



MESTRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2022/2023

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DO TEATRO MUNICIPAL DE OURÉM

FILIPE MIGUEL DE AMORIM DA SILVA VIEIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Presidente do Júri:

Adrián Manuel Tavares da Silva Professor Associado do Departamento de Engenharia
Química da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Orientador Académico:

António Pedro Oliveira de Carvalho Professor Associado do Departamento de Engenharia
Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Julho, 2023

MESTRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2022/2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Tel. +351-22-508-1884

✉ catc@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 do Ambiente - 2022/2023 - Departamento de Engenharia Química, 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.

You can't see me

John Cena

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ingressei no curso de Engenharia para ter Acústica... e isto é Acústica!

Ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, dirijo a minha gratidão pela oportunidade que me proporcionou de aprender mais sobre a única área pela qual ingressei no curso de Engenharia. Pela orientação, disponibilidade e partilha de conhecimento: o meu obrigado.

Ao Engenheiro Eduardo Costa, pela disponibilidade demonstrada na realização das medições acústicas na sala de espetáculos do TMO, pela partilha de experiência em campo e por me ter proporcionado o meu primeiro dia como Engenheiro Acústico.

À empresa *InAcoustics*, pela atenção na disponibilização dos elementos de projeto da sala de espetáculos do Teatro Municipal de Ourém e pelo tempo e predisposição que partilharam connosco para contextualização dos mesmos. E que continuemos ligados pela Acústica no mundo profissional.

À Fundação Conservatório Regional de Gaia, a minha casa antes de ingressar na FEUP, que me deu palco e também foi palco de grandes momentos da minha vida, junto com grandes amigos. Serei eternamente grato pela forma como acolheram a minha família e pelo dom que me proporcionaram: o dom da Música.

À Comunidade da Igreja da Lapa, verdadeira escola de valores e palco dos meus primeiros e privilegiados contactos com a Música e o Som (de um arrebatador órgão de tubos). Continuarei a servir humildemente ao Altar.

Aos meus Zé, Tita, Esmeralda e Domingos, para quem eu era sempre o menino d'oiro, o filósofo, o músico, o outro. Saudades!

À minha família de Raça Amorim e Vieira e padrinhos e primos que sempre me acompanharam.

Aos meus pais, que nos deram tudo e que se nos deram na totalidade, sem pedir nada a nós, meus irmãos, de quem tenho um orgulho incomensurável.

À família do Grupo de Fados de Engenharia, que orgulhosamente integro e que me proporcionou dos melhores momentos destes verdes anos. Um enorme bem-haja!

A quem não deveria de agradecer, pois bem sabem que não se faz por favor, mas sim porque se quer. A Minas e Ambiente tudo, porque muito é nada. E foi o que fiz. E quem vier atrás, que feche a porta, ou deixe só entreaberta para alguém entrar.

Aos meus pilares, que foram aqueles que, como que pugilistas, venceram comigo estas difíceis rondas da vida e com quem, pela irracionalidade da amizade, seguimos de luvas cerradas para o que o futuro nos reserva.

Aos meus amigos de Gaia, com tantas lembranças que me chamam a nostalgia.

A todos aqueles que privaram comigo, de colegas a professores, colegas de trabalho, àqueles a quem o Curso tornou próximas e a Engenharia.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, por ter sido a minha casa durante estes anos.

Um muito obrigado!

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo principal a caracterização acústica do Teatro Municipal de Ourém (TMO).

Esta sala, remodelada acusticamente pela empresa *InAcoustics* no ano de 2021, é principalmente vocacionada para Teatro, podendo ainda ser palco de espetáculos de exibição cinematográfica e de eventos corporativos. Nesse sentido, a inteligibilidade da palavra foi realçada neste trabalho. Este parâmetro está dependente de características interiores da sala, dos seus materiais de absorção sonora e da sua reverberação e também do isolamento sonoro relativamente ao exterior e a espaços interiores próximos.

Este trabalho começa por abordar genericamente conceitos teóricos da área da Acústica, necessários para a compreensão do desenvolvimento desta tese. Além disso, são mais aprofundados os conceitos de acústica de teatros e outras salas cuja principal valência resida na “oratória”.

É também exposta a evolução dos conhecimentos acústicos aplicados em teatros ao longo da História da Acústica. Assim, faz-se a contextualização de alguns valores recomendados para os parâmetros acústicos estudados neste ramo da Acústica e a evolução destes, segundo estudos feitos por experiência e por erros praticados nos projetos deste tipo de espaços. Para além destes valores ideais, dá-se uma abordagem à legislação portuguesa referente à acústica de edifícios deste tipo, o Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios (RRAE) e, por conseguinte, aos valores limite dos parâmetros acústicos abordados na caracterização acústica do TMO.

Além disso descreve-se, neste trabalho, a metodologia de análise das características das salas, através dos parâmetros de acústicos relevantes para este estudo, nomeadamente o tempo de reverberação (TR), o nível de pressão sonora de ruído de fundo com e sem ponderação do Filtro A (L_{eq} e o ponderado L_{Aeq}), as curvas de incomodidade *noise criterion* (NC) e *noise rating* (NR) e o RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*).

A partir dos ensaios *in situ* realizados no TMO, segundo a metodologia descrita para a medição de cada parâmetro de interesse para a caracterização acústica desta sala, obteve-se os seguintes valores médios: TR de 1,0 segundos, que, aceitável para valores ideais para teatro e de 0,67 segundos, com a incerteza (I) associada de 35%, cumprindo valores regulamentados; L_{eq} de 55 dB e L_{Aeq} de 24 dB, com sistemas AVAC desligados; L_{eq} de 55 dB e L_{Aeq} de 35 dB, com sistemas AVAC ligados, que mesmo com a incerteza de 3 dB aplicados, não cumpre os valores regulamentados; valor de índice NC, com os sistemas AVAC ligados, de NC 24, estando dentro do intervalo de valores ideais para teatros; valor de índice NR, com os sistemas AVAC ligados, de NR 25, estando dentro do intervalo de valores ideais para teatros; RASTI médio de 0,69, o que traduz uma qualidade “boa” da inteligibilidade da palavra, com valores medidos ao longo de toda a sala entre 0,62 (para lugares mais afastados do palco com qualidade “boa”) e 0,82 (para lugares mais próximos da sala com qualidade “excelente”). Esta sala, apesar do incumprimento regulamentar medido, é adequada ao propósito que lhe foi dedicado, que é o teatro.

Numa análise comparativa, os valores medidos no TMO para os parâmetros em estudo adequam-se à tendência delineada pelos resultados de outras sete salas portuguesas.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Teatro, Ourém, Reverberação, RASTI, Inteligibilidade da Palavra, Som.

ABSTRACT

The main objective of the current work is the acoustic characterization of the Ourém Municipal Theatre (TMO). This venue, acoustically refurbished by the company InAcoustics in the year 2021, is primarily intended for theater performances but it can also be the stage for film screenings and corporate events. Therefore, speech intelligibility was emphasized in this work. This parameter is dependent on the interior characteristics of the room, its sound absorption material, reverberation, as well as sound isolation from the exterior and neighboring interior spaces.

The study begins by addressing theoretical concepts in the field of acoustics, which are essential for understanding the development of this thesis. Furthermore, it delves deeper into the concepts of theater acoustics and other rooms predominantly focused on “oratory”.

The evolution of acoustical knowledge applied to theaters throughout the history of acoustics is also presented. Thus, some recommended values for the acoustic parameters studied in this branch of acoustics are contextualized, taking into consideration the evolution based on studies conducted through experience and errors encountered in the design of such spaces. In addition to these ideal values, the Portuguese legislation related to the acoustics of buildings of this type is discussed, specifically the Portuguese Regulation of Acoustic Requirements for Buildings (RRAE), including the limit values for the acoustic parameters addressed in the acoustic characterization of TMO.

Moreover, this work describes the methodology for analyzing the characteristics of the rooms, through acoustic parameters relevant for this study, namely the reverberation time (TR), background noise sound pressure level with and without weighting of the A-Filter (L_{eq} and the weighted L_{Aeq}), Noise Criterion (NC) and Noise Rating (NR) curves, and Rapid Speech Transmission Index (RASTI).

From the in situ tests conducted in the TMO following the described methodology for the measurement of each parameter of interest for the acoustic characterization of this venue, the following average values were obtained: a TR of 1,0 seconds, which is acceptable for ideal theater values, and 0,67 seconds, with an associated uncertainty (I) of 35%, meeting regulated values; L_{eq} of 55 dB and L_{Aeq} of 24 dB, with HVAC systems off; L_{eq} of 55 dB and L_{Aeq} of 35 dB, with HVAC systems on, which even with the uncertainty of 3 dB applied, does not meet the regulated values; an NC index of 24 with HVAC systems turned off, falling within the range of ideal values for theaters; an NR index value of 25 with HVAC systems turned on, within the range of ideal values for theatres; and an average RASTI of 0,69, indicating “good” speech intelligibility, with measures values throughout the venue ranging from 0,62 (for seats farthest from the stage with “good” quality) to 0,82 (for seats closer to the stage with “excellent” quality). Despite non-compliance with regulated measurements, this venue is suitable for its intended purpose, which is theater.

In a comparative analysis, the measured values for the studied parameters in TMO align with the trend observed in seven other Portuguese venues.

Keywords: Acoustics, Theater, Ourém, Reverberation, RASTI, Speech Intelligibility, Sound

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice Geral	vii
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Quadros	xi
Símbolos, Acrónimos e Abreviaturas	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e objetivos	1
1.2. Estrutura da tese.....	2
2. Conceitos Acústicos.....	3
2.1. Introdução	3
2.2. Conceitos Teóricos Básicos	4
2.2.1. Som e Propagação do Som	4
2.2.2. Intensidade e potência sonora	5
2.2.3. Níveis.....	6
2.2.4. Análise em Frequência	9
2.2.5. Curvas de Ponderação	11
2.2.6. Comprimento de Onda	14
2.2.7. Análise no Tempo	15
2.3. Correção Acústica	16
2.3.1 Introdução.....	16
2.3.2. Absorção Sonora	16
2.3.3. Tempo de Reverberação	18
2.3.4. Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros	18
2.3.5. Campo Sonoro	20
2.4. Isolamento Sonoro.....	21
2.4.1 Ruídos de Percussão, Aéreos e Transmissão por Via Direta ou Marginal	21
2.4.2 Curvas de Incomodidade <i>Noise Criteria</i> (NC) e <i>Noise Rating</i> (NR).....	22
2.5. Inteligibilidade da Palavra	23
2.5.1 Parâmetros de Medida	23
3. Estado da Arte.....	25
3.1. Enquadramento da Relação Acústica entre a Expressão das Artes e o Meio de Expressão ..	25
3.2. Enquadramento Histórico do Teatro	26
3.3. Teatros	30
3.3.1. Teatros e as suas Exigências Funcionais	30
3.3.2. Intensidade Adequada e Nível Sonoro Uniforme	31
3.3.3. Tempo de Reverberação Adequado	33
3.3.4. Diferença entre Sinal <i>Versus</i> Ruído.....	35
3.3.5. Defeitos Acústicos	37

3.3.6. Acústica Variável.....	37
3.3.6.1. Variação na Absorção.....	37
3.3.6.2. Variação no Volume	38
3.3.7. Inteligibilidade da Palavra- RASTI	40
3.3.8. Legislação- Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios.....	40
4. Medições.....	43
4.1. Enquadramento do Teatro Municipal de Ourém	43
4.2. Metodologia	48
4.2.1. Parâmetros Acústicos Medidos	48
4.2.2. Equipamentos de Medição	49
4.2.3. Medições.....	50
5. Resultados.....	53
5.1. Tempo de Reverberação.....	53
5.2. Tempo de Reverberação com a Sala Ocupada (Previsão)	56
5.3. Ruído de Fundo.....	60
5.4. Curvas de Incomodidade	65
5.5. RASTI.....	67
5.6. Comparação com outras Salas	68
5.6.1. Comparação com outras Salas	68
5.6.2. Tempo de Reverberação	69
5.6.3. Ruído de Fundo, <i>Noise Criteria</i> e <i>Noise Rating</i>	72
5.6.4. RASTI	75
6. Epílogo	81
6.1. Conclusões.....	81
6.2. Desenvolvimentos futuros.....	83
Referências Bibliográficas	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Inter-relação das áreas e zonas de conhecimento da Acústica e zona de interesse para o presente trabalho [2]	3
Figura 2.2- Alternância de zonas de rarefação e de compressão, na propagação de uma onda sonora, referenciado à pressão atmosférica [3]	4
Figura 2.3- Propagação sonora a partir de uma fonte de determinada potência sonora e relação comparativa das intensidades sonoras em dois pontos diferentes, tendo em conta a sua distância (adaptado de [4])	6
Figura 2.4- Representação ilustrativa de um sonómetro [5]	7
Figura 2.5- Níveis de pressão sonora típicos, com avaliação subjetiva (adaptado de [4])	8
Figura 2.6- Esquema do movimento da vibração de uma partícula de ar, sujeita a um estímulo sonoro (adaptado de [4])	9
Figura 2.7- Exemplos práticos de gamas de frequências [1]	10
Figura 2.8- A audibilidade humana em função da intensidade sonora e da frequência [7]	12
Figura 2.9- Descrição gráfica das curvas de ponderação A (azul), B (amarelo), C (vermelho) e D (preto) [8]	13
Figura 2.10- Comprimento de onda de um som de um diapasão (adaptado de [4])	14
Figura 2.11- - Valores típicos de frequência e de comprimento de onda de vários sons distintos (adaptado de [4])	15
Figura 2.12- Interações das ondas sonoras com superfícies (adaptado de [5])	16
Figura 2.13- Ilustração representativa de um tubo de Kundt (adaptado de [5])	17
Figura 2.14- Fotografia de uma câmara de reverberação [9]	18
Figura 2.15 e 2.16- Lã de Rocha (esq.) e aglomerados de cortiça (dir.) [10]	19
Figura 2.17 e 2.18- Ressonadores de Helmholtz [10]	19
Figura 2.19 - Transmissão de ruído aéreo (esq.) e de percussão (dir.) [11]	21
Figura 2.20- Transmissão de ruído por via direta e marginal/indireta [12]	21
Figuras 2.21 e 2.22- Curvas NR (esq.) e NC (dir.) [13]	22
Figura 3.1- Estrutura característica de um teatro grego a céu aberto (adaptado de [4])	26
Figura 3.2- Representação esquemática do som direto (linha cheia) e do som refletido (tracejado), dependendo da posição do intérprete: (a) mais próximo da plateia; (b) mais longe da plateia; (c) mais próximo da skene; (d) no palco erguido [19]	27
Figura 3.3- Evolução da estrutura dos teatros gregos a céu aberto, com as linhas vermelhas a descrever o princípio arquitetónico de Vitruvius sobre a orquestra de um teatro [18]	27
Figura 3.4- Evolução da estrutura das odeias de 15 a.C. à Renascença (adaptado de [18])	28
Figura 3.5- Teatro Olímpico, Vicenza, Itália [5]	29
Figura 3.6- Teatro Sabbioneta, Itália [5]	29
Figura 3.7- Teatro Farnese, Parma, Itália [5]	29
Figura 3.8- Várias estruturas básicas de palco de um teatro [5]	31
Figura 3.9- Reflexão do som na superfície de um teto segmentado (esq.) e socalcado (dir.) [5]	32
Figura 3.10- Concha acústica em teatro ao ar livre [5]	33
Figura 3.11- Canópias colocadas acima de um palco proscénio, como extensão de uma concha acústica colocada no palco [5]	33
Figura 3.12- Correlação dos fatores de volume e tempo de reverberação de uma sala com a sua função ideal para cada configuração de valores (adaptado de [5])	35
Figura 3.13- Cortinas de absorção sonora retráteis (adaptado de [4])	37
Figura 3.14- Superfícies deslizantes (adaptado de [4])	38
Figura 3.15- Painéis articulados (adaptado de [4])	38
Figura 3.16- Elementos Rotativos (adaptado de [4])	38
Figura 3.17- Edwin Thomas Hall adaptado para concertos sinfónicos (adaptado de [4])	39
Figura 3.18- Edwin Thomas Hall adaptado para ópera (adaptado de [4])	39
Figura 3.19- Edwin Thomas Hall adaptado para teatro dramático (adaptado de [4])	39
Figura 4.1 e 4.2- Localização TMO por satélite (esq.) e mapa (dir.) [26]	43
Figura 4.3- Imagem da entrada principal do TMO [24]	44
Figura 4.4- Planta do piso 0 do TMO [28]	45

Figura 4.5- Cortes transversais do TMO [28]	45
Figura 4.6- Cortes longitudinais do TMO [28]	46
Figura 4.7- Enquadramento dos lugares da plateia e da <i>régie</i> na sala de espetáculos [27].....	47
Figuras 4.8 (esq.) e 4.9 (dir.) – Canópia refletora, difusores de ondas sonoras e sistema AVAC [27]	48
Figura 4.10 (esq.) e 4.11 (dir.) - ressoadores agrupados, lã mineral e paredes difusoras de ondas sonoras (fotos do autor)	48
Figura 4.12- Equipamento de emissão de fonte sonora, de RASTI e sonómetro (foto do autor)	50
Figura 4.13- Pontos de medição de tempo de reverberação (Ti) e de ruído de fundo com e sem AVAC (Fi) [28]	51
Figura 4.14- Pontos de medição de RASTI (Ri) [28].....	51
Figura 5.1- Representação gráfica dos valores das medições do Tempo de Reverberação (T30) na sala de espetáculos do Teatro Municipal de Ourém em bandas de frequência de 1/3 de oitava de cada ponto de medição associado ao lugar	55
Figura 5.2- Secções de área de cadeiras ocupadas [28]	57
Figura 5.3- Tempos de Reverberação com a sala vazia e a sala lotada para cada banda de 1/1 oitava dos 125 aos 4000 Hz	59
Figura 5.4- Valores das medições de nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) pelos pontos de medição da sala de espetáculos do TMO por bandas de frequência de 1/3 de oitava (Hz), dos 20 aos 20000 Hz, com o AVAC desligado	62
Figura 5.5- Valores das medições de nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) pelos pontos de medição da sala de espetáculos do TMO por bandas de frequência de 1/3 de oitava (Hz), dos 20 aos 20000 Hz, com o AVAC ligado	62
Figura 5.6- Valores médios das medições de nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) da sala de espetáculos do TMO por bandas de frequência de 1/3 de oitava (Hz), dos 20 aos 20000 Hz, com o AVAC ligado e desligado	64
Figura 5.7- Variação dos níveis de pressão sonora com filtro A, L_{Aeq} em dB, por banda de frequência de um terço de oitava dos 20 aos 20000 Hz, com e sem AVAC	64
Figura 5.8- Diferença entre os valores médios das medições de nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) com AVAC ligado e desligado da sala de espetáculos do TMO, por bandas de frequência de 1/3 de oitava (Hz), dos 20 aos 20000 Hz	65
Figura 5.9- Comparação dos valores dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo equivalentes com o AVAC ligado com as curvas NC	66
Figura 5.10- Comparação dos valores dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo equivalentes com o AVAC ligado com as curvas NR	66
Figura 5.11- Comparação do tempo de reverberação das várias salas em estudo para as bandas de frequência de 1/3 de oitava, dos 100 aos 5000 Hz [29] [30] [31] [32] [33] [34]	71
Figura 5.12- Comparação dos valores de tempo de reverberação médio das várias salas em análise para as bandas de frequência de 1/1 oitava entre os 500 e os 2000 Hz, em função do volume das salas [29] [30] [31] [32] [33] [34]	71
Figura 5.13- Valores médios das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) nas salas em análise por bandas de 1/3 de oitava (Hz), dos 12,5 aos 8000 Hz, com AVAC desligado [29] [30] [31] [32] [33] [34]	73
Figura 5.14- Valores médios das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) nas salas em análise por bandas de 1/3 de oitava (Hz), dos 12,5 aos 8000 Hz, com AVAC ligado [29] [30] [31] [32] [33] [34]	73
Figura 5.15- Comparação do valor médio de RASTI de cada uma das salas em análise em função do tempo de reverberação médio (para as bandas de frequência dos 500, 1000 e 2000 Hz) de cada sala [29] [30] [31] [32] [33] [34]	77
Figura 5.16- Comparação do valor médio de RASTI de cada uma das salas em análise em função do L_{Aeq} de cada sala [29] [30] [31] [32] [33] [34]	77
Figura 5.17- Comparação do valor mínimo de RASTI de cada uma das salas em análise em função do tempo de reverberação médio (para as bandas de frequência dos 500, 1000 e 2000 Hz) de cada sala [29] [30] [31] [32] [33] [34]	78
Figura 5.18- Comparação do valor mínimo de RASTI de cada uma das salas em análise em função do L_{Aeq} de cada sala [29] [30] [31] [32] [33] [34]	78

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1- Valores de frequência limite para as bandas de 1/1 e de 1/3 de oitava e frequências centrais [6]	11
Quadro 2.2- Ponderação do filtro A por banda de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava [1]	13
Quadro 3.1- Valores ideais de tempo de reverberação (500-1000 Hz) para cada função da sala [1] .	34
Quadro 3.2- Valores máximos ideais do índice NC (adaptado de [1]).....	36
Quadro 3.3- Valores máximos ideais do índice NR (adaptado de [13]).....	36
Quadro 3.4- Relação entre valores de RASTI e a qualidade da inteligibilidade da palavra [22]	40
Quadro 5.1- Valores das medições do Tempo de Reverberação (T30) na sala de espetáculos do Teatro Municipal de Ourém em bandas de frequência de 1/3 de oitava de cada ponto de medição associado ao lugar	54
Quadro 5.2- Valores médios do tempo de reverberação medidos no TMO para as bandas de frequência de 1/1 oitava entre os 500 e os 2000 Hz, o respetivo valor médio, o valor com a incerteza associada de 35% e avaliação do cumprimento do RRAE	55
Quadro 5.3- Comparação dos valores ideais do tempo de reverberação (500-1000 Hz) em função do propósito de utilização da sala [1]	56
Quadro 5.4- Parâmetros usados para cálculo do tempo de reverberação com a sala lotada	58
Quadro 5.5- Valores calculados da previsão de tempos de reverberação para a sala lotada para cada banda de oitava dos 125 aos 4000 Hz.....	58
Quadro 5.6- Comparação dos valores ideais da previsão do tempo de reverberação com a sala lotada (500-1000 Hz) em função do propósito de utilização da sala [1]	59
Quadro 5.7- Resultados das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) na sala de espetáculos do TMO com o AVAC desligado, nos diferentes pontos de medição e a média energética das mesmas para as bandas de frequência de 1/3 de oitava, dos 20 aos 20000 Hz e os valores de nível de pressão sonora contínuo equivalente de cada ponto medido sem a ponderação do filtro A (L_{eq}) e com a ponderação do filtro A (L_{Aeq}).....	61
Quadro 5.8- Resultados das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) na sala de espetáculos do TMO com o AVAC desligado, nos diferentes pontos de medição e a média energética das mesmas para as bandas de frequência de 1/3 de oitava, dos 20 aos 20000 Hz e os valores de nível de pressão sonora contínuo equivalente de cada ponto medido sem a ponderação do filtro A (L_{eq}) e com a ponderação do filtro A (L_{Aeq}).....	63
Quadro 5.9- Valores dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo equivalentes com o AVAC ligado, valores regulamentados e análise comparativa sobre o cumprimento dos valores medidos com o RRAE [23].....	65
Quadro 5.10- Valores máximos recomendados do índice de NR [13].....	67
Quadro 5.11- Valores máximos recomendados do índice de NC [1].....	67
Quadro 5.12- Relação entre a a qualidade da inteligibilidade da palavra com os valores de RASTI [22].....	68
Quadro 5.13- Valores do parâmetro RASTI medidos na sala de espetáculos do TMO	68
Quadro 5.14- Auditórios em estudo com respetivos volumes, tempos de reverberação médios para as bandas de frequência de 500, 1000 e 2000 Hz e tempos de reverberação médios de cada uma dessas frequências [29] [30] [31] [32] [33] [34]	70
Quadro 5.15- Valores de níveis de pressão sonora médios de ruído de fundo equivalentes com AVAC ligado e correspondentes valores dos índices de NC e NR [29] [30] [31] [32] [33] [34]	74
Quadro 5.16- Valores de níveis de pressão sonora médios de ruído de fundo equivalentes com AVAC desligado e a diferença entre estes e os valores de níveis de pressão sonora médios de ruído de fundo equivalentes com AVAC ligado [29] [30] [31] [32] [33] [34].....	75
Quadro 5.17- Comparação dos valores de RASTI entre as várias salas em análise [29] [30] [31] [32] [33] [34].....	76
Quadro 6.1- Resumo dos parâmetros acústicos medidos no TMO e usados para a sua caracterização acústica	82

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A – Absorção sonora equivalente [m^2]

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

TMO – Teatro Municipal de Ourém

C_{80} – Claridade [dB]

α – Coeficiente de absorção sonora

c – Celeridade (m/s)

D_{50} – Definição (50 ms) [dB]

TR – Tempo de Reverberação (s)

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

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

I – Intensidade sonora (W/m^2)

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

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

RASTI – *Rapid Speech Transmission Index*

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

L_i – Nível de intensidade sonora [dB]

L_w – Nível de potência sonora [dB]

L_p – Nível de pressão sonora [dB]

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

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

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

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

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

NC – *Noise Criteria* (Critérios de ruído)

NR – *Noise Rating* (Classificação de ruído)

I – Incerteza

p – Pressão Sonora [Pa]

p_0 – Pressão sonora de referência [2×10^{-5} Pa]

STI – *Speech Transmission Index*

S – Superfície real do material (m^2)

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

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

Desde a Antiguidade, o Som tem um papel fulcral nas mais diversas atividades artísticas e científicas, como meio de comunicação entre uma população. Com a tendência progressiva de se realizar este tipo de atividades para um número cada vez maior de pessoas, também a tecnologia acústica se foi adaptando para poder servir estes propósitos. Essa tecnologia foi introduzida tanto nos instrumentos musicais, como em dispositivos de amplificação sonora e também em estruturas e edifícios com a funcionalidade de propagação do som das mais diversas características para as mais diversas funcionalidades.

No intuito de se reter o maior proveito possível do Som, as salas de espetáculo devem adequar-se à sua finalidade acústica específica. Assim, nos locais dedicados à realização de congressos, teatros, espetáculos de música, cinema ou dança, pode ocorrer que várias finalidades não sejam compatíveis para as mesmas configurações acústicas da sala. [1]

No entanto, apesar disto, a problemática da afinidade acústica na construção de uma sala com determinado tipo de funções é muitas vezes suprimida ou desprezada na elaboração do projeto. A sobreposição de interesses arquitetónicos, monetários e outros, condiciona a funcionalidade futura deste tipo de edifícios, cujo propósito se vê prejudicado. Neste sentido, é necessária uma objetiva e correta caracterização acústica das salas, comparando as suas características às ideais para as suas funcionalidades. [1]

Neste trabalho, é explorado um destes tipos de salas, vocacionado para Teatro: o Teatro Municipal de Ourém. Neste tipo de salas, a Palavra é o foco de interesse na afinidade acústica. Apesar de ser preciso que a propagação do som seja eficaz para toda a plateia, a sala deve ser configurada de tal forma que a inteligibilidade das palavras seja preservada, prevenindo fenómenos acústicos prejudiciais à atividade teatral, como o eco. Além disso, a sala deve ser provida de tecnologias de controlo de reverberação, que podem prevenir a sobreposição do rasto sonoro de vogais ao som das consoantes, que são fundamentais para a compreensão da palavra. Estas configurações devem também prever as gamas de frequência distintas entre vogais (baixas frequências) e consoantes (altas frequências). [1]

Assim, o objetivo desta tese é a caracterização acústica do Teatro Municipal de Ourém.

Esta caracterização da sala foi realizada *in situ*, para a medição dos parâmetros pertinentes para este estudo. A estes valores, foram comparados os valores de parâmetros acústicos ideais para os teatros,

como método de avaliação dos espaços caracterizados. Além disso, esses valores são também comparados aos de outras salas com as mesmas finalidades, avaliando-se comparativamente todas essas salas.

Assim, a inteligibilidade da Palavra, a clareza e definição do som, a reverberação e o ruído de fundo foram as principais questões avaliadas na sala de Teatro.

Espera-se que a publicação do presente trabalho aumente o repertório de apoio ao dimensionamento acústico de edifícios dedicados à percepção da Palavra, com o propósito de contribuir para outros projetos de salas com a mesma finalidade.

1.2. ESTRUTURA DA TESE

A presente tese está dividida em oito capítulos.

No primeiro capítulo, “Introdução”, é feito o enquadramento do tema da presente tese, são apresentados os objetivos deste trabalho e os motivos pelos quais realizamos este estudo.

No segundo capítulo, “Conceitos Acústicos”, são colocados para o leitor os conceitos acústicos pelos quais se regeu toda a elaboração da tese, permitindo o acompanhamento e compreensão dos conteúdos deste trabalho.

No terceiro capítulo, “Estado da Arte”, é exposto o repertório de conhecimento já existente sobre acústica de salas trabalhado noutros estudos. É também colocada uma contextualização histórica sobre a evolução de salas de espetáculo para teatro em função das necessidades acústicas ao longo dos tempos. Além disso, são mencionados e explicados os regulamentos existentes para o dimensionamento acústico dos teatros e é feita uma análise estrutural dos teatros e das suas exigências funcionais, englobando as tecnologias e materiais, as dimensões da sala e a disposição destes requisitos mais adequados.

No quarto capítulo, “Medições”, descreve-se o Teatro Municipal de Ourém, englobando as tecnologias, materiais e disposições nessas mesmas salas. Além disso, faz-se uma descrição da metodologia de medição, assim como uma descrição do software DIRAC e contextualização teórica dos parâmetros de edição usados, como o TR, o L_{eq} , o L_{Aeq} , o NC/NR, o C80, o D50, o STI, o L_{eq} , o L_{Aeq} (com e sem AVAC) e o NC/NR (com AVAC).

No quinto capítulo, “Resultados”, são apresentados os resultados obtidos nas medições in situ no Teatro Municipal de Ourém. Além disso, são colocadas algumas considerações sobre a análise dos resultados obtidos. Faz-se a comparação dos valores obtidos sobre os parâmetros medidos com os de sete outras salas portuguesas, sobre os parâmetros medidos e são retiradas algumas conclusões sobre a avaliação da sala em estudo e da sua adequabilidade à finalidade a que se propõe. Além disso, este capítulo confere uma perspetiva realista e contextualizada sobre a qualidade da sala, num panorama mais alargado sobre a qualidade das outras salas em comparação e condicionado a possíveis erros reais de concretização de projeto, a condições monetárias e arquitetónicas.

No sexto capítulo, “Epílogo”, é feita uma análise de todo o conteúdo do trabalho e das conclusões que são possíveis de retirar ao longo da sua leitura, assim como é dada uma resposta aos objetivos propostos no trabalho. Acresce a este capítulo o tipo de trabalhos futuros que podem ser realizados para a otimização da afinidade acústica da sala, numa perspetiva de aumento do repertório do conhecimento sobre este ramo da Acústica Arquitetónica e, eventualmente, como começo de projeto futuro a concretizar nesta mesma sala.

2

CONCEITOS ACÚSTICOS

2.1. INTRODUÇÃO

Com vista à total compreensão dos temas envolvidos na presente dissertação, são expostos neste capítulo os conceitos básicos da Acústica, nomeadamente a definição do que é o som, a sua propagação, e o seu estudo e caracterização. Além disso, são também abordados os conceitos focados à área da Acústica de Edifícios.

A Acústica é o ramo da física no qual se analisa e estuda as ondas sonoras. Atualmente, a Acústica subdivide-se para os mais diversos usos, abordando quase a totalidade das áreas de conhecimento. Essas áreas encontram-se todas englobadas em 4 principais ramos: as Geociências, as Biociências, as Artes e as Engenharias. A área de interesse de exploração da acústica na presente tese fica compreendida entre as Artes e as Engenharias, englobando a área da Acústica de Teatros. [1]

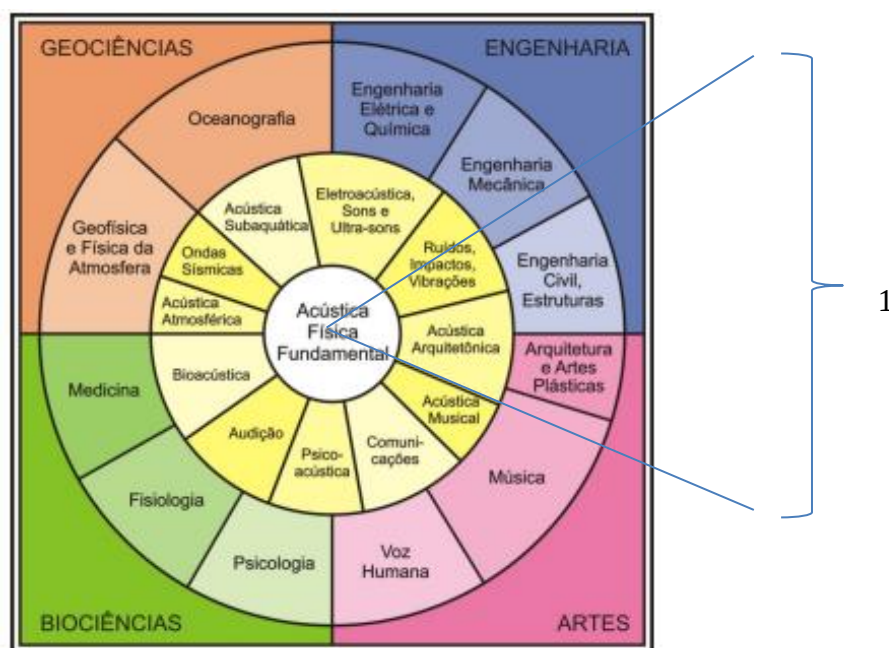


Figura 2.1- Inter-relação das áreas e zonas de conhecimento da Acústica e zona de interesse para o presente trabalho [2]

2.2. CONCEITOS TEÓRICOS BÁSICOS

2.2.1. SOM E PROPAGAÇÃO DO SOM

O som resulta de uma vibração, originada numa determinada fonte emissora, em meios elásticos, tais como o ar, a água, o solo e também na maior parte dos materiais de construção. No ar, este som propaga-se em forma de ondas sonoras, que consistem em variações de pressão mínimas, rápidas, sucessivas e consecutivas umas às outras na atmosfera onde estão a ser propagadas. Estas ondas são geradas desde uma fonte emissora até uma fonte recetora, chegando a esta por meio do choque entre partículas. Esta propagação dá-se sob a forma de esferas concêntricas, cujo centro é a fonte emissora. [1]

As variações de pressão, sendo tão mínimas, não deslocam permanentemente matéria, havendo apenas transmissão sucessiva de energia. No entanto, criam sucessivamente zonas de rarefação e compressão, resultantes da vibração das partículas que chocam entre si longitudinalmente à direção da propagação da onda. [1]

Uma vez que a geração do ruído é derivada e propagada por essas variações de pressão, o parâmetro de medição acústico mais importante é a variação de pressão. Para essa medição, toma-se como pressão de referência a pressão atmosférica, P_{at} , com valor aproximado de 101.400 Pa ($\approx 10^5$ Pa), que é o meio prático com que convivemos nas atividades do dia a dia. [1]

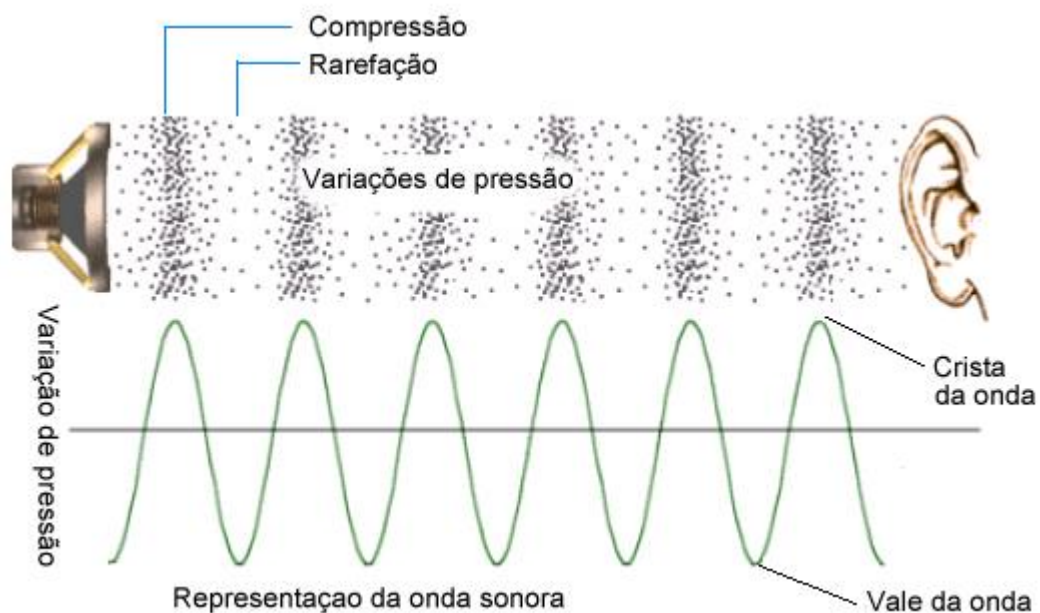


Figura 2.2- Alternância de zonas de rarefação e de compressão, na propagação de uma onda sonora, referenciado à pressão atmosférica [3]

Esta vibração é detetada por sistemas sensoriais localizados no ouvido humano e interpretados pelo cérebro como som (se a vibração for agradável ou tiver algum significado auditivo) ou como ruído (se não for agradável, ou não tiver qualquer significado auditivo). [1]

Admitindo uma fonte sonora pontual que provoca alterações nas suas grandezas de pressão, temperatura e massa específica, comparativamente a um dado estado de equilíbrio, num meio ilimitado, homogêneo e não dissipativo, pode-se prever a reação do sistema envolvente perante essa alteração do equilíbrio que a emissão sonora acarreta, através de vários princípios mecânicos e

termodinâmicos. Assim, com a conjugação da lei das transformações adiabáticas ($PV^\gamma = \text{constante}$), o segundo princípio fundamental da mecânica (“a resultante das forças aplicadas a um corpo é igual à variação da quantidade de movimento por unidade de tempo”) e o princípio da continuidade (a massa de um volume deformável deve permanecer constante), obtém-se a lei da propagação das ondas sonoras (num meio homogêneo, isentrópico, sem viscosidade e em repouso), indicada na expressão 2.1. [1]

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

Com p a representar a pressão em Pa, t o tempo em segundos e c a celeridade em m/s. A celeridade é a velocidade de propagação da onda sonora no meio. No ar seco e ao nível do mar, a celeridade varia com a temperatura da forma descrita na expressão 2.2. [1]

$$c = 20,045\sqrt{T} \quad (2.2)$$

Em que T corresponde à temperatura em unidades Kelvin.

2.2.2. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA

A propagação sonora num meio sem qualquer obstrução dá-se de forma virtualmente esférica, expandindo à medida que se afasta do seu centro. O centro desta esfera é a fonte sonora, que emite um som a uma determinada potência, lida em watts (W). [4]

De forma a visualizar melhor o que vão significar determinados valores de potência sonora descritos no presente trabalho, tenha-se em conta que a potência sonora de instrumentos musicais está dentro de um âmbito de 0,05 W para um clarinete, até 70 W para uma orquestra completa. [1] Portanto, uma coluna PA (*Public Address*) de 10 W pode produzir um som bastante intenso. [4]

No entanto, a energia que passa para um determinado ponto a uma distância d diferente e maior que 0 metros não vai ser a mesma que a potência sonora da fonte emissora. A potência sonora é uma característica da fonte sonora. Esta fonte sonora provoca um estímulo energético num determinado ponto ou direção distintos do ponto da fonte emissora, denominado de intensidade sonora. [1]

Assim, tendo em conta o fenómeno de propagação esférica, a intensidade sonora será a energia emitida pela fonte sonora, dada pela potência sonora, mas dissipada por toda a área de propagação da onda. Portanto, quanto maior a distância de um recetor de uma fonte sonora, menor será a intensidade sonora, mas a potência sonora mantém-se constante. Para o dobro da distância d metros, a área de propagação da onda sonora quadruplica, ou seja, a intensidade é dissipada em 1/4, comparativamente à intensidade no ponto de distância d (fig.2.3). [4]

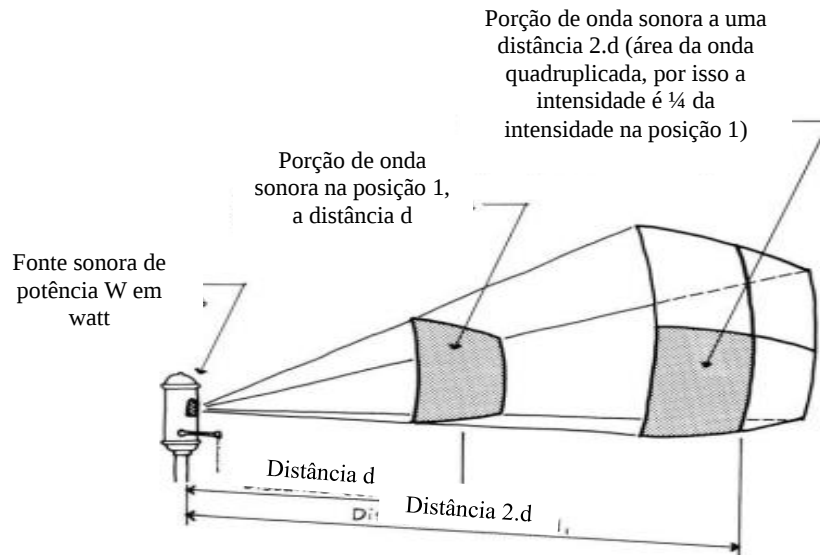


Figura 2.3- Propagação sonora a partir de uma fonte de determinada potência sonora e relação comparativa das intensidades sonoras em dois pontos diferentes, tendo em conta a sua distância (adaptado de [4])

Em definição, a intensidade sonora é, então, a quantidade média de energia por segundo que atravessa, numa dada direção, uma área de 1 m^2 perpendicular à direção da propagação.

Pode ser representada algebricamente pela expressão 2.3, a qual também relaciona a intensidade sonora com a pressão sonora, a massa volúmica e a celeridade.

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

Em que I é a intensidade sonora em watts por metro quadrado (W/m^2), W é a potência sonora em watts (W), r é a distância em metros (m), p é a pressão sonora em pascal (Pa), ρ é a massa volúmica do ar em kg/m^3 (aproximadamente $1,2 \text{ kg/m}^3$) e c celeridade no ar seco a 20°C em metros por segundo (aproximadamente 340 m/s). [1]

2.2.3. NÍVEIS

Nem todas as variações de pressão são detetáveis pelo ouvido humano. A sensibilidade mínima do ouvido, denominada de limiar de audição, é de cerca de 10^{-5} Pa . Por outro lado, uma maior variação de pressão pode deixar de representar só ruído e passar a representar dor. Assim, deteta-se um valor máximo de variação suportável sem dor, denominado de limiar da dor, de 100 Pa . Isto é, a gama de audibilidade humana no domínio de pressão é, numericamente, muito grande (de cerca de 10^7). [1]

Tendo em conta a grande gama de audibilidade, e ao facto de o ouvido corresponder a estímulos sonoros de uma forma mais logarítmica do que linear, a aplicação de uma escala linear em unidades *pascal* seria pouco prática e com valores muito díspares. Nesse sentido, faz-se a conversão dos valores de pressão para valores de níveis de pressão mais adaptados a estas condicionantes em unidades *decibel* (dB). [1]

O *decibel* é um décimo da unidade *bel*, e esta unidade não é restrita à Acústica. É possível fazer a tradução de valores ou de alguma quantidade em níveis, face a um valor de referência convencionado, obtendo-se valores em *bel* ou *decibel*. As conversões de pressões (p em Pa) podem então ser convertidas para níveis de pressão sonora (L_p em dB). Esta conversão sonora é possível segundo a expressão 2.4. [1]

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (2.4)$$

Em que p_0 é a pressão sonora de referência que, neste trabalho, será especificamente de 2×10^{-5} Pa.

Uma vez que, noutras áreas da Acústica, se usa outros valores de referência muito distintos, escreve-se, muitas vezes, a notação “dB re 20 μ Pa”, para evidenciar a referência usada. [1]

Através do uso de aparelhos como o sonómetro, é possível fazer-se a leitura das variações de pressão, apresentando os valores já convertidos em dB. [1]



Figura 2.4- Representação ilustrativa de um sonómetro [5]

De forma a se ter uma noção prática do que significa a gama de níveis de pressão sonora, é apresentada a figura 2.5, na qual se relaciona ruídos ou sons com níveis típicos de pressão sonora. Além disso, apresenta uma análise subjetiva que acrescenta uma perspetiva realista e concreta dos valores dos níveis de pressão sonora, numa tentativa de eliminação de necessidade de abstração perante estes valores.

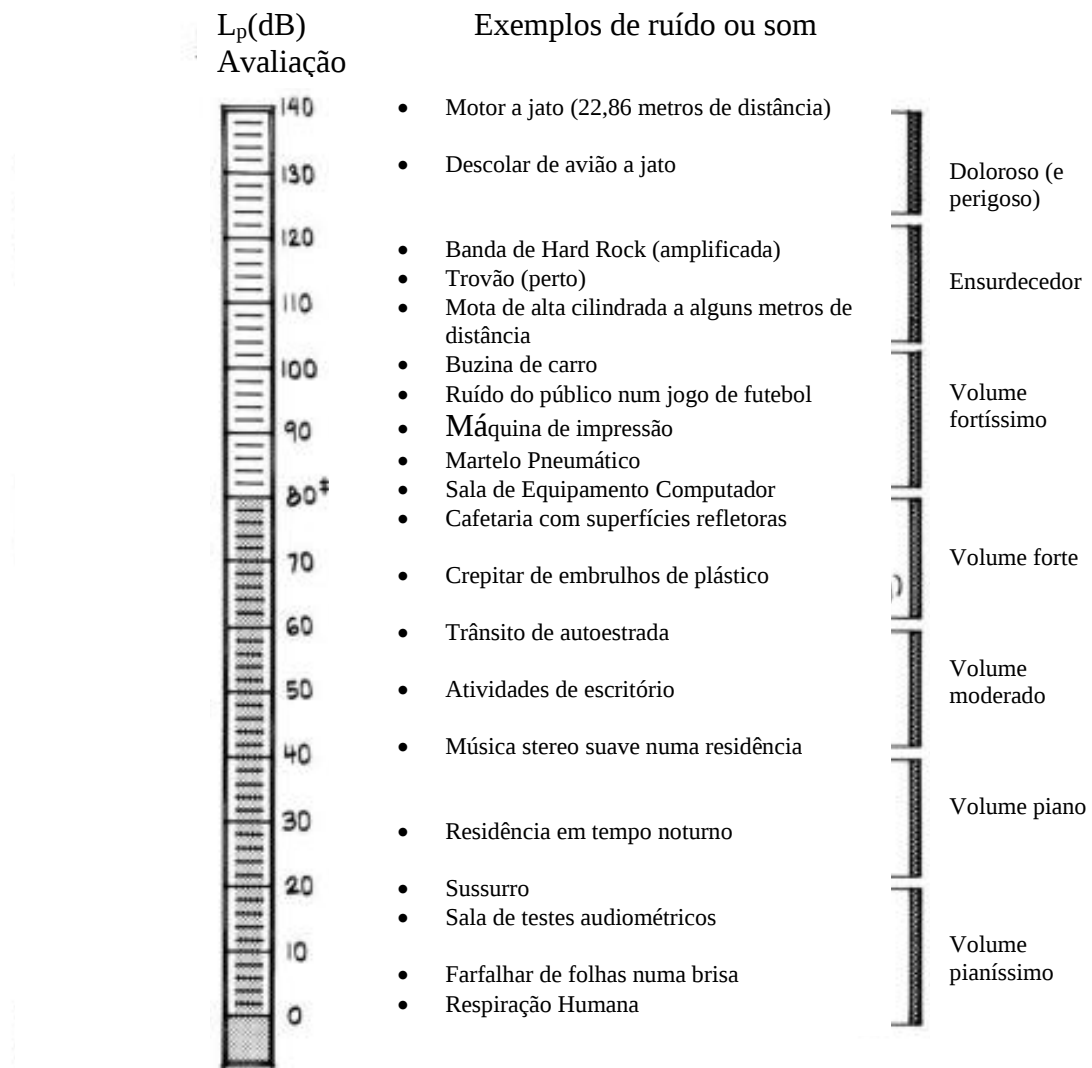


Figura 2.5- Níveis de pressão sonora típicos, com avaliação subjetiva (adaptado de [4])

Através desta figura, e na conversão dos valores de pressão sonora para níveis, o limiar de dor corresponde aos cerca de 130 dB. Naturalmente, tendo assumido uma pressão de referência, o limiar de audição é correspondente ao nível de pressão sonora de 0 dB, abaixo do qual, mesmo existindo variações de pressão, o ouvido humano não deteta qualquer som ou ruído.

Apesar da leitura exata dos níveis de pressão sonora ser possível com tecnologias de medição como o sonómetro, o ouvido humano não consegue distinguir muito pequenas variações de nível. Além disso, a capacidade de discriminação entre níveis depende do valor do próprio nível em si. Para valores de nível mais baixos, a discriminação de L é de 2 dB de diferença, enquanto para valores mais altos (aproximadamente 80 dB) é de 0,5 dB. Este parâmetro de capacidade de discriminação de nível em função do nível do fenómeno sonoro pode ser determinado pela expressão 2.5. [1]

$$\Delta L \text{ (dB)} = 1,644 - 0,0141 \cdot L \quad (2.5)$$

Uma vez que a conversão de valores ou de quantidades de qualquer parâmetro de medição com este tipo de análise para níveis é universal, pode-se também aplicar a expressão 2.4, mas para os parâmetros de intensidade e potência sonoras. É corrente assumir valores de referência de

intensidade sonora ($I_0=10^{-12}$ W/m²) e de potência sonora ($W_0=10^{-12}$ W) e caracterizar o fenómeno acústico através destas grandezas medidas em dB. A conversão dá-se, então, a partir das expressões 2.6 (nível de intensidade sonora L_i) e 2.7 (nível de potência sonora L_w). [1]

$$L_i = 10 \log \frac{I}{I_0}, (dB) \quad (2.6)$$

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0}, (dB) \quad (2.7)$$

Nas situações correntes, e dependentemente da temperatura, os valores de nível de intensidade sonora são sempre quase idênticos aos valores de nível de pressão sonora. [1]

Uma vez que a conversão das unidades dos parâmetros em questão para dB (e de qualquer outro parâmetro convertido para dB) dá-se por bases logarítmicas, a adição de níveis não pode ser algébrica. Desta forma, a adição de n níveis total (L_{total}) deve ser feita da forma expressa na equação 2.8. [1]

$$L_{total} = 10 \times \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (2.8)$$

2.2.4. ANÁLISE EM FREQUÊNCIA

Para além do volume do som/ruído, lido pela sua variação de pressão, intensidade e/ou potência, a frequência é um dos mais importantes parâmetros de caracterização de um sinal sonoro. É esta característica que determina a altura (sensação subjetiva do ouvido humano face à interpretação sensorial da frequência) do fenómeno sonoro e, pela conjugação de todas as suas frequências, permite a distinção desse som/ruído de outros de diferentes fontes sonoras (o timbre diferente). [1] [4]

Um som estável é produzido pelo movimento repetido de uma vibração em intervalos estáveis de tempo. Em definição Física, a frequência é a taxa de repetição de um determinado evento periódico, dentro de um intervalo de tempo definido. Aplicada à Acústica, a frequência de determinado som ou ruído é o número de ciclos que uma partícula de ar completa o seu circuito de vibração desde e até à sua posição neutra (posição inicial da partícula de ar sem qualquer estímulo energético), durante um segundo. Esta característica é lida em hertz (Hz). Inversamente, o período, que é uma característica também de um fenómeno sonoro, refere-se ao tempo que uma dada partícula de ar completa o seu circuito de vibração, desde e até à sua posição neutra, depois de um dado estímulo sonoro. Esta relação está expressa na equação 2.9. [4]

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.9)$$

Em que f é a frequência em hertz (Hz) e T é o período em segundos (s).

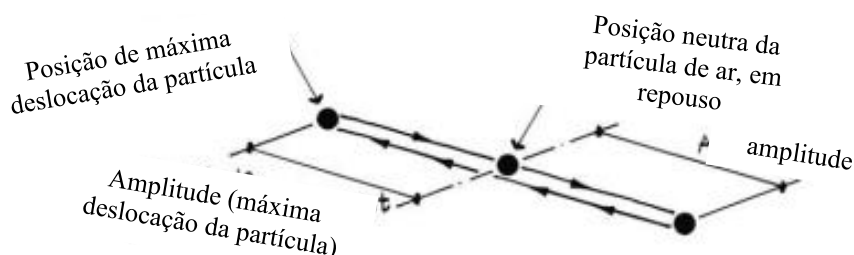


Figura 2.6- Esquema do movimento da vibração de uma partícula de ar, sujeita a um estímulo sonoro (adaptado de [4])

Quanto maior o número de vibrações por segundo, maior a frequência e mais aguda é a sensação de altura do som/ruído. Quanto menor o número de vibrações por segundo, menor a frequência e, portanto, mais grave é a sensação de altura do som/ruído.

Na acústica de edifícios, a distinção de alturas por frequências está vinculada a três grandes zonas, às quais correspondem flagrantemente diferentes necessidades de tratamento acústico: frequências graves, dos 20 aos 355 Hz; frequências médias, dos 355 aos 1410 Hz; frequências agudas, dos 1410 aos 20000 Hz. [1]

No entanto, na área da música, as necessidades acústicas fazem com que haja uma maior distinção das gamas de frequências para os vários artifícios musicais. A variabilidade de frequências é promovida para efeitos artísticos, separando-se instrumentos e até vozes em registos de altura do baixo ao soprano. [1]

De forma a visualizar melhor o que significa alguns valores ou grandezas de frequências ao longo da presente dissertação, apresenta-se a figura 2.7 para melhor contextualização deste tema com vários sons/ruídos com frequências típicas.

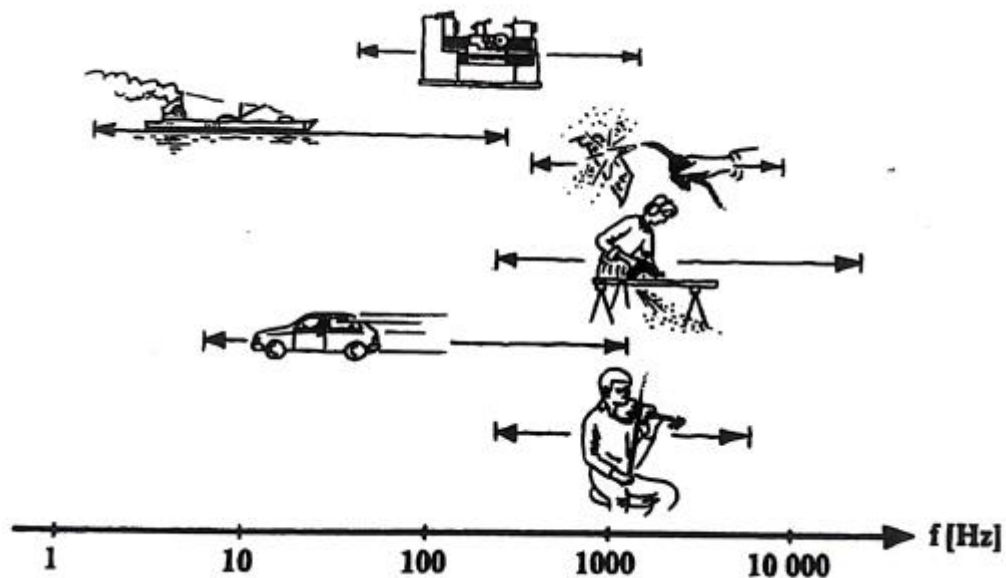


Figura 2.7- Exemplos práticos de gamas de frequências [1]

O ouvido humano, quando jovem e de audição normal, deteta frequências dos 20 aos 20000 Hz. Abaixo desta gama de audibilidade, os sons têm a denominação de infrassons, e os de frequência superior como ultrassons.

Dentro da gama de audibilidade, a distinção entre frequências também não é linear. Para mudanças pequenas de frequência, o ouvido humano tem a capacidade de discriminar mais facilmente mudanças entre baixas frequências (para uma frequência inicial de 125 Hz, variações de cerca de 0,5 Hz) do que entre altas frequências (para uma frequência inicial de 8000 Hz, variações de cerca de 60 Hz). [1]

Uma vez que maior parte dos sons ou ruídos contêm energia sobre uma grande gama de frequências e a análise sobre cada uma delas seria demasiado exaustiva, define-se, para efeitos práticos, um

método de análise de frequências por bandas. As bandas de frequências são intervalos de frequências entre um limite inferior (f_1) e um limite superior (f_2). O valor médio entre esses dois limites é denominado de frequência central (f_0), e obtém-se com a expressão 2.10. [1]

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

E a largura da banda (B) é então a diferença entre a frequência do limite superior e a frequência do limite inferior, como descrito na expressão 2.11.

$$B = f_2 - f_1 \quad (2.11)$$

Em acústica de edifícios, as medidas de bandas de frequência comumente usadas são as bandas de oitava e as bandas de 1/3 de oitava. No quadro 2.1, encontram-se os valores de frequência limite para as bandas tanto de oitava como de 1/3 de oitava e as frequências centrais de cada uma delas. [1]

Quadro 2.1- Valores de frequência limite para as bandas de 1/1 e de 1/3 de oitava e frequências centrais [6]

Frequência Central (Hz)	Banda de terços de oitava (Hz)	Bandas de oitava (Hz)
100	89,1-112	89,1-178
125	112-141	
160	141-178	
200	178-224	178-355
250	224-282	
315	282-355	
400	355-447	355-708
500	447-562	
630	562-708	
800	708-891	708-1410
1000	891-1120	
1250	1120-1410	
1600	1410-1780	1410-2820
2000	1780-2240	
2500	2240-2820	
3150	2820-3550	2820-5620
4000	3550-4470	
5000	4470-5620	

2.2.5. CURVAS DE PONDERAÇÃO

Assim como a discriminação de frequências é diferente entre altas e baixas frequências, também o é a percepção dos sons e ruídos a várias frequências. A sensibilidade auditiva varia ao longo da gama

de frequências presumivelmente detetáveis por um ouvido humano jovem. Para as mesmas intensidades sonoras, o ouvido é mais sensível para frequências na zona entre os 2300 e os 2800 Hz, e muito menos sensível para baixas frequências abaixo dos 125 Hz. Isto quer dizer que a audibilidade de um som ou ruído de alguma frequência também está dependente da intensidade sonora (fig. 2.8). [1]

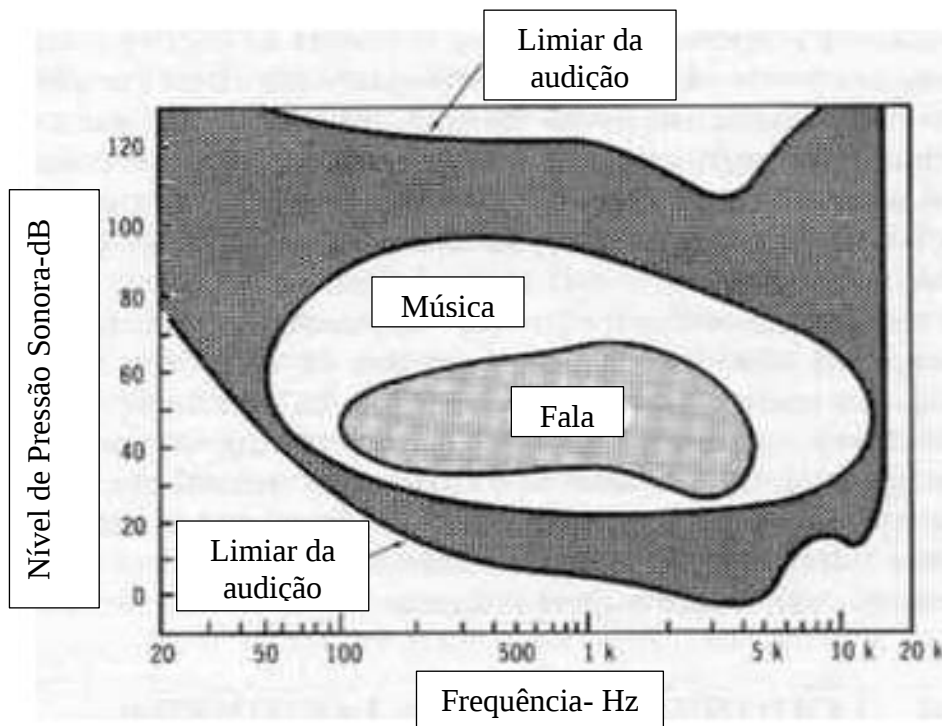


Figura 2.8- A audibilidade humana em função da intensidade sonora e da frequência [7]

No entanto, para efeitos de medição de pressão sonora, os aparelhos tecnológicos como microfones detetam com toda a fidelidade as variações reais para qualquer frequência, que não correspondem à forma como o nosso ouvido as interpreta. Então, estes parâmetros subjetivos da percepção de um som ou ruído devem ser programados para que possam rastrear a verdadeira percepção do som ou ruído que o ouvido humano poderá ter, através de filtros configurados por curvas de ponderação. [1]

As curvas de ponderação representadas na figura 2.9 são referentes às curvas de ponderação existentes entre a A e a D e traduzem graficamente como é que a sua aplicação faz variar o valor real do nível de pressão sonora emitido, representado pela linha reta a preto nos 0 dB. A curva de ponderação mais usada é a A (também denominada de Filtro A), que se aproxima mais fielmente à resposta humana aos ruídos de mais fraca intensidade.

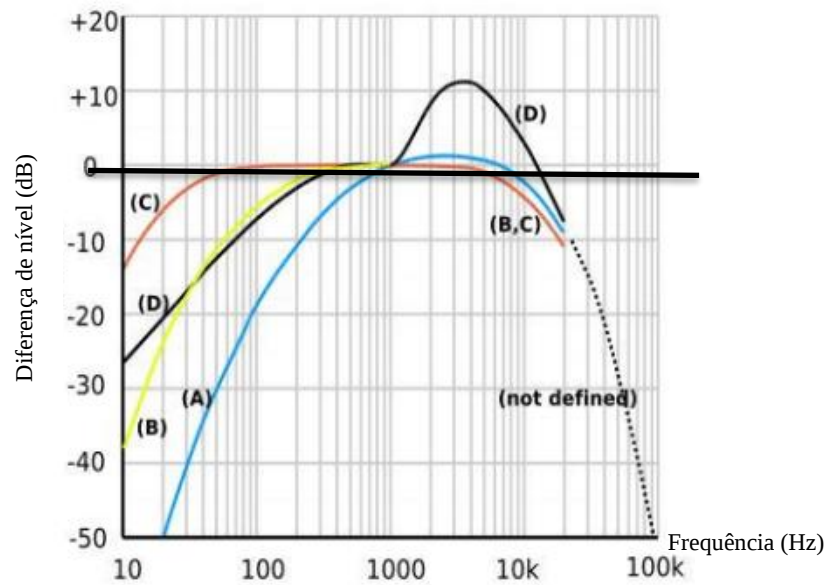


Figura 2.9- Descrição gráfica das curvas de ponderação A (azul), B (amarelo), C (vermelho) e D (preto) [8]

O quadro 2.2 apresenta a ponderação do filtro A por banda de frequência de terço de oitava e oitava.

Quadro 2.2- Ponderação do filtro A por banda de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava [1]

Banda de Frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 de oitava	Ponderação para 1/1 oitava	Banda de Frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 de oitava	Ponderação para 1/1 oitava
25	-44,7	-40	800	-0,8	0
31	39,7		1000	0	
40	-34,6		1250	0,6	
50	-30,2	-26	1600	1,0	+1
63	-26,2		2000	1,2	
80	-22,5		2500	1,3	
100	-19,1	-15,5	3150	1,2	+1
125	-16,1		4000	1,0	
160	-13,4		5000	0,5	
200	-10,9	-8,5	6300	-0,1	-1
250	-8,6		8000	-1,1	
315	-6,6		10000	-2,5	
400	-4,8	-3	12500	-4,3	-7
500	-3,2		16000	-6,6	
630	-1,9		20000	-9,3	

2.2.6. COMPRIMENTO DE ONDA

Por definição, o comprimento de onda (λ , em metros) é a distância que uma onda sonora percorre durante um ciclo de uma onda sonora periódica, que é igual à distância entre dois pontos de ondas periódicas adjacentes e que estão na mesma condição (ou de rarefação, ou de compressão). Pode ser relacionado com a frequência e com o período pela expressão 2.12. [1] [4]

$$\lambda = c \cdot T = c / f \quad (2.12)$$

Em que c é a celeridade em metros por segundo (m/s), T o período em segundos e f a frequência em hertz (Hz).

Na figura 2.10, encontra-se evidenciado, ilustrativamente, a que se refere a medição do comprimento de onda, aplicado ao caso da propagação sonora de um estímulo dado por um diapasão no ar.

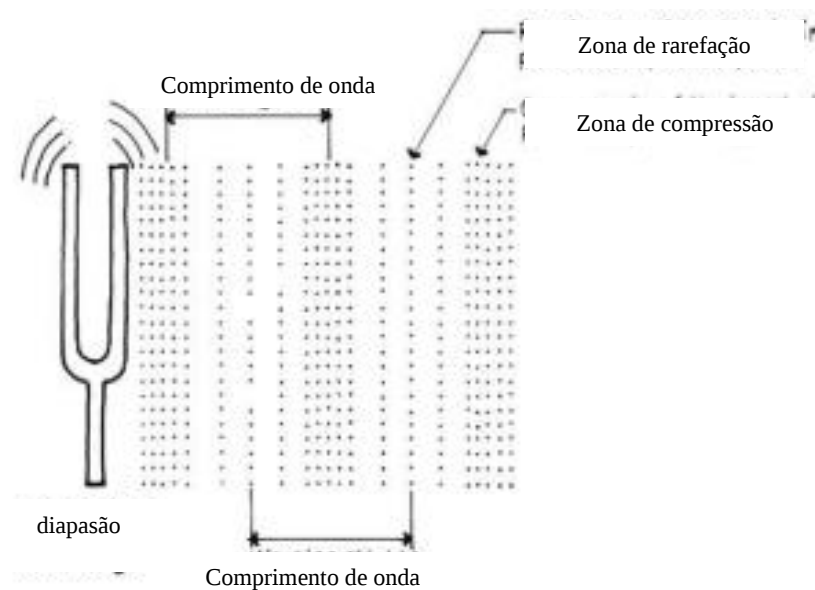


Figura 2.10- Comprimento de onda de um som de um diapasão (adaptado de [4])

A relação entre comprimento de onda e frequência é, então, inversamente proporcional, com constante de proporcionalidade da celeridade no ar a determinada temperatura e humidade. Quanto mais alta a frequência, menor o comprimento de onda, e quanto menor a frequência, maior o comprimento de onda. Na figura 2.11, encontra-se uma relação entre as duas grandezas, com valores típicos de frequência e comprimento de onda para vários sons, que nos permitem ter uma noção prática do que significam esses mesmos valores.

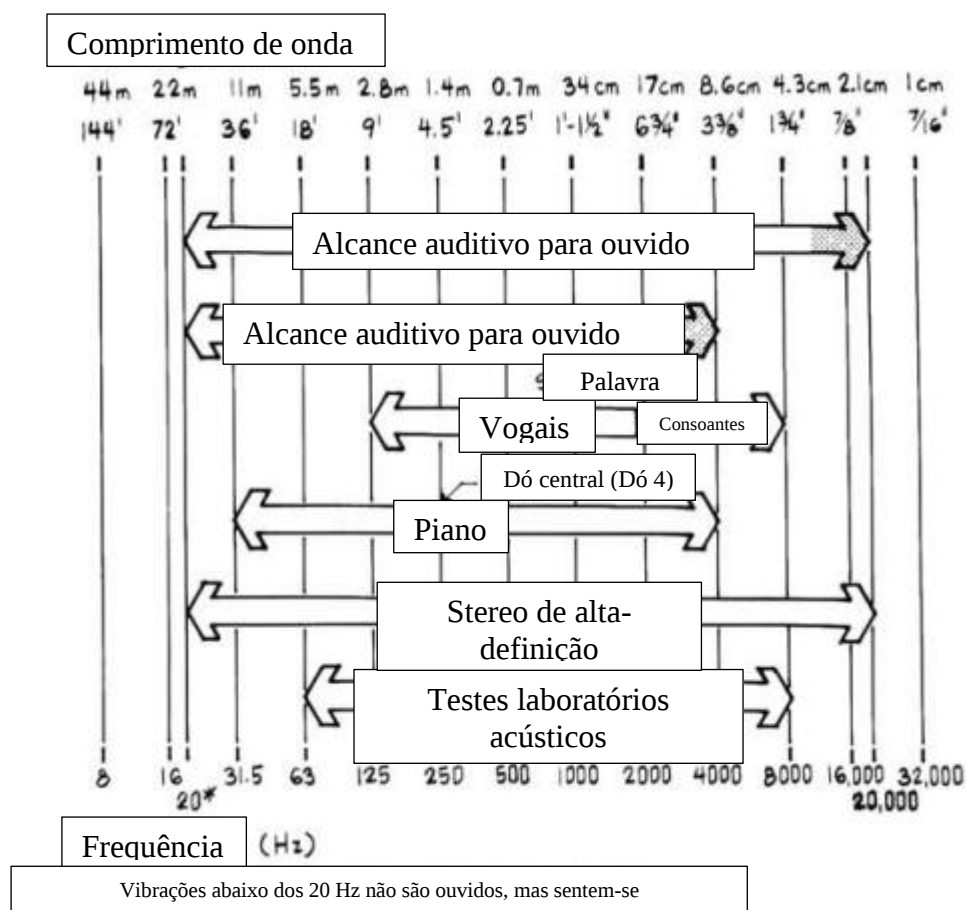


Figura 2.11- - Valores típicos de frequência e de comprimento de onda de vários sons distintos (adaptado de [4])

A influência do comprimento de onda reside no comportamento da onda sonora perante um obstáculo físico na direção da propagação da onda. Num primeiro caso, se o obstáculo tiver um comprimento maior que o comprimento de onda, é criada uma zona de sombra imediatamente após esse obstáculo; se o comprimento de onda for maior que o obstáculo, dá-se a propagação da onda sem influência do obstáculo. Num segundo caso, se o obstáculo tiver um orifício mais pequeno que a onda, dá-se a reorigem da onda sonora pelo orifício; se o orifício for maior que o comprimento de onda, não existe qualquer influência do obstáculo. [1]

2.2.7. ANÁLISE NO TEMPO

Um fator importante na caracterização de um ruído é a sua duração, que pode ser tanto instantânea (como o som de um disparo) como quase interminável (como uma queda de água). Uma vez que a duração de um ruído não é sempre a mesma, as suas características não são constantes ao longo do tempo e a sua permanência ou não têm afetações diferentes para quem convive com estes ruídos, é necessário recorrer a um mesmo parâmetro descritor estatístico ou energético para contornar esta instabilidade temporal. [1]

Assim, surge um parâmetro energético designado de “nível de pressão sonora contínuo equivalente” L_{eq} , que se define como o nível que atuasse contante num dado intervalo de tempo, produziria a mesma energia que a energia do som a avaliar. Pode-se calcular com a expressão 2.13.

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \quad (2.13)$$

Em que T corresponde ao período em segundos, p as diferenças de pressão e t o tempo de medição.

Os parâmetros estatísticos estão associados a quantis de densidade e de probabilidade, representados por L_N . Este parâmetro é definido como sendo o nível que num dado intervalo de tempo é excedido em $N\%$ da duração temporal desse intervalo. Apesar deste parâmetro ter existido para percentagens de N de 95% e de 50% na legislação portuguesa, caiu em desuso, após a substituição destes indicadores por outros vigentes do Regulamento Geral do Ruído e do Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios. [1]

2.3. CORREÇÃO ACÚSTICA

2.3.1 INTRODUÇÃO

Quando existe uma interação de ondas sonoras com superfícies, a energia que incide sobre elas é refletida (E_r), transmitida pela superfície (E_t) ou até absorvida pela mesma (E_a), dando-se o balanço de energias evidenciado na expressão 2.14.

$$E_i = E_r + E_t + E_a \quad (2.14)$$

Uma vez que se está a relevar apenas a correção acústica de uma sala, não vale a pena diferenciar a energia que é absorvida da que é transmitida, uma vez que da perspetiva da qualidade de som da sala, o efeito acústico prático incidente nessa conversão de energia para absorção ou em transmissão é o mesmo. [5]

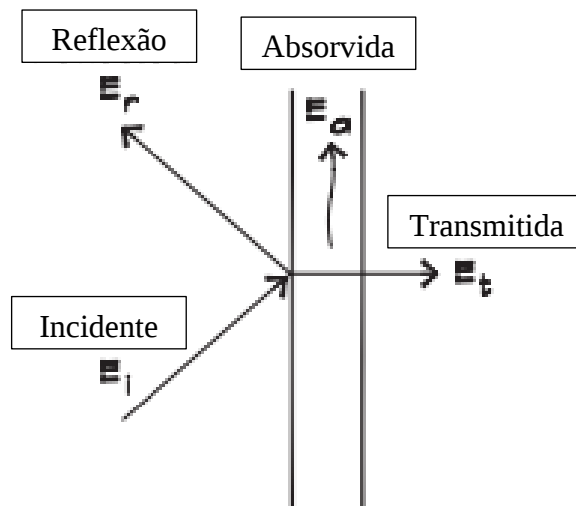


Figura 2.12- Interações das ondas sonoras com superfícies (adaptado de [5])

2.3.2. ABSORÇÃO SONORA

A absorção sonora é a propriedade que muitos materiais têm de converter a energia mecânica de uma onda sonora em qualquer outra modalidade de energia, que geralmente é térmica.

Em virtude do balanço de energias vigente no choque de uma onda sonora com uma superfície, podemos obter um coeficiente de absorção sonora (α) do material dessa superfície como a relação entre a energia sonora absorvida sobre a energia incidente, como evidenciado na expressão 2.15. [1]

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.15)$$

Este coeficiente de absorção sonora varia entre zero a um e representa a fração da porção de energia que não é refletida. Por exemplo, no caso de uma porta ou janela aberta de uma sala de espetáculos, o coeficiente de absorção é um, uma vez que, para efeitos práticos, a energia deixa de estar retida na sala e é totalmente transmitida para a vizinhança. [1]

O valor de α varia com o ângulo de incidência da onda sonora e com a sua frequência, o que significa que a disposição do material absorvente e a sua adequabilidade à absorção ou ao evitar de absorção de algumas frequências alvo deve ser tida em conta. [1]

Para referência de valores, os materiais ditos absorventes são aqueles cujos valores de coeficiente de absorção são superiores ou iguais a 0,5. [1]

Para a medição deste parâmetro de coeficiente de absorção sonora, existe dois métodos normalizados, que são o método de tubo de ondas estacionárias (ou tubo de Kundt) (ISO 10534-1) (fig. 2.13) e o método de câmara reverberante (NP EN ISSO 354) (fig. 2.14).

O primeiro método consiste num tubo metálico e longo, de 10 cm de diâmetro, no qual se coloca numa das extremidades uma pequena amostra circular de 5 cm de raio de material a ser analisado, para a qual se emite uma energia sonora conhecida de um altifalante colocado na outra extremidade do tubo. Pelo meio do altifalante, coloca-se também uma vareta metálica com um microfone na ponta, para se detetar as ondas estacionárias criadas pela interação da onda incidente na amostra com a onda refletida. É a forma desta onda que permite a determinação da absorção sonora do material. [1]

As limitações deste método passam pelo ângulo de incidência da onda emitida pelo altifalante, que é único e perpendicular à energia incidente na amostra, eliminando a perspetiva real de campo difuso de ondas, para obtenção real de um coeficiente de incidência difusa. [1]

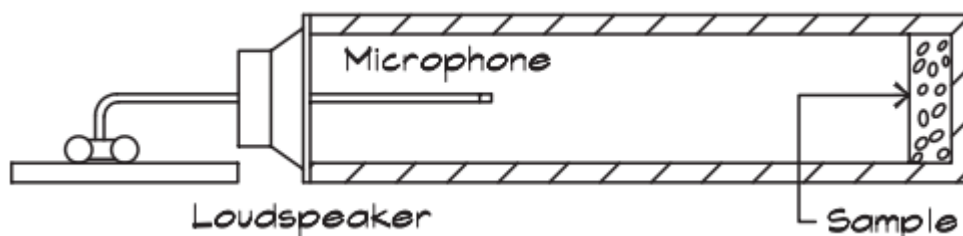


Figura 2.13- Ilustração representativa de um tubo de Kundt (adaptado de [5])

No entanto, o segundo método, da câmara reverberante, permite ter essa perspetiva. Neste caso, porém, a amostra tem de ser de 10 a 12 m², que é uma dimensão relativamente grande e dispendiosa. Este método consiste na colocação da amostra no chão de numa sala com paredes de coeficiente de absorção quase nulo e de campo sonoro bastante difuso, na qual se emite um som e se mede o tempo de reverberação, comparando-o com o tempo de reverberação da sala vazia. Por vezes, os coeficientes de absorção obtidos são superiores a 1,0, o que significa que ocorreu um fenómeno de difração das ondas sonoras nos bordos das amostras, que as fazem parecer maiores e influenciam os valores do coeficiente de absorção sonora. Nestes casos, deve-se assumir o valor máximo de coeficiente de absorção, de 1,0, principalmente em ambientes de projeto. [1]



Figura 2.14- Fotografia de uma câmara de reverberação [9]

2.3.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

As ondas sonoras dentro de um compartimento no qual esteja uma fonte sonora em funcionamento chegam a um recetor quer por via direta, quer por via indireta. As ondas diretas são aquelas que chegam ao recetor em linha reta desde a fonte sonora. Por via indireta, o recetor deteta sons refletidos, que atingem o ouvido depois de uma ou múltiplas reflexões em superfícies do compartimento em questão. Após a emissão da onda direta, as reflexões dos sons refletidos continuam sucessivamente a atingir o ouvido do recetor, até a onda sonora se dissipar tanto pela absorção das superfícies sonoras como na absorção do ar. [1]

Ao intervalo de tempo em que ocorre este processo de dissipação do som, dá-se o nome de tempo de reverberação. Fisicamente falando, é o intervalo de tempo em que o nível de pressão sonora decai 60 dB desde que a fonte sonora cessa de emitir o estímulo sonoro (T_{60}). [1]

Uma vez que a ausência de ruído de fundo é, em condições práticas, uma problemática na leitura de um decaimento de 60 dB, pois é perto de impossível de se obter, podendo mascarar a real leitura do rastro sonoro, foram concebidos também os parâmetros de T_{30} e T_{20} , que representam o intervalo de tempo no qual se dá o decaimento do nível de pressão sonora em 30 dB e 20 dB, respetivamente, extrapolando-se matematicamente o valor de T_{60} . [1]

2.3.4. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS

Os materiais absorventes sonoros atuam de forma diferente para as várias gamas distintas de frequências. Uma vez que na Acústica de Edifícios distinguem-se três tipos de frequências (altas, médias e baixas frequências), também os materiais e sistemas absorventes sonoros podem agrupar-se nessas três categorias diferentes.

A primeira categoria é a de materiais porosos e fibrosos, mais vocacionada para a absorção de altas frequências. O mecanismo deste tipo de absorventes com poros e interstícios baseia-se na dissipação da energia da onda sonora incidente pela vibração, resistência e fricção das fibras, convertendo a energia sonora em térmica. Isto quer dizer que os poros e interstícios têm de ser de tal dimensão, que permitam a vibração das fibras e, ao mesmo tempo, a resistência à vibração. Portanto, as fibras e poros não podem estar muito juntas, para permitirem a entrada de ar, mas ao mesmo tempo, não podem estar muito distendidas, a fim de oferecerem alguma resistência à vibração. São exemplos destes absorventes os tecidos e alcatifas, aglomerados de cortiça (fig. 2.16) e, com aplicação no presente trabalho, lãs e outras fibras minerais (como lã de rocha da fig.2.15). [1]



Figura 2.15 e 2.16- Lã de Rocha (esq.) e aglomerados de cortiça (dir.) [10]

A segunda categoria é a de ressoadores de cavidade, e é aplicável à absorção de médias frequências. Estes ressoadores são uma tecnologia acústica que se baseia numa cavidade de paredes rígidas com uma única entrada estreita de passagem de ar conectada ao volume de ar preso na cavidade. A cavidade pode ter várias formas, mas a mais usual é a em forma de garrafa. Ao incidir uma onda sonora, o ar entra e sai do gargalo repetidamente e o ar dentro do ressoador entra em ressonância, dissipando a vibração sob a forma de energia mecânica. A frequência de ressonância depende do volume do ressoador e poder-se-á acrescentar outras frequências alvo, colocando absorventes sonoros também dentro da cavidade (perdendo-se, no entanto, amplitude de absorção). [1]



Figura 2.17 e 2.18- Ressoadores de Helmholtz [10]

A terceira categoria é a das membranas, que atuam com mais impacto nas baixas frequências. As membranas absorvem as ondas sonoras pela vibração de toda a estrutura, dissipando a energia

sonora em energia mecânica. Além disso, as próprias fibras das membranas oferecem resistência à energia sonora, pela flexão da membrana, dissipando a energia em energia térmica. [1]

Estas tecnologias de absorção complementam-se, dependendo das intenções sobre o tempo de reverberação da sala desejado e outros parâmetros de qualidade da sala. As salas de espetáculo são o instrumento por excelência, que promovem a realização das mais diversas atividades, expressões artísticas e /ou eventos com as mais diversas necessidades acústicas e, por isso, requerem as mais diversas soluções acústicas de configurações de sistemas de absorção sonoros. Este tipo de configurações pode, inclusivamente, variar na mesma sala, ao incluir na sala dispositivos de acústica variável, permitindo variar as configurações acústicas. [1]

2.3.5. CAMPO SONORO

Após a ocorrência de um estímulo sonoro inicial de uma fonte sonora dentro de um compartimento aberto e livre e em qualquer ponto deste espaço, a leitura de valores de nível de pressão sonora perceptível sofre influências da sobreposição dos campos sonoros direto (com origem nas ondas diretas a partir da fonte sonora) e reverberado (com origem nas ondas refletidas). [1]

Em diferentes áreas do compartimento, existe preponderância do campo direto sobre o campo reverberado e vice-versa noutras áreas distintas. Quanto mais próxima da fonte sonora, maior a sobreposição do campo direto sobre o campo indireto. O campo indireto depende da absorção sonora das superfícies do compartimento. A expressão 2.16 descreve o nível de intensidade sonora perceptível em função da soma da potência sonora do estímulo sonoro emitido, com os valores das parcelas de valores de cada um dos campos. [1]

$$L_I = L_w + 10 \log\left(\frac{Q}{4\pi \times r^2} + \frac{4}{R}\right) \quad (2.16)$$

Em que L_I representa o nível de intensidade sonora perceptível em dB, L_w a potência sonora em dB, Q o coeficiente de direccionalidade da fonte sonora (=1 se omnidirecional e 2 se junto a uma parede), r a distância entre a fonte sonora e o ouvinte em metros e R a constante R do local em m². [1]

Quando o campo sonoro constitui um ruído para as salas, poder-se-á aplicar dois tipos de medidas para a mitigação desta problemática [1]:

- No campo direto, diminuindo a direccionalidade (afastar de superfícies refletoras tanto quanto possível) ou colocando ecrãs grandes o suficiente para a criação de bloqueio do campo direto;
- No campo reverberado, através da colocação de absorventes sonoros nas superfícies de reflexão, diminuindo o R .

2.4. ISOLAMENTO SONORO

2.4.1 RUÍDOS DE PERCUSSÃO, AÉREOS E TRANSMISSÃO POR VIA DIRETA OU MARGINAL

Para o eficaz tratamento do isolamento sonoro, é necessário distinguir dois tipos de ruídos (fig. 2.19), de várias origens: [1]

- Ruídos de percussão, em que há solicitação mecânica direta da fonte de irradiação sonora sobre os elementos estruturais da construção
- Ruídos de condução aérea, com propagação e transmissão feita exclusivamente pela vibração do ar.

Em geral, uma vez que o ruído se propaga mais rápido num meio sólido, como o plano estrutural de uma construção, do que no ar, os ruídos de percussão têm uma maior capacidade de se propagarem por todo o edifício. [1]

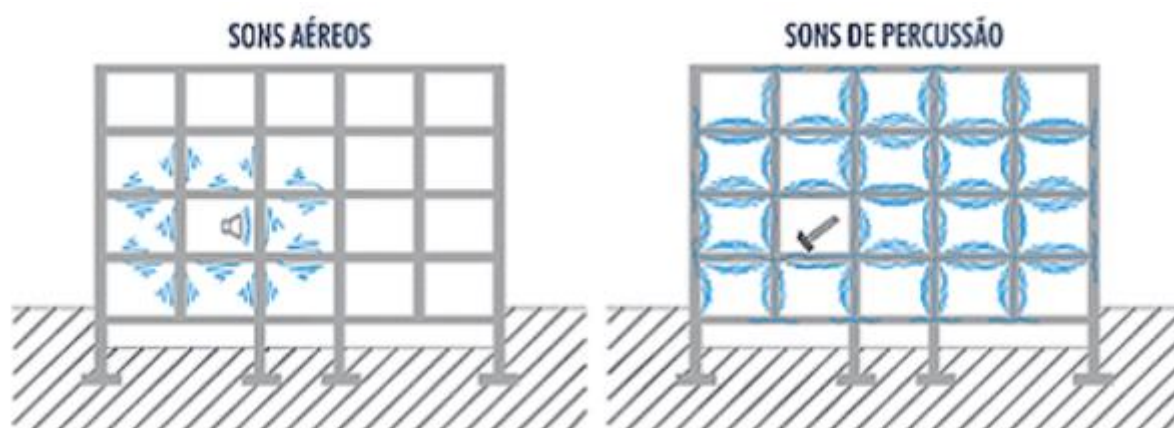


Figura 2.19 - Transmissão de ruído aéreo (esq.) e de percussão (dir.) [11]

Além disso, a transmissão de cada um destes tipos de ruídos pode ocorrer por via direta, ou por via marginal. As transmissões por via direta são aquelas cuja transição de uma divisão de um edifício para outra se faz nos elementos de separação comuns aos dois espaços. As por via marginal ocorrem através de elementos de separação não comuns, mas comunicantes pela envolvente (fig. 2.20). [1]

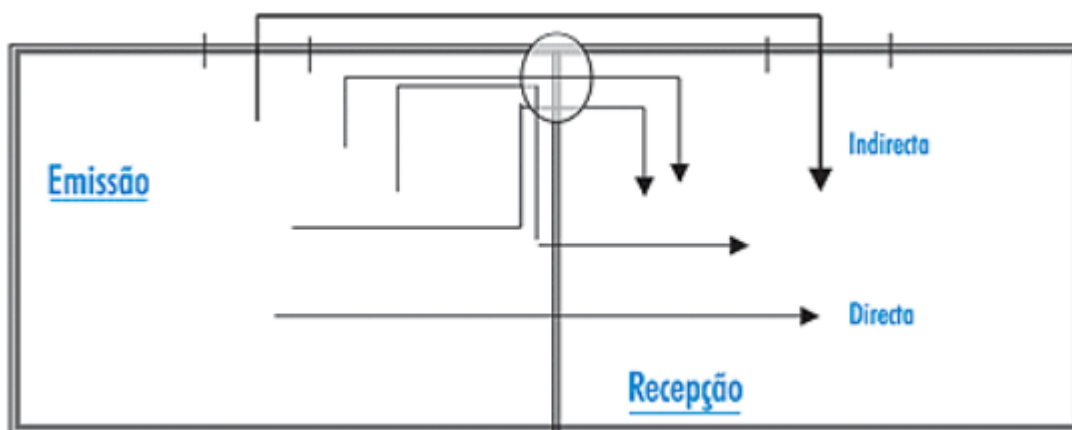


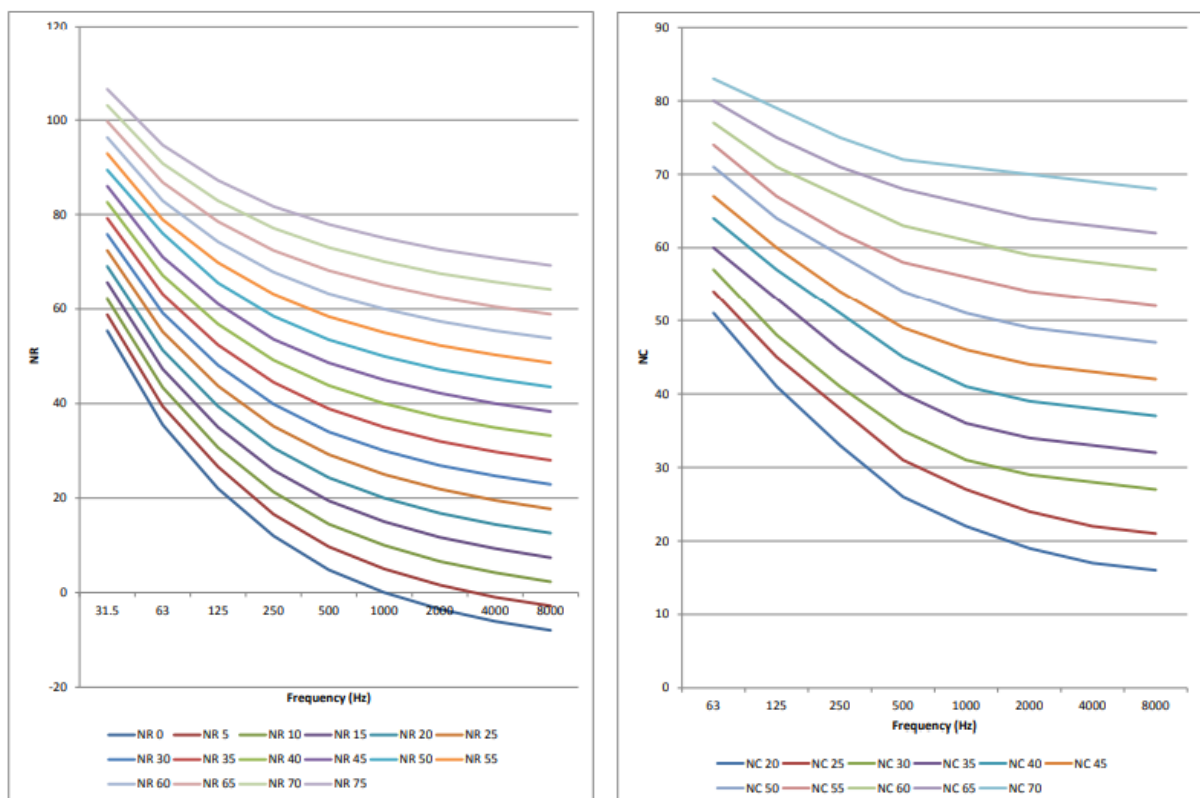
Figura 2.20- Transmissão de ruído por via direta e marginal/indireta [12]

2.4.2 CURVAS DE INCOMODIDADE NOISE CRITERIA (NC) E NOISE RATING (NR)

O ruído de fundo provocado por equipamentos pode ser a problemática pela qual o propósito de salas, como teatro, auditório, salas de concerto, estúdios de gravação, salas de conferências, entre outros, seja desaproveitado para o dimensionamento feito. Nesse sentido, a incomodidade de ruído de fundo deve ser mantida sob controlo, para proteção da integridade do propósito da sala. [1]

Assim, as curvas de incomodidade (NC, NR, RC, NCB e outras) são desenvolvidas como método de avaliação deste parâmetro de ruído de fundo de equipamentos da sala. O procedimento de avaliação baseia-se na medição do ruído de fundo consequente ao funcionamento dos equipamentos integrados no espaço (geralmente sistemas AVAC) nos pontos mais ruidosos da sala, à altura média dos ouvidos de um auditor. Este tipo de ruídos deve ser contínuo e estável, excluindo-se valores de ruído causados pela plateia e outros agentes de poluição sonora. [1]

As curvas NC e NR (fig. 2.21) são determinadas de forma idêntica. Através da disposição gráfica das curvas de NC e de NR para um dado espectro sonoro, e da sobreposição destas com a representação gráfica dos valores níveis de ruído de fundo equivalente da sala, é possível determinar o índice NC e NR com o método da tangente. Assim, esse valor é equivalente ao menor valor de NC ou de NR que a curva de valores de níveis de ruído de fundo ultrapasse. [1]



Figuras 2.21 e 2.22- Curvas NR (esq.) e NC (dir.) [13]

2.5. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

2.5.1 PARÂMETROS DE MEDIDA

Existe dois tipos de parâmetros de medida da qualidade da inteligibilidade da palavra: subjetivos e objetivos.

No que toca aos parâmetros subjetivos, o PB (Phonetically Balanced words) e o MRT (Modified Rhyming Tests), estes baseiam-se na leitura de frases e/ou palavras a um grande número de auditores, que as escrevem tal como as ouvem. O grau de acerto é proporcional à inteligibilidade nessa sala.

No que diz respeito aos testes objetivos, são englobados os seguintes:

- AC (Articulation Class) e AI (Articulation Index) são dois parâmetros de medida bastante semelhantes, na forma de cálculo. A avaliação da inteligibilidade da palavra por este método baseia-se na diferença entre o nível de conversação de referência (nc) e o ruído de fundo (rf) no local, ponderado pelo peso de cada banda de frequências, dependendo da importância destas para a percepção da palavra. [1] No entanto, a origem do parâmetro de AI é distinta do parâmetro AC. O parâmetro AI, originalmente, era usado para a medição de privacidade da palavra e da eficácia de sistemas de comunicação. [14] O AC por sua vez, também é usado para propósitos mais concretos, entre eles a avaliação da eficácia de materiais acústicos na atenuação do ruído para a proteção de uma boa qualidade de inteligibilidade da palavra. [15]

- O SIL (Speech Interference Level) define-se como a média aritmética dos níveis de pressão sonora dos ruídos de fundo em cada uma das bandas de oitava dos 500 aos 2000 Hz.

- O RASTI (Rapid Speech Transmission Index) consiste num parâmetro de medição da qualidade da inteligibilidade da palavra mais simplificado que o STI (Speech Transmission Index). Varia entre valores de zero (nula inteligibilidade) a um (excelente inteligibilidade), e é medido com a redução da modulação do sinal que ocorre entre a emissão de um sinal modelado por uma fonte sonora e da receção do som com um equipamento recetor. A qualidade mínima para este parâmetro é de 0,50. [16]

3

ESTADO DA ARTE

3.1. ENQUADRAMENTO DA RELAÇÃO ACÚSTICA ENTRE A EXPRESSÃO DAS ARTES E O MEIO DE EXPRESSÃO

O desenvolvimento das questões acústicas na exposição da arte musical, dramática ou de outro tipo de discurso público, esteve sempre vinculada às necessidades inerentes ao meio em que se dava a expressão destas. Para diferentes propósitos, públicos, quantidades de pessoas ou condições, a relação artes *versus* ambiente no qual estas eram expressas fomentava ou limitava uma e outra, numa relação codependente. [5]

Por exemplo, a música e dança africanas, que eram expressas ao ar livre, foram influenciadas por um baixo tempo de reverberação e por uma secura acústica próprias de zonas exteriores a edifícios. Perante esta condicionante, estas artes são muito mais ritmadas que as artes europeias, a fim de evitar momentos de silêncio indesejados. A música europeia usufruiu de meios de expressão acusticamente mais permissivos à existência de sons longos e demorados, suspensões e outros recursos estilísticos que definem uma evolução completamente paralela desta arte em relação à evolução africana. Desde o uso de grutas (na pré-história), à construção de templos, igrejas (no período gótico, renascentista e barroco) e edifícios como palácios (no período renascentista e barroco) cada vez mais reverberantes, o modo e o ambiente de vida da sociedade influenciaram profundamente, na sua contemporaneidade, as evoluções artísticas das várias regiões do mundo. [5] [17]

A relação artes *versus* ambiente, sem tecnologia que a influencie, tende sempre para as condicionantes do meio. No entanto, o desenvolvimento do conhecimento e preocupação acústicos tornou possível uma coexistência harmoniosa do ambiente e das artes, num comprometimento da própria construção de um palco dedicado a dada arte e da composição de uma peça musical, dramática ou de discurso adaptadas ao espaço. [5]

Na história, vários filósofos gregos abordaram os assuntos básicos da acústica, como é o caso de Pitágoras em relação à música (na teorização da proporção de divisão de cordas esticadas para a obtenção de notas musicais apazíveis ao ouvido humano, dispostas matematicamente numa gama de frequências à qual o ouvido humano era sensível, e que constitui a essência do funcionamento dos cordofones; entre outros conceitos) e o de Platão (na teorização do estímulo sentimental e sensorial que a disposição de intervalos de notas em determinados ritmos provocavam a um indivíduo e de que forma podia ser aplicado; entre outros conceitos). No entanto, entre 50 a 25 a.C., já Marcus Vitruvius Pollio, arquiteto romano, abordava a problemática da acústica em edifícios no seu documento *Architectura*, no qual teorizava sobre a interferência entre ondas sonoras, reverberação, eco e inteligibilidade da palavra. Muito mais tarde, apenas Sabine dispôs a problemática da acústica de edifícios como extensão do instrumento interpretado numa determinada sala com o propósito da expressão artística ou científica, globalizando os assuntos acústicos como se conhecem hoje. [1] [5] [17]

3.2. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO DO TEATRO

Os primeiros indícios da preocupação acústica de alguns espaços dedicados ao teatro, ou drama ou tragédia gregas são os registos arqueológicos de teatros gregos (e depois, romanos). A figura 3.1 mostra a estrutura característica de um teatro grego. [18]

Estes primeiros indícios poderão ter tido origem na organização política da região, que, pela sua democratização e organização da sociedade através de reuniões na *polis*, levantou questões na necessidade de passar uma mesma informação ou forma de arte a um número cada vez maior de pessoas. [19]

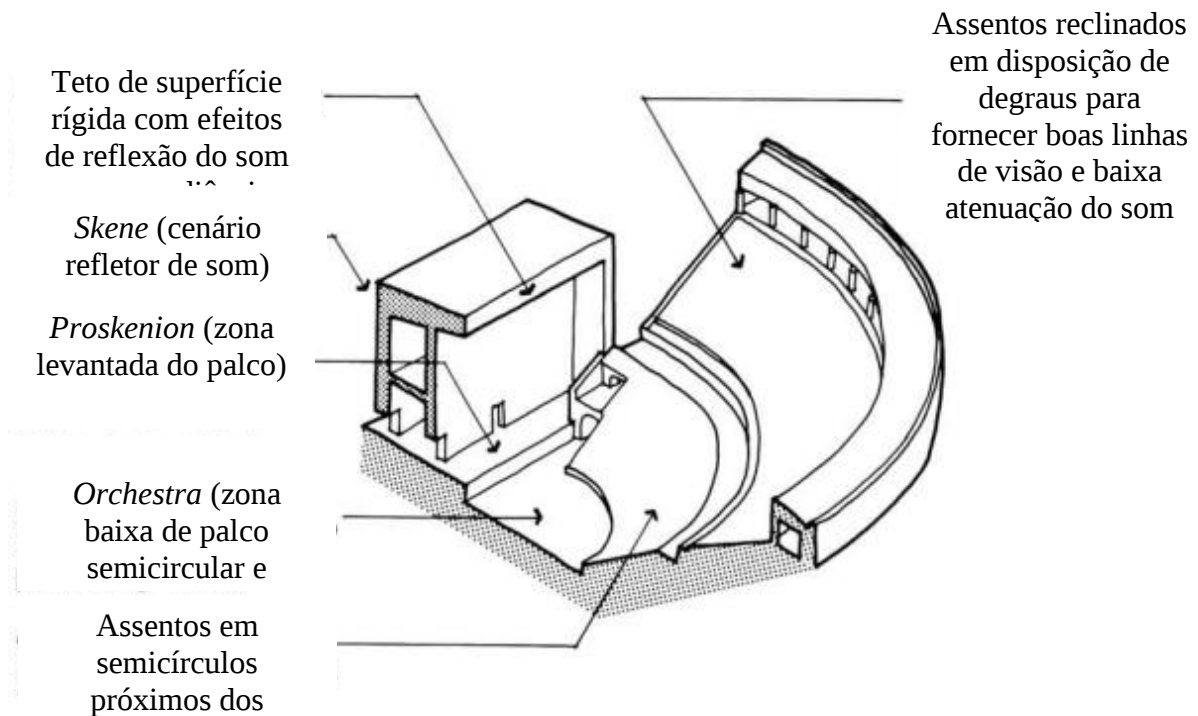


Figura 3.1- Estrutura característica de um teatro grego a céu aberto (adaptado de [4])

Os teatros a céu aberto são, cronologicamente, os pontos de começo de coexistência entre a Arquitetura, a Acústica, o ato Teatral e a Música e o mais velho testemunho da construção de edifícios com o propósito da expressão artística para grandes audiências. Geralmente, este tipo de edifícios podia albergar cerca de 17000 pessoas (para anfiteatros). [18]

Usualmente, uma vez que estes edifícios se encontravam a céu aberto, os teatros gregos localizavam-se principalmente em zonas não urbanas e de pouco movimento, com pouco vento ou pouco exposto a este, de modo a evitar ruídos de fundo prejudiciais à propagação do som que, na antiguidade, não tinha qualquer amplificação, senão o artifício acústico das próprias máscaras dos artistas em forma de megafone. Além disso, estes edifícios eram dispostos em encostas de zonas mais montanhosas, características das regiões da Grécia. Este tipo de encosta permitia a alocação de uma plateia, denominada de *koilon* (em latim, *cavea*), com uma área em forma de cone truncado sulcada em degraus reclinados. A disposição de lugares era, então, semicircular, para que a audiência tivesse a possibilidade de estar mais próxima do palco, reduzindo a perda de intensidade sonora desde o intérprete ao ouvinte. Além disso, permitia a visão sem obstáculo do que estaria a acontecer na zona plana e rasteira do palco, denominada de *orchestra*, e também no palco elevado, denominado de *proskenion*. Para a difusão adequada do som, existem várias noções arquitetónicas

que eram incorporadas na prática de forma inata. Tanto a colocação de uma *skene* (um cenário edificado que permitia a reflexão do som para a plateia, que também servia de camarim e que muitas vezes tinha um teto que ainda contribuía mais para o efeito de difusão da reflexão sonora) como a colocação dos lugares reclinados e a inclinação forte da *koilon*, permitem que a difusão do som seja mais eficaz para toda a plateia e com uma intensidade sonora adequada para a perceptibilidade da expressão artística. A figura 3.2 mostra como as reflexões podiam ocorrer, dependendo da posição do intérprete. [4] [18]

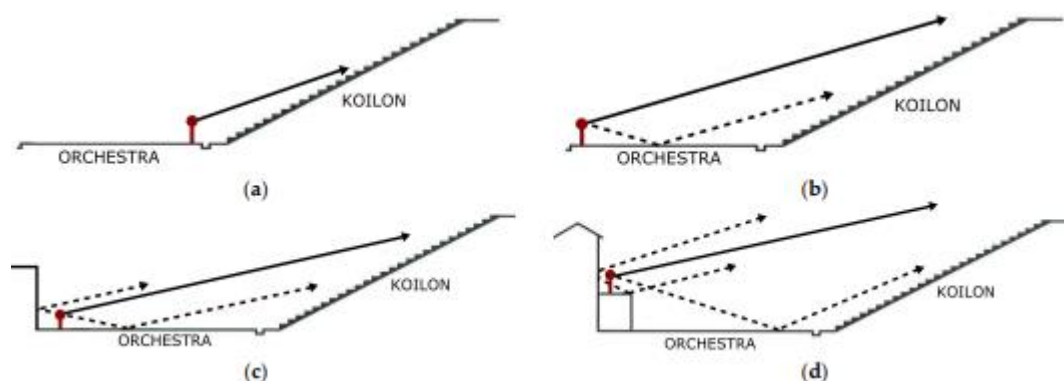


Figura 3.2-Representação esquemática do som direto (linha cheia) e do som refletido (tracejado), dependendo da posição do intérprete: (a) mais próximo da plateia; (b) mais longe da plateia; (c) mais próximo da skene; (d) no palco erguido [19]

Com o passar do tempo, entre o período grego e o romano, aumentou a necessidade de acolher cada vez mais gente que procurava, ativamente, um espetáculo de arte. Esta ideia era inclusivamente fomentada, pelo conceito filosófico da manutenção da sociedade romana de “pão e circo”. Nesse sentido, embora mantendo sempre a estrutura de génese, o teatro aumentou a sua dimensão, fenómeno retratado na figura 3.3. [17] [18]

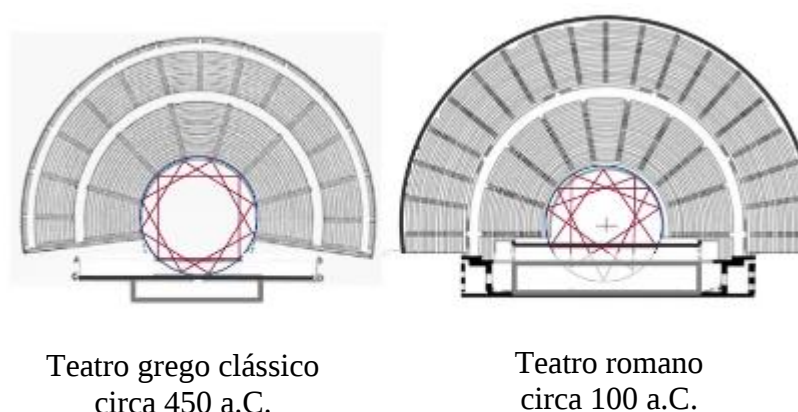
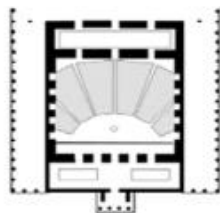


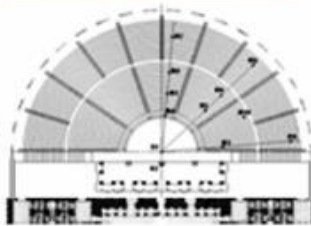
Figura 3.3- Evolução da estrutura dos teatros gregos a céu aberto, com as linhas vermelhas a descrever o princípio arquitetónico de Vitruvius sobre a orchestra de um teatro [18]

Apesar do desenvolvimento deste tipo de teatros, também na Antiguidade se desenvolveu o conceito de odeon, edifício que seguia a disposição de um teatro, mas com um teto, ganhando, naturalmente, outras características de ressonância que seriam mais apropriadas para música do que para teatro,

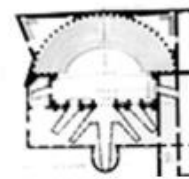
podendo afetar a inteligibilidade da palavra. A figura 3.4 evidencia algumas dessas estruturas, que depois se prolongaram para a época da Renascença. [18]



Odeon greco-romano
circa 15 a.C.



Odeon greco-romano
circa 160 d.C.



Odeon italiano da Renascença
circa 1500 a.C.

Figura 3.4- Evolução da estrutura das odeia de 15 a.C. à Renascença (adaptado de [18])

Mas o desafio arquitetónico e de Engenharia de fazer um espaço coberto cuja principal vocação fosse a inteligibilidade da palavra manteve-se. Mesmo com a inserção da Igreja Católica na vida da sociedade europeia, que, através dos mosteiros, eram a salvaguarda de segurança do conhecimento de até então, esta vertente acústica não foi muito desenvolvida.

Ao invés, eram construídos edifícios dedicados à igreja, de monumentais proporções e adornos que revelavam um exímio trabalho da pedra e alvenaria, mas cujos materiais eram, acusticamente, altamente refletivos. A partir disto, obtinha-se valores de tempo de reverberação elevados, que prejudicavam a inteligibilidade da palavra. Apesar disso e sendo as cerimónias maioritariamente em latim pouco perceptíveis ao comum leigo, o intuito destas salas era mais o de uma passagem de uma sensação transcendente na interpretação da música sacra, como o Papa Gregório I a tinha delineado, mesmo que a peça só se tratasse de uma linha monódica (de 1 som de cada vez). A sobreposição de sons era, então, procurada. [5]

No entanto, a partir da Renascença, a definição de uma arte separada da arte sacra levou à refinação de outras hipóteses de salas separadas da Igreja. Também no teatro se introduziu arte nova, mas sempre com os valores clássicos da Antiguidade Grega (como foi característico deste período). O tipo de salas de teatro também manteve os princípios de proporção e de simetria patentes nos teatros clássicos greco-romanos. Mantinham uma zona de orchestra e de proskenium, com mais noções artísticas de perspetiva. A figura 3.5. revela o Teatro Olímpico de Vicenza, com uma disposição da plateia em forma semi-elíptica. A figura 3.6 revela um teatro com proporções semelhantes, mas com disposição da plateia em U. Trata-se do teatro Sabbioneta, em Itália. [5]

Em Inglaterra, a apresentação de teatros estava ao cargo de companhias ambulantes que montavam o palco em zonas de galerias, sem cenário ou cortina e ao ar livre, o que permitia um uso adequado

da acústica por reflexões nas paredes das galerias e pelo controlo natural da reverberação do fator ar livre. [5]

No período barroco, a construção dos teatros começou a assemelhar-se à disposição mais moderna dos elementos do teatro. O investimento na arte em Itália foi realmente notável, derivada da resolução social de classe alta de frequentar o teatro ou a ópera italiana. Como o interesse foi maior, assim também foi a procura por estes eventos e, conseqüentemente, colocou-se o desafio de fazer salas de teatro adequadas a um maior número de pessoas ao mesmo tempo. [5]

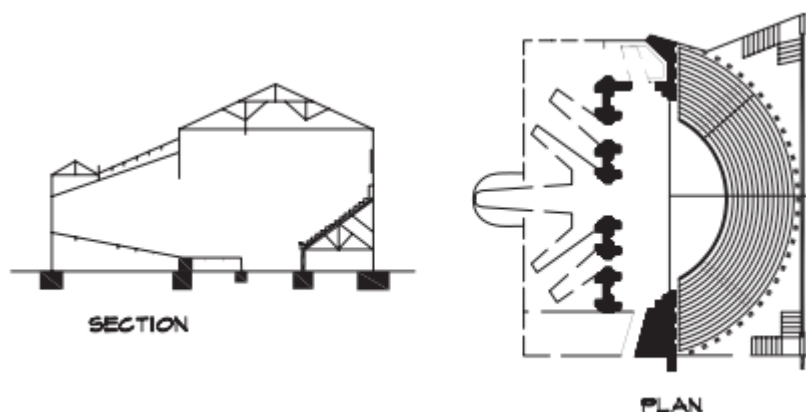


Figura 3.5- Teatro Olímpico, Vicenza, Itália [5]

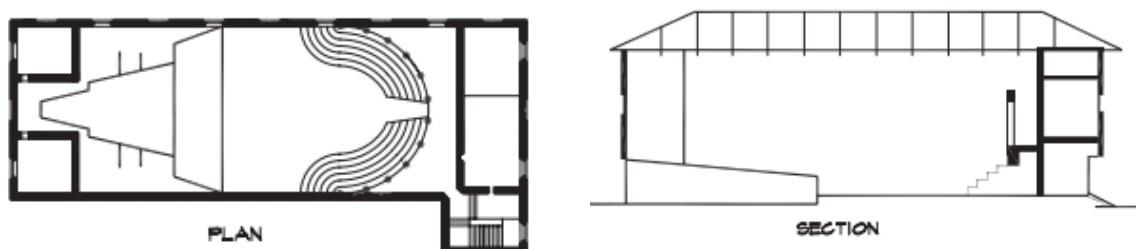


Figura 3.6- Teatro Sabbioneta, Itália [5]

A figura 3.7 fornece uma noção visual de um teatro do período barroco. Neste caso, o Teatro Farnese, Parma, Itália.



Figura 3.7- Teatro Farnese, Parma, Itália [5]

3.3. TEATROS

3.3.1. TEATROS E AS SUAS EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS

Apenas no século XIX se deu a conciliação teórica da arquitetura com a acústica. Apesar desta ideologia não ser propriamente contemporânea, a acústica passou a ter um papel preponderante, estudado e específico para cada propósito de sala. [5] Ou seja, mesmo não sacrificando o papel estético da arquitetura, é possível potencializar a funcionalidade de uma determinada sala de espetáculos, desde que nela se respeitem três condições: os sons têm de ser suficientemente intensos para toda a plateia; as componentes simultâneas de um som complexo devem manter as suas intensidades relativas; os sons sucessivos e/ou em rápida articulação, quer da palavra, quer da música, devem ser claros e livres uns dos outros e de eventuais ruídos de fundo. E assim, se foi consolidando estruturas normais de salas de espetáculos que conciliassem todas essas exigências. Entre eles o nosso caso de estudo: o teatro. [20]

Os palcos para teatro mais básicos são o palco prosccénio, o palco aberto e o palco de arena (fig.3.8):

- O palco prosccénio consiste num palco cercado por uma cúpula, que abre para o público como um quadro. Este palco inclui uma pequena extensão para fora da zona delimitada pela boca de cena, denominada de prosccénio.
- O palco aberto, consiste num palco cuja área de atuação se estende para a área da plateia.
- O palco de arena consiste num palco com uma área de atuação completamente cercada pela plateia. [5]

No caso do teatro, a inteligibilidade da palavra deve ser o ponto fulcral de análise e de cuidado.

Nesse sentido, apesar de poderem ser necessários para vários tipos de teatro, a incorporação de dispositivos acústicos de reflexão e difusão nas paredes da sala e no teto (incluindo painéis suspensos) de teatros com palco de arena ou palco aberto é muito importante, para compensar a característica de uma maior direccionalidade do som de altas frequências da voz humana do que de baixas frequências. Esta característica da voz dos intérpretes tem como consequência a menor radiação de altas frequências para trás do intérprete a proferir a palavra, do que à frente deste (cerca de menos 10-20 dB). De notar que as altas frequências emitidas pela voz humana são muito importantes para a promoção de uma boa qualidade da inteligibilidade da palavra, uma vez que é nesta gama de frequências que se emite o som das consoantes, que são os elementos de definição das palavras. [1] [5]

Marshall Long [5] coloca seis condições fundamentais para a conceção do projeto de auditórios ou salas dedicadas à palavra:

- nível de intensidade sonora adequado;
- nível sonoro relativamente uniforme ao longo de toda a sala;
- tempo de reverberação adequado à inteligibilidade da palavra;
- a diferença sinal-ruído deve ser alta;
- os níveis de ruído de fundo devem ser baixos o suficiente para não prejudicar a inteligibilidade da palavra;
- a sala deve estar livre de defeitos acústicos perfeitamente evitáveis, como reflexões atrasadas, flutter ecos, ressonância e outros.

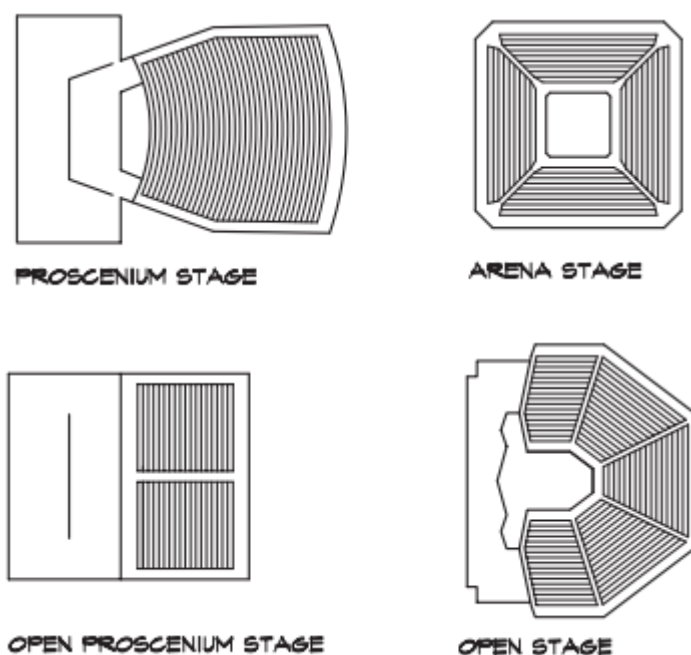


Figura 3.8- Várias estruturas básicas de palco de um teatro [5]

3.3.2. INTENSIDADE ADEQUADA E NÍVEL SONORO UNIFORME

Em salas sem amplificação ou outro artifício acústico eletrônico, deve haver uma grande zona de contacto direto, em que as ondas sonoras se propaguem diretamente para o espetador. Além disso, a distância entre um espectador e a zona do palco/fonte sonora não deve ser muito grande.

A colocação dos assentos abaixo da linha do palco, numa disposição circular e ascendendo os assentos à medida do aumento da sua distância à linha do palco, pode conferir menor distância à fonte sonora e maior campo de visão direto. Além disso, como complemento, o uso das reflexões, principalmente do teto, podem promover a difusão do som por toda a sala. O uso de balcões acima da plateia perto do palco pode também contribuir para a redução da distância entre orador e espectador e para o aumento de assentos disponíveis com boa visibilidade e intensidade sonora ainda adequada.

A colocação de superfícies refletoras em posições calculadas pode promover a reflexão do som das frequências de interesse para todos os pontos da sala, sem que o tempo de atraso da reflexão seja maior que trinta a cinquenta milissegundos. Estas superfícies podem ser colocadas nas paredes e teto, a fim de se dispersar o som por todos os lugares da plateia, sem haver pontos de foco. São exemplos os refletores de teto segmentado ou de teto socalcado, na figura 3.9.

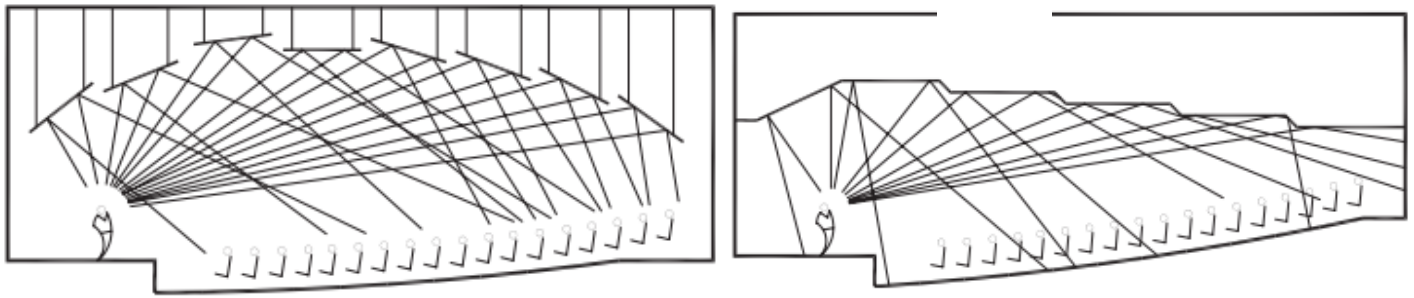


Figura 3.9- Reflexão do som na superfície de um teto segmentado (esq.) e socalcado (dir.) [5]

Estas superfícies refletoras podem promover uma difusão das ondas, dependendo das características da superfície. Normalmente, associa-se outros dispositivos que permitem a reflexão e difusão das ondas sonoras, distribuindo-as pelo espaço, como é o caso das canópias e das conchas acústicas. A aplicação destes refletores em auditórios permite aumentar a perceção da espacialidade e envolvimento da sala, evita fenómenos de enfatização de algumas frequências em detrimento de outras de interesse e pode melhorar a inteligibilidade da palavra ao longo da sala, ou as condições acústicas para usufruto de eventos musicais.

As conchas acústicas (fig. 3.10) são superfícies refletoras, geralmente constituídas por painéis grossos de contraplacado, chapa de metal amortecida, ou placa de gesso pesado. Estas superfícies refletoras e difusoras das ondas sonoras são colocadas no palco para cercar as fontes sonoras (como orquestra, intérpretes e outros) e permitem a distribuição uniforme, equilibrada e homogénea do som por todas as zonas da plateia. Este fenómeno é possível pela conexão do volume do palco ao volume da plateia, através da implementação desta concha acústica. Além disso, estes dispositivos acústicos podem aumentar a intensidade do som ao longo da sala, evitando a dispersão da energia sonora pelas alas do palco e pela torre de cena (volume acima do palco com mecanismos de cenário, como luzes, cortinas ou cenários, manipulados na teia para descer ou recolher, dependendo da necessidade destes recursos), redirecionando-a para a plateia. Estas conchas acústicas, quando a cercar uma orquestra, devem ser providas de pequenos relevos irregulares, que propiciam a difusão do som e, assim, a homogeneização e reflexão de energia sonora de altas frequências dos vários instrumentos. Desta forma, mesmo várias secções da orquestra, outros intérpretes como coros e solistas e/ou outros tipos de ensemble poderão ter a perceção do que estará a ser interpretado em zonas distintas do palco, a fim de promover a coordenação e harmonia da *performance*. Uma vez que existe diferentes disposições de orquestra ou de intérpretes para diferentes tipos de música, é prudente que a concha acústica seja adaptável aos vários tipos de espetáculos programados para a sala de espetáculos em questão, com painéis passíveis de serem ajustados/” afinados” para cada situação, enquanto se dá lugar a ensaios ou durante o *soundcheck*. [5] [21]

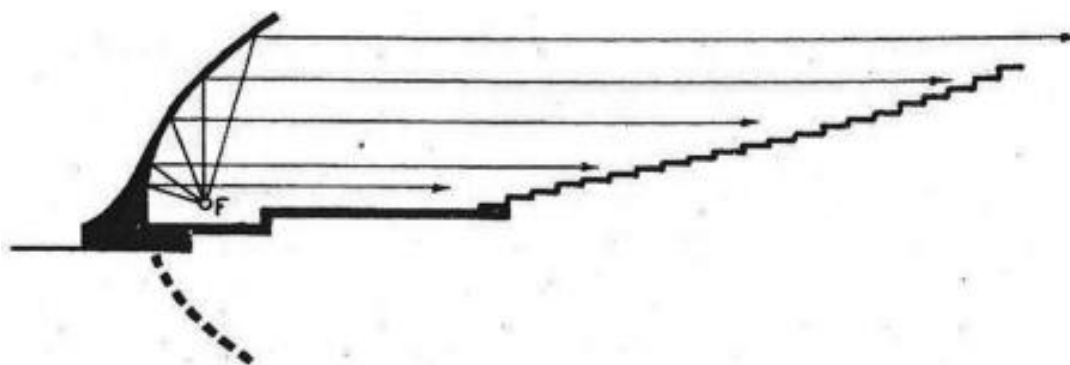


Figura 3.10- Concha acústica em teatro ao ar livre [5]

As canópias são outro exemplo de dispositivo acústico, aplicado na zona do palco de salas de espetáculos (fig.3.11), ou acima de púlpitos de locais de culto (necessárias para a difusão da palavra proferida nos púlpitos em igrejas, com tempos de reverberação tendencialmente elevados). Estas estruturas, colocadas a uma altura superior à fonte sonora e suspensas à frente do prosccénio, permitem a reflexão de ondas sonoras provenientes do palco para toda a audiência e a diminuição do intervalo de tempo entre a chegada das ondas sonoras diretas e a das primeiras ondas sonoras refletidas. Além disso, podem conferir um “ganho” às ondas sonoras diretas por contribuição das ondas refletidas, aumentando a sensação de intimidade. As canópias podem ter dimensões diferentes e, inclusivamente, ser combinadas com vários painéis. Neste caso, os painéis podem ser dispostos espaçados entre eles, para permitir a passagem de energia sonora para as zonas mais altas da sala de espetáculos, promovendo a reverberação de baixas frequências na zona da plateia e, desta forma, a sensação de envolvimento. A figura retrata a colocação de canópias acima de um palco prosccénio. [5] [21]

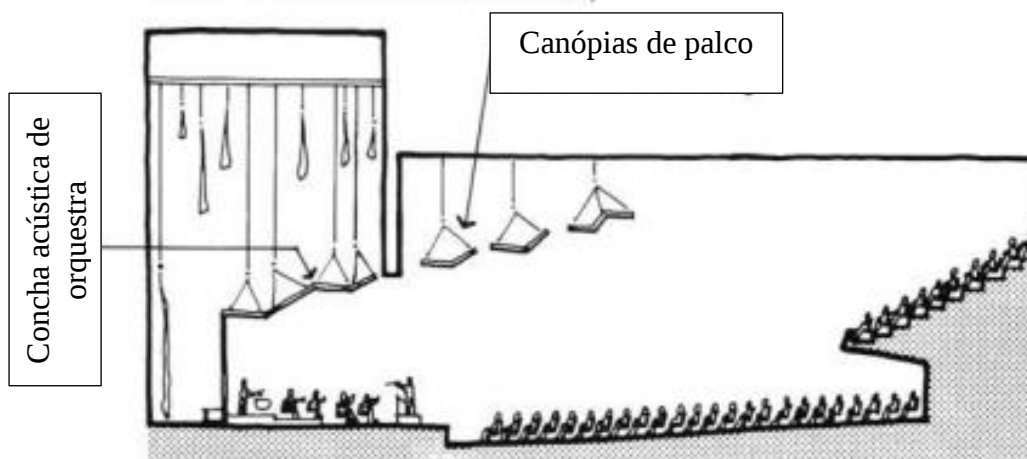


Figura 3.11- Canópias colocadas acima de um palco prosccénio, como extensão de uma concha acústica colocada no palco [5]

3.3.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO ADEQUADO

O tempo de reverberação é um parâmetro que é fundamental para a inteligibilidade da palavra. Geralmente, quanto menor o tempo de reverberação, maior a inteligibilidade, uma vez que a articulação das palavras não causa sobreposição de sons. Para um maior tempo de reverberação, a tendência será a sobreposição das vogais sobre as consoantes das palavras, pela prolongação do

som (uma vez que as vogais, com frequências baixas, são geralmente mais intensas e têm uma maior duração que as consoantes, com frequências altas). Neste sentido, o fator de clareza e definição da palavra, que é a dicção das consoantes, fica “abafado” pela prolongação do som das vogais. [1] [5]

Segundo Carvalho [1], o tempo de reverberação para teatros deverá rondar os 0,7 a 0,9 segundos.

Como referido no capítulo dois, o volume da sala constitui um fator determinante para os valores de tempo de reverberação de uma sala. Análises feitas por vários autores (como Long) correlacionam os fatores de volume e de valores de tempo de reverberação com o tipo de sala ideal para cada configuração destes. A figura 3.12 apresenta graficamente estas conclusões.

Desvios de 5 a 10% dos valores medidos de tempo de reverberação de uma sala em relação aos valores ideais deste parâmetro são habituais. Isto significa que esses valores medidos, podendo não estar incluídos no intervalo de valores ideais estudados por outros autores, podem ainda ter uma adequabilidade à função da sala aceitável.

Segundo Carvalho [1], os valores de tempo de reverberação ideais (500-1000 Hz) para vários propósitos de salas encontram-se no quadro 3.1.

Quadro 3.1- Valores ideais de tempo de reverberação (500-1000 Hz) para cada função da sala [1]

Tipo de Uso	Tempos de reverberação ideais (500-1000 Hz) (s)
Conferências	0,9 – 1,1
Cinema	0,8 – 1,0
Teatro	0,7 – 0,9
Auditórios Escolares	1,5 – 1,8
Auditórios com propósitos gerais	1,6 – 1,8
Auditório (palavra)	0,7 – 0,8
Música popular	0,8 – 1,0
Música sinfónica Barroca	1,4 – 1,6
Música sinfónica Clássica	1,6 – 1,8
Música sinfónica Romântica	1,9 – 2,2
Música sinfónica Moderna	1,4 – 1,9
Ópera não wagneriana	1,3 – 1,7
Ópera wagneriana	1,8 – 1,9
Coros gregorianas	3,0 – 4,0

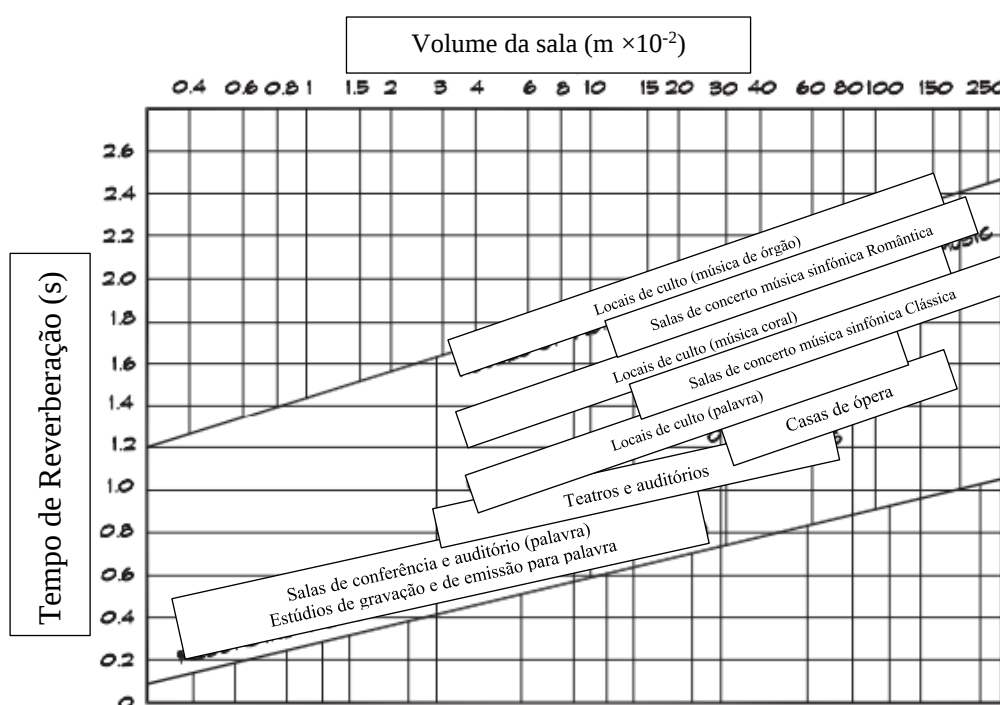


Figura 3.12- Correlação dos fatores de volume e tempo de reverberação de uma sala com a sua função ideal para cada configuração de valores (adaptado de [5])

3.3.4. DIFERENÇA ENTRE SINAL *VERSUS* RUÍDO

Numa sala de espetáculos, a diferença entre o nível de pressão sonora do ruído de fundo de uma sala com os sistemas AVAC ligados e o nível sonoro de uma atuação deve ser significativa o suficiente para que não prejudique o desempenho da atividade, pelo detrimento da inteligibilidade da palavra ou da qualidade musical.

Os níveis de pressão sonora de ruído de fundo em salas de aulas pequenas e em salas dedicadas à palavra devem estar limitados a um máximo de NC 30 (35 dBA) e em grandes auditórios para NC 25 (30 dBA). A diferença entre estes limites para salas pequenas e salas maiores é relativa à maior perda de intensidade sonora ao longo de uma sala maior. Face a isto, há a necessidade de suprimir mais significativamente o ruído de fundo de grandes auditórios, de forma a evitar o incómodo do ruído de fundo para os lugares mais afastados do palco. Alguns autores argumentam que é necessária uma diferença de 10-15 dB entre os níveis de pressão sonora do som de interesse e o de ruído de fundo. [5]

Quando o campo de reverberação é um ruído de mascaramento, pode ser tolerado um maior nível de pressão sonora.

Os quadros seguintes apresentam um conjunto de valores ideais de NC (quadro 3.2) e de NR (quadro 3.3).

Quadro 3.2- Valores máximos ideais do índice NC (adaptado de [1])

Tipo de Uso (e requerimentos)	Âmbito de NC Ideais
Salas de concerto, salas de ópera, estúdios de gravação e de emissão, grandes auditórios, grandes igrejas, salas de recital	< NC-20
Pequenos auditórios, teatros, salas de ensaio de música, grandes salas de reuniões, salas de teleconferência, instalações de audiovisual, grandes salas de conferências, escritórios executivos, igrejas pequenas, tribunais, capelas	NC-20 a NC-30
Quartos, dormitórios, hospitais, residências, apartamentos, hotéis, motéis	NC-25 a NC-35
Escritórios privados e semiprivados, salas de conferência pequenas, salas de aula, bibliotecas	NC-30 a NC-35
Grandes escritórios, áreas de recepção, lojas de retalho, cafetarias, restaurantes, ginásios	NC-35 a NC-40
<i>Lobbies</i> , espaços de trabalho de laboratório, salas de engenharia, escritórios gerais, lojas de manutenção e oficinas	NC-40 a NC-45
Cozinhas, lavandarias, lojas de escola e industriais, salas de computador	NC-45 a NC-55

Quadro 3.3- Valores máximos ideais do índice NR (adaptado de [13])

Tipo de Uso (e requerimentos)	NR Ideais
Salas de concerto e de ópera, estúdios de gravação e de emissão, igrejas	< NR-20
Salas de conferências, hospitais, teatros, cinemas, residências particulares	NR-30
Bibliotecas, museus, tribunais, escolas, salas de operação e enfermarias de hospitais, apartamentos, hotéis, escritórios executivos	NR-35
Salões, corredores, vestiários, restaurantes, clubes noturnos, escritórios, lojas	NR-40
Hipermercados, supermercados, cantinas, escritórios administrativos	NR-45
Salas de computador e de equipamentos informáticos	NR-50
Trabalhos leves de engenharia	NR-60
Fundições e trabalhos pesados de engenharia	NR-70

3.3.5. DEFEITOS ACÚSTICOS

A existência de defeitos acústicos numa sala é pejorativa para qualquer função ou propósito. Este tipo de defeitos pode contribuir para um desconforto nas salas e uma fraca qualidade da inteligibilidade da palavra ou até definição musical. [5]

Dos defeitos acústicos mais flagrantes em salas de espetáculo, incluem-se os seguintes: reflexões atrasadas múltiplas e/ou longas (um elevado intervalo de tempo entre a deteção de uma onda sonora direta e a da primeira onda sonora refletida); a concentração de ondas sonoras em regiões localizadas da plateia (através de uma superfície refletora côncava mal colocada); a sobreposição e enfatização de determinadas frequências, ou bandas de frequência, sobre outras de interesse (causado pelas próprias configurações da sala, ou até mesmo pela existência de materiais absorventes que apenas absorvem determinadas gamas de frequências); zonas de sombra acústica (bloqueio da propagação das ondas sonoras, diretas ou refletidas, até ao recetor). [5]

3.3.6. ACÚSTICA VARIÁVEL

3.3.6.1. Variação na Absorção

Apesar da conceção de um projeto acústico de uma sala de espetáculos para um único propósito ser a situação acústica ideal, as necessidades de determinada população de uma dada região podem levar a que se equacione a construção de salas de espetáculos com múltiplos propósitos, a fim de se lhes proporcionar um leque variado de programação artística.

Neste sentido, torna-se necessário alterar as configurações acústicas da sala de espetáculos, para a adaptar aos diversos tipos de funções. Esta adaptação pode ser feita por variação da absorção sonora global da sala. Através de dispositivos manuais ou mecânicos, é possível alterar as características acústicas de grandes superfícies da envolvente de zonas refletoras para zonas absorventes e vice-versa. [1]

Nos parágrafos seguintes, são apresentados alguns sistemas e dispositivos acústicos que permitem a manipulação da absorção sonora global da sala e, por conseguinte, do seu tempo de reverberação:

- As cortinas de absorção sonora retráteis (fig. 3.13) podem ser ajustadas na área de cortina exposta para variar a quantidade de absorção sonora e, quando recolhidas, podem expor mais uma superfície refletora; [4]

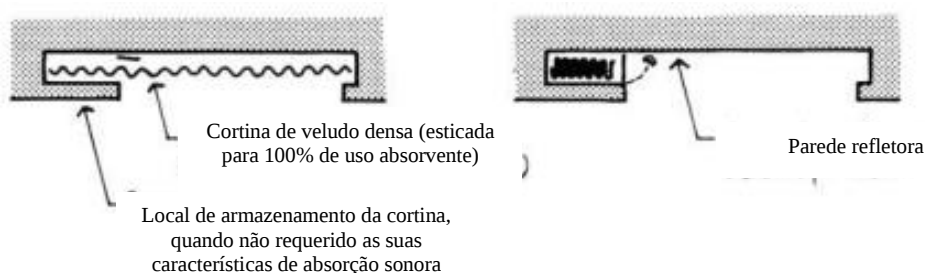


Figura 3.13- Cortinas de absorção sonora retráteis (adaptado de [4])

- As superfícies deslizantes (fig. 3.14) são constituídas por dois painéis de material perfurado, que podem ser usados para variar a absorção sonora, através de um simples deslizamento entre as duas

superfícies. Quando os orifícios destas superfícies perfuradas estão desalinhados, a conjugação dos dois painéis confere um comportamento de superfície refletora. Quando alinhados, permitem a entrada de som pelos orifícios e, assim, a absorção sonora num material colocado entre os painéis e a superfície absorvente colocada atrás destes. [4]

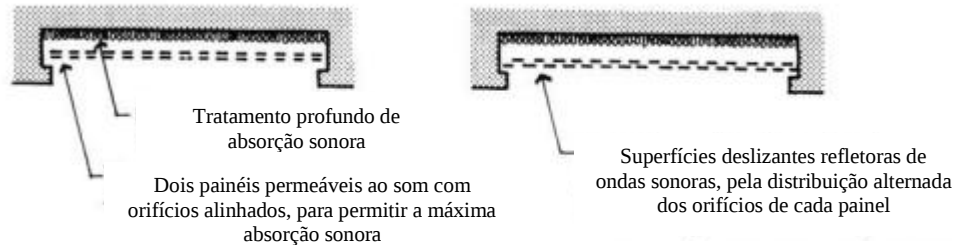


Figura 3.14- Superfícies deslizantes (adaptado de [4])

- Os painéis articulados (fig. 3.15) consistem na instalação de material absorvente sonoro no verso de painéis refletores articulados, que podem alterar a sua posição consoante o verso do painel pretendido para o uso da sala.

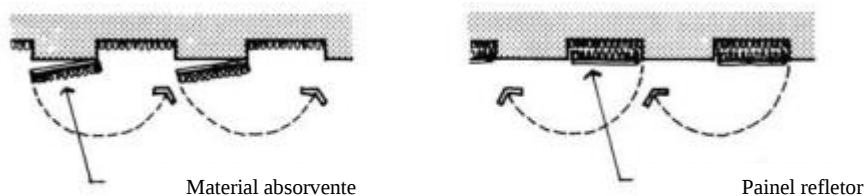


Figura 3.15- Painéis articulados (adaptado de [4])

- Os elementos rotativos (fig. 3.16) permitem uma tripla função, dependendo da configuração na qual este tipo de dispositivos em forma de prisma triangular estão colocados. Um dos lados do elemento rotativo é provido de material absorvente sonoro, enquanto os outros dois lados são superfícies refletoras e o vértice permite a difusão de ondas sonoras.

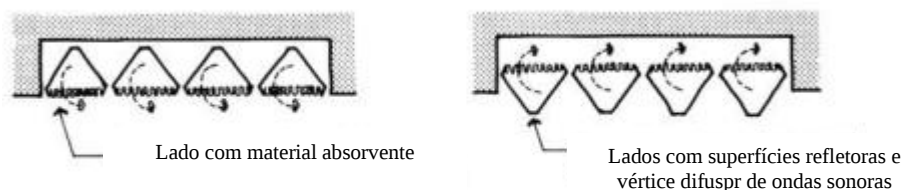


Figura 3.16- Elementos Rotativos (adaptado de [4])

3.3.6.2. Variação no Volume

Outra forma de fazer variar o tempo de reverberação de uma sala de espetáculos é alterando significativamente o volume da mesma. Apesar de não representar uma solução tão usual para esta problemática acústica, a variação de volume de uma sala é eficaz e permite configurações de salas de espetáculos distintas. [1]

É exemplo deste tipo de acústica variável o Edwin Thomas Hall, Universidade de Akron, Akron, Ohio, que apresenta três tipos distintos de configurações de volume da sala de espetáculos: Sala de

concertos (fig. 3.17), a sala de ópera (fig. 3.18) e o teatro dramático (fig.3.19). Estas configurações têm em comum as mesmas instalações, mas para volumes diferentes, cada vez menores em volume quanto menor o tempo de reverberação pretendido. Nas duas situações extremas, o tempo de reverberação diminui de 1,80 s para 1,12 s. [1]

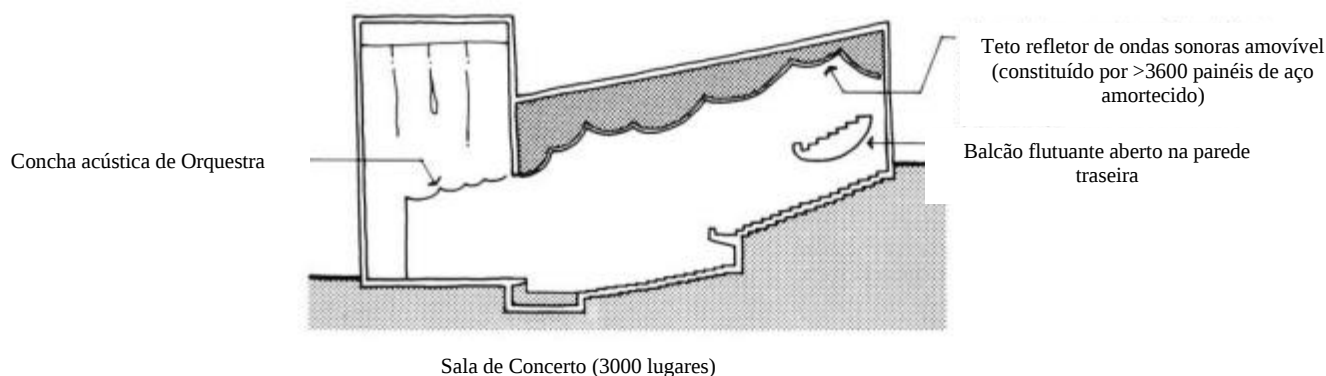


Figura 3.17- Edwin Thomas Hall adaptado para concertos sinfónicos (adaptado de [4])

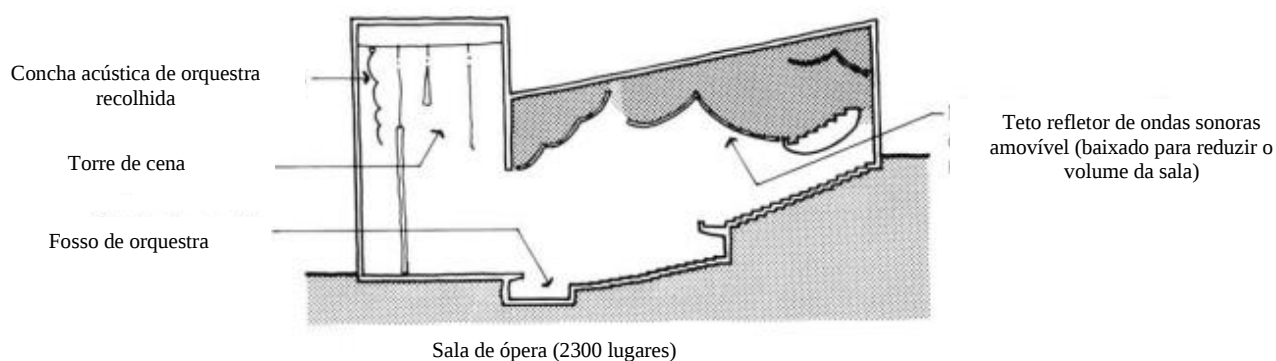


Figura 3.18- Edwin Thomas Hall adaptado para ópera (adaptado de [4])

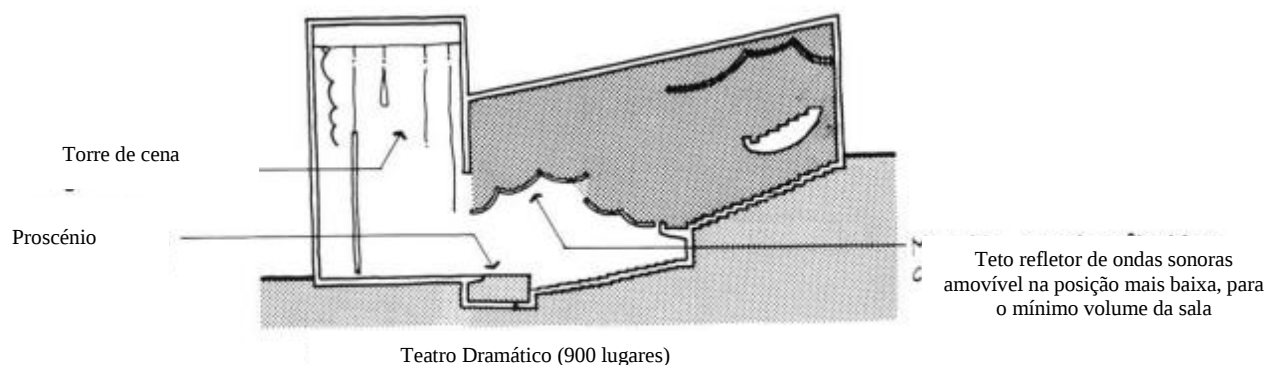


Figura 3.19- Edwin Thomas Hall adaptado para teatro dramático (adaptado de [4])

3.3.7. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA- RASTI

Existe outro tipo de valores que vão ser essenciais para o desenrolar da presente dissertação.

No quadro 3.4 estão colocados os valores de RASTI para as várias qualidades de inteligibilidade da palavra.

Quadro 3.4- Relação entre valores de RASTI e a qualidade da inteligibilidade da palavra [22]

Relação RASTI com a inteligibilidade da Palavra	
Qualidade da Inteligibilidade da Palavra	RASTI
Má	$< 0,32$
Pobre	$0,32 - 0,45$
Razoável	$0,46 - 0,60$
Boa	$0,61 - 0,75$
Excelente	$\geq 0,76$

3.3.8. LEGISLAÇÃO- REGULAMENTO DOS REQUISITOS ACÚSTICOS DE EDIFÍCIOS

No momento de redação da presente dissertação, a legislação que se encontra em vigor é o Decreto-Lei (DL) n.º 129/2002 de 11 de maio, o Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios (RRAE). Este DL sofreu alterações pelo DL n.º 96/2008, de 9 de junho, e posteriormente pelo DL n.º 95/2019, de 18 de julho. As alterações ao DL inicial consistiram no alargamento do tipo de edifícios contemplados, nomeadamente edifícios habitacionais ou mistos e unidades hoteleiras e ao âmbito de aplicação deste Regulamento, estando vigente para construções, reconstruções, ampliações ou alterações de vários tipos de edifícios em função dos seus propósitos, nomeadamente [23]:

- a) Edifícios habitacionais, mistos e unidades hoteleiras;
- b) Edifícios comerciais e de serviços e partes similares em edifícios industriais;
- c) Edifícios escolares e similares e de investigação;
- d) Edifícios hospitalares e similares;
- e) Recintos desportivos;
- f) Estações de transporte de passageiros;
- g) Auditórios e salas.

Uma vez que o presente trabalho se trata da caracterização acústica de uma sala de teatro, podemos aferir que esta caracterização deve ser sujeita à legislação pela alínea g), “Auditórios e salas”.

O RRAE define, ainda, os parâmetros acústicos, os quais têm limites estipulados na legislação vigente., nomeadamente [23]:

- Tempo de reverberação, TR;
- Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado com o exterior (para fachadas, empenas e coberturas), $D_{2m,nT,w}$;
- Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado, $D_{nT,w}$;
- Índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão padronizado, $L'_{nT,w}$;

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

Além disso, para recintos em que o principal propósito da sala seja o da promoção de atividades assentes na “oratória”, o artigo 10º-A do RRAE impõe os seguintes requisitos, a enumerar [23]:

- O tempo de reverberação médio TR, nas bandas de 1/1 oitava nas frequências dos 500, 1000 e 2000 Hz, quando mobilados normalmente e sem ocupação, deve satisfazer as expressões 3.2, 3.3 e 3.4:

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

$$ii. TR \leq 0,32 + 0,17 \times \log V, \text{ se } 250 \leq V < 9000 m^3; \quad (3.2)$$

$$iii. TR \leq 0,05 \times V^{\frac{1}{3}}, \text{ se } V \geq 9000 m^3; \quad (3.3)$$

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

O projeto de condicionamento acústico destes espaços deve incluir um estudo específico destinado a assegurar uma característica de reverberação adequada no restante espectro de frequências e uma boa qualidade da inteligibilidade da palavra nos diversos locais da sala [23].

Em auditórios e salas cujo principal propósito não seja assente na “oratória”, como salas de música e de espetáculo, deve-lhes ser feito um projeto de condicionamento acústico, que inclua um estudo específico destinado a assegurar a conformação acústica adequada à sua utilização funcional [23].

Os valores do índice de isolamento a sons de condução aérea padronizados com o exterior, $D_{2m,nT,w}$, corrigido do termo de adaptação aplicável, C ou C_{tr} , devem ser os necessários para que o nível sonoro contínuo equivalente do ruído ambiente no interior do recinto, L_{Aeq} , satisfaça a seguinte expressão [23]:

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

No interior dos recintos, o nível sonoro contínuo equivalente do ruído particular, L_{Aeq} , associado ao funcionamento dos equipamentos e instalações técnicas, nomeadamente sistemas AVAC, deve satisfazer as seguintes expressões 3.5 e 3.6 [23]:

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

$$L_{Aeq} \leq 30 \text{ dB, nos restantes recintos} \quad (3.6)$$

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 [23].

O edifício é considerado conforme aos requisitos acústicos aplicáveis, quando, cumulativamente [23]:

O valor obtido para o tempo de reverberação, TR, diminuído do fator de incerteza I no valor percentual do limite regulamentar satisfaça:

$$25\%, \text{ se } V < 250 m^3; \quad (3.7)$$

$$35\%, \text{ se } 250 \leq V < 9000 m^3; \quad (3.8)$$

$$40\%, \text{ se } V \geq 9000 m^3; \quad (3.9)$$

O valor obtido para o índice de isolamento a sons de condução aérea padronizados com o exterior, $D_{2m,nT,w}$, acrescido do fator I de 3 dB, satisfaça o limite regulamentar;

O valor obtido para o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado, $D_{nT,w}$, acrescido do fator de incerteza I no valor de 3 dB, e a diferença $D_{nT,oit63Hz}$ acrescida o fator de incerteza I no valor de 5 dB, satisfaçam o limite regulamentar;

O valor obtido para o nível do ruído particular, L_{Aeq} , diminuído do fator I no valor de 3 dB, satisfaça o limite regulamentar.

A caracterização acústica realizada neste trabalho do Teatro Municipal de Ourém vai também ser sujeita a uma avaliação de cumprimento do RRAE, Regulamento ao qual está submetida.

4

MEDIÇÕES

4.1. ENQUADRAMENTO DO TEATRO MUNICIPAL DE OURÉM

O Teatro Municipal de Ourém (TMO) é uma sala de espetáculos, com espaços preparados para uma programação artística principalmente teatral. No entanto, é também feita a promoção de espetáculos de exibição cinematográfica e de eventos corporativos. [24]

Hoje, ele é uma reabilitação do antigo Cineteatro Municipal de Ourém, localizado na Rua Dr. Francisco Sá Carneiro, Ourém, e de autoria de projeto original do Arquiteto J.P. Hamard. As figuras 4.1 e 4.2 retratam o enquadramento geográfico do TMO. [25]

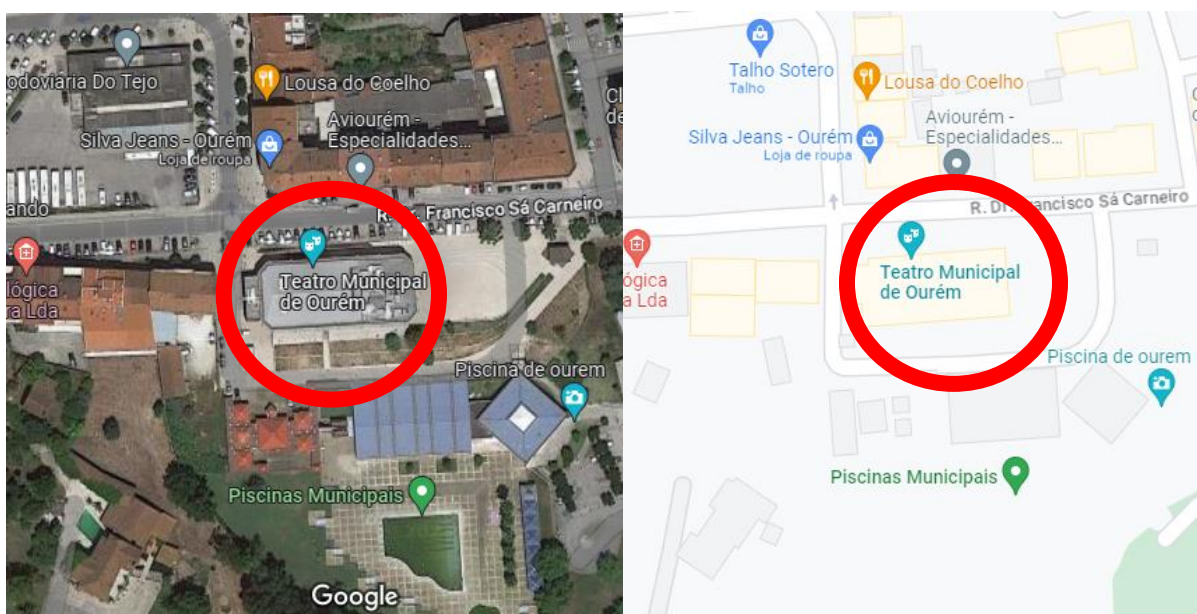


Figura 4.1 e 4.2- Localização TMO por satélite (esq.) e mapa (dir) [26]

Depois de 30 anos de atividade desde a fundação do edifício e dos seus propósitos artísticos, os requisitos técnicos da sala deixaram de ser suficientes para a atualidade do mundo do espetáculo e para o tipo de programação que a sala pretende promover. Assim, procedeu-se à renovação do antigo cineteatro municipal de Ourém, com um investimento na ordem dos dois milhões e setecentos mil euros, em grande parte financiado pelo PEDU (Plano Estratégico de Desenvolvimento Urbano). [24] [25]

A requalificação do TMO foi feita com vista à preservação da estrutura compositiva original do edifício projetado pelo arquiteto Hamard, mantendo os contornos arquitetónicos estilísticos da altura de construção do cineteatro. Estes contornos são ainda visíveis nas fachadas e na estrutura do edifício, retratados nos traços brutalistas resultantes dos sistemas de pré-fabricação utilizados na construção. Toda essa estrutura preservada é visível na figura 4.3. [25]



Figura 4.3- Imagem da entrada principal do TMO [24]

No entanto, foram aplicadas soluções de requalificação do edifício que implicaram diferentes níveis de intervenção, entre estruturais e materiais, e de articulação funcional da distribuição dos espaços que compõem o TMO. Entre outras, as soluções mais drásticas e com preocupação artística (e até acústica), foram as seguintes [25]:

- O rebaixamento do palco e zona da plateia;
- O aumento das dimensões do palco, como área do palco em toda a largura de 19 metros do edifício e de 10,5 metros de profundidade;
- Estabelecimento de uma ligação interna entre o palco e a sala multiusos, para movimentações técnicas e de artistas entre as várias áreas funcionais do TMO.

Desta forma, promoveu-se a flexibilidade e funcionalidade do próprio auditório.

A requalificação do edifício ficou a cargo da empresa de arquitetura *GLCS- Arquitectos*, a qual subcontratou a empresa *InAcoustics*, para a implementação de medidas de correção acústicas na sala, para as necessidades acústicas da finalidade artística do teatro. [27]

Nas figuras 4.4, 4.5 e 4.6, estão evidenciadas as peças desenhadas do teatro municipal de Ourém, relativas à planta do piso 0 e aos cortes transversais e longitudinais do edifício.

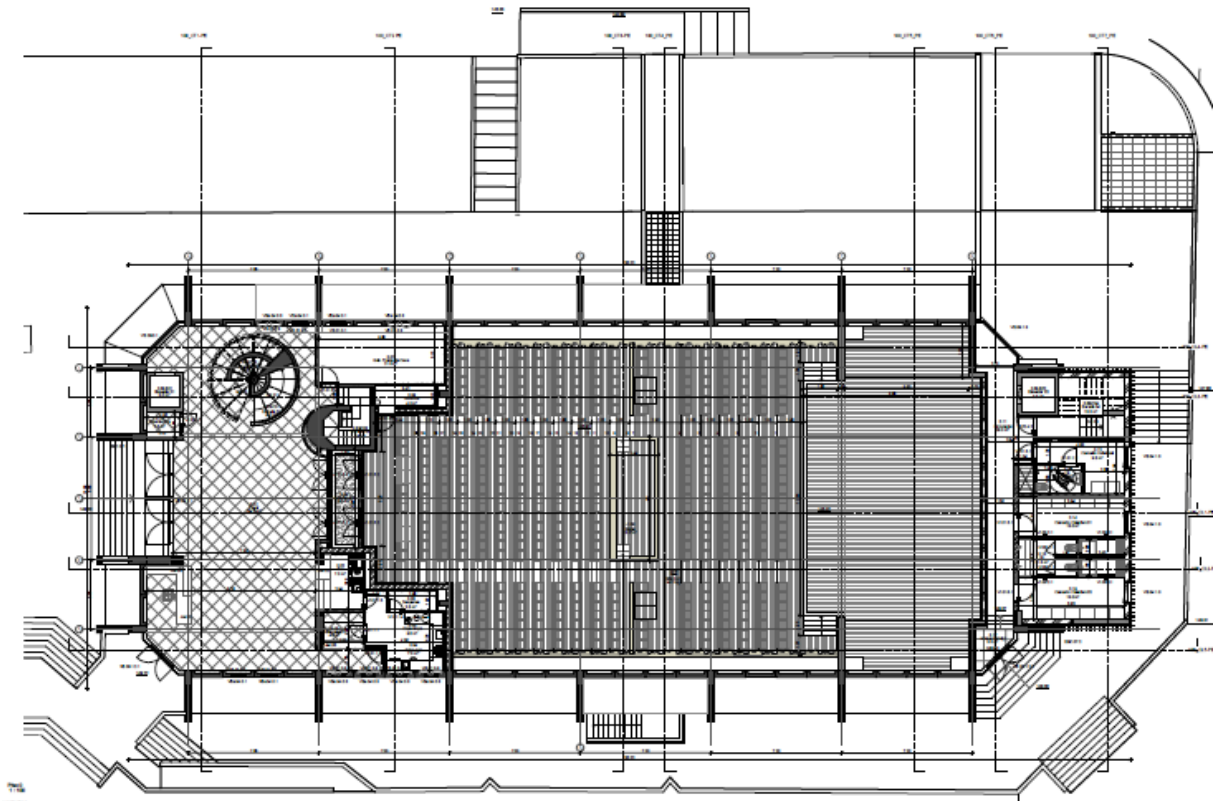


Figura 4.4- Planta do piso 0 do TMO [28]

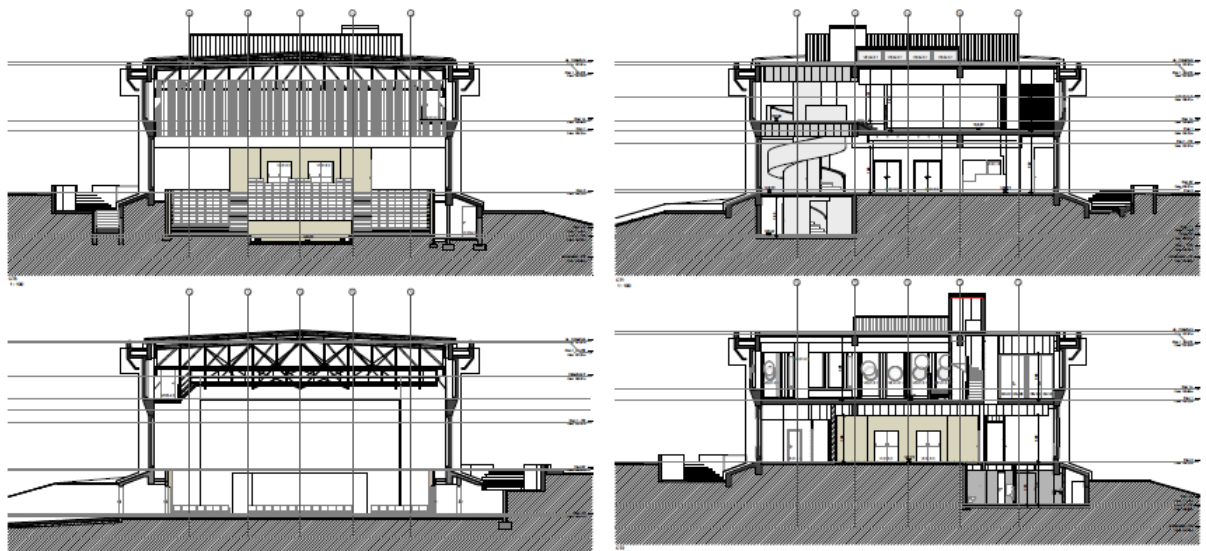


Figura 4.5- Cortes transversais do TMO [28]



Figura 4.6- Cortes longitudinais do TMO [28]

A sala principal do Teatro Municipal de Ourém, que corresponde à sala de espetáculos, está equipada com boca de cena, teia para holofotes e uma plateia com 441 lugares (8 dos quais reservados para pessoas de mobilidade reduzida). A programação habitual atual passa por eventos de cariz teatral, cinematográfico e corporativo, mas também de música e dança. A figura 4.7. evidencia a disposição de lugares e da *régie*, colocada no centro da sala. É ainda evidenciado um corredor de emergência perto da *régie*, paralelo ao palco. [24]

A área da sala é de 359 m^2 , e a altura média, para um teto relativamente plano como é o do estudo de caso, é de $10,90 \text{ m}$. Assim, o volume da sala rondará os 3915 m^3 . A obtenção destes valores foi possível graças às plantas fornecidas do edifício do TMO, em formato *AutoCAD*, e que demarcam este tipo de valores dimensionais. [28]

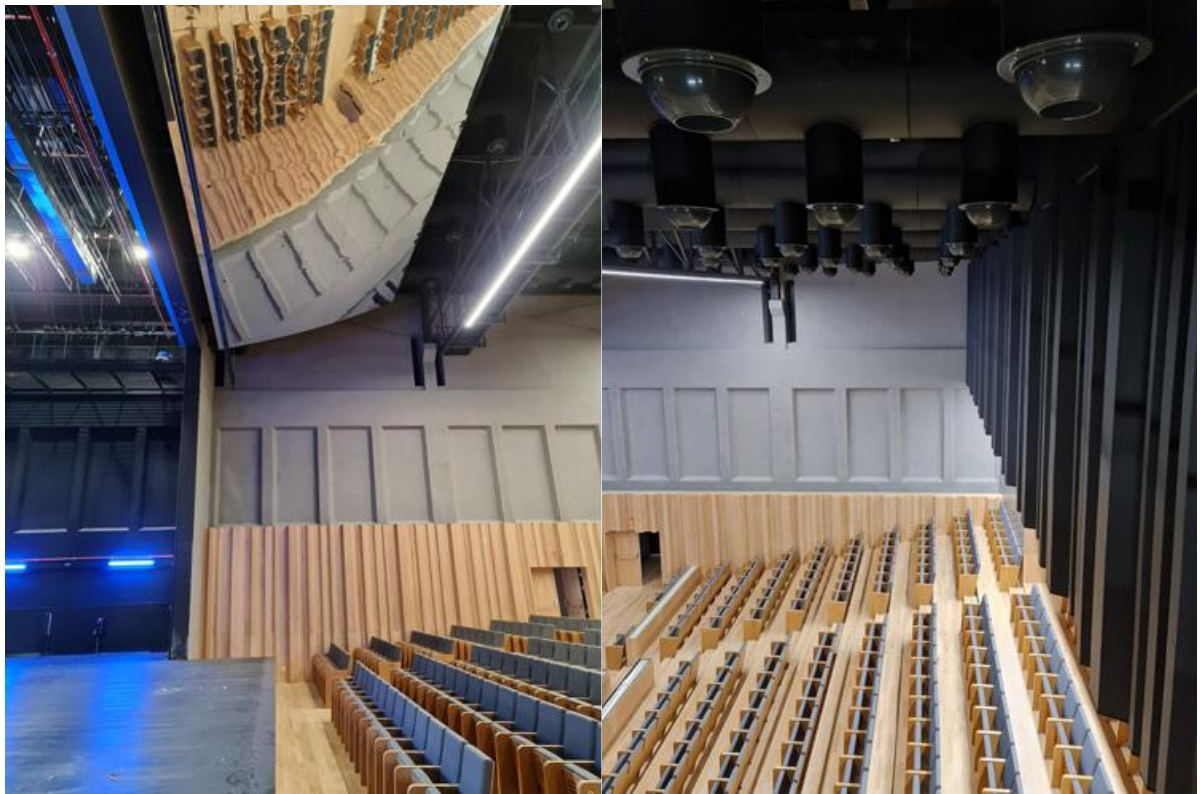
As figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 evidenciam dispositivos acústicos de difusão e/ou de absorção sonora. A figura 4.8 revela uma canópia refletora e difusora de ondas sonoras, composta por painéis de madeira MDF (*Medium Density Fibreboard*) com curvatura (raio de 25 metros) e revestimento de placas espelhadas coladas nos painéis de madeira em toda a sua extensão (incluindo arestas e vértices), permitindo a difusão do som desde o palco até às várias zonas da plateia. A figura 4.9 evidencia o sistema AVAC e um painel difusor de ondas sonoras aplicado no fundo da sala. Igualmente, a figura 4.11. mostra outra superfície difusora de ondas sonoras nas paredes laterais da

sala. A figura 4.10. relewa dois dos dispositivos de absorção sonora presentes na sala e distribuídos pelas paredes e teto da sala de espetáculos, que são ressoadores agrupados (com furação uniforme “8/18”) e revestimentos de superfícies em lã mineral (55 kg/m^3). O outro dispositivo de absorção sonora, para além da presença humana, são os estofos das cadeiras. O pavimento da sala é de *parquet* em régua de madeira maciça colado e envernizado, que reveste a estrutura da laje. [28]

O TMO não só compreende a sala principal (que é denominada de “auditório”), mas também um espaço dedicado a Bar/Cafetaria (com zona de estar, serviço de bar e equipamentos de cozinha), uma sala estúdio (para ensaios, exposições, aulas e ações de formação ou *coworking*; esta sala não foi submetida aos processos de medição acústicos), um anfiteatro exterior (espaço cénico com 400 lugares sentados; também não submetido a medições acústicas) e camarins (dois camarins individuais duplos; dois camarins coletivos para dez pessoas; dois camarins coletivos para pessoas). [24]



Figura 4.7- Enquadramento dos lugares da plateia e da *régie* na sala de espetáculos [27]



Figuras 4.8 (esq.) e 4.9 (dir.) – Canópia refletora, difusores de ondas sonoras e sistema AVAC [27]

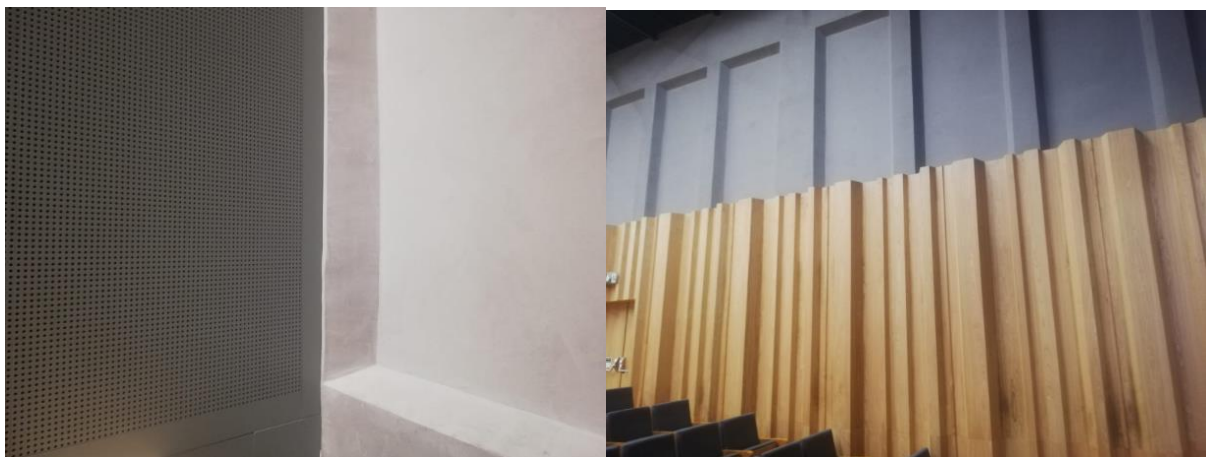


Figura 4.10 (esq.) e 4.11 (dir.) - ressoadores agrupados, lã mineral e paredes difusoras de ondas sonoras (fotos do autor)

4.2. METODOLOGIA

4.2.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS MEDIDOS

Para a caracterização acústica da sala de espetáculos do TMO, foi necessária a obtenção de valores de quatro parâmetros acústicos objetivos:

- Tempo de Reverberação (TR);
- *Rapid Speech Transmission Index (RASTI)*;

- Nível de pressão sonora do ruído de fundo sem AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado);

- Nível de pressão sonora do ruído de fundo com AVAC;

O tempo de reverberação é o intervalo de tempo, em segundos, que um som demora a extinguir-se após várias reflexões depois da cessação da emissão sonora de uma determinada fonte. Considera-se, para tal determinação, o decaimento do nível de pressão sonora equivalente a 60 dB, desde o cessar da emissão som. Face à limitação prática destas leituras, tendo em consideração eventuais ruídos de fundo que podem adulterar estas medições que, para valores mais baixos de nível de pressão sonora, são mais sensíveis à ocorrência de interferências sonoras, realiza-se a medição de tempos de reverberação para decaimentos de apenas 20 ou 30 dB, complementados através de uma extrapolação da continuação da extinção da energia sonora (T_{20} ou T_{30}). O tempo de reverberação está estritamente relacionado e dependente da geometria da sala de espetáculos e da área e qualidade do material absorvente presente nesta.

O ruído de fundo com e sem AVAC é a avaliação dos níveis de pressão sonora de ruído existente na sala de espetáculos e proveniente do exterior e, se estiverem ligados, consequentes ao funcionamento dos sistemas de AVAC. Assim, é medido o nível de pressão sonora equivalente, L_{eq} , e ponderado para o Filtro A – L_{Aeq} , em dB, a fim de se adaptar à sensibilidade do ouvido humano. Assim, determina-se se o ruído exterior é, por si só, incomodativo e se o funcionamento dos sistemas de AVAC é também incomodativo para determinada atividade na sala de espetáculos do TMO.

Uma vez que a sala de espetáculos está adaptada para a expressão teatral, a vertente principal em estudo será a inteligibilidade da palavra. Assim, a leitura do RASTI toma papel fulcral na leitura objetiva da qualidade de percepção da palavra. Através de uma determinada emissão de sons articulados em aparentes vogais e consoantes, a leitura destes parâmetros tem em conta as distorções que o ruído de fundo e as características reverberantes da sala para determinação da qualidade de percepção da palavra exprimida no palco.

4.2.2. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

Para a realização dos ensaios acústicos foram utilizados os seguintes equipamentos que foram requisitados ao Laboratório de Acústica da FEUP:

- Fonte Sonora Brüel & Kjær, modelo 4224 (figura 4.11);
- Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260 (figura 4.11);
- Equipamento de RASTI Brüel & Kjær:
 - Emissor, modelo 4225 (figura 4.11);
 - Recetor, modelo 4419;
- Microfone de 13 mm Brüel & Kjær, modelo 4189;
- Tripé portátil Brüel & Kjær, modelo UA0049 (figura 4.11).



Figura 4.12- Equipamento de emissão de fonte sonora, de RASTI e sonómetro (foto do autor)

4.2.3. MEDIÇÕES

A medição dos valores do tempo de reverberação foi feita através da emissão de um som de uma fonte sonora (FS) previamente colocada a 1,5 metros do início do palco e os pontos (T_i) onde foram realizadas as medições com o sonómetro foram escolhidos segundo a figura 4.13. O critério de seleção dos pontos da sala teve em conta a simetria da sala de espetáculos em relação ao seu eixo central, pelo que só foi necessário fazer as medições em metade da sala (segundo o eixo desenhado a azul na fig. 4.13). Este método de distribuição de pontos de medição repete-se também para a determinação dos pontos de medição de RASTI, como evidenciado na figura 4.14.

A medição dos valores do tempo de reverberação (T_{30} , neste caso prático) foi feito através da emissão de um estímulo sonoro de elevado nível de pressão sonora, com a leitura e extrapolação automática do T60.

A leitura dos valores do nível de pressão sonora do ruído de fundo com e sem AVAC são medidos igualmente nos pontos assinalados (F_i) da figura 4.13 para a determinação de L_{eq} , L_{Aeq} e das curvas de incomodidade NC/NR.

Para a medição do RASTI, a posição da fonte sonora foi igual à da fonte sonora para a leitura do tempo de reverberação, e foi realizada nos pontos (R_i) indicados na figura 4.14.



Figura 4.13- Pontos de medição de tempo de reverberação (Ti) e de ruído de fundo com e sem AVAC (Fi) [28]



Figura 4.14- Pontos de medição de RASTI (Ri) [28]

5

RESULTADOS

5.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O quadro 5.1 é referente aos valores de tempo de reverberação registados na sala de espetáculos do Teatro Municipal de Ourém (TMO), medidos conforme a metodologia indicada no capítulo 4. Os pontos de medição evidenciados no capítulo 4 são também referidos na tabela, usando como referência a designação do lugar dada na sala de espetáculos. Para identificação dos lugares, o Teatro Municipal de Ourém identifica as filas de lugares por letras e a disposição dos lugares na fila por números. A primeira fila é a mais próxima do palco, designada pela letra A e a última, designada pela letra S. As filas maiores têm 23 lugares cada uma, tirando as filas alinhadas com a *régie*, que têm 14 lugares, e as filas de trás, com 11 lugares. Os números são divididos sob o eixo dos lugares 1 de todas as filas (o lugar central), sendo que à esquerda deste estão os números ímpares e à direita os números pares. As medições foram feitas nos lugares ímpares da sala, considerando a simetria da sala.

A sala do TMO tem um volume total de, aproximadamente, 3915 m^3 , como calculado no capítulo 4. Considerando a informação disposta no capítulo 3, sobre o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), que define uma equação para o cálculo do valor médio máximo do tempo de reverberação para uma sala com um volume compreendido entre os 250 e 9000 m^3 , para a função oratória (também apresentada na equação 5.1), podemos aferir que o tempo de reverberação médio da sala para as bandas de oitava dos 500, 1000 e 2000 Hz, com mobilação normal e sem ocupação, é de 0,93 segundos para a função oratória.

$$TR \leq 0,32 + 0,17 \times \log(V), \text{ se } 250 \leq V \leq 9000 \text{ m}^3 \quad (5.1)$$

Em que TR é o tempo de reverberação (s) e V é o volume da sala (m^3).

Aos valores médios de tempo de reverberação medido das bandas de oitava de 500, 1000 e 2000 Hz, é aplicado um fator de incerteza (I) de 35% para salas de espetáculo com volumes entre os 250 e os 9000 m^3 . Este valor (0,67 segundos) é então comparado com o valor regulamentado. Neste caso, o valor médio de tempo de reverberação com a I é inferior ao calculado segundo o RRAE, pelo que a sala cumpre as exigências regulamentadas, como resumido no quadro 5.2.

No entanto, apesar de haver um regulamento, a sala pode não ter os valores ideais para as várias expressões artísticas. Neste caso, a sala abrange vários tipos de funções, como a música e o teatro e para conferências, todo este programa calendarizado para o TMO. O quadro 5.3. põe em causa a adequabilidade desta sala em específico para estes tipos de eventos, sendo que apenas é adequada para conferências, cinema e música popular e aceitável para teatro. Sem dispositivos de acústica variável, dos quais a sala se encontra desprovida, é impossível gerir uma adaptabilidade desta sala de espetáculos tão vinculadamente direcionada para teatro, a todos os outros tipos de espetáculo ou

eventos que lá possam ocorrer. De relevar também uma completa inadequabilidade do TMO a espetáculos de ópera wagneriana, de música sinfônica romântica e de coros gregorianos, por serem espetáculos com maior exigência de uma maior prolongação do som ao longo do tempo, por razões artisticamente estilísticas.

A figura 5.1 representa graficamente os valores de tempo de reverberação medidos em cada ponto de medição definido.

Quadro 5.1- Valores das medições do Tempo de Reverberação (T30) na sala de espetáculos do Teatro Municipal de Ourém em bandas de frequência de 1/3 de oitava de cada ponto de medição associado ao lugar

	T ₃₀ sala de espetáculos (s)					
Frequência (Hz)	Ponto de medição (lugar)				Desvio- padrão	Média
	B1	I7	N19	Q1		
100	1,27	1,24	1,47	1,39	0,11	1,34
125	1,00	1,35	1,48	1,37	0,21	1,30
160	1,01	1,10	1,30	1,22	0,13	1,16
200	1,13	1,16	1,21	1,18	0,03	1,17
250	1,11	1,04	1,02	1,04	0,04	1,05
315	0,91	0,90	0,85	0,86	0,03	0,88
400	0,82	0,81	0,85	0,84	0,02	0,83
500	0,87	0,81	0,92	0,89	0,05	0,87
630	0,83	0,98	0,99	0,96	0,07	0,94
800	0,89	0,96	0,99	0,96	0,04	0,95
1.000	0,94	1,06	1,25	1,16	0,13	1,10
1.250	1,10	1,12	1,10	1,10	0,01	1,11
1.600	1,06	1,09	1,09	1,08	0,01	1,08
2.000	1,01	1,00	1,12	1,08	0,06	1,05
2.500	0,98	1,05	1,12	1,08	0,06	1,06
3.150	1,00	1,06	1,10	1,07	0,04	1,06
4.000	0,88	1,00	1,01	0,98	0,06	0,97
5.000	0,88	0,92	0,97	0,94	0,04	0,93

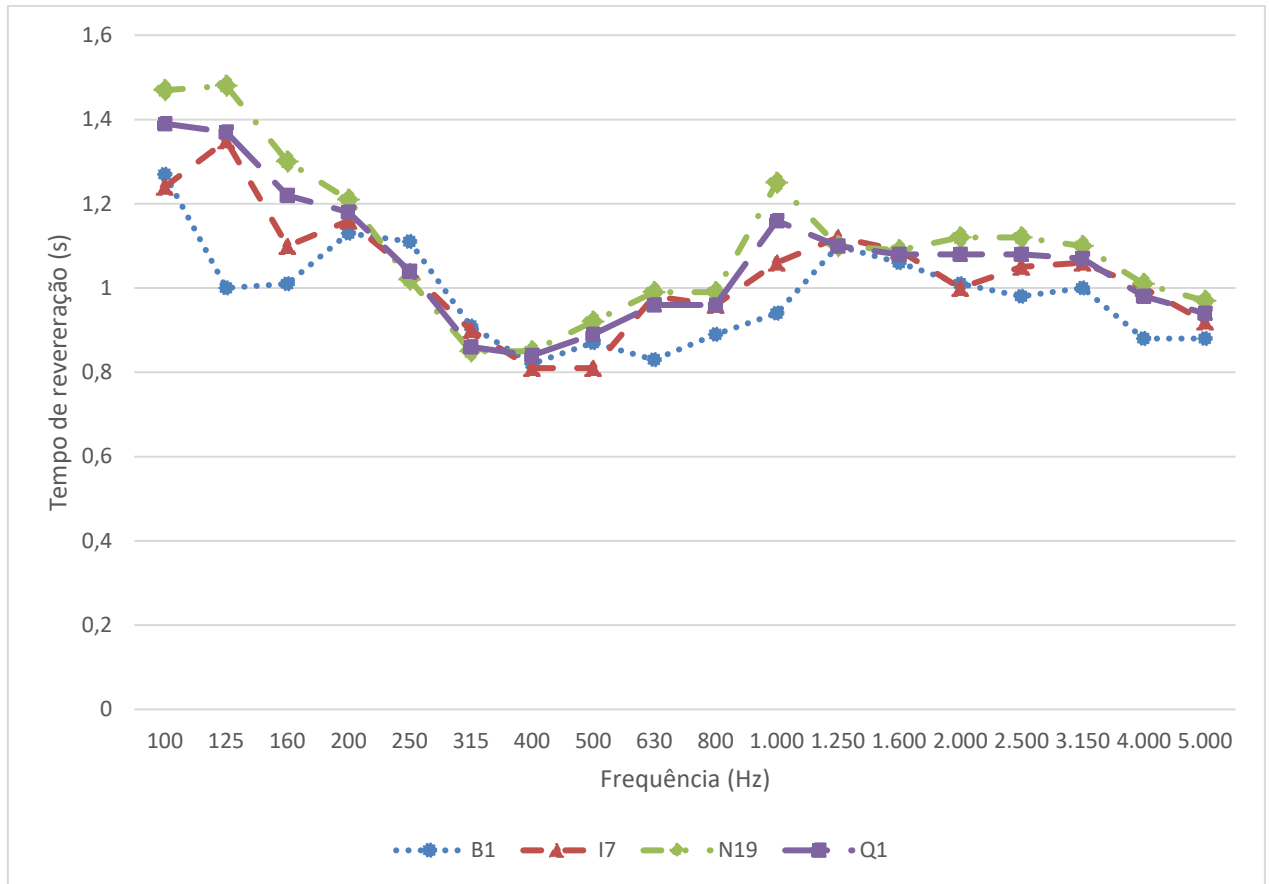


Figura 5.1- Representação gráfica dos valores das medições do Tempo de Reverberação (T30) na sala de espetáculos do Teatro Municipal de Ourém em bandas de frequência de 1/3 de oitava de cada ponto de medição associado ao lugar

Quadro 5.2- Valores médios do tempo de reverberação medidos no TMO para as bandas de frequência de 1/1 oitava entre os 500 e os 2000 Hz, o respetivo valor médio, o valor com a incerteza associada de 35% e avaliação do cumprimento do RRAE

Banda de frequência de 1/1 oitava (Hz)	Tempo de reverberação médio medido (s)	Tempo de reverberação médio medido (s)	Tempo de reverberação medido com Incerteza de 35% (s)	Tempo de reverberação máximo do RRAE (s)	RRAE (para “oratória”)
500	0,88	1,00	0,67	0,93	CUMPRE
1000	1,05				
2000	1,06				

Quadro 5.3- Comparação dos valores ideais do tempo de reverberação (500-1000 Hz) em função do propósito de utilização da sala [1]

Tipo de Uso	Tempos de reverberação ideais (500-1000 Hz) (s)	Comparação com o TR do TMO ($T_{500-1000\text{ Hz}} = 0,97\text{ s}$)
Conferências	0,9 – 1,1	Adequado
Cinema	0,8 – 1,0	Adequado
Teatro	0,7 – 0,9	Aceitável
Auditórios Escolares	1,5 – 1,8	Não adequado
Auditórios com propósitos gerais	1,6 – 1,8	Não adequado
Auditório (palavra)	0,7 – 0,8	Não adequado
Música popular	0,8 – 1,0	Adequado
Música sinfónica Barroca	1,4 – 1,6	Não adequado
Música sinfónica Clássica	1,6 – 1,8	Não adequado
Música sinfónica Romântica	1,9 – 2,2	Inaceitável
Música sinfónica Moderna	1,4 – 1,9	Não adequado
Ópera não wagneriana	1,3 – 1,7	Não adequado
Ópera wagneriana	1,8 – 1,9	Inaceitável
Coros gregorianas	3,0 – 4,0	Inaceitável

5.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO COM A SALA OCUPADA (PREVISÃO)

Apesar da conformidade da sala vazia com o RRAE para a função “oratória” quanto ao parâmetro de tempo de reverberação, é também de grande importância a exploração do tempo de reverberação com a sala ocupada com audiência, que representa a situação prática e concreta de um espetáculo típico do TMO (contando com audiência lotada).

Nesse cenário, pode-se aferir que haveria uma maior área de absorção sonora, correspondente à área delimitada pelo perímetro da plateia, com um acréscimo de comprimento e de largura de ocupação, que, para efeitos de cálculo, se assumiu 0,5 metros para cada lado das faixas de cadeiras, em comprimento e em largura, definindo-se um novo perímetro simulado de ocupação das cadeiras. A partir desta área de absorção, pode ser calculada uma previsão do novo tempo de reverberação, condicionado pela lotação da plateia.

O assumir deste valor de acréscimo de perímetro pode ser generalizado para as várias secções da plateia, que são delimitadas por zonas de passagem da audiência por entre a sala de espetáculos e pela *régie*. Assim, pode-se definir seis secções distintas de cadeiras e de lotação, evidenciadas na figura 5.1. Neste caso, assume-se que os lugares reservados a pessoas de mobilidade reduzida

estariam também completamente lotados e que teriam coeficientes de absorção sonora semelhantes às cadeiras do TMO.

Uma vez que a área assumida para ambos os cálculos de absorção sonora equivalentes das cadeiras, ocupadas ou vazias, é a mesma, o cálculo da absorção sonora equivalente da sala com cadeiras ocupadas pode ser simplificado nos seguintes termos.

$$\begin{aligned} A_f &= A - A_{cv} + A_{co} \Leftrightarrow A_f = A - \alpha_{cv} \times S_c + \alpha_{co} \times S_c \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow A_f = A_s + \Delta\alpha \times S_c \end{aligned} \quad (5.2)$$

Em que A representa a absorção sonora equivalente total da sala com as cadeiras vazias (m^2), A_f a absorção sonora equivalente da sala com as cadeiras ocupadas (m^2), A_{cv} a absorção sonora equivalente das cadeiras vazias (m^2), A_{co} a absorção sonora equivalente das cadeiras ocupadas (m^2), α_{co} o coeficiente de absorção sonora relativo às cadeiras ocupadas, α_{cv} o coeficiente de absorção sonora relativo às cadeiras vazias, S_c a área da secção da sala ocupada por cadeiras (m^2) e $\Delta\alpha$ a diferença entre o coeficiente de absorção das cadeiras ocupadas e o das cadeiras vazias, em que $\Delta\alpha = \alpha_{co} - \alpha_{cv}$. (5.3)

Assim, o tempo de reverberação previsível com audiência TR_{co} é dado pela seguinte equação.

$$TR_{co} = \frac{(0,16 \times V)}{A_f} \quad (5.4)$$

O quadro 5.4 discrimina os parâmetros usados para o cálculo da previsão tempo de reverberação da sala de espetáculos do TMO com lotação total.

O quadro 5.5 apresenta os valores resultantes do cálculo das absorções sonoras por bandas de 1/1 oitava de frequência, dos 125 aos 4000 Hz.

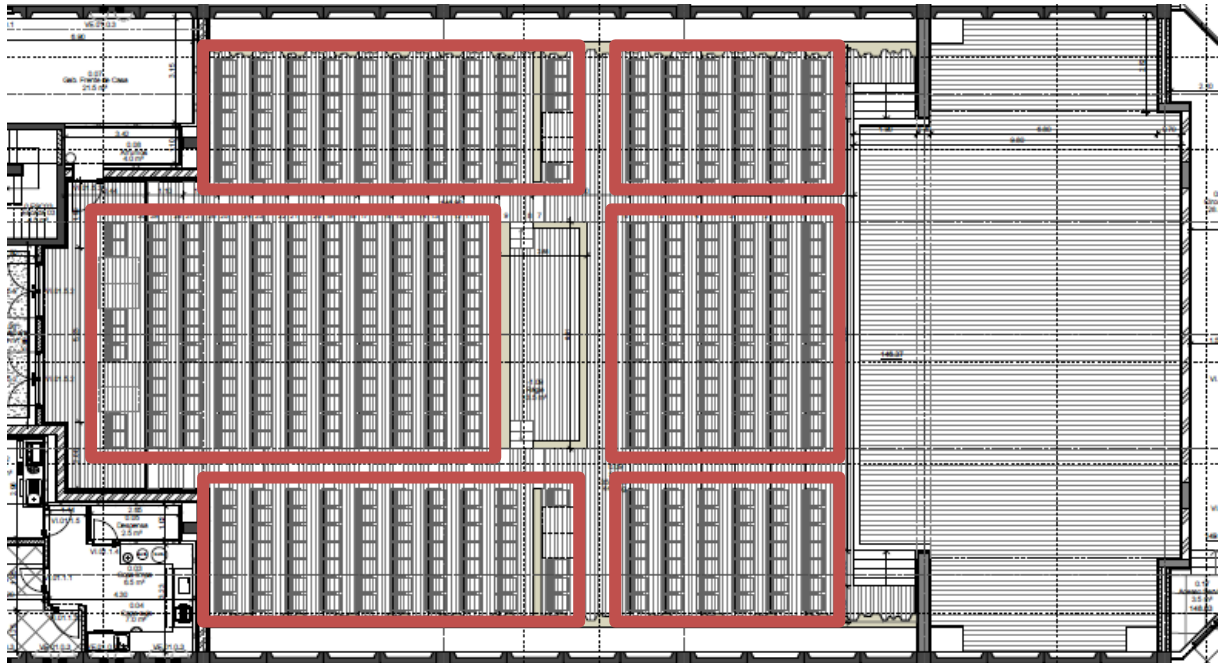


Figura 5.2- Secções de área de cadeiras ocupadas [28]

Como seria de esperar, os valores de tempo de reverberação médio para as frequências de 500, 1000 e 2000 Hz diminuíram, conseqüentemente à adição de uma faixa de absorção sonora correspondente à lotação da plateia, evidenciada pela figura 5.3. Neste caso, houve uma diminuição de 1 para 0,94

segundos. No contexto legislativo, mesmo sem a incerteza de medição aplicada de 35% do valor do tempo de reverberação medido, o valor de tempo de reverberação previsto encontra-se bastante perto dos 0,93 segundos regulamentados no RRAE. Ou seja, no contexto prático de assistência a um espetáculo, o tempo de reverberação é adequado ao propósito da sala.

Por outro lado, a diferença de valores de tempos de reverberação com a sala lotada e a sala vazia é relativamente baixa. Portanto, quer em contexto de espetáculo (com sala lotada), quer em contexto de ensaio (com a sala vazia), as características relativas à reverberação da sala permanecem constantes, permitindo a preparação do espetáculo ou evento, independentemente da ocupação da sala.

No quadro 5.6 está retratada uma análise à adequabilidade do parâmetro de tempo de reverberação ao propósito acústico da sala, tendo em conta a previsão de valores obtidos para este parâmetro num cenário de lotação da sala de espetáculos. Como se pode verificar, com o aumento da área de absorção sonora, os valores de tempo de reverberação ficam mais próximos dos valores ideais, sendo, pelo menos, aceitáveis para todas as atividades com foco na qualidade da inteligibilidade da palavra.

Quadro 5.4- Parâmetros usados para cálculo do tempo de reverberação com a sala lotada

Parâmetros						
Área Plateia (m ²)	320					
Volume (m ³)	3915					
Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α (cadeira vazia)	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
α (cadeira ocupada)	0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86
$\Delta\alpha$	0,12	0,11	0,12	0,13	0,18	0,24
$\Delta\alpha \times S$ (m ²)	38,4	35,2	38,4	41,6	57,6	76,8

Quadro 5.5- Valores calculados da previsão de tempos de reverberação para a sala lotada para cada banda de oitava dos 125 aos 4000 Hz

Frequência (Hz)	Média TR medido(s)	A inicial (m ²)	A total (m ²)	Previsão de TR (s)	Previsão de TR médio (500/1000/2000 Hz) (s)
125	1,27	493	531	1,18	
250	1,03	608	643	0,97	
500	0,88	712	750	0,83	0,94
1000	1,05	597	639	0,98	
2000	1,06	591	649	0,97	
4000	0,99	633	710	0,88	

Quadro 5.6- Comparação dos valores ideais da previsão do tempo de reverberação com a sala lotada (500-1000 Hz) em função do propósito de utilização da sala [1]

Tipo de Uso	Tempos de reverberação ideais (500-1000 Hz) (s)	Comparação com a previsão TR do TMO lotado ($T_{500-1000 \text{ Hz}} = 0,91 \text{ s}$)
Conferências	0,9 – 1,1	Adequado
Cinema	0,8 – 1,0	Adequado
Teatro	0,7 – 0,9	Adequado
Auditórios Escolares	1,5 – 1,8	Não adequado
Auditórios com propósitos gerais	1,6 – 1,8	Não adequado
Auditório (palavra)	0,7 – 0,8	Aceitável
Música popular	0,8 – 1,0	Adequado
Música sinfónica Barroca	1,4 – 1,6	Não adequado
Música sinfónica Clássica	1,6 – 1,8	Não adequado
Música sinfónica Romântica	1,9 – 2,2	Inaceitável
Música sinfónica Moderna	1,4 – 1,9	Não adequado
Ópera não wagneriana	1,3 – 1,7	Não adequado
Ópera wagneriana	1,8 – 1,9	Inaceitável
Coros gregorianas	3,0 – 4,0	Inaceitável

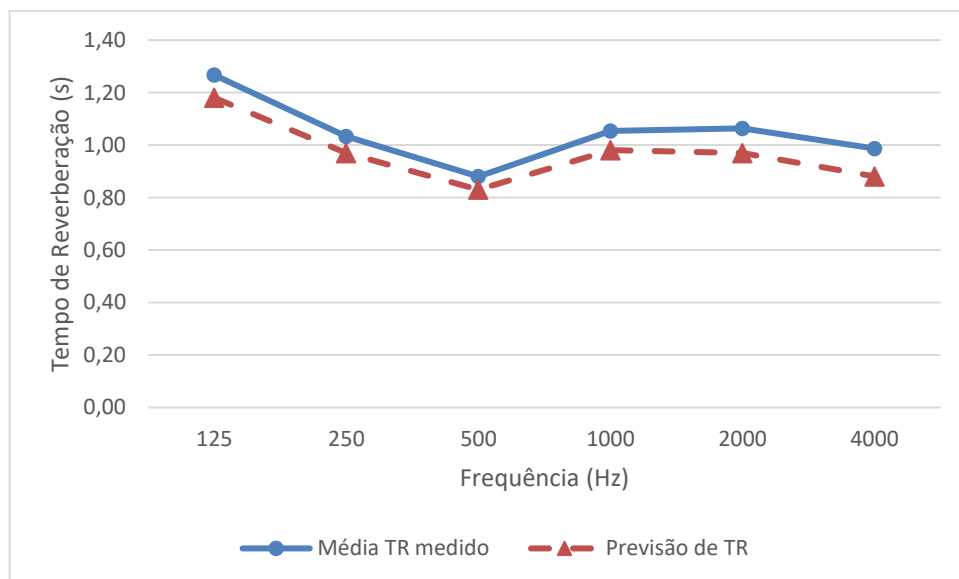


Figura 5.3- Tempos de Reverberação com a sala vazia e a sala lotada para cada banda de 1/1 oitava dos 125 aos 4000 Hz

5.3. RUÍDO DE FUNDO

Nos quadros 5.7. e 5.8. estão registados os valores de ruído de fundo com AVAC desligado e ligado (respetivamente), para cada valor de banda de frequência de terço de oitava, e os valores calculados da média logarítmica dos níveis de ruído de fundo para cada um dos dois pontos distintos de medição.

O quadro 5.9. é referente à comparação dos valores das médias logarítmicas dos níveis do ruído de fundo obtidos aquando do funcionamento dos sistemas AVAC em todos os pontos de medição, com os valores regulamentados no RRAE. Através da análise deste quadro, mesmo após a aplicação de uma incerteza associada de 3 dB, prevista no regulamento, pode-se aferir o nível sonoro do ruído de fundo com os sistemas AVAC ligados ultrapassa o valor regulamentado, não cumprindo com o RRAE.

As figuras 5.4 e 5.5 são referentes à representação gráfica dos valores médios apresentados nos quadros 5.7 e 5.8, sobre os níveis de ruído de fundo medidos pela banda de frequências de terços de oitava com AVAC desligado e ligado, respetivamente.

A partir dessas figuras, pode-se aferir que o ruído de fundo é relativamente uniforme ao longo de toda a sala, dado que os valores medidos nos dois lugares distintos da sala de espetáculos são semelhantes entre eles, não havendo uma discrepância entre a zona mais próxima do palco e a zona mais afastada do palco. Além disso, não parece existir um ruído pontual próximo de algum local, mostrando um eficiente isolamento acústico ao longo de toda a sala, inclusivamente nas portas de entrada e de palco.

A figura 5.6 é referente à representação gráfica e comparativa das médias logarítmicas entre os dois lugares da sala dos níveis sonoros de ruído de fundo, com o AVAC desligado e ligado. A partir desta disposição de dados, é possível realizar uma análise comparativa entre os dois cenários de produção de ruído de fundo e aferir a existência de um aumento do nível de pressão sonora do ruído de fundo com a utilização dos sistemas AVAC da sala. Este aumento é pejorativo para a concretização do propósito artístico da sala, não se revelando, inclusivamente, em conformidade com o RRAE.

Na mesma análise comparativa, a média energética do L_{Aeq} com os sistemas AVAC ligados é cerca de três vezes superior à média energética com os sistemas AVAC desligados (diferença de 10,6 dB).

A figura 5.7 também é referente à representação gráfica e comparativa das médias logarítmicas entre os dois lugares da sala dos níveis sonoros de ruído de fundo, com os sistemas AVAC desligados e ligados, mas ponderados segundo o Filtro A. A partir deste gráfico, podemos aferir que existe um ruído incomodativo para algumas bandas de baixas frequências, como entre os 40 e os 80 Hz, e para as frequências entre os 100 e os 2000 Hz.

A figura 5.8 representa graficamente a diferença entre os valores médios das medições de nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) com AVAC ligado e desligado da sala de espetáculos do TMO, por bandas de frequência de 1/3 de oitava (Hz), dos 20 aos 20000 Hz. A partir desta figura, pode-se verificar o concluído na figura 5.7, com a deteção de uma maior diferença de nível de pressão sonora do ruído de fundo para as baixas frequências, que colmata a ponderação do filtro A e que, por isso, constituem um ruído de fundo relevante para o caso em estudo.

Quadro 5.7- Resultados das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) na sala de espetáculos do TMO com o AVAC desligado, nos diferentes pontos de medição e a média energética das mesmas para as bandas de frequência de 1/3 de oitava, dos 20 aos 20000 Hz e os valores de nível de pressão sonora contínuo equivalente de cada ponto medido sem a ponderação do filtro A (L_{eq}) e com a ponderação do filtro A (L_{Aeq})

$L_{ruído\ de\ fundo\ (dB)\ sem\ AVAC}$			
Frequência (Hz)	Ponto de Medição (lugar)		Média Energética
	B1	N19	
20	43,4	40,7	42,3
25	38,3	39,4	38,9
31,5	44,7	43,1	44,0
40	42,7	40,0	41,6
50	41,5	39,0	40,4
63	32,6	32,6	32,6
80	23,6	24,6	24,1
100	19,3	19,9	19,6
125	18,9	18,7	18,8
160	19,3	20,8	20,1
200	21,5	22,7	22,1
250	18,7	18,5	18,6
315	15,4	16,1	15,8
400	16,0	16,6	16,3
500	14,3	15,3	14,8
630	14,9	14,2	14,6
800	12,8	12,5	12,7
1k	12,5	12,3	12,4
1,25k	11,7	11,7	11,7
1,6k	11,5	11,0	11,3
2k	10,4	10,2	10,3
2,5k	8,5	8,7	8,6
3,15k	8,4	8,0	8,2
4k	8,4	8,2	8,3
5k	9,5	8,6	9,1
6,3k	8,4	8,4	8,4
8k	8,6	8,5	8,6
10k	9,0	8,8	8,9
12,5k	8,9	9,0	9,0
16k	9,0	9,0	9,0
20k	10,6	10,6	10,6
L_{eq}	56,1	52,3	54,6
L_{Aeq}	24,0	23,9	24,0

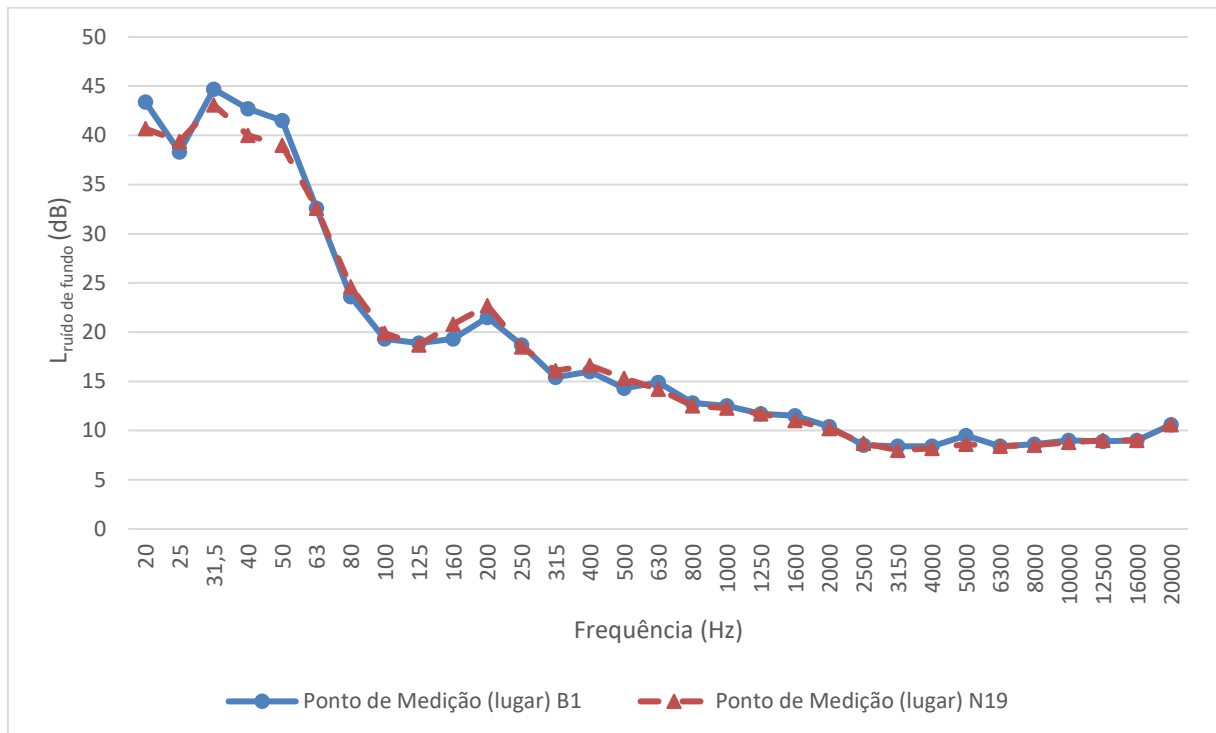


Figura 5.4- Valores das medições de nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) pelos pontos de medição da sala de espetáculos do TMO por bandas de frequência de 1/3 de oitava (Hz), dos 20 aos 20000 Hz, com o AVAC desligado

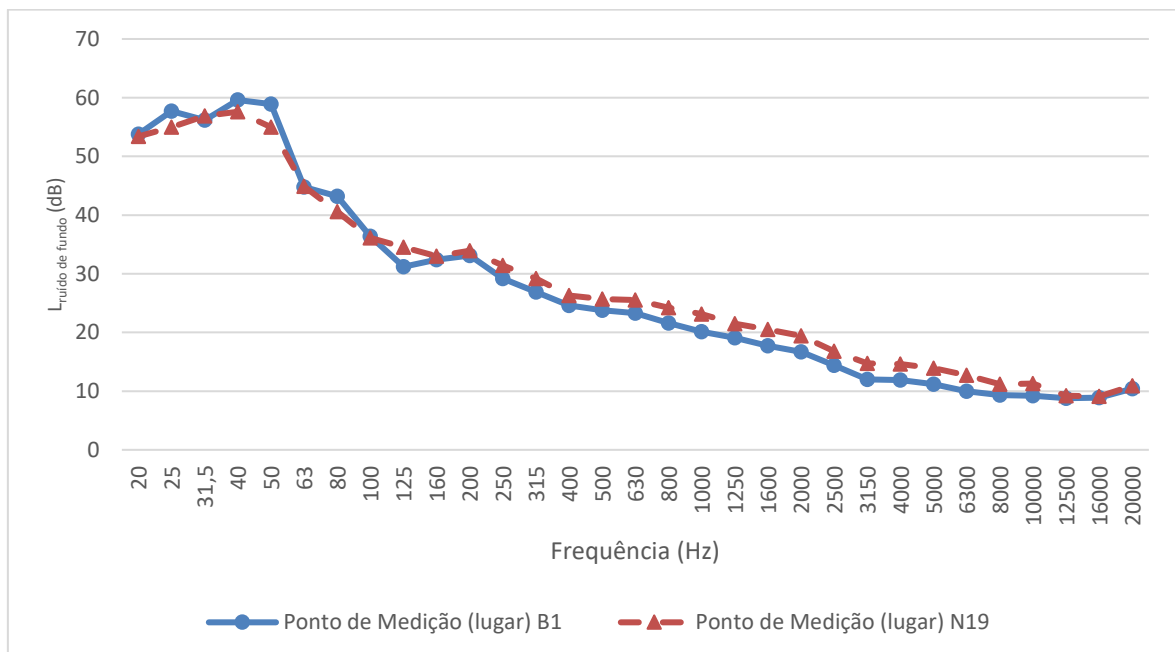


Figura 5.5- Valores das medições de nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) pelos pontos de medição da sala de espetáculos do TMO por bandas de frequência de 1/3 de oitava (Hz), dos 20 aos 20000 Hz, com o AVAC ligado

Quadro 5.8- Resultados das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) na sala de espetáculos do TMO com o AVAC desligado, nos diferentes pontos de medição e a média energética das mesmas para as bandas de frequência de 1/3 de oitava, dos 20 aos 20000 Hz e os valores de nível de pressão sonora contínuo equivalente de cada ponto medido sem a ponderação do filtro A (L_{eq}) e com a ponderação do filtro A (L_{Aeq})

L_{ruído de fundo} (dB) com AVAC			
Frequência (Hz)	Ponto de Medição (lugar)		Média Energética
	B1	N19	
20	53,8	53,4	53,6
25	57,7	55,0	56,6
31,5	56,2	56,9	56,6
40	59,6	57,6	58,7
50	58,9	55,0	57,4
63	44,8	44,9	44,9
80	43,2	40,6	42,1
100	36,4	36,1	36,3
125	31,2	34,5	33,2
160	32,4	33,0	32,7
200	33,1	33,9	33,5
250	29,2	31,4	30,4
315	26,9	29,2	28,2
400	24,6	26,3	25,5
500	23,8	25,7	24,9
630	23,3	25,5	24,5
800	21,6	24,2	23,1
1k	20,1	23,1	21,9
1,25k	19,1	21,5	20,5
1,6k	17,7	20,5	19,3
2k	16,7	19,4	18,3
2,5k	14,4	16,8	15,8
3,15k	12,0	14,7	13,6
4k	11,9	14,6	13,5
5k	11,2	13,9	12,8
6,3k	10,0	12,7	11,6
8k	9,3	11,2	10,4
10k	9,2	11,3	10,4
12,5k	8,8	9,2	9,0
16k	8,9	9,1	9,0
20k	10,4	10,9	10,7
L_{eq}	67,2	66,7	67,0
L_{Aeq}	34,4	34,8	34,6

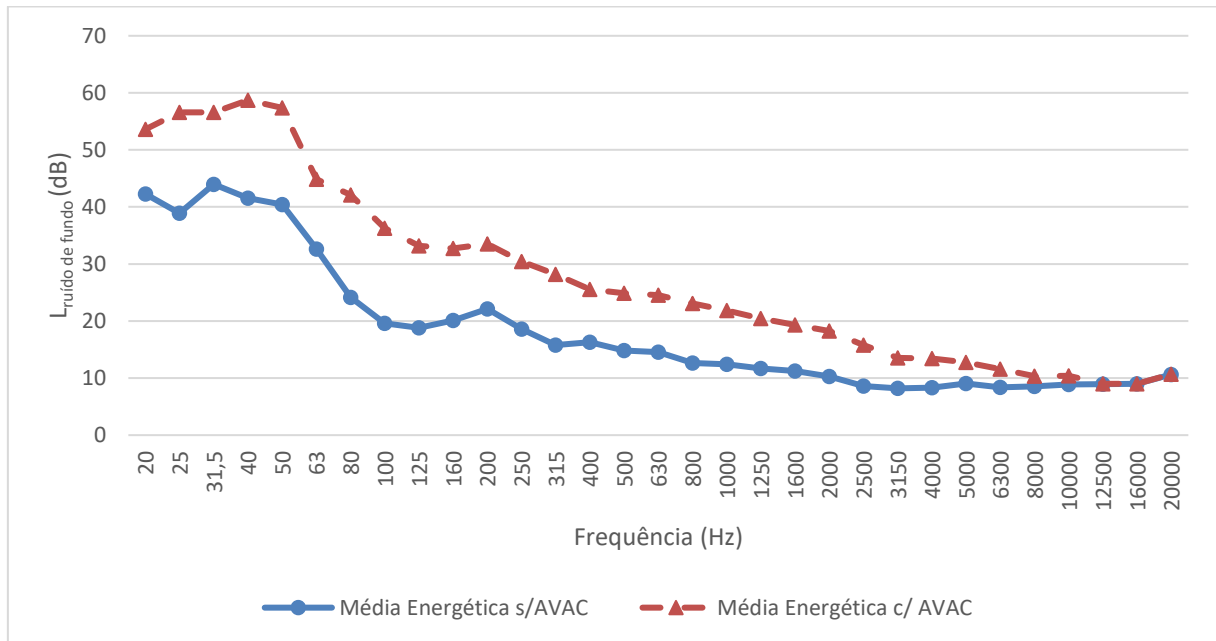


Figura 5.6- Valores médios das medições de nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) da sala de espetáculos do TMO por bandas de frequência de 1/3 de oitava (Hz), dos 20 aos 20000 Hz, com o AVAC ligado e desligado

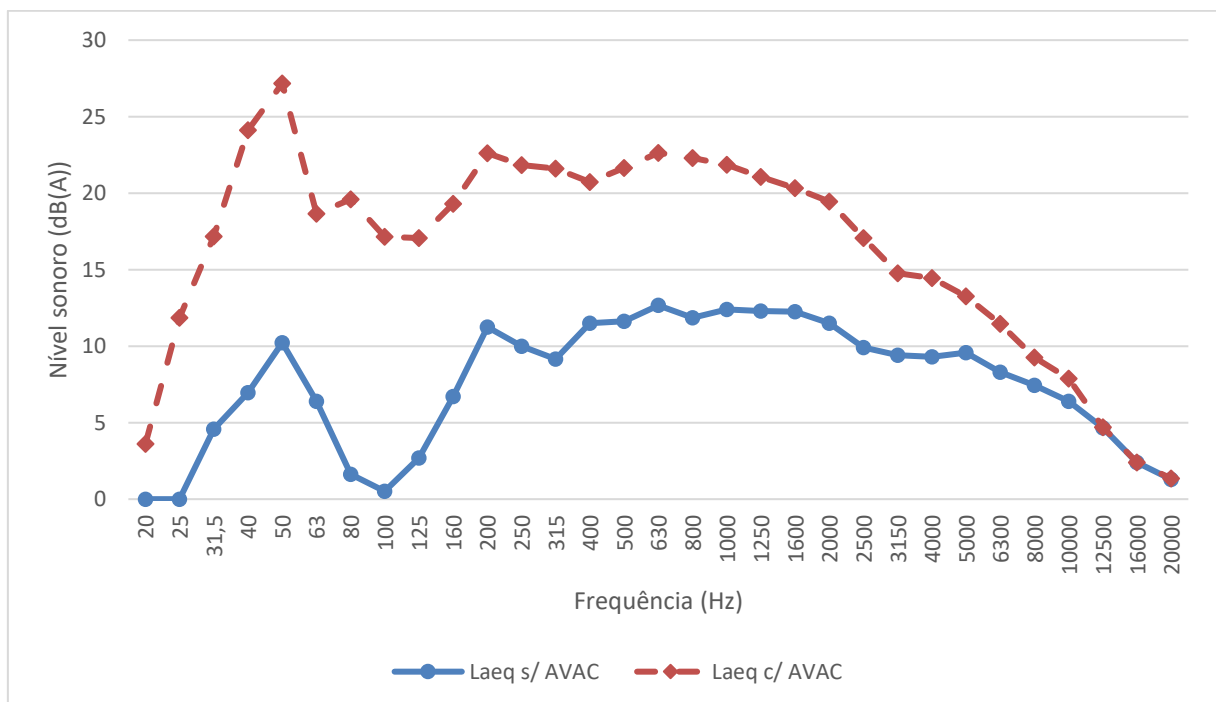


Figura 5.7- Variação dos níveis de pressão sonora com filtro A, L_{Aeq} em dB, por banda de frequência de um terço de oitava dos 20 aos 20000 Hz, com e sem AVAC

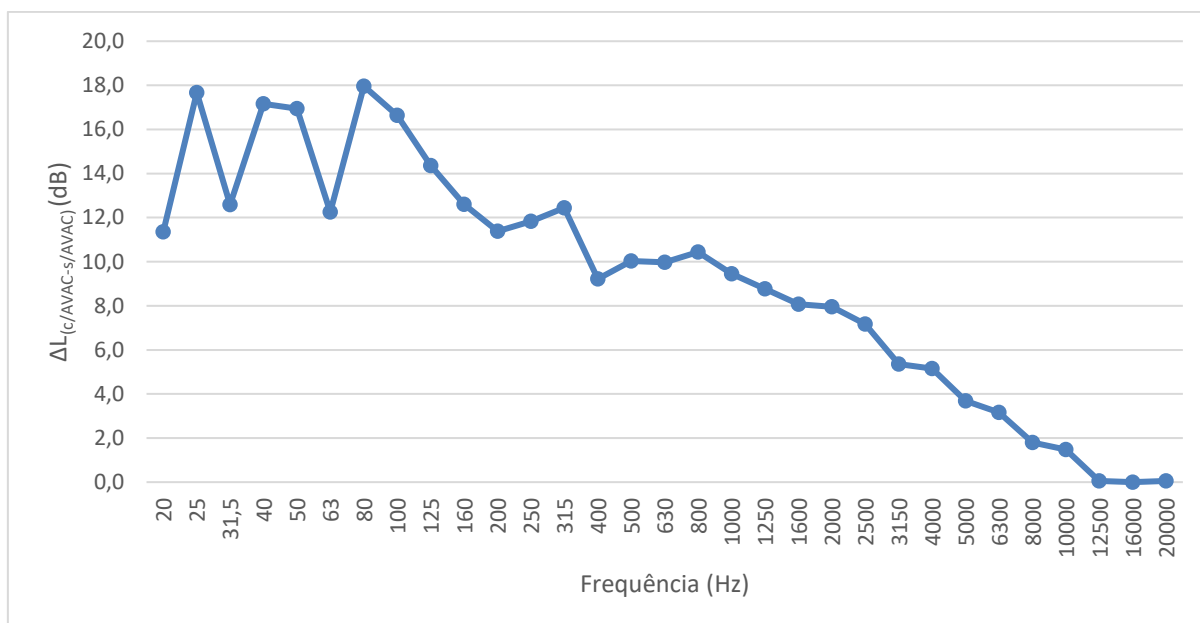


Figura 5.8- Diferença entre os valores médios das medições de nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) com AVAC ligado e desligado da sala de espetáculos do TMO, por bandas de frequência de 1/3 de oitava (Hz), dos 20 aos 20000 Hz

Quadro 5.9- Valores dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo equivalentes com o AVAC ligado, valores regulamentados e análise comparativa sobre o cumprimento dos valores medidos com o RRAE [23]

L_{Aeq}	Valor (dB)		Comparação com o RRAE
Regulamentar	Auditórios exceto cinema	$\leq 30,0$	Não Cumpre
Média Energética	AVAC	35	
Média Energética com Incerteza Associada	AVAC	32	

5.4. CURVAS DE INCOMODIDADE

Como já abordado, as curvas NC (*Noise Criterion*) e NR (*Noise Rating*) são critérios de conforto acústico, que permitem avaliar a incomodidade sonora consequente ao funcionamento de equipamentos da sala ou de ruído de fundo. Deste ruído de fundo proveniente do funcionamento de equipamentos da sala, releva-se o ruído resultante do funcionamento dos equipamentos de climatização da sala (AVAC). A partir desta avaliação, determina-se objetivamente o incómodo causado por estes ruídos para a inteligibilidade do discurso e da comunicação na sala e determinação da favorabilidade do ambiente para o propósito artístico da sala.

Assim, nas figuras 5.9 e 5.10 foram sobrepostos os valores médios do nível de pressão sonora do ruído de fundo da sala com AVAC ligado às curvas NC e NR. A partir dessa sobreposição gráfica,

determinou-se o valor de NC e de NR e comparou-se estes valores com os recomendados para o propósito da sala em estudo, como descrito nas tabelas 5.9 (para o NC) e 5.10 (para o NR).

As curvas de NC compreendem-se nas bandas de frequência de terço de oitava dos 63 aos 8000 Hz, os das curvas NR dos 31,5 aos 8000 Hz.

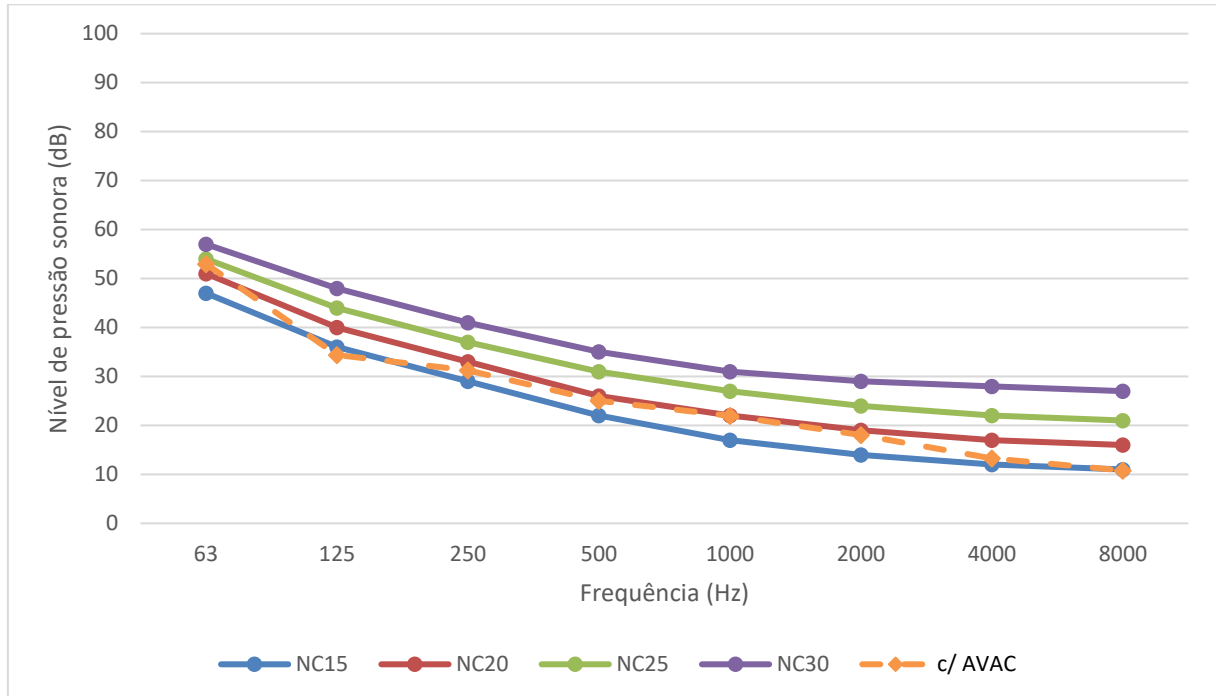


Figura 5.9- Comparação dos valores dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo equivalentes com o AVAC ligado com as curvas NC

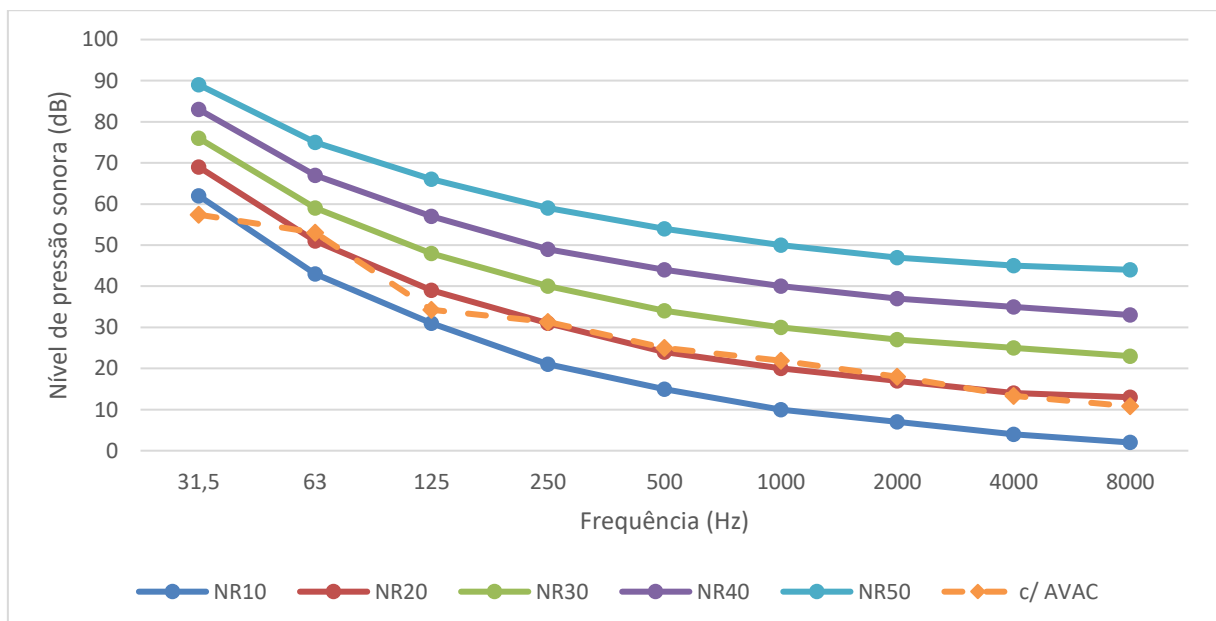


Figura 5.10- Comparação dos valores dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo equivalentes com o AVAC ligado com as curvas NR

Quadro 5.10- Valores máximos recomendados do índice de NR [13]

Tipo de Sala	Valor limite máximo <i>Noise Rating</i>	NR Sala (AVAC ligado)	Comparação com valores recomendados
Residências Particulares, Hospitais, teatros, cinemas e salas de conferências	NR-30	NR-25	Cumpre

Quadro 5.11- Valores máximos recomendados do índice de NC [1]

Tipo de Sala	Valor limite máximo <i>Noise Criteria</i>	NC Sala (AVAC ligado)	Comparação com valores recomendados
Pequenos Auditórios, teatros, salas de ensaio para música, grandes salas de reuniões, salas de teleconferência, instalações de audiovisual, grandes salas de conferências, escritórios executivos, capelas, tribunais e pequenas igrejas	NC-20 até NC-30	NC-24	Cumpre

5.5. RASTI

Os valores do parâmetro de RASTI foram obtidos pela média de três medições feitas em cada um dos seis pontos de medição assumidos, como descrito no capítulo 4, sendo que essa média é a usada para a avaliação objetiva deste parâmetro. No quadro 5.12 está relacionada a qualidade da inteligibilidade da palavra com os valores de RASTI, dando uma percepção objetiva dos valores medidos.

Os valores medidos de RASTI encontram-se dispostos no quadro 5.13.

O valor mínimo de RASTI obtido foi de 0,62 e o valor máximo de 0,82, assinalados no quadro 5.13.

O valor máximo corresponde ao valor medido no lugar mais próximo e central do palco e usufrui de uma qualidade de inteligibilidade da palavra excelente. Isto é lógico, uma vez que, dos pontos de medição assumidos, é o lugar mais próximo da fonte sonora colocada no palco (B1).

O valor mínimo corresponde ao ponto de medição mais afastado e menos centrado em relação à fonte sonora, dentre os pontos de medição assumidos na sala. Esse lugar será o menos provido da contribuição direta de ondas sonoras a partir da fonte sonora. No entanto, usufrui igualmente de uma “boa” qualidade de inteligibilidade da palavra, dependente de várias reflexões das ondas sonoras ao longo de todo o composto de superfícies dispostas na sala.

A qualidade da inteligibilidade da palavra ao longo da sala é “boa”, sendo que os lugares das filas mais próximas do palco podem até usufruir de uma excelente qualidade e adequada para o propósito da sala.

Quadro 5.12- Relação entre a a qualidade da inteligibilidade da palavra com os valores de RASTI [22]

Relação RASTI com a inteligibilidade da Palavra	
Qualidade da Inteligibilidade da Palavra	RASTI
Má	< 0,32
Pobre	0,32 – 0,45
Razoável	0,46 – 0,60
Boa	0,61 – 0,75
Excelente	≥ 0,76

Quadro 5.13- Valores do parâmetro RASTI medidos na sala de espetáculos do TMO

RASTI						
Posição			Medição			
Fila	Lugar	Ponto	1	2	3	Média
B	1	R1	0,82	0,81	0,83	0,82
	15	R2	0,71	0,72	0,70	0,71
F	1	R3	0,70	0,70	0,70	0,70
	15	R4	0,64	0,65	0,66	0,65
J	1	R5	0,68	0,69	0,67	0,68
	15	R6	0,68	0,67	0,67	0,67
P	1	R7	0,67	0,66	0,65	0,66
	15	R8	0,62	0,63	0,62	0,62

5.6. COMPARAÇÃO COM OUTRAS SALAS

5.6.1. COMPARAÇÃO COM OUTRAS SALAS

A partir da comparação dos valores dos parâmetros medidos na caracterização acústica do TMO com os de outras salas, o presente subcapítulo pretende referenciar uma visão prática e mais correspondente à realidade da qualidade geral das salas de espetáculo, a fim de permitir averiguar a qualidade da sala em estudo. Além disso, esta comparação permite dispor uma perspetiva global da eficácia da implementação de medidas acústicas neste tipo de salas.

Para este propósito, usou-se os valores medidos noutras salas de espetáculo, constados noutras teses semelhantes à presente tese, sobre a caracterização acústica de salas, nomeadamente o Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares, V.N. Gaia) [29], o Centro de Congressos do Altice Fórum Braga (pequeno e grande auditório) [30], Centro de Artes de Águeda [31], Auditório da FEUP (Asprela,

Porto) [32], Cineteatro de Esmoriz [33] e o Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra) [34].

5.6.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

No quadro 5.14 estão dispostos os valores de tempo de reverberação médios de oito salas para as bandas de frequência de 1/1 oitava, dos 500 aos 2000 Hz, em paralelo com informações sobre os volumes das salas estudadas.

De denotar que, uma vez que na altura de medição do tempo de reverberação do Cineteatro de Esmoriz a sala se encontrava por mobilar, o tempo de reverberação utilizado para a presente análise é uma previsão, calculada pela fórmula de Sabine, considerando o projeto de mobilação da sala e a colocação dos acabamentos nos elementos estruturantes da obra. A consideração da previsão do tempo de reverberação do cineteatro de Esmoriz, perante o projeto de mobilação e acabamento da sala, é de importância vinculada perante a análise comparativa com as outras salas. À concretização do projeto de mobilação da sala de Esmoriz, as superfícies da mobília da sala atuariam como um fator de absorção sonora significativo, a ter em conta nos valores obtidos.

Através do quadro 5.14, pode-se aferir que o maior tempo de reverberação é correspondente ao das salas com maior volume, o Grande Auditório do Convento de S. Francisco (volume de 12000 m³ e TR de 1,52 s) e o Grande Auditório do Altice Fórum Braga (volume de 9150 m³ e TR de 1,52 s), e o menor ao do Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga (0,47 segundos). Tendo em conta a expressão de Sabine sobre o tempo de reverberação, os valores máximo e mínimo são espectáveis, perante o volume das salas em questão (que são as maiores e as menores, entre todas as salas incluídas no quadro comparativo).

O tempo de reverberação médio mais baixo é espectável, uma vez que é correspondente ao tempo de reverberação da sala com o menor volume.

Perante estes valores, denota-se uma relação logarítmica para o tempo de reverberação médio crescente em função do aumento de volume da sala, corroborada pela figura 5.12, com uma linha de tendência assinalada com um coeficiente de correlação de 0,60. Apesar de não ser muito alto, tendo em conta o possível desvio de valores da sala de Esmoriz, o coeficiente de correlação é significativamente relevante.

A figura 5.11 traduz visualmente os valores de tempo de reverberação para a gama de frequências de 1/3 de oitava, dos 100 aos 5000 Hz. A partir desta figura, pode-se constatar o disposto no quadro 5.14. Além disso, encontra-se os valores de tempo de reverberação do TMO como valores médios, entre todos os valores de tempo de reverberação das salas em estudo.

Quadro 5.14- Auditórios em estudo com respetivos volumes, tempos de reverberação médios para as bandas de frequência de 500, 1000 e 2000 Hz e tempos de reverberação médios de cada uma dessas frequências [29] [30] [31] [32] [33] [34]

Auditório	Volume (m³)	TR [500, 1k, 2k] (s)	TR médio (s)
Teatro Municipal de Ourém	3915	0,88	1,00
		1,05	
		1,06	
Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra)	12000	1,47	1,52
		1,55	
		1,55	
Cineteatro de Esmoriz (Valor Previsto se Mobilado)	8574	1,32	1,40
		1,39	
		1,48	
Centro de Artes de Águeda	5066	0,78	0,84
		0,88	
		0,85	
Auditório da FEUP	3317	1,50	1,40
		1,40	
		1,20	
Pequeno Auditório do Altice Fórum de Braga	1320	0,43	0,47
		0,50	
		0,47	
Grande Auditório do Altice Fórum de Braga	9150	1,04	1,52
		1,01	
		0,99	
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares)	2111	1,10	1,12
		1,09	
		1,18	

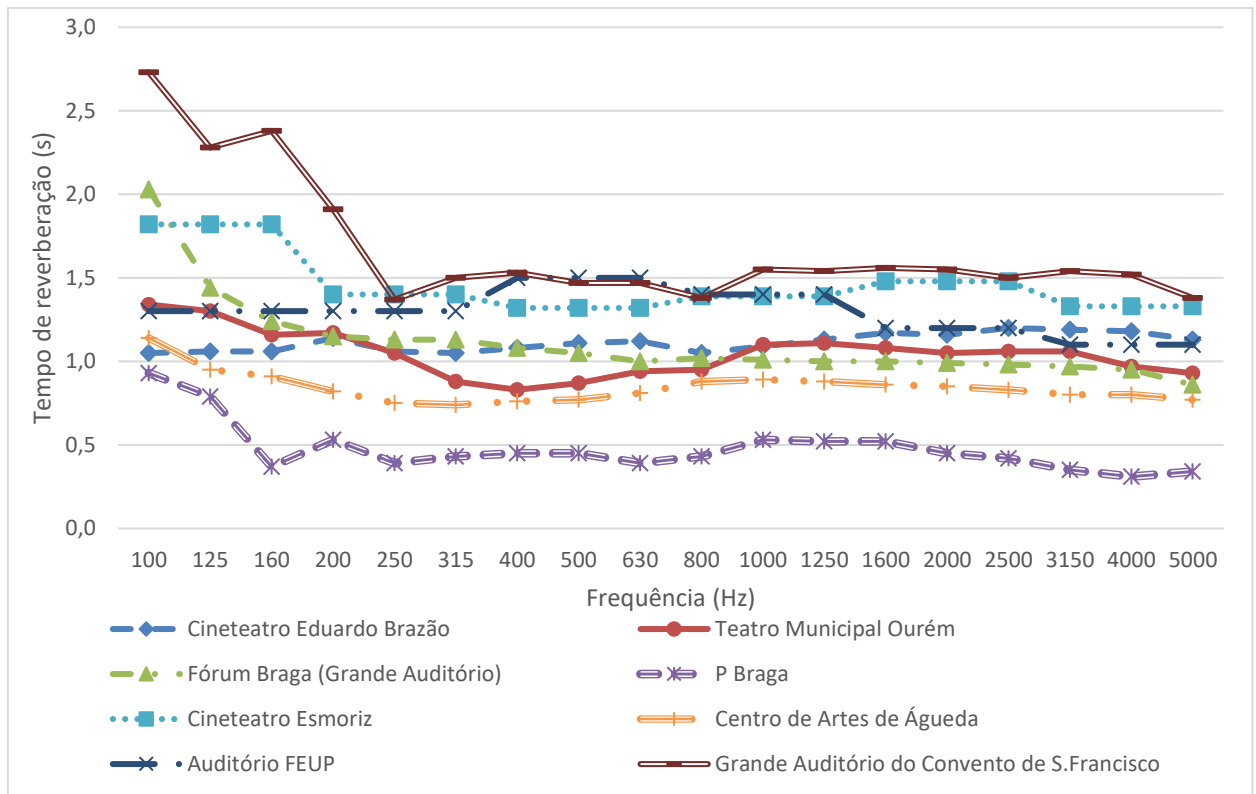


Figura 5.11- Comparação do tempo de reverberação das várias salas em estudo para as bandas de frequência de 1/3 de oitava, dos 100 aos 5000 Hz [29] [30] [31] [32] [33] [34]

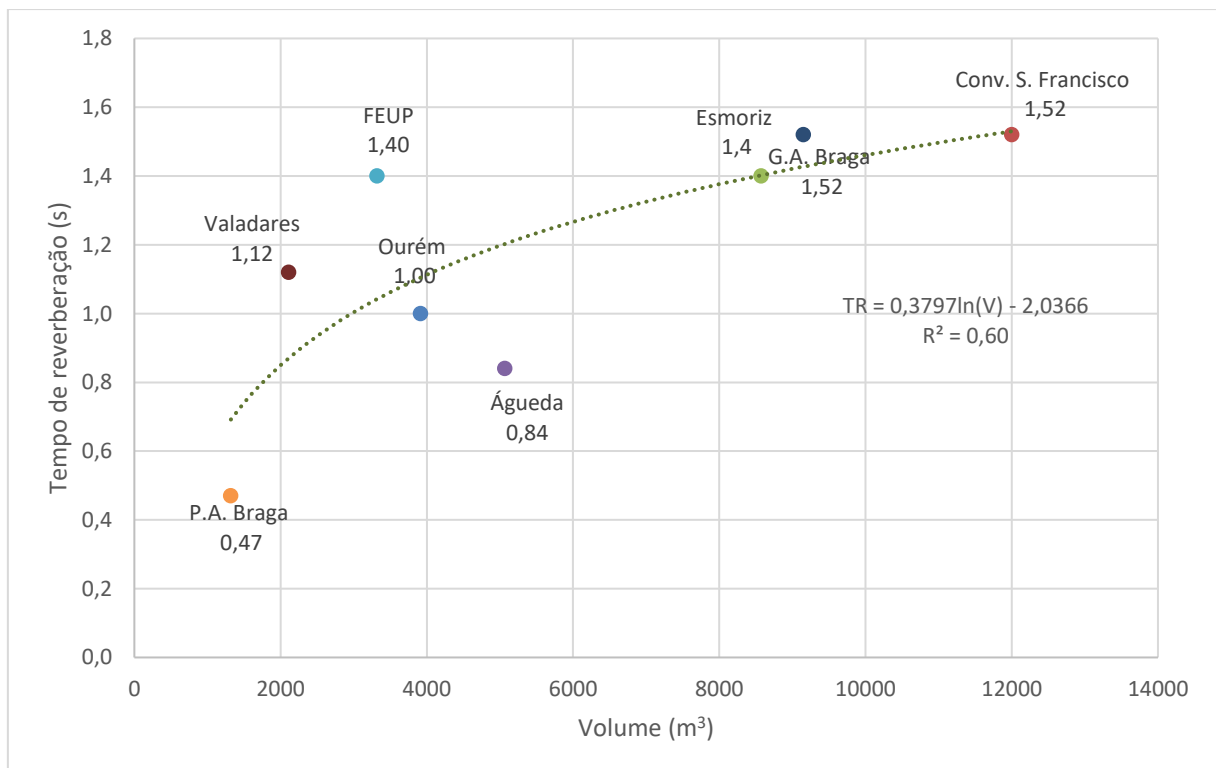


Figura 5.12- Comparação dos valores de tempo de reverberação médio das várias salas em análise para as bandas de frequência de 1/1 oitava entre os 500 e os 2000 Hz, em função do volume das salas [29] [30] [31] [32] [33] [34]

5.6.3. RUÍDO DE FUNDO, NOISE CRITERIA E NOISE RATING

As figuras 5.13 e 5.14 são referentes à representação gráfica dos valores médios das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo das várias salas, com os sistemas AVAC desligados e ligados, respetivamente. Esta representação permite uma análise comparativa intuitiva sobre o parâmetro de ruído de fundo.

A disposição dos valores de nível de pressão sonora do ruído de fundo está em função de uma gama de frequências dos 20 aos 8000 Hz, em bandas de 1/3 de oitava, por configuração dos aparelhos e *softwares* usados para as medições. No entanto, de referir que as medições do Auditório da FEUP foram realizadas em bandas de 1/1 oitava para as frequências entre os 20 e os 16000 Hz e as do Altice Fórum Braga em bandas de 1/3 de oitava dos 100 aos 5000 Hz. Para efeitos comparativos, distribuiu-se os valores das medições do Auditório da FEUP por bandas de 1/3 de oitava pela repetição dos valores 1/1 oitava pelas bandas de 1/3 de oitava adjacentes a essas frequências centrais, ficando com a média logarítmica dos valores de 1/3 de oitava igual aos valores de 1/1 oitava.

O Cineteatro de Esmoriz não está incluído nesta comparação, uma vez que não realizaram medições do parâmetro de ruído de fundo.

Entre as figuras 5.13 e 5.14, constata-se uma subida de nível de ruído de fundo significativa para todos as salas em estudo, espetável e referente ao ruído de funcionamento dos sistemas AVAC.

A figura 5.14 evidencia uma discrepância visual, entre a série de dados do auditório da FEUP e as restantes salas, sendo que o auditório padece de um maior nível de pressão sonora de ruído de fundo, relativa ao funcionamento dos equipamentos AVAC presentes nessa sala. O TMO, apesar de na figura 5.13 se encontrar em valores médios de nível de ruído de fundo sem AVAC (e até entre os mais baixos), na figura 5.14 encontra-se em valores superiores, mas dentro da disposição média das séries de valores das outras salas.

No quadro 5.15 encontra-se os valores de níveis sonoros médios de ruído de fundo com AVAC ligado das várias salas de espetáculo, assim como os valores do índice NC e NR.

Neste quadro verifica-se que os auditórios não cumprem, na sua generalidade, o RRAE, que limita em 30 dB(A) os valores de nível sonoro do ruído de fundo. No entanto, aplicada a incerteza de 3 dB(A), apenas as salas do Teatro Municipal de Ourém, do Grande Auditório do Altice Fórum Braga, do Auditório da FEUP e do Cineteatro Eduardo Brazão é que não cumprem o regulamento. No entanto, o Cineteatro Eduardo Brazão, se se reger pelo limite regulamentado para cinemas de 38 dB(A), cumpre o regulamento estabelecido. Além disso, o valor mínimo de nível sonoro do ruído de fundo com o AVAC ligado é o Grande Auditório do Convento de S. Francisco (30 dB(A)), e o valor máximo será o Auditório da FEUP (41 dB(A)), com uma diferença de 11 dB(A), que corresponderá quase ao “quíntuplo” do ruído. O TMO é o terceiro maior valor de ruído de fundo.

O valor do índice NC mínimo é o do Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga (NC-18) e o máximo é o do Auditório da FEUP (NC-37). Da mesma forma, o valor do índice NR mínimo é o do Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga (NR-20) e o máximo é o do Auditório da FEUP (NC-39). O TMO encontra-se na média de valores de índice NC e NR. Dentre estas salas, as que não se encontram dentro dos valores ideais são os índices de NC do Grande Auditório do Altice Fórum Braga (cujo limite seria NC-20 para grandes auditórios) e os NC e NR do Auditório da FEUP (cujos limites seriam NC-30 e NR-30).

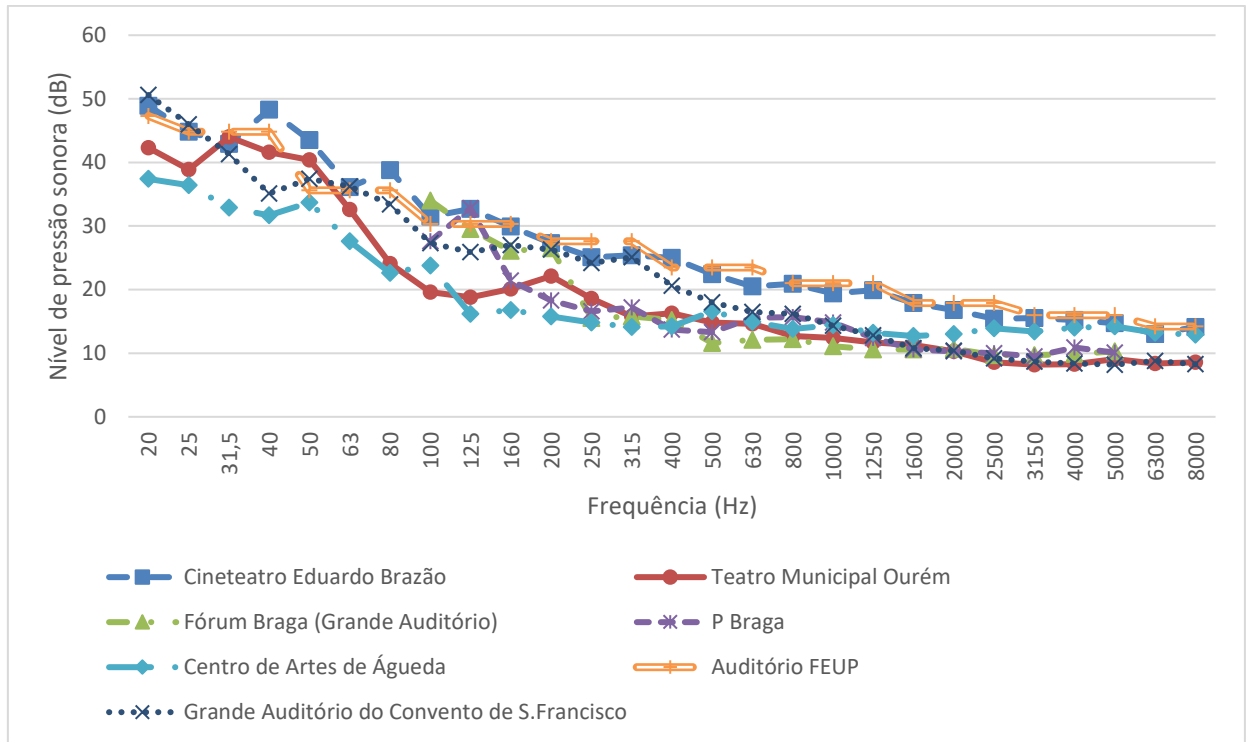


Figura 5.13- Valores médios das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) nas salas em análise por bandas de 1/3 de oitava (Hz), dos 12,5 aos 8000 Hz, com AVAC desligado [29] [30] [31] [32] [33] [34]

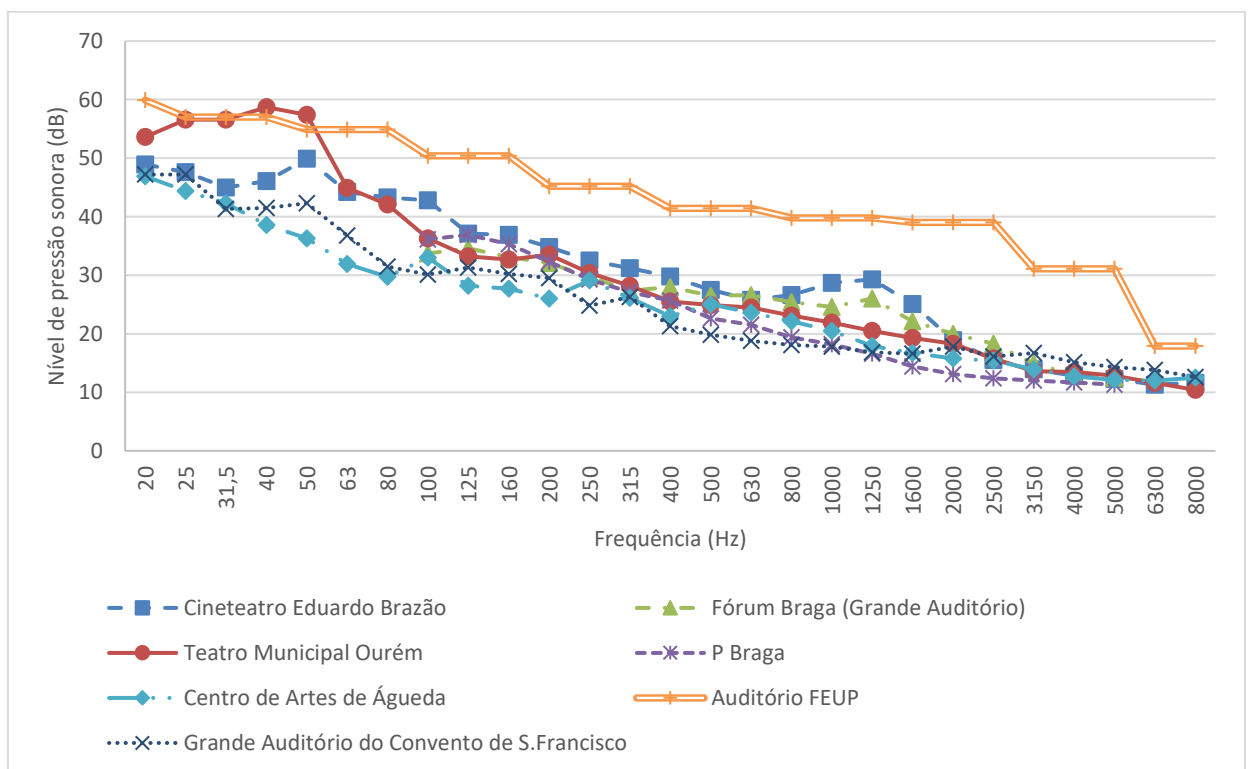


Figura 5.14- Valores médios das medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB) nas salas em análise por bandas de 1/3 de oitava (Hz), dos 12,5 aos 8000 Hz, com AVAC ligado [29] [30] [31] [32] [33] [34]

Quadro 5.15- Valores de níveis de pressão sonora médios de ruído de fundo equivalentes com AVAC ligado e correspondentes valores dos índices de NC e NR [29] [30] [31] [32] [33] [34]

Auditório	com AVAC		
	L _{Aeq} (dB)	NC	NR
Teatro Municipal de Ourém	35	24	25
Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra)	30	19	21
Grande Auditório Altice Fórum Braga	34	23	25
Pequeno Auditório Altice Fórum Braga	31	18	20
Centro de Artes de Águeda	31	25	27
Auditório FEUP	41	37	39
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares)	37	28	28
Δ (melhor-pior)	11	19	19

O quadro 5.16 é referente aos valores de níveis sonoros médios de ruído de fundo com AVAC desligado e às diferenças entre os valores médios de níveis de pressão sonora de ruído de fundo com os equipamentos AVAC ligado e os valores com os equipamentos AVAC desligado. A partir destes valores, pode-se constatar que o TMO tem o mínimo ruído de fundo (24 dB(A)), com o equipamento AVAC desligado, e o Cineteatro Eduardo Brazão o máximo valor de ruído (32 dB(A)). Existe, então, uma diferença de 8 dB(A), que corresponderá quase ao “triplo” do ruído.

Das diferenças entre ruído de fundo com e sem AVAC, a diferença maior é a do Auditório da FEUP (15 dB(A), que corresponderá, aproximadamente, a “seis” vezes o ruído sentido sem AVAC) e a menor é a do Grande Auditório do Convento de S. Francisco (3,4 dB(A), que corresponderá, aproximadamente, ao “dobro” do ruído sentido sem AVAC). A diferença medida para o TMO é a segunda maior, de 11 dB(A), o que traduz uma significativa contribuição do funcionamento do equipamento AVAC (cerca do “quádruplo” do ruído de fundo sem AVAC).

Quadro 5.16- Valores de níveis de pressão sonora médios de ruído de fundo equivalentes com AVAC desligado e a diferença entre estes e os valores de níveis de pressão sonora médios de ruído de fundo equivalentes com AVAC ligado [29] [30] [31] [32] [33] [34]

Auditório	L_{Aeq} (dB) sem AVAC	Δ L_{Aeq} (com AVAC-sem AVAC)
Teatro Municipal de Ourém	24	11
Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra)	27	3
Grande Auditório Altice Fórum Braga	24	10
Pequeno Auditório Altice Fórum Braga	25	7
Centro de Artes de Águeda	26	5
Auditório FEUP	27	15
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares)	32	5
Δ(melhor-pior)	8	

5.6.4. RASTI

No quadro 5.17 estão dispostos os valores mínimos, médios e máximos de RASTI medidos em cada uma das salas de espetáculo em estudo, assim como as suas diferenças entre RASTI mínimo e máximo. Uma vez mais, não consta o Cineteatro de Esmoriz, uma vez que não se realizaram medições deste parâmetro no local.

Na generalidade, os valores mínimos de RASTI traduzem uma qualidade da inteligibilidade da palavra razoável (para as salas do Grande Auditório do Convento de S. Francisco, do Auditório da FEUP e do Cineteatro Eduardo Brazão) e boa (para as salas do TMO, do Grande e do Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga e do Centro de Artes de Águeda). O melhor RASTI, entre os valores mínimos, é o do Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga (0,75) e os piores os do Cineteatro Eduardo Brazão e do Grande Auditório do Convento de S. Francisco (0,55). O TMO tem o segundo melhor RASTI mínimo de entre todas as salas em análise (0,62).

Os valores máximos traduzem uma qualidade da inteligibilidade da palavra boa (para as salas do Grande Auditório do Convento de S. Francisco, do Auditório da FEUP e do Cineteatro Eduardo Brazão) e excelente (para as salas do TMO, do Grande e do Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga e do Centro de Artes de Águeda). O melhor RASTI, entre os valores máximos, é o do Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga (0,84) e o pior o do Auditório da FEUP (0,69). O TMO tem o segundo melhor RASTI máximo de entre todas as salas em análise (0,82). As diferenças de RASTI mínimo e máximo revelam que existe uma maior diferença de qualidade da inteligibilidade da palavra de uns lugares para outros da sala no TMO e no Centro de Artes de Águeda, de 0,20.

As figuras 5.15 e 5.16 são representações gráficas das médias dos valores de RASTI de cada sala em função do tempo de reverberação médio em cada sala e da média energética dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo com o equipamento AVAC desligado, respetivamente.

A partir da análise destas figuras, é possível aferir o seguinte:

O ruído de fundo afeta significativamente o parâmetro do RASTI, como seria expectável, uma vez que maior o ruído de fundo, menor será a qualidade da inteligibilidade da palavra. Graficamente, esta relação é evidenciada por um coeficiente de correlação (R^2) suficiente para se assumir entre as duas variáveis (0,42), vinculada numa função de tendência logarítmica.

O tempo de reverberação é também um fator que afeta diretamente o RASTI. Isto é expectável, uma vez que o maior tempo de reverberação coloca em causa a definição das sílabas das palavras ou até a clareza da palavra. Esta aferição é corroborada pela tendência logarítmica que relaciona os parâmetros do RASTI e do tempo de reverberação médio, cujo coeficiente de correlação (R^2) é de 0,63. Este coeficiente de correlação é suficientemente significativo para não se ignorar este tipo de relação.

O TMO também se integra nas tendências suprarreferidas.

Quadro 5.17- Comparação dos valores de RASTI entre as várias salas em análise [29] [30] [31] [32] [33] [34]

Auditório	RASTI			Δ RASTI (Valores Máximos- Mínimos)
	Valores Mínimos	Valores Médios	Valores Máximos	
Teatro Municipal de Ourém	0,62	0,69	0,82	0,20
Grande Auditório do Convento S. Francisco	0,55	0,61	0,72	0,17
Grande Auditório Altice Fórum Braga	0,60	0,67	0,79	0,19
Pequeno Auditório Altice Fórum Braga	0,75	0,80	0,84	0,09
Centro de Artes de Águeda	0,61	0,67	0,81	0,20
Auditório FEUP	0,57	0,61	0,69	0,12
Cineteatro Eduardo Brazão Valadares	0,55	0,60	0,70	0,15
Δ RASTI (melhor-pior)	0,20	0,20	0,15	

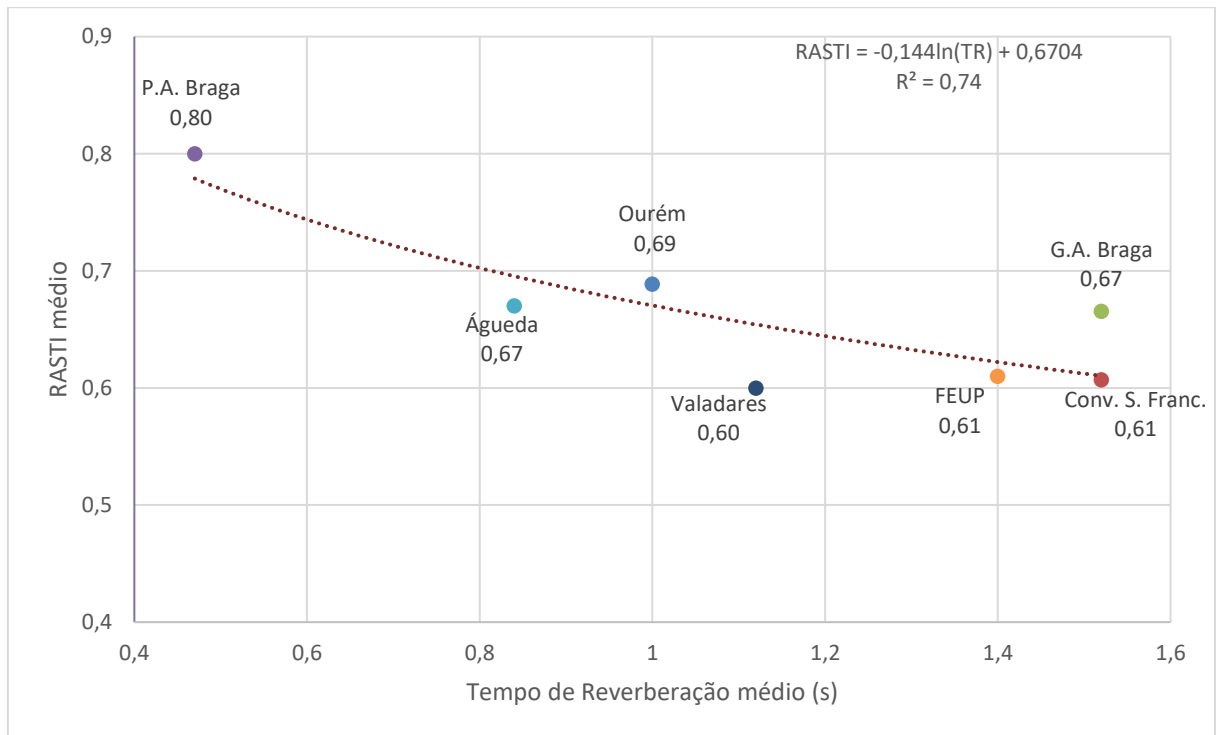


Figura 5.15- Comparação do valor médio de RASTI de cada uma das salas em análise em função do tempo de reverberação médio (para as bandas de frequência dos 500, 1000 e 2000 Hz) de cada sala [29] [30] [31] [32] [33] [34]

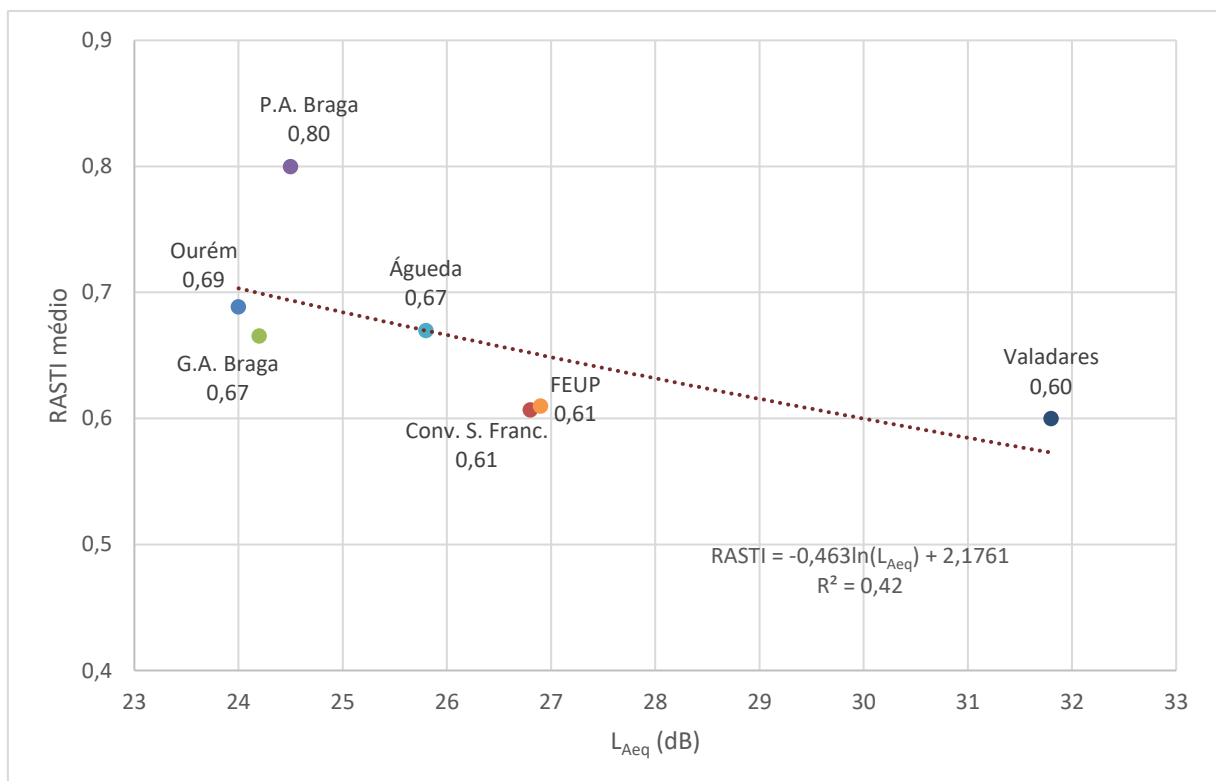


Figura 5.16- Comparação do valor médio de RASTI de cada uma das salas em análise em função do LA_{eq} de cada sala [29] [30] [31] [32] [33] [34]

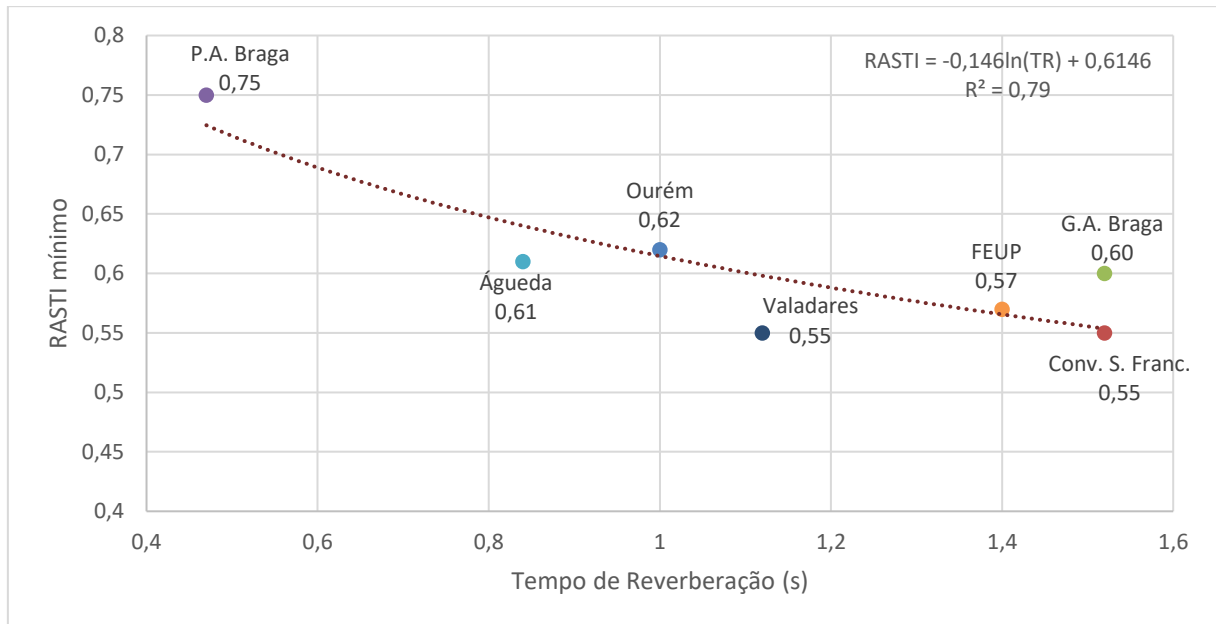


Figura 5.17- Comparação do valor mínimo de RASTI de cada uma das salas em análise em função do tempo de reverberação médio (para as bandas de frequência dos 500, 1000 e 2000 Hz) de cada sala [29] [30] [31] [32] [33] [34]

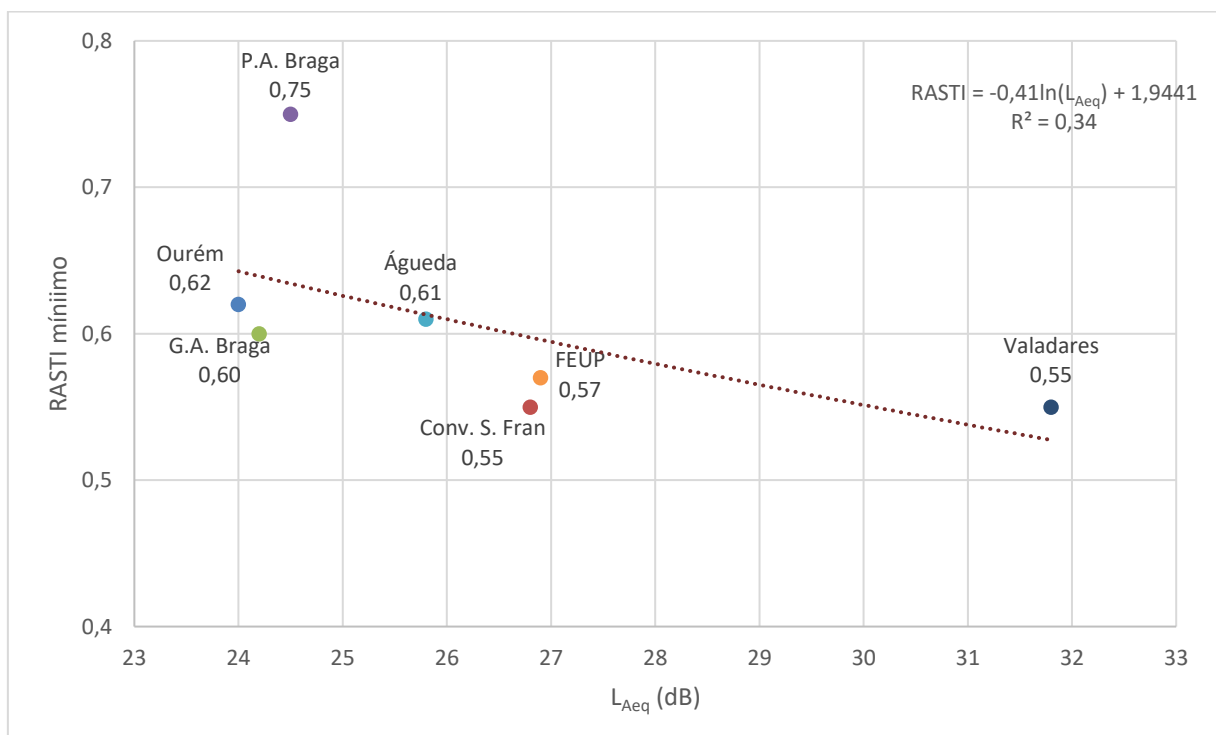


Figura 5.18- Comparação do valor mínimo de RASTI de cada uma das salas em análise em função do LAeq de cada sala [29] [30] [31] [32] [33] [34]

As figuras 5.17 e 5.18 são representações gráficas dos valores mínimos de RASTI de cada sala em função do tempo de reverberação médio em cada sala e da média energética dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo com o equipamento AVAC desligado, respetivamente.

A partir da análise destas figuras, é possível aferir o seguinte:

Apesar de evidenciar um coeficiente de correlação (R^2) menor que quando assumido os valores médios de RASTI na figura 5.16 (0,34 menor que 0,42), mantém-se uma relação entre o ruído de fundo e o parâmetro do RASTI, que é, novamente, espectável. Graficamente, mantém-se a tendência logarítmica, estando apenas um pouco mais desvinculado desta tendência o ponto correspondente ao Pequeno Auditório do Altice Fórum de Braga.

A influência do tempo de reverberação sobre o RASTI torna-se ainda mais vinculada. No entanto, na figura 5.17, a representação gráfica revela uma tendência mais logarítmica, com um coeficiente de correlação (R^2) relativamente mais alto que a relação estabelecida na figura 5.15 (0,79 é maior que 0,74). Todos as salas encontram-se dentro dessa tendência.

O TMO também se integra nas tendências suprarreferidas.

6

EPÍLOGO

6.1. CONCLUSÕES

Apesar do conflito de sobreposição dos interesses arquitetónicos, monetários e outras condicionantes e limitações práticas relativas à construção ou reabilitação de edifícios, a preocupação pela problemática da acústica na construção de salas de espetáculo e outros locais abertos ao público tem-se tornado cada vez mais relevante. A presente dissertação é testemunha desta preocupação, pela caracterização acústica do Teatro Municipal de Ourém (TMO), através da medição de parâmetros acústicos objetivos, e pela sua comparação com outras sete salas de espetáculo portuguesas.

O TMO recebe várias atividades artísticas e outros eventos, como espetáculos de teatro, dança e de música, assim como eventos corporativos e exposições cinematográficas. Apesar disso, a sala é vocacionada para uma programação fundamentalmente teatral. Sendo assim, o tratamento acústico é direcionado para a perceção da palavra. Nesse sentido, a caracterização acústica teve em conta os valores regulamentados e ideais para este propósito.

Neste estudo, foram avaliados e medidos *in situ* três parâmetros acústicos de forma a determinar a qualidade acústica da sala: o tempo de reverberação, o nível de pressão sonora do ruído de fundo e o RASTI, todos os três essenciais para a determinação da qualidade da inteligibilidade da palavra, na sua transmissão para uma audiência. A partir dos parâmetros de tempo de reverberação e de nível de pressão sonora de ruído de fundo, foram calculados valores de tempo de reverberação com a sala lotada e as curvas de incomodidade NC e NR.

A média das medições de tempo de reverberação, com a sala vazia, para as frequências de 500, 1000 e 2000 Hz resultou num valor de 1,0 segundos. Após a aplicação da incerteza associada regulamentada de 35%, o valor de tempo de reverberação medido resultante é de 0,67 segundos, que se encontra em cumprimento com o tempo de reverberação máximo calculado segundo o RRAE para a função “oratória”, de 0,93 segundos.

O tempo de reverberação obtido é adequado para atividades como conferências, cinema e música popular e aceitável para teatro, mas inaceitável para atividades musicais que requerem maior tempo de reverberação, como óperas wagnerianas, coros gregorianos e música sinfónica romântica. Genericamente, a sala é inadequada para atividades musicais, sem ser música popular (mais ritmada

e menos dependente da reverberação das notas e dos ritmos), sendo mais adequado para atividades com o propósito da percepção da palavra.

Considerando o fator da lotação da sala, a previsão de tempo de reverberação médio calculado da sala para as bandas de frequência de 1/1 oitava entre os 500 e os 2000 Hz é de 0,94 segundos. O tempo de reverberação médio para as bandas de frequência dos 500 e 1000 Hz calculado (0,91 segundos), neste caso, é adequado também para teatro, vincando-se assim a vocação da sala para atividades onde a inteligibilidade da palavra é essencial.

As medições do nível de pressão sonora do ruído de fundo foram realizadas com os sistemas AVAC ligados e desligados. Assim, obtiveram-se os valores de nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) de 24 dB com os sistemas AVAC desligados e de 35 dB com os sistemas AVAC ligados. Apesar de, para espetáculos de cinema, o valor do nível sonoro equivalente do ruído de fundo com AVAC ligado de 35 dB(A) estar em conformidade com o valor máximo do RRAE para cinema (38 dB(A)), não se encontra em conformidade com o valor máximo regulamentado pelo RRAE para o propósito da sala de teatro de 30 dB(A), mesmo com a aplicação da incerteza regulamentada de 3 dB(A) (de 32 dB(A)). No entanto, através da análise das curvas de incomodidade NC e NR, foi possível verificar que o ruído de fundo não constitui incômodo para a audiência, pois os valores de NC-24 e de NR-25 se encontram abaixo dos valores máximos recomendados de NC-30 e de NR-30.

A qualidade da inteligibilidade da palavra, medida pelo parâmetro de RASTI, revelou-se “boa, com um valor de RASTI médio de 0,69. Os valores de RASTI, nos vários pontos de medição da sala, estavam compreendidos entre o 0,62 e o 0,82. Em nenhum dos pontos de medição, a qualidade da inteligibilidade da palavra é menor que “boa”, e alguns lugares da sala usufruem de uma qualidade “excelente”.

O quadro 6.1 constitui um resumo dos principais parâmetros acústicos medidos e que caracterizam acusticamente o Teatro Municipal de Ourém.

Quadro 6.1- Resumo dos parâmetros acústicos medidos no TMO e usados para a sua caracterização acústica

Parâmetro	Valor	Valor com Incerteza associada	Valor ideal	Cumprimento
TR [500, 1000, 2000 Hz] (s) com sala vazia	1,0	0,67	0,7-0,9 ($TR_{500-1000}$ Hz para teatro)	Aceitável
Previsão TR [500, 1000, 2000 Hz] (s) com sala “lotada”	0,94	0,61		Adequado
L_{Aeq} (dB) com AVAC desligado	24	21	≤ 30 (segundo o RRAE)	Adequado
L_{Aeq} (dB) com AVAC ligado	35	32		Não adequado
NC (AVAC ligado)	24	-	≤ 30	Adequado
NR (AVAC ligado)	25	-	≤ 30	Adequado
RASTI médio	0,69	-	$\geq 0,60$	Adequado

A análise comparativa entre as sete salas em estudo, no que toca aos parâmetros acústicos medidos, permite-nos verificar as seguintes conclusões:

- o tempo de reverberação do TMO encontra-se entre os valores médios de tempos de reverberação das outras salas, mas demonstra uma tendência maior para uma adequabilidade a atividades dependentes da inteligibilidade da palavra; verifica-se uma tendência logarítmica quanto ao aumento do tempo de reverberação em relação ao aumento do volume das salas, como previsto.
- o nível de pressão sonora do ruído de fundo com os sistemas AVAC desligados do TMO é o mais baixo de entre as salas em estudo; com os sistemas AVAC ligados, o nível de pressão sonora do ruído de fundo do TMO enquadra-se dentro da média dos níveis medidos nas outras salas, mas encontra-se nos valores mais superiores medidos, sendo o valor médio equivalente o 3º mais alto de entre as salas em estudo; o TMO apresenta das maiores diferenças entre níveis de ruído de fundo entre as configurações de sistemas AVAC ligado e desligado
- De entre as salas em estudo, apenas o Auditório da FEUP padece de um ruído de fundo incomodativo, pela análise das curvas NC e NR.
- Em termos de RASTI, o TMO detém um dos maiores valores máximos de RASTI dentre as salas em estudo, e também um dos maiores valores mínimos de RASTI. Apesar disso, também padece de uma das maiores diferenças de RASTI entre os valores máximo e mínimos medidos para este parâmetro nos vários pontos de medição definidos; as relações entre tempo de reverberação *versus* RASTI e entre nível de pressão sonora do ruído de fundo *versus* RASTI, das várias salas em estudo evidenciam tendências que permitem aferir que o aumento de ambos estes parâmetros podem causar a diminuição dos valores de RASTI e, portanto, a diminuição da qualidade da inteligibilidade da palavra.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Através da análise comparativa dos resultados das medições obtidos no TMO com os de outras salas, para os mesmos parâmetros medidos, podemos constatar que os valores obtidos no TMO se adequam ao panorama prático de uma sala tratada acusticamente e condicionada por outros tipos de necessidades (como conforto térmico, instalações previamente fundadas que condicionam a reabilitação, entre outras), verificando-se mesmo que alguns valores se sobressaem positivamente a outros obtidos noutras salas. Apesar disso, a sala não apresenta um comportamento acústico perfeito e padece de algumas irregularidades acústicas, que podem ser colmatadas.

Além disso, existe ainda a possibilidade de aprofundamento do estudo acústico da sala do TMO, com outros parâmetros também relevantes, como o EDT (*Early Decay Time*), o C_{80} (Claridade) e o D_{50} (Definição), os quais não foram possíveis de medir por problemas de configuração do software *DIRAC*.

Além disso, seria relevante realizar um aprofundamento dos parâmetros acústicos subjetivos, através do uso de inquéritos à audiência de vários espetáculos no TMO, sobre a problemática da acústica da sala, no que toca à perceção da qualidade da inteligibilidade da palavra (através da sua definição e clareza) e ao incómodo causado pelo ruído de fundo na sala (quanto à perceção de ruído de fundo e se este adultera a qualidade do evento realizado na sala).

Apesar de ser feito uma previsão de valores de tempo de reverberação com a sala ocupada, é de considerar realizar as medições desse parâmetro, recorrendo à lotação real da sala, assim como dos parâmetros em estudo de RASTI e de Ruído de Fundo.

Noutro estudo, uma vez que se deu o incumprimento dos valores regulamentados de Ruído de Fundo com os sistemas AVAC ligados, e com base no acréscimo de ruído bastante significativo que o acionar destes sistemas representa, dever-se-á fazer a análise destes com o propósito de retificação destes valores.

Tendo em conta que, desde a sua reabilitação e abertura ao público, o TMO não é apenas palco de teatros, cinema, conferências e música popular, mas também de música clássica e outros eventos, é importante considerar o estudo da implementação de dispositivos e tecnologias de acústica variável que permitissem uma maior adaptabilidade da sala às necessidades artísticas da programação do TMO. Outra alternativa é a consideração de um estudo de tecnologias de reforço eletroacústico, que permitissem o tratamento do som consoante as necessidades acústicas do espetáculo perante as condições acústicas da sala.

No entanto, e como referido ao longo da presente dissertação, nenhuma sala se adaptará aos vários e variados usos e necessidades acústicas das artes para grandes audiências simultaneamente. Devem então ser também revistos os programas artísticos da sala, para maior usufruto das condições acústicas do TMO.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Carvalho, *Acústica Ambiental e de Edifícios*, FEUP. 2019.
- [2] [Online]. Available: <http://andre-godinho-cfq-8a.blogspot.com/2013/06/>.
- [3] [Online]. Available: <https://www.fq.pt/som/propagacao-do-som>.
- [4] M. D. Egan, *Architectural Acoustics*, J.Ross Publishing Classics, 2007.
- [5] M. Long, *Architectural Acoustics*, Elsevier Inc., 2006.
- [6] “Imperialum,” [Online]. Available: <https://www.imperialum.com/plataforma-imperialum/solucoes-imperialum-2/solucoes-de-isolamento-acustico/bandas-de-frequencia/>. [Acedido em 20/2/2023].
- [7] “Portal São Francisco,” [Online]. [Acedido em 22/2/2023].
- [8] Escola Superior de Tecnologia de Tomar. [Online]. Available: http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2959__NocElementares_P2_FC.pdf. [Acedido em 22/2/2023].
- [9] “Portal Acústica,” [Online]. Available: <https://portalacustica.info/absorcao-sonora-de-um-material-acustico/>. [Acedido em 1/3/2023].
- [10] “Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo,” [Online]. Available: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4445901/mod_resource/content/0/05%20b%20-%20Absor%C3%A7%C3%A3o%20-%20Materiais%20absorventes.pdf. [Acedido em 2/6/2023].
- [11] Imperialum, “Sons aéreos e de percussão,” Imperialium, [Online]. Available: <https://www.imperialum.com/plataforma-imperialum/solucoes-imperialum-2/solucoes-de-isolamento-acustico/sons-aereos-e-de-percussao/>. [Acedido em 9/6/2023].
- [12] Imperialum, “Transmissão Marginal,” Imperialum, [Online]. Available: <https://www.imperialum.com/plataforma-imperialum/solucoes-imperialum-2/solucoes-de-isolamento-acustico/transmissao-marginal/>. [Acedido em 3/6/2023].
- [13] Cirrus Reaseach pdc, “Calculation of NR & NC Curves,” [Online]. Available: Calculation of NR & NC Curves. [Acedido em 25/4/2023].
- [14] Siemens, “Articulation Index,” Siemens, [Online]. Available: <https://community.sw.siemens.com/s/article/articulation-index>. [Acedido em 23/6/2023].
- [15] S. Barbosa, *Caracterização Acústica do Museu Municipal Abade Pedrosa*, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2022.
- [16] A. Costa, *Caracterização Acústica de Bibiliotecas em Portugal e Análise de Influência na Reabilitação Acústica*, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [17] D. J. Grout e C. V. Palisca, *História da Música Ocidental*, 2007.
- [18] “Acoustical Society of America,” [Online]. Available: <https://acoustics.org/the-origins-of-building-acoustics-for-theatre-and-music-performances-john-mourjopoulos/>. [Acedido em 10/3/2023].
- [19] A. Bellia e A. Bevilacqua, “Rediscovering the Intangible Heritage of Past Performative Spaces: Interaction between Acoustics, Performance and Architecture,” *heritge*, 29/12/2022.

- [20] W. C. Sabine, *Collected papers on acoustics*, London: Cambridge Harvard University Press, 1922.
- [21] R. Parreira, *Difusores acústicos 3D com forma orgânica- estudo numérico e otimização*, Coimbra: Universidade de Coimbra, 2018.
- [22] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, 2017.
- [23] Ministério do Ambiente do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, “Diário da República,” Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 9 6 2008. [Online]. Available: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/96-2008-449682>. [Acedido em 23/5/2023].
- [24] T. M. d. Ourém, “Teatro Municipal de Ourém,” Teatro Municipal de Ourém, [Online]. Available: <https://teatromunicipal.ourem.pt/tmo/>. [Acedido em 23/3/2023].
- [25] R. d. T. e. C. Portugueses, “Rede de Teatros e Cineteatros Portugueses- Teatro Municipal de Ourém,” Rede de Teatros e Cineteatros Portugueses, [Online]. Available: <https://www.rtcp.pt/pt/espacos/teatro-municipal-de-ourem/>. [Acedido em 22/3/2023].
- [26] G. Maps, “Localização TMO,” Google Maps, [Online]. Available: <https://www.google.com/maps/place/Teatro+Municipal+de+Our%C3%A9m/@39.6543448,-8.5783524,302m/data=!3m1!1e3!4m14!1m7!3m6!1s0xd18820349190755:0xeda98892f7f29ec6!2sTeatro+Municipal+de+Our%C3%A9m!8m2!3d39.6543427!4d-8.5770649!16s%2Fg%2F11c6cnv4cl!3m5!1s0xd188>. [Acedido em 31/3/2023].
- [27] InAcoustics, “Portfolio- Teatro Municipal de Ourém,” InAcoustics, [Online]. Available: <https://www.inacoustics.com/portfolio/teatro-municipal-ourem/>. [Acedido em 1/4/2023].
- [28] Plantas fornecidas pela InAcoustics, 2023.
- [29] D. Silva, *Caracterização Acústica do Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares)*, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [30] G. Rocha, *Caracterização Acústica do Centro de Congressos do Altice Fórum Braga*, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2022.
- [31] H. Abelha, *Caracterização Acústica do Centro de Artes de Águeda*, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2022.
- [32] M. Pinto, *Caracterização Acústica de Grandes Auditórios- o caso do auditório da FEUP*, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [33] R. Silva, *Análise Acústica na Reabilitação do Cineteatro de Esmoriz*, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2020.
- [34] T. Miranda, *Caracterização Acústica do Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra)*, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.