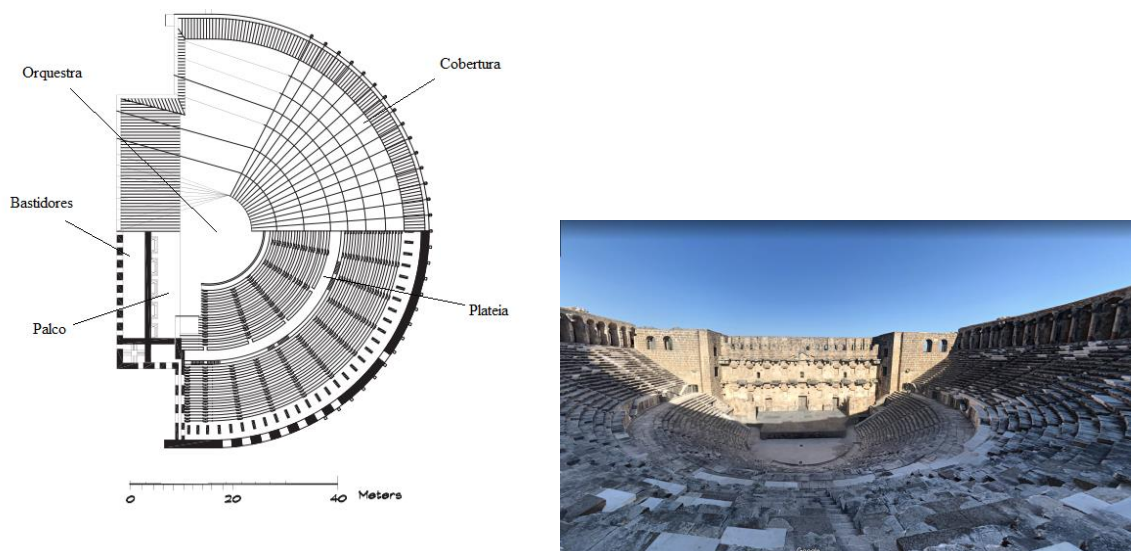


Fig. 3.3. e 3.4. –Esquema em planta do Teatro Romano de *Aspendus* à esquerda e foto retirada do espaço atualmente à direita [adaptado de 8] [24].

3.2.2. RENASCIMENTO

Apesar da crescente evolução da construção de igrejas e catedrais nesta época, a construção de edifícios para teatro foi “abandonada” desde o tempo dos romanos, havendo pouca evolução da acústica nestes anos. Até que no ano de 1580, foi ordenado construir um novo teatro. As características deste teatro são idênticas aos anteriores, com uma organização da plateia semi elítica, um fosso de orquestra, desta vez melhor desenhado e um palco elevado em relação ao fosso da orquestra. Este novo teatro tomou o nome de Teatro Olímpico e encontra-se em Vincenza, Itália (Fig.3.5. e 3.6.) [16].

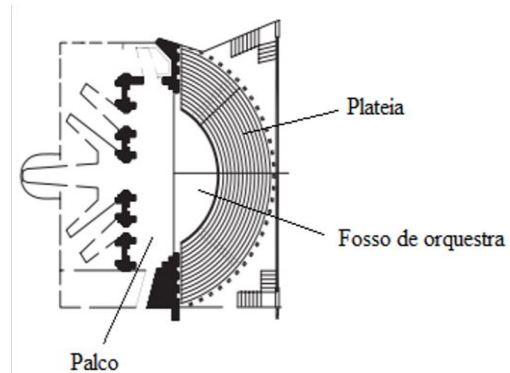


Fig. 3.5. e 3.6. – Teatro Olímpico, Vincenza, Itália (à esquerda) e esquema do Teatro Olímpico, Vincenza, Itália (à direita) [25] [adaptado de 8].

3.2.3. BARROCO

No barroco, a música e o canto começaram a ter uma grande evolução, surgindo várias ramificações de estilos quer da música, quer do canto. Esta evolução, juntamente com o facto da Itália ser um centro cultural e de artes nesta época, suscitou a evolução arquitetónica de teatros. O sentido de funcionalidade da sala como um todo emergiu, devido ao aparecimento da necessidade de alteração das cenas do palco, sendo então criadas zonas próprias que facilitassem as mudanças de cenário, mantendo as bases de existência de uma plateia, palco e fosso de orquestra (Fig. 3.7.) [8] [26].

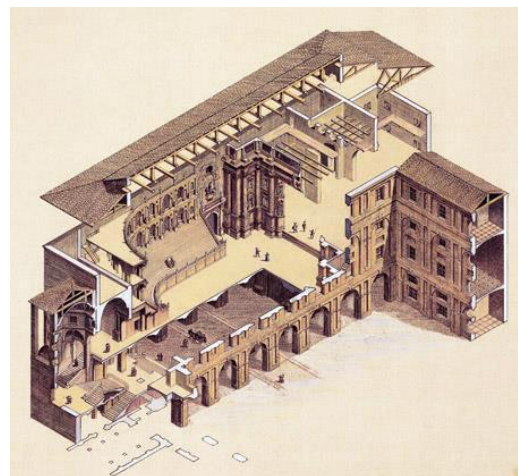
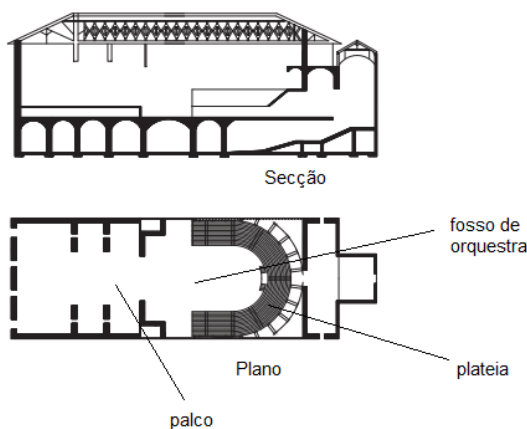


Fig. 3.7. e 3.8. – Esquema do Teatro Farnese, Parma, Itália (à esquerda) e Corte ilustrativo do Teatro Farnese (à direita) [adaptado de 8] [26].

3.2.4. PERÍODO CLÁSSICO

No século XVIII, a Europa era “movida” pelo movimento intelectual e filosófico do Iluminismo, em que o conhecimento era obtido através da razão e da observação. A música clássica nasceu neste período, com cada vez mais atenção da sua escrita para diferentes formas e já com o pensamento do seu desempenho num local com características específicas, durante a fase de composição musical, surgindo grandes compositores como Wolfgang Amadeus Mozart (1756-1791) e mais tarde Ludwig Beethoven (1770 -1827) [8].

Com o período clássico, Itália perdeu a capacidade de ser o foco principal de atuações musicais na Europa, devido à criação de orquestras em cidades como Londres, Paris e Viena, disponíveis para compositores de toda a Europa e à construção e adaptação de edifícios próprios para espetáculos musicais, que até à data eram pouco tradicionais. Em Leipzig, Alemanha, surgiu uma adaptação de uma sala, onde se realizavam atividades relacionadas com comércio, *Gewandhaus*, para uma sala destinada para atuações musicais, nascendo assim o *Altes Gewandhaus* (Fig. 3.9. e 3.10.) [8].

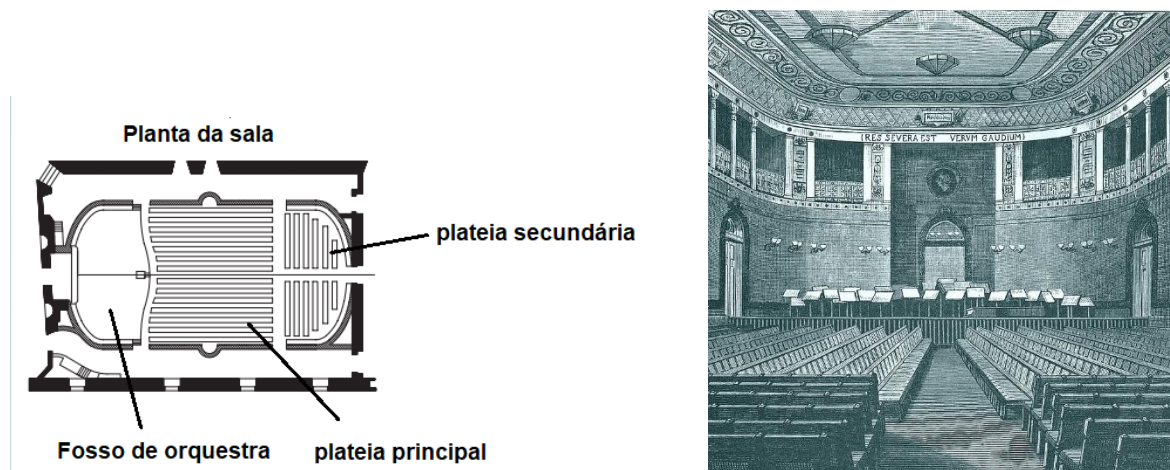


Fig. 3.9. e 3.10. – Planta do *Altes Gewandhaus*, Leipzig, Alemanha (à esquerda) e ilustração em secção do *Altes Gewandhaus* (à direita), onde se pode ver a orquestra como foco principal do edifício [adaptado de 8] [27].

3.2.5 INÍCIO DA ACÚSTICA MODERNA

O século XIX ficou marcado com o início dos estudos da acústica como uma ciência, com várias publicações de grande relevância, por parte de autores conhecidos como *Sensations of Tone* (1860), publicado por Hermann Von Helmholtz e *Theory of Sound* (1877), publicado por John William Strutt. Paralelamente, na década de 1870, surgiu a criação e desenvolvimento dos primeiros dispositivos eletroacústicos, iniciando assim uma nova área de estudo da acústica [1] [8].

Mas foi na transição do século XIX para o século XX que o estudo teórico da acústica arquitetónica foi iniciado por um físico chamado W.C. Sabine. O trabalho de Sabine foi essencial para o desenvolvimento da acústica, pois pela primeira vez, abordaram-se e relacionaram-se assuntos como a reverberação e absorção sonora de uma forma detalhada, surgindo então a primeira teoria de absorção sonora de materiais e a conhecida fórmula de Sabine (Equação 2.11.) [8][28].

Sabine ajudou no planeamento da construção do *Boston Music Hall*, conhecido agora como *Symphony Hall* (Fig. 3.11. e 3.12.) [8].

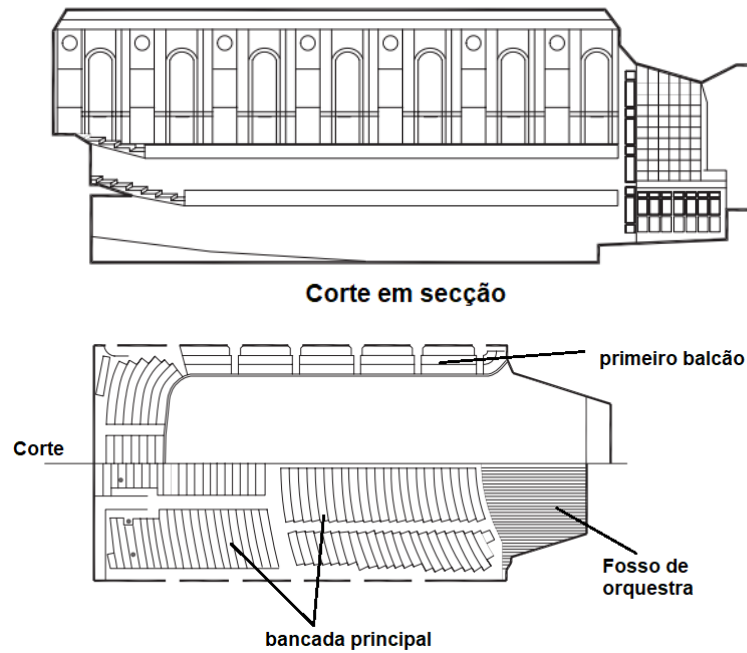


Fig. 3.11. – Planta e corte em secção do *Boston Music Hall* [adaptado de 8].

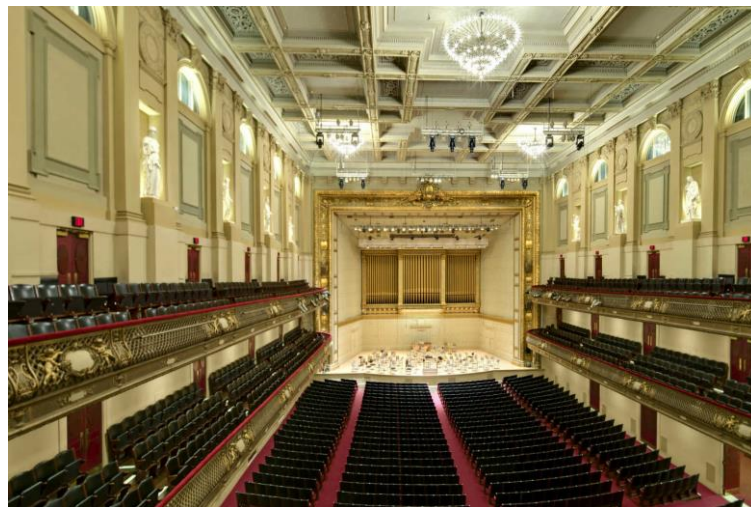


Fig. 3.12. – Fotografia do *Symphony Hall* [29].

3.2.6. SÉCULO XX

No início deste século, a acústica arquitetónica começou a ser reconhecida como ciência e arte. Notou-se um grande desenvolvimento no conhecimento da propagação do som e de materiais com propriedades acústicas, com cada vez mais estudos e trabalhos publicados e desenvolvidos por vários conhecedores desta área. O desenvolvimento da área da eletroacústica, nomeadamente com desenvolvimento de dispositivos como microfones, amplificadores, altifalantes e outros dispositivos de processamento de som [1] [8].

3.3. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS

3.3.1. SALAS PARA A PALAVRA

A qualidade acústica dos auditórios destinados a palestras e discursos é um pouco mais simples em comparação à música. O principal objetivo nesses espaços é garantir a clareza da palavra. Quanto maior a quantidade de energia sonora captada inicialmente, melhor será a acústica da sala. Por outro lado, a energia sonora tardia resulta em reverberação indesejada na compreensão da palavra. Portanto, para aumentar a quantidade de energia sonora inicial, é necessário direcionar ondas sonoras diretas e reflexões iniciais em direção ao público. Superfícies projetadas para refletir ondas sonoras para a plateia mostram-se como uma solução eficaz na produção dessas reflexões iniciais.[2] [8]

Em salas que contém superfícies refletoras capazes de gerar uma quantidade considerável de energia sonora inicial através das várias reflexões, e, ao mesmo tempo, possuem tempos de reverberação curtos têm um bom desempenho acústico. Em espaços dedicados ao uso da palavra, os valores ideais de tempo de reverberação geralmente variam de 0,7 a 0,9 s. Já em espaços destinados a salas de cinema, esse valor é um pouco mais estendido, de 0,8 a 1,0 s [8].

3.3.2. SALAS PARA A MÚSICA

O projeto de auditórios para espetáculos musicais é mais complexo do que para outros tipos de usos. Para garantir uma boa qualidade acústica nesses espaços, é necessário considerar vários fatores acústicos que não eram tão relevantes em outras salas [8].

As salas de espetáculo precisam ser capazes de acomodar grandes plateias, o que traz consigo problemas acústicos já conhecidos e mencionados anteriormente. Além disso, esses auditórios devem ter uma flexibilidade acústica para se adaptarem aos diferentes estilos musicais. Por essas razões, o planeamento de auditórios para espetáculos musicais é um processo muito difícil e trabalhoso [8].

O tempo de reverberação desempenha um papel importante na atmosfera de um auditório. Baixos valores deste parâmetro em salas de espetáculos musicais resultam em experiências pouco satisfatórias para o público. Geralmente, um tempo de reverberação inferior a 1,6 segundos, nas frequências entre 500 e 1000 Hz, pode tornar a experiência musical pouco agradável. [8].

Embora o tempo de reverberação seja um parâmetro importante, não é o único a ser considerado no projeto acústico de salas para fins musicais. É essencial encontrar um equilíbrio nos níveis de pressão sonora em diferentes gamas de frequência. A falta de pressão sonora em algumas frequências produzidas por determinados instrumentos pode causar perturbação na apreciação de um espetáculo musical, para além disso, a difusão do som também é fundamental, pois permite uma distribuição uniforme do som por toda a plateia em auditórios desse tipo. [8].

3.4. LEGISLAÇÃO

Aquando da escrita desta dissertação, a legislação em vigor em Portugal é o Decreto-Lei (DL) nº. 129/2002, 11 de maio de 2002 RRAE (Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios), que foi sujeito a uma primeira alteração a 9 de junho de 2009 através do DL nº 06/2008 e posteriormente a uma segunda alteração a 18 de julho de 2019 com o DL nº 95/2019 [14] [26].

Neste decreto-lei, no artigo 1º, número2, separam-se os edifícios em função do seu uso:

- Edifícios habitacionais e mistos e unidades hoteleiras;
- Edifícios comerciais e de serviços e pares similares em edifícios industriais;
- Edifícios escolares e similares e de investigação;
- Edifícios hospitalares e similares;
- Recintos desportivos;
- Estações de transporte de passageiros;
- Auditórios e salas de espetáculo.

No artigo 2º, surgem definições de parâmetros acústicos a serem analisados e as suas respetivas fórmulas de obtenção:

- Tempo de reverberação (T);

- Isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado ($D_{2m,nT}$)

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} \text{ (dB)} \quad (3.1)$$

- Isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado (D_{nT})

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} \text{ (dB)} \quad (3.2)$$

- Nível sonoro de percussão padronizado (L'_{nT})

$$L'_{nT} = L_i - 10 \log \frac{T}{T_0} \text{ (dB)} \quad (3.3)$$

- Nível de avaliação padronizado ($L_{Ar,nT}$)

$$L_{Ar,nT} = L_A + K - 10 \log \frac{T}{T_0} \text{ (dB)} \quad (3.4)$$

- Termo de adaptação (C ou C_{tr})

Visto que os teatros se enquadram na categoria de “auditórios e salas de espetáculo”, surge neste Decreto-Lei o artigo 10-A que especifica limites legais de edifícios desta categoria, que impõe limites aos parâmetros descritos anteriormente.

- 1- a) O tempo de reverberação médio, T, nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, a considerar para estes recintos, quando mobilados normalmente e sem ocupação, deve satisfazer o seguinte:

$$T \leq 0,12 * V^{\frac{1}{3}}, \text{ se } V < 250 \text{ m}^3 \quad (3.5)$$

$$T \leq 0,32 + 0,17 * \log V, \text{ se } 250 \text{ m}^3 \leq V < 9000 \text{ m}^3 \quad (3.6)$$

$$T \leq 0,05 * V^{\frac{1}{3}}, \text{ se } V \geq 9000 \text{ m}^3 \quad (3.7.)$$

Em que V é o volume interior do recinto, em m³.

- 2- Nos auditórios e salas cuja principal valência não corresponda a atividades assentes na oratória, nomeadamente de auditórios para música ou salas de espetáculo, o projeto de condicionamento acústico destes espaços deve incluir um estudo específico destinado a assegurar a conformação acústica adequada à sua utilização funcional.
- 3- As fachadas dos recintos referidos nos números 1 e 2 devem assegurar que os valores do índice de isolamento a sons aéreos, $D_{2m, nT}$, corrigido do termo de adaptação aplicável, C ou C_{tr} , sejam os necessários para que o nível sonoro contínuo equivalente do ruído

ambiente no interior do recinto, determinado a partir da média espacial de pontos representativos, na ausência de funcionamento das instalações técnicas do edifício, L_{Aeq} , satisfaça o seguinte:

$$L_{Aeq} \leq 30 \text{ dB} \quad (3.8)$$

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

$$L_{Aeq} \leq 30 \text{ dB} \quad (3.9)$$

- 5- A determinação do tempo de reverberação, T , deve ser efetuada em conformidade com o disposto na normalização portuguesa aplicável ou, caso não exista, na normalização europeia ou internacional.
- 6- Nas avaliações *in situ* destinadas a verificar o cumprimento dos requisitos acústicos dos edifícios deve ser tido em conta um fator de incerteza, I , associado à determinação das grandezas em causa.
- 7- O edifício, ou qualquer das suas partes, é considerado conforme aos requisitos acústicos aplicáveis, quando, cumulativamente:
- a) O valor obtido para o tempo de reverberação, T , diminuído do fator I no valor percentual do limite regulamentar, de acordo com o seguinte, satisfaça o limite regulamentar:

$$25\%, \text{ se } V < 250 \text{ m}^3 \quad (3.10)$$

$$35\%, \text{ se } 250 \text{ m}^3 \leq V < 9000 \text{ m}^3 \quad (3.11)$$

$$40\%, \text{ se } V \geq 9000 \text{ m}^3 \quad (3.12)$$

- b) O valor obtido para o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{2m, nT, w}$, acrescido do factor I no valor de 3 dB (A), satisfaça o limite regulamentar;
- c) O valor obtido para o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nT, w}$, acrescido do fator I no valor do 3 dB, e a diferença $D_{nT, oit.63Hz}$ acrescida do fator I no valor de 5 dB, satisfaçam o limite regulamentar;
- d) O valor obtido para o nível do ruído particular, L_{Aeq} , diminuído do fator I no valor de 3 dB, satisfaça o limite regulamentar.

4

MEDIÇÕES

4.1. LOCAL DE ESTUDO

4.1.1. HISTÓRIA

O edifício onde se insere o Teatro Municipal da Covilhã localiza-se na Rua Rui Faleiro 1, 6200-505 Covilhã (Fig. 4.1.) e data a década de 1940, quando foi requerido ao arquiteto Raul Rodrigues Lima, um projeto de construção de um novo teatro na cidade da Covilhã. Este projeto foi finalmente aprovado em 1945, começando assim as obras que viriam a durar cerca de 10 anos, até 31 de maio de 1954, quando se inaugurou o denominado Teatro Cine da Covilhã. Como é indicativo com o nome, o uso deste edifício passava essencialmente pela exibição de cinema, com o teatro a ser então uma arte menos atrativa e afilente de público, tendo em conta que nesta região eram escassas as companhias de teatro existentes (Fig. 4.1.) [31].



Fig. 4.1. – Localização do Teatro Municipal da Covilhã. [32]

Na década de 1980, o edifício acaba por encerrar até 1992, altura em que a Câmara Municipal da Covilhã tenta reativar a sua utilização para promover a cultura da localidade, acabando por reter parte patrimonial do mesmo. Em 2003 são executadas as primeiras reabilitações neste edifício, promovidas pelo programa *Polis*, criado pela União Europeia. Em 2010 o edifício passa a ser totalmente pertencente à entidade camarária, iniciando assim um novo ciclo de vida deste teatro, surgindo cada vez mais, uma programação mais ativa e consistente para satisfazer os desejos da população e nasce o nome de Teatro Municipal da Covilhã [31].

Finalmente, em 2018 inicia-se a última obra de requalificação deste edifício, com o apoio da *InAcoustics*, terminando em 2021. Desde então, o local é utilizado principalmente para espetáculos musicais e peças de teatro, com lugar para cerca de 600 pessoas [31].



Fig. 4.2. – Teatro Cine da Covilhã, 1967. [32]

4.1.2. CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO

O edifício contém no seu interior quartos pertencentes a uma residência cultural, vários camarins, locais de arrumo, escritórios, zona de bastidores e um grande espaço multiusos servindo propósito para alguns eventos. Contudo, o espaço principal e o objeto de estudo desta dissertação é a sala principal do teatro, composta por uma plateia e um palco, no piso 1, e por um balcão superior e uma área técnica, ambos localizados sobre a da plateia e que se encontram no piso 2 do edifício (Fig. 4.2. – Fig. 4.5) (Quadro 4.1.).

Quadro 4.1. – Valores da área e pé direito das zonas principais do teatro.

Divisão/Espaço	Área (m ²)	Pé Direito (m)
Palco	142,75	6,72
Plateia principal	325,63	3,41 até ao balcão
Balcão	209,28	6,40
Área Técnica	141,73	-
Espaço Multiusos	198,07	3,90
Bastidores	53,68	-

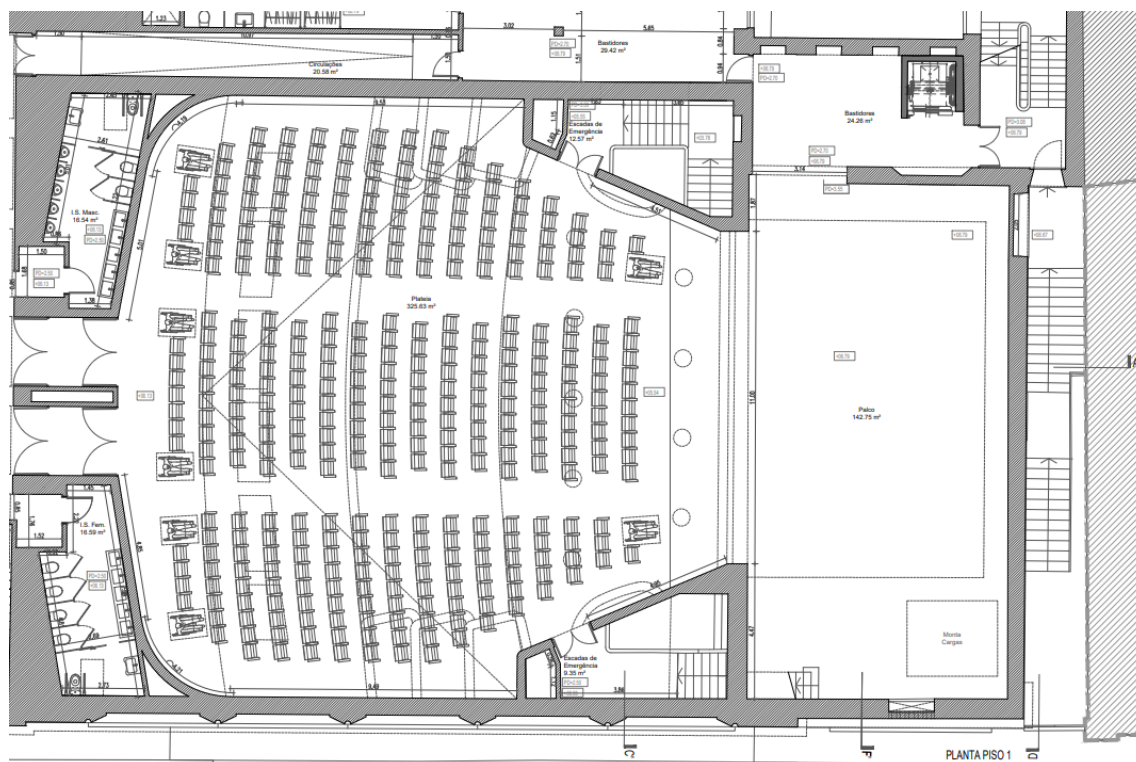


Fig. 4.3 – Planta do Piso 1 da sala principal. [33]

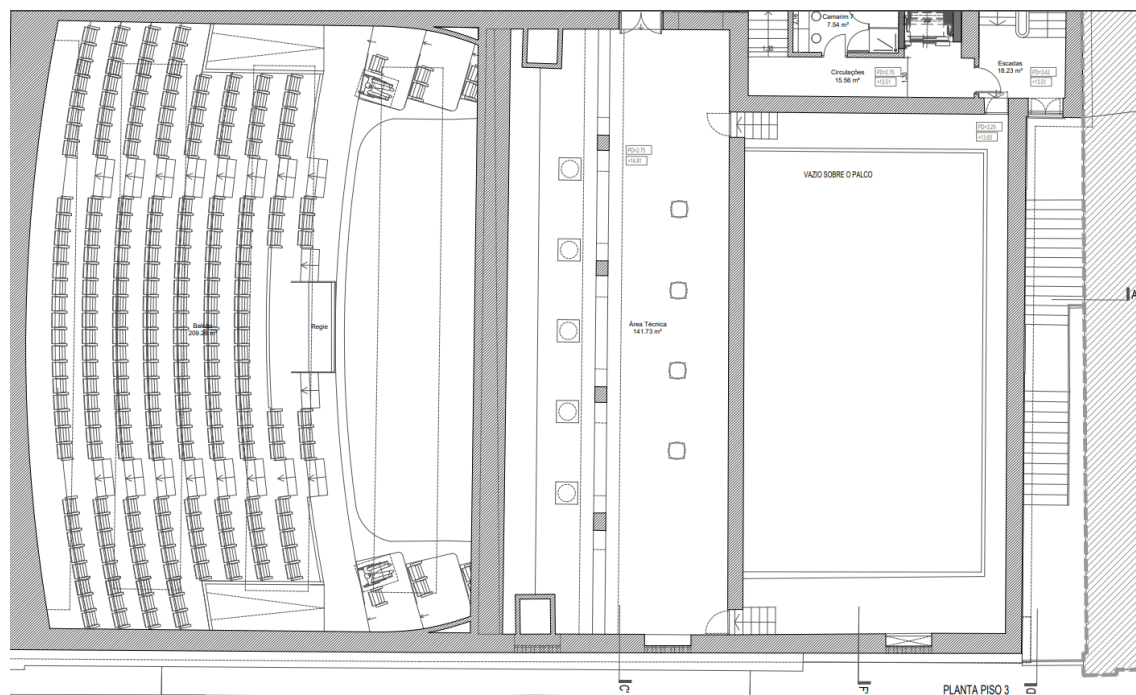


Fig. 4.4. – Planta do Piso 2 da sala principal. [33]

- A parede em frente ao palco apresenta materiais texturados, muito parecidos a difusores denominados de *Art Diffusor* (Fig. 4.8.).



Fig. 4.7. – Cadeira presente na sala do Teatro Municipal da Covilhã. [foto do autor].



Fig. 4.8. – Pormenor da parede frontal ao palco, à esquerda [foto do autor] e difusor *Art Diffusor*, à direita [35].

4.2. PREPARAÇÃO DAS MEDIÇÕES

4.2.1. PARÂMETROS

Para se obter uma caracterização acústica do espaço em estudo, fez-se uma análise de parâmetros objetivos, abordados no capítulo 2, através de medições feitas *in situ* dos seguintes parâmetros acústicos:

- Tempo de Reverberação (TR);
- *Rapid Speech Transmission Index* (RASTI).
- Nível sonoro do ruído de fundo (LAeq) com sistema de AVAC ligado;
- Nível sonoro do ruído de fundo (LAeq) com sistema de AVAC desligado.

4.2.2. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

Os parâmetros referidos no subcapítulo anterior foram todos medidos com equipamentos pertencentes ao Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e, todas as medições, realizadas pelo Engenheiro António Eduardo Costa e auxiliadas pelo autor. As medições concretizaram-se no dia 28 de março de 2023, com a sala em estudo completamente desocupada e sem atividades previstas nesse dia, facilitando muito o trabalho realizado. Utilizou-se então a seguinte lista de equipamentos:

- Fonte Sonora Brüel & Kjaer, modelo 4224 (Fig. 4.9.);
- Microfone de 13 mm Brüel & Kjaer, modelo 4189;
- Sonómetro Brüel & Kjaer, modelo 2260 (Fig. 4.9.);
- Tripé portátil Brüel & Kjaer, modelo UA0049 (Fig. 4.7.);
- Emissor de RASTI Brüel & Kjaer, modelo 4225 (Fig. 4.10.);
- Recetor de RASTI Brüel & Kjaer, modelo 4419 (Fig. 4.10.).

4.3. METODOLOGIA DAS MEDIÇÕES

4.3.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

A primeira medição realizada foi precisamente a do tempo de reverberação, por ser um ensaio mais demorado e trabalhoso, mas de extrema importância para esta dissertação. A montagem começou pela instalação da fonte sonora Brüel & Kjaer, numa posição central do palco da sala em estudo com uma inclinação de 45° (Fig. 4.7.). Esta fonte é própria para medições acústicas de edifícios e consiste num altifalante, com um amplificador e um gerador de som embutidos, que consegue emitir níveis sonoros até 115 dB [36].

De seguida, instalou-se o sonómetro Brüel & Kjaer num tripé portátil, para que este esteja a uma altura desejável e facilite a sua locomoção, porque para uma melhor caracterização deste parâmetro, foi necessário colocar o sonómetro em posições diferentes da sala, escolhidas previamente e com critério.

Em cada ponto escolhido, fez-se duas medições do tempo de reverberação, uma com o sonómetro orientado 45° para a direita, e a segunda com o sonómetro orientado 45° para a esquerda, captando o nível de pressão sonora emitido pela fonte, nas bandas de frequência de 1/3 de oitava de 100 a 5.000 Hz. Como a sala é simétrica, as medições foram todas feitas apenas de um lado da mesma, seguindo um raciocínio de que no lugar simétrico ao medido, os valores obtidos seriam os mesmos ou praticamente iguais (Fig. 4.8. e 4.9.).



Fig. 4.9. – Fonte sonora Brüel & Kjaer, modelo 4224, inclinada 45°, à esquerda e Sonómetro Brüel & Kjaer, modelo 2260, à direita. [foto do autor]

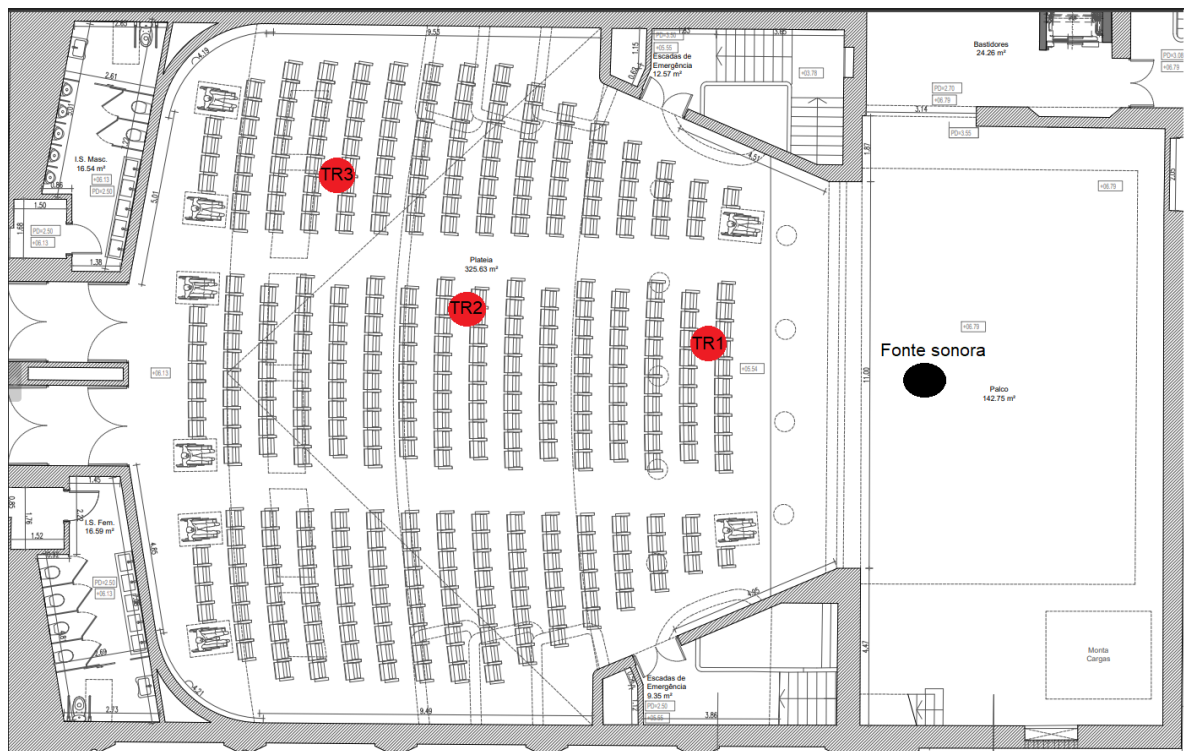


Fig. 4.10. – Malha de pontos escolhida para a medição do tempo de reverberação, na plateia (fonte sonora corresponde à fonte utilizada e os TRi correspondem aos pontos de colocação do sonómetro) [adaptado de 33].

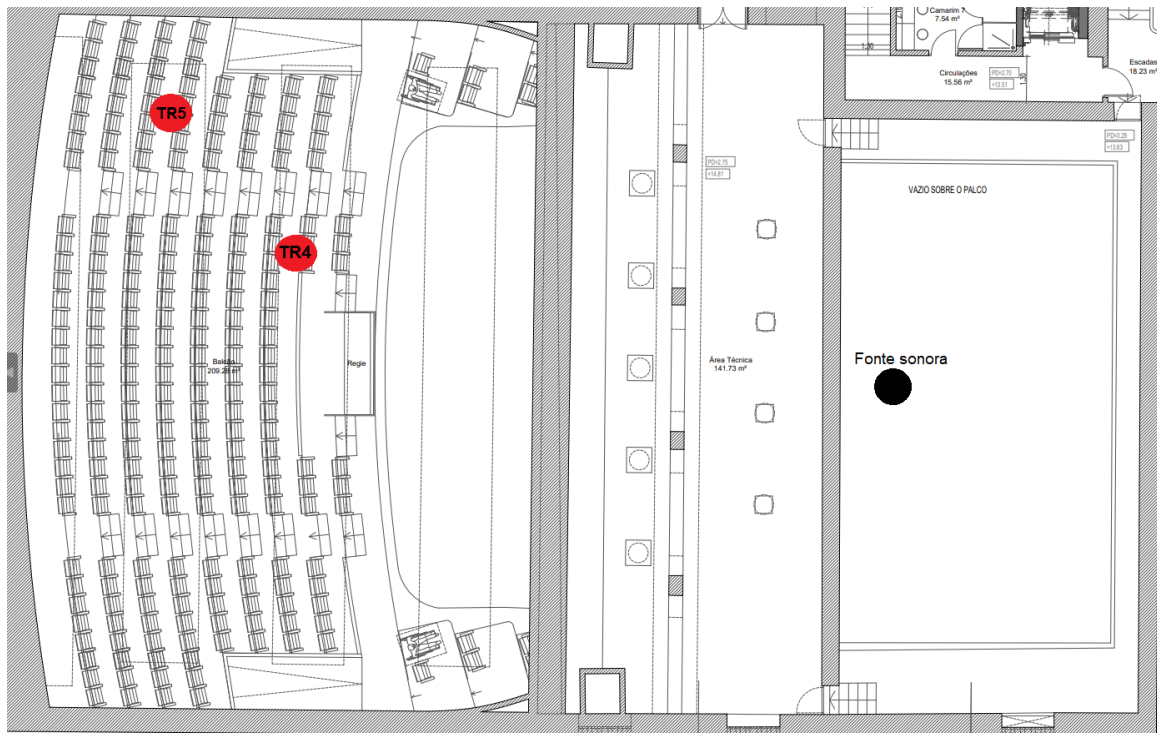


Fig. 4.11. – Malha de pontos escolhida para a medição do tempo de reverberação, no balcão (Fonte sonora localizada no palco e os TR_i correspondem aos pontos de colocação do sonómetro) [adaptado de 33].

4.3.2. RASTI

A segunda medição realizada foi para determinar o parâmetro acústico do *Rapid Speech Transmission Index* (RASTI). Inicialmente, foi necessário fixar o emissor de RASTI Brüel & Kjaer num tripé fixo, de modo a obter uma altura equivalente à altura de um orador, visto que a sala tem uso para artes dramáticas e é essencial que a inteligibilidade da palavra seja boa para que todo o público consiga disfrutar dos espetáculos. Este emissor foi colocado no centro do palco, em direção ao eixo de simetria da sala e emite um ruído, que reproduz a forma como a voz humana funciona, incluindo as suas flutuações resultantes dos diferentes processos de formação das palavras e a forma como as diferentes letras são emitidas. Este ruído é emitido para as bandas de frequências de 500 a 2000 Hz (Fig. 4.10.) (Quadro 4.2.).

Quadro 4.2. – Relação do parâmetro acústico objetivo RASTI com o parâmetro subjetivo da inteligibilidade da palavra [37]

RASTI	Classificação subjetiva de inteligibilidade da palavra
[0 – 0,30[	Má
[0,30 – 0,45[	Fraca
[0,45 – 0,60[	Razoável
[0,60 – 0,75[	Boa
[0,75 – 1]	Excelente



1. *Journal of the American Medical Association*, 2000; 283: 2689-2696.

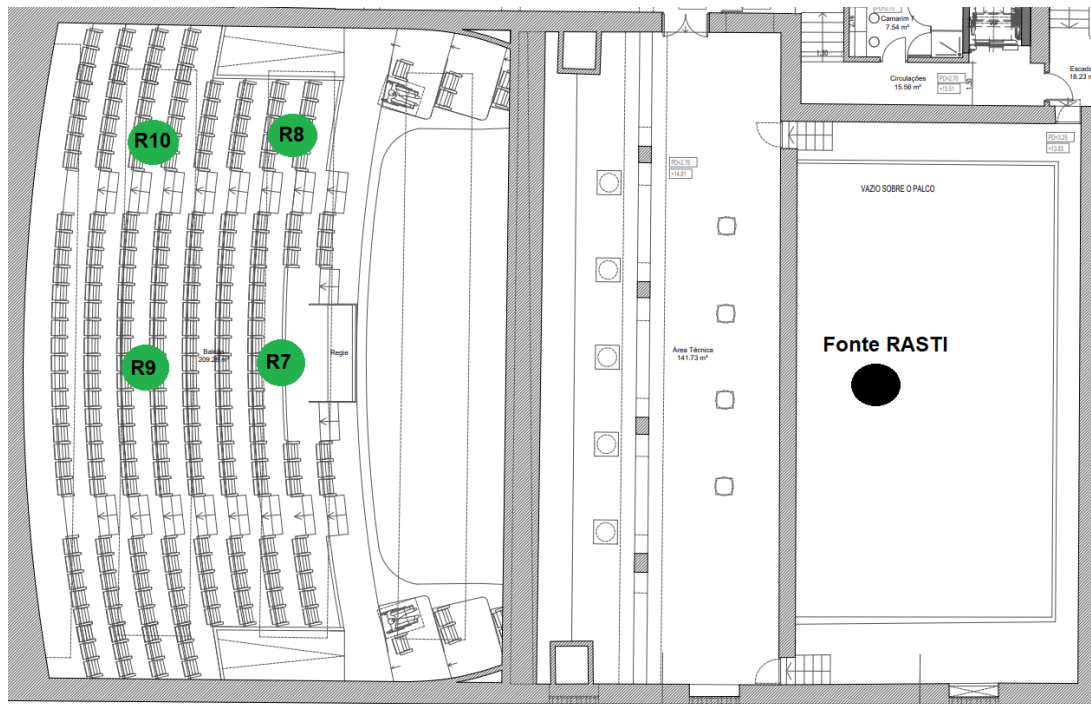


Fig. 4.14. – Malha de pontos escolhida para a medição do RASTI, no balcão do piso superior (emissor RASTI localizado no palco e os Ri correspondem aos pontos de colocação do recetor RASTI) [adaptado de 33].

4.3.3 RUÍDO DE FUNDO

Para medição do ruído de fundo, inicialmente verificou-se que a sala está equipada com sistema AVAC para climatização da mesma, sendo por isso possível a medição deste parâmetro com o sistema AVAC ligado e desligado. Como as medições foram realizadas com a sala vazia, não existiu ruído de fundo proveniente do interior, nem ruído de fundo proveniente de outras fontes exteriores.

Para execução da medição, foi utilizado o sonómetro Brüel & Kjaer colocado num tripé portátil, para facilitar a sua movimentação para os locais definidos na sala (Fig. 4.13). Inicialmente fez-se as medições para a sala sem o AVAC ligado, e depois, as medições 15 minutos após o arranque do sistema AVAC a média potência (Fig. 4.14. – Fig. 4.15.).



Fig. 4.15. – Sonómetro Brüel & Kjaer, modelo 2260 [foto do autor].

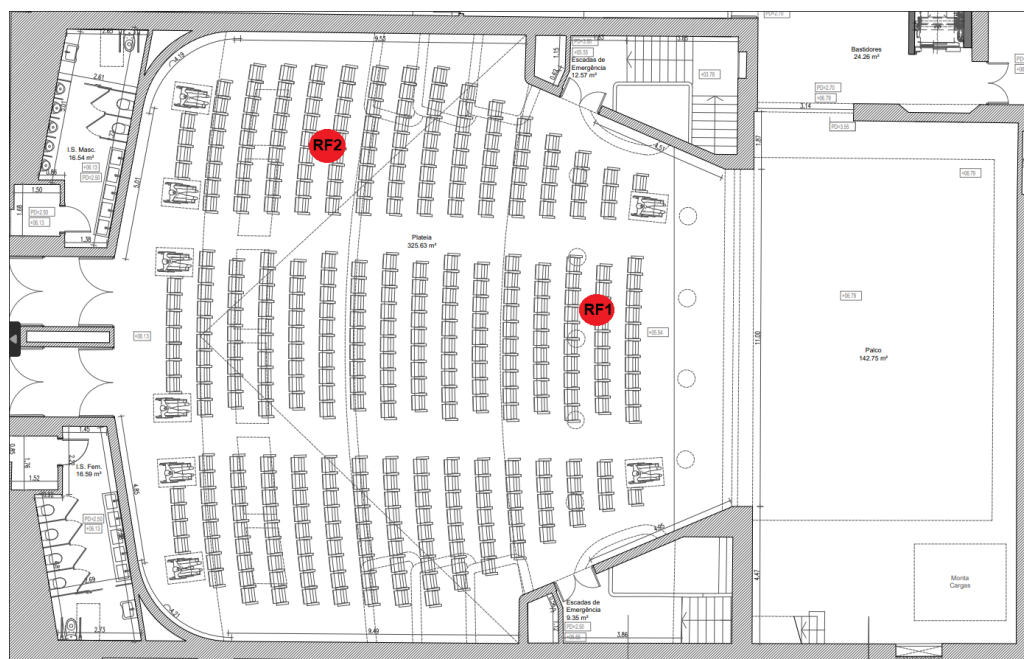


Fig. 4.16. – Malha de pontos escolhida para a medição do Ruído de Fundo, na plateia (RFi corresponde aos pontos de colocação do sonómetro) [adaptado de 33].

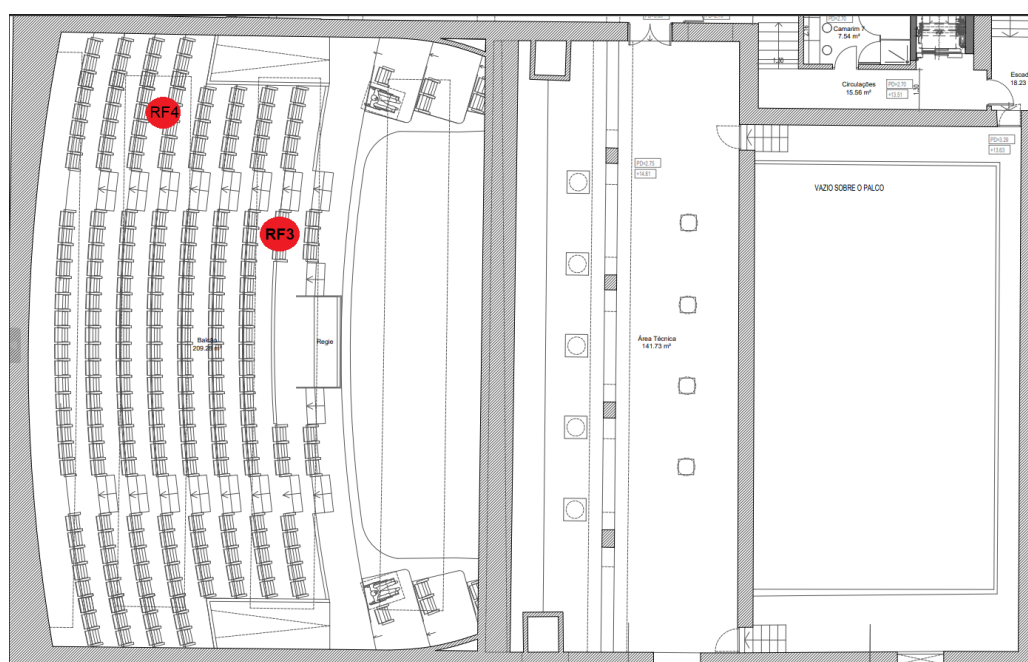


Fig. 4.17. – Malha de pontos escolhida para a medição do Ruído de Fundo, no balcão (RFi corresponde aos pontos de colocação do sonómetro) [adaptado de 33].

5

RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

5.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

5.1.1. MEDIÇÕES

No quadro 5.1. são apresentados os resultados das medições do tempo de reverberação (T_{30}) da sala principal do Teatro Municipal da Covilhã, na malha de pontos escolhida, referenciada no capítulo 4.3. deste trabalho (Fig. 4.8 e 4.9.), em bandas de frequência de 1/3 de oitava, com uma coluna de cálculo da média aritmética dos valores obtidos de todos os pontos em cada frequência.

De acordo com o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) e sendo que a sala de espetáculos principal deste teatro tem um volume de cerca de 4258 m³, consegue-se obter pela equação 5.1., o valor de 0,94 s de tempo de reverberação limite máximo para esta sala, para a função da “palavra”. Para verificar se a sala cumpre com este limite, é necessário transformar os valores obtidos do tempo de reverberação em bandas de frequência de 1/3 oitava para bandas de frequência de 1/1 oitava, na gama de frequências de 500, 1.000 e 2.000 Hz, de modo a obter três valores médios de tempo reverberação para essas frequências. Depois, fazendo uma média aritmética desses valores obtidos, obtém-se um único tempo de reverberação, que tem de ser corrigido com uma percentagem de incerteza de 35% do valor limite do RRAE (0,94 s) para obter então o valor final que vai ser comparado com o limite imposto pela legislação (equação 5.2.) (Quadro 5.2.).

O quadro 5.3 consiste na apresentação dos valores recomendados do tempo de reverberação para diferentes tipos de utilização [1] e a respetiva verificação se a sala em estudo cumpre esse valor de tempo de reverberação. Importante notar que, nesta situação, utilizam-se apenas valores correspondentes às frequências de 500 e 1.000 Hz, obtendo então o valor final médio de tempo de reverberação de 1,43 segundos.

$$T(RRAE) \leq 0,32 + 0,17 \times \log(\text{Volume}) \quad (5.1.)$$

$$\leq 0,94$$

$$\begin{aligned} \text{Tempo de Reverberação corrigido} &= T_{\text{médio medido}} - T(RRAE) \times \text{Incerteza} \quad (5.2.) \\ &= 1,38 - 0,94 \times 0,35 \\ &= 1,05 \end{aligned}$$

Quadro 5.1 – Resultado das medições do Tempo de Reverberação (T_{30}) na sala principal do Teatro Municipal da Covilhã, em bandas de frequência de 1/3 de oitava e a respetiva média aritmética, de acordo com a malha de pontos escolhida.

T_{30} sala de espetáculos (s)							
Frequência (Hz)	Pontos de medição (lugar das cadeiras)					Desvio Padrão	Média
	TR1	TR2	TR3	TR4	TR5		
100	1,81	2,40	2,36	2,25	2,29	0,24	2,22
125	1,79	1,02	1,96	1,99	1,95	0,41	1,74
160	1,65	1,98	2,07	2,05	2,20	0,21	1,99
200	1,90	1,80	1,60	1,92	1,97	0,15	1,84
250	1,94	1,75	1,57	1,94	1,83	0,15	1,81
315	1,57	1,47	1,76	1,62	1,67	0,11	1,62
400	4,37(não contabilizado)	1,50	1,56	1,42	1,47	0,06	1,49
500	1,29	1,34	1,37	1,57	1,55	0,13	1,42
630	1,29	1,35	1,38	1,57	1,50	0,11	1,42
800	1,32	1,43	1,47	1,40	1,37	0,06	1,40
1.000	1,34	1,37	1,46	1,45	1,52	0,07	1,43
1.250	1,34	1,37	1,43	1,39	1,54	0,08	1,41
1.600	1,22	1,30	1,32	1,38	1,4	0,07	1,32
2.000	1,20	1,29	1,23	1,23	1,36	0,06	1,26
2.500	1,14	1,20	1,30	1,25	1,30	0,07	1,24
3.150	1,13	1,19	1,18	1,25	1,24	0,05	1,20
4.000	1,06	1,06	1,08	1,18	1,12	0,05	1,10
5.000	0,89	0,93	0,95	1,05	0,96	0,06	0,96

Quadro 5.2 – Resultado das medições do tempo de reverberação em bandas de 1/1 oitava para as frequências de 500 a 2000 Hz, os valores das médias obtidos e aplicação de uma incerteza de 35% e a verificação do cumprimento do RRAE para a função “palavra”.

Frequência (Hz) 1/1 oitava	Tempo de reverberação médio em cada frequência (s)	Tempo de reverberação médio total medido (s)	Tempo de reverberação obtido com a incerteza de 35% (s)	Tempo de Reverberação máximo de acordo com o RRAE (s)	RRAE (“palavra”)
500	1,44	1,38	1,05	0,94	Não Cumpre
1000	1,41				
2000	1,27				

Quadro 5.3 – Intervalos dos valores de tempo de reverberação recomendados para cada tipo de utilização da sala e a comparação com o valor de tempo de reverberação obtido para as frequências 500 e 1000 Hz em bandas de 1/1 oitava [1][12].

Tipo de utilização	Tempo de reverberação ideal (500 - 1.000 Hz) (s)	Verificação de adequação da sala ($T_{500,1000\text{ Hz}} = 1,38\text{ s}$)
Teatro	0,7 – 0,9	Não Adequado
Cinema	0,8 – 1,0	Não Adequado
Auditórios com propósitos gerais	1,6 – 1,8	Sofrível
Auditório (Palavra)	0,7 – 0,8	Não Adequado
Música popular	0,8 – 1,0	Não Adequado
Música sinfónica Clássica	1,6 – 1,8	Não Adequado
Música sinfónica Moderna	1,4 – 1,9	Adequado
Música sinfónica Romântica	1,9 – 2,2	Não Adequado
Música sinfónica Barroca	1,4 – 1,6	Adequado
Ópera (não wagneriana)	1,3 – 1,7	Adequado
Ópera (wagneriana)	1,8 – 1,9	Não Adequado

5.1.2. PREVISÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO PARA A SALA OCUPADA

Para verificação da conformidade dos valores de tempo de reverberação medidos com o RRAE, realizou-se as medições para uma sala totalmente vazia, mas este não é o caso mais “real”, pois como se trata de uma sala onde se realizam espetáculos culturais, esta encontra-se sujeita à ocupação de espectadores, técnicos e dos artistas musicais ou atores.

Tendo em conta este caso mais prático, é possível fazer uma previsão simplificada do efeito da ocupação da sala nos valores obtidos de tempo de reverberação. Esta previsão baseia-se na utilização da fórmula de Sabine (Expressão 2.11.), fazendo alterar o valor da absorção sonora equivalente (A), adicionando-lhe um incremento (ΔA), proveniente da diferença do coeficiente de absorção sonora da cadeira ($\Delta \alpha$) para o caso de estar ocupada e vazia (Quadro 5.4.). Importante notar que o quadro tem valores para dois tipos de estofos, mas o escolhido para a previsão foi o “estofos médio”. A área das cadeiras foi obtida através do número de cadeiras, multiplicado pela sua área em planta e adicionando um valor marginal de 0,5 m, para atender ao acréscimo em altura das áreas de absorção reais [1]. Depois, no quadro 5.5., são apresentados os resultados dos cálculos feitos para a previsão do tempo de reverberação no caso de a sala estar ocupada, através da fórmula de Sabine, tendo como volume da sala 4258 m³ e adicionando o incremento de coeficiente de absorção equivalente (ΔA) ao valor obtido nas medições e finalmente calculando o novo tempo de reverberação para cada frequência de 500 – 2000 Hz na banda de 1/1 oitava. Como se pode verificar, a média de tempo de reverberação médio destas três frequências é 1,17 segundos, menos 0,21 segundos quando comparado com o valor obtido através das medições realizadas *in situ* de 1,38 s. É notória a influência da capacidade de absorção sonora do ser humano nos valores de tempo de reverberação. (Fig. 5.1.)

Quadro 5.4 – Parâmetros utilizados para o cálculo do tempo de reverberação para a situação de sala ocupada.

[1]

Frequência 1/1 oitava (Hz)		125	250	500	1.000	2.000	4.000
Cadeira vazia α	Estofos médio	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
	Estofos pesado	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79
Cadeira ocupada α	Estofos médio	0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86
	Estofos pesado	0,76	0,83	0,88	0,91	0,91	0,88
$\Delta \alpha$ estofos médio		0,12	0,11	0,12	0,13	0,18	0,14
$\Delta \alpha$ estofos pesado		0,04	0,04	0,05	0,05	0,08	0,09
Área de cadeiras S (m ²) 600							
Volume da sala (m ³) 4258							
ΔA estofos médio (m²)		72	66	72	78	108	84
ΔA estofos pesado (m²)		24	24	30	30	48	54

Quadro 5.5 – Previsão dos resultados de tempo de reverberação para situação de sala ocupada para as gamas de frequência de 500 – 2.000 Hz em bandas de 1/1 oitava.

Frequência (Hz) 1/1 oitava	TR médio medido (s)	Absorção sonora equivalente (A) sala vazia (m ²)	Absorção sonora equivalente (A) sala ocupada (m ²)	TR médio previsto sala ocupada (s)	Média TR previsto (s)
500	1,44	473	545	1,25	1,17
1.000	1,41	483	561	1,21	
2.000	1,27	536	644	1,06	

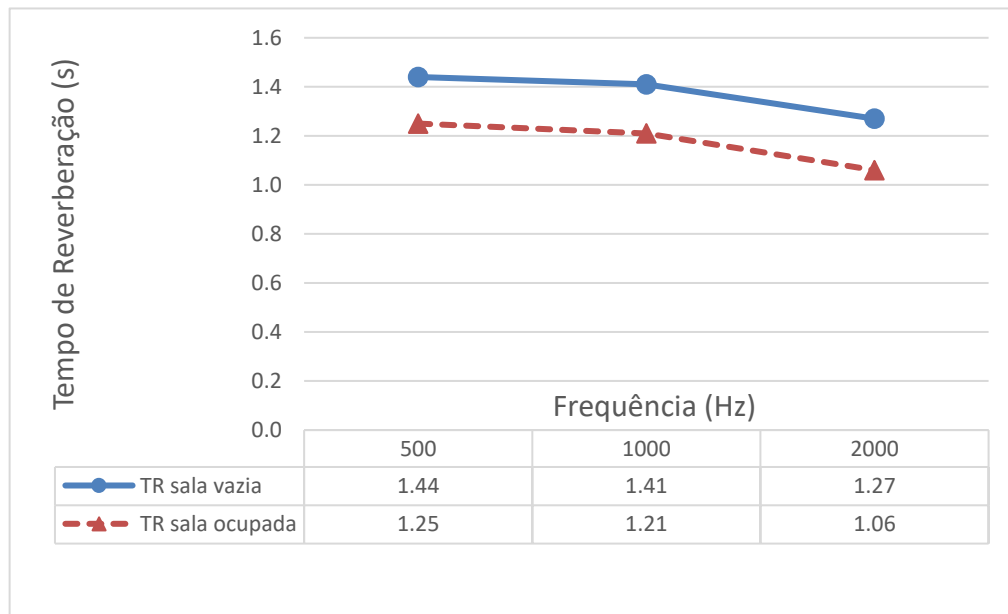


Figura 5.1. – Comparação dos valores de tempo de reverberação nas situações de sala vazia (a azul) e de sala ocupada (a tracejado). [foto do autor]

5.2. RASTI

Como foi explicado no capítulo 2.5.3, o RASTI tem uma ligação com a inteligibilidade da palavra, estabelecendo uma relação que resumidamente está expressa no Quadro 4.2.

As medições foram realizadas de acordo com a malha de pontos (Fig. 4.11. e 4.12), onde o ponto R1 é o ponto mais perto do palco e o ponto R10 o mais afastado do palco. O Quadro 5.6 apresenta os resultados obtidos do RASTI, nas três medições realizadas em cada ponto e a respetiva média desses três valores, que é o valor mais relevante para o estudo deste parâmetro. Pode-se então verificar que os valores pertencem ao intervalo de valores de [0,55 – 0,75], o que indica que a sala apresenta uma classificação de inteligibilidade da palavra razoável ou boa, em que os valores se alteram com a distância ao palco.

Para ter uma melhor ideia dos valores de RASTI obtidos na sala, é apresentado na Fig. 5.2. e 5.3., um mapa de linhas de igual RASTI da sala, que fornece uma melhor perspectiva da variação deste parâmetro, tendo em conta a sua localização face ao palco onde se encontra a fonte. Assim, apesar de apenas terem sido medido os pontos centrais e os pontos do lado direito da sala, considera-se que os valores obtidos nos pontos R2, R4, R6, R8 e R10 são iguais aos valores obtidos na sua posição simétrica da sala.

Como se pode verificar, na plateia, o valor de RASTI decresce com o afastamento ao palco e ao eixo principal da sala, o que era de esperar visto que este parâmetro está relacionado com a inteligibilidade da palavra, e portanto, quanto mais próximo do palco, melhor a capacidade de receção do som. No balcão, obtiveram-se os menores valores deste parâmetro, notando um aumento progressivo com o afastamento ao palco, que se explica pela proximidade dos pontos com as paredes da sala, originando múltiplas reflexões que contribuem de uma forma positiva para uma maior inteligibilidade da palavra.

Quadro 5.6 – Resultado das medições do RASTI na malha de pontos escolhida e a respetiva média aritmética desses valores.

RASTI				
Ponto de Medição	Resultado das Medições			
	1	2	3	Média
R1	0,71	0,73	0,73	0,72
R2	0,63	0,63	0,64	0,63
R3	0,68	0,66	0,67	0,67
R4	0,63	0,64	0,64	0,64
R5	0,66	0,64	0,65	0,65
R6	0,61	0,62	0,60	0,61
R7	0,59	0,61	0,60	0,60
R8	0,59	0,59	0,59	0,59
R9	0,62	0,63	0,63	0,63
R10	0,62	0,62	0,63	0,62

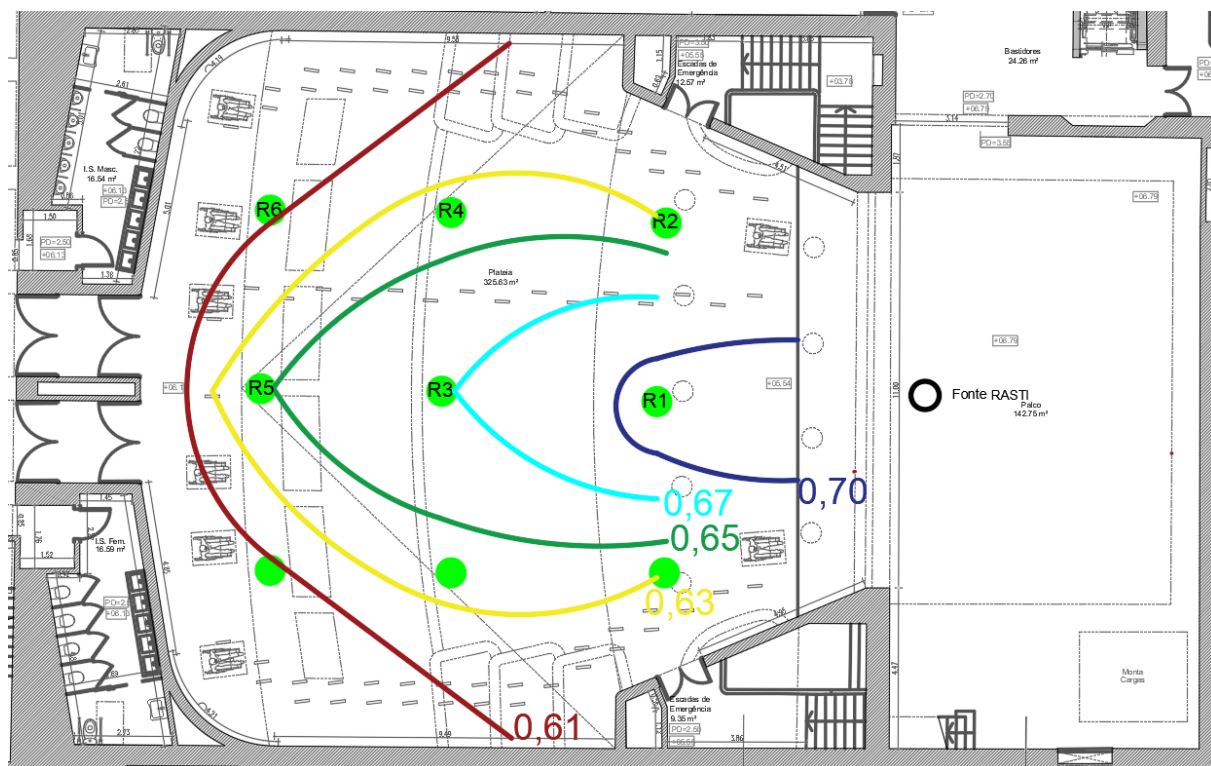


Figura 5.2. – Mapa de linhas de igual RASTI do piso 1 (plateia).

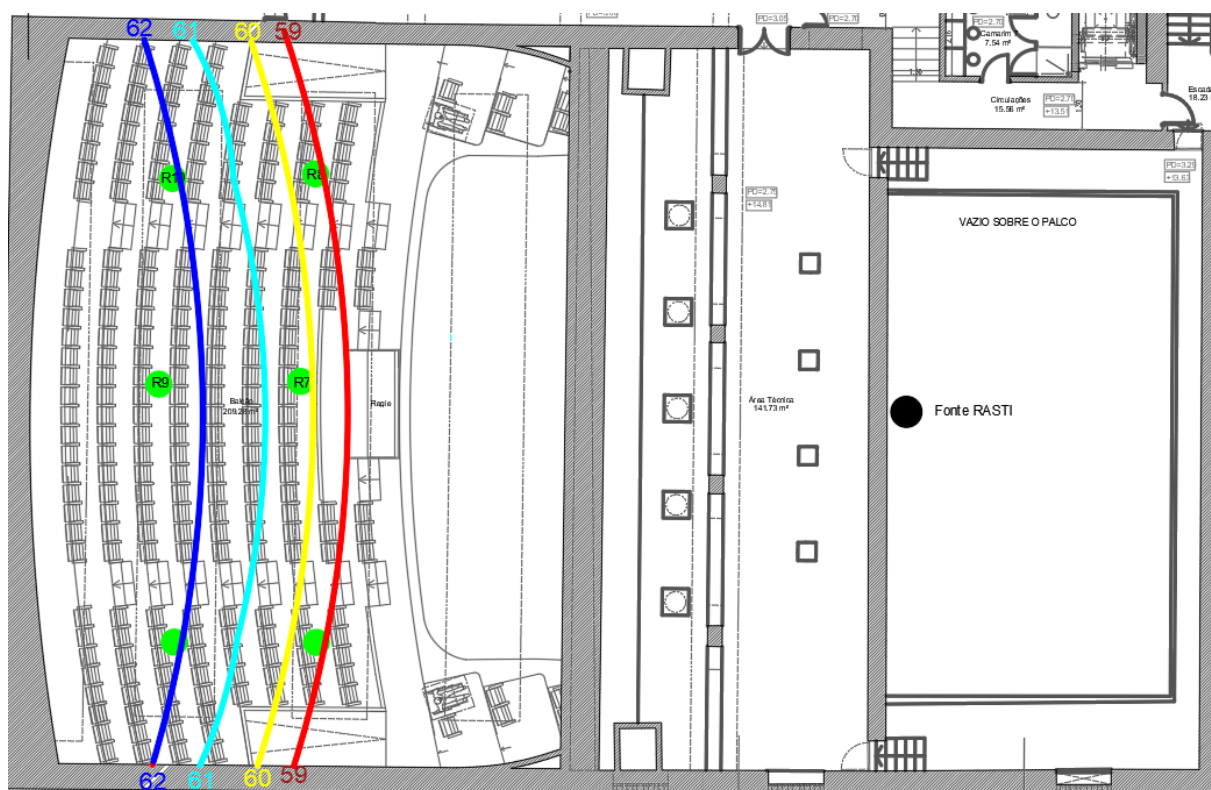


Figura 5.3. – Mapa de linhas de igual RASTI do piso 2 (balcão).

5.3. RUÍDO DE FUNDO

O ruído de fundo está diretamente associado à presença e funcionamento de equipamentos ou instalações mecânicas, que podem criar um ruído de fundo indesejado que afeta a utilização de uma sala de espetáculos. Neste caso, existe a presença de um sistema AVAC na sala em estudo, que pode ser ativado e desativado conforme as necessidades da mesma. De acordo com o RRAE, referido no capítulo 3.4, há um parâmetro associado à existência deste tipo de equipamento denominado nível sonoro contínuo equivalente do ruído ambiente aplicado com filtro A (L_{Aeq}), que tem de cumprir um valor regulamentar máximo de 30 dB, com um decréscimo de incerteza de 3 dB aos valores medidos.

As medições do ruído de fundo foram feitas em duas situações distintas e os resultados são apresentados no quadro 5.7 para a situação de AVAC desligado e no quadro 5.8 com o sistema de AVAC em funcionamento após 30 minutos do seu arranque e os pontos são referentes à malha de pontos escolhida (Fig. 4.14. e 4.15).

No quadro 5.9 é possível ver os resultados obtidos do nível de pressão sonora contínuo equivalente nas duas situações de funcionamento de AVAC, nos pontos selecionados, sem ponderação do filtro A (L_{eq}), e com a ponderação do filtro A (L_{Aeq}). Analisando os resultados é possível verificar que os valores de L_{Aeq} são satisfatórios para a situação de AVAC desligado, mas que não cumprem os limites máximos estabelecidos no RRAE de 30 dB, na situação de funcionamento do AVAC, especialmente nos dois pontos localizados no balcão da sala.

Para uma melhor visualização do efeito do sistema AVAC nos valores de ruído do fundo obtidos, criou-se dois gráficos com estes valores em todos os pontos medidos e para as duas situações de funcionamento do sistema AVAC, para um gama de frequência de 12,5 a 8.000 Hz em bandas de 1/3 oitava (Fig. 5.4, 5.5). Para analisar de um modo geral o efeito do sistema AVAC nos valores de ruído de fundo, pegando nos valores obtidos nas tabelas anteriores, criou-se um gráfico com a média logarítmica dos valores de ruído de fundo medidos nos quatro pontos e outro gráfico com esses valores, mas adicionando o efeito do filtro A, matéria abordada no capítulo 2. (Fig. 5.6. e 5.7.).

Com a ativação do AVAC, há um aumento geral dos níveis de pressão sonora de ruído de fundo, facilmente compreendido por se tratar de um sistema muito potente, de grandes dimensões, sendo este aumento mais notório nos pontos do balcão (RF4 e RF3), que se explica pelo sistema ter as saídas de ar na parte superior da sala numa posição frontal ao balcão. Pode-se também retirar dos dados obtidos, que há um maior efeito do AVAC em gamas de frequências mais baixas (ruído grave), entre os 12,5 e 1000 Hz, por se tratar de um equipamento que de forma geral emite ruídos para esta gama de frequências, e com especial atenção para os 160 Hz onde se nota um pico de aumento dos valores obtidos nos gráficos, indicando que este sistema AVAC emite um ruído muito intenso específico nesta frequência. Através do gráfico da figura 5.8., que representa a diferença entre os valores médios de ruído de fundo obtidos para as situações de AVAC ligado e desligado, pode-se fomentar o que foi explicado neste parágrafo, tendo um aumento máximo de quase 30 dB de nível de pressão sonora para a frequência de 160 Hz quando o AVAC está em funcionamento.

Quadro 5.7 – Resultados das medições do ruído de fundo com o sistema de AVAC desligado, nos pontos seleccionados, numa banda de frequência de 1/3 de oitava, com as respetivas médias energéticas.

Frequência (Hz)	Ponto				Desvio padrão	Média logarítmica
	RF1	RF2	RF3	RF4		
12,5	49,4	48,4	50,0	48,9	0,59	49,2
16	51,5	51,2	51,7	50,7	0,38	51,3
20	49,5	50,3	48,7	47,9	0,89	49,2
25	43,5	44,4	45,2	45,4	0,75	44,7
31,5	35,8	41,3	43,7	43,2	1,03	41,6
40	37,0	41,0	43,9	43,3	1,25	41,7
50	36,1	37,4	38,4	38,2	0,90	37,6
63	32,9	32,6	33,4	33,2	0,30	33,0
80	28,4	28,1	28,9	28,3	0,29	28,4
100	24,9	24,7	26,1	25,9	0,61	25,4
125	22,7	22,2	23,6	22,8	0,50	22,9
160	21,6	21,1	20,8	20,9	0,31	21,1
200	18,8	18,5	17,9	17,7	0,44	18,2
250	17,2	16,3	17,8	16,9	0,54	17,1
315	16,0	15,5	15,6	15,2	0,29	15,6
400	15,0	14,4	14,3	13,6	0,50	14,4
500	12,8	12,0	11,1	10,6	0,84	11,7
630	13,3	12,3	11,0	10,4	1,13	11,9
800	14,0	13,1	11,7	11,0	1,17	12,6
1.000	12,6	12,0	10,5	9,9	1,09	11,4
1.250	10,7	10,4	9,2	8,9	0,76	9,9
1.600	12,7	12,1	11,1	10,7	0,79	11,7
2.000	13,9	12,9	11,8	11,2	1,04	12,6
2.500	11,8	10,9	10,5	9,9	0,69	10,8
3.150	8,1	8,0	8,6	8,3	0,23	8,3
4.000	8,1	8,1	8,7	8,3	0,24	8,3
5.000	8,2	8,3	8,6	8,3	0,15	8,4
6.300	8,1	8,2	8,4	8,3	0,11	8,3
8.000	8,5	8,4	8,4	8,3	0,07	8,4
10.000	9,1	8,9	8,7	8,6	0,19	8,8
12.500	8,5	8,5	8,5	8,5	0,00	8,5
16.000	8,7	8,7	8,7	8,7	0,00	8,7
20.000	9,9	9,8	9,6	9,5	0,16	9,7

Quadro 5.8 – Resultados das medições do ruído de fundo com o sistema de AVAC acionado, nos pontos seleccionados, numa banda de frequência de 1/3 de oitava, com as respetivas médias energéticas em cada frequência.

Ruído de Fundo com AVAC (dB)						
Frequência (Hz)	Ponto				Desvio padrão	Média logarítmica
	RF1	RF2	RF3	RF4		
12,5	47,8	50,9	47,2	60,5	5,33	55,3
16	46,3	47,6	48,7	53,2	2,60	49,8
20	50,4	46,7	49,6	51,9	1,89	50,0
25	50,7	48,6	44,1	45,7	2,55	48,0
31,5	45,3	45,5	45,7	42,6	1,26	44,9
40	46,4	43,8	45,3	44,2	1,01	45,0
50	46,0	42,8	40,6	43,4	1,92	43,6
63	39,6	36,4	34,4	36,9	1,86	37,2
80	35,9	33,1	34,9	36,2	1,21	35,2
100	31,6	29,4	33,1	35	2,05	32,7
125	30,4	29,6	34,7	33	2,04	32,4
160	39,5	41,2	51,8	47,3	4,90	47,5
200	35,4	34,4	40,2	38,2	2,29	37,7
250	29,9	31,6	35,8	35,1	2,44	33,7
315	30,5	32,3	34,2	34,4	1,59	33,1
400	28,5	29,3	32,7	33,6	2,17	31,5
500	29,3	28,9	32,7	34,1	2,21	31,8
630	31,7	31,1	33,7	34,4	1,36	32,9
800	31,9	31,1	35,3	34,6	1,77	33,6
1.000	30,3	29,6	33,9	33,4	1,87	32,2
1.250	28,8	27,2	31,4	31,3	1,77	30,0
1.600	27,9	26,3	30,3	30,4	1,72	29,0
2.000	26,1	24,8	28,9	28,6	1,72	27,4
2.500	24,2	23,2	26,9	27,3	1,74	25,7
3.150	22,0	21,0	24,6	24,6	1,59	23,3
4.000	19,2	18,0	20,9	21	1,25	19,9
5.000	16,7	14,8	17,1	16,9	0,92	16,5
6.300	14,1	12,3	14,3	14,1	0,81	13,8
8.000	10,6	9,4	10,2	9,8	0,45	10,0
10.000	9,3	8,7	9,8	9	0,41	9,2
12.500	9,4	9,0	8,7	8,5	0,34	8,9
16.000	9,3	8,9	8,8	8,7	0,23	8,9
20.000	14,3	13,2	10,3	9,9	1,87	12,3

Quadro 5.9 – Valores obtidos do nível de pressão sonora contínuo equivalente nas duas situações, nos pontos seleccionados, sem ponderação do filtro A (L_{eq}), e com a ponderação do filtro A (L_{Aeq}) e verificação de conformidade com o RRAE.

Parâmetro (dB)	Ponto							
	RF1 (plateia)		RF2 (plateia)		RF3 (balcão)		RF4 (balcão)	
L_{Aeq} s/AVAC	24,1	ΔL= +15,0	23,7	ΔL= +14,8	23,4	ΔL= +20,1	23,0	ΔL= +19,5
L_{Aeq} c/AVAC	39,1		38,5		43,5		42,5	
L_{eq} s/AVAC	57,5	ΔL= +2,3	57,1	ΔL= +5,2	57,0	ΔL= +4,9	56,1	ΔL= +9,4
L_{eq} c/AVAC	59,8		62,3		61,9		65,5	
L_{Aeq} c/AVAC Verificação do RRAE	RRAE ≤ 30 dB outros usos				39,1 – 3 = 36,1dB		Não verifica	
	RRAE ≤ 38 dB cinema				43,5 – 3 = 40,5 dB		Não verifica	

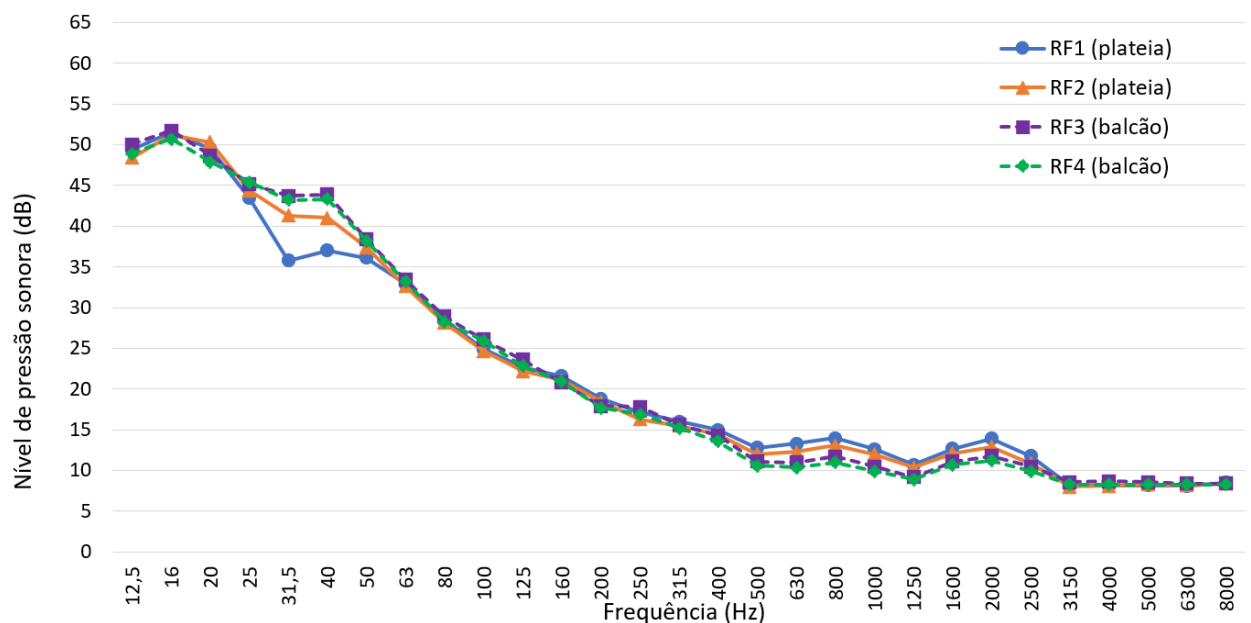


Figura 5.4. – Valores das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) de todos os pontos, na situação de não funcionamento do sistema AVAC.

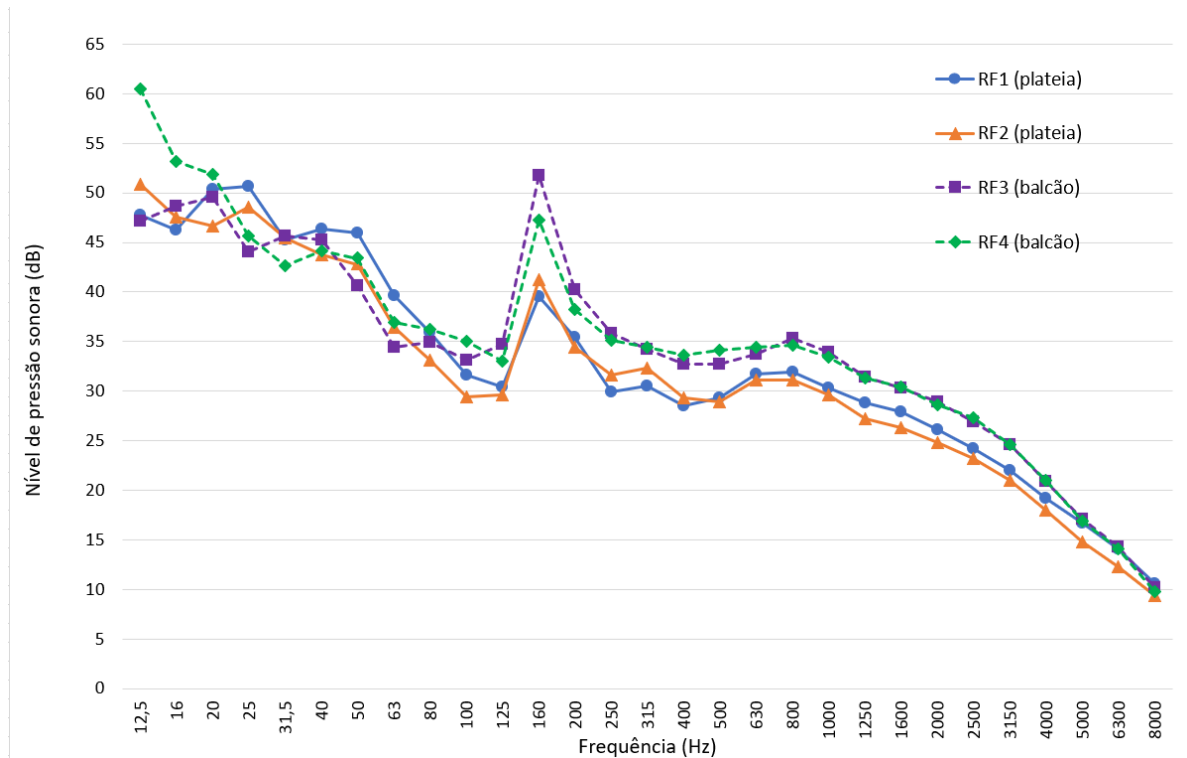


Figura 5.5 – Valores das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) de todos os pontos, na situação de funcionamento do sistema AVAC.

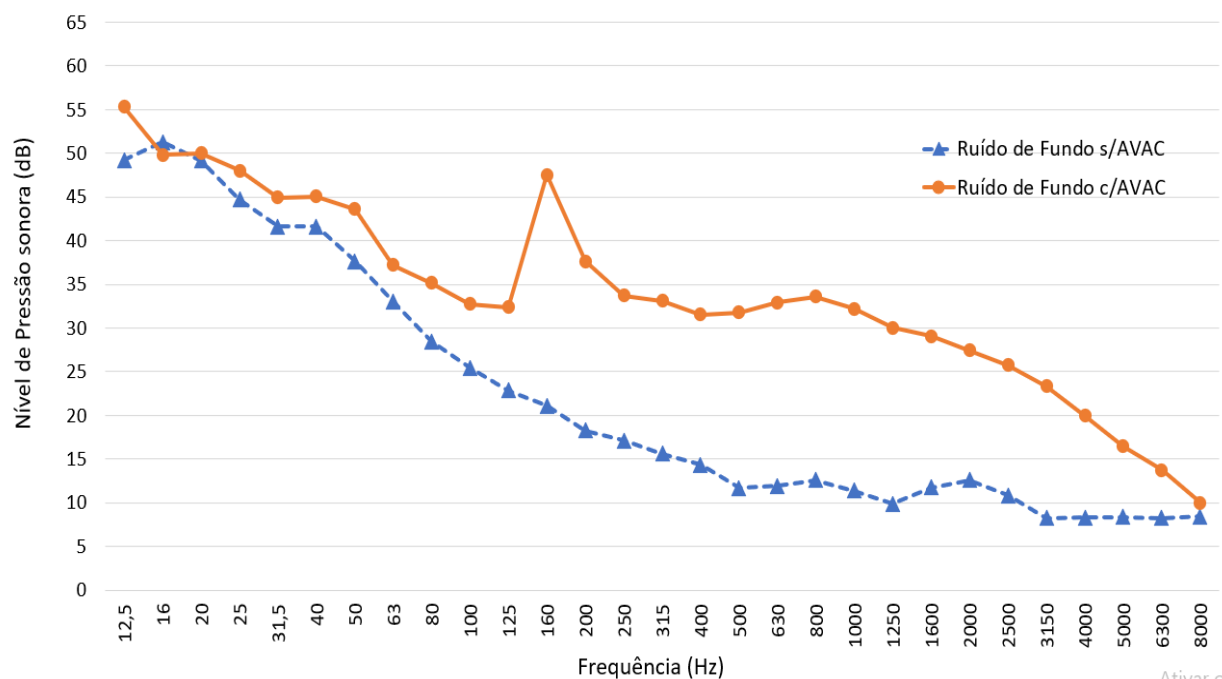


Figura 5.6. – Valores das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) da média logarítmica dos quatro pontos de medição, em bandas de 1/3 de oitava (Hz) para as duas situações do funcionamento do sistema AVAC.

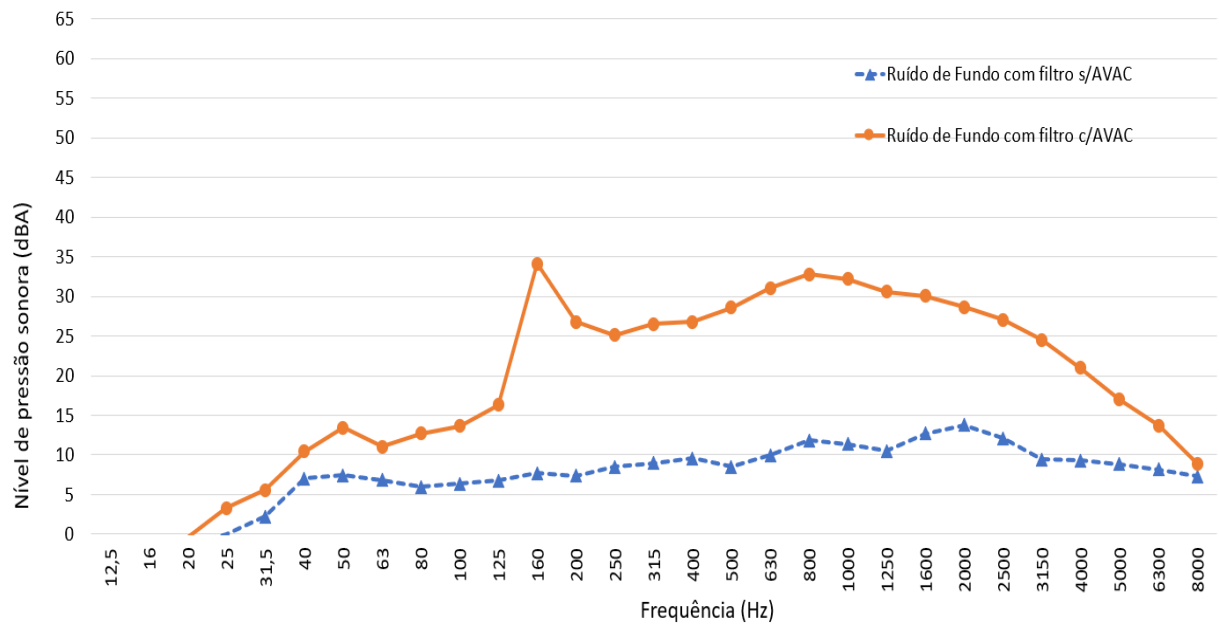


Figura 5.7. – Valores das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dBA) da média logarítmica dos quatro pontos de medição, em bandas de 1/3 de oitava (Hz) para as duas situações do funcionamento do sistema AVAC com aplicação do filtro A.

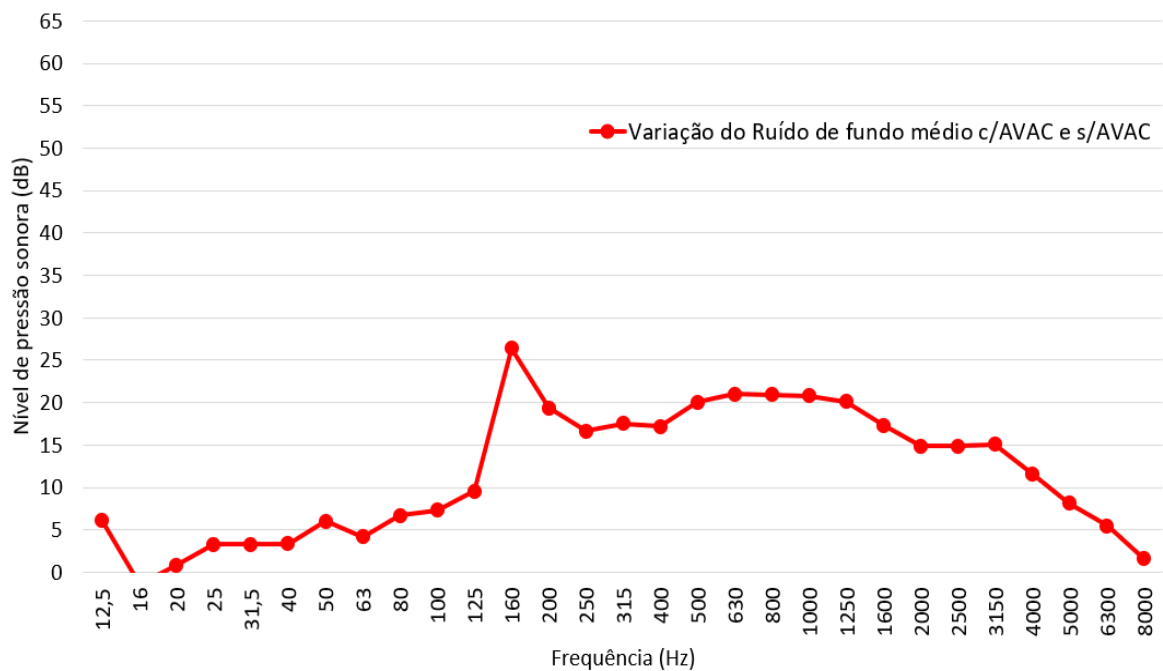


Figura 5.8. – Valores das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) da média logarítmica dos quatro pontos de medição, em bandas de 1/3 de oitava (Hz) para as duas situações do funcionamento do sistema AVAC.

5.4. CURVAS DE INCOMODIDADE

Como é referido no capítulo 2.5.5.2., as curvas NC e NR são dois parâmetros que avaliam a incomodidade sonora criada por ruídos contínuos, neste caso o ruído do sistema de AVAC. Escolheu-se então um ponto de referência, neste caso, o ponto RF4 por se tratar de um ponto localizado no balcão, e, portanto, mais próximo das saídas de ar do sistema AVAC, sofrendo então um maior aumento nos níveis de pressão sonora sentidos pelo ruído de fundo emitido pelo mesmo.

Na figura 5.9. é feita uma comparação da curva de resultados do nível de pressão sonora numa banda de 1/1 oitava, com as curvas de *Noise Criterion* (NC), que abrange o intervalo de frequências de 63 a 8000 Hz. Pode-se concluir através da leitura do gráfico que no ponto RF4, com o sistema AVAC ligado, a curva correspondente aos resultados obtidos é NC38, porque o nível de pressão sonora, na frequência de 1000 Hz encontra-se entre duas curvas NC35 e NC40, e com o sistema AVAC desligado, a curva correspondente aos resultados obtidos é aproximadamente NC18, visto que na gama dos 2000 a 8000 Hz, é delimitada superiormente pela curva NC20 e inferiormente pela curva NC15.

Para avaliar as curvas de *Noise Rating* (NR) correspondentes aos resultados obtidos de níveis de pressão sonora no ponto RF4, criou-se um gráfico (Fig. 5.10.) para evidenciar esta relação, numa banda de 1/1 oitava no intervalo de frequências 31,5 a 8000 Hz. Para a situação do sistema AVAC ligado, a curva a que corresponde os valores obtidos de níveis de pressão sonora é a curva NC38, pois estes valores encontram-se limitados nos 1000 e 2000 Hz, pelas curvas NR35 e NR40. Quando o sistema AVAC está desligado, a curva mais aproximada aos valores obtidos é a NR15, que delimita superiormente os níveis de pressão sonora medidos.

No quadro 5.11. é feita uma comparação das curvas NR e NC obtidas, com os respetivos valores recomendados para diferentes utilizações de salas idênticas à sala em estudo [1][19].

Quadro 5.11 – Valores recomendados de *Noise Rating* e *Noise Criterion* e verificação dos limites de acordo com os resultados obtidos pelas medições e respetivas curvas correspondentes associadas NC33 e NR33.[1][19].

Tipo de local	Valor limite máximo recomendado	Curva correspondente à sala em estudo c/AVAC	Verificação
Pequenas salas de conferência	NC35	NC38	Não Verifica
Pequenos auditórios, teatros, grandes salas de conferências	NC30		Não Verifica
Salas de concerto, casas de óperas, grandes auditórios	NC20		Não Verifica
Grandes salas musicais, estudos de gravação	NR15	NR38	Não Verifica
Teatros, salas de conferência	NR30		Não Verifica
Museus, escolas, bibliotecas	NR35		Não Verifica

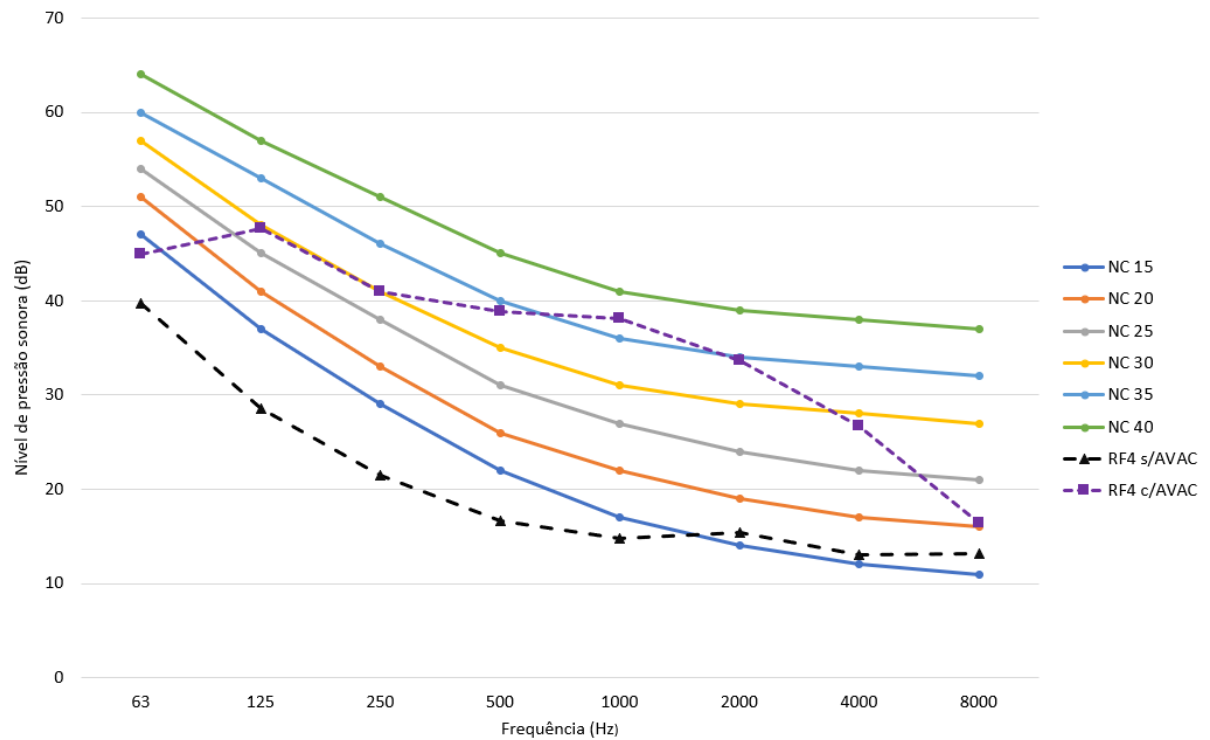


Figura 5.9. – Comparação das curvas NC com os valores de níveis de pressão sonora de ruído de fundo no ponto RF4, nas duas situações de funcionamento do sistema AVAC em bandas de 1/1 de oitava.

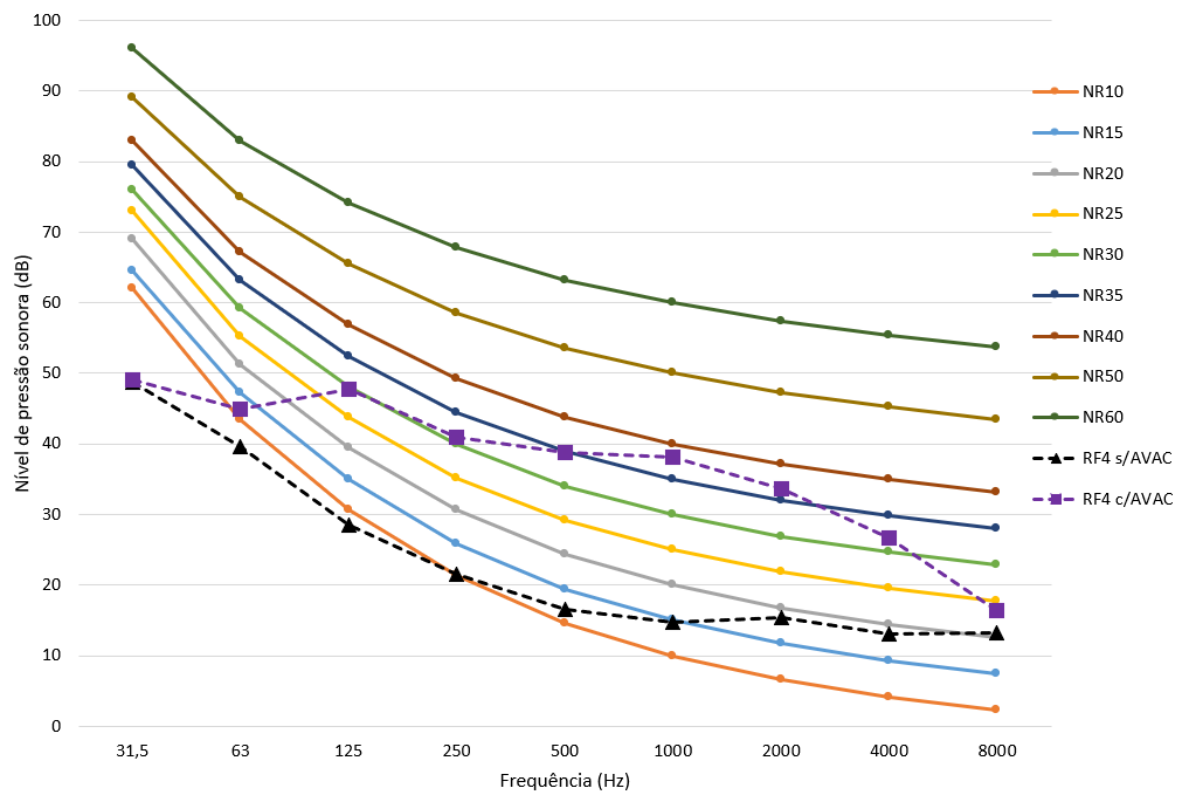


Figura 5.10. – Comparação das curvas NR com os valores de níveis de pressão sonora de ruído de fundo no ponto RF4, nas duas situações de funcionamento do sistema AVAC em bandas de 1/1 de oitava

5.6. COMPARAÇÃO COM OUTRAS SALAS

5.6.1. INTRODUÇÃO

Para obter uma análise mais complexa dos resultados obtidos nas medições de todos os parâmetros estudados, é relevante realizar uma comparação com outras salas idênticas, ou que sirvam o mesmo propósito da sala em estudo do Teatro Municipal da Covilhã. Para tal efeito, consultou-se as seguintes dissertações, realizadas por antigos alunos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto:

- “Caracterização Acústica do Centro de Congressos do Altice Fórum Braga” – Gil Rocha [38];
- “Caracterização Acústica do Centro de Artes de Águeda” – Helena Abelha [39];
- “Caracterização Acústica de Grandes Auditórios – O caso do Auditório da FEUP” – Mónica Pinto [40];
- “Caracterização Acústica do grande auditório do convento de Francisco” – Tiago Miranda [41];
- “Caracterização Acústica do Cineteatro Eduardo Brazão” – Diogo Silva [42].

Sendo que são analisadas um total de sete salas:

- Grande auditório do centro de congressos do Altice Fórum (Braga);
- Pequeno auditório do centro de congressos do Altice Fórum (Braga);
- Sala de espetáculos do Centro de Artes de Águeda;
- Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares);
- Auditório da FEUP;
- Grande auditório do convento de S.Francisco (Coimbra);
- Sala principal do Teatro Municipal da Covilhã (este estudo).

5.6.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

De modo a obter uma comparação dos valores do tempo de reverberação medidos na sala em estudo com as restantes salas analisadas, criou-se um gráfico com os respetivos valores médios medidos de todos os pontos de medição, em bandas de frequência de 1/3 de oitava, na gama de frequências de 100 a 5.000 Hz (Fig. 5.11.). Após uma análise do gráfico, é possível verificar que o tempo de reverberação médio obtido para a sala em estudo tem valores muito elevados quando comparados com os valores das restantes salas, com exceção do auditório do convento de S.Francisco e o Auditório da FEUP. Há vários parâmetros que podem influenciar os valores elevados destes parâmetros para estas salas, como o volume da sala, capacidade de absorção sonora dos materiais constituintes da sala, forma da sala, capacidade de reflexão sonora da sala e anomalias existentes na construção da sala.

Na Figura 5.12. é feita uma relação entre o valor médio de tempo de reverberação em bandas de 1/1 oitava nas frequências 500 a 2000 Hz, com o Volume total da sala correspondente, para avaliar se existe alguma relação entre estes dois parâmetros. Pela fórmula de Sabine (Equação 2.11), o tempo de reverberação é diretamente proporcional ao volume do compartimento, pelo que era de esperar que o gráfico criado seguisse essa tendência. De facto, o valor mais alto de tempo de reverberação médio (1,49 s) corresponde à sala de maior dimensão, mas há salas como o grande auditório do centro de congressos de Braga, que apesar da sua enorme dimensão, apresenta um valor de tempo de reverberação (1,01 s), inferior ao cineteatro Eduardo Brazão (1,10 s), ainda

que com um volume quase 5 vezes superior. A explicação para tal resultado é a capacidade absorvente das duas salas, pois pela fórmula de Sabine é inversamente proporcional ao tempo de reverberação, o que indica que o Grande Auditório do Centro de Congressos de Braga é muito mais capaz em termos de absorção sonora, devido às propriedades das várias componentes da sala, como as cadeiras, paredes, tetos, forma da sala, entre outras.

Na figura 5.13., é feita uma análise destes resultados obtidos, enquadrados com os valores limites recomendados para utilização de Teatro e de Música sinfónica moderna, em que para a primeira utilização, apenas a sala do Centro de Artes de Águeda é adequada, e que para a segunda utilização, as salas que se encontram neste limite são o Auditório da FEUP e o auditório do Convento de S.Francisco.

Analizou-se várias linhas de tendência e os respetivos valores de coeficiente de determinação (R^2), para ver qual a melhor e escolheu-se uma relação linear, com a equação representada na figura, assim como o valor arredondado de R^2 de 0,22. Sendo que o valor ideal, de um modo geral, do parâmetro R^2 é 1, verifica-se que o resultado é um número baixo, indicando uma fraca relação entre o Tempo de Reverberação e o Volume da sala.

Mas neste caso em concreto, o facto do valor de R^2 ser baixo e existir fraca relação linear entre os parâmetros, não é um mau indicador. Pela fórmula de Sabine, o volume da sala é diretamente proporcional com o tempo de reverberação, mas é também inversamente proporcional com a absorção sonora equivalente (A). Por isso, um valor de R^2 muito elevado indicaria que esta distribuição de pontos se aproximava de uma distribuição linear, ou seja, com o aumento do volume da sala teríamos um aumento do Tempo de Reverberação, o que de facto, não se verifica, pois há outra variável que afeta os resultados deste parâmetro, a absorção sonora equivalente.

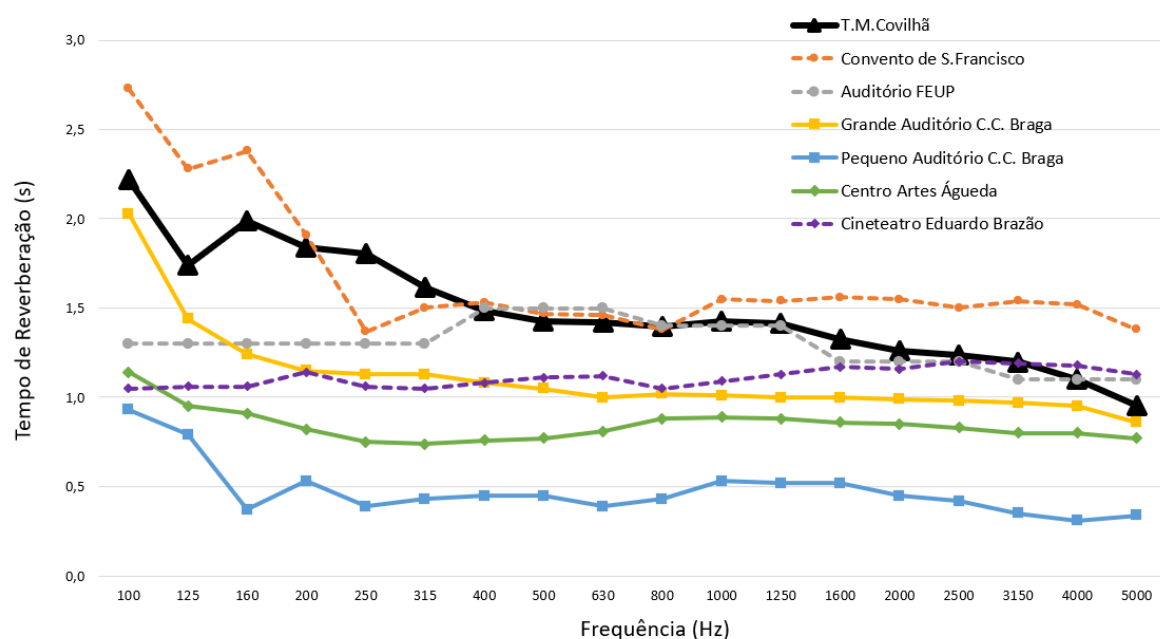


Figura 5.11. – Comparação dos valores obtidos de Tempo de Reverberação médios das diferentes salas, em bandas de 1/3 de oitava, no intervalo de frequências 100 a 5000 Hz.

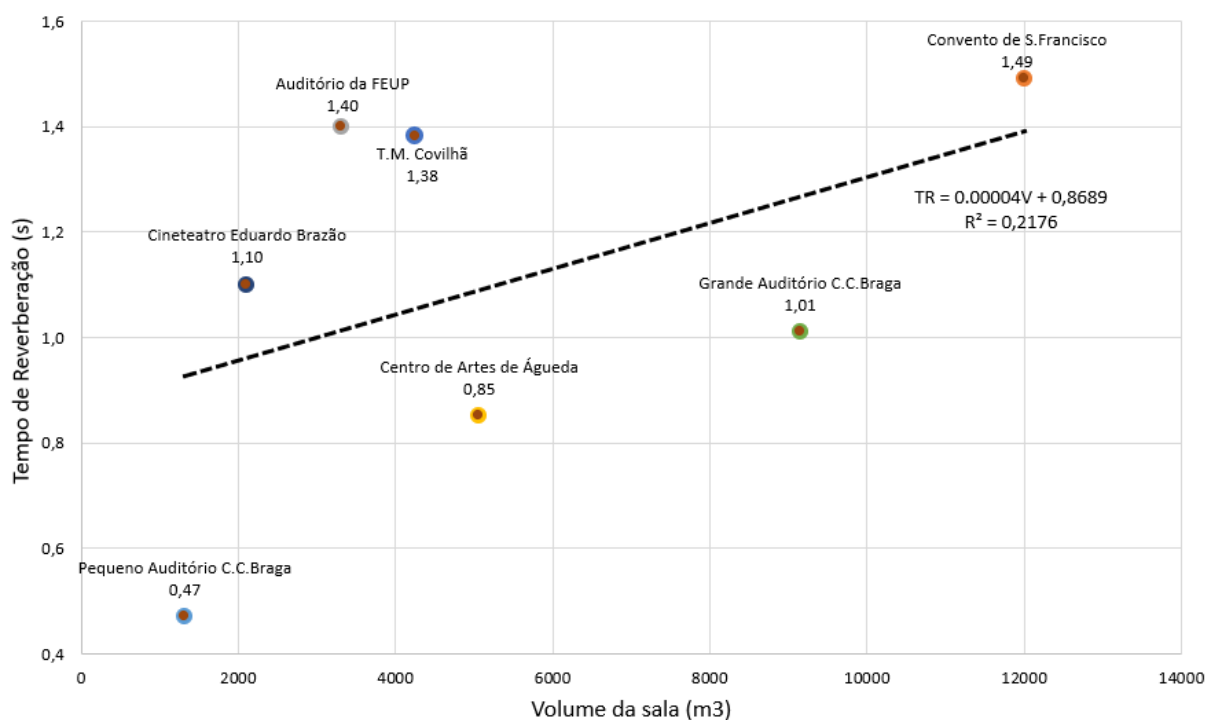
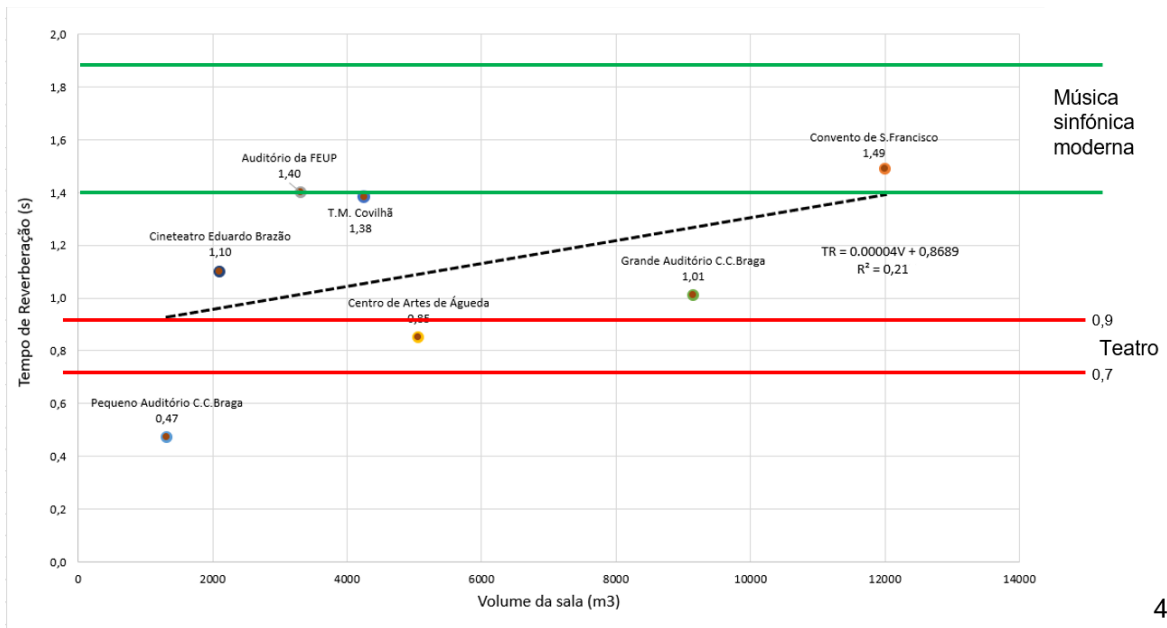


Figura 5.12. – Comparação dos valores obtidos da média do valor de tempo de reverberação de todos os pontos das diferentes salas, em bandas de 1/1 de oitava (no intervalo de frequências 500 a 2000 Hz) com o volume total da sala correspondente.



47

Figura 5.13. – Comparação dos valores obtidos da média do valor de tempo de reverberação de todos os pontos das diferentes salas, em bandas de 1/1 de oitava (no intervalo de frequências 500 a 2000 Hz) com os valores ideais para as utilizações de música sinfónica moderna e teatro.

5.6.3. RUÍDO DE FUNDO

Para relacionar o ruído de fundo existente de todas as salas, criou-se um gráfico, que apresenta os resultados médios dos níveis de pressão sonora obtidos em todos os pontos de todas as salas, para cada frequência na gama de 100 – 5000 Hz em bandas de 1/3 de oitava, para as situações de sistema AVAC desligado e para a situação de sistema AVAC em funcionamento (Fig. 5.14. e 5.15.)

Analisando a figura 5.14., pode-se verificar que na sala principal do Teatro Municipal da Covilhã, quando não está ligado o sistema de AVAC, não há ruído de fundo, devido aos valores do nível de pressão sonora serem muito baixos para serem audíveis, ao contrário de algumas salas como o caso do Cineteatro Eduardo Brazão, o Auditório da FEUP e o a sala do convento de S.Francisco. O caso do Cineteatro Eduardo Brazão é justificado pelo facto de aquando da realização das medições, este ainda não se encontrava completamente reabilitado, faltando inclusive a instalação das cadeiras da sala.

Quando é ativado o sistema de AVAC, é notória uma grande diferença nos gráficos da figura 5.15., pois os valores de níveis de pressão sonora aumentam em todas as salas, especialmente no caso do Auditório da FEUP e da sala em estudo do Teatro Municipal da Covilhã, onde o efeito do AVAC chega a atingir diferenças de cerca de 20 dB em relação à figura 5.14. em certos pontos. Este aumento é notado especialmente na gama de frequências de 100 a 1000Hz, porque este tipo de equipamentos, em geral, emite ruídos graves, predominantemente em baixas frequências. Isto prova que a existência destes equipamentos é prejudicial ao bom funcionamento da sala, em especial quando a sua instalação não é bem projetada, numa fase de projeto da obra na fase de execução da obra.

Importante realçar o caso peculiar do Auditório da FEUP, pois as medições foram realizadas em bandas de frequência de 1/3 de oitava, ao contrário das restantes que se realizaram em 1/1 de oitava, por isso, o gráfico pode não ser completamente preciso, não obstante, os valores dos resultados de nível de pressão sonora são muito elevados nos dois casos de funcionamento do AVAC.

Fez-se também esta relação, mas com a aplicação do filtro A, de modo a ter em consideração a percepção humana ao som. Para tal efeito, criou-se dois gráficos com o valor de pressão sonora de ruído de fundo, com o sistema AVAC desligado e ligado, subtraindo os valores dos níveis de pressão sonora do filtro A para as respetivas frequências. (Fig. 5.16 e 5.17.).

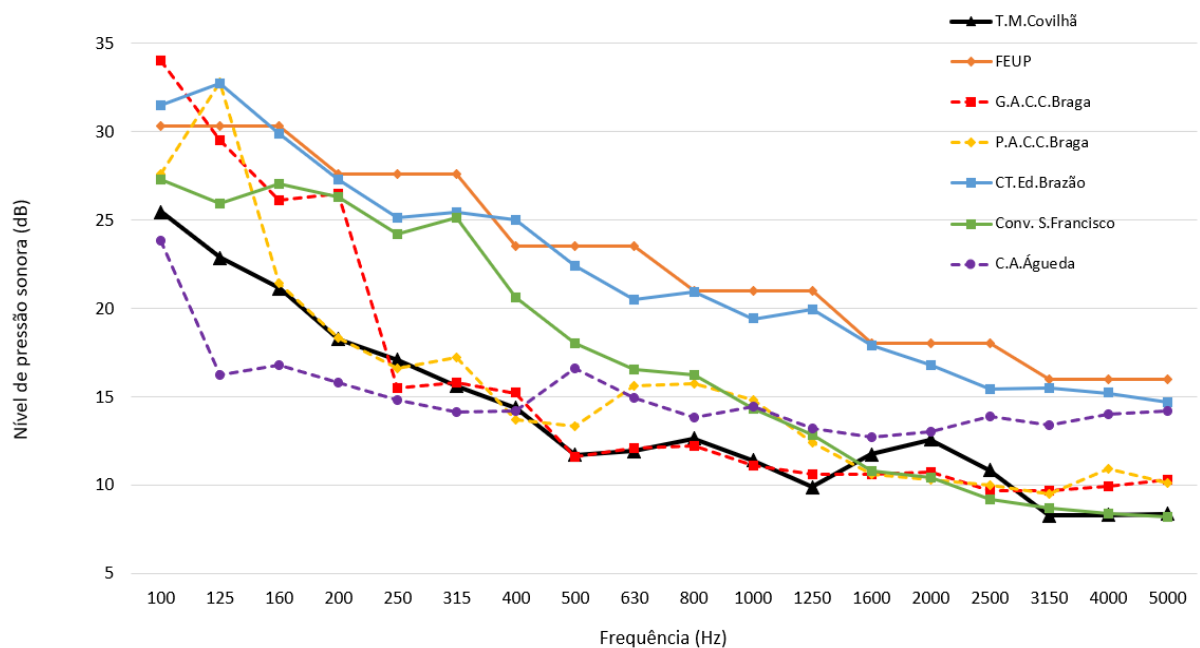


Figura 5.14. – Comparação dos valores de níveis de pressão sonora obtidos médios na situação do sistema AVAC desligado em bandas de 1/3 de oitava, na gama de frequência de 100 a 5.000 Hz, das várias salas analisadas.

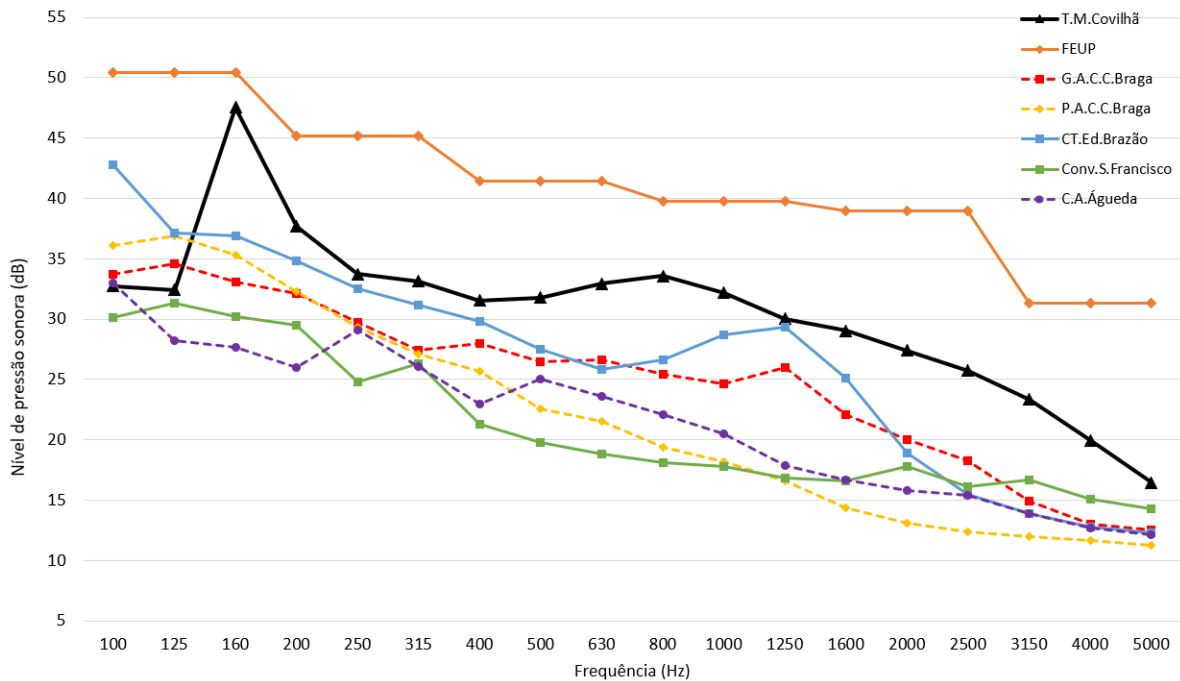


Figura 5.15. – Comparação dos valores de níveis de pressão sonora obtidos médios na situação do sistema AVAC ligado em bandas de 1/3 de oitava, na gama de frequência de 100 a 5.000 Hz, das várias salas analisadas.

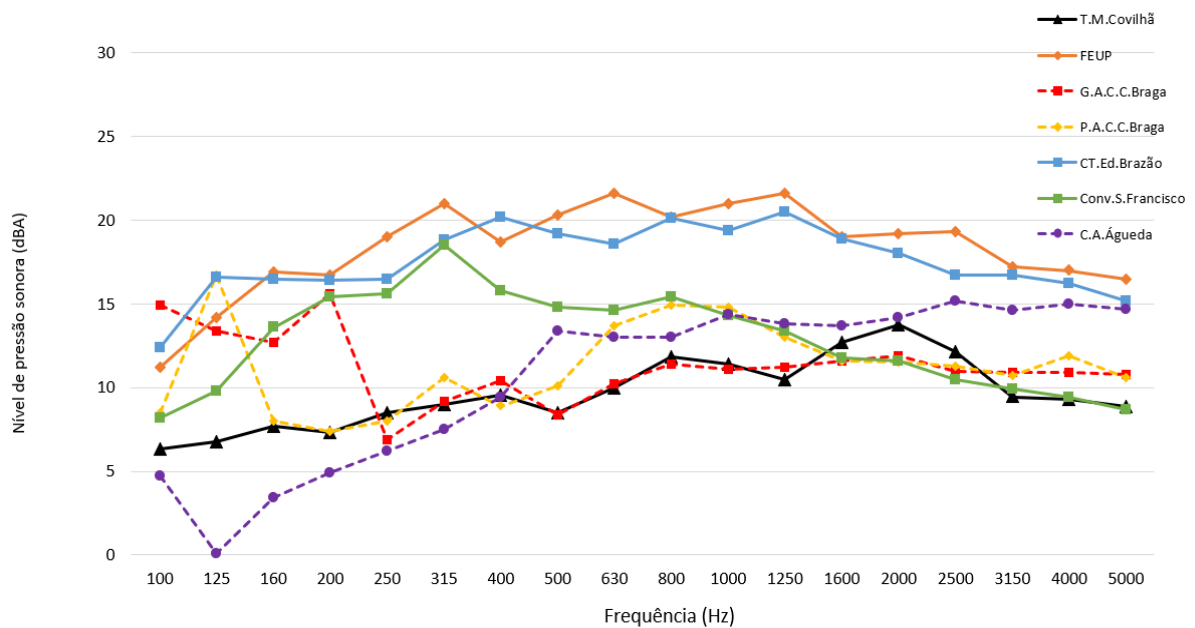


Figura 5.16. – Comparação dos valores de níveis de pressão sonora obtidos médios na situação do sistema AVAC desligado em bandas de 1/3 de oitava, na gama de frequência de 100 a 5.000 Hz, das várias salas analisadas com aplicação do filtro de ponderação A.

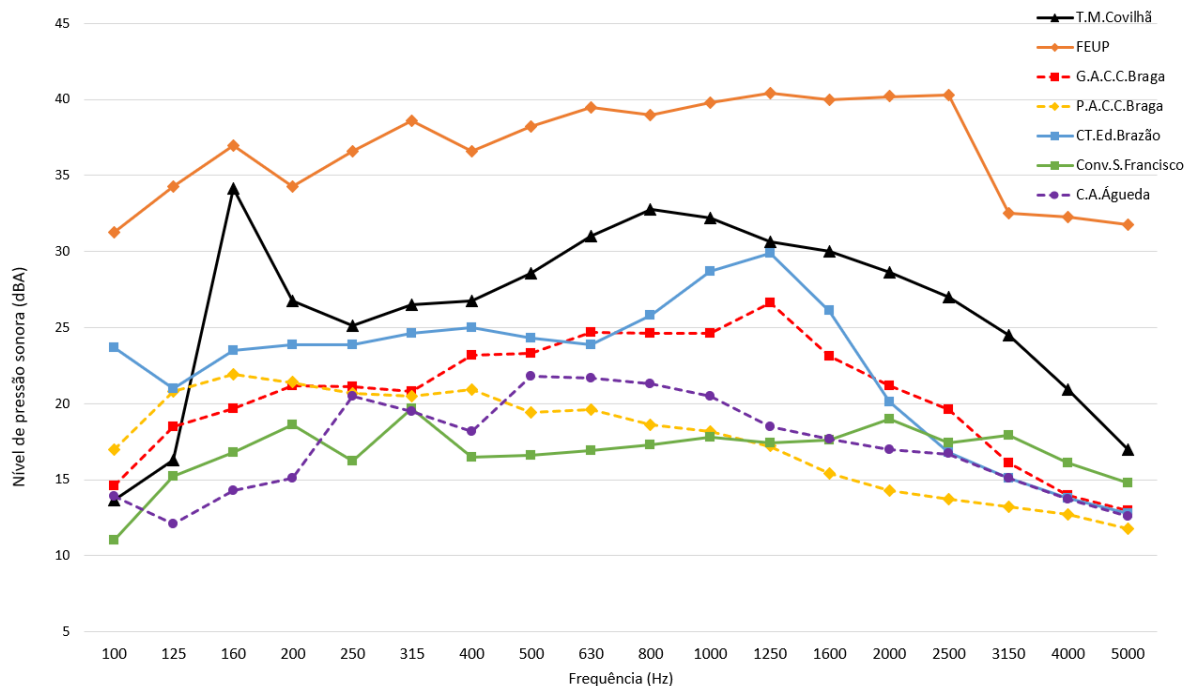


Figura 5.17. – Comparação dos valores de níveis de pressão sonora obtidos médios na situação do sistema AVAC ligado em bandas de 1/3 de oitava, na gama de frequência de 100 a 5.000 Hz, das várias salas analisadas com aplicação do filtro de ponderação A.

5.6.4. RASTI

Para se fazer uma comparação dos valores obtidos de RASTI de todas as salas, não chega apenas comparar os resultados obtidos, porque à exceção do pequeno auditório do centro de congressos do fórum Braga, que apresenta um valor médio global de RASTI de 0,80, que indica uma excelente inteligibilidade da palavra, as restantes seis salas têm valores médios globais deste parâmetro compreendidos entre os 0,60 e 0,70, que indicam uma boa inteligibilidade da palavra. No entanto, pode-se relacionar o parâmetro RASTI com outros parâmetros objetivos medidos, como é o caso do Tempo de reverberação, do Nível de Ruído de Fundo global com aplicação do filtro A (L_{Aeq}) e do Volume da sala.

Para o primeiro caso, criou-se três gráficos para relacionar o valor médio global do RASTI, valor mínimo do RASTI e valor máximo do RASTI em cada sala com o valor de Tempo de Reverberação médio para a gama de frequências de 500 a 2.000 Hz em bandas de 1/1 oitava e feita uma análise de regressão não linear dos resultados (Fig. 5.18 5.20 5.20.). Escolheu-se uma linha de tendência polinomial de grau 2 para todos os gráficos, pois os resultados são flutuantes e o valor de R^2 obtidos são superiores aos valores de R^2 obtidos com outras linhas de tendência. Para o caso do RASTI médio, o valor de R^2 é 0,92 e para o caso do RASTI mínimo, o valor de R^2 é 0,93, indicando que esta regressão não linear é um bom ajuste para os dados inseridos nestes dois gráficos (Fig. 5.18 e 5.20.). No caso do RASTI máximo, o valor de R^2 é inferior, com valor de 0,76, concluindo-se então que apesar de não ter um valor ideal, esta linha de tendência tem na mesma uma boa aproximação. Os valores de coeficiente de determinação (R^2) tem o valor compreendido entre 0 e 1, por isso, nestes casos, os valores são bastante bons para concluir que os dados podem ser explicados com uma linha de tendência polinomial de segundo grau, por exemplo, o RASTI mínimo pode ser explicado 0,93 ou 93% das vezes pelo seu valor do Tempo

de Reverberação Médio 500 a 2000 Hz (s). Se uma sala demora mais tempo a dissipar uma onda sonora, significa que há um maior número de reflexões e estas são mais duradouras, propriedade prejudicial para uma boa inteligibilidade da palavra.

Relacionando o valor médio global, mínimo e máximo do RASTI com o valor médio de L_{Aeq} , para as diferentes salas, obtiveram-se os gráficos das figuras 5.19., 5.21. e 5.23.. Analisando os gráficos, verifica-se que na maioria das salas, os valores de RASTI se concentram numa zona de valor médio de L_{Aeq} , entre os 23 e 27 dB, à exceção do caso do Cineateatro Eduardo Brazão, e que, de um modo geral, os valores maiores de RASTI coincidem com valores baixos de L_{Aeq} e os menores valores de RASTI coincidem com o maior valor de L_{Aeq} das salas, por isso existe uma relação entre estes dois parâmetros, apesar de não ser tão evidente. De facto, com a existência de ruído de fundo, é mais difícil termos uma boa percepção da palavra, porém este parâmetro não é o de maior relevância para os resultados obtidos do RASTI nas várias salas.

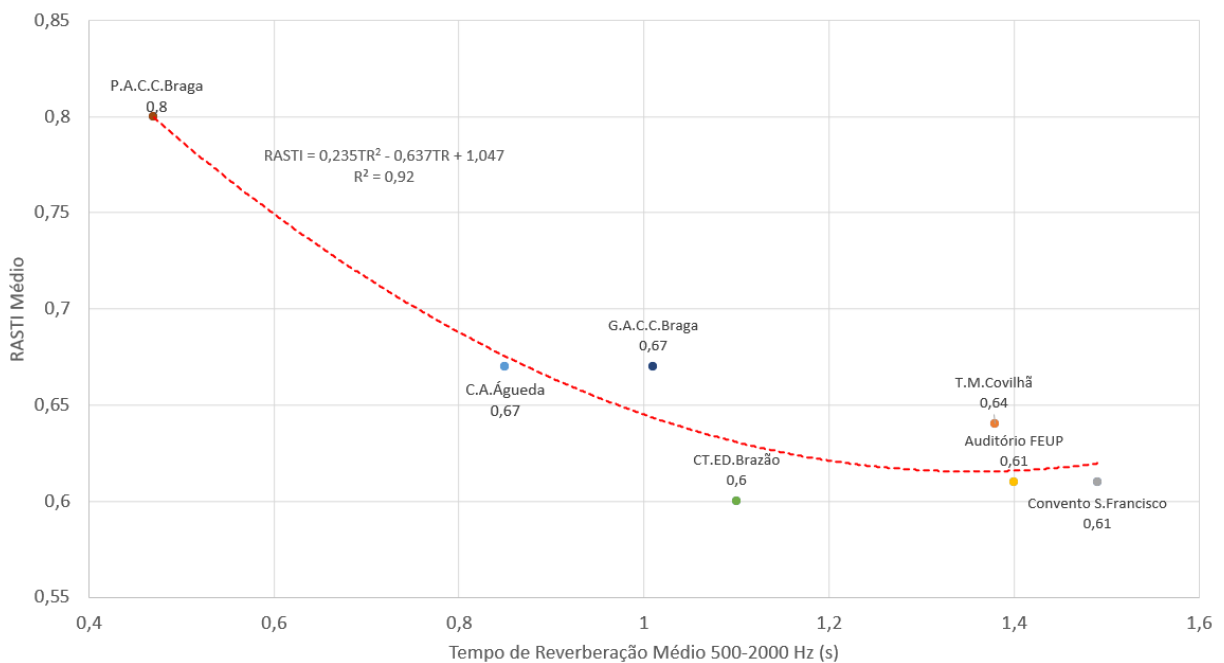


Figura 5.18. – Relação do valor de RASTI médio obtido com o valor de tempo de reverberação médio da gama de frequências 500 a 2.000 Hz em bandas de 1/1 oitava.

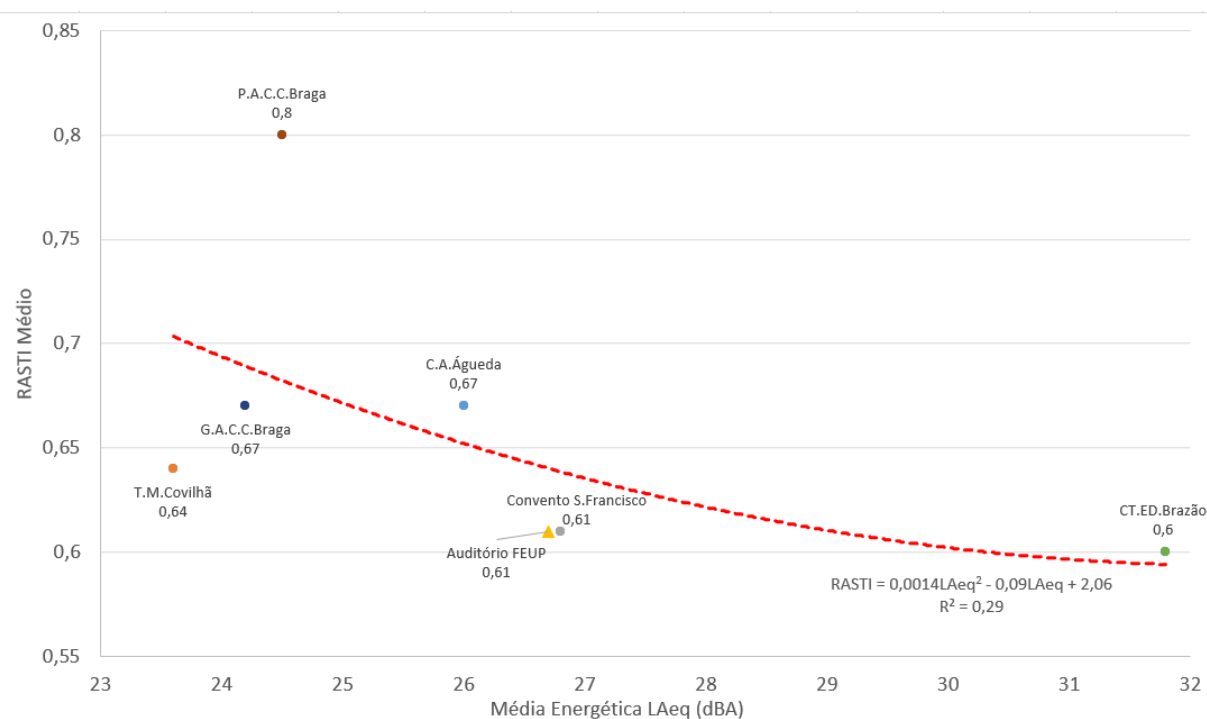


Figura 5.19. Relação do valor de RASTI médio obtido em cada sala com o respetivo valor médio de ruído de fundo LAeq obtido(dBA).

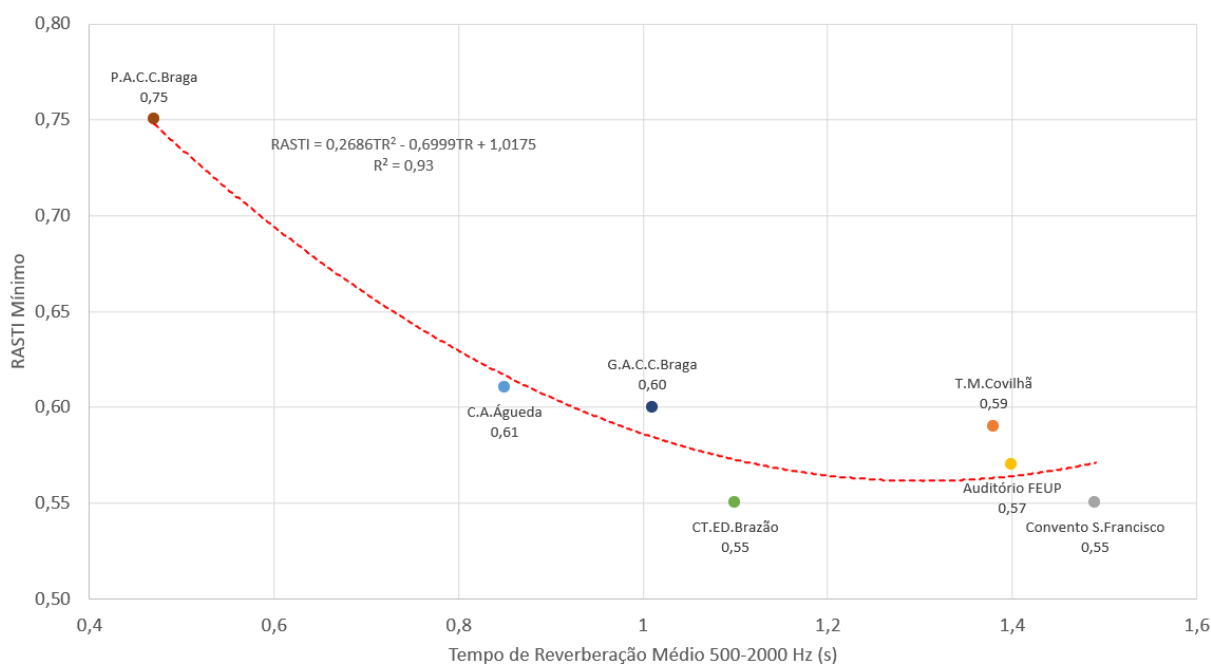


Figura 5.20. – Relação do valor de RASTI mínimo obtido com o valor de tempo de reverberação médio da gama de frequências 500 a 2.000 Hz em bandas de 1/1 oitava.

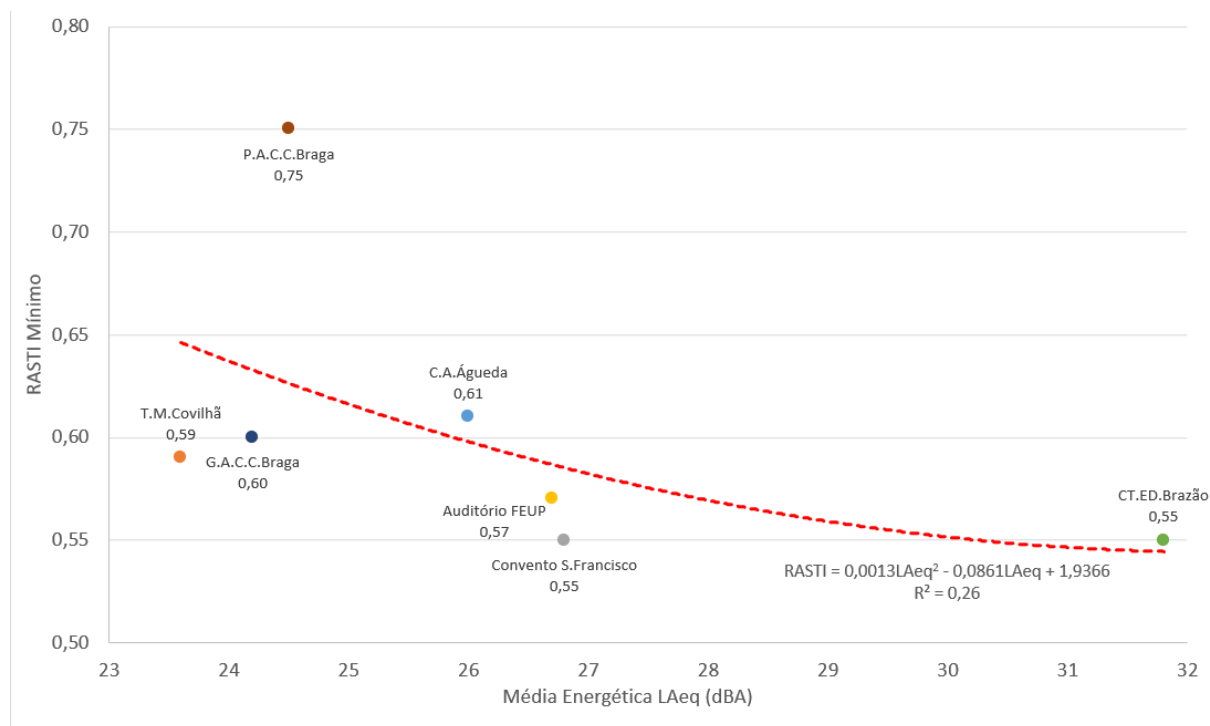


Figura 5.21. Relação do valor de RASTI mínimo obtido em cada sala com o respetivo valor médio de ruído de fundo L_{Aeq} obtido(dBA).

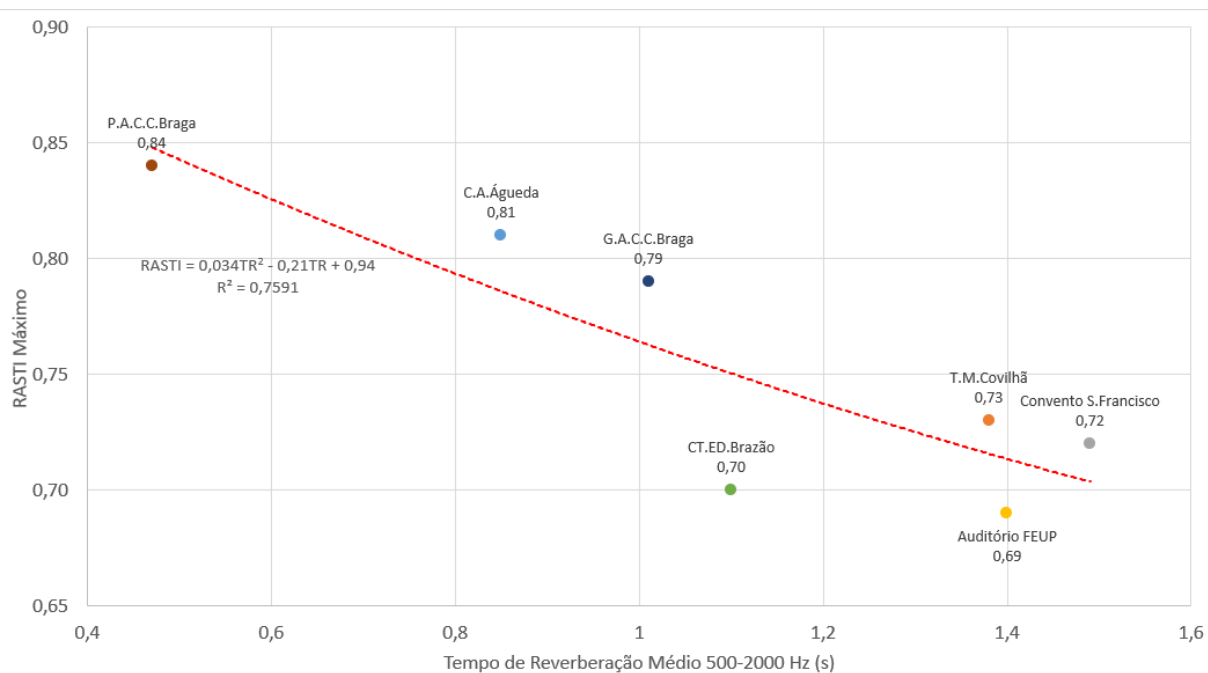


Figura 5.22. – Relação do valor de RASTI máximo obtido com o valor de tempo de reverberação médio da gama de frequências 500 a 2.000 Hz em bandas de 1/1 oitava.

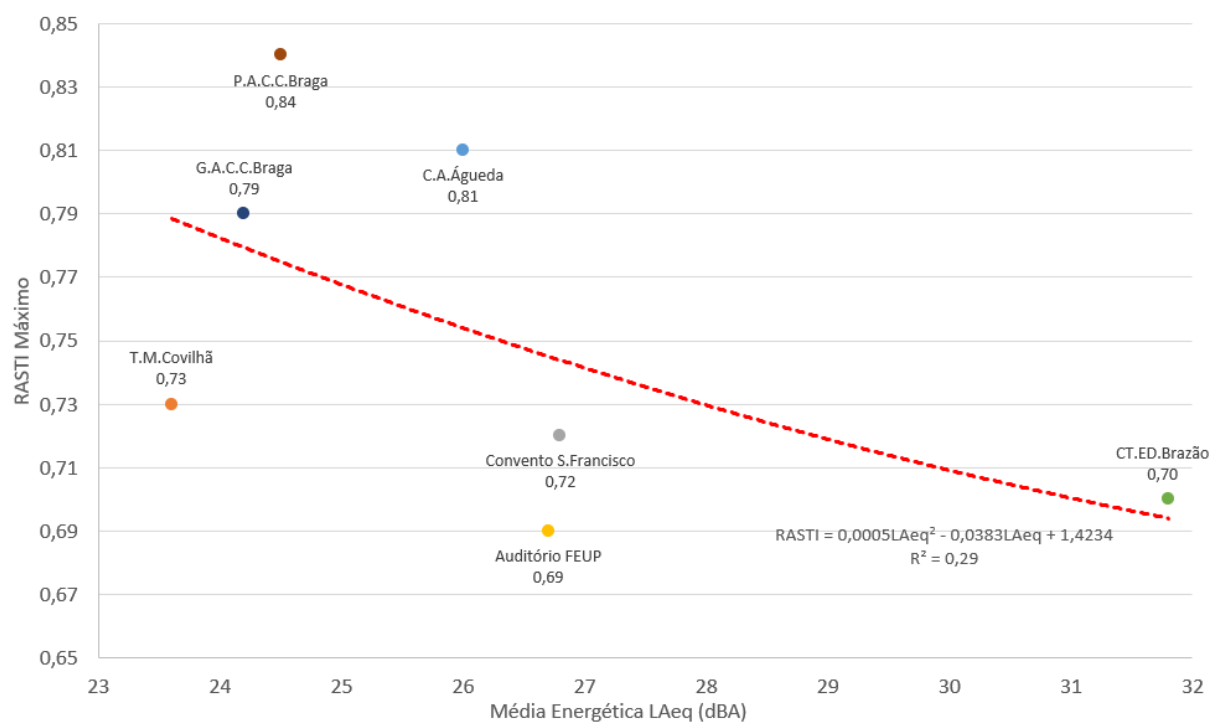


Figura 5.23. Relação do valor de RASTI máximo obtido em cada sala com o respetivo valor médio de ruído de fundo LAeq obtido(dBA).

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

A área de estudo da acústica de edifícios é, nos tempos de hoje, cada vez mais valorizada e tem tido um crescente papel, pois é indispensável a existência de projetistas especializados em acústica a nível de projeto de edifícios, especialmente para edifícios com fim cultural, como é o caso do Teatro Municipal da Covilhã, onde é espetável a existência de certas características, que consigam ir ao encontro das exigências dos utilizadores. No entanto, o projeto de acústica não é “soberano”, pois, muitas vezes, pode sofrer alterações em prol da arquitetura desenhada para o edifício, porque a estética tem um papel preponderante.

O Teatro Municipal da Covilhã foi objeto de uma obra de reabilitação e o estudo desenvolvido nesta dissertação foi importante para perceber como “funciona” a Acústica em obras deste tipo, em edifícios antigos que foram projetados em épocas em que o ramo da Acústica era ainda pouco relevante. Verificou-se que neste edifício, houve um certo cuidado na projeção acústica da sala, nomeadamente nos materiais e no desenho da sala.

Para a caracterização acústica deste edifício, realizou-se ensaios acústicos simples, *in situ*, onde se mediu três parâmetros acústicos, o Tempo de Reverberação, o RASTI e os níveis de pressão sonora do ruído de fundo, para obter uma ideia global do comportamento acústico da sala em estudo, permitindo ainda a obtenção de mais parâmetros como as curvas de incomodidade NC e NR. Com os resultados obtidos, fez-se uma comparação com os valores ideais destes parâmetros e com os valores legais presentes no RRAE, para verificar se a sala apresenta valores satisfatórios e cumpre os requisitos mínimos. Essa comparação é apresentada no quadro 6.1.

Com a leitura do quadro, rapidamente se pode concluir que os valores são, na maioria, não adequados, tendo em conta os valores ideais, ou que não cumprem os valores limites regulamentados no RRAE.

O tempo de reverberação médio da sala vazia (1,05 s), não cumpre o limite máximo presente no RRAE, que é obtido através da aplicação de uma incerteza de 35%, nem se encontra no intervalo de valores ideais para salas com os fins principais da sala em estudo (música e palavra). Ainda que não seja um valor muito superior, não é totalmente satisfatório e a sua explicação pode passar pelas propriedades absorventes dos materiais que compõe a sala e/ou pela sua grande dimensão volumétrica.

O nível sonoro do ruído de fundo obtido, com a sala completamente vazia e sem utilização de equipamentos, cumpre o valor limite (RRAE), com um valor médio de 24 dBA, sendo por isso uma sala sem grandes interferências de ruído exterior. Quando o sistema de AVAC é ligado, a situação piora, ficando com um valor de L_{Aeq} de 41 dBA, sendo este mais gravoso em zonas próximas às saídas do sistema de ventilação. Este valor não cumpre com o valor limite máximo presente no RRAE para salas de uso de palavra, mas cumpre no caso de salas de cinema, demonstrando assim o efeito negativo que o sistema AVAC instalado nesta sala tem, para um funcionamento satisfatório da mesma.

As curvas de NC e NR associadas ao efeito de ruído de fundo gerado pelo funcionamento do sistema AVAC são, respetivamente NC38 e NR38, ou seja, para salas com o fim do uso da palavra, como teatros ou salas de conferência, este valor não se insere no valor máximo de NC30 e NR30 e no caso de uso de música, os limites são NC 25 e NR25, por isso as curvas de incomodidade referentes a esta sala não se enquadram nestes limites.

O valor médio de RASTI é 0,64, um valor que não apresenta limites legais, mas que está compreendido entre os valores ideais ou recomendados por vários autores, refletindo então numa inteligibilidade da palavra boa na sala, apesar dos valores de tempo de reverberação um pouco altos. Os valores mínimos deste parâmetro em algumas zonas atingem os 0,59 e os máximos os 0,72, indicando que a sala se encontra sempre no intervalo de [0,59 – 0,72], classificando-se assim como tendo uma boa inteligibilidade da palavra

Quadro 6.1 – Quadro resumo dos valores obtidos nas medições dos parâmetros mais relevantes abordados neste trabalho (Tempo de reverberação, RASTI, Níveis de ruído de fundo, Curvas de incomodidade NC e NR) e a respetiva comparação com valores ideais e valores regulamentares do RRAE.

Parâmetro	Resultado	Valor ideal	Valor limite de acordo com o RRAE para “oratória”	Verificação
Tempo de Reverberação médio [500,1k,2k] Hz (s)	1,38 s	Teatro [0,7 – 0,9] s	-	Não Adequado
		Música Sinfónica [1,4 – 2,2] s		Sofrível
	1,05 s com incerteza de 35%	-	0,95 s	Não Cumpre
RASTI mínimo	059	$\geq 0,60$	-	Não adequado
RASTI médio	0,64			Adequado
RASTI máximo	0,72			Adequado
$L_{Aeq} s/AVAC$ (dB)	24 dB	-	≤ 30 dB (palavra)	Cumprido
$L_{Aeq} c/AVAC$ (dB)	41,4 dB (38,4 dB c/incerteza)	-	≤ 30 dB (palavra)	Não cumpre
			≤ 38 dB (cinema)	Não cumpre
Noise Criterion (NC) c/AVAC	NC38	$\leq NC30$ (Palavra) $\leq NC25$ (Música)	-	Não Adequado
Noise Rating (NR) c/AVAC	NR38	$\leq NR30$ (Palavra) $\leq NC25$ (Música)	-	Não Adequado

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Esta dissertação, no seu desenvolvimento, suscitou algumas questões e problemas técnicos com equipamentos, que não foram possíveis de solucionar, pelo que há espaço para aprofundamento de algumas matérias em trabalhos futuros que abordem o local em estudo, mas também a utilização desta dissertação como fonte para futuras comparações de resultados:

- Utilização desta dissertação como fonte de resultados para comparação dos mesmos em trabalhos futuros sobre a caracterização acústica de salas semelhantes;
- Estudo de parâmetros subjetivos de caracterização acústica, para além dos parâmetros objetivos abordados (Tempo de Reverberação, RASTI e Ruído de Fundo), através de, por exemplo, inquéritos de qualidade realizados a utilizadores, ou seja, os espetadores, ou responsáveis da sala, de modo a obter assim resultados de parâmetros subjetivos, e uma possível comparação dos mesmos com resultados obtidos em outras salas;

- Medição dos parâmetros objetivos estudados nesta dissertação, num dia em que a sala estivesse completa, de modo a fazer uma comparação com os valores obtidos para a sala vazia;
- Como inicialmente era previsto, realizar medições do *Speech Transmission Index* (STI), e não do RASTI, visto que é um parâmetro mais abrangente e preciso. Realizar o estudo de outros parâmetros, como Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}) e Tempo de decaimento inicial (EDT);
- Estudo de possíveis soluções para melhorar a qualidade acústica da sala, que se foque numa análise de materiais e soluções construtivas, com breve análise económica, de modo a obter vários valores para as várias soluções encontradas.

Referências Bibliográficas

- [1] Acústica Ambiental e de Edifícios, A. P. Oliveira de Carvalho, setembro 2022 Edição 8.19.
- [2] Architectural Accoustics, M.David Egan, J. Ross 2007.
- [3] E. Berg, R. sound physics. <https://www.britannica.com/science/sound-physics> - Acedido a 21/02/2023.
- [4] <http://www.cochlea.eu/> - Sound Intensity – Acedido a 21/02/2023.
- [5] Portal da acústica - Conceitos básicos da acústica – PARTE II - Portal Acústica (portalacustica.info) – Acedido a 22/02/2023.
- [6] Sound Intensity (engineeringtoolbox.com) – Acedido a 22/02/2023.
- [7] Sound Pressure (engineeringtoolbox.com) – Acedido a 23/02/2023.
- [8] Architectural acoustics, Elsevier, Marshall Long, 1st Edition 2006.
- [9] Hearing Overview, <http://www.cochlea.org/> - Acedido a 24/02/2023.
- [10] Soluções de absorção acústica Pladur - <https://corporativo.pladur.com/pt-pt/solucoes/absorcao-acustica/> – acedido a 25/03/2023.
- [11] Tempo de reverberação Medição I NTi Audio (nti-audio.com) – Acedido a 27/02/2023.
- [12] O que é tempo de reverberação? (concepcaoacustica.com) – Acedido a 27/02/2023.
- [13] Classroom Reverberation Time Based on the Sabine Equation - P. Jafari Shalkouhi, 2009 .(sagepub.com) – Acedido a 29/02/2023.
- [14]Itecons - Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade - https://www.itecons.uc.pt/services/assay_types/1/assays – Acedido a 28/02/2023.
- [15] Reverberation: How to measure it, and why it matters - <https://www.conwed.com/reverberation/> – Acedido a 28/02/2023.
- [16] Auditorium Accoustics and Archtitectural Design, Spoon Press, Michael Barron, Second Edition, 2009.
- [17] O Som no Ar - Imperialum, <https://www.imperialum.com/plataforma-imperialum/solucoes-imperialum-2/solucoes-de-isolamento-acustico/o-som-no-ar/> – Acedido a 22/02/2023.
- [18] NC - the Noise Criterion (engineeringtoolbox.com) – Acedido a 27/02/2023.
- [19] NR – the Noise Rating Curve (engineeringtoolbox.com) – Acedido a 27/02/2023.
- [20] Theatre-Introduction-and-CPRC-<https://portal.ct.gov/-/media/SDE/Arts/Guide-to-K12-Program-Development-in-the-Arts/Theatre-Introduction-and-CPRC.pdf?la=en> - Acedido a 23/03/2023.
- [21]Auditorium Acoustics Design: Then and Now | NetWell (controlnoise.com) - acedido a 22/03/2023.
- [22] Carlson, Marvin. "Psychic Polyphony". Journal of Dramatic Theory and Criticism, View of Psychic Polyphony (ku.edu) , acedido a 19/03/2023.
- [23] The Story of the Epidaurus Ancient Theater - Greeking.me - acedido a 25/03/2023.

- [24] Fotografia atual do teatro de Aspendius retirada do Google Maps – <https://www.google.com/maps> - Acedido a 25/03/2023.
- [25] Olympic Theater (English) - Comune di Vicenza – acedido a 25/03/2023.
- [26] Farnese Theatre – Complesso Monumentale della Pilotta (complessopilotta.it) – Acedido a 25/03/2023
- [27] History | Gewandhaus Leipzig (gewandhausorchester.de) – Acedido a 17/05/2023.
- [28] the history of the Boston Symphony Hall - <https://www.bso.org/about/history> - Acedido a 18/05/2023.
- [29] Boston Symphony Hall https://wsdg.com/portfolio_tags/boston-symphony-hall/ - Acedido a 15/05/2023.
- [30] Decreto-Lei n.º 96/2008, de 9 de junho | DRE – acedido a 25/03/2023.
- [31] Patrícia Morais, O Teatro Municipal da Covilhã Um Novo Capítulo. FLUC, Dissertação, setembro 2022.
- [32] Memórias da Covilhã. <https://memoriasdacovilha.blogs.sapo.pt/teatro-cine-da-covilha-teatro-2985> - acedido a 03/04/2023.
- [33] Documento interno fornecido pela InAccoustics, plantas do Teatro Municipal da Covilhã.
- [34] TMC, Teatro Municipal da Covilhã, <http://tmc.web98.assec.net/> - acedido a 04/04/2023.
- [35] 2D diffuser 509 – oak / beech 30x30cm - acousticmodule.com – acedido a 15/05/2023.
- [36] Product Data: Sound Source 4224, <https://www.bksv.com/media/doc/bp0066.pdf> - acedido a 03/04/2023.
- [37] Carlos Silva, O tempo de reverberação e a inteligibilidade da palavra, julho de 2013.
- [38] Gil Rocha, Caracterização Acústica do Centro de Congressos do Altice Fórum Braga, dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia do Porto, 2022.
- [39] Helena Abelha, Caracterização Acústica do Centro de Artes de Águeda, dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, FEUP, 2022.
- [40] Mónica Pinto, Caracterização Acústica de grandes auditórios, o caso do auditório da FEUP, dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia do Porto, 2012.
- [41] Tiago Miranda, Caracterização Acústica do grande auditório do convento de S.Francisco, dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia do Porto, 2022.
- [42] Diogo Silva, Caracterização Acústica do Cineteatro Eduardo Brazão, dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia do Porto, 2022.
- [43] Nível sonoro. Escala decibel (explicatorium.com), Acedido a 21/02/2023