

Caracterização acústica do Theatro Circo (Braga)

DANIEL SERRA ALVES

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

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2025

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2024/2025

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ mec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2024/2025 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2025*.

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.

A meus Pais

“Nunca existiu uma grande inteligência sem uma veia de loucura”

Aristóteles

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar queria agradecer aos meus pais pelo apoio, a todos os níveis, que me deram ao longo destes anos académicos. É graças a eles que mais uma etapa da minha vida é concluída. Ao meu irmão que apesar de me dar algumas dores de cabeça sempre me ajudou no que conseguiu.

Ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho gostaria de agradecer pela exigência, pelo rigor e todos os conselhos que me deu ao longo trabalho de forma a apresentar o melhor resultado possível.

Ao Engenheiro António Eduardo Costa pela disponibilidade para realizar as medições e ainda o tempo que despendeu para me auxiliar com os resultados, estando sempre disponível para qualquer dúvida que existisse.

Ao Theatro Circo pela permissão para a realização das medições e ainda pela disponibilidade em responder a todo o tipo de informação que fosse importante para a realização do trabalho. Ao técnico do Theatro Circo que teve disponibilidade para auxiliar nas medições.

A todos os meus amigos que a vida universitária me deu gostaria de agradecer pela amizade e por contribuírem para facilitar a vida académica ao atravessar esta fase da vida em conjunto comigo. Aos amigos mais antigos por contribuírem para que conseguisse em certos momentos desligar da vida académica e tornar-me uma pessoa feliz.

Por último queria agradecer a toda a minha família pelo apoio que me deram não só a mim como aos meus pais para que toda esta etapa fosse concluída da forma mais suave possível.

Muito obrigado a todos.

RESUMO

Ao longo desta dissertação, que faz parte dum programa de investigação de salas de espetáculo portuguesas, é apresentada a caracterização acústica do Theatro Circo, que se localiza em Braga e foi aberto ao público em 1915, tendo sofrido uma requalificação em meados dos anos 1990. Esta é uma das salas com maior reconhecimento em Braga e promove a cultura dando abrigo a espetáculos desde o teatro à música e comédia. Como objeto desta caracterização acústica são apresentadas medições realizadas no local que foram comparadas com resultados de outras salas tanto a nível nacional como a nível internacional.

Primeiramente e com vista a potenciar o entendimento de todo o conteúdo desta dissertação, é apresentado um capítulo com explicação teórica de todos os conceitos, fórmulas e regras que são fundamentais à sua leitura. Após a exposição do Estado da Arte e da explicação dos métodos utilizados nas medições foram posteriormente introduzidos os resultados obtidos nos vários pontos da sala que foram escolhidos de forma a ter uma melhor representatividade e conhecimento acústico da mesma, com e sem o funcionamento do sistema AVAC para entender ainda o impacto que este tem. As medições recaem sobre o Nível Sonoro e curvas de incomodidade (NC e NR) do ruído de fundo, Tempo de reverberação, *Speech Transmission Index* (STI), Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}) e ainda do Tempo central (ts).

Tendo em conta todos os parâmetros obtidos foram analisados os resultados de forma a perceber se a sala está de acordo com a regulamentação existente e ainda se ela exhibe valores considerados adequados para os tipos de utilização que tem, isto é, se tem uma boa inteligibilidade da palavra para espetáculos que assim o exigem e também se o público consegue ter uma boa experiência auditiva para espetáculos musicais.

Assim, através das medições da sala desocupada dos vários parâmetros medidos podem ser resumidos pela média dos vários pontos da sala sendo estes:

- Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) = 35 dB (com AVAC) e 29 dB (sem AVAC);
- Curvas de incomodidade NC (*Noise Criterion*) = 31dB (com AVAC) e 21 dB (sem AVAC) e NR (*Noise Rating*) = 32 (com AVAC) e 23 (sem AVAC);
- Tempo de reverberação (TR) [500, 1.000 Hz] = 1,2 s;
- *Speech Transmission Index* (STI) máximo, médio e mínimo com AVAC = 0,67/0,59/0,52 e sem AVAC 0,68/0,59/0,53;
- Claridade (C_{80}), [500, 1.000 Hz]: 3,5 dB;
- Definição (D_{50}), [500, 1.0000 Hz]: 0,56;
- Tempo Central (TS), [500, 1.000 Hz]: 76 ms;
- Rácios de Baixos (BR_TR): 1,05.

Depois do tratamento dos resultados das medições e análise dos resultados foi realizada uma comparação com outras salas internacionais com formato semelhante, nacionais com formato semelhante e ainda com nacionais com todo os formatos, tendo em vista a perceber o enquadramento desta sala face a outras.

Com estas comparações foi possível verificar que o Theatro Circo apresenta, entre as do mesmo formato (“ferradura”) nacionais os valores mais elevados de STI e um tempo de reverberação igual

ao Teatro Nacional São João sendo o segundo mais elevado. Com as salas internacionais percebe-se que o tempo de reverberação médio é um pouco elevado. E por último ao comparar com as salas nacionais de diferentes formatos percebe-se que o STI é o mais reduzido entre o de todas elas e um tempo de reverberação um pouco acima da média das salas.

Para finalizar a caracterização do Theatro Circo são sugeridas algumas formas de atuar para futuramente desenvolver a análise realizada na presente dissertação e ainda de potenciar a qualidade acústica da sala em estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Teatro, Inteligibilidade da palavra, Ruído de fundo, Tempo de reverberação, Braga

ABSTRACT

This dissertation, which is part of a research program on Portuguese concert halls, presents the acoustic characterization of the Theatro Circo, which is located in Braga and was opened to the public in 1915, but underwent a refurbishment in the mid-1990s. This is one of the most renowned theaters in Braga and promotes culture by hosting shows ranging from theater to music and comedy. The object of this acoustic characterization is to present measurements taken at the hall which were compared with results from other halls both nationally and internationally.

Firstly, in order to enhance the understanding of the entire content of this dissertation, a chapter is presented with a theoretical explanation of all the concepts, formulas and rules that are fundamental to its reading. After presenting the state of the art and explaining the methods used in the measurements, the results obtained at the various points in the room were introduced. These were chosen in order to have a better representation and acoustic knowledge of the room, both with and without the HVAC system operating, so as to understand its impact. The measurements thus cover Sound Level and annoyance curves (NC and NR) for background noise, Reverberation Time, Speech Transmission Index (STI), Clarity (C_{80}), Definition (D_{50}) and Central Time (ts).

Taking into account all the parameters obtained, the results were analysed in order to understand whether the room complies with the existing regulations and also whether the room has values considered adequate for the types of use it has, that is, whether it has good intelligibility of the word for shows that require it and also whether the audience can have a good listening experience for musical shows.

Thus, through the measurements in the unoccupied room, the various parameters measured can be summarized by the average of the various points in the room:

- Equivalent sound level of background noise (L_{Aeq}) = 35 dB (with HVAC and 29 dB (without HVAC);
- Noise Criterion (NC) = 31 dB (with HVAC) and 21 dB (without HVAC) and Noise Rating (NR) = 32 (with HVAC) and 23 (without HVAC);
- Average reverberation time (TR) [500, 1,000 Hz] = 1.2 s;
- Speech Transmission Index (STI) maximum, average and minimum with HVAC = 0.67/0.59/0.52 and without HVAC 0.68/0.59/0.53;
- Clarity (C_{80}), [500, 1,000 Hz]: 3.5 dB;
- Definition (D_{50}), [500, 1,0000 Hz]: 0.56;
- Center Time (TS), [500, 1,000 Hz]: 76 ms;
- Bass Ratios (BR_TR): 1.05.

After processing the results of the measurements and analyzing the results, a comparison was made with other international halls with a similar format, national halls with a similar format and national halls with all formats, with a view to understanding how this hall fits in with others.

With these comparisons, it was possible to see that Theatro Circo has the highest mean STI values among the venues of the same format (“horseshoe”) in Portugal and the same mean reverberation time as Teatro Nacional São João, which is the second highest. Compared to international venues, the average reverberation time is slightly higher. And finally, when comparing national venues of

different formats, it is clear that the mean STI is the lowest of all of them and the mean reverberation time is slightly above the average for all venues.

To conclude the characterization of the Theatro Circo, the study presents some ways of acting in the future to develop the analysis carried out in this dissertation and also to improve the acoustic quality of the room under study.

KEYWORDS: Acoustics, Theater, Speech Intelligibility, Background noise, Reverberation time, Braga

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE QUADROS	XIX
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	XXIII

1. INTRODUÇÃO 1

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

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

2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES 3

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

2.1.1. ORIGEM DO SOM	3
-----------------------------------	----------

2.1.2. SISTEMA AUDITIVO HUMANO.....	3
--	----------

2.2. CONCEITOS GERAIS	5
------------------------------------	----------

2.2.1. PRESSÃO	5
-----------------------------	----------

2.2.2. FREQUÊNCIA	8
--------------------------------	----------

2.2.3. ANÁLISE NO TEMPO	12
--------------------------------------	-----------

2.3. ABSORÇÃO SONORA	13
-----------------------------------	-----------

2.3.1. DEFINIÇÃO	13
-------------------------------	-----------

2.3.2. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO SONORA	14
---	-----------

2.3.3. MATERIAIS DE ABSORÇÃO SONORA	15
--	-----------

2.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	18
---	-----------

2.4.1. DEFINIÇÃO	18
-------------------------------	-----------

2.4.2. MEDIÇÃO.....	18
----------------------------	-----------

2.4.3. TEMPO DE DECAIMENTO CURTO (EDT)	19
---	-----------

2.4.4. RÁCIO DE BAIXOS	19
-------------------------------------	-----------

2.4.5. EFEITOS DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO	19
--	-----------

2.4.6. FÓRMULAS DE PREVISÃO	19
--	-----------

2.5. ISOLAMENTO SONORO.....	21
------------------------------------	-----------

2.5.1. RUÍDOS AÉREOS.....	21
----------------------------------	-----------

2.5.2. RUÍDOS DE PERCUSSÃO	22
---	-----------

2.5.3. RUÍDOS DE EQUIPAMENTOS.....	23
2.6. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	25
2.6.1. CONCEITOS GERAIS	25
2.6.2. PARÂMETROS	26
2.7. ACÚSTICA ARQUITETÓNICA.....	27
2.7.1. CONCEITOS GERAIS	27
2.7.2. PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJETIVOS.....	29
2.7.3. PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJETIVOS	30
3. ESTADO DA ARTE.....	31
3.1. CONTEXTO HISTÓRICO.....	31
3.1.1. SALAS DE TEATRO	31
3.1.2. SALAS DE ÓPERA.....	35
3.2. CONSIDERAÇÕES ACÚSTICAS	39
3.2.1. CONSIDERAÇÕES ACÚSTICAS PARA A PALAVRA	39
3.2.2. CONSIDERAÇÕES ACÚSTICAS PARA A MÚSICA	40
3.3. SISTEMAS ACÚSTICOS	41
3.3.1. ACÚSTICA VARIÁVEL	41
3.3.2. DIFUSORES	48
3.3.3. DISCOS VOADORES	48
3.4. LEGISLAÇÃO PORTUGUESA	49
4. CASO DE ESTUDO	51
4.1. THEATRO CIRCO (BRAGA)	51
4.1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	51
4.1.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA	52
4.2. METODOLOGIA	58
4.2.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS E EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO	58
4.2.2. PROCESSOS DE MEDIÇÃO	59
5. RESULTADOS	63
5.1. INTRODUÇÃO.....	63
5.2. RUÍDO DE FUNDO	63
5.2.1. MEDIÇÕES <i>IN SITU</i>	63
5.2.2. AVALIAÇÃO DA LEGISLAÇÃO PORTUGUESA	81

5.2.3. CURVAS DE INCOMODIDADE NC E NR	81
5.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	82
5.3.1. AVALIAÇÃO DAS MEDIÇÕES	82
5.3.2. PREVISÃO DA SALA OCUPADA COM PERCENTAGENS DIFERENTES	85
5.3.3. AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE COM A LEGISLAÇÃO PORTUGUESA	87
5.3.4. AVALIAÇÃO DE ACORDO COM OS VALORES IDEAIS	87
5.4. RÁCIO DE BAIXOS	88
5.5. SPEECH TRANSMISSION INDEX (STI)	89
5.6. CLARIDADE (C80).....	92
5.7. DEFINIÇÃO (D50)	99
5.8. TEMPO CENTRAL (TS).....	105
5.9. BALANÇO DO EFEITO DO AVAC.....	111
 6. ANÁLISE COMPARATIVA COM OUTRAS SALAS.....	 113
6.1. INTRODUÇÃO	113
6.2. SALAS INTERNACIONAIS EM FERRADURA.....	115
6.2.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	115
6.2.2. CLARIDADE (C80).....	119
6.3. SALAS NACIONAIS.....	121
6.3.1. SALA NACIONAIS EM FERRADURA	121
6.3.2. SALAS NACIONAIS TODOS OS FORMATOS.....	127
6.4. RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS ESTUDADOS	134
 7. CONCLUSÃO	 137
7.1. CONCLUSÕES	137
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	140
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sistema auditivo humano [5].	4
Figura 2.2 - Esquema da distribuição estímulo das frequências na cóclea [1].	4
Figura 2.3 - Propagação do som com representação das zonas de rarefação e compressão [3].	5
Figura 2.4 - Representação da variação da intensidade sonora com a distância à fonte sonora [10].	6
Figura 2.5 - Relação entre a pressão, potência e intensidade sonora [12].	6
Figura 2.6 - Comparação de oscilogramas dum som puro (esquerda) e um som complexo (direita) [18].	9
Figura 2.7 - Onda sonora com representação de características [20].	9
Figura 2.8 - Curvas de igual sensação auditiva (fone) [22].	11
Figura 2.9 - Representação gráfica de, L_{eq} , L_1 , L_{10} e L_{90} [23].	12
Figura 2.10 - Desenho esquemático da interação do som com um material [27].	13
Figura 2.11 - Tubo de ondas estacionárias (tubo de Kundt) [30].	14
Figura 2.12 - Câmara reverberante [32].	15
Figura 2.13 - Comportamento típico do coeficiente de absorção sonora de materiais porosos [33].	15
Figura 2.14 – Ressonadores: Ressonador de Helmholtz (esq.) e Ressonadores agrupados (dir.) [35], [36].	16
Figura 2.15 - Desenvolvimento do coeficiente de absorção de ressonador com material absorvente na cavidade (linha tracejada) e sem o material [1].	17
Figura 2.16 - Evolução do coeficiente de absorção segundo a frequência para membranas [37].	17
Figura 2.17 - Definição do tempo de reverberação [38].	18
Figura 2.18 - Equipamento de medição do tempo de reverberação [38].	18
Figura 2.19 - Transmissões dos ruídos aéreos [44].	21
Figura 2.20 - Exemplo de medição da redução sonora em laboratório [46].	22
Figura 2.21 - Funcionamento da propagação de ruídos de percussão [47].	22
Figura 2.22 - Máquina de percussão para realização de ensaios [49].	23
Figura 2.23 - Curvas de Incomodidade NC [50].	24
Figura 2.24 - Curvas de Incomodidade NR [51].	24
Figura 2.25 - Esquema da perda de intensidade sonora da palavra tendo em conta a direccionalidade da emissão [54].	25
Figura 2.26 - Exemplos de aplicação de difusores na parede (esq.) e no teto (dir.) [58], [59].	28
Figura 3.1 - Teatro da Grécia antiga em Atenas [62].	31
Figura 3.2 - Ângulo de incidência do som direto e refletido na plataforma dos teatros Gregos [52].	32

Figura 3.3 - Forma em leque da plateia do teatro na Grécia Antiga [52].	32
Figura 3.4 - Teatro clássico romano na Jordânia [63].	32
Figura 3.5 - Representação do que seria o típico teatro romano [52].	33
Figura 3.6 - Exemplo de teatro do Renascimento em Vicenza, Itália [52].	33
Figura 3.7 - Exemplo de teatro proscénio Barroco (Teatro Drury Lane, Londres) [64].	34
Figura 3.8 - Planta de um teatro em forma de leque (Prinzregenten Theater, Munique) [52].	34
Figura 3.9 - Esquema de um teatro de palco de impulso (Guthrie Theatre, Minneapolis) [52].	35
Figura 3.10 - Planta de um teatro circular (Royal Exchange Theatre, Manchester) [52].	35
Figura 3.11 - Esquema do ângulo de visão para o palco [65].	36
Figura 3.12 - Exemplo de uma sala em "ferradura" - Grande Teatro de Bordéus em França [52].	36
Figura 3.13 Reflexões associadas a salas de ópera em planta [65].	37
Figura 3.14 - Esquema das reflexões sonoras na canópia de uma sala de ópera [65].	37
Figura 3.15 - Esquema das reflexões sonoras do teto de uma sala de ópera [65].	38
Figura 3.16 - Esquema do rácio entre a profundidade das varandas e a altura da abertura da varanda e do ângulo de visão vertical [65].	38
Figura 3.17 - Esquemas de possíveis reflexões nas varandas de uma sala de ópera [65].	39
Figura 3.18 - Esquema de possíveis anomalias eco (esc.) e focalização(dir.) [52].	40
Figura 3.19 - Exemplo de cortinas de absorção sonora Congress Centrum de Suhl, Turíngia [68].	42
Figura 3.20 - Vista em planta de painéis refletorizantes móveis montados em frente de uma parede 50% tratada com material absorvente: a) posição de absorção mínima; b) posição com absorção máxima [52].	42
Figura 3.21 - Painéis perfurados: a) cavidades alinhadas; b) cavidades desalinhadas [52].	43
Figura 3.22 - Painéis com rotação de 180°: a) painéis abertos; b) painéis fechados [52].	43
Figura 3.23 - Painéis com rotação de 90° [52].	44
Figura 3.24 - Painéis prismáticos com rotação de 360° [52].	44
Figura 3.25 - Divisórias móveis com elevado desempenho acústico [52].	45
Figura 3.26 - Câmaras reverberantes no Eugene McDermott Concert Hall, Dallas [52].	46
Figura 3.27 - Cain Auditorium em Manhattan (EUA) com os painéis na posição mais elevada: a) configuração da sala; b) representação das primeiras reflexões [52].	47
Figura 3.28 - Cain Auditorium em Manhattan (EUA) com os painéis na posição mais baixa: a) configuração da sala; b) representação das primeiras reflexões [52].	47
Figura 3.29 - Exemplo de difusores: Difusor policilíndricos (esq.); Difusor MLS (dir.) [52].	48
Figura 3.30 - Discos voadores colocados no Royal Albert Hall, Londres [69].	49

Figura 4.1 - Fachada do Theatro Circo em Braga [74].	51
Figura 4.2 - Localização do Theatro Circo em Braga [75].	52
Figura 4.3 - Sala principal do Theatro Circo em Braga [Foto do autor].	53
Figura 4.4 - Planta da sala principal do Theatro Circo [76].	53
Figura 4.5 - Fosso de orquestra com equipamento de som [Foto do autor].	53
Figura 4.6 - Cortinas de veludo e assentos almofadados [Foto do autor].	54
Figura 4.7 - Divisórias entre os balcões (esq.) e cúpula do Theatro Circo [Fotos do autor].	54
Figura 4.8 - Grelhas de insuflação: na zona da plateia e no palco [Fotos do autor].	55
Figura 4.9 - <i>Régie</i> ao fundo da sala do Theatro Circo [Foto do autor].	56
Figura 4.10 - Planta do palco em AutoCad do Theatro Circo [78].	56
Figura 4.11 - Corte vertical do palco do Theatro Circo [76].	57
Figura 4.12 - Planta da zona do público em AutoCad do Theatro Circo [78].	57
Figuras 4.13 e 4.14 - Fontes sonoras: Fonte sonora Brüel & Kjaer (<i>Echo Speech Source</i>), modelo 4720 e Fonte sonora Brüel & Kjaer, modelo 4224 [Fotos do autor].	59
Figura 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 - Equipamento de medição: Sonómetro Brüel & Kjær, 2236, Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260, Calibrador de microfones Brüel & Kjær, 4231 e Microfone de 13 mm Brüel & Kjær, 4189 [Foto do autor], [79], [80].	59
Figura 4.19 - Planta da sala principal do Theatro Circo com a localização da fonte sonora (FS) e dos pontos de medição do ruído de fundo [adaptado de 76].	60
Figura 4.20 - Localização da fonte sonora no palco do Theatro Circo [Fotos do autor].	61
Figura 4.21 - Planta da sala com a localização da fonte sonora (FS) e dos pontos de medição dos parâmetros TR , ts , C_{80} , D_{50} e ST : P1 a P8 na plateia, P8 a P11 no primeiro andar dos balcões, P12 a P14 no segundo andar dos balcões e P15 a P17 no terceiro andar dos balcões [adaptado de 76].	61
Figura 5.1 – Nível de pressão sonora sem filtro A dos pontos (RF1, RF2 e RF3) do ruído de fundo em bandas de frequência de 1/1 de oitava, do Theatro Circo com AVAC.	67
Figura 5.2 - Nível de pressão sonora sem filtro A dos pontos (RF1, RF2 e RF3) do ruído de fundo em bandas de frequência de 1/1 de oitava, do Theatro Circo sem AVAC.	68
Figura 5.3 - Nível de pressão sonora com filtro A dos pontos (RF1, RF2 e RF3) do ruído de fundo em bandas de frequência de 1/1 de oitava, do Theatro Circo com AVAC.	68
Figura 5.4 - Nível de pressão sonora com filtro A dos pontos (RF1, RF2 e RF3) do ruído de fundo em bandas de frequência de 1/1 de oitava, do Theatro Circo sem AVAC.	69
Figura 5.5 – Variação do nível de pressão sonora sem filtro A dos pontos (RF1, RF2 e RF3) do ruído de fundo em bandas de frequência de 1/3 de oitava, do Theatro Circo com AVAC.	70
Figura 5.6 – Nível de pressão sonora sem filtro A dos pontos (RF1, RF2 e RF3) do ruído de fundo em bandas de frequência de 1/3 de oitava, do Theatro Circo sem AVAC.	71

Figura 5.7 - Nível de pressão sonora com filtro A dos pontos (RF1, RF2 e RF3) do ruído de fundo em bandas de frequência de 1/3 de oitava, do Theatro Circo com AVAC.....	71
Figura 5.8 - Nível de pressão sonora com filtro A dos pontos (RF1, RF2 e RF3) do ruído de fundo em bandas de frequência de 1/3 de oitava, do Theatro Circo sem AVAC.....	72
Figura 5.9 – Valores médios dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), de todos os pontos com e sem o filtro A, para bandas de frequência de 1/1 oitava, com AVAC do Theatro Circo.	73
Figura 5.10 – Valores médios dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), de todos os pontos com e sem o filtro A, para bandas de frequência de 1/1 oitava, sem AVAC do Theatro Circo.	73
Figura 5.11 – Valores médios dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), de todos os pontos com e sem o filtro A para bandas de frequência de 1/3 oitava com AVAC do Theatro Circo.	75
Figura 5.12 – Valores médios dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), de todos os pontos com e sem o filtro A para bandas de frequência de 1/3 oitava sem AVAC do Theatro Circo.	75
Figura 5.13 - Comparação entre os valores médios do nível de pressão sonora sem filtro A do ruído de fundo (RF), em bandas de frequência de 1/1 de oitava com e sem o AVAC ligado e a respetiva variação dos níveis de pressão, do Theatro Circo.....	77
Figura 5.14 - Comparação entre os valores médios do nível de pressão sonora com filtro A do ruído de fundo (RF), em bandas de frequência de 1/1 de oitava com e sem o AVAC ligado e a respetiva variação dos níveis de pressão, do Theatro Circo.....	77
Figura 5.15 - Comparação entre os valores médios do nível de pressão sonora sem filtro A do ruído de fundo (RF), em bandas de frequência de 1/3 de oitava com e sem o AVAC ligado e a respetiva variação dos níveis de pressão, do Theatro Circo.....	80
Figura 5.16 - Comparação entre os valores médios do nível de pressão sonora com filtro A do ruído de fundo (RF), em bandas de frequência de 1/3 de oitava com e sem o AVAC ligado e a respetiva variação dos níveis de pressão, do Theatro Circo.....	80
Figura 5.17 – Valores do Tempo de reverberação para os quatorze pontos medidos (P1, P3, P6, P8, P9, P10, P12, P13, P15 e P16) em bandas de frequência de 1/3 de oitava com o AVAC ligado, no Theatro Circo.	83
Figura 5.18 – Valores do Tempo de reverberação (T30) para os quatorze pontos medidos (P1, P3, P6, P8, P9, P10, P12, P13, P15 e P16) em bandas de frequência de 1/1 de oitava com o AVAC ligado, no Theatro Circo.	83
Figura 5.19 - Valores do Tempo de reverberação com a percentagem de ocupação da sala de (0%), (50%) e com (100%) em bandas de 1/1 oitava.	86
Figura 5.20 Comparação dos valores do parâmetro Rácio de Baixos para os quatorze pontos medidos (P1, P3, P6, P8, P9, P10, P12, P13, P15 e P16) e a média, do Theatro Circo.	89
Figura 5.21 - Comparação dos valores do parâmetro STI para os quatorze pontos medidos (P1, P2, P4, P5, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16 e P17) e a média, com AVAC, no Theatro Circo.	91

Figura 5.22 - Comparação dos valores do parâmetro STI para os quatorze pontos medidos (P1, P2, P4, P5, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16 e P17) e a média, sem AVAC, no Theatro Circo	91
Figura 5.23 - Comparação dos valores do parâmetro STI médio para os pontos P1, P2, P4, P5, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16 e P17 com e sem AVAC e a correspondente variação entre eles no Theatro Circo.	92
Figura 5.24 - Valores do parâmetro Claridade (C80) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava com AVAC, no Theatro Circo.	95
Figura 5.25 - Valores do parâmetro Claridade (C80) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava sem AVAC, no Theatro Circo.	95
Figura 5.26 - Média dos Valores do parâmetro Claridade (C80) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava sem e com AVAC, no Theatro Circo.	96
Figura 5.27 - Comparação dos valores do parâmetro Claridade C80 [500, 1k Hz] (dB) para os pontos medidos (P1 a P17) e a média com AVAC no Theatro Circo.	97
Figura 5.28 - Comparação dos valores do parâmetro Claridade C80 [500, 1k Hz] (dB) para os pontos medidos (P1 a P17) e a média com AVAC no Theatro Circo.	97
Figura 5.29 - Comparação dos valores médios do parâmetro Claridade C80 [500, 1k] para os pontos medidos (P1 a P17) com e sem o AVAC e a correspondente variação no Theatro Circo.	98
Figura 5.30 - Valores do parâmetro definição (D50) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava com AVAC, no Theatro Circo.	102
Figura 5.31 - Valores do parâmetro definição (D50) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava sem AVAC, no Theatro Circo.	102
Figura 5.32 – Média dos valores do parâmetro definição (D50) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava com e sem AVAC no Theatro Circo.	103
Figura 5.33 - Comparação dos valores do parâmetro Definição (D50 [500, 1k Hz]) para os pontos medidos (P1 a P17) e a média com AVAC, no Theatro Circo.	103
Figura 5.34 - Comparação dos valores do parâmetro Definição (D50 [500, 1k Hz]) para os pontos medidos (P1 a P17) e a média sem AVAC, no Theatro Circo.	104
Figura 5.35 - Comparação dos valores médios do parâmetro Definição (D50) para os pontos medidos (P1 a P17) com e sem o AVAC e a correspondente variação no Theatro Circo.	105
Figura 5.36 - Valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava com AVAC, no Theatro Circo.	108
Figura 5.37 - Valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava sem AVAC, no Theatro Circo.	108
Figura 5.38 – Média dos valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava, com e sem AVAC, no Theatro Circo.	109
Figura 5.39 - Comparação dos valores do Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] para os pontos medidos (P1 a P14) e a média com AVAC, no Theatro Circo.	109

Figura 5.40 - Comparação dos valores do Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] para os pontos medidos (P1 a P14) e a média sem AVAC, do Theatro Circo.....	110
Figura 5.41 - Comparação dos valores médios do parâmetro Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] para os pontos medidos (P1 a P17) com e sem o AVAC e a correspondente variação, no Theatro Circo.....	111
Figura 6.1 - Valores do parâmetro TR [500, 1000 Hz] desocupado em função do volume das cinco salas internacionais com formato “ferradura” e do Theatro Circo, com linha de tendência (logarítmica). ...	115
Figura 6.2 - Valores do parâmetro TR [500, 1000 Hz] ocupado em função do volume das cinco salas internacionais com formato “ferradura” e do Theatro Circo (previsão), com linha de tendência (logarítmica).	116
Figura 6.3 – Valores do parâmetro TR [500, 1000 Hz] desocupado em função do número de lugares das cinco salas internacionais e do Theatro Circo, com linha de tendência (logarítmica).	116
Figura 6.4 – Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] ocupado em função do número de lugares das cinco salas internacionais e do Theatro Circo (previsão), com linha de tendência (logarítmica).	117
Figura 6.5 - Valores do tempo de reverberação das salas desocupadas em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4000 Hz das cinco salas internacionais e do Theatro Circo.	118
Figura 6.6 - Valores do tempo de reverberação das salas ocupadas em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4000 Hz das cinco salas internacionais e do Theatro Circo.	119
Figura 6.7 - Valores de Claridade média (C80 [500, 1000 Hz]) em função do volume com linha de tendência (linear) das cinco salas internacionais e do Theatro Circo.	120
Figura 6.8 - Valores de Claridade média (C80 [500, 1000 Hz]) em função do número de lugares com linha de tendência (linear) das cinco salas internacionais e do Theatro Circo, com as salas desocupadas.	120
Figura 6.9 - Valores do tempo de reverberação (salas desocupadas) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4000 Hz das três salas, do Theatro Circo.	122
Figura 6.10 - Valores da Claridade (C80) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4000 Hz das 3 salas, do Theatro Circo.	123
Figura 6.11 - Valores da Definição (D50) bandas de 1/1 oitava de 125 a 8000 Hz das quatro salas, do Theatro Circo e o valor médio das bandas de frequência médias.	124
Figura 6.12 - Valores do Tempo Central (t_s) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8000 Hz das quatro salas, do Theatro Circo e o valor médio das bandas de frequência médias.	125
Figura 6.13 - Valores do <i>Speech Transmission Index</i> (STI) máximo, médio e mínimo das quatro salas e do Theatro Circo	126
Figura 6.14 – Valores do parâmetro TR [500, 1000 Hz] em função do Volume das quinze salas nacionais e do Theatro Circo com linha de tendência (logarítmica).....	128
Figura 6.15 – Valores do parâmetro TR [500, 1000 Hz] em função do Volume das quinze salas nacionais e do Theatro Circo com linha de tendência (logarítmica).....	128
Figura 6.16 - Valores do parâmetro TR [500, 1000 Hz] em função do Volume/Número de lugares das quinze salas nacionais e do Theatro Circo com linha de tendência (logarítmica).	129

Figura 6.17 – Valores do parâmetro RASTI/STI em função do TR médio (TR [500, 1000 Hz]) das quinze salas nacionais e do Theatro Circo com linha de tendência (potência).....	132
Figura 6.18 – Valores do parâmetro RASTI/STI em função do Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (LAeq) sem AVAC das quinze salas nacionais e do Theatro Circo com linha de tendência (logarítmica).....	133
Figura 6.19 – Valores médios [500, 1000 Hz] do parâmetro TS em função da Claridade (C80) de quatro salas nacionais e do Theatro Circo, com linha de tendência (potência)	134
Figura 6.20 – Valores médios [500, 1000 Hz] do parâmetro Claridade (C80) em função da Definição D50 de quatro salas nacionais e do Theatro Circo com linha de tendência (logarítmica).	135
Figura 6.21– Valores médios [500, 1000 Hz] do parâmetro Tempo Central em função da Definição D50 de quatro salas nacionais e do Theatro Circo com linha de tendência (exponencial).....	135

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Intervalos de frequências ouvidas por animais em comparação com o ser humano [16].	8
Quadro 2.2 - Valores das ponderações do filtro A para as bandas de 1/1 e de 1/3 de oitava em dB [1].	11
Quadro 2.3 - Valores máximos ideais de NC em diversos locais [52].	24
Quadro 2.4 - Valores máximos ideais para o NR [53].	25
Quadro 2.5 - Pesos e nível de conversação por banda de frequência para cálculo do índice de articulação [1].	26
Quadro 2.6 - Graus de inteligibilidade e de privacidade [1].	26
Quadro 2.7 - Valores de SIL para a comunicação no limite do possível (M - Masculino, F - Feminino) [1].	27
Quadro 2.8 - Valores do método de obtenção de AC [1].	27
Quadro 2.9 - Valores ideais para a Claridade [1].	29
Quadro 2.10 - Valores ideais da Definição [61].	29
Quadro 2.11 - Valores ideais do tempo central de diferentes usos [1].	30
Quadro 3.1 - Valores ideais para a palavra com a sala ocupada [1], [52].	40
Quadro 3.2 - Valores ideais de TR para diferentes tipos musicais [1].	40
Quadro 4.1 - Valores da área, altura e volume aproximados, das diferentes zonas da sala principal do Theatro Circo.	55
Quadro 5.1 - Valores dos níveis de pressão sonora com e sem o filtro A nos pontos (RF1, RF2 e RF3) para bandas de frequência de 1/1 de oitava, nível sonoro equivalente (LAeq) e nível pressão sonora equivalente (Leq) do Theatro Circo com AVAC.	64
Quadro 5.2 - Valores dos níveis de pressão sonora com e sem o filtro A nos pontos (RF1, RF2 e RF3) para bandas de frequência de 1/1 de oitava, nível sonoro equivalente (LAeq) e nível pressão sonora equivalente (Leq) do Theatro Circo sem AVAC.	64
Quadro 5.3 - Valores dos níveis de pressão sonora com e sem o filtro A nos pontos (RF1, RF2 e RF3) para bandas de frequência de 1/3 de oitava, nível sonoro equivalente (LAeq) e nível pressão sonora equivalente (Leq) do Theatro Circo com AVAC.	65
Quadro 5.4 - Valores dos níveis de pressão sonora com e sem o filtro A nos pontos (RF1, RF2 e RF3) para bandas de frequência de 1/3 de oitava, nível sonoro equivalente (LAeq) e nível pressão sonora equivalente (Leq) do Theatro Circo sem AVAC.	66
Quadro 5.5 - Variação dos níveis de pressão sonora equivalente (Leq) com o AVAC ligado e desligado do Theatro Circo.	67
Quadro 5.6 - Variação dos níveis sonoro equivalente (LAeq) com o AVAC ligado e desligado do Theatro Circo.	67

Quadro 5.7 - Valores da média logarítmica do nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}) e o nível sonoro equivalente (L_{Aeq}) para bandas de frequência de 1/1 de oitava, do Theatro Circo.	72
Quadro 5.8 - Valores da média logarítmica do nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}) e o nível sonoro equivalente (L_{Aeq}) para bandas de frequência de 1/3 de oitava, do Theatro Circo.	74
Quadro 5.9 – Diferença entre os níveis de pressão sonora equivalente (L_{eq}) com e sem AVAC de acordo com a sua frequência em bandas de 1/1 oitava.....	76
Quadro 5.10 – Diferença entre os níveis sonoros equivalente (L_{Aeq}) com e sem AVAC de acordo com a sua frequência em bandas de 1/1 oitava.....	76
Quadro 5.11 – Diferença entre os níveis de pressão sonora equivalente (L_{eq}) com e sem AVAC de acordo com a sua frequência em bandas de 1/3 oitava.....	78
Quadro 5.12 – Diferença entre os níveis sonoros equivalente (L_{Aeq}) com e sem AVAC de acordo com a sua frequência em bandas de 1/3 oitava.....	79
Quadro 5.13 Avaliação regulamentar (RRAE) do nível sonoro contínuo equivalente do Theatro Circo	81
Quadro 5.14 - Valores calculados de NC e NR com e sem o funcionamento do AVAC e a sua variação, comparativamente com os valores máximos recomendados [1]	81
Quadro 5.15 - Valores do Tempo de reverberação (T_{30}) em bandas de 1/1 de oitava de 125 a 4.000 Hz para os pontos (P1, P3, P6, P8, P9, P10, P12, P13, P15 e P16) obtidos no Theatro Circo, juntamente com a média e desvio padrão com AVAC ligado (+, -: maior e menor valor em cada coluna).	82
Quadro 5.16 - Valores do Tempo de reverberação (T_{30}) em bandas de 1/3 de oitava de 100 a 5000 Hz para os pontos (P1, P3, P6, P8, P9, P10, P12, P13, P15 e P16) obtidos no Theatro Circo, juntamente com a média e desvio padrão com AVAC ligado.	84
Quadro 5.17 - Parâmetros utilizados para a previsão do Tempo de reverberação com a sala 50% e 100% ocupada do Theatro Circo[81].	85
Quadro 5.18 Cálculo da Absorção sonora do Theatro Circo para uma ocupação de 0%.	85
Quadro 5.19 - Cálculo do Tempo de reverberação estimado para a sala com 50%, 79% e 100% de ocupação nas bandas de 1/1 oitava de 125 a 4.000 Hz do Theatro Circo	86
Quadro 5.20 - Avaliação regulamentar (RRAE) do Tempo de reverberação médio do Theatro Circo.	87
Quadro 5.21 - Verificação dos valores recomendados para o parâmetro Tempo de reverberação médio de acordo com a função do Theatro Circo [1].	87
Quadro 5.22 - Valores médios do parâmetro Rácio de Baixos e do Tempo de Reverberação para os pontos P1, P3, P6, P8, P9, P10, P12, P13, P15 e P16, e a respetiva comparação dos valores ideais de Rácio de Baixos baseado no Tempo de reverberação, do Theatro Circo [81].	88
Quadro 5.23 - Valores médios do parâmetro STI para os pontos P1, P2, P4, P5, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16 e P17 (com e sem AVAC), e a respetiva variação entre eles e a respetiva comparação dos valores ideais na inteligibilidade da palavra do Theatro Circo (+, -: maior e menor valor em cada coluna) (Boa (0,60 - 0,75) e Suficiente (0,45 - 0,6).	90

Quadro 5.24 - Valores do parâmetro Claridade (C80) (dB) para os pontos P1 a P17 e a respetiva média, mediana e desvio padrão (com AVAC), medidos do Theatro Circo (+, -: maior e menor valor em cada coluna).....	93
Quadro 5.25 Valores do parâmetro Claridade (C80) (dB) para os pontos P1 a P17 e a respetiva média e desvio padrão (sem AVAC), medidos do Theatro Circo (+, -: maior e menor valor em cada coluna).	94
Quadro 5.26 - Valores médios do parâmetro Claridade (C80) para os pontos P1 a P17 com e sem AVAC com a variação, no Theatro Circo (+, -: maior e menor valor em cada coluna).....	96
Quadro 5.27 - Avaliação dos valores considerados ideais do parâmetro Claridade (C80) de acordo com a uso do espaço para o Theatro Circo.	98
Quadro 5.28 - Valores do parâmetro Definição (D50) para os pontos P1 a P17 e a respetiva média, mediana e desvio padrão (com AVAC), medidos no Theatro Circo (+, -: Maior e menor valor em cada coluna) (Boa (0,67 a 0,86), Razoável (0,39 a 0,67) e Fraca (0,17 a 0,39))	100
Quadro 5.29 - Valores do parâmetro Definição (D50) para os pontos P1 a P17 e a respetiva média mediana e desvio padrão (sem AVAC), medidos no Theatro Circo (+, -: Maior e menor valor em cada coluna) (Boa (0,67 a 0,86), Razoável (0,39 a 0,67) e Fraca (0,17 a 0,39)).	101
Quadro 5.30 Valores médios do parâmetro Definição (D50 [500, 1k Hz]) para os pontos P1 a P17 com e sem AVAC com a variação, no Theatro Circo (+, -: maior e menor valor em cada coluna).	104
Quadro 5.31 - Valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os pontos (P1 a P17) medidos e a respetiva média, mediana e desvio padrão com AVAC, do Theatro Circo (+, -: maior e menor valor em cada coluna)	106
Quadro 5.32 - Valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os pontos (P1 a P17) medidos e a respetiva média, mediana e desvio padrão sem AVAC, do Theatro Circo (+, -: maior e menor valor em cada coluna)	107
Quadro 5.33 - Valores médios do parâmetro Tempo Central (TS) para os pontos P1 a P17 com e sem AVAC e a variação por ele causada, no Theatro Circo (+, -: maior e menor valor em cada coluna).	110
Quadro 5.34 - Efeito do funcionamento do AVAC nos parâmetros acústicos medidos no Theatro Circo	112
Quadro 6.1 - Comparação das dezasseis salas nacionais para diferentes atividades mais exibidas	114
Quadro 6.2 - Valores do tempo de reverberação médio (TR [500, 1.000 Hz]), ocupado e desocupado, de cinco salas internacionais com formato “ferradura” e do Theatro Circo, com o respetivo volume e número de lugares (adaptado de [81])	115
Quadro 6.3 – Valores do tempo de reverberação da sala desocupada em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4.000 Hz das cinco salas internacionais com formato “ferradura” e do Theatro Circo, com desvio padrão (adaptado de [81]).	117
Quadro 6.4 – Valores do tempo de reverberação da sala ocupada em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4000 Hz das cinco salas internacionais com formato “ferradura” e do Theatro Circo, com desvio padrão (adaptado de [81]).	118

Quadro 6.5 - Valores da Claridade média ($C80[500, 1000 \text{ Hz}]$) de cinco salas internacionais e do Theatro Circo com o respetivo volume e número de assentos (adaptado de [81]).	119
Quadro 6.6 - Valores do tempo de reverberação (salas desocupadas) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4000 Hz das 3 salas, do Theatro Circo e o valor médio [82], [83], [84].	121
Quadro 6.7 - Valores da Claridade ($C80$) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4000 Hz das três salas, do Theatro Circo e o valor médio das bandas de frequência médias [82], [83], [84].	122
Quadro 6.8 - Valores da Definição ($D50$) bandas de 1/1 oitava de 125 a 8000 Hz das quatro salas, do Theatro Circo e o valor médio das bandas de frequência médias [82], [83], [84].	124
Quadro 6.9 – Valores do Tempo Central (t_s) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8000 Hz das quatro salas, do Theatro Circo e o valor médio das bandas de frequência médias [82], [83], [84].	125
Quadro 6.10 - Valores do <i>Speech Transmission Index</i> (STI) máximo, médio e mínimo das quatro salas e do Theatro Circo [82], [83], [84].	126
Quadro 6.11 – Valores do Volume, Número de lugares, Volume por assento e TR médio (500, 1000 Hz) das quinze salas nacionais e do Theatro Circo [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92], [93], [94] e [95] (+, -: maior e menor valor em cada coluna).	127
Quadro 6.12 - Verificação dos valores ideais do parâmetro Tempo de Reverberação médio [500, 1000 Hz] de acordo com vários tipos de função das dezasseis salas nacionais.	130
Quadro 6.13 - Valores do Volume, Número de lugares, RASTI/STI médio e Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) sem AVAC das quinze salas nacionais e do Theatro Circo [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92], [93], [94] e [95].	131
Quadro 6.14- Valores do Volume, Número de lugares, RASTI/STI médio e Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) com AVAC das quinze salas nacionais e do Theatro Circo [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92], [93], [94] e [95].	132
Quadro 6.15 – Quadro-matriz com os melhores valores de $R2$ das várias relações entre os valores médios [500, 1000 Hz] parâmetros estudados obtidos através de regressões com os valores de cinco salas nacionais.	134
Quadro 7.1 - Resumo dos parâmetros acústicos medidos no Theatro Circo com as respetivas verificações regulamentares e avaliação em função da utilização	139

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

α – Coeficiente de absorção sonora

λ – Comprimento de onda (m)

θ – Temperatura (°C)

A – Área de Absorção sonora equivalente (m²)

AC – *Articulation Class*

AI - *Articulation Index* (Índice de Articulação)

B – Largura de banda (Hz)

BR – *Bass Ratio* (Rácio de Baixos)

c – Celeridade (m/s)

C_{80} – Claridade (dB)

D_{50} – Definição

dB - Decibel

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

E – Energia absorvida e incidente (J)

FS – Fonte Sonora

F – Intensidade audível absoluta (fone)

f – Frequência (Hz)

f_0 – Frequência central; valor médio (Hz)

f_1 – Frequência de limite inferior (Hz)

f_2 – Frequência de limite superior (Hz)

ITDG – *Initial Time Delay Gap* (ms)

I – Intensidade Sonora (W/m²)

I_0 – Intensidade Sonora de Referência (W/m²)

K – Constante

K_{Tonal} – Penalização RGR (3 dBA)

ρ – Massa Volúmica (kg/m³)

L_1 – Nível de Intensidade Sonora (dB)

L_p – Nível de Pressão Sonora (dB)

L_w – Nível de Potência Sonora (dB)

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

$L_{Ar,nT}$ – Nível de avaliação padronizado do ruído particular de equipamentos (dB)

L_{Aeq} – Nível Sonoro continuo equivalente do equipamento (dB)

NC – *Noise Criterion*

NR – *Noise Rating*

r – Distância (m)

p – Pressão (Pa)

p_{at} – Pressão atmosférica (Pa)

p_0 – Pressão de Referência (Pa)

RASTI – *Rapid Speech Transmission Index*

RGR – Regulamento Geral do Ruído

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

S – Intensidade audível relativa (sone)

S – Superfície real do material (m^2)

SIL – *Speech Interference Level*

STI – *Speech Transmission Index*

T – Temperatura (K)

T – Período (s)

TS – Tempo central (ms)

TR – Tempo de reverberação (s)

V – Volume do compartimento (m^3)

W – Potência Sonora (W)

W_0 – Potência Sonora de Referência (W)

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

O som desde sempre foi algo que acompanhou o Homem tendo sido através dele que este conseguiu evoluir de maneira a se comunicar através da palavra distinguindo se assim dos restantes animais. Porém só passados milhões de anos é que se começou a estudar o som.

A acústica é uma ciência em que o principal objetivo é estudar as ondas sonoras podendo esta ciência ser aplicada a várias áreas. Como palavra teve origem por meio de Sir Francis Bacon em meados do ano de 1623, porém só mais de cem anos depois é que a palavra teve tradução para português [1].

O estudo do som em edifícios, em termos científicos da Acústica em Edifícios, pode dizer-se que surgiu quando o físico W.C. Sabine, no início do século XX, realizou o estudo do tempo de reverberação relacionando este com as dimensões e a absorção da sala. Através deste estudo o físico conseguiu deduzir uma fórmula do tempo de reverberação que foi algo muito importante uma vez que este parâmetro vai ter muita influência na percepção do ouvinte [1].

A percepção do som numa sala é algo que depende de variados fatores sendo dois deles o tempo de reverberação e o isolamento sonoro da mesma de forma a que não seja sentido dentro da sala o chamado ruído de fundo. Apenas nos anos mais recentes se tem dado a devida importância ao estudo acústico das salas de espetáculo sendo até então o principal foco na sua construção a sua beleza estética sem utilização de qualquer projeto acústico. Com esta crescente preocupação com a experiência auditiva algumas salas mais antigas sofreram alterações de forma a melhorar a acústica da mesma.

O objetivo desta dissertação passa por, através de diferentes parâmetros medidos *in situ*, realizar a caracterização acústica do Theatro Circo que se localiza em Braga, de forma a entender se esta está a ser utilizada para os fins a que melhor se destina acusticamente de forma ao espectador ter uma boa experiência e ainda se os valores dos parâmetros medidos estão de acordo com a lei portuguesa e/ou valores ideais. Um outro objetivo é comparar com outras salas nacionais e internacionais para perceber como esta sala se compara acusticamente em relação a salas semelhantes.

1.2. ESTRUTURA DA TESE

Esta dissertação é composta por sete capítulos.

O capítulo número 1 “Introdução” tem como objetivo dar enquadramento, abordar os objetivos que a presente dissertação irá cumprir ao longo da mesma e ainda introduzir a sua estrutura.

O capítulo número 2 “Conceitos e Definições” aborda os conceitos e as definições básicas que é necessário conhecer para ser possível entender tudo o que está presente ao longo do documento.

O capítulo número 3 “Estado da Arte” compreende informação histórica das salas de espetáculo assim como a sua evolução e ainda características a ter em atenção tendo em consideração o tipo de uso das mesmas.

No capítulo número 4 “Caso de Estudo” é introduzida a sala em estudo com um contexto geral e as suas características, é ainda abordada a metodologia utilizada assim como os parâmetros em estudo.

No capítulo número 5 “Resultados” são expostos os resultados dos vários parâmetros em estudo obtidos nas medições in situ e uma posterior avaliação dos mesmos tendo em conta a legislação portuguesa assim como os valores que se consideram bons para os tipos de utilização.

No capítulo número 6 “Análise comparativa com outras salas” é realizada uma análise comparativa dividida em três fases, uma primeira com salas nacionais, uma segunda com salas nacionais, porém com uma seleção prévia tendo em conta a forma (ferradura) de modo a serem salas semelhantes à que está em estudo e por último com salas internacionais relevantes de formato semelhante (ferradura).

No capítulo número 7 “Conclusão” são abordadas as várias conclusões passíveis de ser retiradas do caso de estudo juntamente com as comparações realizadas de forma a perceber o posicionamento das condições acústicas desta sala face a outras e ainda são abordadas medidas futuras que se poderiam implementar de forma a melhorar as condições acústicas e possíveis desenvolvimentos futuros deste trabalho.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES**2.1. INTRODUÇÃO****2.1.1. ORIGEM DO SOM**

O som, segundo a definição da palavra, trata-se duma sensação auditiva causada por vibrações mecânicas o que se pode traduzir como ser uma sensação provocada no cérebro que tem origem na variação da pressão do ar que o aparelho auditivo deteta [1], [2].

Assim, o som tem origem quando por alguma razão há uma variação da pressão do ar que chega ao tímpano e através duma série de processos de codificação vai chegar ao cérebro onde este vai interpretar o som. Tendo em conta o ouvinte este estímulo pode ser dividido em dois tipos de natureza qualitativa. Ele pode ser um ruído se segundo o ouvinte este é desagradável e sem significado ou um som quando este tem significado ou é agradável [1].

Um som pode ser caracterizado principalmente pela frequência, a intensidade o timbre e a duração é através deles que o cérebro faz a distinção de diferentes sons e assim consegue identificar a fonte sonora e também se é um ruído ou um som [3].

2.1.2. SISTEMA AUDITIVO HUMANO

O sistema auditivo do Homem tem como principal órgão o ouvido sendo este o responsável por captar as variações de pressão que existe no ar e transmiti-las ao cérebro. O ouvido é constituído por três partes (Figura 2.1) [1] [4]:

- Ouvido externo;
- Ouvido médio;
- Ouvido interno.

O ouvido externo é constituído pelo pavilhão da orelha que é responsável por captar as ondas sonoras, o canal auditivo que possui aproximadamente 2 cm e faz a ligação entre o pavilhão da orelha e o tímpano que é uma pequena membrana com cerca de 0,1 mm de espessura e um raio de 5 mm que tem como função receber as vibrações e passa-las para o ouvido médio [1], [4], [5].

O ouvido médio é constituído pelos ossículos, que são os ossos mais pequenos do corpo humano e fazem a ligação entre o tímpano e a janela oval da cóclea. O primeiro ossículo com ligação ao tímpano é o martelo que transmite a vibração à bigorna e por último o estribo que transmite as ondas mecânicas oriundas do meio aéreo para o meio líquido da cóclea através da janela oval. Esta secção do ouvido tem ligação à garganta de forma a ser possível controlar a pressão interna por meio do denominado tubo de Eustáquio (ou trompa de Eustáquio) [1], [3].

O ouvido interno é constituído pela cóclea que tem forma de espiral possuindo perto de 2,5 voltas e cerca de 35 mm se esticada. Dentro desta existe um fluído de nome perilinfa e as células ciliadas, que em conjunto têm um papel fundamental na audição. Estes últimos existem em grande quantidade (próximo de 1,7 milhões) e pertencem a células ciliadas com cerca de $2\ \mu\text{m}$ cada. Esta possui ainda duas conexões com o ouvido médio através da anteriormente mencionada janela oval e também através da janela redonda [1], [4], [5].

As vibrações que o estribo provoca através da janela oval na perilinfa dentro da cóclea fazem com que a membrana basilar se movimente e consequentemente movimenta os cílios. Este movimento induz estas células a libertarem impulsos elétrico-químicos que são transmitidos pelo nevo auditivo ipsi-lateral até ao cérebro onde o som é interpretado. As fibras do nervo auditivo encontram-se dispostas ao longo da cóclea de forma que podem captar impulsos das células ciliadas próximas que recebem vibrações principalmente de uma faixa de frequências. Desta forma a cóclea faz a separação das componentes de frequências do som e envia a informação para fibras diferentes do nervo auditivo. [1] [4], [5].

O ouvido humano saudável consegue ouvir na gama de frequências de 20 a 20000 Hz, e estas causam estímulos diferentes ao longo da cóclea, isto é, as frequências altas causam maior vibração no início da cóclea enquanto que as baixas apesar de provocarem vibrações em todo o comprimento estas são de maior intensidade na zona final (figura 2.2) [1].

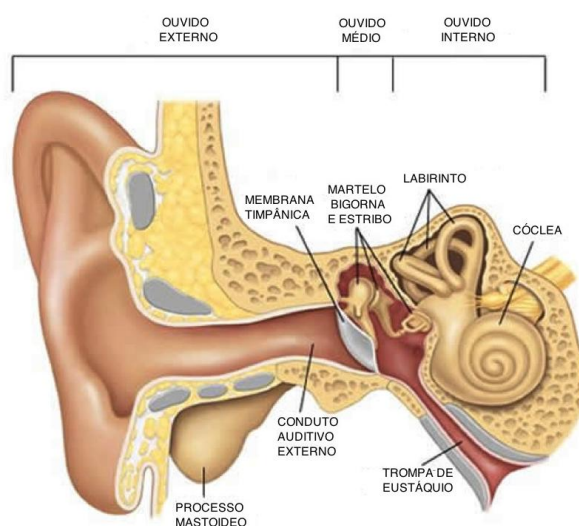


Figura 2.1 - Sistema auditivo humano [5].

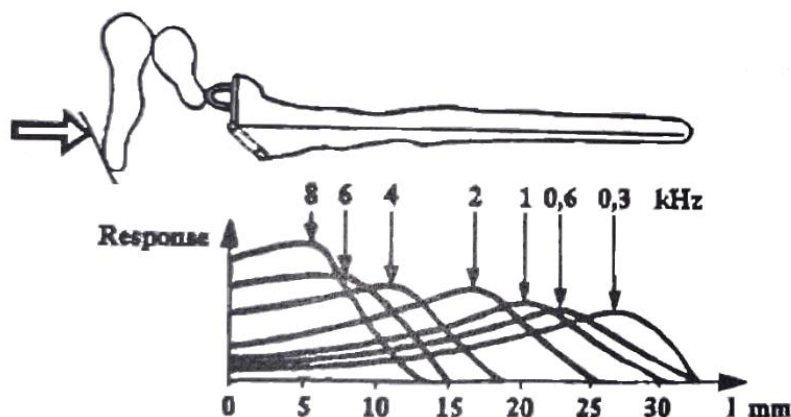


Figura 2.2 - Esquema da distribuição estímulo das frequências na cóclea [1].

2.2. CONCEITOS GERAIS

2.2.1. PRESSÃO

2.2.1.1. Propagação do Som

O som para existir necessita duma fonte, um recetor e para se conseguir propagar necessita dum meio elástico. Seja este sólido, líquido ou gasoso, não existindo meio de propagação (vácuo) não existe som. Para o estudo realizado nesta dissertação o foco está na propagação no ar. A fonte sonora causa vibração das partículas que, por conseguinte, fazem vibrar as partículas adjacentes criando zonas de rarefação que são zonas onde as partículas estão mais afastadas que o normal e zonas de compressão que são zonas onde as partículas estão mais próximas que no seu estado natural (figura 2.3) [1], [6].

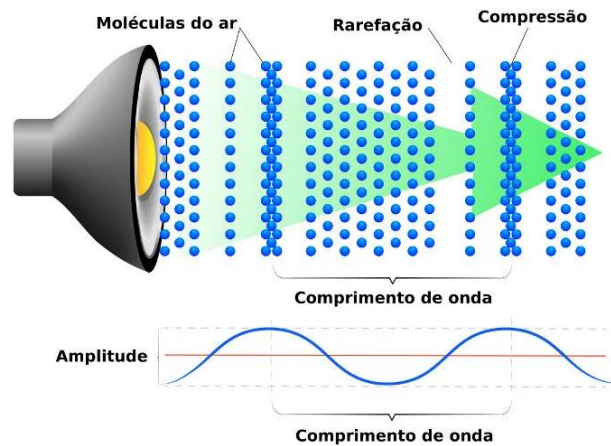


Figura 2.3 - Propagação do som com representação das zonas de rarefação e compressão [3].

A fonte sonora causa no ar uma onda com origem na fonte que se propaga em todas as direções do mesmo modo que uma gota de água quando cai sobre água parada, porém no plano tridimensional. Estas vibrações à medida que se afastam da fonte vão provocar vibração em um maior número de partículas o que resulta numa distribuição da energia por mais partículas até à extinção da onda. As vibrações que são impostas pela fonte sonora causam assim no meio de propagação variações na pressão em relação à pressão atmosférica (P_{at}) que varia tendo em conta a altitude e a temperatura apresentando um valor médio de 101.325 Pa. Assim, a variação da pressão, é o elemento mais importante a ser medido [1], [7], [8].

2.2.1.2. Celeridade

A celeridade (c) é o nome que se dá à velocidade de propagação da frente de onda e varia consoante o meio onde esta se propaga, em regra geral, maior em meio sólido, menor em meio gasoso e quando em meio líquido está entre os dois referidos. Neste caso de estudo apenas tem interesse a celeridade no ar que varia consoante a temperatura tendo em conta a fórmula 2.1 (válida para ar seco e ao nível do mar) [1], [9]:

$$c = 20,045\sqrt{T} \quad \text{Eq. 2.1}$$

$$T(K) = 273,15 + \theta(^{\circ}\text{C}) \quad \text{Eq. 2.2}$$

2.2.1.3. Intensidade e Potência Sonora

A intensidade sonora é uma grandeza vetorial que se caracteriza pela energia que passa por segundo em 1 m^2 num determinado ponto do espaço. Tendo em conta que as ondas sonoras se propagam em forma de esfera (tridimensional) a energia é inversamente proporcional ao quadrado do raio, isto é a intensidade sonora será tanto menor quanto maior a distância do recetor à fonte (figura 2.4) [1], [10].

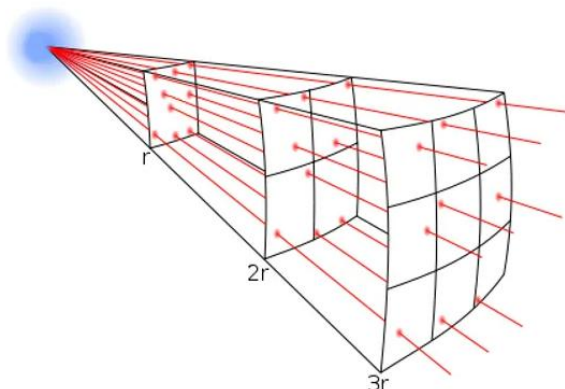


Figura 2.4 - Representação da variação da intensidade sonora com a distância à fonte sonora [10].

A potência sonora é a energia emitida num segundo, medida em *watt*, por uma fonte sonora e ao contrário da intensidade sonora não depende da distância ao recetor uma vez que é uma característica da própria fonte. Assim, a intensidade sonora depende da potência sonora e podem-se relacionar como se vê na Figura 2.5 [1], [11].

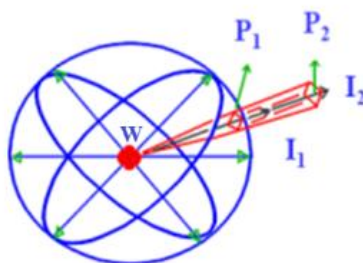


Figura 2.5 - Relação entre a pressão, potência e intensidade sonora [12]

A potência sonora, a intensidade sonora e a pressão relacionam-se de acordo com a seguinte fórmula 2.3:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad \text{Eq. 2.3}$$

com, I - intensidade sonora (W/m^2);

W - potência sonora (W);

r - distância (m);

p - pressão sonora (Pa);

ρ - massa volúmica do ar ($\approx 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$);

c - celeridade ($\approx 340 \text{ m/s}$).

2.2.1.4. Níveis de Pressão, Potência e Intensidade Sonora

O ouvido humano consegue captar uma variação mínima de 2×10^{-5} na frequência de 1 kHz Pa ao qual se dá o nome de limiar absoluto de audição. No extremo oposto existe o limiar de dor que é quando o ouvido capta variações de pressão superiores a cerca de 100 Pa. Em suma a gama de audição humana situa-se em $10^7 Pa$ [1].

A utilização duma escala linear em *pascal* para se medir a variação das pressões sonoras resultaria em valores de difícil compreensão e de baixa utilidade prática. Por tudo isto foi criada uma unidade que permite avaliar o nível de alguma quantidade tendo em conta um valor de referência, a essa unidade deu-se o nome de *decibel* (dB) que é 1/10 do *bel*. É de notar que o *decibel* pode ser usado em várias áreas da acústica, portanto é necessário ser claro qual a referência usada [1].

Assim, tendo como referência a variação aproximada da pressão mínima que o Homem consegue captar obtêm-se as seguintes fórmulas 2.4 e 2.5:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad \text{Eq. 2.4}$$

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} \quad \text{Eq. 2.5}$$

com p_0 - pressão sonora de referência ($2 \times 10^{-5} Pa$).

O ouvido humano não consegue distinguir quando a diferença entre os níveis de pressão sonora é muito pequena. Quanto maior for o nível menor é a diferença entre eles que o ouvido consegue detetar. Pelo contrário, quanto menor for o nível é necessária uma maior variação para o Homem conseguir perceber. Isto traduz-se numa maior facilidade em detetar diferenças para níveis de pressão sonora superiores. Este parâmetro pode ser calculado através da fórmula 2.6 [1]:

$$\Delta L (dB) = 1,644 - 0,014 \times L \quad \text{Eq. 2.6}$$

O nível de intensidade sonora pode também ser medido em dB e os resultados são quase numericamente idênticos aos obtidos no cálculo do nível de pressão sonora. A forma de cálculo é semelhante à do cálculo do nível de pressão sonora, porém alterando o valor de referência usando o valor da intensidade ao invés de usar o valor da pressão obtendo a fórmula de cálculo 2.7 [1].

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} (dB) \quad \text{Eq. 2.7}$$

com Intensidade sonora de referência $I_0 = 10^{-12} W/m^2$.

2.2.1.5. Direccionalidade

Uma fonte sonora omnidireccional é uma fonte que emite a mesma quantidade de energia em todas as direcções formando uma esfera de radiação perfeita. Este tipo de fontes não é o mais comum sendo até a minoria das fontes existentes. Contudo todas as fontes pequenas são teoricamente omnidireccionais Para avaliar a direccionalidade existem dois parâmetros [1]:

- Coeficiente de direccionalidade (Q) - este parâmetro relaciona a intensidade acústica propagada para uma certa direcção com a que se propagaria na mesma direcção em uma fonte sonora omnidireccional com igual potência apresentando a fórmula de cálculo 2.8 [1];

$$Q_{(\varphi,\phi)} = \frac{I_{(\varphi,\phi)}}{I_{\text{OMNI}}} = \frac{p_{\text{RMS}}^2}{p_{\text{OMNI}}^2} \quad \text{Eq. 2.8}$$

- Índice de direccionalidade (G) em dB, para uma direção (φ,ϕ) com as duas fórmulas de cálculo 2.9 e 2.10.

$$G_{(\varphi,\phi)} = 10 \log Q_{(\varphi,\phi)} \quad \text{Eq. 2.9}$$

$$G_{(\varphi,\phi)} = L_p(\varphi,\phi) - L_{p\text{OMNI}} \quad \text{Eq. 2.10}$$

2.2.2. FREQUÊNCIA

2.2.2.1. Definição

A frequência em física é medida em *hertz* (Hz) e equivale ao número de ciclos que acontecem em 1 segundo (1 ciclo completo equivale a uma onda completa). Este parâmetro físico pode ser utilizado para caracterizar todo o tipo de ondas sendo mais utilizado no estudo do som e da luz. Focando no som, a frequência permite fazer distinção entre diferentes fontes sonoras quando cada uma apresenta a sua própria frequência [1], [13], [14].

O ouvido humano jovem e com audição normal consegue ouvir sons simples com frequências entre 20 e 20000 Hz o que comparando com outros animais é uma gama reduzida de frequências. Como por exemplo o morcego que consegue ouvir uma gama de frequências bem maior como se pode ver na Quadro 2.1 em que se percebe que ouvem sons na gama dos ultra-sons que são as frequências acima dos 20000 Hz (quando abaixo de 20 Hz são denominados de infra-sons) [1], [15].

Quadro 2.1 - Intervalos de frequências ouvidas por animais em comparação com o ser humano [16].

Seres vivos	Intervalos de frequência (Hz)
Cão	15 – 45.000
Ser Humano	20 – 20.000
Sapo	50 – 10.000
Gato	60 – 65.000
Morcego	1000 – 120.000

Em acústica de Edifícios para uma maior facilidade separa-se as frequências em três zonas:

- Frequências graves - 20 a 355 Hz;
- Frequências médias - 355 a 1.410 Hz;
- Frequências agudas - 1.410 a 20000 Hz.

2.2.2.2. Som puro e Som composto

Um som pode ser distinguido entre dois tipos: sons puros que são sons com uma onda com uma única frequência; sons complexos que são sons com mais que uma frequência que podem ter origem na junção de dois ou mais sons puros (Figura 2.6). Os sons complexos são mais comuns que os sons puros sendo um dos poucos sons puros o som dum diapasão [1], [17].



Figura 2.6 - Comparação de oscilogramas dum som puro (esquerda) e um som complexo (direita) [18].

2.2.2.3. Comprimento de Onda e Período

O período (T) é o tempo em segundos que separa dois pontos semelhantes consecutivos numa onda e pode ser calculado utilizando a fórmula 2.11 [19]:

$$T = 1/f \text{ (s)} \quad \text{Eq. 2.11}$$

Uma onda sonora tem na sua constituição cristas e vales de onda sendo respetivamente o ponto mais alto e o ponto mais baixo (Figura 2.7). À distância entre duas cristas de onda consecutivas ou de dois vales consecutivos dá-se o nome de comprimento de onda (λ), podendo este comprimento ser medido também em outros pontos da onda tendo em consideração que têm de ter características semelhantes. A forma de cálculo deste parâmetro traduz na seguinte fórmula 2.12 [1], [20]:

$$\lambda = c \cdot T = c/f \quad \text{Eq. 2.12}$$

com, λ - comprimento de onda (m);

c - celeridade (velocidade de propagação do som no ar (m/s);

T - período (s);

f - frequência (Hz).

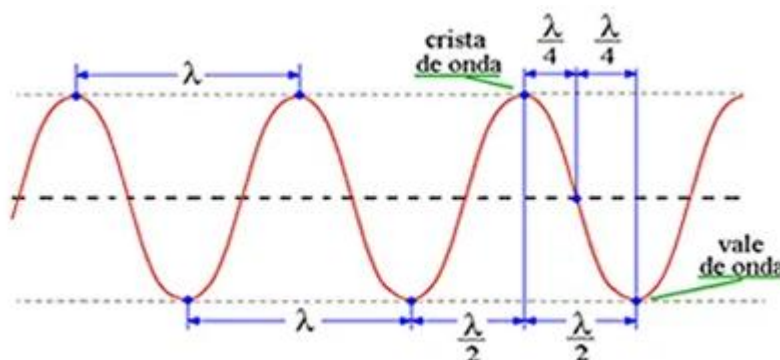


Figura 2.7 - Onda sonora com representação de características [20].

2.2.2.4. Bandas de Frequência

O estudo da frequência, tendo em conta que existem inúmeras, é facilitado através do agrupamento de várias frequências em intervalos do eixo das frequências. A este agrupamento de frequências deu-se o nome de bandas. A denominação da banda é assim dada pela frequência central (f_0) que pode ser calculado através da fórmula 2.13 [1]:

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \quad \text{Eq. 2.13}$$

com, f_1 - limite inferior;

f_2 - limite superior.

Com a introdução das bandas de frequências foi introduzida também a largura de banda (B) que é a diferença entre os limites extremos da banda. É muito comum usar no estudo da acústica de edifícios dois tipos de bandas sendo elas a de 1/1 oitava e a de 1/3 de oitava, podendo a largura destas ser calculada pela Eq. 2.14 [1]:

$$B = f_2 - f_1 = \frac{2^K - 1}{\sqrt{2^K}} f_0 \quad \text{Eq. 2.14}$$

com, $K = 1$ ou $1/3$ para a banda de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava respetivamente.

É possível também através da frequência central calcular os limites das duas bandas de frequências, para tal [1]:

$$f_1 = f_0 2^{-K/2} \text{ e } f_2 = f_0 2^{K/2} \quad \text{Eq. 2.15}$$

com, $K=1$ ou $1/3$ para banda de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava respetivamente

Ambas as bandas têm intervalos normalizados. Para a de 1/1 oitava os valores das frequências nominais ou centrais (f_0) são 16, 31, 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k e 16k Hz. Já na banda de 1/3 de oitava são 20, 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1k, 1250, 1600, 2k, 2500, 3150, 4k, 5k, 6300, 8k, 10k, 12500, 16k e 20k Hz [1].

2.2.2.5. Curvas de Ponderação

As curvas de ponderação foram criadas devido à necessidade de adaptar os níveis de pressão sonora à audição humana pois o ouvido não ouve todas as frequências de igual forma. O ouvido humano tem diferente sensibilidade para diferentes frequências (percepção subjetiva) sendo mais sensíveis na zona de emissão da palavra que se situa entre os 1000 e os 5000 Hz. Para traduzir esta subjetividade surgiram as curvas com a unidade *fone* (F) (Figura 2.8) onde cada curva representa igual percepção para as diferentes frequências tendo como base o nível de pressão sonora do valor de 1k Hz (valor de *fone* é o valor do nível de pressão sonora da frequência de 1k Hz). Em termos comparativos não se pode dizer que 20 *phones* é o dobro de 10 *phones* e para facilitar a comparação surgiu a unidade *sone* (S) com a relação entre as unidades traduzida pela fórmula 2.16 [1]:

$$S = 2^{(F-40)/10} \quad \text{Eq. 2.16}$$

Nota: a fórmula é válida apenas para a gama de 40 a 100 *fone*.

De forma a corrigir as medições dum aparelho para o adaptar à audição humana, especialmente para sons complexos, surgiram as curvas de ponderação, também denominadas de filtros, consistem em correções às frequências atribuindo-lhe diferentes pesos em dB. As principais curvas existentes são as curvas A, B, C e D porém a mais usada é a curva A que pretende aproximar à resposta do ouvido

para ruídos de baixa intensidade e consiste numa aproximação do inverso da curva de 40 *fone*. As curvas B e C, pouco usadas pretendem aproximar para ruídos de alta intensidade e a curva D é utilizada para ruídos de aviões, essencialmente [1], [21].

Quando a um nível de pressão sonora é aplicado o filtro A a denominação passa a ser nível sonoro em dB(A). Assim para o cálculo do nível sonoro é adicionado algebricamente ao nível de pressão sonora e em cada banda de frequência a ponderação que está no Quadro 2.2. Por fim faz-se a soma logarítmica do nível sonoro de cada uma das bandas de frequências para obter o nível sonoro global do ruído [1].

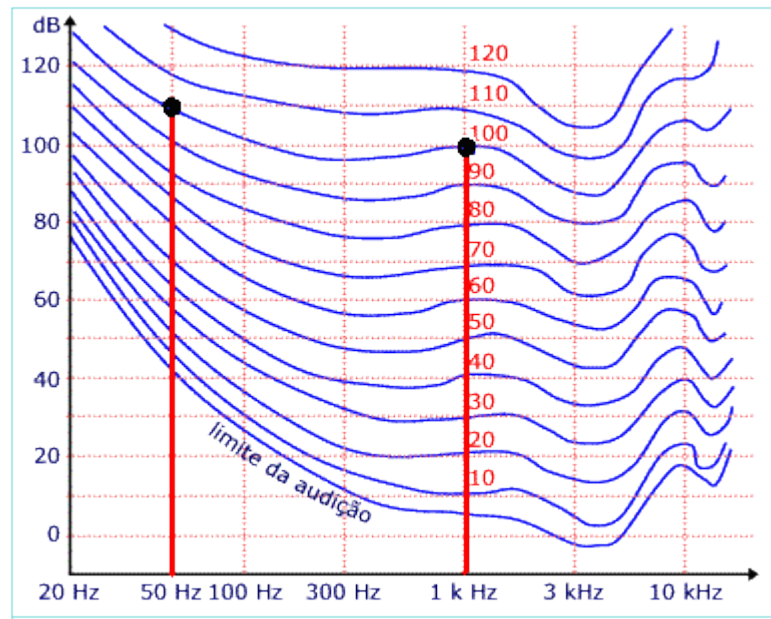


Figura 2.8 - Curvas de igual sensação auditiva (*fone*) [22].

Quadro 2.2 - Valores das ponderações do filtro A para as bandas de 1/1 e de 1/3 d oitava em dB [1].

Banda de frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 de oitava	Ponderação A para 1/1 de oitava	Banda de frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 de oitava	Ponderação A para 1/1 de oitava
12,5	-63,4	-57	800	-0,8	0
16	-56,7		1000	0	
20	-50,5		1250	0,6	
25	-44,7	-40	1600	1,0	+1
31,5	-39,4		2000	1,2	
40	-34,6		2500	1,3	
50	-30,2	-26	3150	1,2	+1
63	-26,2		4000	1,0	
80	-22,5		5000	0,5	
100	-19,1	-15,5	6300	-0,1	-1
125	-16,1		8000	-1,1	
160	-13,4		10000	-2,5	
200	-10,9	-8,5	12500	-4,3	-7
250	-8,6		16000	-6,6	
315	-6,6		20000	-9,3	
400	-4,8	-3			
500	-3,2				
630	-1,9				

2.2.3. ANÁLISE NO TEMPO

O estudo da duração dum ruído é importante pois permite avaliar este com um valor único ao contrário de fazer uma análise com valores individuais bastante díspares. Existem ruídos quase instantâneos (como um tiro por exemplo) porém esta análise no tempo não é necessária para esses e foca-se nos não instantâneos. A análise do nível de pressão sonora é mais estável quando esta se faz no tempo do que no instante, porém apresenta ainda um nível de pressão sonora eficaz (L_{pef}), que também pode se encontrar com a denominação de SPL (*sound pressure level*), de difícil compreensão [1].

Assim de forma a fazer-se a análise da melhor forma o parâmetro utilizado é o nível de pressão equivalente (L_{eq}) que se traduz num nível que ao emitir de forma constante num intervalo de tempo possui a mesma energia que o som em análise. Este apresenta a seguinte fórmula de cálculo [1]:

$$L_{\text{eq}} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \quad \text{Eq. 2.17}$$

Existe, também para a análise no tempo, os parâmetros estatísticos (L_N) que consistem no nível de pressão sonora que num determinado espaço de tempo é excedido em $N\%$ do tempo. Sendo nesta análise bastante comum o uso dos percentis de L_{95} e L_{50} . Na Figura 2.9 pode ver-se a diferença entre o L_{eq} , de L_1 , de L_{10} e de L_{90} para uma melhor compreensão destes parâmetros [1].

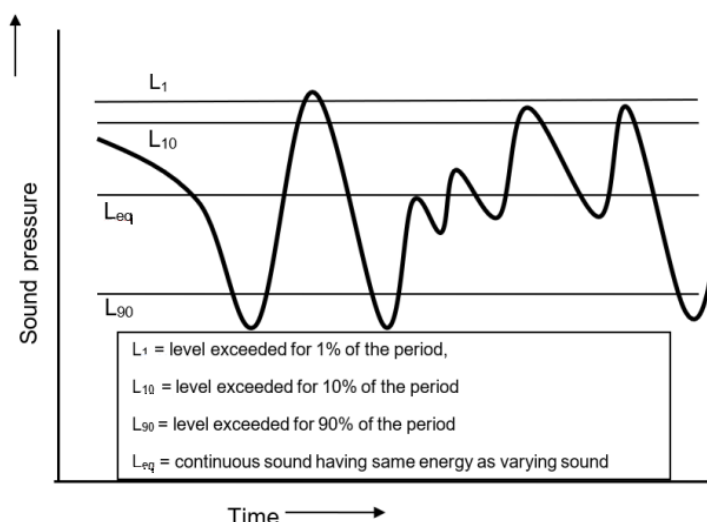


Figura 2.9 - Representação gráfica de, L_{eq} , L_1 , L_{10} e L_{90} [23].

Outra forma deste estudo é através do parâmetro SEL (*sound exposure level* ou *single event level*) que se define pelo nível que num segundo contém a mesma energia que o ruído em estudo. É de salientar que para o cálculo deste parâmetro é necessário o valor de $L_{\text{eq}T}$ num determinado intervalo de tempo em segundo (T) podendo assim o SEL ser calculado pela equação 2.18:

$$\text{SEL} = L_{\text{eq}T} + 10 \log T \quad \text{Eq. 2.18}$$

2.3. ABSORÇÃO SONORA

2.3.1. DEFINIÇÃO

A absorção sonora é a capacidade que um material tem em absorver as ondas sonoras ao invés de as refletir novamente para o meio (Figura 2.10). Este fenómeno consiste na transformação da energia sonora que incide no material para outro tipo de energia (em geral energia térmica) [1], [24], [25].

Para quantificar a absorção de um determinado material é utilizado o coeficiente de absorção sonora (α) que relaciona a quantidade de energia emitida com a energia absorvida. Este coeficiente varia de 0 a 1 [1], [26].

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad \text{Eq. 2.19}$$

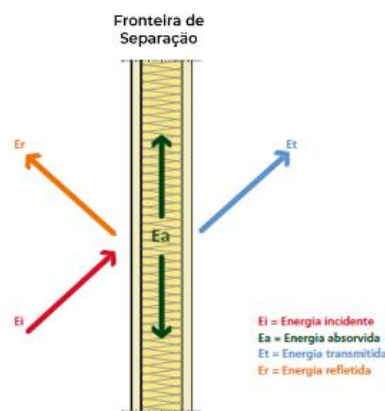


Figura 2.10 - Desenho esquemático da interação do som com um material [27].

O coeficiente de absorção sonora, reflete a absorção sonora para cada frequência. Existem outras formas de classificação desta propriedade dos materiais. O NRC (*noise reduction coefficient*) é uma dessas formas de classificação em que este é representado pela média aritmética dos coeficientes de absorção para as frequências de 250, 500, 1000 e 2000 Hz (Eq. 2.20) [28].

$$\text{NRC} = (\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}) \quad \text{Eq. 2.20}$$

Existe também a SAA (*sound absorption average*), usada nos EUA, que utiliza o mesmo método do NRC (média aritmética) com a diferença de que utiliza os valores do coeficiente de absorção das frequências das bandas de 1/3 de oitava dos 200 aos 2500 Hz [1].

Outra forma bastante utilizada é a do α_w que avalia o coeficiente para as frequências de 250, 500, 1000 e 2000 e através de uma curva de referência (por exemplo: 0,8/1,0/1,0/0,9) e determina-se os desvios entre esta e os valores reais. A soma dos positivos deve ser o mais próximo possível de 0,1 (sem a ultrapassar e em múltiplos de 0,05). O valor de α_w é o valor de α para a frequência de 500 Hz. Quando o valor de uma determinada frequência excede o de referência em 0,25 é acrescentada uma letra consoante a frequência em que isto acontece (250/500 - L, 1000/2000 - M, 4000 - H). A norma NP EN ISO 1165 [29] para esta classificação exige ainda a classificação das classes em que se atribui A para $\alpha_w \geq 0,95$, B para $0,8 \leq \alpha_w \leq 0,85$, C para $0,60 \leq \alpha_w \leq 0,75$, D para $0,30 \leq \alpha_w \leq 0,55$, E para $0,15 \leq \alpha_w \leq 0,25$ e não classificado para $\alpha_w \leq 0,1$ [1].

2.3.2. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO SONORA

A determinação do coeficiente de absorção sonora tem dois métodos normalizados, o método do tubo de ondas estacionárias, também denominado de tubo de Kundt) e o método da câmara reverberante [1].

O ensaio através do tubo de ondas estacionárias utiliza o tubo de Kundt (Figura 2.11) que consiste num tubo metálico ou em vidro com 0,1 m de diâmetro; uma das extremidades tem o altifalante com um orifício para a nele fazer deslizar uma vara ligada a um microfone que desliza sobre rodas. O altifalante ao ser ligado cria ondas estacionárias através das interações entre as ondas incidentes e as refletidas. Este método tem o inconveniente de não ser possível fazer a medição para a incidência sem ser na perpendicular o que conduz a resultados não tão exatos como o método da câmara reverberante onde pelo contrário isso é possível. Para fazer uma aproximação desta medição na perpendicular para um valor do coeficiente para um campo difuso usa-se a fórmula 2.21 [1], [30]:

$$\alpha_d = 1,9277 \cdot \alpha_n - 0,891 \cdot \alpha_n^2 \quad \text{Eq. 2.21}$$



Figura 2.11 - Tubo de ondas estacionárias (tubo de Kundt) [30].

O ensaio da câmara reverberante (Figura 2.12), como o nome indica faz uso da câmara reverberante que ao contrário de uma câmara anecóica, em que as paredes, teto e piso são em um material altamente absorvente, os elementos da sala são altamente refletores garantido assim um tempo de reverberação elevado. Podem também existir na câmara difusores suspensos para aumentar a difusão do som. Para o ensaio são utilizadas amostras de uma dimensão elevada em comparação ao método do tubo de Kundt (10 a 12 m²) o que pode ser inconveniente. São realizadas duas medições do tempo de reverberação, uma com a câmara “vazia” (sem o material em estudo) e outra com o elemento em estudo. Depois são comparados os valores medidos do tempo de reverberação. Este método apesar de ser mais exato que o do tubo de Kundt, uma vez que o campo sonoro da câmara é difuso, pode apresentar valores matematicamente incorretos ($\alpha > 1$). Esta imprecisão acontece, pois, pode existir difração nos bordos do material em estudo. Estes valores (superiores a 1) apesar de serem pouco superiores aparecem muitas vezes em catálogos dos fornecedores [1], [31].



Figura 2.12 - Câmara reverberante [32].

2.3.3. MATERIAIS DE ABSORÇÃO SONORA

Os materiais e/ou sistemas de absorção sonora geralmente são agrupados tendo em conta as suas características básicas em que cada grupo é mais eficaz para uma determinada gama de frequências [1].

- Porosos ou fibrosos

São os materiais/sistemas absorventes mais eficazes para frequência mais elevadas (Figura 2.13) e são caracterizados por ser materiais onde as ondas sonoras se vão dissipando nos poros e/ou fibras existentes por fricção entre estas transformando a energia sonora em calor. Alguns exemplos deste tipo são alcatifas em lã mineral [1].

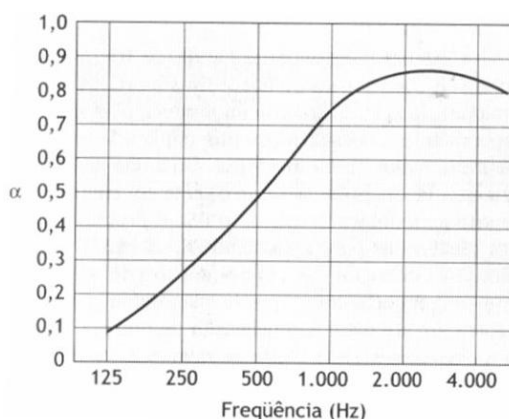


Figura 2.13 - Comportamento típico do coeficiente de absorção sonora de materiais porosos [33].

- Ressonadores

Este sistema pode-se dividir em ressoadores isolados (Figura 2.14 esq.) ou em ressoadores agrupados (Figura 2.14 dir.). Os ressoadores isolados (frequentemente denominados por ressoadores de Helmholtz) são cavidades nas paredes com uma abertura para o exterior (e a ligação à cavidade de nome garganta) em que o som ao entrar na cavidade faz o ar vibrar e forma-se um sistema massa-mola. As dimensões da garganta, tanto o diâmetro como o comprimento e ainda o volume da cavidade influenciam a frequência de eficácia máxima e pode-se calcular esta segundo a fórmula 2.22 [1], [34]:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(l+1,6r)}} \quad \text{Eq. 2.22}$$

com, c - celeridade (m/s);

S - área da abertura do gargalo (cm^2);

V - volume da cavidade (cm^3);

l - comprimento do gargalo (cm);

r - raio do gargalo (cm).

O outro tipo de ressoadores são os agrupados (Figura 2.14 dir.) que consistem em painéis com perfurações (em geral colocados em tetos falsos e podem ser em madeira ou metálicos). Até um certo limite o aumento da furação dos painéis conduz a um aumento do coeficiente de absorção sonora sendo que a partir de 25% de furação do painel o efeito deixa de ser notório. A expressão de cálculo da frequência de eficácia máxima é dada por [1]:

$$f = \frac{10.c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{(e+1,6r)d}} \quad \text{Eq. 2.23}$$

com, c - celeridade (m/s);

P - percentagem de furação (%);

E - espessura da placa perfurada (cm);

r - raio de cada perfuração (cm);

d - largura de caixa de ar (cm).

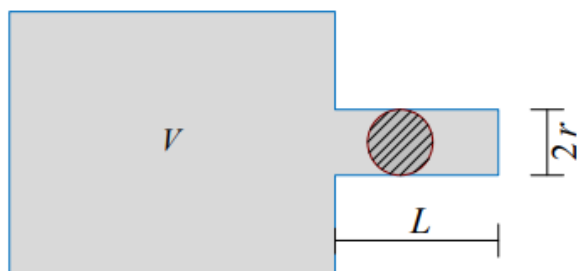


Figura 2.14 – Ressoadores: Ressorador de Helmholtz (esq.) e Ressoadores agrupados (dir.) [35], [36].

Os ressoadores devem conter no interior da cavidade material absorvente sonoro para melhorar o coeficiente de absorção. Os dois tipos de ressoadores são mais eficazes a absorver as frequências médias e na Figura 2.16 pode-se ver a evolução do coeficiente de absorção ao longo das frequências [1].

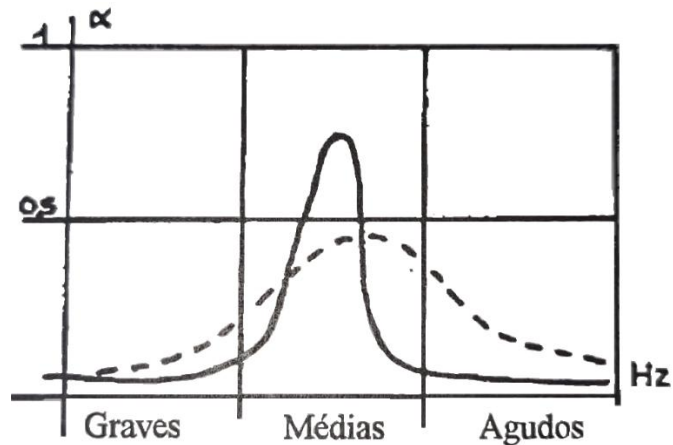


Figura 2.15 - Desenvolvimento do coeficiente de absorção de ressoador com material absorvente na cavidade (linha tracejada) e sem o material [1].

- Membranas

Este é o sistema com maior eficácia para baixas frequências. A absorção das ondas sonoras é realizada através da vibração da membrana que transforma através desta vibração a energia sonora em calor. A eficácia deste sistema é maior para a sua frequência natural que é dada pela Eq. 2.24 [1].

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{m \cdot d}} \cong \frac{60}{\sqrt{m \cdot d}} \quad \text{Eq. 2.24}$$

com, c - celeridade (m/s);

ρ - massa volúmica do ar;

m - massa superficial (kg/m^2);

d - espessura da caixa de ar (m).

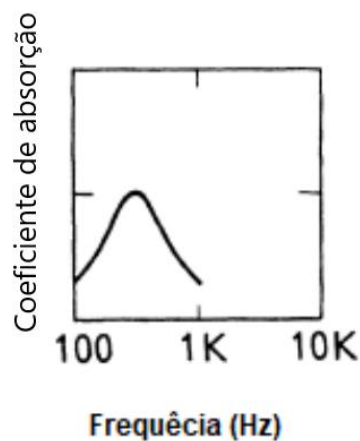


Figura 2.16 - Evolução do coeficiente de absorção segundo a frequência para membranas [37].

2.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

2.4.1. DEFINIÇÃO

O tempo de reverberação por definição é o tempo necessário para o nível de pressão sonora de um determinado espaço reduzir em 60 dB após a fonte sonora ser desligada (Figura 2.18). Apesar de por definição apresentar como sendo uma redução de 60 dB na prática esta diminuição é bastante difícil de ser atingida e por essa razão é comum ser medido o tempo até se obter um decaimento de 30 ou 20 dB e extrapolado para 60 dB (T_{30} ou T_{20}) [1], [38].

O tempo de reverberação mais elevado acontece quando uma sala tem a sua envolvente constituída por materiais com pouca capacidade de absorção sonora o que resulta na reflexão das ondas sonoras e assim o recetor recebe as ondas sonoras de forma direta e por reflexão podendo esta reflexão ser simples (uma reflexão) ou múltipla (várias reflexões) [1].

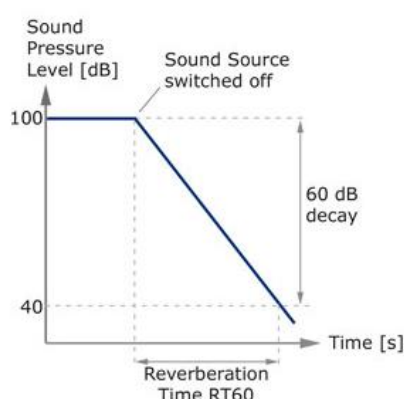


Figura 2.17 - Definição do tempo de reverberação [38].

2.4.2. MEDIÇÃO

A medição do tempo de reverberação (em segundos), que é regulamentada pela EN ISO 3382 [39], necessita de essencialmente de dois equipamentos. Uma fonte sonora que pode ou não ser omnidirecional, porém deve ser potente, como tal é comum serem utilizados altifalantes (mais usado na atualidade) ou pistolas de pólvora seca. O outro equipamento essencial é o sonómetro para fazer a medição do nível de pressão sonora e assim perceber o tempo que demora a reduzir os 60 dB (segundo a definição) ou 30 dB (na prática) [1], [40].



Figura 2.18 - Equipamento de medição do tempo de reverberação [38].

2.4.3. TEMPO DE DECAIMENTO CURTO (EDT)

O tempo de decaimento curto (EDT que significa *early decay time*) consiste no tempo de reverberação, em segundos, porém na sua medição ao invés de se medir o tempo até se obter uma diminuição de 60 dB realiza-se a medição até se obter a diminuição de 10 dB e posteriormente multiplicado por 6 (Eq. 2.25). Esta medição tem uma maior influência das reflexões iniciais e da posição do recetor, portanto é mais indicada para analisar a percepção do ouvinte dependendo da sua posição do local em estudo [41].

$$EDT=6[DS^1(10)-DS^1(0)] \text{ (s)} \quad \text{Eq. 2.25}$$

2.4.4. RÁCIO DE BAIXOS

Este parâmetro é utilizado para avaliar o balanço tonal realizado uma comparação entre os tempos de reverberação de frequência baixa com a de frequência alta [1].

BR_TR - *Bass Ratio* baseado no tempo de reverberação

$$BR_TR=[TR(125)+TR(250)]/[TR(500)+TR(1k)] \quad \text{Eq. 2.26}$$

2.4.5. EFEITOS DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O tempo de reverberação mais elevado tem como ponto negativo a sobreposição dos sons uma vez que o primeiro som não decai até à chegada do som seguinte e assim o primeiro pode mascarar o segundo o que conduz à dificuldade na percepção deste. Em suma o som direto pode ser mais difícil de captar por sobreposição do som refletido. Por outro lado, o tempo de reverberação mais elevado pode ter um efeito positivo que é o aumento do nível de pressão sonora, que acontece quando o som refletido chega com uma diferença não superior a 40 ms do som direto e o ouvido humano não o percebe como um som distinto resultando no aumento do nível de pressão sonora [42].

Na palavra o efeito da reverberação elevada mais crítico é a sobreposição o que resulta numa percepção mais reduzida. Isto acontece, pois, as vogais normalmente têm uma intensidade mais alta. Logo não se dissipam tão facilmente como as consoantes que têm em geral uma intensidade mais baixa, resultando assim na sobreposição das vogais sobre as consoantes havendo perda de informação visto que as consoantes têm mais informação que as vogais [1], [42].

Na música o efeito do tempo de reverberação elevado, até um certo limite, é mais positivo pois permite ter um aumento do nível de pressão sonora o que conduz a uma maior percepção das notas musicais sem ser crítica a perda da inteligibilidade palavra. É de salientar que dentro dos estilos musicais o tempo de reverberação ideal é diferente entre cada um deles [1].

2.4.6. FÓRMULAS DE PREVISÃO

O primeiro a estudar o fenómeno do tempo de reverberação foi Wallace Clemment Sabine numa sala de aula da universidade onde lecionava e deduziu uma fórmula de cálculo que relacionava o volume da sala com a absorção [1]:

$$T=\frac{0,16V}{A} \quad \text{Eq. 2.27}$$

com, T - tempo de reverberação (s);

V - volume do compartimento (m^3);

A - absorção sonora equivalente (m^2).

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad \text{Eq. 2.28}$$

com, α - coeficiente de absorção sonora;

S - área da superfície do material (m^2).

Nota: a fórmula de Sabine tem mais precisão para compartimentos difusos e em que o coeficiente de absorção sonora médio da envolvente é inferior a 0,2.

Para calcular o tempo de reverberação em compartimentos em que a sua envolvente é constituída por materiais com coeficientes de absorção sonora semelhantes entre si foi criada a fórmula de Norris-Eyring [1]:

$$T = \frac{0,16V}{-S \cdot \ln(1-\bar{\alpha})} \quad \text{Eq. 2.29}$$

com, V - volume do compartimento (m^3);

S - área da superfície do material (m^2);

$\bar{\alpha}$ - média pesada pelas superfícies do coeficiente de absorção sonora.

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i S_i}{\sum S_i} \quad \text{Eq. 2.30}$$

com, α - coeficiente de absorção sonora;

S - área da superfície do material (m^2).

Para compartimentos com a envolvente com coeficientes de absorção sonora bastante diferentes entre si surgiu a fórmula de Millington-Sette [1]:

$$T = \frac{0,16V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1-\alpha_i)} \quad \text{Eq. 2.31}$$

com, V - volume do compartimento (m^3);

S - área da superfície do material (m^2);

α - coeficiente de absorção sonora.

De forma genérica a fórmula de Sabine, que é a fórmula mais comum de ser utilizada pode ainda ser definida por [1]:

$$T = \frac{0,16V}{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^m A_j + mV} \quad \text{Eq. 2.32}$$

com, V - volume do compartimento (m^3);

S - área da superfície do material (m^2);

A_j - absorções sonoras localizadas (m^2);

m - absorção sonora do ar em função da humidade (m^{-1}).

Uma forma simplificada de ainda obter a atenuação sonora ΔL por acréscimo de absorção sonora, por exemplo quando se intervém num local aumentando a absorção deste, (de A_0 para A_1) é dada pela seguinte equação [1]:

$$\Delta L = 10 \log \frac{A_1}{A_0} \quad \text{Eq. 2.33}$$

2.5. ISOLAMENTO SONORO

2.5.1. RUÍDOS AÉREOS

2.5.1.1. Definição

O ruído aéreo é gerado pelas vibrações do ar provocadas pelas fontes sonoras. Estas vibrações podem passar de uma sala para outra por via direta ou marginal (Figura 2.19), sendo a segunda por vezes desleixada o que resulta num mau isolamento da sala [1], [43], [44].

O isolamento sonoro para este tipo de ruídos é condicionado pela massa do material, assim como a duplicação do elemento. Um exemplo da duplicação são as paredes duplas onde é importante garantir que os panos (interior e exterior) têm espessuras diferentes uma vez que isto permite que a frequência crítica (frequência que passa pelo elemento praticamente sem redução) destes não coincida. Para um bom isolamento sonoro a frequência crítica deve ser a mais baixa possível e isso é geralmente garantido através do aumento da massa superficial do elemento [1].

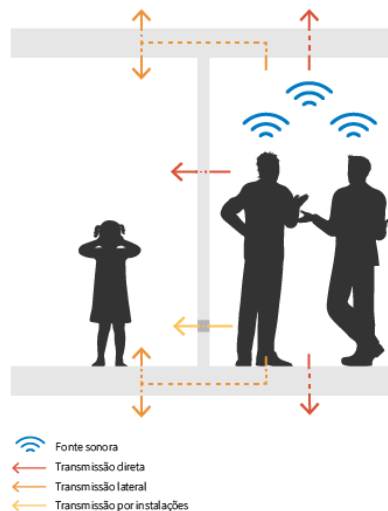


Figura 2.19 - Transmissões dos ruídos aéreos [44].

2.5.1.2. Medição

Para medir o isolamento sonoro a ruídos aéreos existem dois métodos, um em que apenas é medida a transmissão direta do som e um segundo em que se tem em consideração e mede-se também as transmissões marginais. Para o obter é feita a medição do nível de pressão sonora em cada compartimento e em seguida é realizada a diferença entre elas. Ambos métodos são regidos pela NP EN ISO 16283-1 [45] que diz que se deve emitir um ruído rosa de 100 dB para ter o isolamento por banda de frequência. Já o método que visa também as transmissões marginais é realizado *in situ* obtendo o valor do isolamento sonoro padronizado (D_{nT}) [1].

A primeira é realizada em laboratório (Figura 2.20) sendo um ambiente controlado é possível então garantir apenas a passagem do som só por via direta obtendo o valor de redução sonora (R) [1].



Figura 2.20 - Exemplo de medição da redução sonora em laboratório [46].

2.5.2. RUÍDOS DE PERCUSSÃO

2.5.2.1. Definição

Os ruídos de percussão (Figura 2.21), em geral são mais incomodativos que os ruídos aéreos, têm origem na excitação mecânica dos elementos da estrutura do edifício sendo eles as paredes e/ou pavimentos. Podem também ser transmitidos de forma direta ou marginal. Este tipo de ruído tem ainda duas origens, fontes estáticas (por exemplo um sistema de bombagem) e as fontes de impacto (por exemplo uma pessoa a andar no andar acima) [1] [47].

Para reduzir as perturbações causadas por estes ruídos é possível atuar de três formas: pode-se atuar na fonte, por exemplo afastar esta da zona onde se pretende menos ruído ou até aplicar camadas resilientes nas superfícies que vão sofrer impacto (por exemplo uma alcatifa no piso). Em segundo, pode-se atuar no caminho de propagação “desligando” mecanicamente as componentes estruturais (por exemplo lajes flutuantes). Por último pode ainda atuar-se junto ao recetor ao isolar as superfícies que irradiam o ruído (por exemplo a aplicação de teto falso com absorção sonora) [1].

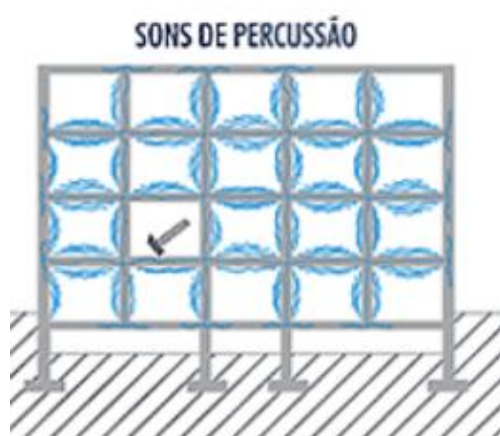


Figura 2.21 - Funcionamento da propagação de ruídos de percussão [47].

2.5.2.2. Medição

Do mesmo modo que com os ruídos aéreos o isolamento sonoro a ruídos de percussão pode ser medido com as transmissões marginais (*in situ*) ou sem (em laboratório). Ao contrário do que é realizado na medição do isolamento a ruídos aéreos neste não é possível fazer a diferença entre os níveis de pressão sonora entre os compartimentos. Para a medição que é normalizada segundo NP EN ISO 16283-2 [48] é utilizado uma máquina de impacto (Figura 2.22) que produz o ruído de percussão através de cinco martelos a bater 10 vezes por segundo. Pode-se assim avaliar através deste processo o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado ($L_{n,w}$), quando em laboratório ou o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão padronizados ($L'_{nT,w}$), quando *in situ* [1].



Figura 2.22 - Máquina de percussão para realização de ensaios [49].

2.5.3. RUÍDOS DE EQUIPAMENTOS

2.5.3.1. Fontes de Ruído

Alguns exemplos de equipamentos que individualmente não fazem grande ruído, porém quando ligados a um objeto de maior dimensão originam ruídos de mais elevado nível sonoro são [1]:

- Canalizações - nas zonas de cavitação principalmente podendo-se resolver este problema através da velocidade da água não superior a 2 m/s;
- Instalações elétricas - para evitar este problema é de evitar colocar caixas elétricas no mesmo envolvimento da parede, evitar luzes fluorescentes (pois estas produzem ruído) e ainda selar as zonas de passagem dos cabos com material isolante;
- Elevadores – para evitar os ruídos destas fontes deve-se colocar a zona das máquinas afastada, usar um motor que produza pouco ruído e ainda realizar a casa das máquinas de forma a isolar ruídos aéreos e de percussão.

2.5.3.2. Curvas de Incomodidade

Para avaliar o incômodo causado pelo ruído de fundo causado por equipamentos num determinado compartimento são utilizadas as curvas de incomodidade. Existem várias, porém no presente trabalho são apenas abordadas as NC (*Noise Criterion*) e a NR (*Noise Rating*). As medições para a avaliação destes parâmetros devem ser realizadas à altura dos ouvidos para uma melhor representação à escala humana e o ruído a avaliar deve ser contínuo [1].

- NC (*Noise Criterion*) - Este critério avalia a pressão sonora de oito bandas de frequência de 1/1 de oitava entre 63 e 8000 Hz. A classificação é dada pela menor curva que não é excedida por nenhum nível sonoro das várias bandas (Figura 2.23);

- NR (Noise Rating) – A avaliação deste critério é semelhante ao da curva de NC, porém utiliza ainda a banda de 1/1 de oitava de 32 Hz além das já utilizadas na NC (Figura 2.24).

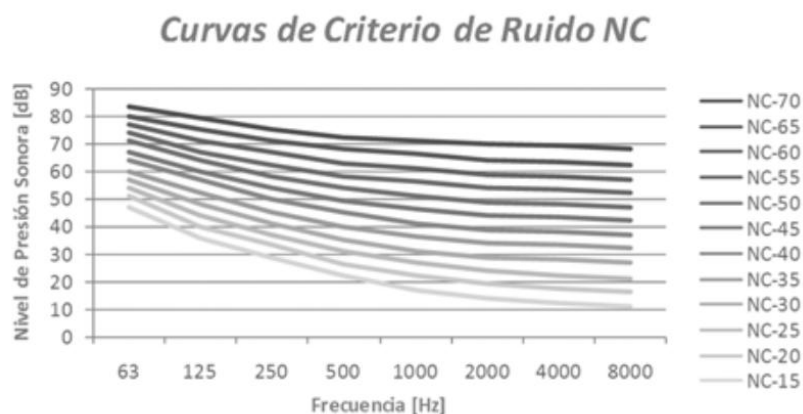


Figura 2.23 - Curvas de Incomodidade NC [50].

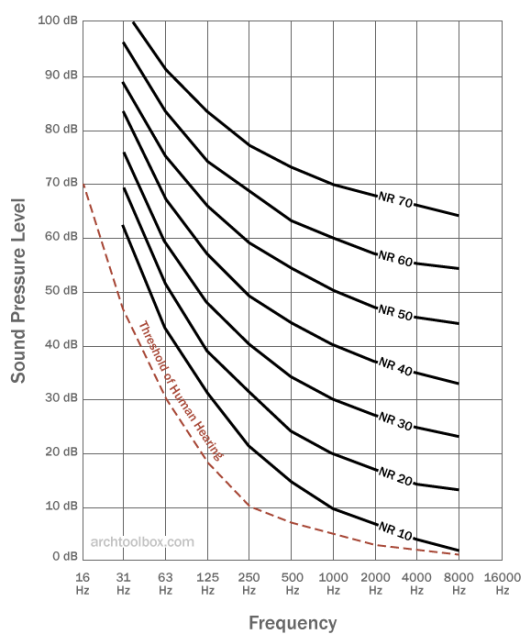


Figura 2.24 - Curvas de Incomodidade NR [51].

Quadro 2.3 - Valores máximos ideais de NC em diversos locais [52].

Local	Curva de NC máxima
Estúdios de gravação	15
Salas de concerto e teatros	15-25
Salas de aulas	20-30
Bibliotecas	30-35
Restaurantes	35-40
Hotéis	20-30
Pavilhões desportivos	40-50

Quadro 2.4 - Valores máximos ideais para o NR [53].

Utilização	Máximo NR
Estúdios de gravação	20
Salas de concertos	20 – 25
Cinemas	25 – 30
Igrejas	25 – 30
Salas de aula	25 – 35

2.6. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

2.6.1. CONCEITOS GERAIS

A análise detalhada da voz humana tem essencialmente de abordar quatro características, sendo elas a frequência, intensidade, duração e a direccionalidade [1].

A emissão da palavra humana tem uma gama de frequência que varia sensivelmente entre 150 e 7000 Hz. Os diferentes fonemas têm frequências diferentes entre si, tendo as vogais frequências fundamentais mais baixas (150-300 Hz) enquanto que as consoantes têm frequências fundamentais mais elevadas (3500-7000 Hz). Esta característica da palavra varia com o idioma falado sendo uma das explicações para um português entender melhor o português do Brasil do que um brasileiro entende o português de Portugal pois o de Portugal tem uma maior amplitude de frequências e assim tem hábito e entende essas diferenças mais facilmente [1].

Quanto à intensidade a maior diferença mais uma vez está entre as vogais e as consoantes podendo no caso mais extremo fazer uma diferença de cerca de 28 dB (vogal mais intensa e consoante menos intensa) [1].

A duração média da palavra e de igual modo às duas características anteriores pode-se verificar diferenças significativas entre as consoantes (20 ms) e as vogais (90 ms) [1].

A direccionalidade da emissão da voz é preferencialmente para a frente do orador, porém como se pode verificar na Figura 2.25 as frequências mais elevadas têm uma maior perda de intensidade sonora, quando se mede fora da zona em frente ao orador, que as baixas frequências [1].

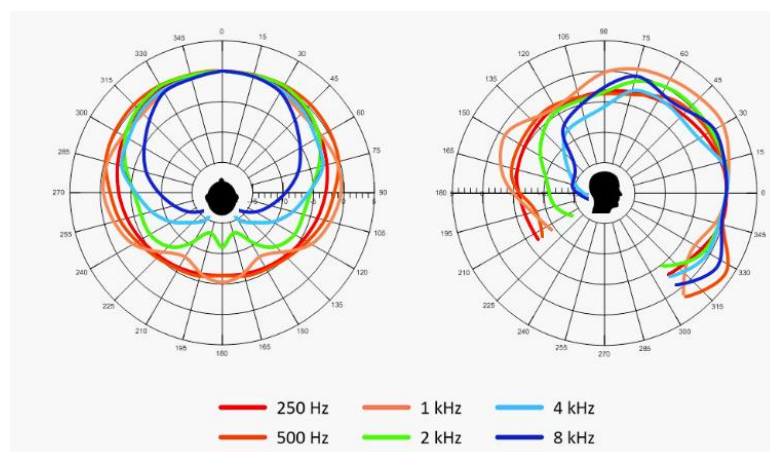


Figura 2.25 - Esquema da perda de intensidade sonora da palavra tendo em conta a direccionalidade da emissão [54].

2.6.2. PARÂMETROS

No estudo da inteligibilidade da fala existem duas abordagens possíveis a primeira abordagem é subjetiva e consiste no uso de auditores a ouvirem um determinado texto e posteriormente escrever o que ouvirem podendo assim avaliar-se a inteligibilidade. A segunda abordagem, que terá foco no presente trabalho, é uma abordagem objetiva em que através de valores pré-estabelecidos se avalia a inteligibilidade sem ser necessário ouvintes humanos para o estudo. Os parâmetros objetivos abordados neste trabalho são [1]:

- AI (índice de articulação) - O índice de articulação surgiu com o objetivo de avaliar o impacto que o nível sonoro do ruído de fundo pode ter na percepção da conversação. O valor do índice varia entre 0 e 1 (podendo dizer-se o grau de inteligibilidade tendo em conta os valores do Quadro 2.4). Para a obtenção do parâmetro é realizada a diferença entre o nível sonoro da conversação (nc) com o do ruído de fundo (nf) pesada tendo em conta as gamas de frequências com maior importância (p) (Quadro 2.3), depois soma-se as diferenças e ao dividir por 1000 é obtido o índice de articulação [1], [55].

Quadro 2.5 - Pesos e nível de conversação por banda de frequência para cálculo do índice de articulação [1].

Frequência (Hz)	Nível de conversação	Peso (p)
250	72	18
500	73	50
1000	78	75
2000	63	107
4000	58	83

Quadro 2.6 - Graus de inteligibilidade e de privacidade [1].

AI (Índice de articulação)	Grau de privacidade	Grau de inteligibilidade
$< 0,05$	Confidencial	Nula
$0,05 \leq AI < 0,2$	Normal privacidade	Muito fraca
$0,2 \leq AI < 0,35$	Marginal	Fraca
$0,35 \leq AI < 0,4$	Pobre	Sofrível
$0,4 \leq AI < 0,65$	Em geral, sem privacidade	Boa
$\geq 0,65$	Privacidade totalmente inexistente	Excelente comunicação

- SIL (nível de interferência na conversação) - este parâmetro avalia o quanto um ruído de fundo influencia na conversação. Para a avaliação deste parâmetro é realizada uma média aritmética do ruído de fundo para três bandas de frequência (500, 1000 e 2000 Hz) (Eq. 2.34) e posteriormente comparada com valores tabelados de esforço tendo em conta a distância entre os recetores e orador e o sexo do orador (Feminino ou Masculino) (Quadro 2.5) [1], [56].

$$SIL(dB) = (RF_{500\text{ Hz}} + RF_{1\text{ kHz}} + RF_{2\text{ kHz}}) / 3 \quad \text{Eq. 2.34}$$

Quadro 2.7 - Valores de SIL para a comunicação no limite do possível (M - Masculino, F - Feminino) [1].

Distância (m)	SIL (dB)							
	Esforço de Voz							
	Normal		Elevado		Muito alto		Gritando	
	M	F	M	F	M	F	M	F
0,3	68	63	74	69	80	75	86	81
1,0	58	53	64	59	70	65	76	71
2,0	52	47	58	53	64	59	70	65
3,0	48	43	54	49	60	55	66	61
4,0	46	41	52	47	58	53	64	59

- *AC (articulation class)* – Este é semelhante ao AI, porém utiliza-se as bandas de frequência de 1/3 de oitava de 200 a 5000 Hz (Eq. 2.35), com os valores dos pesos (p) e do nível de conversação (nc) na Quadro 2.6 [1].

$$AC = \sum_{i=0}^{15} \Delta L_i \cdot \text{peso}_i / 10000 \quad \text{Eq. 2.35}$$

Quadro 2.8 - Valores do método de obtenção de AC [1].

Frequência (Hz)	Nível de conversação (nc)	Peso (p)	Frequência (Hz)	Nível de conversação (nc)	Peso (p)
200	67	4	1250	62	30
250	68	10	1600	60	37
315	69	10	2000	59	37
400	70	14	2500	57	34
500	68	14	3150	55	34
630	66	20	4000	53	24
800	65	20	5000	51	20
1000	64	24			

- *STI (speech transmission index)* – este parâmetro que mede inteligibilidade da palavra varia entre 0 e 1 sendo o mais favorável 1 (quando existe ótima inteligibilidade) e para o pior cenário 0 (quando existe nula inteligibilidade) [1].

2.7. ACÚSTICA ARQUITETÓNICA

2.7.1. CONCEITOS GERAIS

2.7.1.1. Reflexões

A arquitetura do compartimento tem grande importância na acústica deste uma vez que através de algumas características do espaço pode-se fazer alterar bastante de forma positiva ou negativa a acústica do ambiente. O formato da sala, o volume, os materiais da envolvente e ainda os sistemas acústicos que podem existir no compartimento são algumas formas de se alterar a acústica com a arquitetura [1].

Numa sala de espetáculos o som atinge o ouvinte de forma direta (som direto) ou através das reflexões que chegam ao ouvinte depois do som direto podendo se distinguir as reflexões em dois tipos, os *initial sounds* que são as reflexões que atingem o ouvinte nos primeiros 80 ms, ao som que chega depois desses 80 ms dá-se o nome de *late sound*. O tempo de atraso inicial é o nome que se dá ao tempo entre o som direto e a primeira reflexão ao chegar ao ouvinte.

2.7.1.2. Ecos

O eco é um efeito, que é bastante comum surgir em salas com elevado volume pois a distância a percorrer pelo som até atingir o ouvinte é maior e são o tipo de reflexões que se pretende evitar numa sala de espetáculos. Todos os ecos são reflexões (nem todas as reflexões são ecos) que chegam ao ouvinte com nível sonoro suficiente para se entender após mais do que 50 ms da chegada do som direto. Existe também outro tipo de eco que acontece quando o som é refletido até à sua dissipação entre duas superfícies formando assim o chamado eco repetido [1] [57].

Para evitar estes fenómenos é comum adotar pelo menos uma de duas soluções, a primeira passa pela colocação de materiais com um coeficiente de absorção mais elevado que evita as reflexões ou então redirecionar as reflexões através de sistemas (discos voadores que “reduzem” o pé direito da sala reduzindo o percurso das reflexões) ou então inclinação das paredes da envolvente [1].

2.7.1.3. Difusão

Aos elementos capazes de refletir as ondas sonoras para todas as direções dá-se o nome de difusores. Através dos relevos dos difusores é possível condicionar as frequências que este reflete, quando os relevos são de pequenas dimensões o efeito é maior para as altas frequências e vice-versa. É com o uso destes sistemas que se consegue um campo sonoro de uma sala mais difuso o que resulta numa maior uniformidade do som na sala. Estes sistemas podem ser aplicados tanto no teto como nas paredes (Figura 2.26) [1].

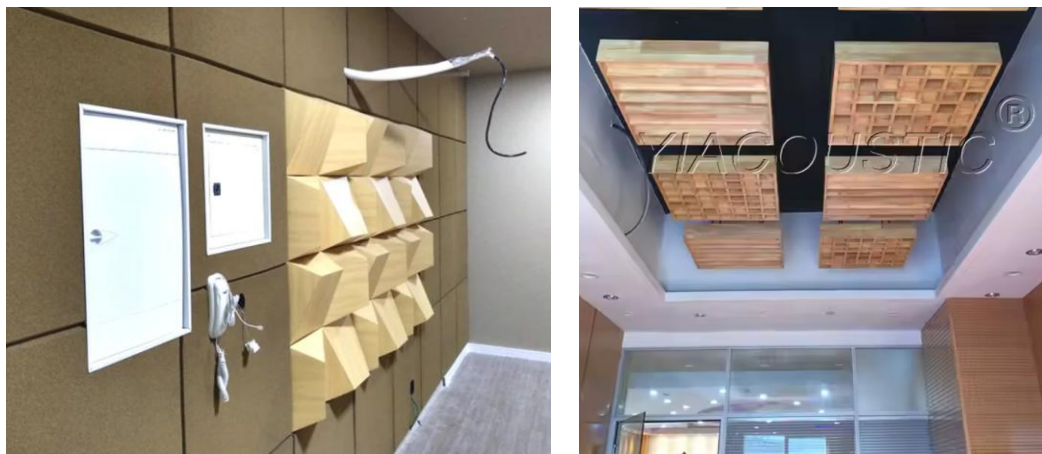


Figura 2.26 - Exemplos de aplicação de difusores na parede (esq.) e no teto (dir.) [58], [59].

2.7.2. PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJETIVOS

O estudo da acústica de uma sala pode ser realizado através de parâmetros objetivos que são obtidos através de equipamentos e medições sendo alguns dos mais importantes para estudo os seguintes [1]:

- Claridade (C_{80}) - A claridade consiste na razão em dB entre a energia sonora inicial no intervalo inicial até aos 80 ms e a energia reverberada após os 80 ms (em geral utiliza-se a recebida nos 3 segundos seguintes [1], [60] :

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{dB}) \quad \text{Eq. 2.36}$$

Quadro 2.9 - Valores ideais para a Claridade [1].

Função	$C_{80}(\text{dB})$
Ópera (não wagneriana)	3 a 4
Música de câmara	-1 a 1
Música sinfónica clássica	-1 a 0
Música popular	>6
Música de órgão	< -2
Coros gregorianos	-3 a -1

- Definição (D_{50}) - É a razão entre a energia recebida nos 50 ms iniciais e a energia total recebida. Os 50 ms são utilizados pois é o limite considerado perceptível para a palavra [1]:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad \text{Eq. 2.37}$$

Quadro 2.10 - Valores ideais da Definição [61].

Avaliação	$D_{50}(\%)$
Excelente	0,86 a 1,0
Boa	0,67 a 0,86
Razoável	0,39 a 0,67
Fraca	0,17 a 0,39
Má	0,06 a 0,17

- Tempo central (t_s) - É o tempo onde a energia recebida antes e depois é a mesma, sendo o valor mais comum para salas de espetáculos entre 140 a 180 ms [1]:

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{ms}) \quad \text{Eq. 2.38}$$

Quadro 2.11 - Valores ideais do tempo central de diferentes usos [1].

Uso	TS (s)
Música (ópera)	80 a 230
Palavra	< 80

2.7.3. PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJETIVOS

Ao contrário dos parâmetros objetivos os parâmetros subjetivos são obtidos através da avaliação do ouvinte. Sendo alguns dos mais importantes os seguintes [1]:

- Ruído de fundo - onde o ouvinte avalia se os ruídos que não são os que proveem da fonte (ex: tráfego no exterior da sala) sonora que se pretende ouvir são incomodo ou não;
- Intensidade sonora - avalia a intensidade sonora sendo esta a mistura entre o som direto e o refletido podendo ser baixa ou elevada;
- Clareza do discurso musical - mede o grau de definição das notas ouvidas;
- Reverberância - tempo em que o som é sentido após cessar a fonte sonora;
- Eco - avalia a existência de ecos que são incomodativos para uma sala de espetáculos;
- Intimidade - avalia a sensação de proximidade do som podendo fazer parecer que a sala é pequena mesmo não o sendo;
- Direccionalidade - avalia se o som sentido dá a sensação de provir da fonte ou de outro local da sala;
- Envolvimento - avalia o sentimento de estar imerso pelo som;
- Equilíbrio tímbrico - avalia a sensação de não haver desigualdade entre os níveis sentidos por diferentes tipos de fontes sonoras;
- Impressão geral – avalia a qualidade acústica geral da sala.

3

ESTADO DA ARTE

3.1. CONTEXTO HISTÓRICO

3.1.1. SALAS DE TEATRO

O principal objetivo da construção de uma sala aos dias de hoje é que esta tenha uma boa estética visual assim como uma boa acústica para o objetivo que esta tenha. Podendo este objetivo ser desde música (dentre os vários estilos que existem), teatro, oratórias (tal como espetáculos de comédia entre outras) e em alguns casos também para cinema. Ao longo da História da Humanidade o objetivo de ter uma boa acústica foi evoluindo pois anteriormente as construções eram realizadas numa perspectiva de grandiosidade e não no sentido de proporcionar uma boa experiência ao utente [52].

Os primeiros teatros a surgir eram ao ar livre o que tinha muitas complicações ao nível acústico pois o som perde, como visto no capítulo anterior 6 dB por cada duplicação da distância entre fonte-recetor. Segundo Knudsen, a uma distância superior a 42 m a voz humana é quase impercetível [52].

Na Grécia surgiam em 400 a.C. os teatros clássicos gregos ao ar livre (Figura 3.1) que tinham grandes dimensões e onde o lugar mais afastado poderia chegar aos 70 metros de distância. Apesar da distância o som era possível de se ouvir devido às primeiras reflexões que existiam numa plataforma circular (chamada orquestra) localizada entre o palco e a bancada. Estas reflexões poderiam assim contribuir para uma duplicação do nível sonoro (aumento de 3 dB) (Figura 3.2). Além das reflexões a localização do teatro tinha contributo para a boa perceção pois estes eram localizados em zonas pouco ruidosas, tendo assim um ruído de fundo bastante reduzido [52].



Figura 3.1 - Teatro da Grécia antiga em Atenas [62].

Outra característica destes teatros era a sua forma que se assemelhava a um leque (Figura 3.3) com cerca de 210°, algo que resultava numa menor perceção e também uma menor visibilidade nos extremos da plateia. Para ter-se uma boa visão mesmo em locais mais elevados o ângulo dos níveis

dos assentos era elevado (entre 20° e 34°), esta inclinação tem também influência direta para uma boa acústica nos locais mais superiores [52].

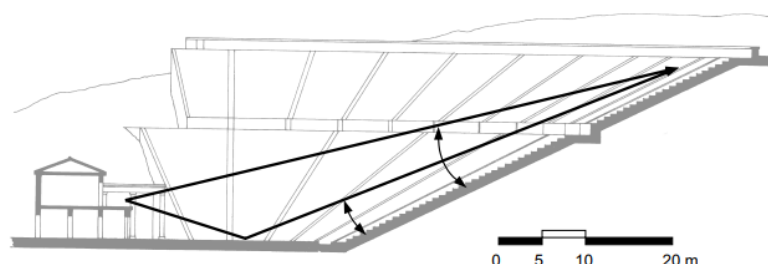


Figura 3.2 - Ângulo de incidência do som direto e refletido na plataforma dos teatros Gregos [52].

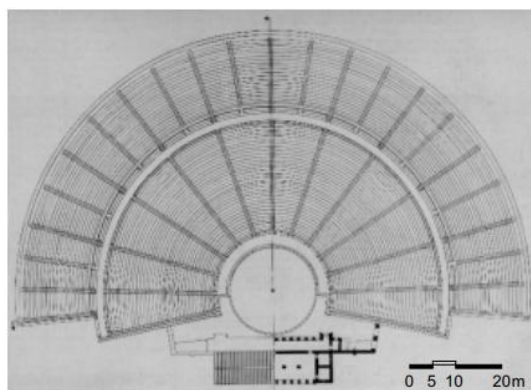


Figura 3.3 - Forma em leque da plateia do teatro na Grécia Antiga [52].

Ao contrário dos teatros da Grécia Antiga os teatros clássicos romanos (Figura 3.4) tinham dimensões mais reduzidas de forma a manter em todos os assentos uma boa percepção da palavra, reduzindo a distância entre o ouvinte e o palco. Apesar de mais reduzidos estes têm um grande declive na plateia (geralmente entre 30° e 34°) o que garantia uma menor distância ao lugar, mas afastado (cerca de 53 m) mantendo um elevado número de lugares. Na zona atrás do palco existia uma parede alta com decorações e a orquestra ao invés de ser circular era semicircular e era utilizada como lugar para as pessoas mais importantes. O facto desta zona ser utilizada para este fim impedia que esta funcionasse como superfície de reflexão devido às pessoas sentadas e também exigia que o palco fosse mais baixo que os da Grécia Antiga para que as pessoas aí sentadas tivessem uma melhor visibilidade [52].



Figura 3.4 - Teatro clássico romano na Jordânia [63].

Outra grande diferença que existia entre estes e os da Grécia Antiga era a existência de uma cobertura sobre o recinto (Figura 3.5) em que a principal função era proteger do sol, apesar desta

apresentar alguma capacidade de refletir o som não era o suficiente para criar reverberação no espaço pois esta não cobria totalmente o teatro. Caso esta cobertura tivesse a cobrir todo o teatro devido ao material de que a sala era construída esta seria muito reverberante perdendo inteligibilidade da palavra [52].

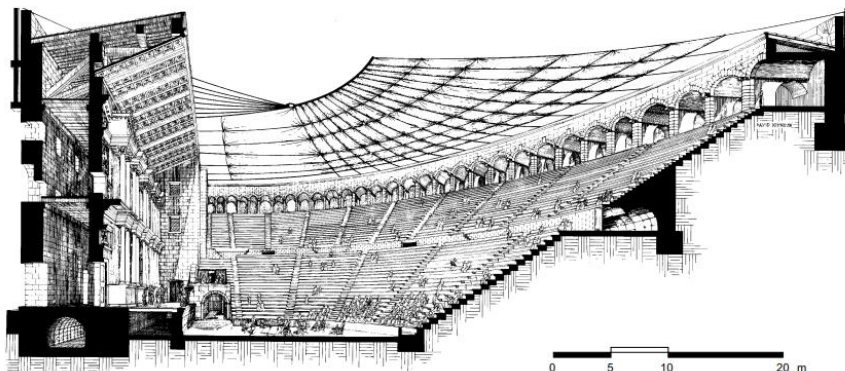


Figura 3.5 - Representação do que seria o típico teatro romano [52].

O aparecimento de teatros fechados trouxe novos desafios para a acústica além de vantagens óbvias como a redução do ruído de fundo. Este ruído tem hoje uma origem diversa podendo ser dos sistemas de ventilação, de abastecimentos de água ou até mesmo ruído do exterior. A projeção de uma sala com elevadas dimensões e/ou com baixa absorção sonora resulta em salas demasiado reverberantes o que conduz a uma grande perda da inteligibilidade da palavra em muitos locais da sala. Por conseguinte a condição necessária para uma boa inteligibilidade é que o volume seja mais limitado, reduzindo a capacidade de público em relação aos teatros ao ar livre do antigamente [52].

Um dos exemplos mais evidentes da teoria de reduzir o volume em relação ao antigamente surge no Renascimento (Figura 3.6). Os teatros no Renascimento mantêm a forma dos teatros clássicos a uma escala mais reduzida e cobertos. Assim, estes possuem a orquestra em semicírculo e uma elevada inclinação da plateia [52].



Figura 3.6 - Exemplo de teatro do Renascimento em Vicenza, Itália [52].

No período Barroco, no início do século XVII, os teatros de prosaénio (Figura 3.7) tiveram uma evolução em que as salas começaram a ser projetadas com forma em semicircular. Foi nesta altura que surgiram os formatos em U, em ferradura, sino, entre outros formatos. O formato em ferradura teve um grande desenvolvimento na Itália e posteriormente se espalhou pela Europa. Estas salas

distinguem-se pelas suas dimensões mais elevadas que os teatros do Renascimento, é nestes que surge a caixa de palco que concede uma maior flexibilidade teatral às salas. Houve também o aumento da profundidade do palco que era colocado mais próximo ao público para criar uma maior proximidade palco-público e a criação de vários pisos com camarotes aumentando o número de lugares [52].



Figura 3.7 - Exemplo de teatro prosccénio Barroco (Teatro Drury Lane, Londres) [64].

Ao longo do século XX os teatros prosccénios continuaram a sofrer alterações dando origem a novas formas com o objetivo de ter uma boa acústica dando prioridade a uma boa inteligibilidade da palavra e uma sonoridade suficientemente elevada. Foram assim criadas salas em forma de leque (Figura 3.8) onde surgiu uma dificuldade que foi a focalização do som devido à sua forma côncava. Estes teatros tinham uma capacidade máxima de cerca de 1500 pessoas que à data era considerado o limite para se conseguir uma sala com boa qualidade acústica [52].

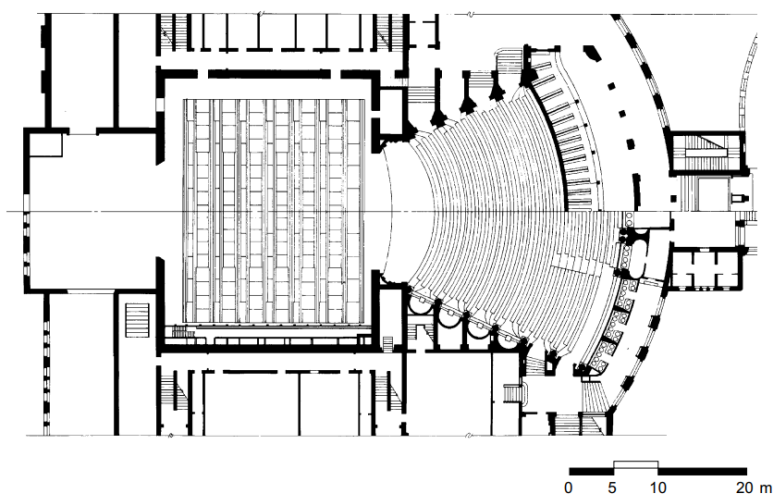


Figura 3.8 - Planta de um teatro em forma de leque (Prinzregenten Theater, Munique) [52].

Com o objetivo de criar uma maior proximidade entre o palco e o público do que nos teatros prosccénios surgiu o chamado de teatro de palco de impulso ou teatros de palco integrado (Figura 3.9). Neste tipo de teatros o palco está colocado mais próximo do público e a plateia desenvolve-se em volta do palco, porém não nos 360°. Ao contrário do anterior este oferece uma experiência tridimensional em que o público ao invés de ver o palco de frente consegue ver também lateralmente. O formato destes é assim semelhante aos teatros clássicos ao ar livre. Em algumas salas surgiram os refletores suspensos no teto que apenas tinham algum efeito se a fonte sonora

estivesse voltada para a plateia. Estes refletores fazem com que a sala tenha um tempo de reverberação mais elevado devido ao acoplamento da sala com o espaço acima dela [52].

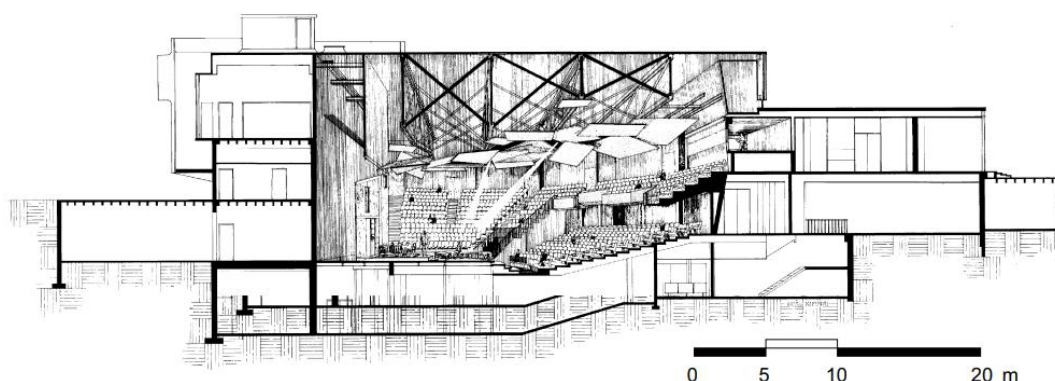


Figura 3.9 - Esquema de um teatro de palco de impulso (Guthrie Theatre, Minneapolis) [52].

Ao levar ao extremo a ideia de maximizar a intimidade palco-público surgem os teatros circulares (Figura 3.10) que como o nome indica o formato da sala é redondo e o palco está no centro, existindo público em frente ao ator e também atrás. Com isto surge o problema de que quem estiver sentado atrás vai ter uma menor inteligibilidade da palavra. Esta limitação exige para manter uma boa perceptibilidade para todos os lugares que a distância entre o palco e a plateia mais reduzida do que os teatros com o palco integrado [52].

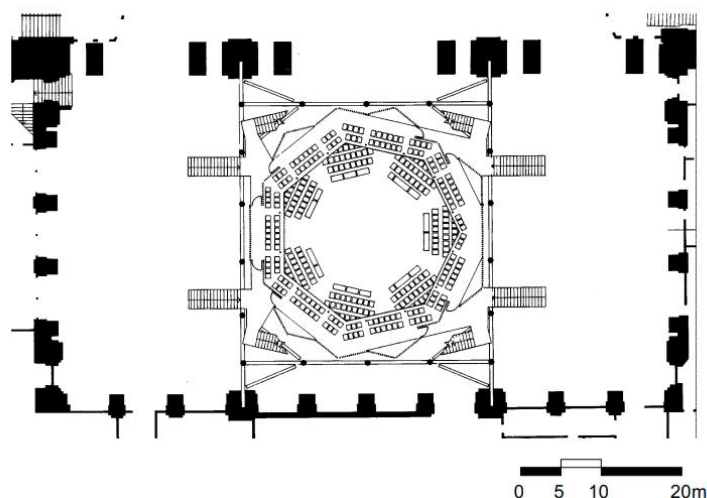


Figura 3.10 - Planta de um teatro circular (Royal Exchange Theatre, Manchester) [52].

3.1.2. SALAS DE ÓPERA

No período do Renascimento, em Itália, teve origem uma nova forma de expressão artística através da recriação do drama grego pela música, ao qual se deu o nome de ópera. No seu início e devido aos seus elevados custos, um espetáculo de ópera, era algo apenas acessível para elementos das classes mais elevadas. Quando este tipo de espetáculos começou a ser levado ao público em geral houve um crescimento da construção de salas destinadas a este fim [65], [66].

A conceção de salas de ópera tem algumas diferenças em comparação com as salas de teatro. Uma delas é a necessidade de quer os cantores quer a orquestra verem o maestro o que implica que o

fosso da orquestra fique entre a plateia e o palco. Outra condicionante é a distância máxima do público ao palco que é condicionada tanto pela acústica como pela linha de visão (em geral uma distância máxima de 30 m) e o ângulo máximo que tipicamente é de 30° (Figura 3.11). Estes fatores contribuem para o domínio das salas Barrocas ao longo do tempo e que nos dias de hoje ainda sejam utilizadas para novas casas de ópera (Figura 3.12) [65].

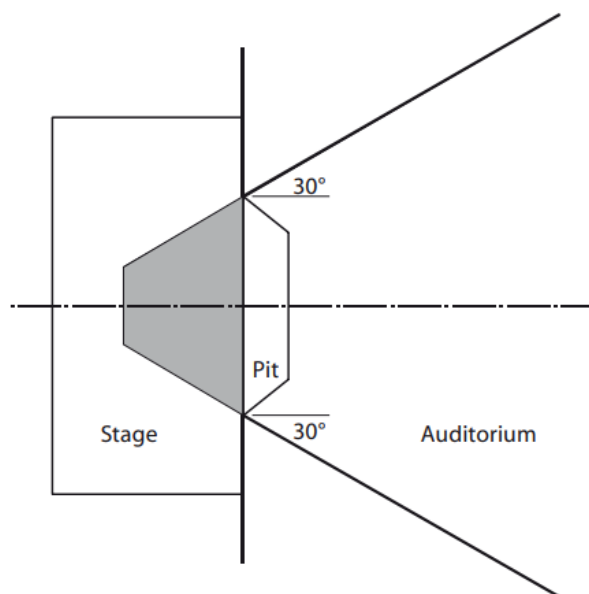


Figura 3.11 - Esquema do ângulo de visão para o palco [65].

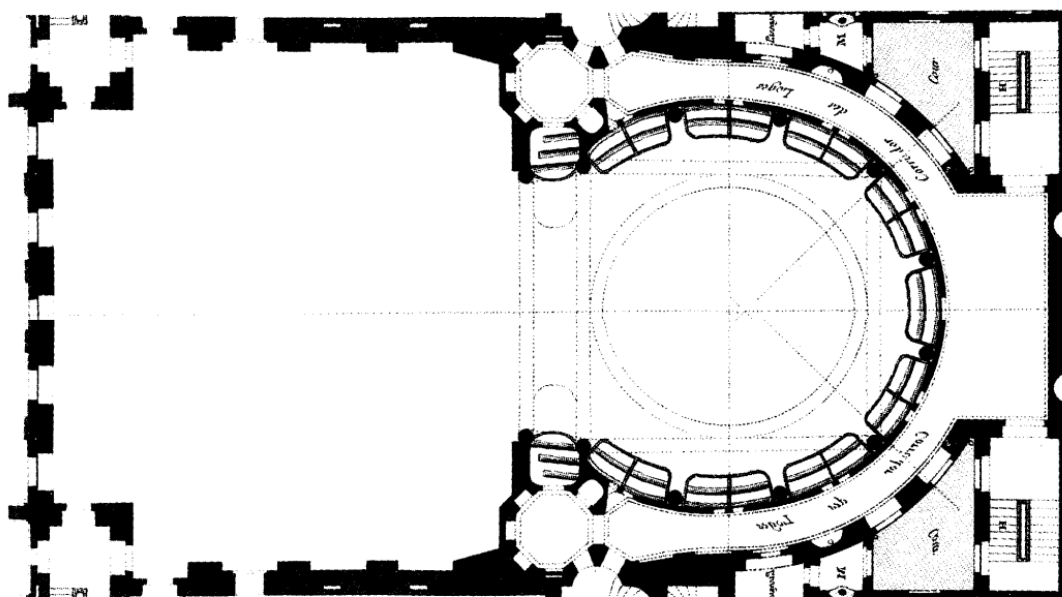


Figura 3.12 - Exemplo de uma sala em "ferradura" - Grande Teatro de Bordéus em França [52].

Com este posicionamento da orquestra numa zona mais baixa o som deixa de possuir um caminho direto até ao público. Apesar de existir difração do som, isto pode ter como consequência uma perda da qualidade do som sentido uma vez que aumenta o caminho por ele percorrido até ao público. Porém em espetáculos de ópera com o canto dos cantores este fenómeno tem um impacto menor. Para melhorar a acústica desta zona é comum adotar um tratamento difusor das paredes do fosso e a plateia com uma ligeira inclinação (assentos mais afastados do palco mais elevados do que os mais próximos) o que resulta em uma diminuição do caminho do som e consequentemente uma redução da atenuação [65], [67].

Segundo Michael Barron [65] a origem do projeto de uma sala de ópera é a abertura de prosaénio (abertura do palco) que para a ópera deve ter 10 a 18 m de largura e cerca de 9 m de altura. A orientação das paredes é outro fator bastante importante e para a ópera existem duas de mais impacto sendo elas as superfícies laterais da abertura do palco (*Proscenium splay*) e as paredes laterais da sala (Figura 3.13). É comum que as paredes laterais sejam orientadas em “concertina” para direcionar o som para os lugares centrais. As paredes do fundo das salas de ópera normalmente são curvas que pode provocar efeitos que perturbam as zonas dos balcões [65].

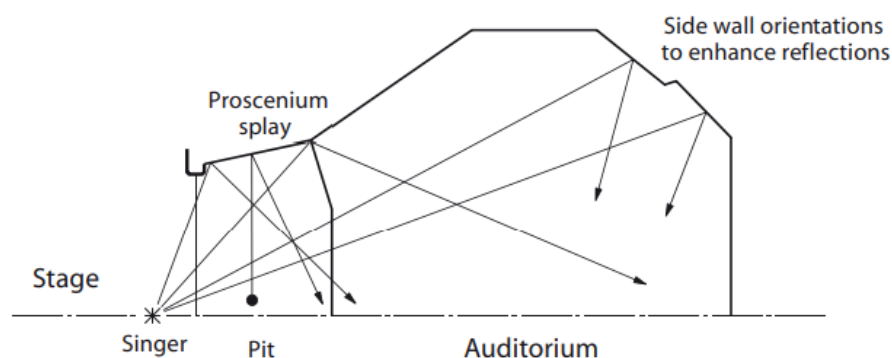


Figura 3.13 Reflexões associadas a salas de ópera em planta [65].

Quanto ao teto, na conceção de salas de ópera dá-se bastante importância à superfície em frente ao prosaénio e acima do fosso de orquestra à qual se deu o nome de canópia (Figura 3.14). Essa superfície, que desempenha um papel fundamental para realçar a voz dos cantores, vai refletir o som para os balcões, devido à sua elevada inclinação, ao invés de para a plateia onde seria mais necessário uma vez que os balcões recebem as ondas sonoras refletidas pelo teto. Com isto foram colocados painéis suspensos nesta zona para direcionar o som para a plateia e ainda refletir o som da orquestra novamente para o fosso (Figura 5.15) [65].

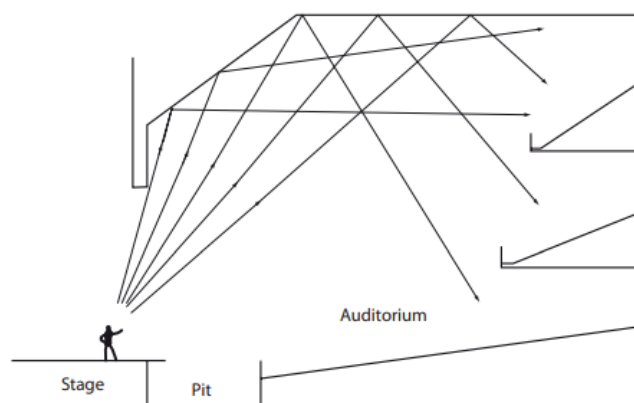


Figura 3.14 - Esquema das reflexões sonoras na canópia de uma sala de ópera [65].

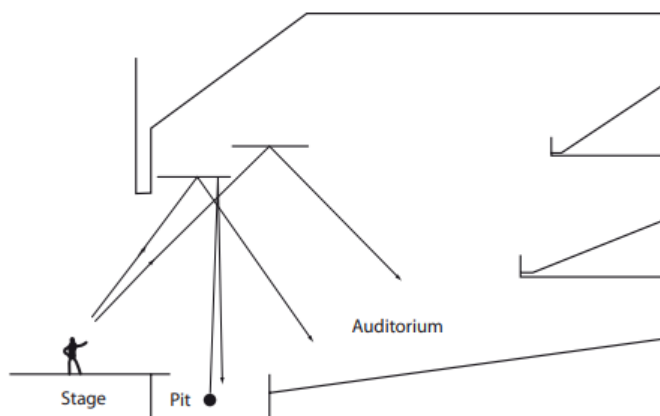


Figura 3.15 - Esquema das reflexões sonoras do teto de uma sala de ópera [65].

Em muitas salas do século XIX o teto tem a forma de abóbada o que faz com que os balcões recebem menos reflexões sonoras do que o devido. Outro problema que surgiu na atualidade foi o sistema de iluminação no teto que pode gerar problemas para a acústica do ambiente [65].

Este tipo de salas exige uma atenção especial também ao nível dos balcões. Estes podem bloquear a visão para o palco e provocar uma redução no nível sonoro. Para a palavra a redução do som não é muito significativa a menos que o nível sonoro se torne muito reduzido. Para a música, após alguns andares de balcões é sentida uma redução do som. Uma vez que na ópera é tanto importante a voz como a música para a conceção adota-se um critério intermédio.

As reflexões do som da plateia para os balcões é também algo a ter em conta e nas salas de ópera o som refletido é menos sentido nestas zonas do que em salas de teatro. Para resolver este problema surgiram duas propostas geométricas (Figura 3.16). Uma delas era ter em consideração o rácio entre a profundidade das varandas e a altura da abertura da varanda e este não deve ser superior a 2. A outra foi que o ângulo de visão vertical tinha maior impacto e este nunca poderá ser menor que 30° .

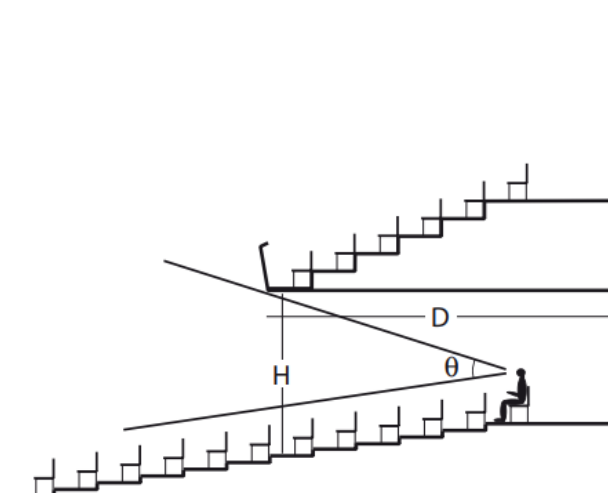


Figura 3.16 - Esquema do rácio entre a profundidade das varandas e a altura da abertura da varanda e do ângulo de visão vertical [65].

Uma das formas de resolver o problema da redução sonora sentida nos balcões é através de reflexões nas paredes posteriores. Para isto é necessário a altura do balcão ser elevada o que conduz a uma redução na capacidade da sala. Em salas barrocas desenvolvem-se horizontalmente ao longo das paredes, isto conduz a uma boa acústica para alguns balcões pois recebem reflexões das paredes laterais e dos intradorsos (Figura 3.17). Porém nos balcões mais elevados e mais próximos ao palco existem desvantagens acústicas e visuais. Para resolver este problema a solução mais lógica é usar conjuntos de balcões que vão descendo nas paredes laterais [65].

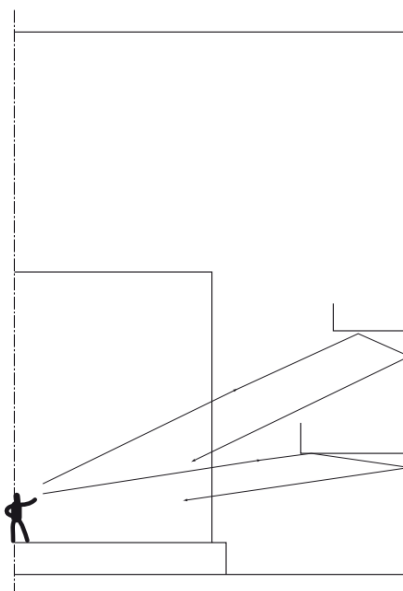


Figura 3.17 - Esquemas de possíveis reflexões nas varandas de uma sala de ópera [65].

3.2. CONSIDERAÇÕES ACÚSTICAS

3.2.1. CONSIDERAÇÕES ACÚSTICAS PARA A PALAVRA

No projeto de uma sala onde o uso principal é a palavra é necessário não só ter em consideração o tempo de reverberação, mas também a inteligibilidade da palavra. Em geral uma sala onde o ruído de fundo não compromete a percepção da palavra não terá queixas por parte da audiência. Para avaliar estes parâmetros é necessário tem em consideração as características da fala humana mencionadas no capítulo anterior [52], [65].

Segundo Antoni Carrión Isbert [52] para a boa percepção da palavra é necessário também eliminar algumas possíveis anomalias (Figura 3.18) que vão prejudicar a boa acústica da sala. Estas anomalias, em geral, são causadas devido às reflexões no compartimento, sendo mais acentuadas em salas de elevadas dimensões. Quando a sala possui as paredes e teto lisos e sem qualquer absorção sonora, em certos locais da sala o som refletido pode provocar a sensação de que este provém de um local diferente de onde se localiza o locutor. A forma da sala juntamente com uma orientação das superfícies mal dimensionadas (côncava ou circular) pode conduzir a uma focalização das ondas sonoras para determinados locais provocando assim zonas onde se tem uma boa percepção e outras uma má percepção. Outro fenómeno bastante prejudicial para a experiência do ouvinte é o eco [52], [65].

Tem tudo isto em consideração para a projeção de uma sala especializada para a palavra foram estabelecidos valores ideais para os parâmetros apresentado na Quadro seguinte. Além dos valores ideais é importante garantir um bom nível sonoro, assim como a sua uniformidade pela sala, e um nível de ruído de fundo reduzido [1], [52], [65].

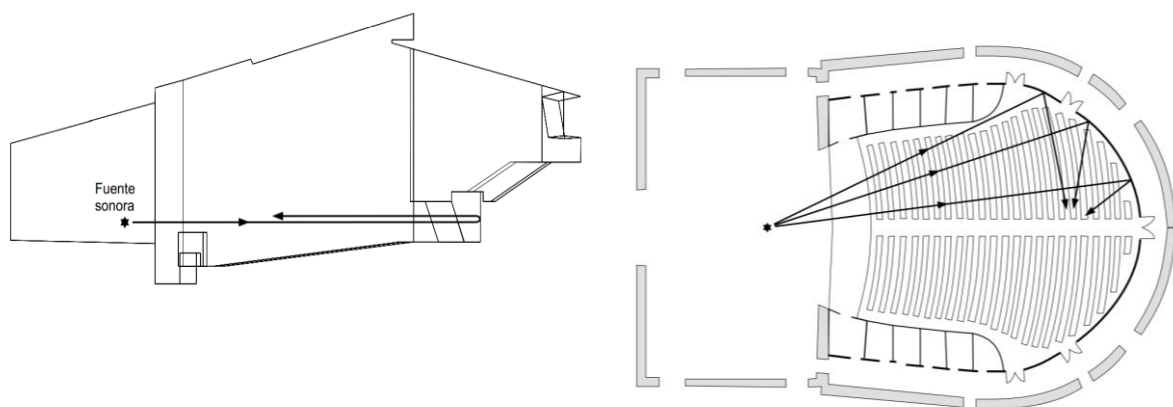


Figura 3.18 - Esquema de possíveis anomalias eco (esc.) e focalização(dir.) [52].

Quadro 3.1 - Valores ideais para a palavra com a sala ocupada [1], [52].

Parâmetro	Valor ideal
Tempo de reverberação (médio (500 - 1k Hz)) (s)	$0,7 \leq TR_{\text{médio}} \leq 1,2$
Clareza (C80) (dB)	> 6
Definição (D50)	> 0,5
STI/RASTI	> 0,65

3.2.2. CONSIDERAÇÕES ACÚSTICAS PARA A MÚSICA

De forma semelhante com o que acontece com a projeção para a palavra, para a música é de igual importância a sala ter uma boa uniformidade sonora. É importante, numa sala dedicada à música, que exista uma resposta da sala sem prejudicar a clareza do som. As condições acústicas de uma sala considerada adequada para a palavra não são necessariamente consideradas boas para a música. A projeção de uma sala de espetáculos musicais é mais complexa que do que para a palavra pois dependendo também do tipo de música as características ideais da sala podem ser diferentes. Uma boa sala para a música deve dar a sensação de intimidade que faz parecer que a fonte sonora está próxima ao ouvinte e assim ter-se a percepção de se estar numa sala de pequenas dimensões [52].

Para a música um tempo de reverberação (TR) ligeira mente mais elevado é algo que oferece ao ouvinte uma melhor experiência auditiva e existe entre os diferentes tipos de música pequenas diferenças nos valores ideais como se pode ver na tabela abaixo [1], [52].

Quadro 3.2 - Valores ideais de TR para diferentes tipos musicais [1].

Função	TR 500 - 1k Hz (s)
Ópera (não wagneriana)	1,3 - 1,7
Música de câmara	1,4 - 1,7
Música sinfónica clássica	1,6 - 1,8
Música popular	0,8 - 1,0
Música de órgão	2,5 - 3,5
Coros gregorianos	3,0 - 4,0

3.3. SISTEMAS ACÚSTICOS

3.3.1. ACÚSTICA VARIÁVEL

3.3.1.1. Contextualização

A utilização de uma sala para mais do que um objetivo não é algo que tenha surgido recentemente, sendo um exemplo disso a sala The Redoutensaal construída a 1705 em Viena, Áustria. Esta foi adaptada de uma sala de baile para uma sala de concertos. Porém a projeção da sala para serem utilizadas para diferentes usos é algo recente [65].

Por razões económicas a conceção de uma sala tendo em vista uma única utilização é algo irrealista para grande parte das cidades. Com esta dificuldade surgiu a acústica variável que consiste em alterações físicas na sala, que segundo os mais recentes estudos têm de ser substanciais para surtirem efeitos significativos [65].

Para acomodar mais que um tipo de utilização na mesma sala, em geral é necessária uma alteração no tempo de reverberação da sala. Em salas de maiores dimensões é necessário para a música um tempo de reverberação mais elevado que pode comprometer a inteligibilidade da palavra [65].

Ao analisar a fórmula do tempo de Reverberação de Sabine pode-se concluir que os fatores que têm influência no tempo de reverberação são o volume da sala e a absorção sonora da mesma. Assim, ao fazer estes variar faz-se variar o tempo de reverberação. Entre estes parâmetros o volume, na maioria das vezes, é o mais atrativo para fazer alterar uma vez que a alteração da absorção sonora pode resultar na variação do nível sonoro e o teto devido a ser uma grande superfície pode também ser alvo de intervenção [65].

3.3.1.2. Variação na Absorção Sonora

A variação da absorção sonora de uma sala é o método mais comum para obter um tempo de reverberação variável. Para salas mais pequenas é muitas das vezes suficiente para ter resultados de forma perceptível. Alguns dos métodos para se obter absorção variável de uma sala são [52]:

- Cortinas;
 - Painéis refletores móveis;
 - Painéis perfurados sobrepostos;
 - Painéis giratórios.
- a) Cortinas - A colocação de cortinas (Figura 3.19) em frente a superfícies refletoras permite através da abertura/fecho destas fazer variar a absorção sonora da sala. O baixo desempenho na absorção de baixas frequências produz um desequilíbrio nos novos valores do tempo de reverberação uma vez que a redução do TR é perceptível apenas para as médias e altas frequências [52].

As cortinas para ter uma boa absorção sonora devem ter uma densidade elevada (na ordem de $0,5 \text{ kg/m}^2$). Por questões estéticas é comum colocar as cortinas escondidas atrás de elementos acusticamente transparentes (elementos que não absorvem o som) [52].



Figura 3.19 - Exemplo de cortinas de absorção sonora Congress Centrum de Suhl, Turíngia [68].

- b) Painéis refletores móveis - Este sistema (Figura 3.20) tem por base a colocação de painéis refletores móveis em frente a paredes de interesse, que se movem através de guias e lateralmente. Para o melhor funcionamento deste sistema coloca-se material absorvente em várias zonas das paredes (cerca de 50% da parede) tendo o coeficiente o mais elevado possível. Com os painéis e dependendo do tipo de uso são expostas ou tapadas as zonas com o material absorvente [52].

A mobilidade dos painéis deve ser independente entre cada um para que a modificação dos tempos de reverberação seja contínua. O caso onde a absorção é máxima será quando todos os elementos com material absorvente estão expostos sendo limitado pela área destes [52].

Na Figura 3.13 pode ver-se os dois casos mais extremos, o primeiro quando estão expostas as superfícies refletores e o segundo com 50% de superfície absorvente e 50% com superfície refletora [52].

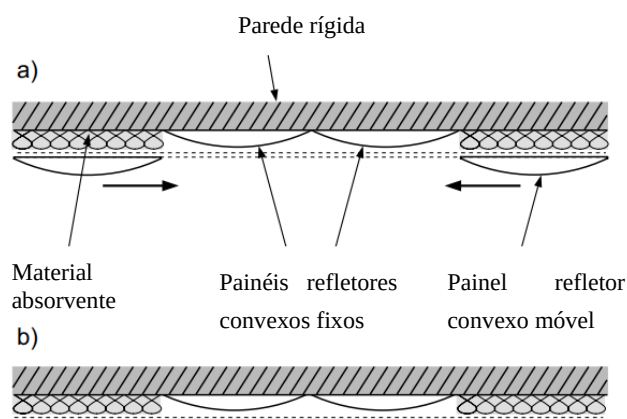


Figura 3.20 - Vista em planta de painéis refletores móveis montados em frente de uma parede 50% tratada com material absorvente: a) posição de absorção mínima; b) posição com absorção máxima [52].

- c) Painéis perfurados sobrepostos - Este sistema (Figura 3.21) baseia-se na colocação de dois painéis refletores perfurados, um deles fixo enquanto que o outro é móvel, colocados em frente a módulos absorvente [52].

Ao alinhar os orifícios dos painéis refletores pode assim deixar-se exposto o material absorvente criando uma série de ressoadores. Quando os orifícios não estão alinhados o material absorvente fica isolado da sala e assim aumentando o tempo de reverberação [52].

O grande inconveniente deste sistema é a grande disparidade da variação do tempo de reverberação em função da frequência uma vez que este sistema tem uma eficácia mais elevada para a frequência de ressonância do ressoador [52].

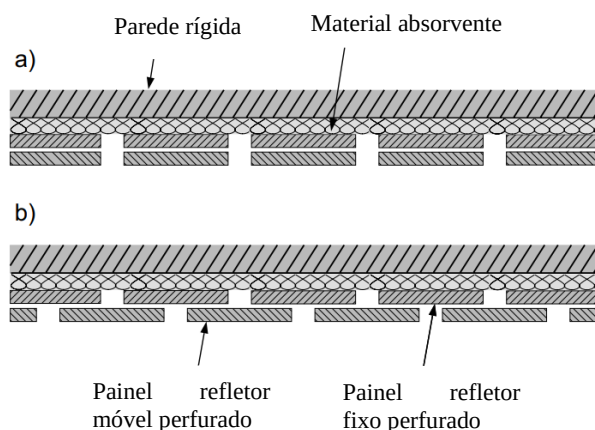


Figura 3.21 - Painéis perfurados: a) cavidades alinhadas; b) cavidades desalinhadas [52].

- d) Painéis giratórios – O sistema (Figura 3.22) consiste em três tipos de painéis que se distinguem pela sua rotação. Os painéis que rodam 180° são constituídos por um lado refletor e um lado absorvente. O lado refletor e o lado absorvente podem rodar até 180° e são colocados na(s) parede(s) de interesse. Quando fechados os painéis expõem a sua superfície refletora; quando abertos expõem as superfícies absorventes dos próprios painéis assim como o material absorvente fixo na parede. Este sistema exige a colocação de material absorvente em 50% da superfície onde se vai colocar o sistema [52].

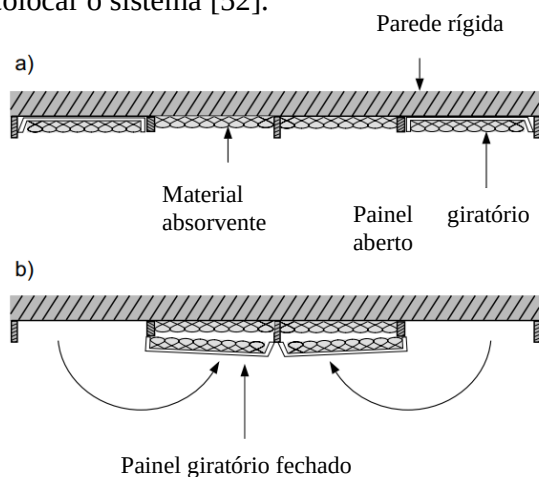


Figura 3.22 - Painéis com rotação de 180° : a) painéis abertos; b) painéis fechados [52].

Outra variante do sistema é a com os painéis a rodar até aos 90° (Figura 3.23), onde exige a colocação de material absorvente em toda a superfície. Este do mesmo modo que o anterior tem uma superfície refletora e outra absorvente. Quando aberto o painel expõem o material absorvente da parede e o do próprio painel enquanto que quando fechado apenas a superfície refletora do painel é exposta [52].

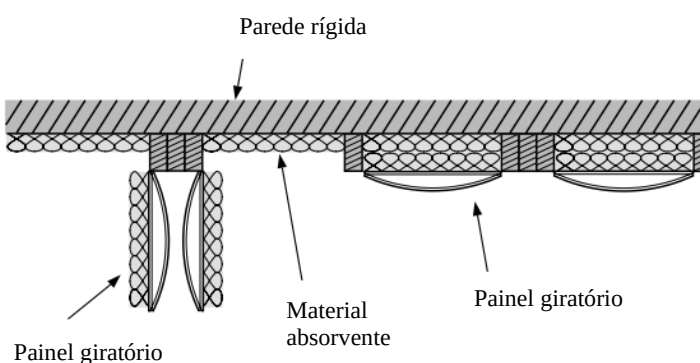


Figura 3.23 - Painéis com rotação de 90° [52].

Por último existe o sistema em que os painéis podem rodar até 360° (Figura 3.24) em torno do seu eixo. Quando todas as faces refletoras estão alinhadas e localizadas no lado do invólucro, a absorção é mínima, enquanto que quando as faces alinhadas são as absorventes acontece o oposto. A partir deste sistema foram criadas várias variações sendo uma delas um prisma com uma superfície refletora, uma absorvente e uma difusora. Este último permite uma maior versatilidade ao que se pretende na sala [52].

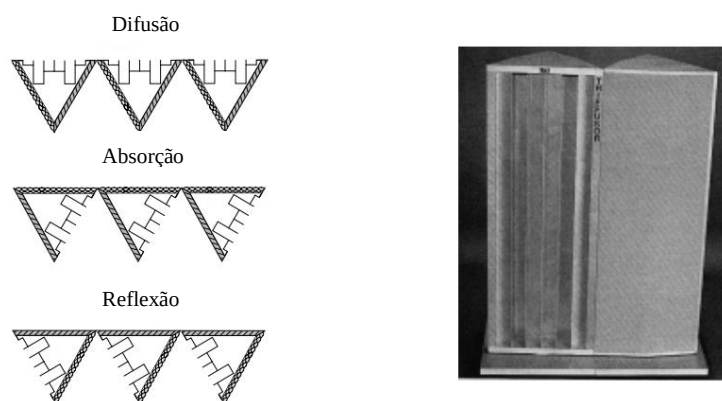


Figura 3.24 - Painéis prismáticos com rotação de 360° [52].

3.3.1.3. Variação no Volume

A abordagem para a variação do volume consiste em quatro métodos [52]:

- Através de divisórias verticais móveis;
 - Através de sistemas de abertura e fecho de teto falso;
 - Através de cavidades reverberantes anexas à sala;
 - Através de painéis móveis suspensos no teto.
- a) Divisórias verticais móveis - Através deste sistema (Figura 3.25) é possível dividir o recinto em dois, permitindo assim reduzir o volume do recinto e consequentemente o tempo de reverberação da sala e ainda criar um subespaço que pode ser eventualmente utilizado para outra finalidade. Ao reduzir o tamanho do compartimento naturalmente é reduzido o número de lugares da sala [52].

A utilização dos dois subespaços pode ser um problema uma vez que este sistema normalmente não proporciona um bom isolamento sonoro. Com o avanço da acústica já existem diferentes divisórias com bom isolamento sonoro para diferentes frequências podendo adaptar a escolha ao projeto [52].

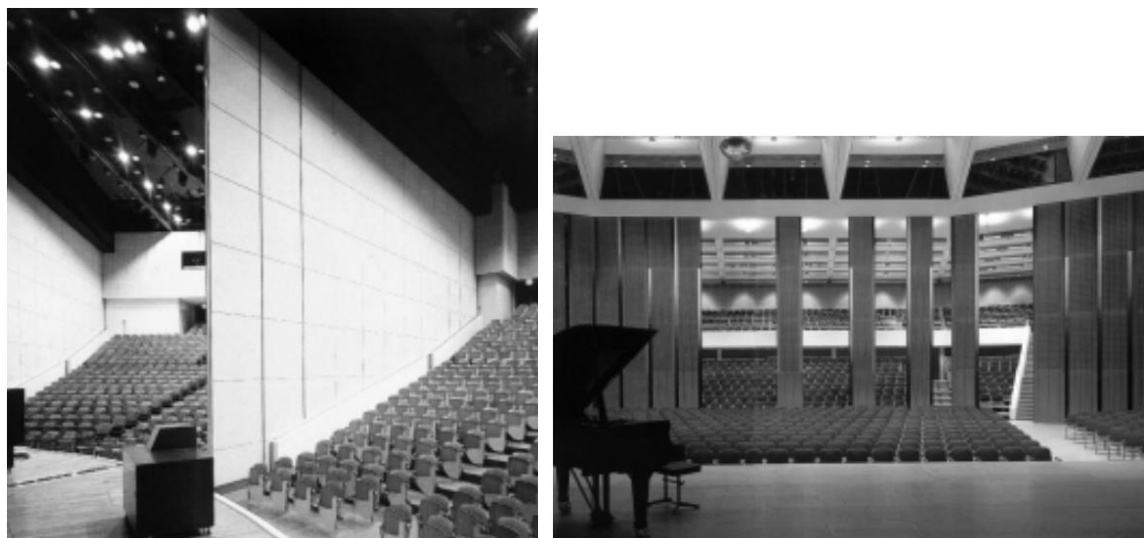


Figura 3.25 - Divisórias móveis com elevado desempenho acústico [52].

- b) Sistemas de abertura e fecho de teto falso - Este sistema permite, através de um sistema que permite abrir e fechar o teto falso, aumentar ou diminuir o volume do compartimento de modo a obter diferentes tempos de reverberação para cada uso. No que respeita ao espaço suspenso, este deve ser altamente reverberante. Se existirem materiais absorventes ou difusores na zona suspensa o aumento do volume tem pouco contributo para um aumento considerável do tempo de reverberação. Em geral o aumento do tempo de reverberação é pequeno pois a energia transferida entre os dois espaços é bastante limitada [52].
- c) Cavidades reverberantes anexas à sala - É um sistema (Figura 3.26) semelhante ao anterior, porém as cavidades anexas são sempre reverberantes e são especificamente concebidas para um aumento considerável do volume. As cavidades ao contrário do sistema de abertura e fecho do teto falso têm de ser construídas quando da conceção da sala tendo um custo muito acrescido se realizadas posteriormente [52].

As cavidades estão normalmente situadas na zona periférica da sala e têm sistemas de abertura/fecho remoto. Quando se abre o sistema, dá-se um acoplamento acústico, cujo efeito se manifesta sob a forma de um prolongamento da secção final da cauda reverberante [52].

Em geral este sistema apresenta um melhor desempenho que o anterior pois a diferença do aumento do volume é maior neste e são também altamente reverberantes aumentando o tempo de reverberação. Apesar disto como as cavidades estão na periferia da sala tem-se a sensação de que o som reverberado vem do exterior da sala. Este fator e a complexidade da projeção fazem com que este sistema tenha uma menor utilização prática [52].

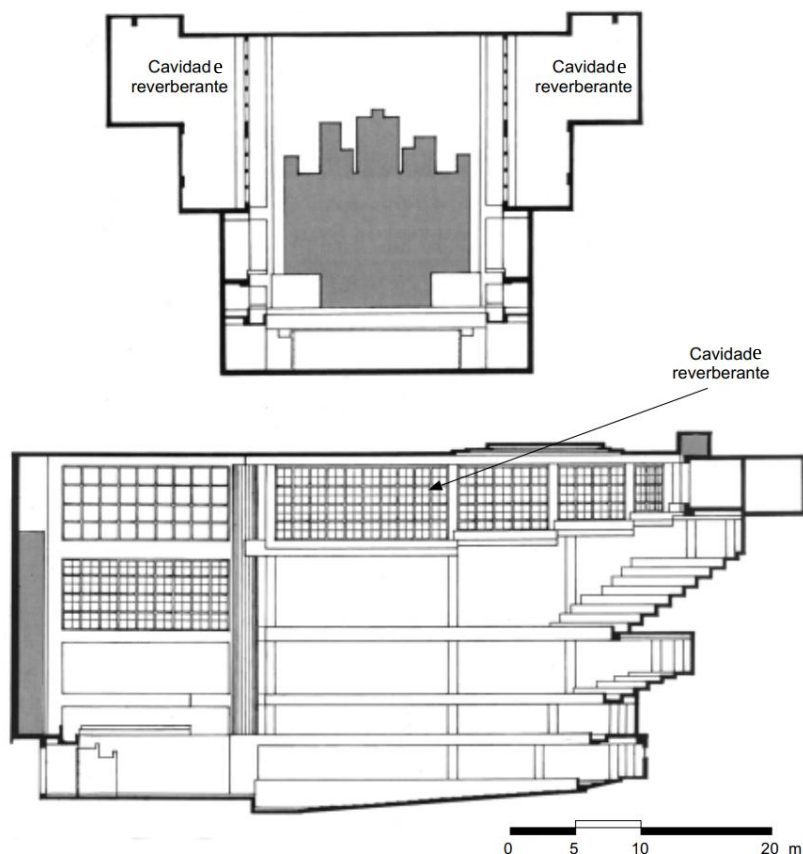


Figura 3.26 - Câmaras reverberantes no Eugene McDermott Concert Hall, Dallas [52].

- a) Painéis móveis suspensos no teto - Com o uso dos painéis móveis é possível ao deslocar alguns ou a totalidade destes para baixo, reduzir o volume da sala, sendo também possível eliminar zonas da plateia em alguns casos (especialmente em anfiteatros). O material destes painéis deve ter um coeficiente de absorção sonora baixo para ser uma superfície refletora [52].

O sistema apresenta também a vantagem do aumento da energia das primeiras reflexões pois a superfície de reflexão está mais próxima ao público (quando os painéis são deslocados para baixo). Em contrapartida tem o inconveniente da dificuldade da compatibilidade com os sistemas técnicos da sala o que vai exigir um melhor planeamento para tudo funcionar da melhor forma [52].

O teto móvel tem a capacidade de poder estar a diferentes alturas permitindo assim adaptar o volume e consequentemente o tempo de reverberação consoante as necessidades da utilização. Com o teto mais elevado o tempo de reverberação é mais elevado (Figura 3.27) e quando mais baixo (Figura 3.28) o TR é mais reduzido [52], [65].

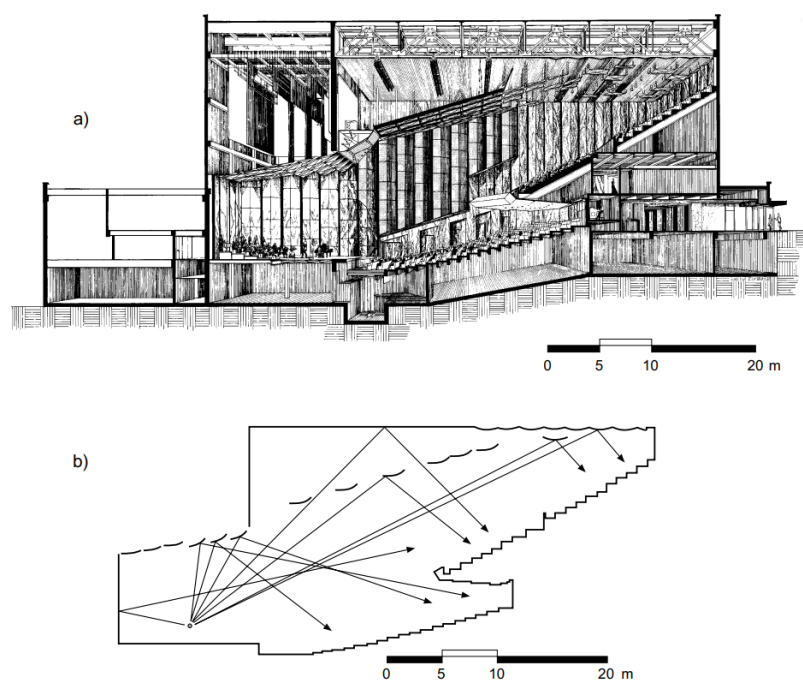


Figura 3.27 - Cain Auditorium em Manhattan (EUA) com os painéis na posição mais elevada: a) configuração da sala; b) representação das primeiras reflexões [52].

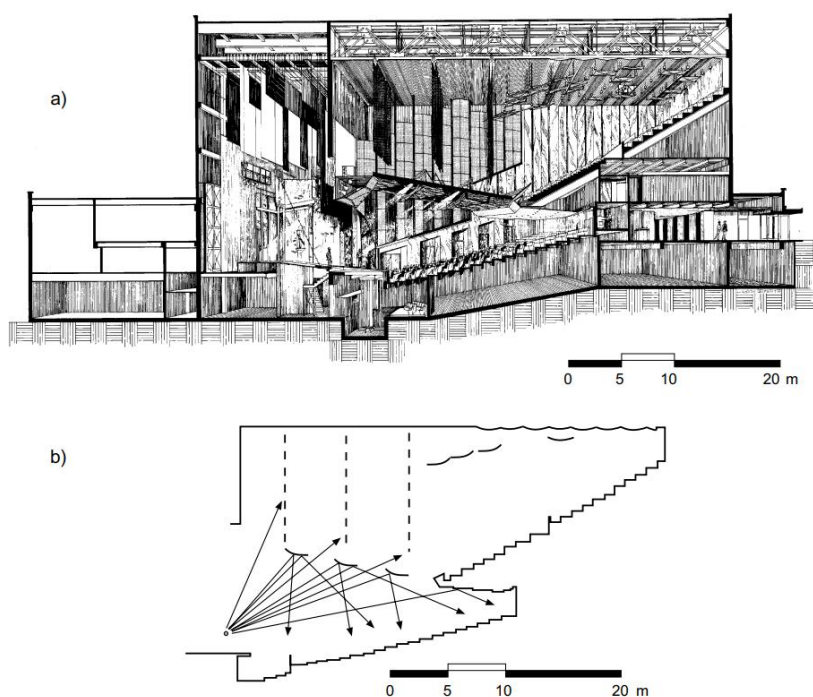


Figura 3.28 - Cain Auditorium em Manhattan (EUA) com os painéis na posição mais baixa: a) configuração da sala; b) representação das primeiras reflexões [52].

3.3.2. DIFUSORES

A utilização de difusores (Figura 3.29) em salas de espetáculos é bastante comum para se conseguir fazer chegar o som aos ouvidos do público com a mesma energia em qualquer lugar na sala. Estes elementos podem também ser utilizados para eliminar anomalias (focalização por exemplo). Estes elementos podem ser colocados nas paredes ou até mesmo no teto existindo uma grande variedade de escolha que em suma realizam a mesma função. Alguns deles são [52]:

- Difusores policilíndricos;
- Difusores PRD;
- Difusores MLS;
- Difusores QRD.

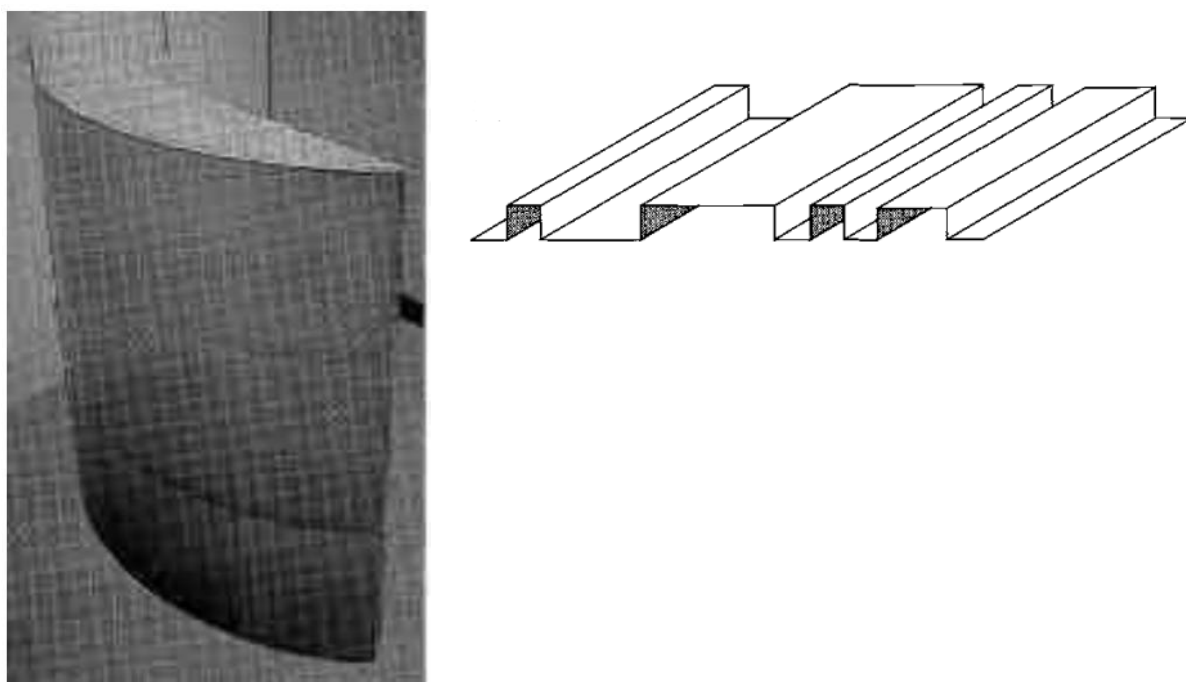


Figura 3.29 - Exemplo de difusores: Difusor policilíndricos (esq.); Difusor MLS (dir.) [52].

3.3.3. DISCOS VOADORES

Quando uma sala possui um pé direito muito elevado pode dar origem a anomalias sonoras não desejadas e para resolver esse problema uma das soluções passa pela redução artificial do pé direito utilizando os chamados “discos voadores”. Estes consistem em elementos refletorres suspensos no teto que vão evitar que o som chegue até ao teto. Um exemplo bastante conhecido desta aplicação é o Royal Albert Hall, Londres (Figura 3.30) que tinha problemas acústicos e após uma intervenção com este sistema passou a ter uma melhor acústica [1], [69].

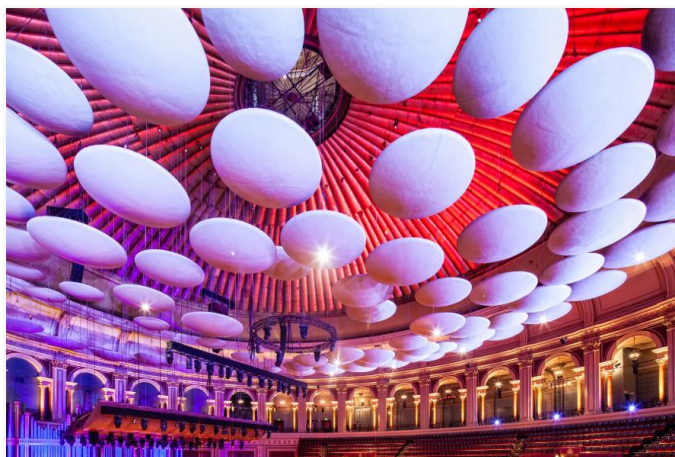


Figura 3.30 - Discos voadores colocados no Royal Albert Hall, Londres [69].

3.4. LEGISLAÇÃO PORTUGUESA

Aquando da realização deste trabalho a legislação que rege, em Portugal, os requisitos acústicos dos edifícios é o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE). Foi instituído pelo DL n° 129/2002 de 1/5 tendo sofrido uma grande atualização pelo DL n° 96/2008 de 9/6.

O RRAE, através de limites numéricos de diversos índices de comportamento, orienta a construção dos edifícios de forma a ser atingido o conforto acústico. Este regula vários tipos de edifícios tal como [70]:

- Habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras (art° 5°);
- Comerciais e de serviços, e partes similares em edifícios industriais (art° 6°);
- Escolares e similares, e de investigação (art° 7°);
- Hospitalares e similares (art° 8°);
- Recintos desportivos (art° 9°);
- Estações de transporte de passageiros (art° 10°);
- Auditórios e salas (art° 10°-A).

No presente caso de estudo onde será caracterizada a acústica do Theatro Circo em Braga é aplicado o artigo 10°-A (referente a auditórios e salas), visto que este tem como principais usos da sala o teatro e a música [70] [71].

O ponto 1 do artigo 10°-A rege os requisitos mínimos para salas e auditórios onde a principal atividade esta assente na oratória (palavra) sendo estes:

- a) O Tempo de reverberação médio (T), para as bandas de frequências de 500, 1000 e 2000 Hz deve satisfazer:
 - $T \leq 0,12 V^{1/3}$, se $V < 250 \text{ m}^3$;
 - $T \leq 0,32 + 0,17 \log V$, se $250 \leq V < 9000 \text{ m}^3$;
 - $T \leq 0,05 V^{1/3}$, se $V \geq 9000 \text{ m}^3$.

sendo V o volume interior do compartimento em m^3 .

- b) O projeto de acústica do espaço deve realizar um estudo específico para garantir a reverberação para as restantes frequências adequada e uma boa inteligibilidade da palavra em todos os locais do compartimento.

O ponto 2 do artigo indica que para as salas onde a sua utilização se destina a atividades onde o foco não é a oratória (por exemplo música) o projeto de acústica deve conter um estudo para garantir a acústica adequada tendo em conta a sua utilização funcional

O ponto 3 refere que para os tipos de salas referidas nos dois pontos anteriores devem garantir que as suas fachadas tenham valores de isolamento sonoro a ruídos aéreos ($D_{2m,nT,w}$) necessários para que o nível sonoro contínuo equivalente do ruído ambiente no interior do recinto, sem o ruído de equipamentos técnicos (L_{Aeq}) seja:

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

O ponto 5 indica os valores regulamentares para o nível sonoro contínuo equivalente do ruído particular (L_{Aeq}) dos equipamentos técnicos, com a sala desocupada deve satisfazer o seguinte:

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

Através do ponto 6 o regulamento indica que os pontos anteriores (1 a 5) são aplicados a recintos que constituem o uso principal do edifício, mas também aos recintos que estão inseridos em edifícios com uso diferente.

Como evidenciado no ponto 7 o Tempo de reverberação deve ser determinado de acordo com as normas portuguesas ou quando estas não são aplicáveis usar as europeias ou internacionais.

De acordo com o ponto 8 para as medições *in situ* deve ser introduzido um valor de incerteza (I) associado aos parâmetros em estudo.

De acordo com o ponto 9 a conformidade dos requisitos acústicos de um edifício ou do compartimento acontece quando cumulativamente:

- a) O valor do Tempo de reverberação (T) diminuído do fator de incerteza no valor percentual do limite regulamentar, de acordo com o seguinte, satisfaça o limite regulamentar:
- 25%, se $V < 250 \text{ m}^3$;
 - 35%, se $250 \leq V < 9000 \text{ m}^3$;
 - 40% se $9000 \geq V \text{ m}^3$.
- b) O valor do isolamento sonoro a ruídos aéreos ($D_{2m,nT,w}$) somado ao fator de incerteza (I) com o valor de 3 dB satisfaça o limite regulamentar;
- c) O valor obtido para o nível do ruído particular (L_{Aeq}) diminuído do fator de incerteza (I) no valor de 3 dB, satisfaça o limite regulamentar.

4

CASO DE ESTUDO

4.1. THEATRO CIRCO (BRAGA)

4.1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Em 1906, com o objetivo de colmatar as necessidades da cidade de Braga que possuía apenas um teatro, teve início a idealização do Theatro Circo (Figura 4.1). A ideia surgiu através de um grupo de três conterrâneos sendo eles o presidente da Câmara Municipal Artur Jorge Soares, José António Veloso e Cândido Martins [71], [72].

No ano de 1911 começou a ser erguido o projeto desenhado pelo arquiteto João de Moura Coutinho na Avenida da Liberdade, no local do antigo Convento dos Remédios, em Braga (Figura 4.2) sendo inaugurado a 21 de abril de 1915. A sala principal com 1500 lugares e em “estilo italiano” era organizada em taburnos para facilitar a adaptação ao tipo de espetáculo. Por ser uma sala de grandes dimensões e devido à sua arquitetura, na época foi considerada uma das maiores do país [69], [70].

Ao longo de quase 85 anos a sala recebeu uma enorme variedade de espetáculos tais como teatro, revista, música, cinema e circo. O facto de a sala receber frequentemente espetáculos de circo foi a razão do nome da sala ser Theatro Circo [72], [73].



Figura 4.1 - Fachada do Theatro Circo em Braga [74].



Figura 4.2 - Localização do Theatro Circo em Braga [75].

No ano de 1999, através de um protocolo entre a Câmara Municipal de Braga e o Ministério da Cultura o edifício sofreu uma profunda remodelação. A requalificação abrangeu todo o edifício (interior e exterior) e teve como objetivos o reforço estrutural e a conversão do Theatro Circo num grande complexo cultural com uma melhor tecnologia cénica e sonora [71], [72].

Com a reabilitação da sala principal esta passou a ser qualificada para qualquer tipo de arte que seja realizada em salas de espetáculos. Esta que outrora possuía uma capacidade de 1500 pessoas passou a ter 897 lugares. Os camarins e armazéns sofreram também intervenções [71], [72].

Além das ações na sala principal foram criadas duas outras salas, uma de ensaios e um pequeno auditório com capacidade para 236 pessoas. Foram também criadas zonas de apoio como um museu, uma livraria de artes, um café-concerto e bares. As obras foram finalizadas no ano de 2006 e para celebrar a reabertura, a Orquestra Sinfónica Nacional Checa foi atuar no dia 27 de outubro de 2006 [71], [72].

4.1.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA

A sala principal (Figura 4.3) do Theatro Circo que se situa no piso 0 do edifício, é uma sala de grandes dimensões que possui a zona do palco, fosso de orquestra, a plateia, duas galerias e três andares de camarotes (Figura 4.4), totalizando uma capacidade de 897 lugares. Apesar desta capacidade em geral são apenas utilizados 710 lugares devido a condicionantes permanentes que podem ser a visibilidade reduzida, lugares para pessoas com mobilidade reduzida, camarote administrativo e zona de bloqueio técnico [76].

A zona de fosso de orquestra, (Figura 4.5), possui um sistema mecânico de elevação com paragem em seis níveis para melhor adaptar a sala à necessidade (ou não) do fosso. Este mecanismo permite que o fosso seja colocado até à posição mais baixa a 2,1 m do nível da plateia. Quando o espetáculo não exige o fosso de orquestra esta zona é utilizada para a colocação de equipamento de som [76].



Figura 4.3 - Sala principal do Theatro Circo em Braga [Foto do autor].

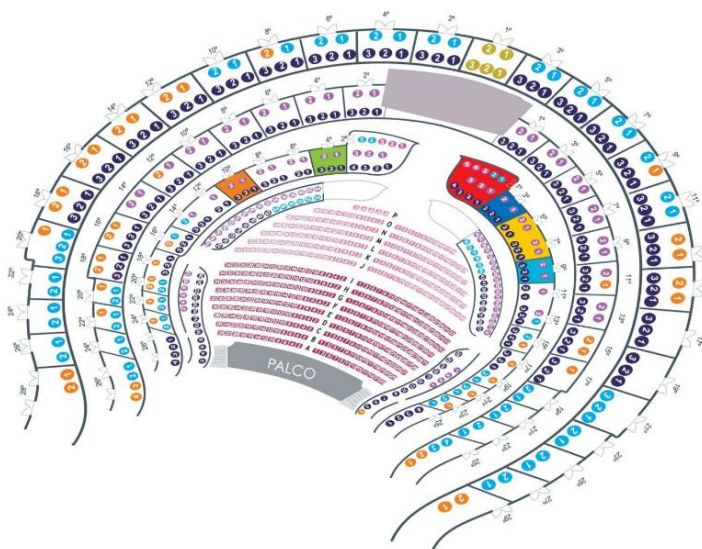


Figura 4.4 - Planta da sala principal do Theatro Circo [76].



Figura 4.5 - Fosso de orquestra com equipamento de som [Foto do autor].

Além do sistema sonoro para potenciar o som a sala possui alguns elementos para melhorar a acústica da mesma tal como cortinas em veludo e os assentos almofadados (Figura 4,6) [76]. Na zona dos camarotes além das cortinas e dos assentos existe também divisórias entre cada um em madeira como se pode ver na Figura 4.7 esq. [76].



Figura 4.6 - Cortinas de veludo e assentos almofadados [Foto do autor].

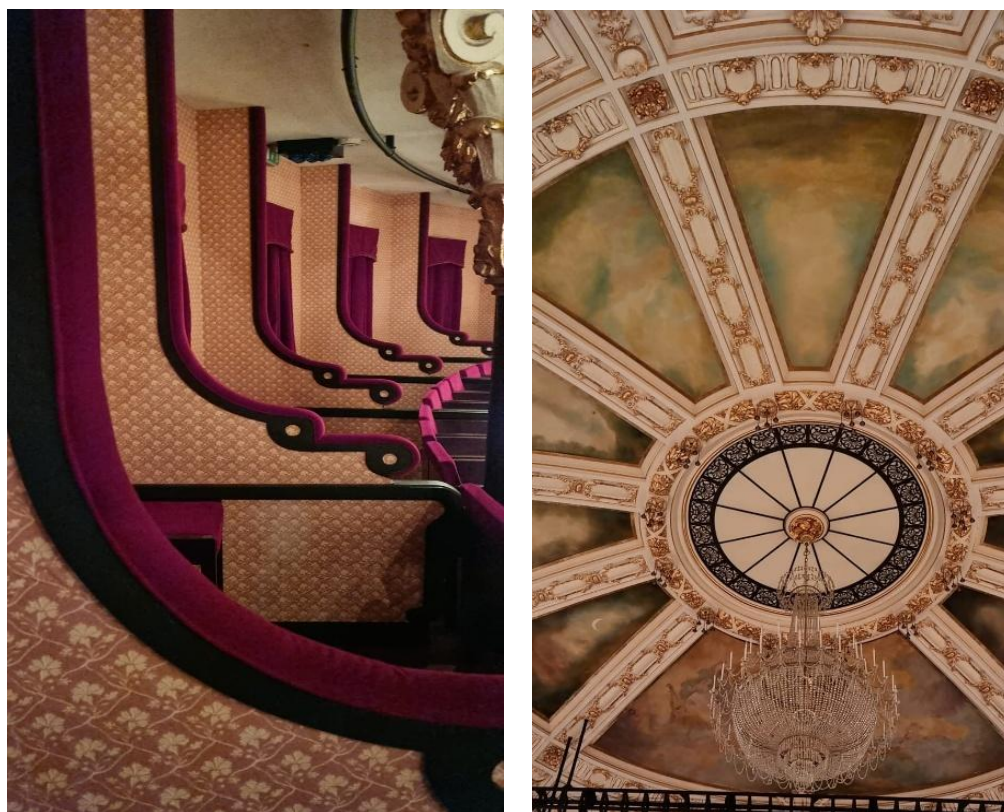


Figura 4.7 - Divisórias entre os balcões (esq.) e cúpula do Theatro Circo [Fotos do autor].

Outra característica arquitetónica da sala com elevado impacto é o teto. Este impacto deve-se a este ser uma cúpula (Figura 4.7 dir.) que é decorada com vários adornos, uma pintura que sofre alterações consoante a luz solar incide pelo exterior e um candelabro no centro [76], [77].

O Theatro Circo tem um sistema AVAC que insufla a sala a partir de grelhas (Figura 4.8) dispostas por toda a sala. Apesar de haver várias destas grelhas as que estão colocadas na zona do palco e da plateia têm um maior caudal de ar o que se traduz num maior ruído na zona da plateia [74].

Através de plantas e cortes fornecidos pelo Theatro Circo, em formato *DWG*, foi possível realizar um cálculo aproximado da área e do volume das várias zonas da sala (Quadro 4.1). Para este cálculo foi utilizado o *software* AutoCad e a sua ferramenta de medição de áreas e distâncias. A sala apresenta o formato em “ferradura” e possui um volume aproximado de 9800 m^3 já o palco possui um volume aproximado de 5600 m^3 (Figuras 4.10, 4.11 e 4.12).

Existe ainda uma pequena *régie* na zona do fundo da sala próxima à porta de saída que mesmo em *stand by* emite um constante ruído que não sendo possível de desligar a mesma (Figura 4.9)



Figura 4.8 - Grelhas de insuflação: na zona da plateia e no palco [Fotos do autor].

Quadro 4.1 - Valores da área, altura e volume aproximados, das diferentes zonas da sala principal do Theatro Circo.

Zona	Área aprox. (m^2)	Altura média aprox. (m)	Volume aprox. (m^3)
Palco	200	28	5600
Plateia	330	25	8250
Camarotes/Balcões	111	14	1554
Fosso de orquestra em uso	30	2,1	63



Figura 4.9 - Régie ao fundo da sala do Theatro Circo [Foto do autor].

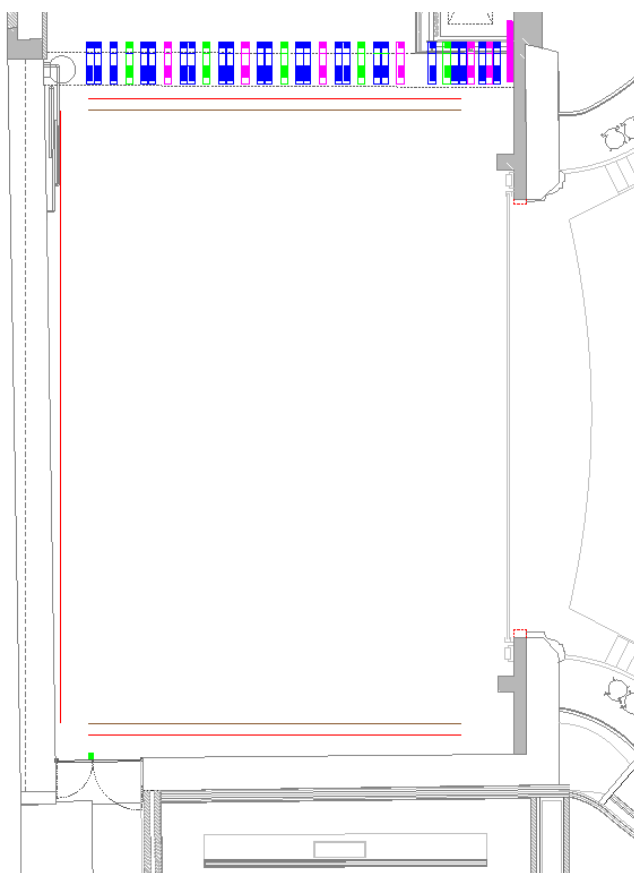


Figura 4.10 - Planta do palco em AutoCad do Theatro Circo [78].

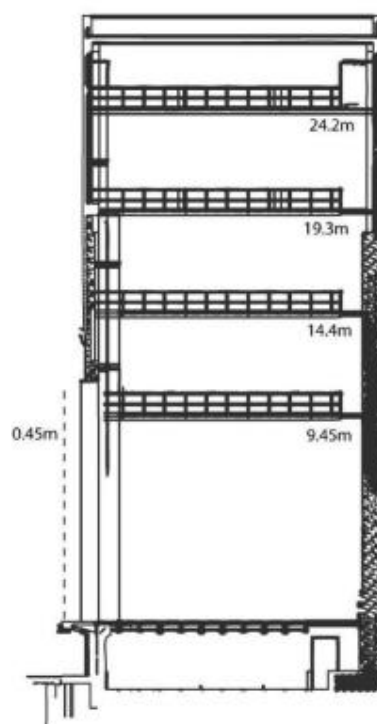


Figura 4.11 - Corte vertical do palco do Theatro Circo [76].

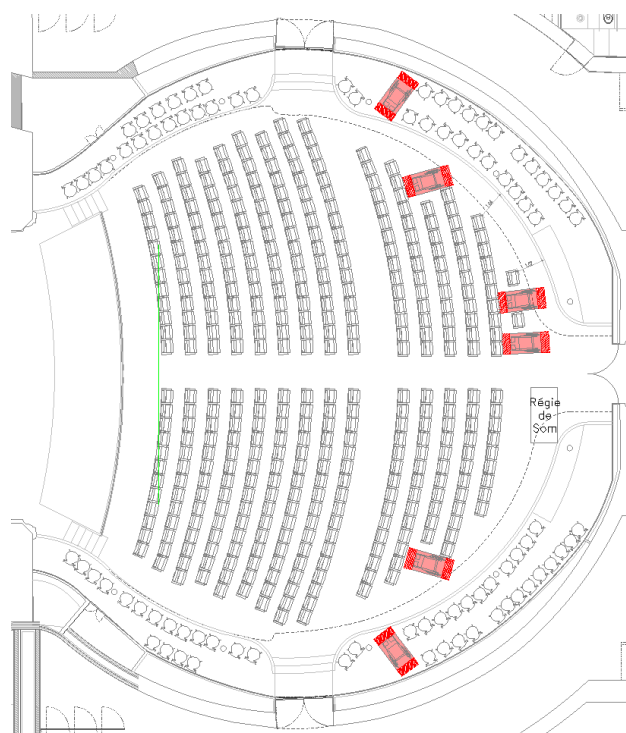


Figura 4.12 - Planta da zona do público em AutoCad do Theatro Circo [78].

4.2. METODOLOGIA

4.2.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS E EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

A avaliação acústica de uma sala para ser completa deve avaliar diferentes parâmetros objetivos conseguindo assim uma melhor caracterização do espaço pois são conhecidos mais aspetos relevantes. Para a presente dissertação foram avaliados os parâmetros seguintes medidos *in situ*:

- Tempo de reverberação (TR);
- Nível de pressão sonora do ruído de fundo (L);
- *Speech Transmission Index* (STI);
- Claridade (C_{80});
- Definição (D_{50});
- Tempo central (ts);
- Rácio de Baixos (BR_{TR}).

Os vários parâmetros foram medidos em diferentes pontos da sala pensados de forma a obter uma análise completa da sala e percebendo as variações entre o diferentes locais. Tendo em conta a simetria da sala as medições foram realizadas apenas em metade desta. O sonómetro para simular a posição do espectador sentado foi colocado a uma altura de 1,20 m com num tripé para o fixar. Antes de realizar as medições foi feita uma calibração dos sonómetros e foi conferido o funcionamento de todos os equipamentos. Estas medições foram realizadas pelo Engenheiro António Eduardo Batista da Costa com o auxílio do autor.

Para as medições foram utilizados equipamentos e um *software* que foram disponibilizados pelo Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) sendo eles:

- Fonte sonora Brüel & Kjaer (*Echo Speech Source*), modelo 4720 (Figura 4.13);
- Fonte sonora Brüel & Kjaer, modelo 4224 (Figura 4.14);
- Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260 (Figura 4.15);
- Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2236 (Figura 4.16);
- Calibrador de microfones Brüel & Kjær, modelo 4231 (Figura 4.17);
- Microfone de 13 mm Brüel & Kjær, modelo 4189 (Figura 4.18);
- Tripé portátil Brüel & Kjaer, modelo UA0049;
- *Software* DIRAC.



Figuras 4.13 e 4.14 - Fontes sonoras: Fonte sonora Brüel & Kjær (*Echo Speech Source*), modelo 4720 e Fonte sonora Brüel & Kjær, modelo 4224 [Fotos do autor].



Figura 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 - Equipamento de medição: Sonómetro Brüel & Kjær, 2236, Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260, Calibrador de microfones Brüel & Kjær, 4231 e Microfone de 13 mm Brüel & Kjær, 4189 [Foto do autor], [79], [80].

4.2.2. PROCESSOS DE MEDIÇÃO

4.2.2.1. Ruído de Fundo

A avaliação do ruído de fundo foi realizada com a sala sem espectadores e com as portas da sala fechadas de forma a analisar os níveis sonoros e níveis de pressão sonora dos ruídos que se fazem sentir na sala sendo estes provindos do exterior ou até de equipamentos da própria sala.

Neste ensaio o único equipamento utilizado foi o sonómetro (Brüel & Kjær, 2260) colocado no tripé à altura de 1,20 m e em três pontos da sala. O RF1, é referente ao lugar na plateia mais ao centro da sala e junto ao palco, o RF2, é na plateia na zona lateral mais ao fundo da sala e o RF3 está localizado no segundo piso de camarotes na porta número 9. Na Figura 4.19 pode-se ver a localização de cada ponto. Em cada ponto foram realizadas duas medições uma com o sistema AVAC ligado e outra com ele desligado. Isto permite avaliar o impacto que o sistema tem no ruído de fundo da sala. O equipamento regista em bandas de 1/3 de oitava, desde os 63 aos 8000 Hz, o valor do nível de

pressão sonora contínuo equivalente (L_{eq}) e posteriormente adiciona o filtro A de forma a obter o nível sonoro equivalente (L_{Aeq}).

É de notar que havia equipamentos da *régie* que não foi possível desligar sendo nessa zona o ruído mais elevado (RF2).

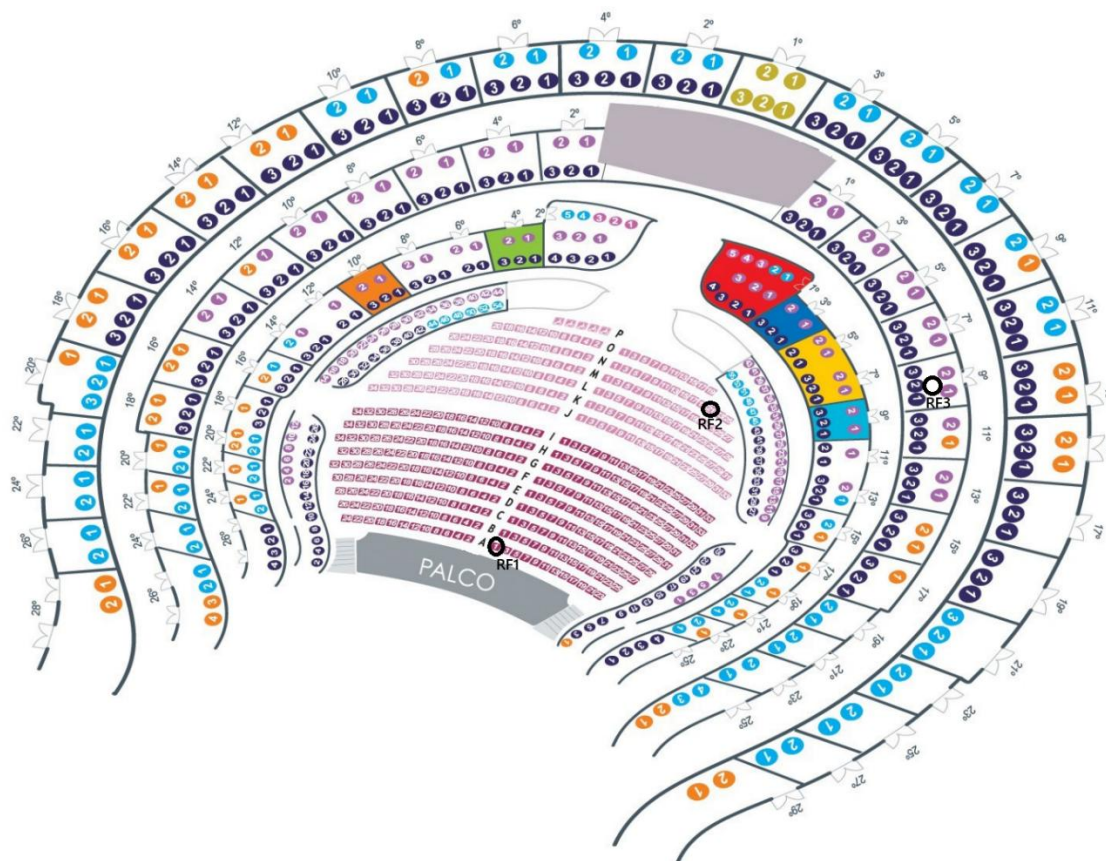


Figura 4.19 - Planta da sala principal do Theatro Circo com a localização da fonte sonora (FS) e dos pontos de medição do ruído de fundo [adaptado de 76].

4.2.2.2. Outros Parâmetros

Para medir os restantes parâmetros (Tempo de reverberação (TR), *Speech Transmission Index* (STI), Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}) e Tempo central (t_s)) foi utilizado o sonómetro (Brüel & Kjær, 2236) que foi posicionado a 1,20 m de altura em vários pontos da sala para obter de igual modo ao ruído de fundo uma boa caracterização do espaço.

Foram utilizadas duas fontes sonoras (Fonte sonora Brüel & Kjaer (*Echo Speech Source*), modelo 4720 e Fonte sonora Brüel & Kjaer, 4224) que foram posicionadas no centro do palco a cerca de 1,80 m da boca do palco (FS) (Figura 4.20). Estas emitiram um ruído branco a um nível de pressão sonora de 90 dB.

Foram escolhidos 17 pontos (Figura 4.21) para obter uma boa caracterização de todos os lugares da sala onde se mediu quatro vezes em cada ponto, duas com o AVAC ligado e duas desligado. Do ponto P1 ao ponto P8 estão situados na plateia, os pontos P9, P10 e P11 estão situados no primeiro andar de camarotes, os pontos P12, P13 e P14 estão situados no segundo andar de camarotes e os pontos P15, P16 e P17 estão situados no terceiro andar de camarotes. O ruído emitido pelas fontes sonoras é filtrado

em bandas de 1/1 de oitava pelo recetor e posteriormente o *software* calcula todos os parâmetros de forma automática.



Figura 4.20 - Localização da fonte sonora no palco do Theatro Circo [Fotos do auto].

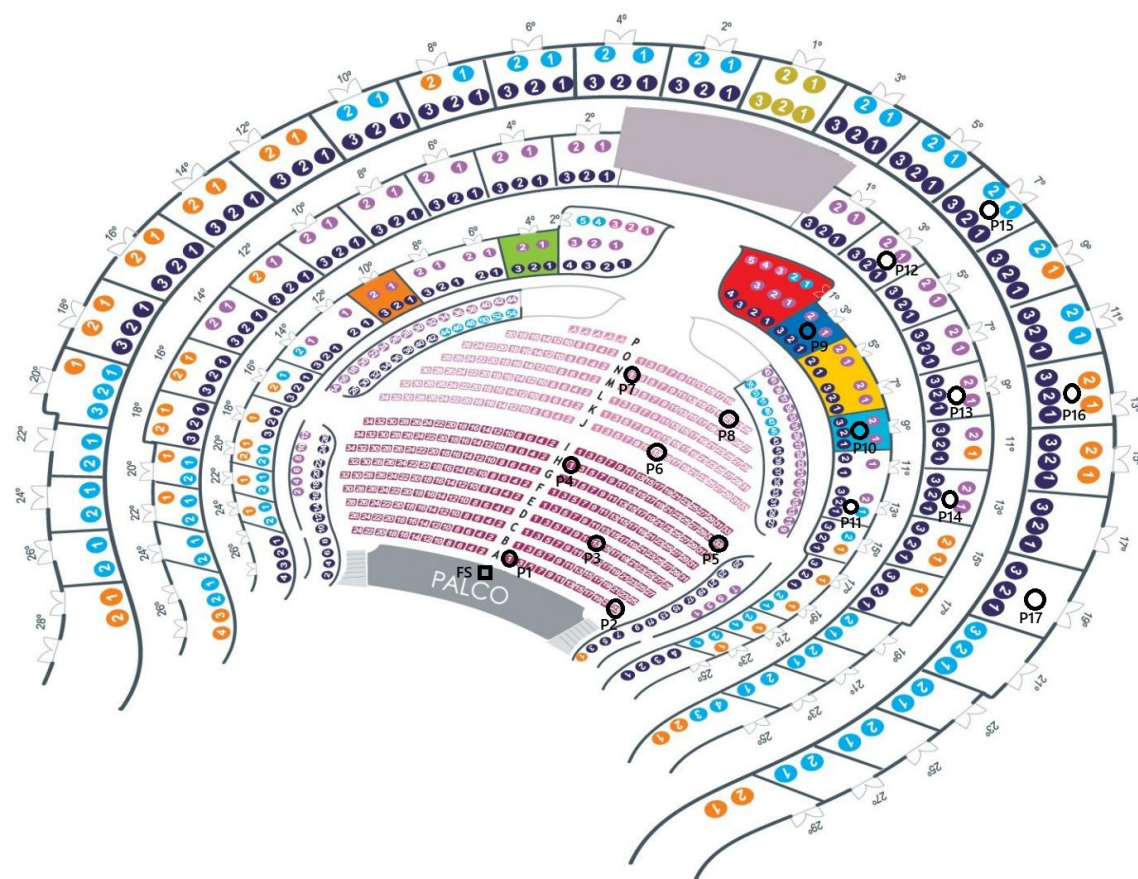


Figura 4.21 - Planta da sala com a localização da fonte sonora (FS) e dos pontos de medição dos parâmetros TR , ts , C_{80} , D_{50} e ST : P1 a P8 na plateia, P8 a P11 no primeiro andar dos balcões, P12 a P14 no segundo andar dos balcões e P15 a P17 no terceiro andar dos balcões [adaptado de 76].

5

RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados das medições realizadas *in situ* no Theatro Circo em Braga. É ainda averiguado se os valores obtidos estão em conformidade com os valores ideais e com os limites impostos pela regulamentação portuguesa (RRAE) tendo em conta o tipo de utilização do edifício.

5.2. RUÍDO DE FUNDO

5.2.1. MEDIÇÕES *IN SITU*

Para a caracterização acústica de uma sala um dos parâmetros principais a avaliar é o nível de pressão sonora do ruído de fundo que existe no espaço. Este parâmetro permite retirar conclusões sobre o nível sonoro residual, isto é, sons que não têm origem devido às atividades da sala. É também fulcral para a análise do conforto acústico do ouvinte e ainda é um dos parâmetros que tem de estar de acordo com a legislação portuguesa (RRAE).

Através das medições nos três pontos já mencionados no capítulo 4.2.2.1, do nível de pressão sonora em bandas de frequência de 1/3 de oitava desde os 16 aos 18000 Hz com o sistema AVAC em funcionamento e desligado, foi também obtido o nível sonoro através da aplicação do filtro A.

Nos Quadros 5.1 e 5.2 são expostos os valores do nível de pressão sonora com e sem o filtro A em bandas de 1/1 oitava com e sem AVAC respetivamente. Ao analisar os resultados é possível evidenciar que o nível de pressão sonora equivalente e o nível sonoro em ambos os casos variam consoante a distância ao palco. Devido à *régie* o ponto mais próximo desta (RF2) apresenta um nível sonoro mais elevado que os restantes pontos. Foi também possível evidenciar que quando se analisa o nível sonoro o aumento devido ao sistema de ventilação é mais significativo o que permite concluir que o sistema produz um ruído com algum impacto nas frequências sonoras em que o Homem ouve melhor. Nos Quadros 5.3 e 5.4 são expostos os valores do nível de pressão sonora e nível sonoro em bandas de 1/3 oitava com e sem AVAC respetivamente.

Segundo os resultados obtidos e apresentados nos Quadros 5.5 e 5.6 é possível verificar que o sistema de AVAC produz um aumento do nível de pressão sonora equivalente com maior impacto no ponto mais próximo ao palco o que indica que a insuflação tem um maior caudal na zona do palco. Quanto ao nível sonoro equivalente o aumento é mais significativo no ponto mais afastado ao palco (RF3). Pelas Figuras 5.1 e 5.2 é também possível verificar que o ruído tem um nível de pressão sonora sem filtro A mais elevado para frequências mais baixas e este reduz-se para frequências mais elevadas.

Quadro 5.1 - Valores dos níveis de pressão sonora com e sem o filtro A nos pontos (RF1, RF2 e RF3) para bandas de frequência de 1/1 de oitava, nível sonoro equivalente (L_{Aeq}) e nível pressão sonora equivalente (L_{eq}) do Theatro Circo com AVAC.

Freq. (Hz)	Ponto					
	RF1 (A1)		RF2 (N23)		RF3 (2º andar camarote Porta 9)	
	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A
16	49,3	<0	50,1	<0	49,4	<0
31	49,0	9,0	48,0	8,0	50,2	10,0
63	43,1	17,1	42,8	16,8	38,7	13,0
125	38,6	23,1	38,7	23,2	35,9	20,0
250	38,3	29,8	39,9	31,4	36,8	28,0
500	34,7	31,7	36,8	33,8	35,5	33,0
1k	27,7	27,7	28,0	28,0	25,3	25,0
2k	20,9	21,9	21,4	22,4	20,1	21,0
4k	14,6	15,6	14,8	15,8	15,2	16,0
8k	12,1	11,1	12,2	11,2	13,2	12,0
16k	12,8	5,8	13,0	6,0	12,8	5,8
L_{Aeq} (dB)		35,0		36,1		34,0
L_{eq} (dB)	54,4		55,4		55,9	

Quadro 5.2 - Valores dos níveis de pressão sonora com e sem o filtro A nos pontos (RF1, RF2 e RF3) para bandas de frequência de 1/1 de oitava, nível sonoro equivalente (L_{Aeq}) e nível pressão sonora equivalente (L_{eq}) do Theatro Circo sem AVAC.

Freq. (Hz)	Ponto					
	RF1 (A1)		RF2 (N23)		RF3 (2º andar camarote Porta 9)	
	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A
16	43,8	<0	52,7	<0	54,5	<0
31	46,3	6,3	47,0	7,0	49,8	9,8
63	40,7	14,7	39,6	13,6	39,3	13,3
125	37,6	22,1	34,7	19,2	31,1	15,6
250	29,6	21,1	37,6	29,1	28,6	20,1
500	26,2	23,2	26,6	23,6	23,3	20,3
1k	22,7	22,7	24,0	24,0	20,5	20,5
2k	17,0	18,0	18,3	19,3	17,4	18,4
4k	12,5	13,5	13,3	14,3	12,2	13,2
8k	11,8	10,8	12,2	11,2	11,8	10,8
16k	12,8	5,8	13,3	6,3	12,8	5,8
L_{Aeq} (dB)		28,5		31,0		26,5
L_{eq} (dB)	50,4		55,0		56,7	

Quadro 5.3 - Valores dos níveis de pressão sonora com e sem o filtro A nos pontos (RF1, RF2 e RF3) para bandas de frequência de 1/3 de oitava, nível sonoro equivalente (L_{Aeq}) e nível pressão sonora equivalente (L_{eq}) do Theatro Circo com AVAC.

Freq. (Hz)	Ponto					
	RF1 (A1)		RF2 (N23)		RF3 (2º andar camarote Porta 9)	
	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A
12,5	41,4	<0	45,7	<0	43,4	<0
16	45,1	<0	45,7	<0	42,0	<0
20	45,8	<0	44,6	<0	46,9	<0
25	46,6	1,9	45,4	0,7	47,6	2,9
31	41,2	1,8	40,9	1,5	45,2	5,8
40	43,0	8,4	42,2	7,6	41,6	7,0
50	41,3	11,1	41,1	10,9	37,8	7,6
63	36,5	10,3	36,0	9,8	29,7	3,5
80	33,5	11,0	33,1	10,6	25,7	3,2
100	35,9	16,8	35,9	16,8	32,8	13,7
125	31,2	15,1	31,4	15,3	28,2	12,1
160	33,1	19,7	33,2	19,8	31,1	17,7
200	34,0	23,1	37,2	26,3	32,9	22,0
250	34,2	25,6	34,2	25,6	31,6	23,0
315	32,2	25,6	32,9	26,3	31,4	24,8
400	32,4	27,6	35,6	30,8	34,9	30,1
500	28,3	25,1	27,9	24,7	24,4	21,2
630	27,2	25,3	27,0	25,1	23,2	21,3
800	24,5	23,7	24,6	23,8	21,7	20,9
1k	22,5	22,5	22,3	22,3	19,6	19,6
1,25k	21,3	21,9	22,2	22,8	19,8	20,4
1,6k	17,7	18,7	18,5	19,5	16,6	17,6
2k	16,2	17,4	16,4	17,6	14,8	16,0
2,5k	13,5	14,8	13,7	15,0	14,2	15,5
3,15k	11,5	12,7	11,6	12,8	11,0	12,2
4k	9,4	10,4	9,6	10,6	10,5	11,5
5k	7,9	8,4	8,4	8,9	9,8	10,3
6,3k	7,3	7,2	7,7	7,6	9,5	9,4
8k	7,3	6,2	7,3	6,2	7,7	6,6
10k	7,4	4,9	7,4	4,9	7,7	5,2
12,5k	7,4	3,1	7,4	3,1	7,5	3,2
16k	7,6	1,0	7,7	1,1	7,7	1,1
20k	8,9	<0	9,3	<0	8,8	<0
L_{Aeq} (dB)		35		36,1		34,0
L_{eq} (dB)	54,4		55,4		55,9	

Quadro 5.4 - Valores dos níveis de pressão sonora com e sem o filtro A nos pontos (RF1, RF2 e RF3) para bandas de frequência de 1/3 de oitava, nível sonoro equivalente (L_{Aeq}) e nível pressão sonora equivalente (L_{eq}) do Theatro Circo sem AVAC.

Freq. (Hz)	Ponto					
	RF1 (A1)		RF2 (N23)		RF3 (2º andar camarote Porta 9)	
	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A
12,5	36,7	<0	48,5	<0	50,4	<0
16	40,2	<0	48,5	<0	49,9	<0
20	39,5	<0	46,4	<0	48,7	<0
25	43,3	<0	43,6	<0	46,5	1,8
31	40,2	0,8	42,3	2,9	45,3	5,9
40	40,5	5,9	40,0	5,4	42,2	7,6
50	39,3	9,1	30,9	8,8	38,6	8,4
63	33,0	6,8	29,6	3,4	30,1	3,9
80	30,7	8,2	24,9	2,4	22,4	-0,1
100	36,4	17,3	33,1	14,0	29,4	10,3
125	28,3	12,2	26,0	9,9	22,3	6,2
160	28,5	15,1	27,2	13,8	23,7	10,3
200	27,1	16,2	36,4	25,5	26,3	15,4
250	23,6	15,0	28,9	20,3	21,8	13,2
315	22,4	15,8	28,3	21,7	21,7	15,1
400	23,4	18,6	23,1	18,3	20,3	15,5
500	20,1	16,9	21,5	18,3	17,6	14,4
630	19,9	18,0	20,5	18,6	16,7	14,8
800	18,7	17,9	20,2	19,4	16,4	15,6
1k	16,8	16,8	18,1	18,1	15,3	15,3
1,25k	18,1	18,7	19,2	19,8	15,4	16,0
1,6k	14,5	15,5	14,9	15,9	13,7	14,7
2k	11,2	12,4	13,8	15,0	13,5	14,7
2,5k	9,4	10,7	10,8	12,1	9,3	10,6
3,15k	8,9	10,1	9,4	10,6	8,1	9,3
4k	7,1	8,1	8,2	9,2	7,2	8,2
5k	6,8	7,3	7,7	8,2	6,8	7,3
6,3k	6,9	6,8	7,6	7,5	6,9	6,8
8k	7,0	5,9	7,3	6,2	7,1	6,0
10k	7,2	4,7	7,5	5,0	7,2	4,7
12,5k	7,4	3,1	7,6	3,3	7,4	3,1
16k	7,7	1,1	7,8	1,2	7,7	1,1
20k	8,9	<0	9,8	0,5	8,9	<0
L_{Aeq} (dB)		28,5		31,0		26,5
L_{eq} (dB)	50,4		55,0		56,7	

Quadro 5.5 - Variação dos níveis de pressão sonora equivalente (L_{eq}) com o AVAC ligado e desligado do Theatro Circo.

Ponto	RF1	RF2	RF3
L_{eq} (dB) com AVAC Ligado	54,4	55,4	55,9
L_{eq} (dB) sem AVAC Ligado	50,4	55	55,9
Δ Ruído de Fundo (dB)	+ 4,0	+ 0,4	≈ 0

Quadro 5.6 - Variação dos níveis sonoro equivalente (L_{Aeq}) com o AVAC ligado e desligado do Theatro Circo.

Ponto	RF1	RF2	RF3
L_{Aeq} (dB) com AVAC Ligado	35,0	36,1	34,0
L_{Aeq} (dB) sem AVAC Ligado	28,5	31,0	26,5
ΔL_A Ruído de Fundo (dB)	+ 6,5	+ 5,1	+ 7,5

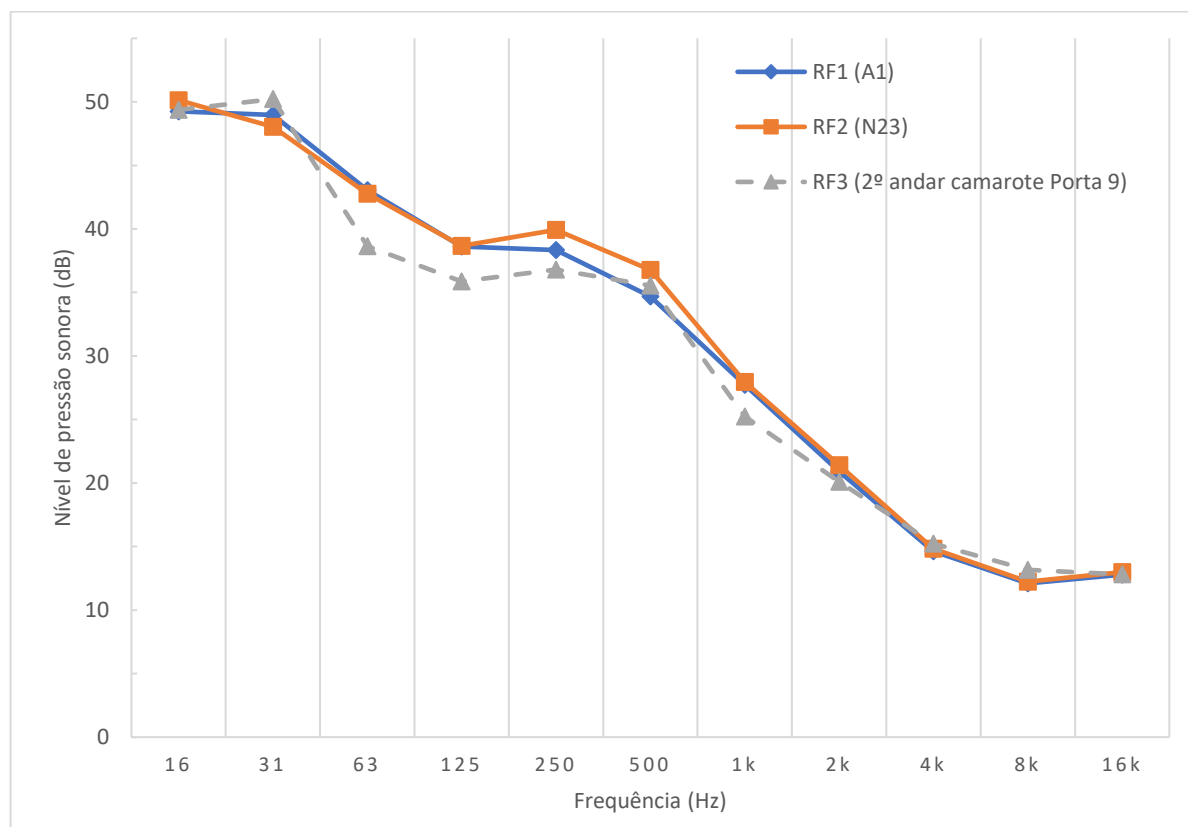


Figura 5.1 – Nível de pressão sonora sem filtro A dos pontos (RF1, RF2 e RF3) do ruído de fundo em bandas de frequência de 1/1 de oitava, do Theatro Circo com AVAC.

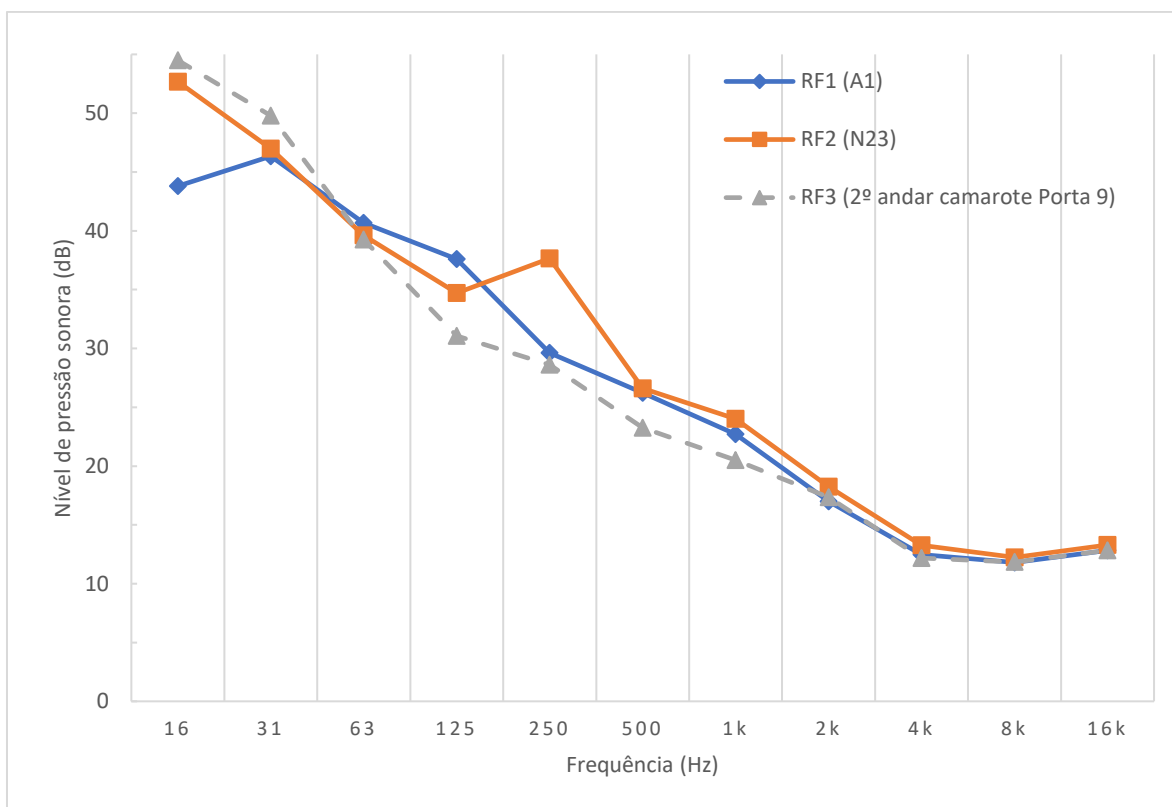


Figura 5.2 - Nível de pressão sonora sem filtro A dos pontos (RF1, RF2 e RF3) do ruído de fundo em bandas de frequência de 1/1 de oitava, do Theatro Circo sem AVAC.

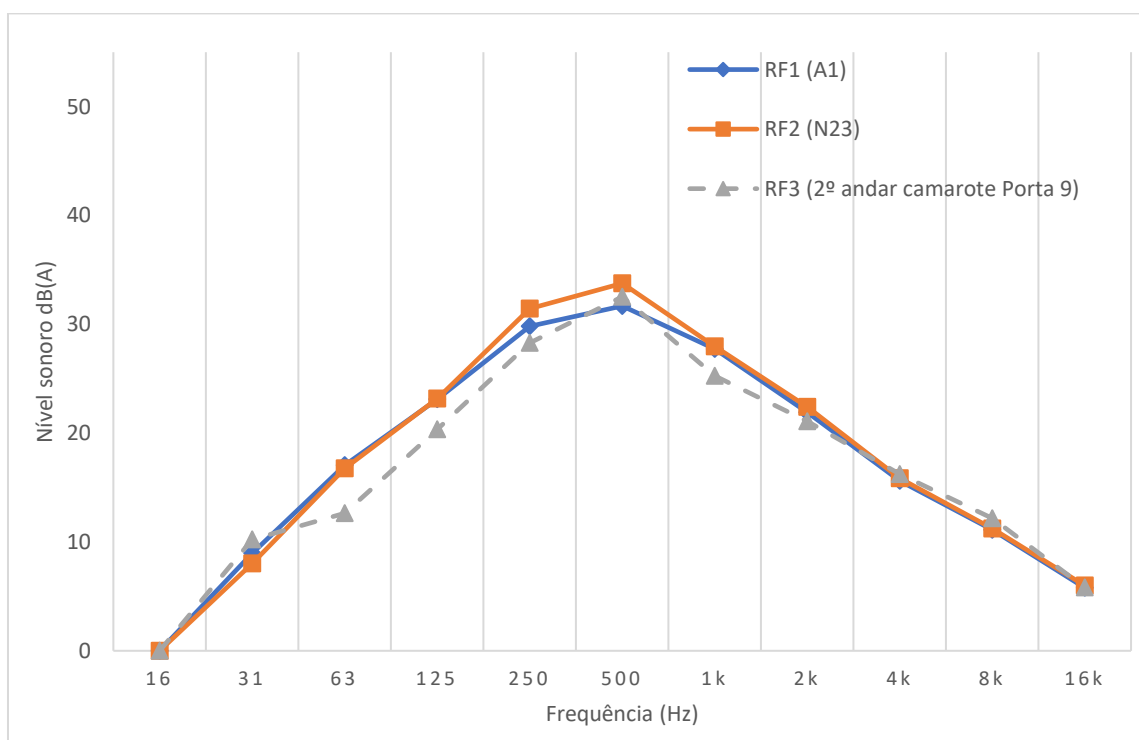


Figura 5.3 - Nível de pressão sonora com filtro A dos pontos (RF1, RF2 e RF3) do ruído de fundo em bandas de frequência de 1/1 de oitava, do Theatro Circo com AVAC.

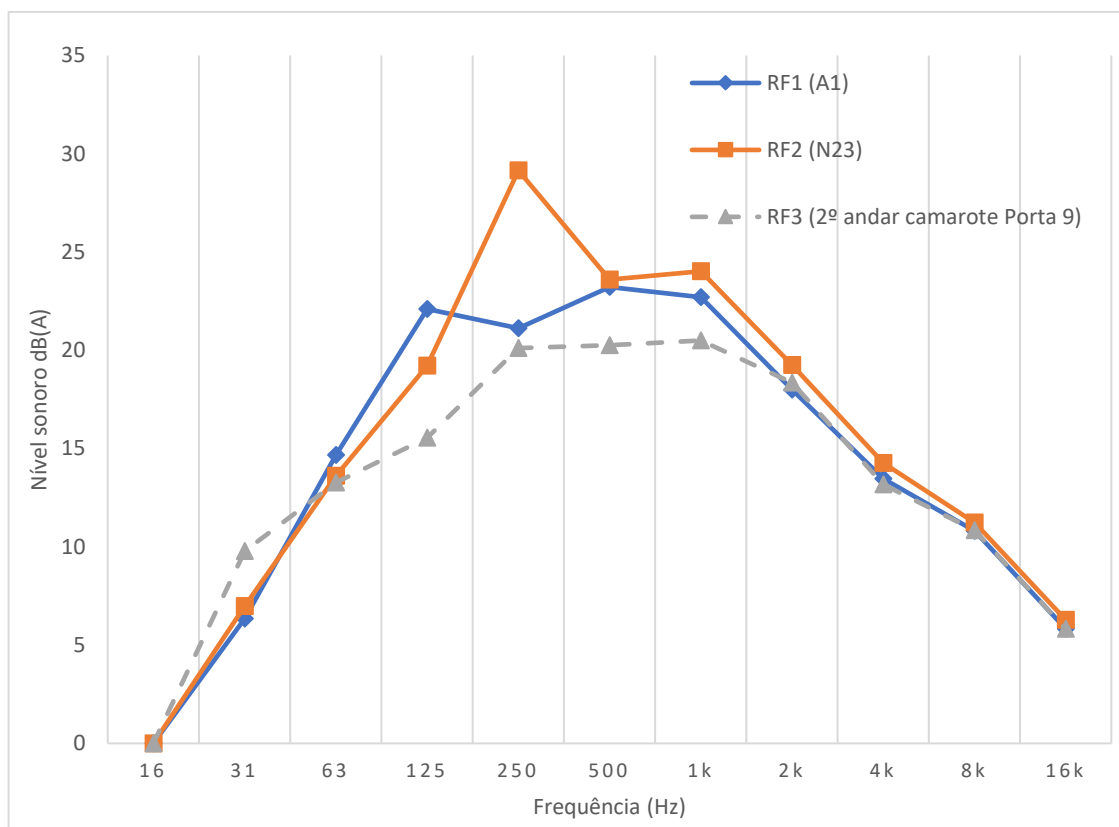


Figura 5.4 - Nível de pressão sonora com filtro A dos pontos (RF1, RF2 e RF3) do ruído de fundo em bandas de frequência de 1/1 de oitava, do Theatro Circo sem AVAC.

Através da comparação entre as Figuras 5.1 e 5.3 e também entre as Figuras 5.2 e 5.4 é possível verificar que não só o ruído tem uma redução da intensidade, mas também as frequências médias possuem um maior nível de pressão sonora, como já era de esperar devido à aplicação do filtro A em que as frequências médias são mais percebidas pelo ouvido humano. Ainda nestas figuras é pode-se verificar que com a aplicação do filtro A ao nível de pressão sonora a intensidade deixa de ser decrescente consoante o aumento das frequências, mas tem um pico para a banda de frequências dos 500 Hz. As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam a variação do nível de pressão sonora sem filtro A nos diferentes pontos consoante a frequência para bandas de frequência de 1/3 de oitava com e sem AVAC respetivamente. Já as Figuras 5.7 e 5.8 apresentam a variação do nível de pressão sonora com filtro A nos diferentes pontos consoante a frequência para bandas de frequência de 1/3 de oitava com e sem AVAC respetivamente.

Através do Quadro 5.7, onde se realizou a média logarítmica e o desvio padrão dos resultados para bandas de frequência de 1/1 oitava (no Quadro 5.8 são apresentados os valores para 1/3 de oitava) é possível perceber que existe um desvio do nível sonoro e do nível de pressão sonora entre os pontos é significativo tendo um desvio maior para as frequências de 125 e 250 Hz e quase nem tem desvio para a frequência de 16 Hz. Podendo depois verificar-se nas Figuras 5.9 e 5.10 visualizar o impacto que o sistema de ventilação tem na média dos pontos da sala, sendo maior nas frequências centrais o que é prejudicial para a palavra uma vez que é nestas que se situam as frequências da voz humana.

No Quadro 5.9 foi realizada uma diferença para cada frequência entre o nível de pressão sonora médio equivalente com e sem o funcionamento do AVAC para bandas de frequência de 1/1 oitava de forma a comprovar o que visualmente se tinha percebido nas Figuras 5.9 e 5.10, o facto de nas frequências centrais o aumento do ruído ser maior. Na Figura 5.13 é possível visualizar a diferença em função da frequência.

No Quadro 5.10 é apresentado o mesmo para o nível sonoro. As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam a variação do nível sonoro das médias logarítmicas para bandas de frequência de 1/1 oitava com sem AVAC respetivamente. Na Figura 5.14 é apresentada a variação dessa diferença ao longo da frequência. No Quadro 5.11 foi realizada uma diferença para cada frequência entre o nível de pressão sonora médio equivalente com e sem o funcionamento do AVAC para bandas de frequência de 1/3 oitava e são representados estes valores em função da frequência na Figura 5.15. Ao ao comparar estes valores com os que se obteve no Quadro 5.12 e representados na Figura 5.16 (onde se realizou do mesmo modo que no Quadro 5.11 e Figura 5.15 as médias logarítmicas, mas para o nível sonoro) é possível reforçar o que se verificou com os dados para 1/1 oitava de que as frequências médias apresentam um aumento no ruído mais significativa.

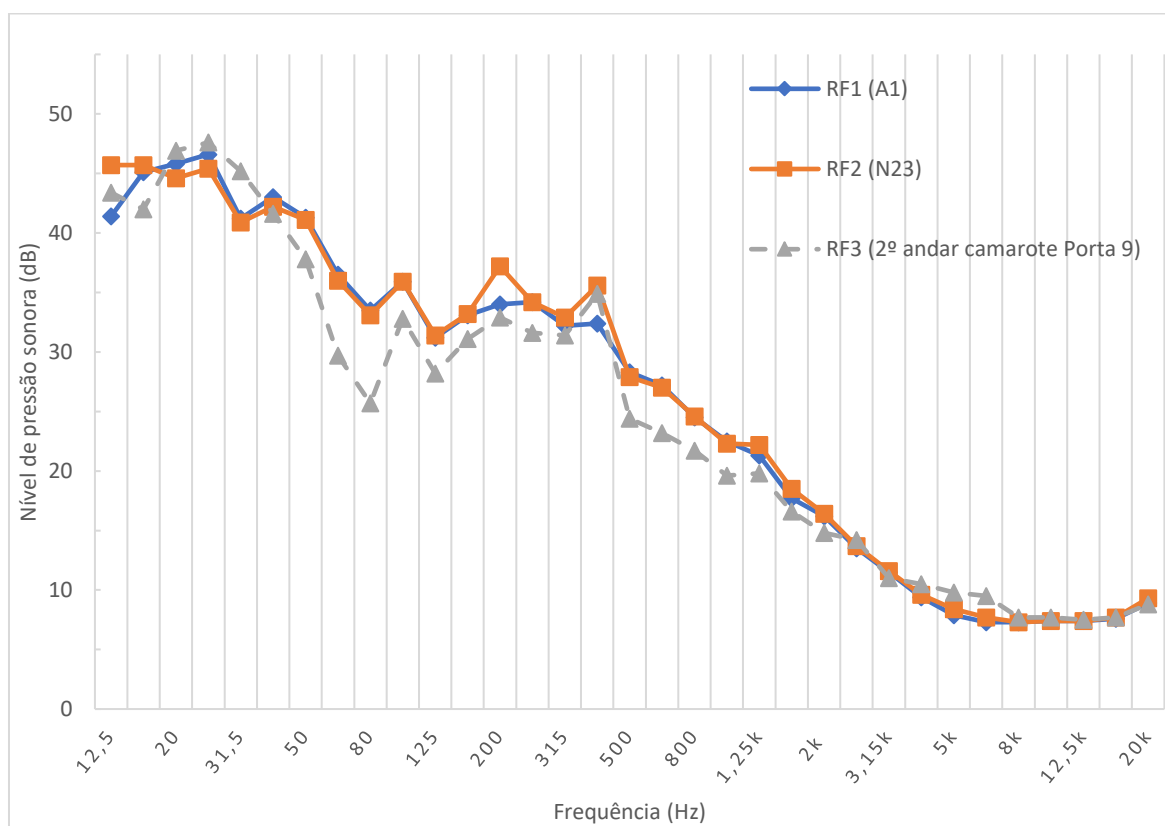


Figura 5.5 – Variação do nível de pressão sonora sem filtro A dos pontos (RF1, RF2 e RF3) do ruído de fundo em bandas de frequência de 1/3 de oitava, do Theatro Circo com AVAC.

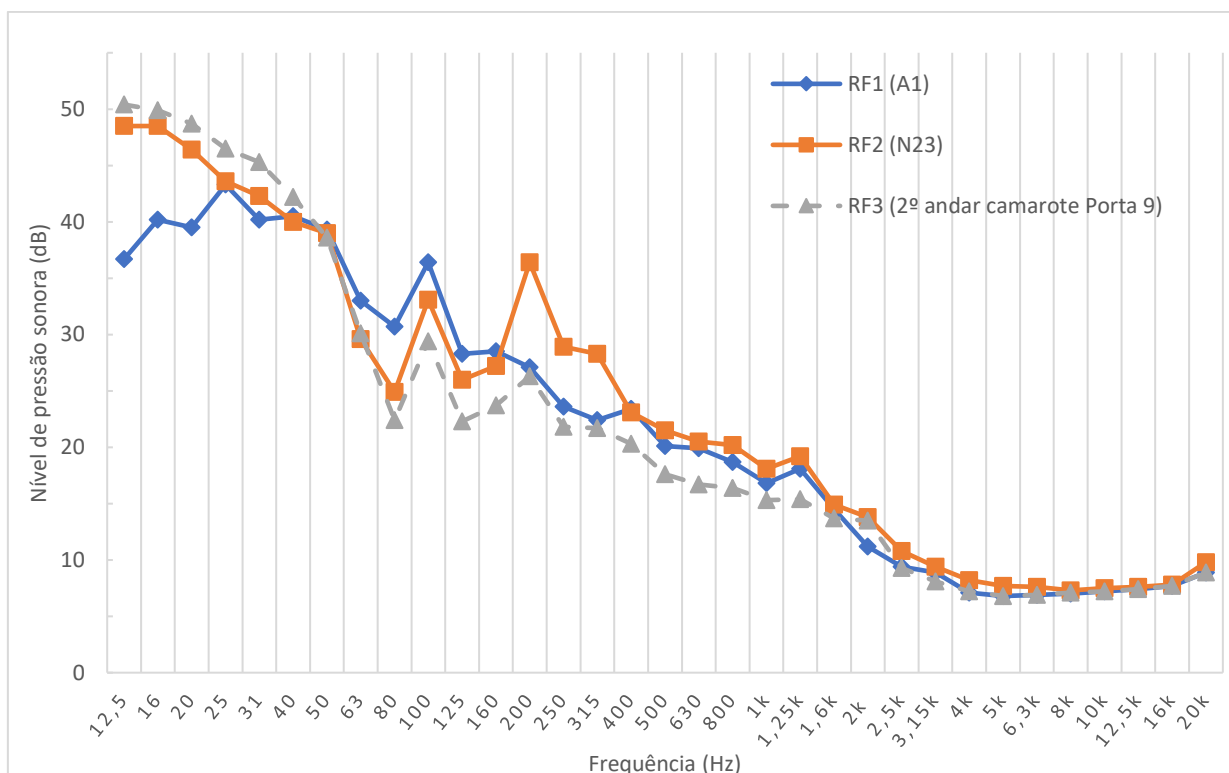


Figura 5.6 – Nível de pressão sonora sem filtro A dos pontos (RF1, RF2 e RF3) do ruído de fundo em bandas de frequência de 1/3 de oitava, do Theatro Circo sem AVAC.

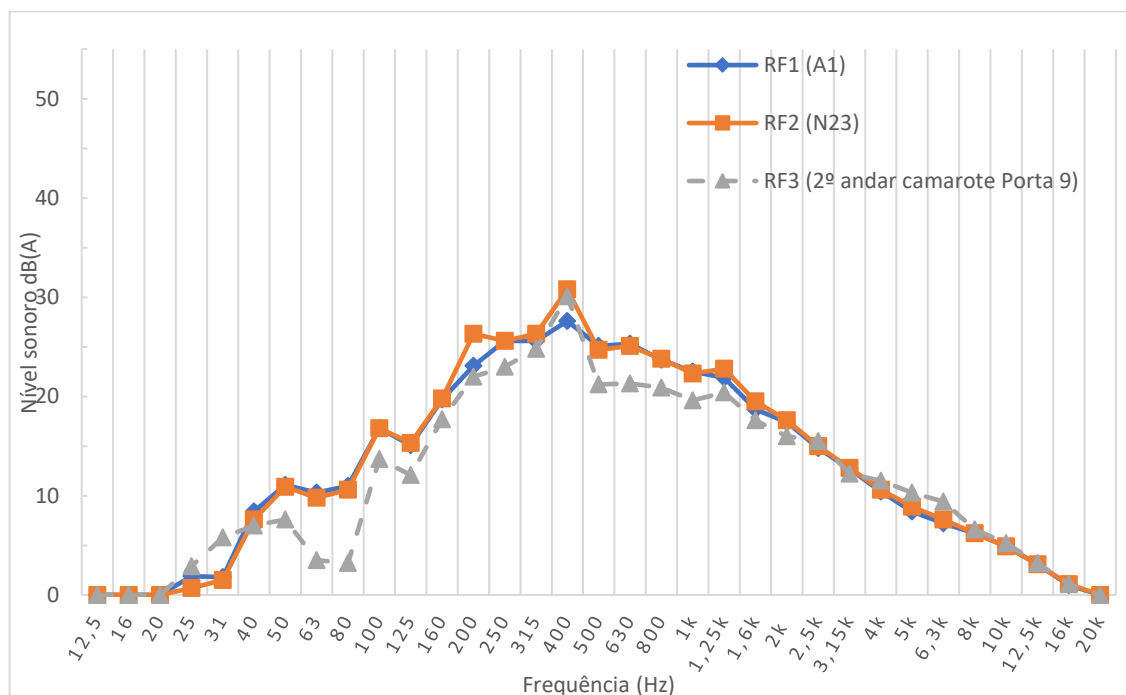


Figura 5.7 - Nível de pressão sonora com filtro A dos pontos (RF1, RF2 e RF3) do ruído de fundo em bandas de frequência de 1/3 de oitava, do Theatro Circo com AVAC.

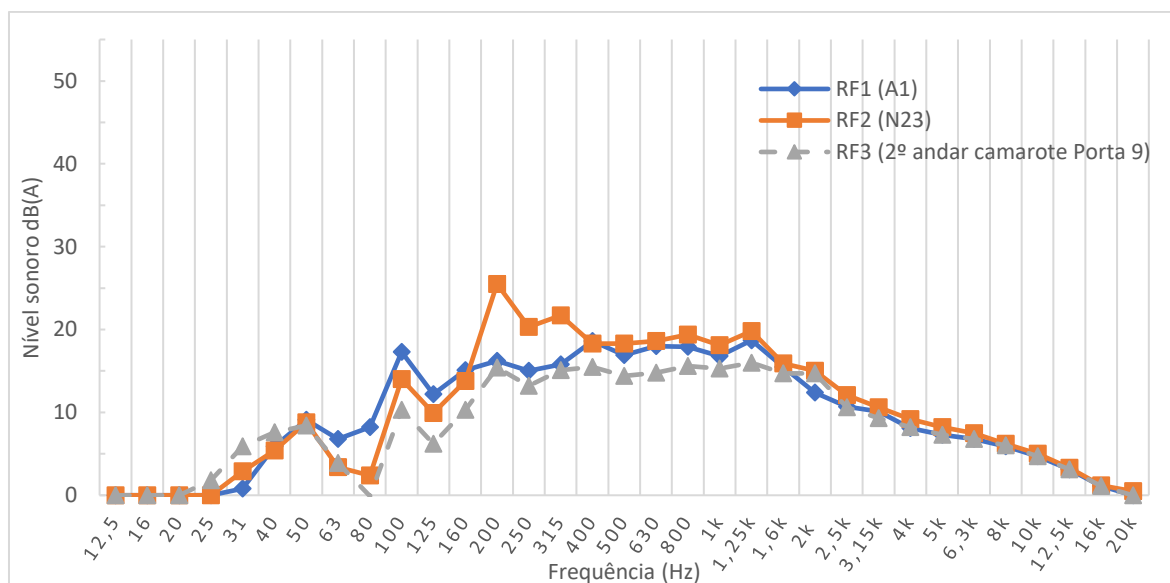


Figura 5.8 - Nível de pressão sonora com filtro A dos pontos (RF1, RF2 e RF3) do ruído de fundo em bandas de frequência de 1/3 de oitava, do Theatro Circo sem AVAC.

Quadro 5.7 - Valores da média logarítmica do nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}) e o nível sonoro equivalente (L_{Aeq}) para bandas de frequência de 1/1 de oitava, do Theatro Circo.

Freq. (Hz)	Com AVAC ligado				Sem AVAC ligado			
	L (dB) Média Logarítmica (RF1, RF2 e RF3)		Desvio Padrão (RF1, RF2 e RF3) (dB)		L (dB) Média Logarítmica (RF1, RF2 e RF3)		Desvio Padrão (RF1, RF2 e RF3) (dB)	
	Sem filtro A	Com filtro A	Sem filtro A	Com filtro A	Sem filtro A	Com filtro A	Sem filtro A	Com filtro A
16	49,6	<0	0,4	0,4	52,1	<0	4,7	<0
31	49,2	9,2	0,9	0,9	48,0	8,0	1,5	1,5
63	41,9	15,9	2,0	2,0	39,9	13,9	0,6	0,6
125	37,9	22,4	1,3	1,3	35,2	19,7	2,7	2,7
250	38,5	30,0	1,3	1,3	34,0	25,5	4,0	4,0
500	35,7	32,7	0,9	0,9	25,6	22,6	1,5	1,5
1k	27,1	27,1	1,2	1,2	22,6	22,6	1,5	1,5
2k	20,8	21,8	0,5	0,5	17,6	18,6	0,5	0,5
4k	14,9	15,9	0,3	0,3	12,7	13,7	0,5	0,5
8k	12,5	11,5	0,5	0,5	12,0	11,0	0,2	0,2
16k	12,9	5,9	0,1	0,1	13,0	6,0	0,2	0,2
L_{Aeq} (dB)		35,1		0,9		29,1		1,8
L_{eq} (dB)	55,3		0,6		54,7		2,7	

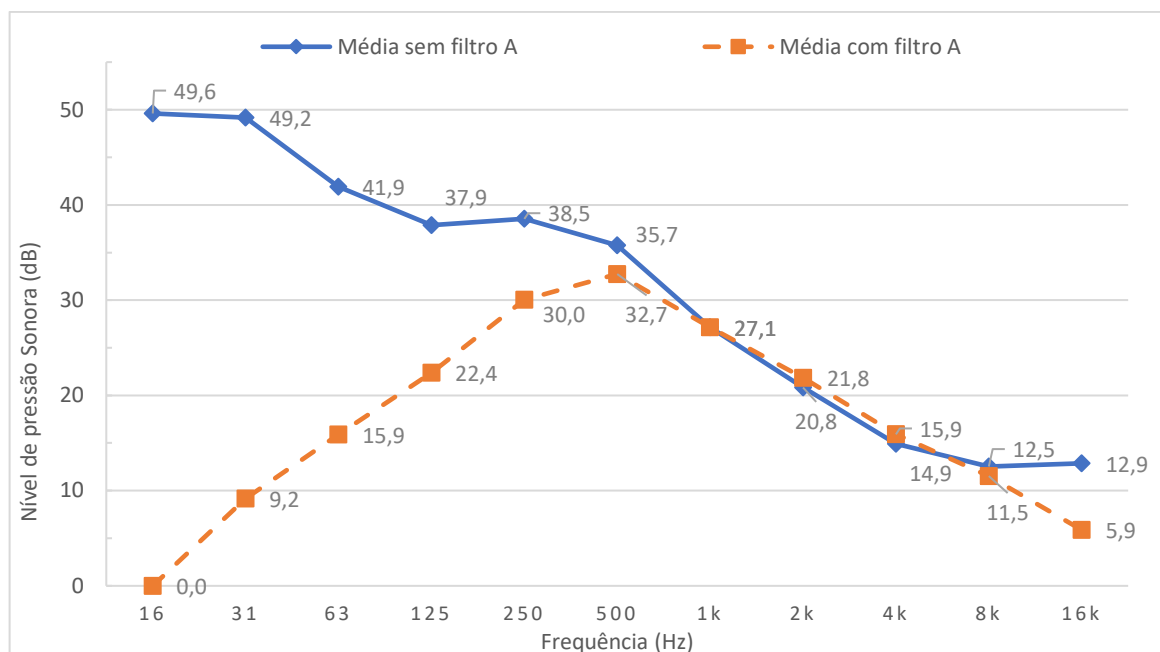


Figura 5.9 – Valores médios dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), de todos os pontos com e sem o filtro A, para bandas de frequência de 1/1 oitava, com AVAC do Theatro Circo.

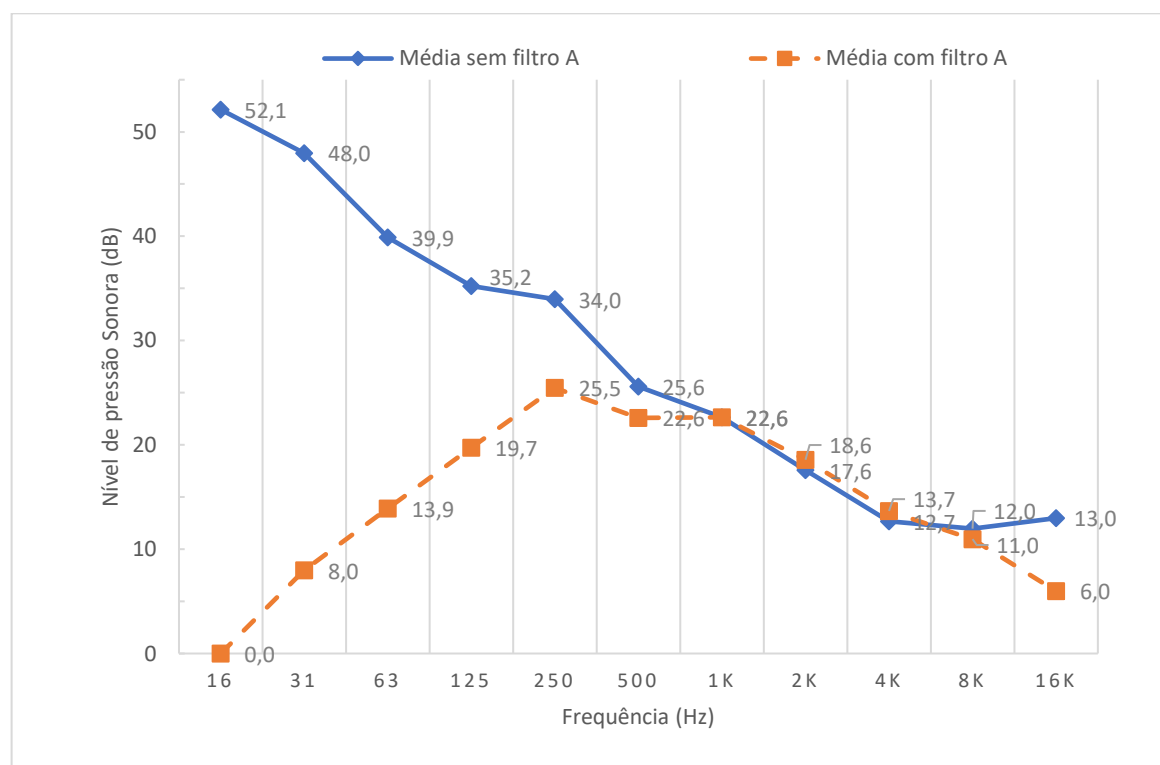


Figura 5.10 – Valores médios dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), de todos os pontos com e sem o filtro A, para bandas de frequência de 1/1 oitava, sem AVAC do Theatro Circo.

Quadro 5.8 - Valores da média logarítmica do nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}) e o nível sonoro equivalente (L_{Aeq}) para bandas de frequência de 1/3 de oitava, do Theatro Circo.

Freq. (Hz)	Com AVAC ligado				Sem AVAC ligado			
	L (dB) Média Logarítmica (RF1, RF2 e RF3)		Desvio Padrão (RF1, RF2 e RF3) (dB)		L (dB) Média Logarítmica (RF1, RF2 e RF3)		Desvio Padrão (RF1, RF2 e RF3) (dB)	
	Sem filtro A	Com filtro A	Sem filtro A	Com filtro A	Sem filtro A	Com filtro A	Sem filtro A	Com filtro A
12,5	43,9	<0	1,8	0,0	47,9	0,0	6,1	0,0
16	44,5	<0	1,6	0,0	47,8	0,0	4,3	0,0
20	45,9	<0	0,9	0,0	46,3	0,0	3,9	0,0
25	46,6	1.9	0,9	0,9	44,7	0,7	1,4	0,8
31	42,9	3.5	2,0	2,0	43,1	3,7	2,1	2,1
40	42,3	7.7	0,6	0,6	41,0	6,4	0,9	0,9
50	40,3	10.1	1,6	1,6	39,0	8,8	0,3	0,3
63	35,0	8.8	3,1	3,1	31,2	5,0	1,5	1,5
80	31,9	9.4	3,6	3,6	27,4	4,9	3,5	3,5
100	35,1	16.0	1,5	1,5	33,8	14,7	2,9	2,9
125	30,5	14.4	1,5	1,5	26,2	10,1	2,5	2,5
160	32,6	19.2	1,0	1,0	26,9	13,5	2,0	2,0
200	35,1	24.2	1,8	1,8	32,5	21,6	4,6	4,6
250	33,5	24.9	1,2	1,2	25,9	17,3	3,0	3,0
315	32,2	25.6	0,6	0,6	25,2	18,6	3,0	3,0
400	34,5	29.7	1,4	1,4	22,5	17,7	1,4	1,4
500	27,2	24.0	1,8	1,8	20,0	16,8	1,6	1,6
630	26,1	24.0	1,8	1,8	19,3	17,4	1,7	1,7
800	23,8	23.0	1,3	1,3	18,7	17,9	1,6	1,6
1k	21,7	21.7	1,3	1,3	16,9	16,9	1,1	1,1
1,25k	21,2	21.8	1,0	1,0	17,8	18,4	1,6	1,6
1,6k	17,7	18.7	0,8	0,8	14,4	15,4	0,5	0,5
2k	15,9	17.1	0,7	0,7	13,0	14,2	1,2	1,2
2,5k	13,8	15,1	0,3	0,3	9,9	11,2	0,7	0,7
3,15k	11,4	12,6	0,3	0,3	8,8	10,0	0,5	0,5
4k	9,9	10,9	0,5	0,5	7,5	8,5	0,5	0,5
5k	8,8	9,3	0,8	0,8	7,1	7,6	0,4	0,4
6,3k	8,3	8,2	1,0	1,0	7,1	7,0	0,3	0,3
8k	7,4	6,3	0,2	0,2	7,1	6,0	0,1	0,1
10k	7,5	5,0	0,1	0,1	7,3	4,8	0,1	0,1
12,5k	7,4	3,1	0,0	0,0	7,5	3,2	0,1	0,1
16k	7,7	1,1	0,0	0,0	7,7	1,1	0,0	0,0
20k	9,0	<0	0,2	0,0	9,2	0,2	0,4	0,2
L_{Aeq} (dB)		35,1		0,9		29,1		1,8
L_{eq} (dB)	55,3		0,6		54,7		2,7	2,7

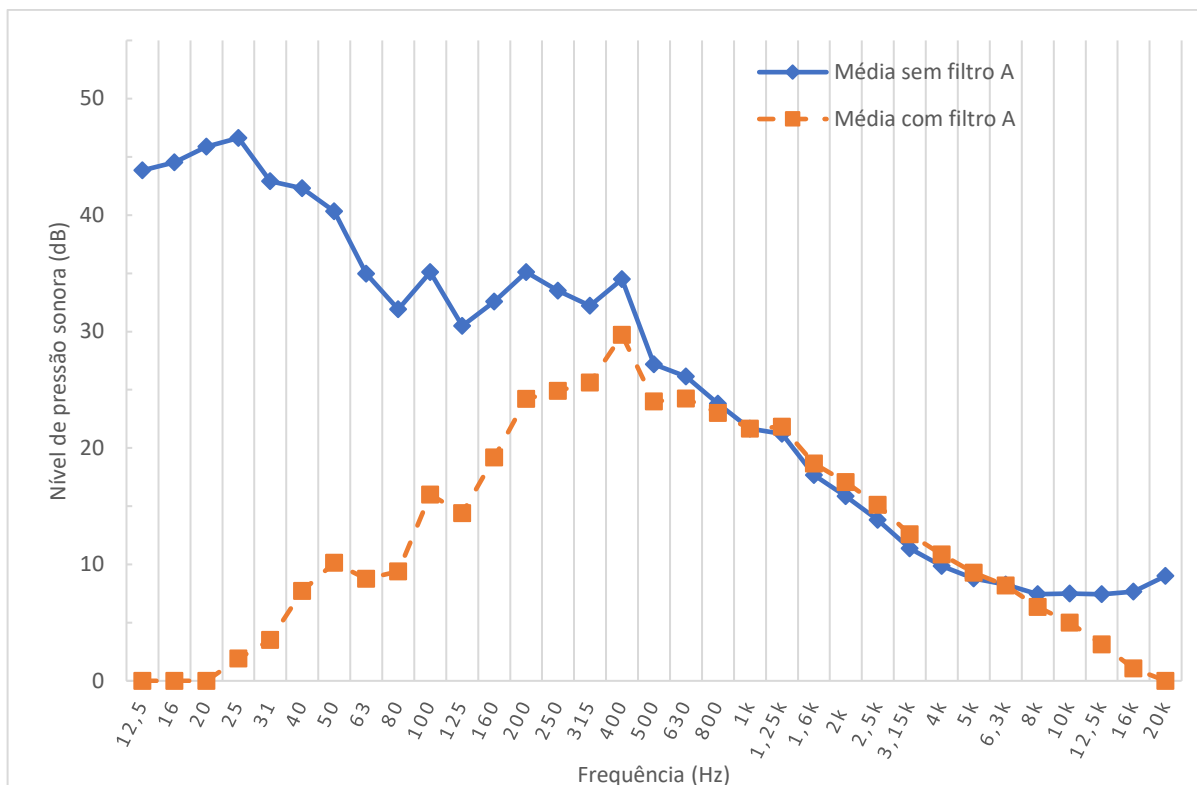


Figura 5.11 – Valores médios dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), de todos os pontos com e sem o filtro A para bandas de frequência de 1/3 oitava com AVAC do Theatro Circo.

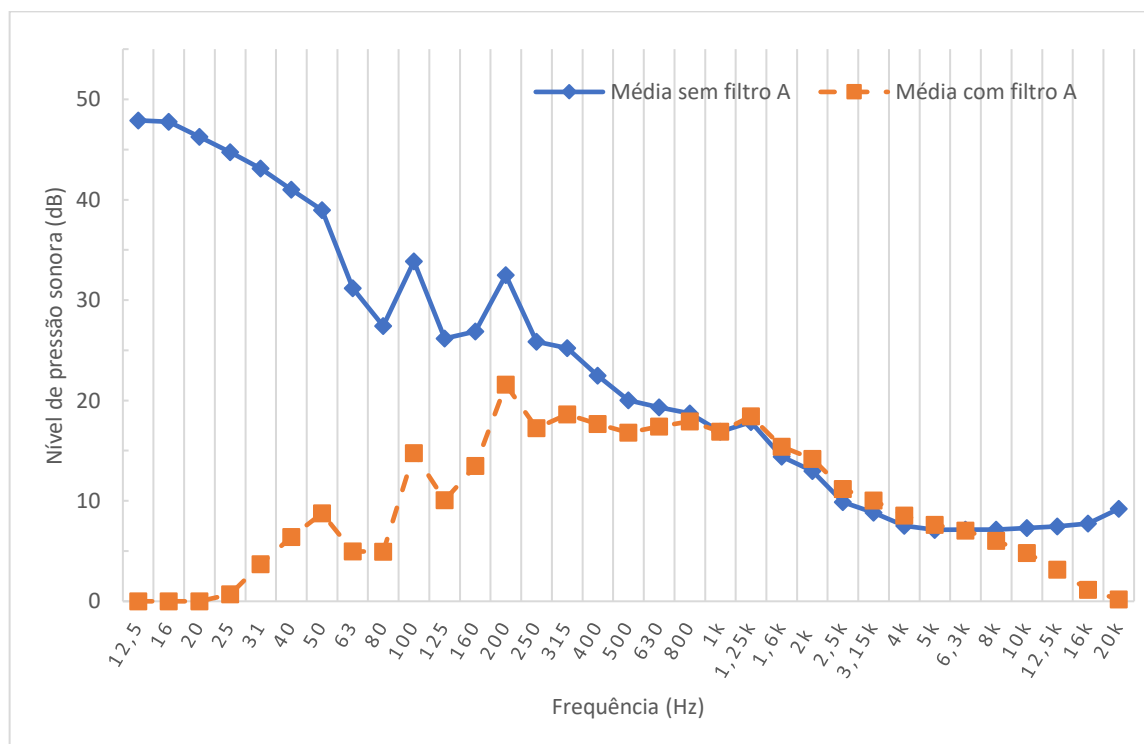


Figura 5.12 – Valores médios dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo (dB), de todos os pontos com e sem o filtro A para bandas de frequência de 1/3 oitava sem AVAC do Theatro Circo.

Quadro 5.9 – Diferença entre os níveis de pressão sonora equivalente (L_{eq}) com e sem AVAC de acordo com a sua frequência em bandas de 1/1 oitava.

Frequência (Hz)	Média Logarítmica L_{eq} (dB) com AVAC Ligado	Média Logarítmica L_{eq} (dB) sem AVAC Ligado	Variação de Ruído de Fundo (ΔRF) (dB)
16	49,6	52,1	- 2,5
31	49,2	48,0	+1,2
63	41,9	39,9	+ 2,0
125	37,9	35,2	+ 2,7
250	38,5	34,0	+ 4,5
500	35,7	25,6	+ 10,1
1k	27,1	22,6	+ 4,5
2k	20,8	17,6	+ 3,2
4k	14,9	12,7	+ 2,2
8k	12,5	12,0	+ 0,5
16k	12,9	13,0	- 0,1
L_{eq} (dB)	55,3	54,7	+ 0,6

Quadro 5.10 – Diferença entre os níveis sonoros equivalente (L_{Aeq}) com e sem AVAC de acordo com a sua frequência em bandas de 1/1 oitava.

Frequência (Hz)	Média Logarítmica L_{Aeq} (dB) com AVAC	Média Logarítmica L_{Aeq} (dB) sem AVAC	Variação de Ruído de Fundo (ΔRF) (dB(A))
16	0,0	0,0	- 2,5
31	9,2	8,0	+1,2
63	15,9	13,9	+ 2,0
125	22,4	19,7	+ 2,7
250	30,0	25,5	+ 4,5
500	32,7	22,6	+ 10,1
1k	27,1	22,6	+ 4,5
2k	21,8	18,6	+ 3,2
4k	15,9	13,7	+ 2,2
8k	11,5	11,0	+ 0,5
16k	5,9	6,0	- 0,1
L_{Aeq} (dB)	35,1	29,1	+ 6

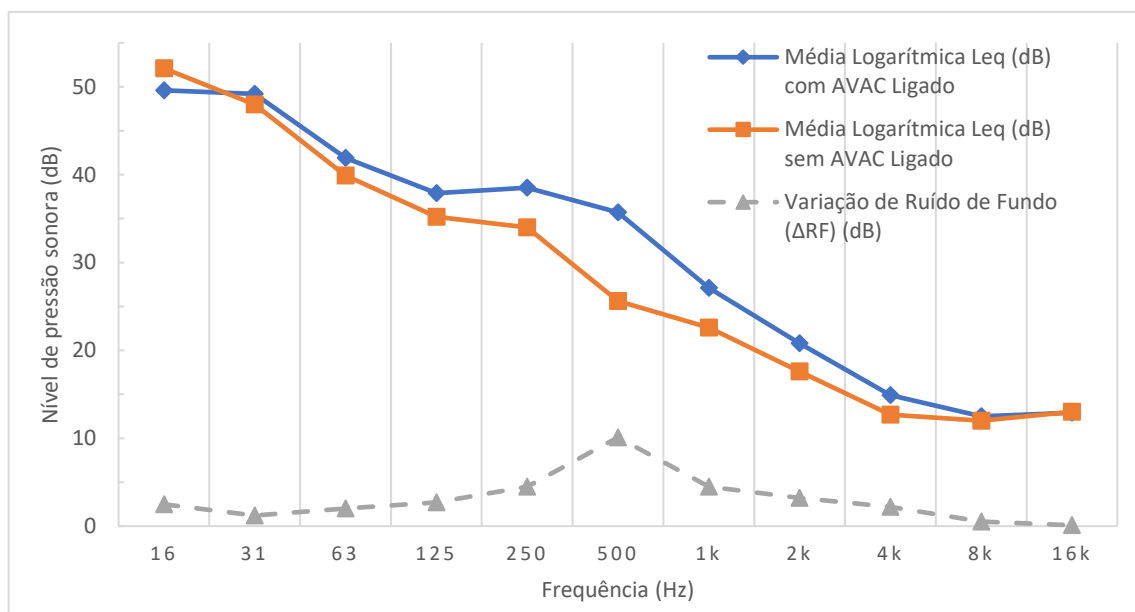


Figura 5.13 - Comparação entre os valores médios do nível de pressão sonora sem filtro A do ruído de fundo (RF), em bandas de frequência de 1/1 de oitava com e sem o AVAC ligado e a respetiva variação dos níveis de pressão, do Theatro Circo.

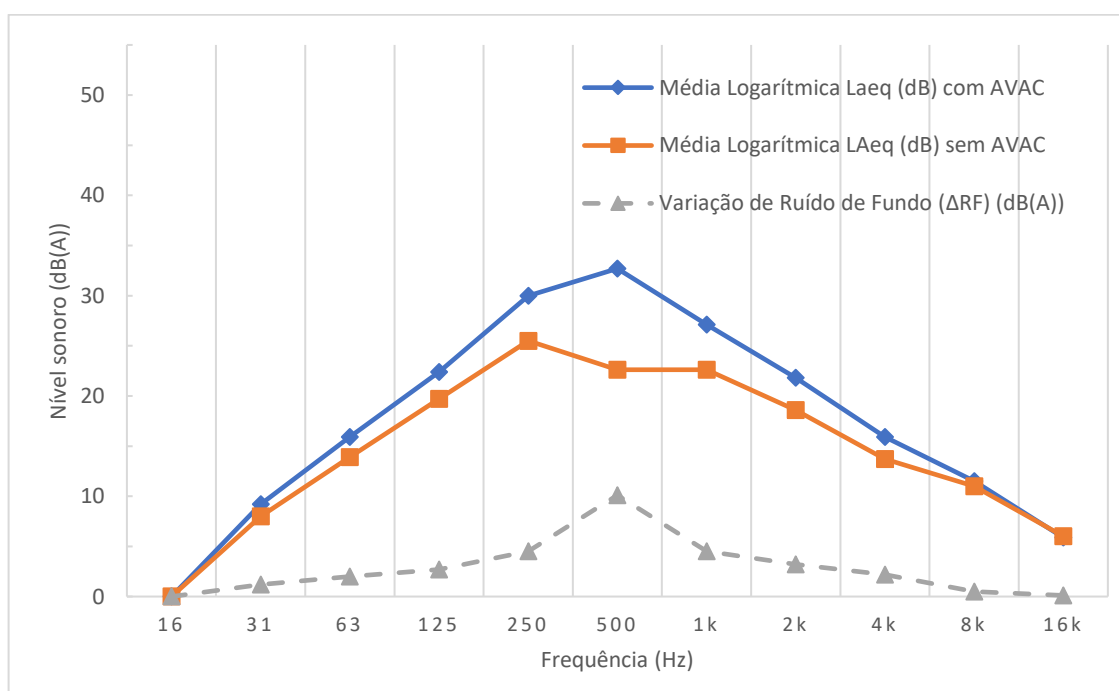


Figura 5.14 - Comparação entre os valores médios do nível de pressão sonora com filtro A do ruído de fundo (RF), em bandas de frequência de 1/1 de oitava com e sem o AVAC ligado e a respetiva variação dos níveis de pressão, do Theatro Circo.

Quadro 5.11 – Diferença entre os níveis de pressão sonora equivalente (L_{eq}) com e sem AVAC de acordo com a sua frequência em bandas de 1/3 oitava.

Frequência (Hz)	Média Logarítmica L_{eq} (dB) com AVAC Ligado	Média Logarítmica L_{eq} (dB) sem AVAC Ligado	Variação de Ruído de Fundo (ΔRF) (dB)
12,5	43,9	47,9	4,0
16	44,5	47,8	3,3
20	45,9	46,3	0,4
25	46,6	44,7	1,9
31	42,9	43,1	0,2
40	42,3	41,0	1,3
50	40,3	39,0	1,3
63	35,0	31,2	3,8
80	31,9	27,4	4,5
100	35,1	33,8	1,3
125	30,5	26,2	4,3
160	32,6	26,9	5,7
200	35,1	32,5	2,6
250	33,5	25,9	7,6
315	32,2	25,2	7,0
400	34,5	22,5	12,0
500	27,2	20,0	7,2
630	26,1	19,3	6,8
800	23,8	18,7	5,1
1k	21,7	16,9	4,8
1,25k	21,2	17,8	3,4
1,6k	17,7	14,4	3,3
2k	15,9	13,0	2,9
2,5k	13,8	9,9	3,9
3,15k	11,4	8,8	2,6
4k	9,9	7,5	2,4
5k	8,8	7,1	1,7
6,3k	8,3	7,1	1,2
8k	7,4	7,1	0,3
10k	7,5	7,3	0,2
12,5k	7,4	7,5	0,1
16k	7,7	7,7	<0
20k	9,0	9,2	0,2
L_{eq} (dB)	55,3	54,7	0,6

Quadro 5.12 – Diferença entre os níveis sonoros equivalente (L_{Aeq}) com e sem AVAC de acordo com a sua frequência em bandas de 1/3 oitava.

Frequência (Hz)	Média Logarítmica L_{Aeq} (dB) com AVAC Ligado	Média Logarítmica L_{Aeq} (dB) sem AVAC Ligado	Variação de Ruído de Fundo (ΔRF) (dB)
12,5	<0	<0	<0
16	<0	<0	<0
20	<0	<0	<0
25	1.9	0,7	1,2
31	3.5	3,7	0,2
40	7.7	6,4	1,3
50	10.1	8,8	1,3
63	8.8	5,0	3,8
80	9.4	4,9	4,5
100	16.0	14,7	1,3
125	14.4	10,1	4,3
160	19.2	13,5	5,7
200	24.2	21,6	2,6
250	24.9	17,3	7,6
315	25.6	18,6	7,0
400	29.7	17,7	12,0
500	24.0	16,8	7,2
630	24.0	17,4	6,6
800	23.0	17,9	5,1
1k	21.7	16,9	4,8
1,25k	21.8	18,4	3,4
1,6k	18.7	15,4	3,3
2k	17.1	14,2	2,9
2,5k	15.1	11,2	3,9
3,15k	12.6	10,0	2,6
4k	10.9	8,5	2,4
5k	9.3	7,6	1,7
6,3k	8.2	7,0	1,2
8k	6.3	6,0	0,3
10k	5.0	4,8	0,2
12,5k	3.1	3,2	0,1
16k	1.1	1,1	<0
20k	<0	0,2	0,2
L_{Aeq} (dB)	35,1	29,1	6,0

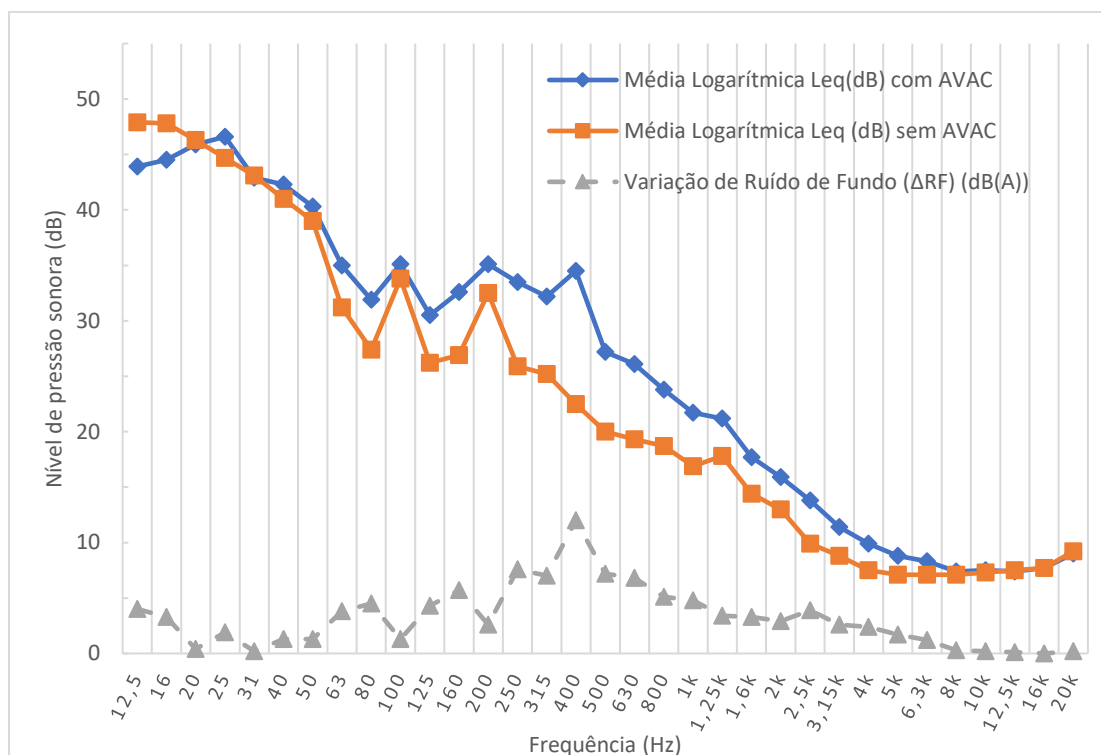


Figura 5.15 - Comparação entre os valores médios do nível de pressão sonora sem filtro A do ruído de fundo (RF), em bandas de frequência de 1/3 de oitava com e sem o AVAC ligado e a respectiva variação dos níveis de pressão, do Theatro Circo.

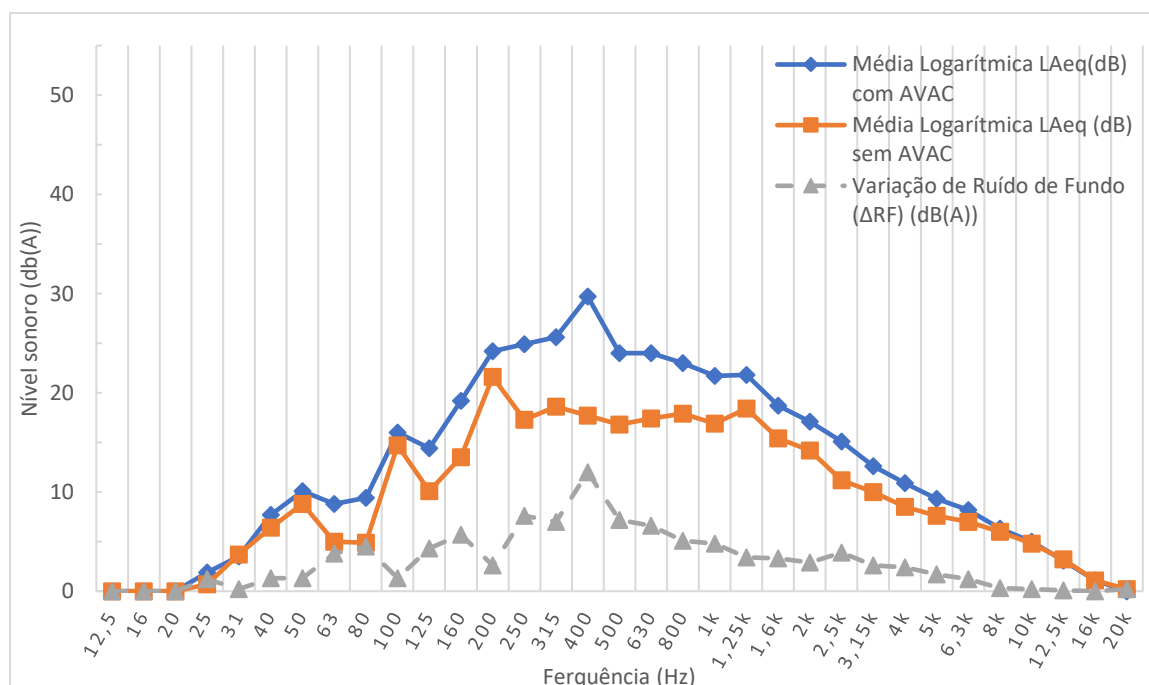


Figura 5.16 - Comparação entre os valores médios do nível de pressão sonora com filtro A do ruído de fundo (RF), em bandas de frequência de 1/3 de oitava com e sem o AVAC ligado e a respectiva variação dos níveis de pressão, do Theatro Circo.

5.2.2. AVALIAÇÃO DA LEGISLAÇÃO PORTUGUESA

Uma vez que o parâmetro L_{RF} é um valor regulamentado na legislação portuguesa (RRAE) é necessário avaliar se este está em conformidade. Para tal é necessário utilizar o nível sonoro médio equivalente e adicionar-lhe o fator de incerteza que no caso do ruído de fundo é -3 dB(A). Assim como se pode ver no Quadro 5.13 foi obtido um valor regulamentar de 32,1 dB(A) quando o AVAC está em funcionamento. Quando não está, foi obtido um valor de 26,1 dB(A).

Tendo em conta o tipo de utilização da sala a legislação implica que o valor não seja superior a 30 dB(A) o que acontece quando o sistema de insuflação está desligado. Porém quando o sistema está em funcionamento o valor ultrapassa o limite regulamentar.

Quadro 5.13 Avaliação regulamentar (RRAE) do nível sonoro contínuo equivalente do Theatro Circo

Tipo de Utilização	AVAC	L_{Aeq} (dB) medido	Fator de incerteza dB(A)	L_{Aeq} medido + fator de incerteza (I) (dB)	RRAE L_{Aeq} (dB)	Avaliação
Recintos de espetáculos (exceto cinema)	Ligado	35,1	- 3	32,1	≤ 30	KO
	Desligado	29,1	- 3	26,1	≤ 30	OK
Cinema	Ligado	35,1	- 3	32,1	≤ 38	OK
	Desligado	29,1	- 3	26,1	≤ 38	OK

5.2.3. CURVAS DE INCOMODIDADE NC E NR

Como mencionado no capítulo 2.5.3.2 as curvas de incomodidade permitem avaliar o incómodo do ruído de fundo causado pelos equipamentos da sala, do ruído com o sistema de ventilação ligado e desligado.

Ao calcular as curvas NC e de NR quando o sistema de ventilação não está em funcionamento foram obtidos os valores de 21 e 23 respetivamente o que se encontra adequados para teatro e música. Ao contrário do que acontece com o AVAC desligado, quando este está ligado as curvas ultrapassam ligeiramente os valores máximos recomendados o que significa que o sistema provoca algum incómodo para a utilização do espaço.

Como forma de verificar o elevado impacto do AVAC nas curvas de incomodidade foi também realizada a diferença entre as curvas com e sem o funcionamento do sistema (Quadro 5.14) podendo verificar que na curva de NC existe um aumento de 10 enquanto que na curva de NR há um aumento de 9 o que em ambos os casos é algo considerável sendo um aumento de quase 50%.

Quadro 5.14 - Valores calculados de NC e NR com e sem o funcionamento do AVAC e a sua variação, comparativamente com os valores máximos recomendados [1]

	NC	NR	Valores Máximos recomendados (Teatro e música)
Com AVAC	31	32	22 a 30
Sem AVAC	21	23	20 a 30
Variação (Δ com AVAC)	+ 10	+ 9	

5.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

5.3.1. AVALIAÇÃO DAS MEDIÇÕES

Como mencionada no capítulo 2.4.1 o tempo de reverberação pretende avaliar o tempo que demora ao som diminuir em 60 dB, porém devido à potência da fonte sonora existente no presente trabalho e ao ruído ambiente foi medido o tempo para uma diminuição de 30 dB (T30). É de notar que as medições deste parâmetro foram realizadas com a sala vazia.

No Quadro 5.15 estão os valores de obtidos na medição para as bandas de frequência de 1/10itava entre 125 e os 4000 Hz assim como os valores calculados posteriormente da média entre as frequências de 500 e 1000 Hz (TR [500,1k Hz]), da média do tempo de reverberação em cada ponto para cada banda de frequência de 1/1 oitava e ainda o desvio padrão. Ao analisar os desvios padrão é possível perceber que a diferença entre os diferentes pontos é pequena exceto para as frequências de 125 e 250 Hz. O maior tempo de reverberação acontece no ponto 1 para a banda de frequências de 125 Hz enquanto que o menor acontece no ponto 13 para a gama de frequências de 4000 Hz. Ao analisar o TR [500,1k Hz] é possível ver que o ponto com o menor tempo é o ponto 12 enquanto que o que tem o maior tempo é o ponto 8. De igual forma no Quadro 5.16 são apresentados os valores em 1/3 de oitava.

Através das Figuras 5.17 e 5.18 é possível verificar que em geral o tempo de reverberação diminui ligeiramente à medida que a frequência aumenta.

Quadro 5.15 - Valores do Tempo de reverberação (T30) em bandas de 1/1 de oitava de 125 a 4.000 Hz para os pontos (P1, P3, P6, P8, P9, P10, P12, P13, P15 e P16) obtidos no Theatro Circo, juntamente com a média e desvio padrão com AVAC ligado (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Tempo de Reverberação (T30) (s)							TR
Ponto	Frequência (Hz)						[500,1k
	125	250	500	1k	2k	4k	Hz]
P1	1,94 (+)	1,34	1,14	1,20	1,13	0,99	1,17
P3	1,55	1,36	1,13	1,23	1,26	0,95	1,18
P6	1,46	1,22	1,22	1,32 (+)	1,16	1,01	1,27 (+)
P8	1,40	1,09	1,20	1,16	1,12	1,17 (+)	1,18
P9	1,35	1,26	1,15	1,23	1,29 (+)	0,95	1,19
P10	1,20 (-)	1,39 (+)	1,19	1,17	1,16	0,90	1,18
P12	1,46	0,98 (-)	1,00 (-)	1,05	1,09	0,89	1,03 (-)
P13	1,42	1,25	1,13	1,04 (-)	1,03 (-)	0,83 (-)	1,09
P15	1,44	1,19	1,29 (+)	1,12	1,04	0,91	1,21
P16	1,55	1,31	1,25	1,27	1,09	0,90	1,26
Média	1,48	1,24	1,17	1,18	1,14	0,95	1,18
Δ, TR (s)	0,75	0,41	0,29	0,28	0,27	0,35	0,24
Desvio Padrão	0,18	0,12	0,08	0,09	0,08	0,09	0,07

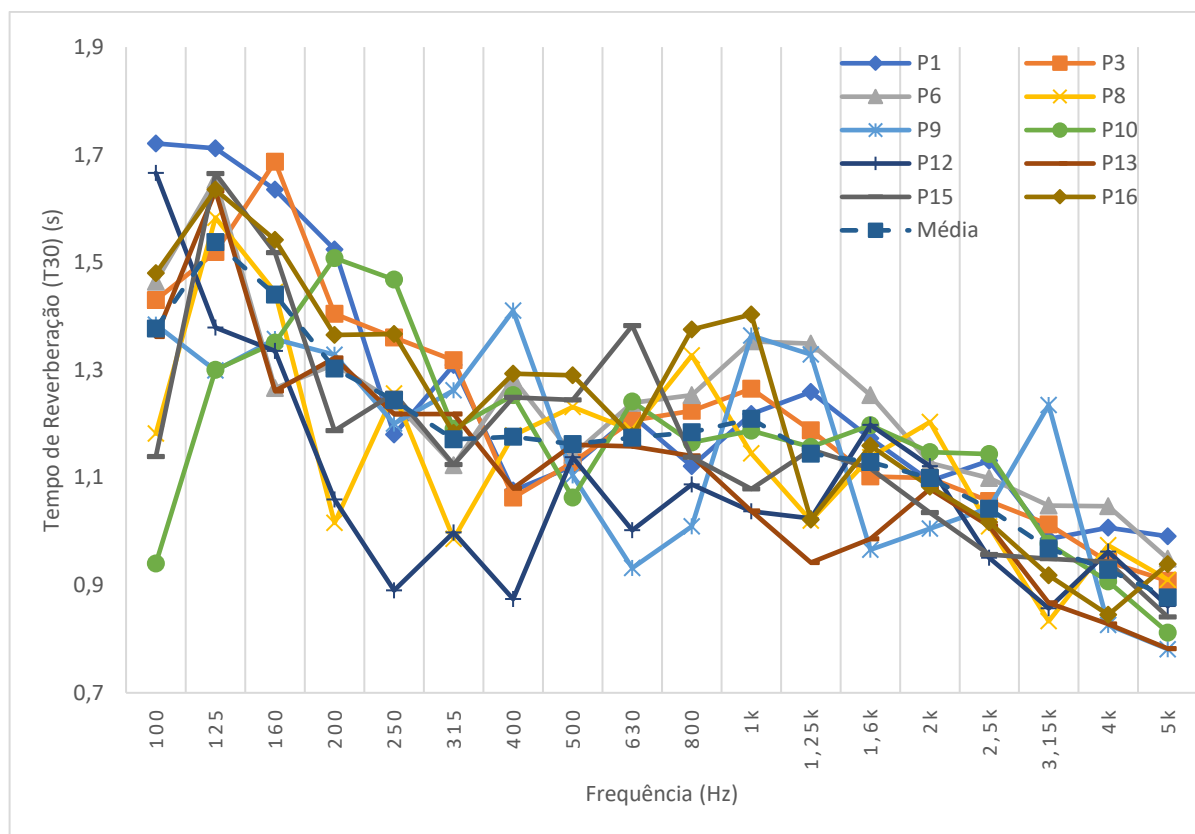


Figura 5.17 – Valores do Tempo de reverberação para os quatorze pontos medidos (P1, P3, P6, P8, P9, P10, P12, P13, P15 e P16) em bandas de frequência de 1/3 de oitava com o AVAC ligado, no Theatro Circo.

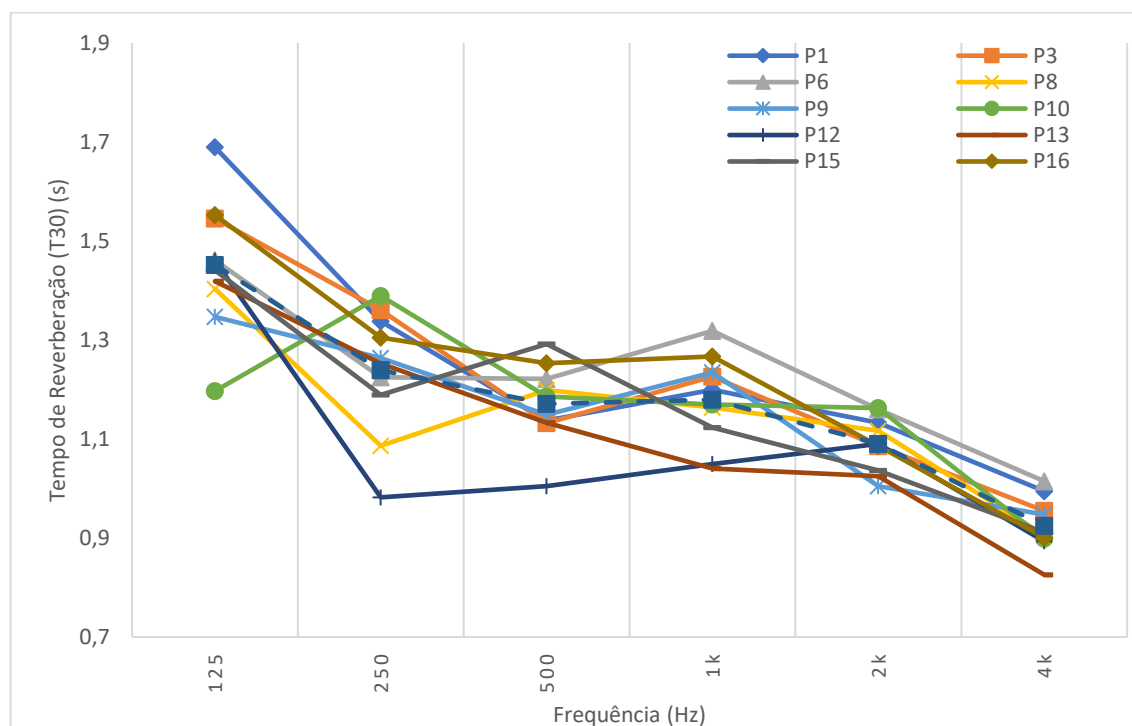


Figura 5.18 – Valores do Tempo de reverberação (T_{30}) para os quatorze pontos medidos (P1, P3, P6, P8, P9, P10, P12, P13, P15 e P16) em bandas de frequência de 1/1 de oitava com o AVAC ligado, no Theatro Circo.

Quadro 5.16 - Valores do Tempo de reverberação (T30) em bandas de 1/3 de oitava de 100 a 5000 Hz para os pontos (P1, P3, P6, P8, P9, P10, P12, P13, P15 e P16) obtidos no Theatro Circo, juntamente com a média e desvio padrão com AVAC ligado.

Tempo de Reverberação (T30) (s)									
Ponto	Frequência (Hz)								
	100	125	160	200	250	315	400	500	630
P1	1,72	1,71	1,64	1,52	1,18	1,31	1,08	1,12	1,22
P3	1,43	1,52	1,69	1,40	1,36	1,32	1,06	1,13	1,21
P6	1,46	1,65	1,27	1,31	1,24	1,12	1,28	1,14	1,24
P8	1,18	1,58	1,45	1,02	1,26	0,99	1,18	1,23	1,19
P9	1,38	1,30	1,36	1,33	1,20	1,26	1,41	1,10	0,93
P10	0,94	1,30	1,35	1,51	1,47	1,19	1,25	1,06	1,24
P12	1,67	1,38	1,34	1,06	0,89	1,00	0,87	1,14	1,00
P13	1,36	1,63	1,26	1,32	1,22	1,22	1,08	1,16	1,16
P15	1,14	1,67	1,52	1,19	1,26	1,12	1,25	1,24	1,38
P16	1,48	1,64	1,54	1,37	1,37	1,18	1,29	1,29	1,18
Média	1,38	1,54	1,44	1,30	1,24	1,17	1,18	1,16	1,17
Δ , TR (s)	0,78	0,41	0,43	0,51	0,58	0,33	0,54	0,23	0,45
Desvio Padrão	0,23	0,15	0,14	0,16	0,15	0,11	0,15	0,07	0,12
Tempo de Reverberação (T30) (s)									
Ponto	Frequência (Hz)								
	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
P1	1,12	1,22	1,26	1,17	1,09	1,13	0,99	1,01	0,99
P3	1,22	1,27	1,19	1,10	1,10	1,06	1,01	0,94	0,91
P6	1,25	1,35	1,35	1,25	1,13	1,10	1,05	1,05	0,95
P8	1,33	1,15	1,02	1,14	1,20	1,01	0,83	0,97	0,91
P9	1,01	1,36	1,33	0,97	1,01	1,04	1,24	0,83	0,78
P10	1,17	1,19	1,16	1,20	1,15	1,14	0,98	0,91	0,81
P12	1,09	1,04	1,02	1,20	1,12	0,95	0,86	0,96	0,86
P13	1,14	1,04	0,94	0,99	1,08	1,01	0,87	0,83	0,78
P15	1,14	1,08	1,15	1,12	1,04	0,96	0,95	0,94	0,84
P16	1,38	1,40	1,02	1,16	1,08	1,02	0,92	0,85	0,94
Média	1,18	1,21	1,14	1,13	1,10	1,04	0,97	0,93	0,88
Δ , TR (s)	0,37	0,37	0,41	0,29	0,20	0,19	0,40	0,22	0,21
Desvio Padrão	0,11	0,13	0,13	0,09	0,05	0,06	0,11	0,07	0,07

5.3.2. PREVISÃO DA SALA OCUPADA COM PERCENTAGENS DIFERENTES

De forma a obter um resultado do tempo de reverberação da sala que represente a sala em funcionamento da melhor forma possível é importante perceber como é que este vai variar quando a sala tem ocupação. Com a existência de pessoas dentro da sala a absorção sonora vai aumentar o que conduz a uma diminuição do tempo de reverberação. Para realizar esta previsão foi utilizada a estimativa da variação da absorção entre as cadeiras ocupadas e desocupadas, de Beranek [81] para três situações: quando a sala tem 50% de ocupação, 100% e quando apresenta a ocupação típica (710 pessoas que implica 79%).

Para o cálculo da área das cadeiras foi considerada a área total dos assentos e quando possível foi considerada uma faixa de absorção de 0,5 m em torno do perímetro das cadeiras para uma melhor representação da absorção da lateral. Após o cálculo da área de ocupação dos assentos multiplicou-se este pela variação do coeficiente de absorção devido à ocupação, obtendo assim a variação da absorção (Quadro 5.17 e 5.18).

Tendo em conta o volume da sala de 9800 m³ já estimado anteriormente e a fórmula de Sabine ao acrescentar a absorção extra causada pela ocupação foram estimados os tempos de reverberação para as três situações já mencionadas podendo se ver os resultados no Quadro 5.19.

Quadro 5.17 - Parâmetros utilizados para a previsão do Tempo de reverberação com a sala 50% e 100% ocupada do Theatro Circo [81].

Frequência (Hz)		125	250	500	1k	2k	4k
$\alpha_o(\text{cadeira ocupada})$		0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86
$\alpha_v(\text{cadeira vazia})$		0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
$\Delta\alpha$		0,12	0,11	0,12	0,13	0,18	0,24
$\Delta A = \Delta\alpha * S$ (50% ocupado)		28	26	28	30	42	56
$\Delta A = \Delta\alpha * S$ (79% ocupado)		45,00	41,25	45,00	48,75	67,50	90
$\Delta A = \Delta\alpha * S$ (100% ocupado)		56,88	52,14	56,88	61,62	85,32	113,76
Área (m ²)	Ocupação de 100%	Ocupação de 79%	Ocupação de 50%				
Sa (assentos)	474	375	237				

Quadro 5.18 Cálculo da Absorção sonora do Theatro Circo para uma ocupação de 0%.

Frequência (Hz) em bandas de 1/1 oitava	0% Ocupação			
	TR (s)	A sala (m ²)	TR [500, 1k Hz] (s)	TR [500, 1k, 2k Hz] (s)
125	1,48	1060	-	-
250	1,24	1265	-	-
500	1,17	1340	1,18	1,16
1k	1,18	1329		
2k	1,14	1375		
4k	0,95	1651	-	-
Volume (m ³)				
9800				

Quadro 5.19 - Cálculo do Tempo de reverberação estimado para a sala com 50%, 79% e 100% de ocupação nas bandas de 1/1 oitava de 125 a 4.000 Hz do Theatro Circo

Frequência (Hz) em bandas de 1/1 oitava	50% Ocupação			79% Ocupação Típica			100% Ocupação		
	TR (s)	A sala (m²)	TR [500, 1k Hz] (s)	TR (s)	A sala (m²)	TR [500, 1k Hz] (s)	TR (s)	A sala (m²)	TR [500, 1k Hz] (s)
125	1,44	1087	1,15	1,42	1104	1,14	1,40	1116	1,13
250	1,21	1293		1,20	1305		1,19	1316	
500	1,15	1368		1,13	1385		1,12	1397	
1k	1,15	1359		1,14	1377		1,13	1390	
2k	1,11	1418		1,09	1442		1,07	1460	
4k	0,92	1707		0,90	1740		0,89	1764	
Volume									
9800									

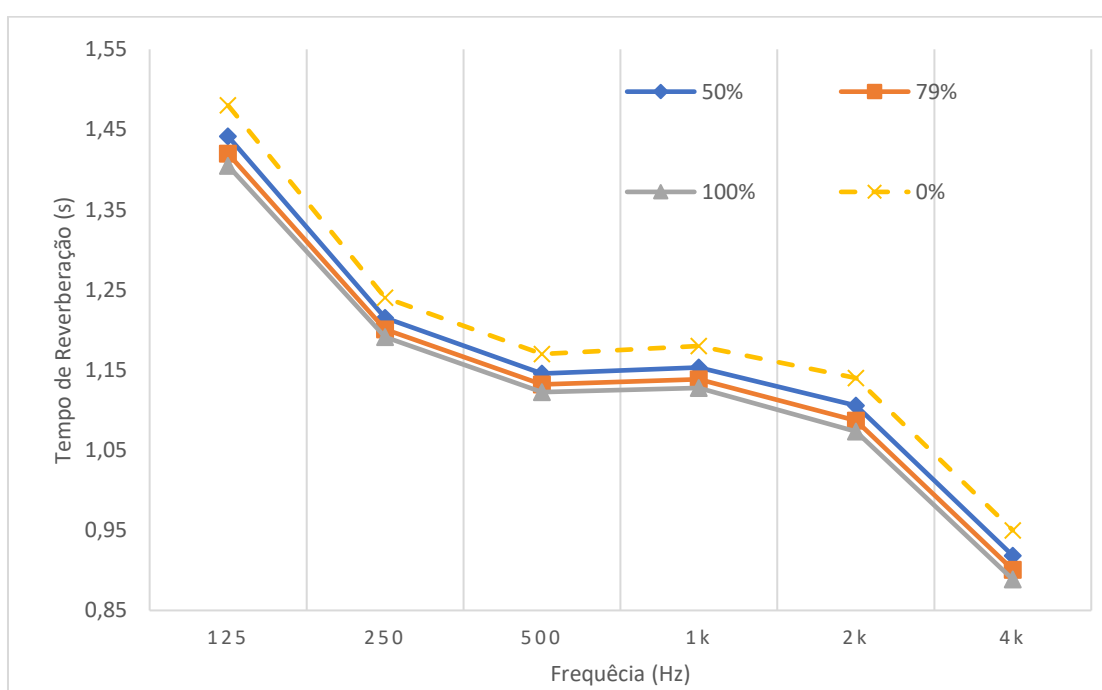


Figura 5.19 - Valores do Tempo de reverberação com a percentagem de ocupação da sala de (0%), (50%) e com (100%) em bandas de 1/1 oitava.

Através da análise do Quadro 5.12 é possível verificar que a ocupação de 50%, 79% e 100% provocam uma diminuição inferior a 0,06 s do tempo de reverberação médio (TR [500, 1k Hz]). Esta diferença não é significativa uma vez que a sala tem um elevado volume e já possui uma absorção sonora elevada sendo o acréscimo da absorção devido à ocupação quase irrelevante. Na Figura 5.19 são apresentadas as curvas dos tempos de reverberação para as bandas de frequência de 1/1 oitava (250 - 4000 Hz) das diferentes percentagens de ocupação.

Nota: a utilização da “fórmula de Sabine” pode não ser a mais correta uma vez que esta é mais aconselhada para salas com um coeficiente de absorção sonora médias inferior a 0,2 porém foi utilizada para se obter uma simulação rudimentar e não talvez os reais valores pois, para tal, a melhor maneira seria a medição do parâmetro com a ocupação real da sala.

5.3.3. AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE COM A LEGISLAÇÃO PORTUGUESA

O parâmetro tempo de reverberação é também regulamentado pela legislação portuguesa (RRAE). O RRAE impõe um valor máximo do tempo de reverberação médio das bandas de frequência de 500, 1k e 2k Hz em função do volume da sala. Outra distinção que é imposta por lei é o tipo de utilização da mesma, o Theatro Circo estando inserido na categoria de auditórios e salas o tempo de reverberação (para a função “palavra”) é limitado superiormente pela equação $0,05V^{1/3}$. É ainda necessário aplicar ao valor médio medido um fator de incerteza de 35%.

No Quadro 5.20 pode-se verificar os cálculos efetuados para a avaliação e assim perceber que após a aplicação do fator de incerteza o regulamentar tempo de reverberação médio da sala é de 0,79 s o que é inferior ao limite imposto de 1,07 s (com uma diferença de 0,28 s).

Quadro 5.20 - Avaliação regulamentar (RRAE) do Tempo de reverberação médio do Theatro Circo

Frequência em bandas de 1/1 oitavas (Hz)	TR medido (s)	TR médio (s)	TR máximo RRAE (s)	Fator incerteza (I)	TR médio com fator Incerteza (I) (s)	Avaliação para "oratória" (RRAE)
500	1,17	1,16	1,07	35%	0,79	OK
1k	1,18					
2k	1,14					

5.3.4. AVALIAÇÃO DE ACORDO COM OS VALORES IDEAIS

A avaliação do tempo de reverberação para entender se este está de acordo com os valores ideais para o tipo de utilização da sala é fundamental para perceber se esta está a ser utilizada para as finalidades que melhor se adequam às suas características. Para tal é comparado o tempo de reverberação aconselhado para a finalidade com o resultado obtido das medições.

No Quadro 5.21 é possível verificar que a sala apesar de não possuir nenhuma função com uma excelente compatibilidade tem uma melhor afinidade para música sinfónica barroca e moderna e para o teatro. Já no outro extremo é possível verificar que o Theatro Circo é totalmente desadequado para eventos de coros gregorianos e desadequado para ópera wagneriana, música romântica e sinfónica. Em suma apesar de não ser o aconselhável para grande parte das utilizações na sua maioria os valores do Theatro Circo são considerados toleráveis.

Quadro 5.21 - Verificação dos valores recomendados para o parâmetro Tempo de reverberação médio de acordo com a função do Theatro Circo [1].

Função	TR [500, 1k Hz] ideal (s)	TR [500, 1.000 Hz] (s)	Avaliação
Auditório (palavra)	0,7 a 0,8	1,2	Mau
Teatro	0,7 a 0,9		Tolerável
Ópera (não wagneriana)	1,3 a 1,7		Tolerável
(wagneriana)	1,8 a 1,9		Mau
Música sinfónica Barroca	1,4 a 1,6		Tolerável
Clássica	1,6 a 1,8		Mau
Romântica	1,9 a 2,2		Mau
Moderna	1,4 a 1,9		Tolerável
Música popular	0,8 a 1,0		Tolerável
Coros gregorianos	3 a 4		Muito mau

5.4. RÁCIO DE BAIXOS

O rácio de baixos baseado no tempo de reverberação (BR_TR), como mencionado no capítulo 2.7.2, é utilizado para comparar os tempos de reverberação das baixas frequências com os das altas. para salas de música e ópera de acordo com Beranek [81] os valores ideais para este parâmetro são entre 1,1 e 1,45. Como se pode ver no Quadro 5.22, onde aparecem os resultados das medições, os valores variam entre 0,8 e 1,2 o que é uma variação considerada um pouco elevada uma vez que nos locais com o rácio acima de 1,0 os graves podem ser reforçados de forma excessiva.

Na Figura 5.20 proporciona uma visualização do equilíbrio que existe entre os vários pontos medidos com a exceção do ponto P9 que tem um valor inferior a 1 enquanto que todos os outros têm valores superiores a 1.

No Quadro 5.22 foi realizada uma avaliação comparativa entre os valores medidos e os valores considerados adequados. Com esta avaliação percebeu-se que o único ponto onde o valor do rácio é considerado mau é o P9 enquanto que nos restantes pontos o valor é sempre pelo menos decente. Os locais com o melhor rácio de baixos são os pontos P3 e P16 com 1,2 o que se encontra próximo do centro do intervalo considerado ideal ($1,1 < BR < 1,45$). Ao analisar a média dos pontos conclui-se que o rácio de baixos apesar de não estar dentro do intervalo recomendado pode-se considerar que é um valor aceitável pois este está muito próximo do limite inferior (0,05). Em suma neste parâmetro a sala possui uma avaliação equilibrada e de acordo com o indicado.

Quadro 5.22 - Valores médios do parâmetro Rácio de Baixos e do Tempo de Reverberação para os pontos P1, P3, P6, P8, P9, P10, P12, P13, P15 e P16, e a respetiva comparação dos valores ideais de Rácio de Baixos baseado no Tempo de reverberação, do Theatro Circo [81].

Ponto (Posição)	Rácio de Baixos (BR)	BR ideais para TR até 1,8 (s)
		$1,1 < BR < 1,45$
P1	1,1	Bom
P3	1,2	Bom
P6	1,0	Tolerável
P8	1,0	Tolerável
P9	0,8	Mau
P10	1,1	Bom
P12	1,1	Bom
P13	1,0	Tolerável
P15	1,0	Tolerável
P16	1,2	Bom
Média	1,05	Tolerável
Desvio padrão	0,11	-
ΔBR	0,4	-

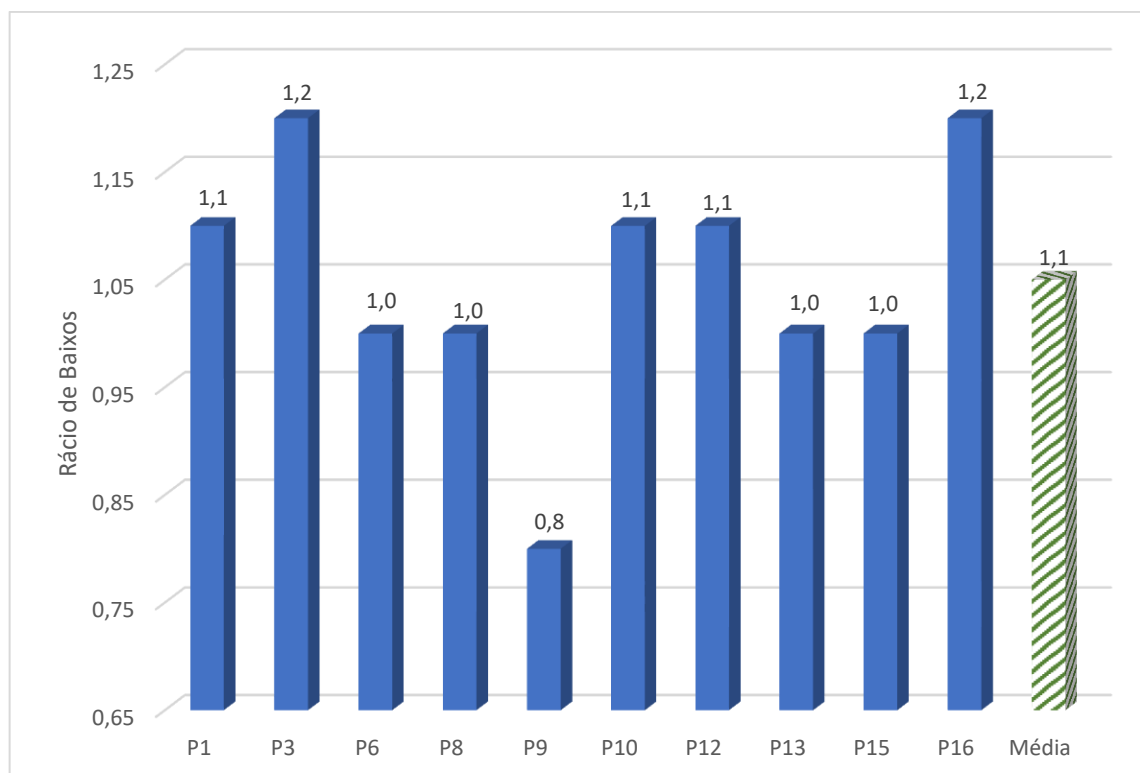


Figura 5.20 Comparação dos valores do parâmetro Rácio de Baixos para os quatorze pontos medidos (P1, P3, P6, P8, P9, P10, P12, P13, P15 e P16) e a média, do Theatro Circo.

5.5. SPEECH TRANSMISSION INDEX (STI)

O parâmetro *Speech Transmission Index* é fundamental uma vez que como já mencionado no capítulo 2.6.2 permite avaliar a inteligibilidade da palavra. Este permite perceber o impacto que o ruído de fundo tem na perceção da palavra. Tratando-se de uma sala onde existem espetáculos que exigem uma boa perceção é então necessário que este parâmetro seja avaliado e que em todos os pontos haja uma boa inteligibilidade. O parâmetro varia entre 0 e 1 sendo o 0 o pior cenário e o 1 o melhor. É de salientar que a medição deste parâmetro foi realizada sem qualquer reforço eletroacústico.

No Quadro 5.23 estão expostos os resultados das medições juntamente com o desvio padrão, média e o desvio máximo com e sem o sistema de AVAC em funcionamento e ainda uma avaliação da inteligibilidade em cada lugar. Tanto na média dos pontos como nos pontos individuais a diferença causada pelo AVAC é bastante reduzida sendo o valor máximo desse aumento igual a 0,04. Isto indica que o sistema não tem impacto significativo na inteligibilidade da palavra.

Outra conclusão que se pode retirar é que em toda a sala a perceção é no mínimo aceitável. O valor médio de todos os pontos quer com e sem AVAC em funcionamento é considerado aceitável. O ponto com a melhor inteligibilidade é o ponto P7 em ambas as situações (com AVAC - 0,67 e sem AVAC - 0,68), já o com pior é o ponto P4 também em ambas as situações (Com AVAC - 0,52 e Sem AVAC - 0,53). O facto do P7 ser no fundo da sala pode ser um dos fatores que justifique uma maior inteligibilidade uma vez que recebe as primeiras reflexões com maior energia e mais cedo em relação aos outros pontos. Pelo contrário o P4 recebe estas reflexões de forma mais tardia e menos intensas o que pode justificar a menor inteligibilidade.

Quadro 5.23 - Valores médios do parâmetro STI para os pontos P1, P2, P4, P5, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16 e P17 (com e sem AVAC), e a respetiva variação entre eles e a respetiva comparação dos valores ideais na inteligibilidade da palavra do Theatro Circo (+, -: maior e menor valor em cada coluna) (Boa (0,60 - 0,75) e Suficiente (0,45 - 0,6)).

Ponto	STI médio com AVAC	STI médio sem AVAC	Δ STI	Inteligibilidade da Palavra
P1	0,62	0,63	0,01	Boa
P2	0,59	0,59	0	Aceitável
P4	0,52 (-)	0,53 (-)	0,01	Aceitável
P5	0,61	0,61	0	Boa
P7	0,67 (+)	0,68 (+)	0,01	Boa
P8	0,62	0,62	0	Boa
P9	0,61	0,64	0,03	Boa
P10	0,54	0,58	0,04	Aceitável
P11	0,55	0,56	0,01	Aceitável
P12	0,58	0,58	0	Boa
P13	0,57	0,57	0	Aceitável
P14	0,59	0,59	0,01	Boa
P15	0,61	0,61	0	Boa
P16	0,59	0,59	0	Aceitável
P17	0,54	0,54	0,01	Aceitável
Média	0,59	0,59	0	Aceitável
Mediana	0,59	0,59	0	
Desvio padrão	0,04	0,04	0	
Δ STI	0,15	0,15	0	

Ao contrário do que seria de esperar o local mais próximo da sala não é o local onde a inteligibilidade é maior, mas sim um local ao fundo da sala (P7). O local de “pior” STI (P4) situa-se sensivelmente a meio da plateia o que confirma a tese de que o facto de receber as reflexões de forma tardia tem impacto negativo na inteligibilidade. Estes resultados tendo em conta que foram realizados sem reforço eletroacústico são positivos pois indicam que a sala está concebida de forma a que a inteligibilidade seja suficiente ou boa sem a necessidade de utilização de sistemas eletroacústicos.

Na Figura 5.21 está presente uma representação visual dos valores médios do STI medidos com o AVAC em funcionamento em cada ponto e ainda a média dos pontos. Nesta pode-se ver que o ponto do camarote P15 apesar de ser mais distante que os restantes pontos situados nos camarotes (P9 a P17) apresenta um valor mais elevado. Este facto pode dever-se ao facto deste receber primeiro e com maior intensidade as primeiras reflexões vindas do teto e da parede do fundo da sala.

Na Figura 5.22 está presente uma representação visual dos valores médios do STI medidos sem o AVAC em funcionamento em cada ponto e ainda a média dos pontos. Nesta pode ver-se que os resultados são ligeiramente superiores aos de com AVAC tendo dois pontos com um aumento maior em comparação com os a ele próximos (P8 e P10).

Com a Figura 5.23, onde tem a comparação dos valores de STI com e sem AVAC e ainda a diferença entre elas, pode-se ver que a diferença imposta pelo AVAC é quase impercetível na grande maioria dos pontos e pode também se verificar que em alguns casos a inteligibilidade é a mesma para quando o sistema de insuflação está em funcionamento.

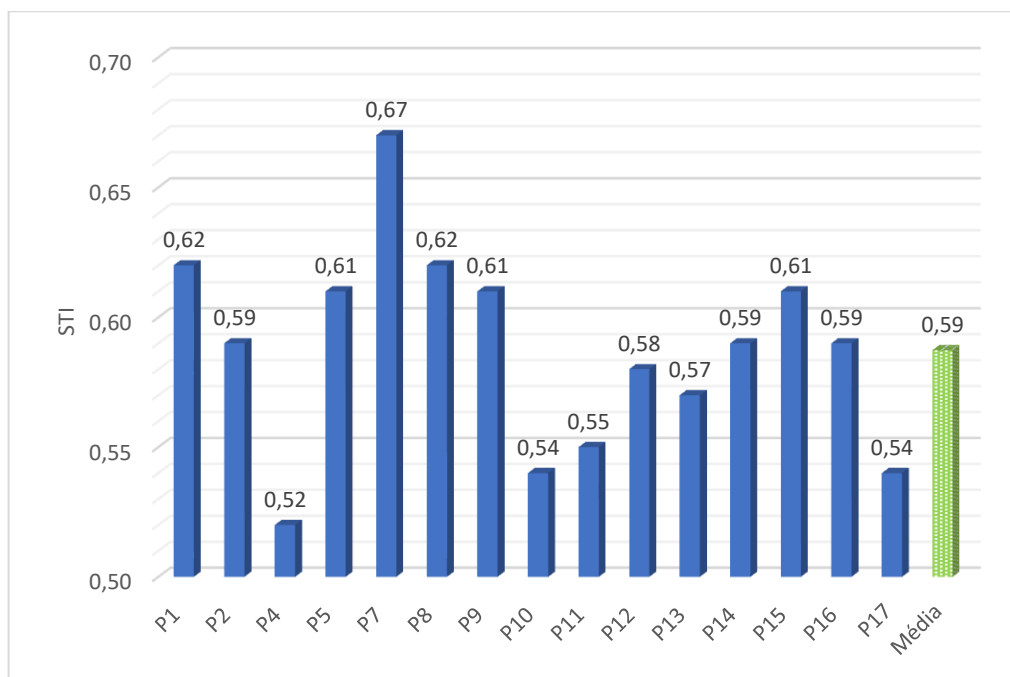


Figura 5.21 - Comparação dos valores do parâmetro STI para os quatorze pontos medidos (P1, P2, P4, P5, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16 e P17) e a média, com AVAC, no Theatro Circo.

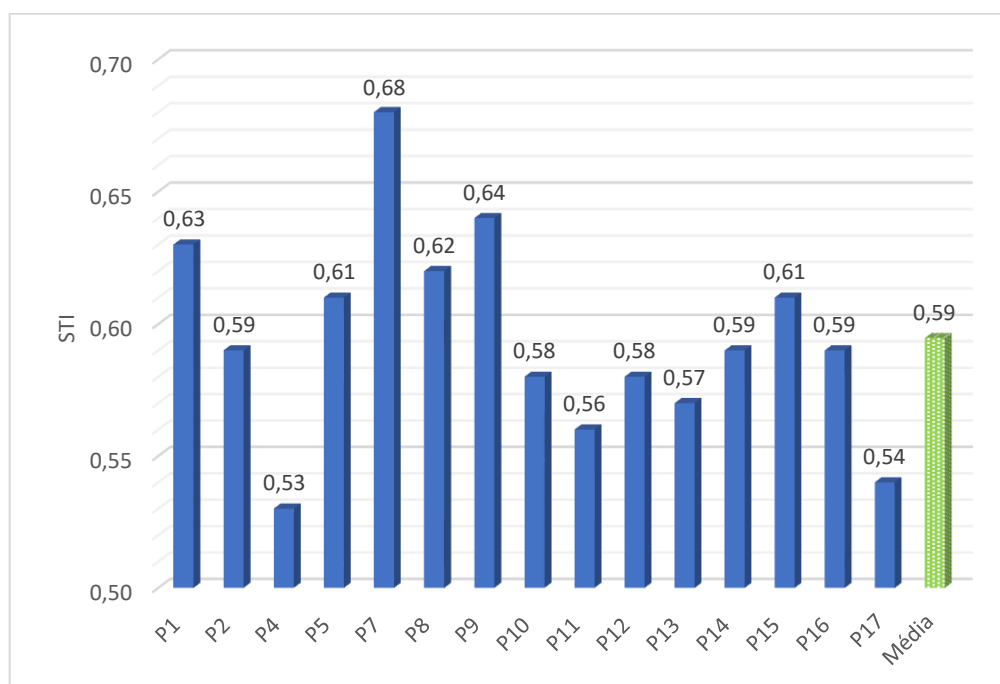


Figura 5.22 - Comparação dos valores do parâmetro STI para os quatorze pontos medidos (P1, P2, P4, P5, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16 e P17) e a média, sem AVAC, no Theatro Circo

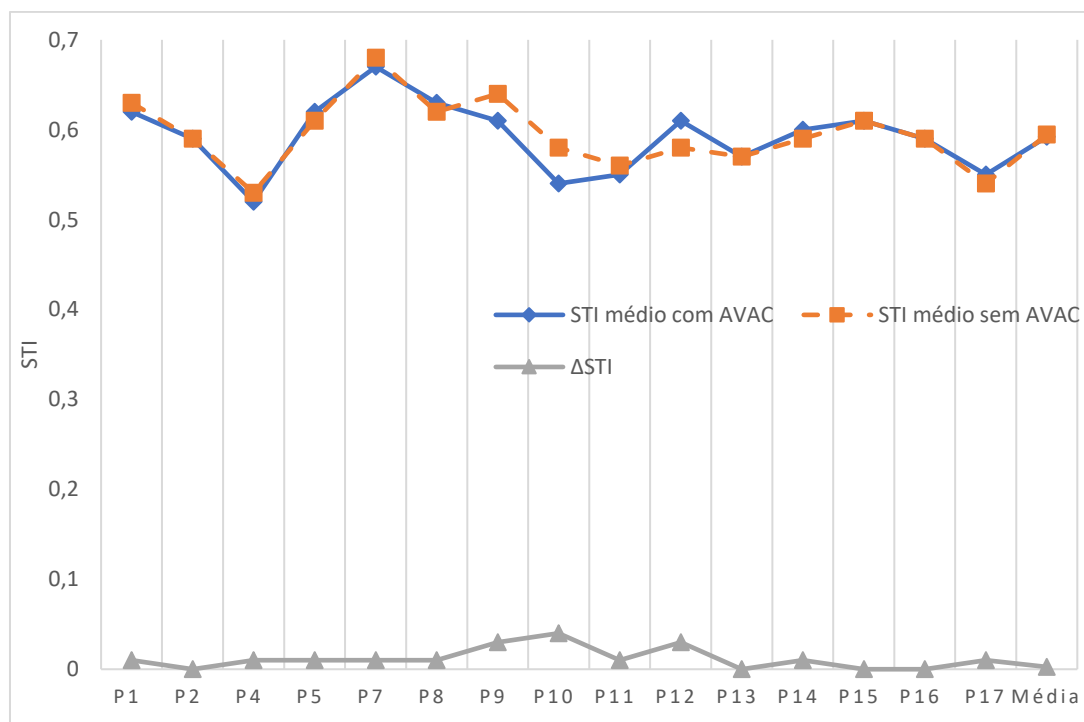


Figura 5.23 - Comparação dos valores do parâmetro STI médio para os pontos P1, P2, P4, P5, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16 e P17 com e sem AVAC e a correspondente variação entre eles no Theatro Circo.

5.6. CLARIDADE (C_{80})

Como mencionado no capítulo 2.7.2 a Claridade (C_{80}) consiste na razão entre a energia recebida através das primeiras reflexões e a energia recebida após. Se o valor for muito elevado indica que a energia recebida primeiro é mais elevada que a posterior o que conduz a uma sobreposição face ao valor da energia recebida pelo som reverberado. Quando o valor é negativo indica que a energia das primeiras reflexões é inferior à energia do som tardio. Para obter uma boa caracterização da sala foram medidos 17 pontos distintos na sala. Este parâmetro é de análise fundamental para salas onde existem espetáculos musicais.

Os Quadros 5.24 e 5.25 expõem os resultados das medições para as bandas de frequências de 125 a 8000 Hz com e sem AVAC respetivamente, juntamente com a média, o desvio padrão, a maior diferença e ainda a média de cada ponto da Claridade nas bandas de 500 e 1k Hz.

Ao analisar os Quadros 5.24 e 5.25 juntamente com as Figuras 5.24 e 5.25 é possível verificar que o local onde a Claridade média é mais reduzida é no ponto P17, em ambos os cenários (com e sem AVAC), o que é justificado pela distância à fonte sonora pois fica no camarote mais elevado e em zona lateral. O local onde é mais elevada é num ponto ao fundo da sala (P7) em ambos os cenários (com e sem AVAC). Isto pode ser justificado pelo facto de o ponto ser numa posição central em relação ao palco e ainda ser próximo das paredes do fundo recebendo as primeiras reflexões com maior energia. Em geral a variação entre os vários pontos é considerável sendo que a frequência de 125 Hz tem o seu desvio padrão máximo de 2,8 dB (sem AVAC) e 3,1 dB (com AVAC).

Quadro 5.24 - Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) (dB) para os pontos P1 a P17 e a respetiva média, mediana e desvio padrão (com AVAC), medidos do Theatro Circo (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto	Frequência (Hz)							C_{80} [500, 1k Hz] (dB)
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
P1	2,64	4,14	6,41	3,81	4,16	6,50	13,14 (+)	5,11
P2	-1,35	3,05	2,78	2,73	1,36	4,30	9,09	2,75
P3	-2,38 (-)	-0,91 (-)	3,69	2,17	1,28	4,84	10,73	2,93
P4	-0,87	-0,61	1,75	2,61	1,55	3,58	9,15	2,18
P5	0,01	1,28	4,47	2,93	3,34	6,51	11,61	3,70
P6	-1,04	0,82	1,69	2,02	1,95	2,77 (-)	8,96	1,86
P7	7,49 (+)	8,95 (+)	9,89 (+)	7,58 (+)	5,77 (+)	8,13 (+)	7,72	8,73 (+)
P8	6,53	1,52	7,09	5,54	4,28	5,47	9,66	6,31
P9	7,87	2,82	3,89	5,27	4,21	4,92	8,31	4,58
P10	0,33	5,89	5,03	2,09	1,22	5,36	9,12	3,56
P11	1,91	3,23	2,29	-0,90 (-)	0,61 (-)	4,78	9,88	0,70
P12	5,20	7,48	7,17	3,33	3,58	5,88	12,89	5,25
P13	2,22	2,96	4,38	-0,14	3,74	4,92	8,32	2,12
P14	1,58	2,03	3,61	1,66	3,25	5,50	8,96	2,64
P15	1,43	4,07	5,33	3,65	5,39	4,62	9,02	4,49
P16	3,28	1,85	2,58	2,69	5,43	4,71	8,52	2,63
P17	1,74	1,44	-0,30 (-)	1,22	2,27	3,49	7,44 (-)	0,46 (-)
Média (dB)	2,15 (-)	2,94	4,22	2,84	3,14	5,07	9,56 (+)	3,53
Mediana (dB)	1,74	2,82	3,89	2,69	3,34	4,92	9,09	2,93
Desvio padrão	3,08	2,61	2,48	2,03	1,63	1,27	1,64	2,08
ΔC_{80} (dB)	9,87	9,86	10,19	8,47	5,16	5,36	5,70	8,27

A banda de frequências onde existe uma maior claridade em todos os pontos com e sem o AVAC em funcionamento é a banda de frequências de 8k Hz enquanto que a com menor é a banda de 125 Hz. Ao analisar o C_{80} [500, 1k Hz] individualmente vê-se que no ponto P7, novamente, aparece a maior Claridade medida que com AVAC quer sem. É de salientar que existem pontos em que para certas bandas de frequência o valor da Claridade é negativo.

Com o auxílio do Quadro 5.26 é possível verificar que o sistema AVAC não causa grande variação no parâmetro em estudo, podendo ver-se que os valores da Claridade são bastante próximos nos dois cenários para todas as bandas de frequência. Pode-se ainda verificar que o sistema de ventilação provocou uma descida na Claridade em quase todas as bandas de frequência com a exceção da banda de 125 Hz. Na Figura 5.26 é possível visualizar a diferença entre a Claridade com e sem AVAC em função da frequência.

Quadro 5.25 Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) (dB) para os pontos P1 a P17 e a respetiva média e desvio padrão (sem AVAC), medidos do Theatro Circo (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto	Frequência (Hz)							C_{80} [500, 1k Hz] (dB)
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
P1	2,13	3,67	5,88	3,40	3,88	6,91	12,69 (+)	4,64
P2	-1,07	3,22	2,55	2,17	1,46	5,28	7,99 (-)	2,36
P3	-1,80 (-)	-0,87 (-)	3,98	2,78	1,81	5,02	10,71	3,38
P4	-0,66	-0,77	2,78	2,70	1,94	3,50	8,67	2,74
P5	0,23	1,04	3,53	2,69	3,13	7,41 (+)	10,64	3,11
P6	-1,08	0,71	1,54	2,19	2,29	3,78	9,16	1,86
P7	6,65	6,26	7,96 (+)	7,03 (+)	7,02 (+)	7,03	11,26	7,49 (+)
P8	5,45	1,26	7,84	5,32	3,66	5,69	10,99	6,58
P9	7,40 (+)	4,18	6,13	4,28	5,77	5,49	10,67	5,21
P10	0,40	7,69 (+)	5,79	1,87	3,40	5,69	9,57	3,83
P11	0,58	5,23	3,47	-0,23 (-)	0,37 (-)	5,84	9,83	1,62
P12	4,70	7,41	4,71	2,67	3,90	5,96	10,40	3,69
P13	0,90	4,22	4,25	1,44	3,47	4,49	9,02	2,84
P14	2,16	3,37	3,52	2,63	2,94	5,40	9,99	3,08
P15	1,54	3,48	5,25	3,75	4,46	4,82	8,34	4,50
P16	3,55	2,41	3,21	3,26	4,47	4,47	8,48	3,24
P17	2,00	0,00	-1,07 (-)	1,76	2,59	2,81 (-)	8,18	0,35 (-)
Média (dB)	1,94 (-)	3,09	4,20	2,92	3,33	5,27	9,80 (+)	3,56
Mediana	1,54 (-)	3,37	3,98	2,69	3,40	5,40	9,83 (+)	3,24
Desvio padrão	2,76 (+)	2,64	2,23	1,61	1,61	1,24 (-)	1,29	1,76
ΔC_{80} (dB)	9,20 (+)	8,57	9,03	7,26	6,65	4,60 (-)	4,70	7,15

Nas Figuras 5.27 e 5.28 onde estão representados os valores da Claridade C_{80} [500, 1k] com e sem AVAC é possível verificar que em ambos os cenários os pontos localizados em posições mais ao fundo da sala (pontos P7 e P8) têm uma maior Claridade. É também possível verificar que a sala tem uma Claridade bastante heterogénea e poucos dos pontos em estudo têm um valor semelhante ao valor da média. Na Figura 5.29 é também possível verificar essa heterogeneidade e ainda perceber o impacto do sistema de ventilação sendo mais notório nos pontos P7 e P12. Uma justificação para tal é a proximidade das grelhas a estes pontos.

No Quadro 5.27 foi realizada uma comparação entre os valores obtidos da Claridade C_{80} [500, 1k Hz] medida e os valores ideais para cada tipo de utilização. Ao analisar esta comparação é possível perceber que a sala possui uma Claridade Boa apenas para a ópera não wagneriana sendo também aceitável para a ópera wagneriana e para a música sinfónica Barroca. Para os restantes tipos de utilização a sala apresenta um valor desadequado.

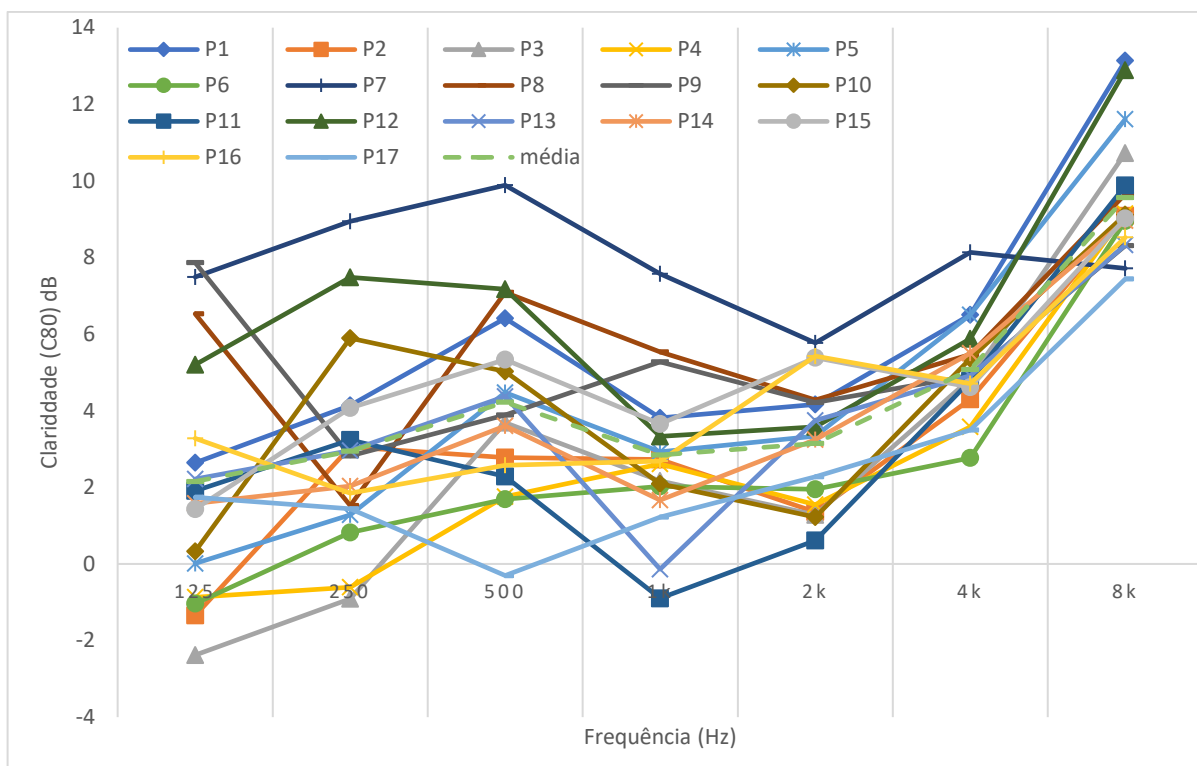


Figura 5.24 - Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava com AVAC, no Theatro Circo.

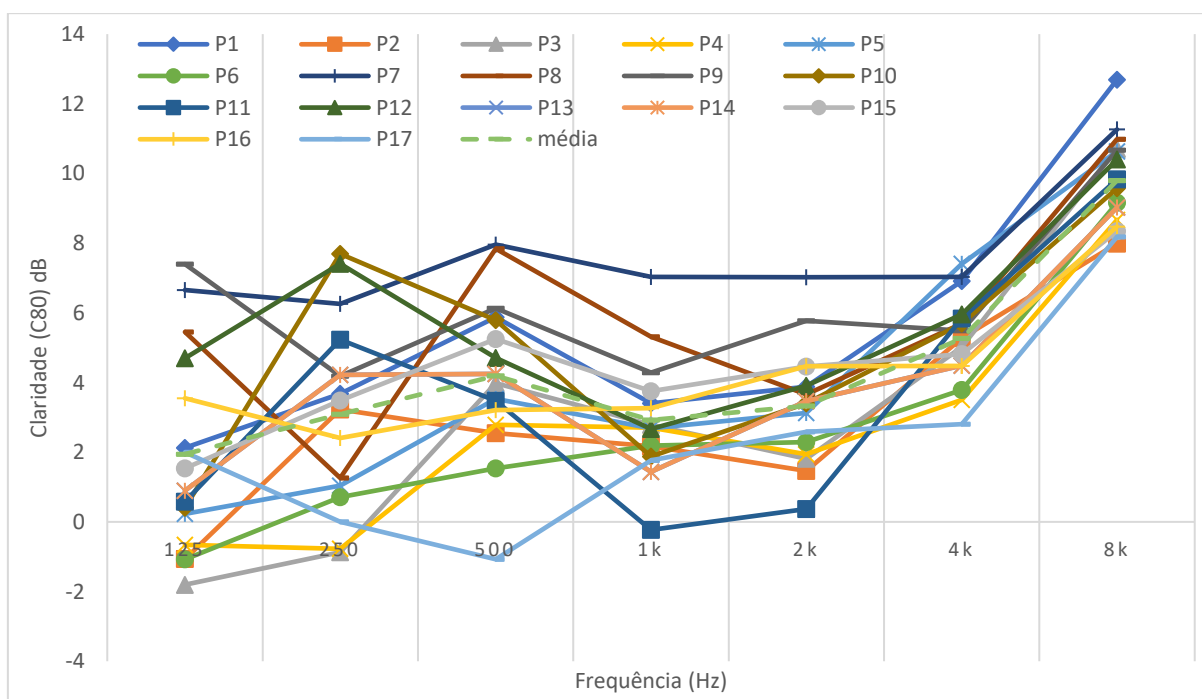


Figura 5.25 - Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava sem AVAC, no Theatro Circo.

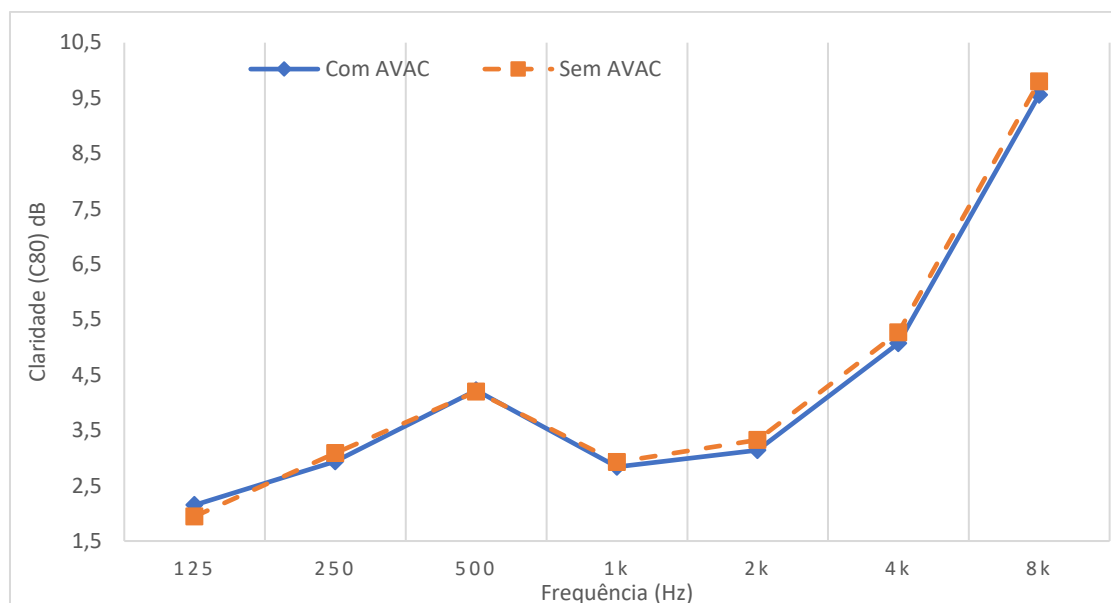


Figura 5.26 - Média dos Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava sem e com AVAC, no Theatro Circo.

Quadro 5.26 - Valores médios do parâmetro Claridade (C_{80}) para os pontos P1 a P17 com e sem AVAC com a variação, no Theatro Circo (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto (Posição)	C_{80} [500, 1k Hz] (dB)		ΔC_{80} (dB) devido ao AVAC
	Com AVAC	Sem AVAC	
P1	5,1	4,6	0,5
P2	2,8	2,4	0,4
P3	2,9	3,4	0,5
P4	2,2	2,7	0,5
P5	3,7	3,1	0,6
P6	1,9	1,9	0 (-)
P7	8,7 (+)	7,5 (+)	1,2
P8	6,3	6,6	0,3
P9	4,6	5,2	0,6
P10	3,6	3,8	0,2
P11	0,7	1,6	0,9
P12	5,3	3,7	1,6 (+)
P13	2,1	2,8	0,7
P14	2,6	3,1	0,5
P15	4,5	4,5	0 (-)
P16	2,6	3,2	0,6
P17	0,5 (-)	0,4 (-)	0,1
Média	3,5	3,6	0,1
Mediana	2,9	3,2	0,5
ΔC_{80}	8,3	7,2	1,1

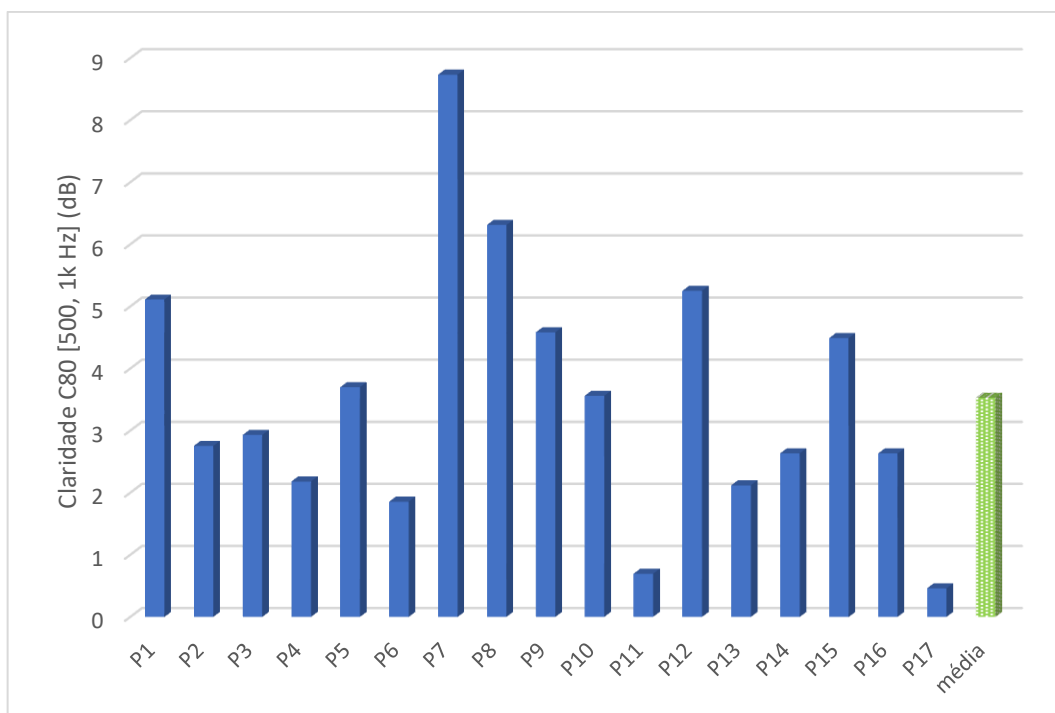


Figura 5.27 - Comparação dos valores do parâmetro Clareza C_{80} [500, 1k Hz] (dB) para os pontos medidos (P1 a P17) e a média com AVAC no Theatro Circo.

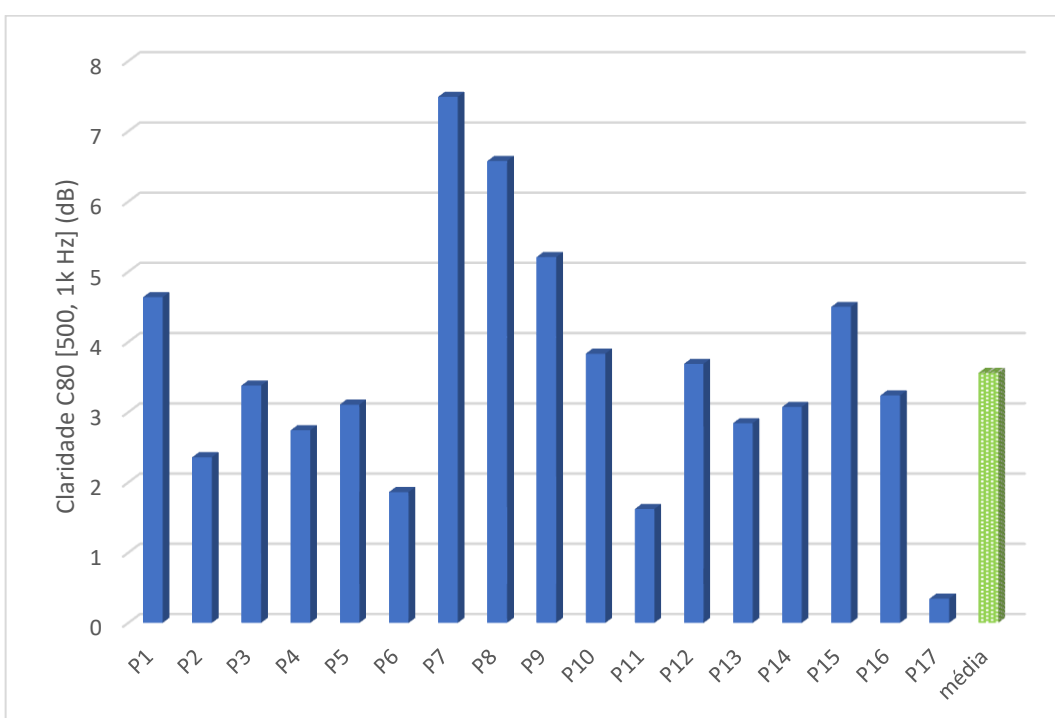


Figura 5.28 - Comparação dos valores do parâmetro Clareza C_{80} [500, 1k Hz] (dB) para os pontos medidos (P1 a P17) e a média com AVAC no Theatro Circo.

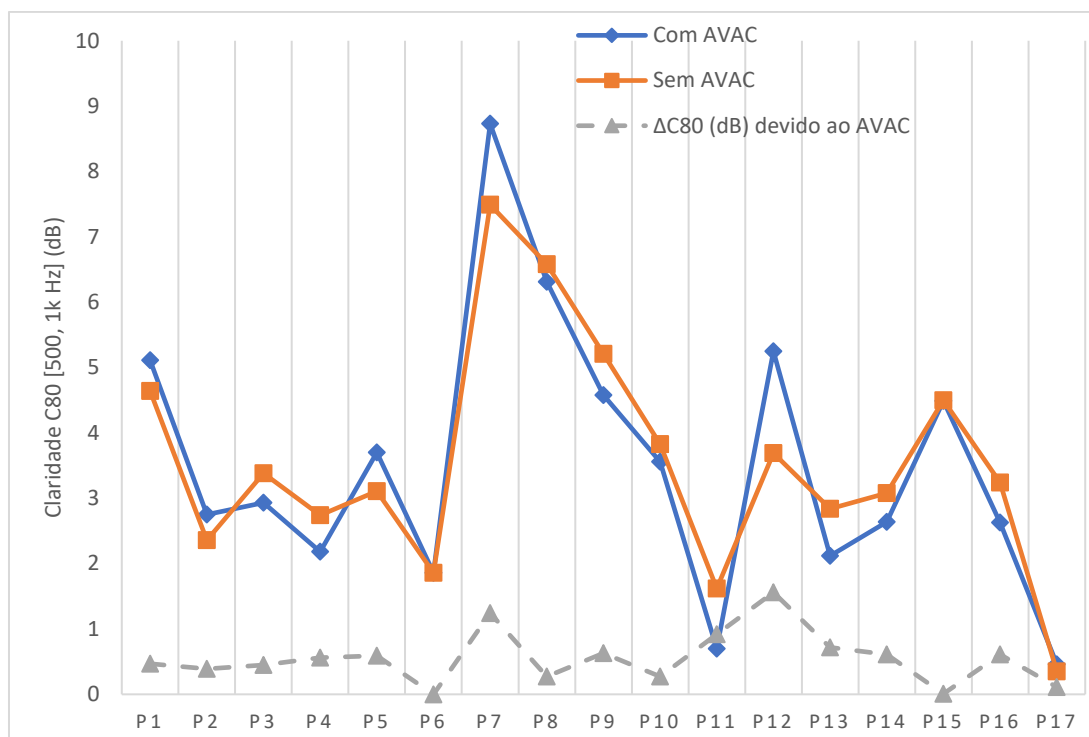


Figura 5.29 - Comparação dos valores médios do parâmetro Claridade C_{80} [500, 1k] para os pontos medidos (P1 a P17) com e sem o AVAC e a correspondente variação no Theatro Circo.

Quadro 5.27 - Avaliação dos valores considerados ideais do parâmetro Claridade (C_{80}) de acordo com a uso do espaço para o Theatro Circo.

Uso	C_{80} [500, 1k Hz] ideal (dB) [1]	C_{80} [500, 1k Hz] medido (dB)		Avaliação
		Com AVAC	Sem AVAC	
Auditório (palavra)	> 6	3,5	3,6	Mau
Teatro	> 6			Mau
Ópera (não wagneriana)	3 a 4			Bom
(wagneriana)	1 a 2			Tolerável
Música sinfónica Barroca	0 a 2			Tolerável
Clássica	-1 a 0			Mau
Romântica	-2 a -1			Mau
Moderna	-1 a 0			Mau
Música popular	> 6			Mau
Coros gregorianos	-3 a -1			Muito mau

5.7. DEFINIÇÃO (D_{50})

A Definição (D_{50}) é outro dos parâmetros mais importante ao analisar salas de espetáculos dedicadas a espetáculos em que é essencial a palavra pois permite avaliar a percepção desta. O parâmetro caracteriza-se pela relação entre a energia recebida nos primeiros 50 ms e a energia total. Este varia entre 0 e 1 sendo o melhor quando o valor é próximo de 1.

No Quadro 5.28 são apresentados os resultados das medições quando o AVAC está em funcionamento, juntamente com a média de todos os pontos para cada banda de frequência (entre 125 e 8k Hz). Foi também calculada a Definição para as frequências médias de 500 e 1k Hz e posteriormente avaliado este valor caracterizando a definição do discurso. Neste é possível verificar que o ponto P7 apresenta para todas as bandas de frequência com a exceção da banda de 125 Hz os valores mais elevados da Definição. Já o ponto P6 apresenta os valores mais inferiores para um maior número de bandas, porém nas bandas centrais o com valores mais reduzidos é o ponto P17 o que é justificado por ser o ponto mais distante da fonte pois situa-se uma zona lateral e no último andar de camarotes. O valor mais elevado da Definição é na banda de frequências dos 8k Hz no ponto P1 e é de 0,90 enquanto que o menor é de 0,12 e surge no ponto P6 para a banda de frequências dos 125 Hz.

Ao avaliar o desvio padrão pode-se verificar que a variação entre os pontos é considerável sendo em quase todas as bandas de frequência superior a 0,1 o que num parâmetro que vai de 0 a 1 equivale a 10%. A avaliação da Definição do discurso permite concluir que a sala quando o AVAC está em funcionamento apresenta uma Definição razoável em todos os pontos da sala sendo os melhores deste os pontos P1, P7 e P8 (pontos mais próximos da parede do fundo da sala). O primeiro recebe o som direto pois está próximo da fonte sonora enquanto que os outros dois recebem o som refletido da parede do fundo reforçando o som direto.

O Quadro 5.29 apresenta os mesmos parâmetros que o Quadro 5.22, porém medidos quando o sistema AVAC desligado. De igual modo ao que acontece quando o AVAC está ligado o ponto onde se regista a melhor Definição é o ponto P7 e o pior o P6. O valor mais elevado foi registado na banda de frequências de 8k Hz no ponto P1 (0,90) e o mais baixo no ponto P6 para a banda de frequências de 125 Hz. Quando sem o AVAC em funcionamento existe mais um ponto com a classificação de Boa definição (ponto P9).

Nas Figuras 5.30 e 5.31 estão representados os valores da Definição dos diferentes pontos para cada banda de frequência de 1/1 oitava entre 125 e os 8k Hz. Nestas é possível confirmar a disparidade entre os valores medidos nos diferentes pontos.

Na Figura 5.32 onde se representou a média da Definição com e sem AVAC é possível verificar que o AVAC em metade das bandas de frequência provoca um aumento da definição apesar do aumento não ser significativo.

Nas Figuras 5.33 e 5.34 estão representados para cada ponto a Definição média das bandas frequência de 500 e 1k Hz, onde se consegue evidenciar a elevada diferença entre o ponto com maior Definição (ponto P7) e o ponto com menor (ponto P17 com AVAC e ponto P6 sem AVAC). É também possível confirmar a elevada discrepância entre os valores das várias posições.

Quadro 5.28 - Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os pontos P1 a P17 e a respetiva média, mediana e desvio padrão (com AVAC), medidos no Theatro Circo (+, -: Maior e menor valor em cada coluna) (Boa (0,67 a 0,86), Razoável (0,39 a 0,67) e Fraca (0,17 a 0,39))

Ponto	Frequência (Hz)							D_{50} [500, 1k Hz]	Definição do discurso [61]
	125	250	500	1k	2k	4k	8k		
P1	0,56	0,65	0,72	0,62	0,60	0,73	0,90 (+)	0,67	Boa
P2	0,39	0,63	0,58	0,55	0,52	0,66	0,80	0,57	Razoável
P3	0,29	0,39	0,61	0,53	0,48	0,67	0,86	0,57	Razoável
P4	0,18	0,39	0,45	0,42	0,41	0,48	0,74	0,44	Razoável
P5	0,41	0,45	0,62	0,56	0,58	0,75	0,88	0,59	Razoável
P6	0,12 (-)	0,30 (-)	0,40	0,33	0,36	0,40 (-)	0,70 (-)	0,37 (-)	Razoável
P7	0,76	0,74	0,81 (+)	0,77 (+)	0,70 (+)	0,77 (+)	0,79	0,79 (+)	Boa
P8	0,49	0,45	0,78	0,67	0,58	0,69	0,82	0,73	Boa
P9	0,77 (+)	0,56	0,60	0,63	0,67	0,66	0,79	0,62	Razoável
P10	0,39	0,75 (+)	0,61	0,41	0,40	0,64	0,79	0,51	Razoável
P11	0,39	0,55	0,50	0,29 (-)	0,35 (-)	0,62	0,82	0,40	Razoável
P12	0,53	0,67	0,65	0,44	0,50	0,67	0,87	0,55	Razoável
P13	0,48	0,50	0,61	0,38	0,53	0,57	0,70 (-)	0,50	Razoável
P14	0,46	0,53	0,53	0,50	0,55	0,67	0,80	0,52	Razoável
P15	0,52	0,52	0,68	0,57	0,63	0,62	0,79	0,62	Razoável
P16	0,58	0,56	0,56	0,50	0,62	0,60	0,73	0,53	Razoável
P17	0,55	0,42	0,31 (-)	0,47	0,49	0,50	0,76	0,39	Razoável
Média	0,48	0,55	0,61	0,53	0,55	0,64	0,80	0,57	
Mediana	0,48	0,53	0,61	0,50	0,53	0,66	0,79	0,55	
Desvio padrão	0,17	0,13	0,13	0,13	0,11	0,10	0,06	0,12	
ΔD_{50}	0,65	0,45	0,50	0,48	0,35	0,37	0,20	0,43	

No Quadro 5.30 e a Figura 5.35 onde estão representadas as médias de todos os pontos da Definição média das bandas frequência de 500 e 1k Hz com e sem AVAC em funcionamento e ainda a diferença entre as duas situações de forma a obter a variação causada pelo sistema. Ao fazer uma breve análise a ambos é possível verificar que o impacto que o sistema de ventilação é relativamente reduzido, existindo várias bandas de frequência onde não há qualquer variação entre as duas situações estudadas.

Quadro 5.29 - Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os pontos P1 a P17 e a respetiva média mediana e desvio padrão (sem AVAC), medidos no Theatro Circo (+, -: Maior e menor valor em cada coluna) (Boa (0,67 a 0,86), Razoável (0,39 a 0,67) e Fraca (0,17 a 0,39)).

Ponto	Frequência							D_{50} [500, 1k Hz]	Definição do discurso [61]
	125	250	500	1k	2k	4k	8k		
P1	0,56	0,65	0,72	0,62	0,60	0,75	0,90 (+)	0,67	Boa
P2	0,40	0,63	0,58	0,55	0,52	0,69	0,80	0,57	Razoável
P3	0,32	0,39	0,64	0,54	0,52	0,67	0,86	0,59	Razoável
P4	0,19	0,39	0,45	0,42	0,42	0,48	0,75	0,44	Razoável
P5	0,42	0,45	0,62	0,56	0,58	0,78 (+)	0,88	0,59	Razoável
P6	0,13 (-)	0,30 (-)	0,40	0,33 (-)	0,36	0,43 (-)	0,70 (-)	0,37 (-)	Razoável
P7	0,76	0,74	0,81 (+)	0,77 (+)	0,75 (+)	0,77	0,89	0,79 (+)	Boa
P8	0,49	0,47	0,80	0,71	0,58	0,70	0,87	0,75	Boa
P9	0,77 (+)	0,66	0,73	0,63	0,74	0,69	0,87	0,68	Boa
P10	0,40	0,76 (+)	0,66	0,36	0,47	0,66	0,81	0,51	Razoável
P11	0,41	0,69	0,55	0,36	0,35 (-)	0,69	0,82	0,46	Razoável
P12	0,55	0,72	0,65	0,44	0,55	0,69	0,87	0,55	Razoável
P13	0,48	0,58	0,61	0,44	0,53	0,61	0,74	0,53	Razoável
P14	0,46	0,58	0,53	0,50	0,54	0,67	0,83	0,52	Razoável
P15	0,52	0,51	0,68	0,59	0,63	0,62	0,79	0,64	Razoável
P16	0,59	0,56	0,60	0,56	0,62	0,61	0,73	0,58	Razoável
P17	0,56	0,42	0,31(-)	0,47	0,49	0,50	0,77	0,39	Razoável
Média	0,48	0,56	0,61	0,53	0,55	0,65	0,82	0,57	
Mediana	0,48	0,58	0,62	0,54	0,54	0,67	0,82	0,56	
Desvio padrão	0,17	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,06	0,12	
ΔD_{50}	0,64	0,46	0,49	0,44	0,39	0,35	0,20	0,42	

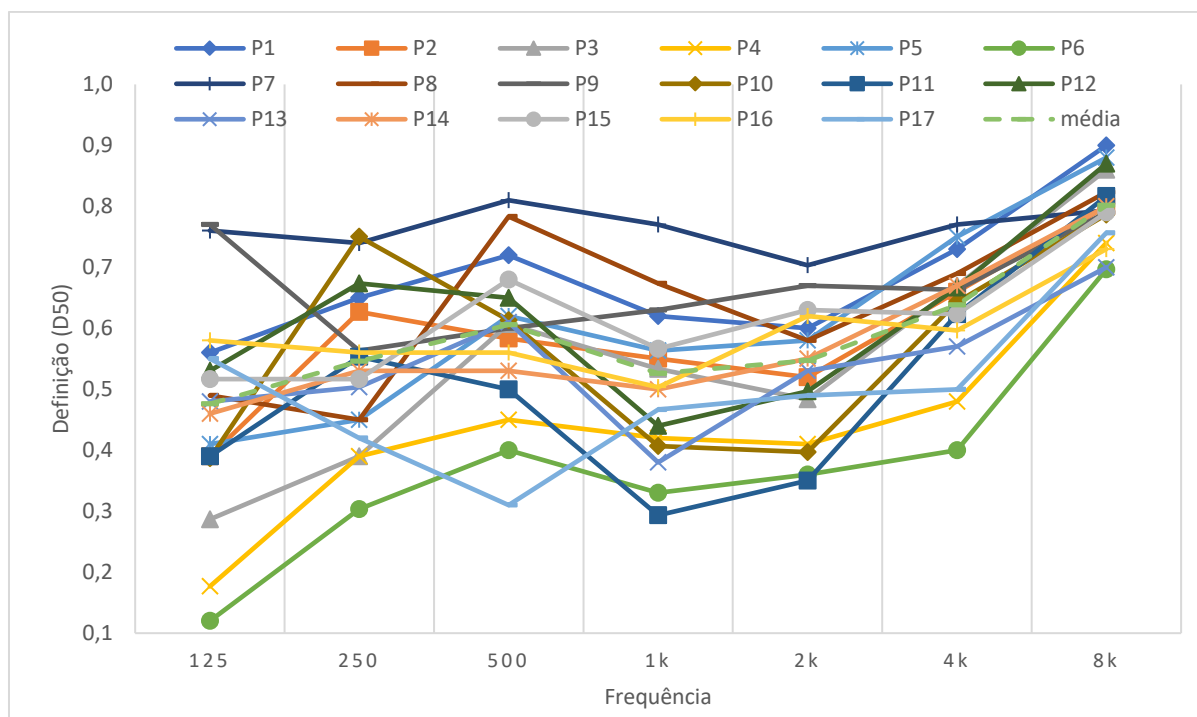


Figura 5.30 - Valores do parâmetro definição (D_{50}) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava com AVAC, no Theatro Circo.

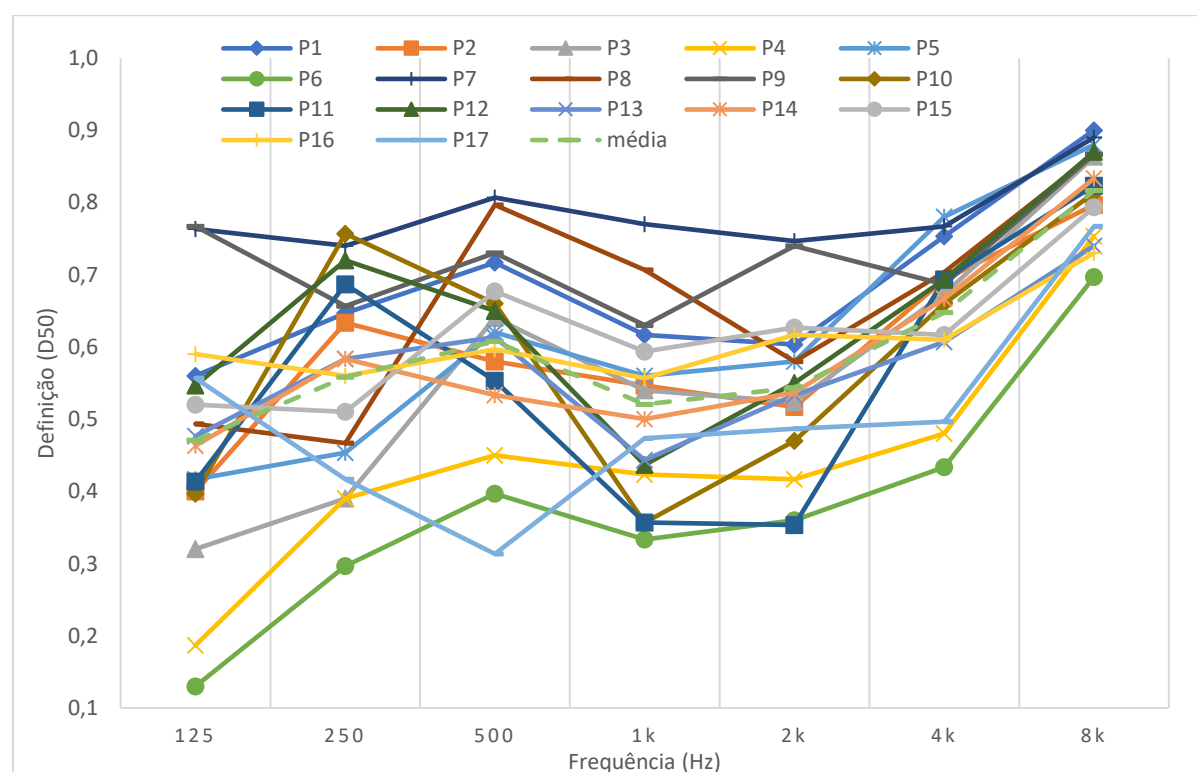


Figura 5.31 - Valores do parâmetro definição (D_{50}) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava sem AVAC, no Theatro Circo.

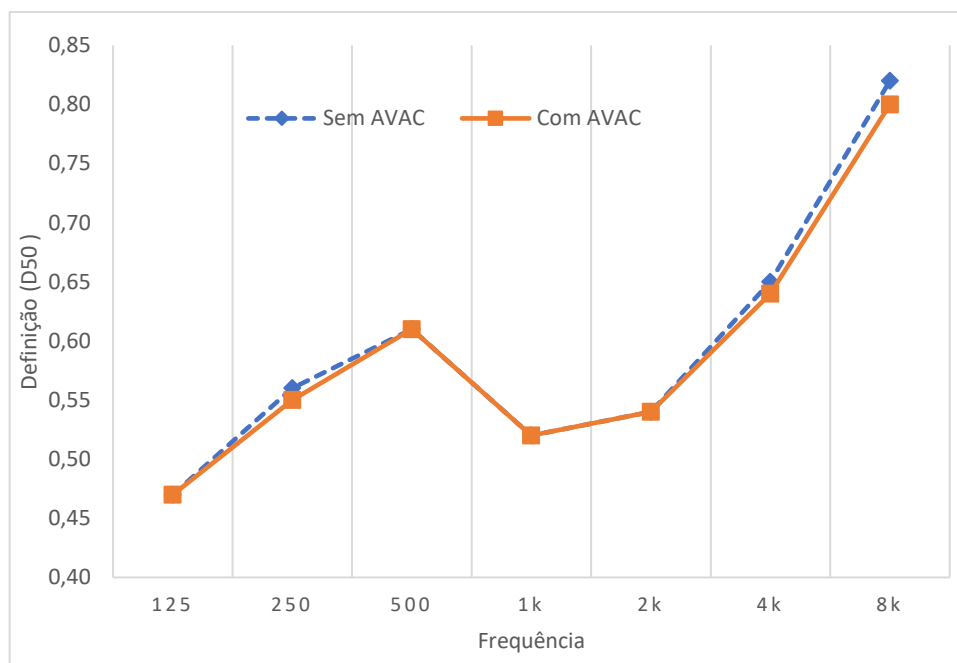


Figura 5.32 – Média dos valores do parâmetro definição (D_{50}) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava com e sem AVAC no Theatro Circo.

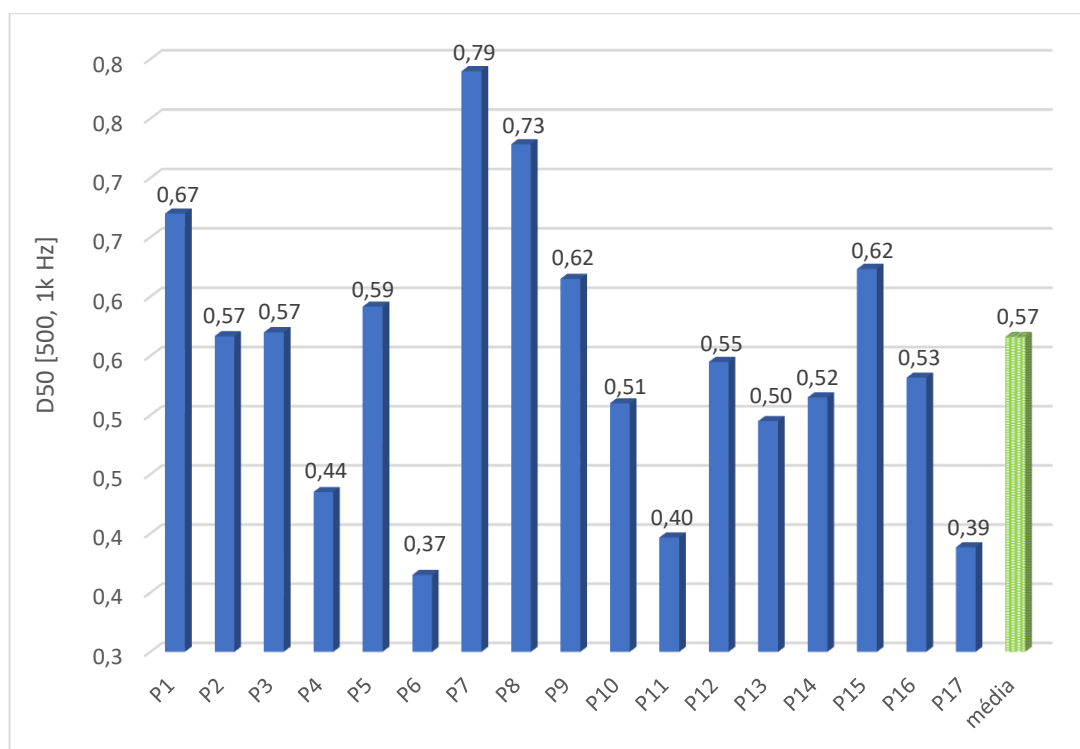


Figura 5.33 - Comparação dos valores do parâmetro Definição (D_{50} [500, 1k Hz]) para os pontos medidos (P1 a P17) e a média com AVAC, no Theatro Circo.

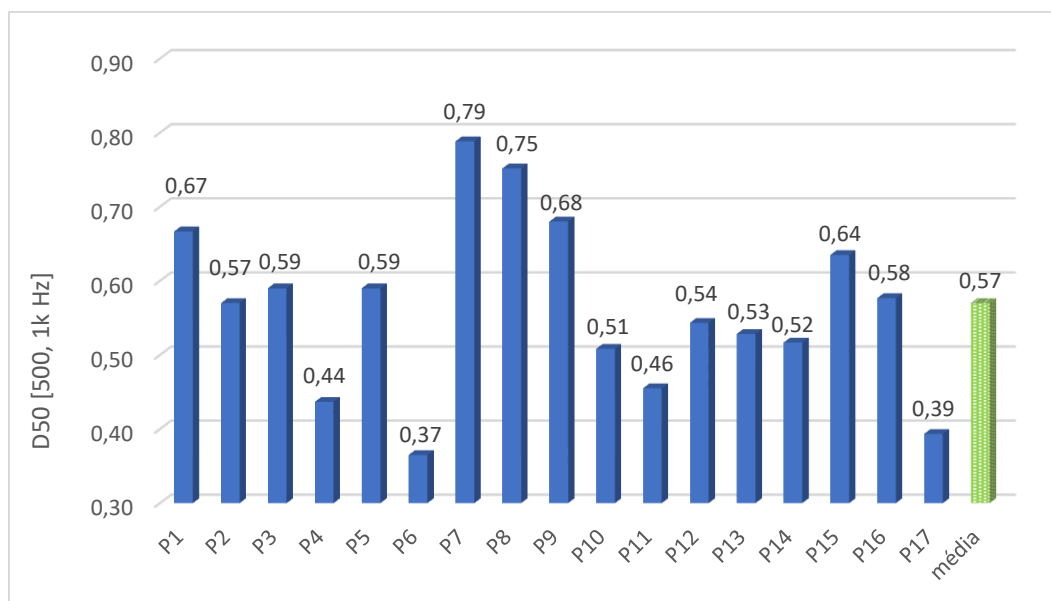


Figura 5.34 - Comparação dos valores do parâmetro Definição (D_{50} [500, 1k Hz]) para os pontos medidos (P1 a P17) e a média sem AVAC, no Theatro Circo.

Quadro 5.30 Valores médios do parâmetro Definição (D_{50} [500, 1k Hz]) para os pontos P1 a P17 com e sem AVAC com a variação, no Theatro Circo (+, -; maior e menor valor em cada coluna).

Ponto	D_{50} [500, 1k Hz]		ΔD_{50}
	Com AVAC	Sem AVAC	
P1	0,67	0,69	0,02
P2	0,56	0,59	0,03
P3	0,59	0,57	0,02
P4	0,44	0,46	0,02
P5	0,59	0,61	0,02
P6	0,37 (-)	0,40 (-)	0,03
P7	0,79 (+)	0,84 (+)	0,05
P8	0,75	0,73	0,02
P9	0,68	0,64	0,04
P10	0,51	0,51	0 (-)
P11	0,46	0,40 (-)	0,06 (+)
P12	0,54	0,59	0,05
P13	0,53	0,52	0,01
P14	0,52	0,53	0,01
P15	0,64	0,63	0,01
P16	0,58	0,53	0,05
P17	0,39	0,39	0 (-)
Média	0,57	0,57	0
Mediana	0,55	0,57	0,03
ΔD_{50}	0,43	0,42	0,01

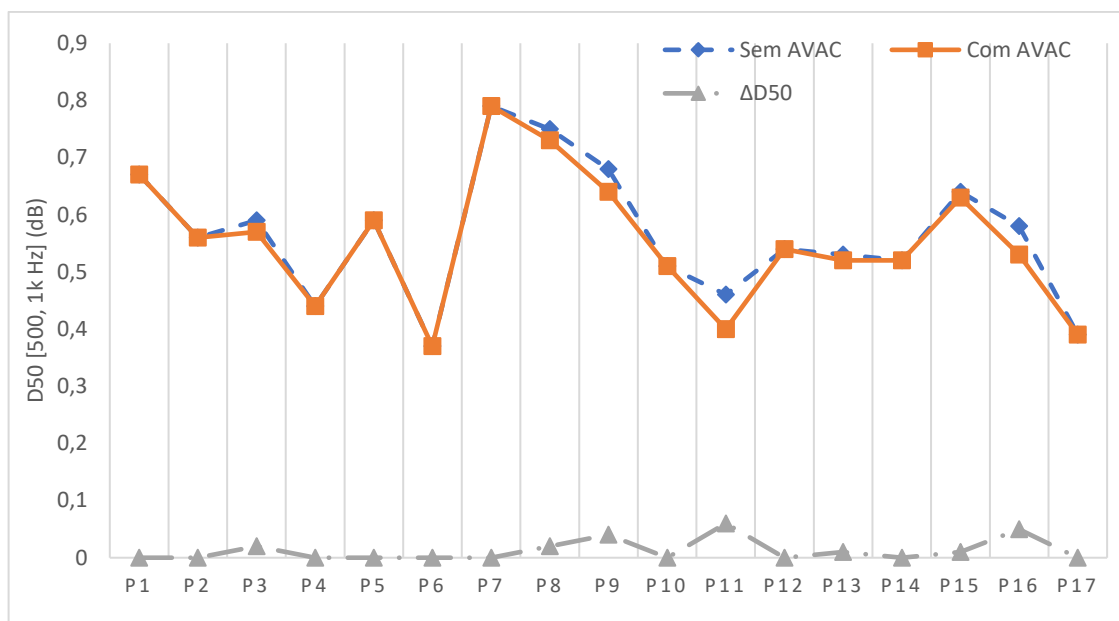


Figura 5.35 - Comparação dos valores médios do parâmetro Definição (D_{50}) para os pontos medidos (P1 a P17) com e sem o AVAC e a correspondente variação no Theatro Circo.

5.8. TEMPO CENTRAL (TS)

O Tempo Central (ts), que consiste no ponto no tempo onde a energia recebida antes é igual à recebida posteriormente e permite avaliar se o ponto recebe as primeiras reflexões com mais intensidade ou a últimas. Quando a maior parte da energia captada pelo ouvido humano é a das primeiras reflexões o ts é mais reduzido e isto traduz-se uma maior nitidez. Em suma para uma sala focada para a palavra o Tempo Central deve ser mais reduzido do que quando é para a música.

No Quadro 5.31 são apresentados os resultados das medições do Tempo Central quando o AVAC está em funcionamento, juntamente com a média de todos os pontos para cada banda de frequência (entre 125 e 8k Hz). Foi também calculado o TS para as frequências médias de 500 e 1k Hz. Analisando os resultados é possível verificar que o ponto P7 apresenta em todas as bandas de frequência, exceto a de 125 e 8k Hz, os valores mais reduzidos de TS o que é justificado pelo facto de este ponto se localizar numa zona central e próxima da parede do fundo assim recebendo primeiro do que os outros pontos as reflexões vindas dessa parede. Através da média de todos os pontos para cada frequência é possível concluir que para a banda frequências de 125 Hz o tempo é bastante superior aos restantes que em geral são valores muito próximos entre si. Existe também o extremo contrário onde a média é um pouco inferior às restantes (banda de frequências de 8k Hz). Analisando o desvio padrão consegue-se verificar que todas as bandas têm uma variação um pouco elevada com a exceção da banda de frequências de 125 Hz sendo superior a 30 ms. O valor máximo de 180 ms surge no ponto P4 para a banda de frequências de 125 e o mínimo surge no ponto 1 para a banda de frequências de 8k Hz (ponto mais próximo da fonte sonora).

No Quadro 5.32 são apresentados os resultados das medições do Tempo Central quando o AVAC não está em funcionamento, juntamente com a média de todos os pontos para cada banda de frequência (entre 125 e 8k Hz). Foi também calculado o TS para as frequências médias de 500 e 1k Hz. Os resultados obtidos são muito semelhantes a quando o AVAC está em funcionamento sendo novamente o ponto P7 com os valores mais reduzidos. O TS médio das gamas de frequência de 500

e 1k Hz são em todos os pontos inferior a 100 ms exceto no ponto P17 que se localiza no último andar de camarotes e numa zona mais lateral ao palco.

Nas Figuras 5.36 e 5.37 onde estão representados os valores do Tempo Central em cada ponto para as bandas de frequência de 1/1 oitava de 125 a 8k Hz com e sem AVAC respetivamente. Ao analisar ambas pode-se ver que existe uma dispersão do valor entre os vários pontos, verificando-se novamente a maior dispersão para a banda de frequências de 125 Hz.

A Figura 5.38 representa a diferença entre a média do Tempo Central com e sem AVAC respetivamente. Nesta figura é possível verificar que o sistema tem um impacto que pode-se considerar quase nulo. Nas Figuras 5.39 e 5.40 está representado o TS médio para as bandas de frequências médias (500 e 1k Hz) em cada ponto assim como a média de todos os pontos com e sem AVAC. Ao analisar os valores é possível verificar dois pontos com valores muito inferiores aos restantes (pontos P7 e P8) com uma diferença, em ambos os cenários, superior a 20 ms para o ponto P8 e superior a 30 ms no caso do ponto P7.

Quadro 5.31 - Valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os pontos (P1 a P17) medidos e a respetiva média, mediana e desvio padrão com AVAC, do Theatro Circo (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto	Frequência (Hz)							TS [500, 1k Hz] (ms)
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
P1	125	76	52	69	62	44	17 (-)	60
P2	144	82	78	75	80	51	29	77
P3	170	106	70	86	84	57	23	78
P4	180 (+)	118 (+)	93	85	88	73	34	89
P5	125	96	62	71	65	43	19	67
P6	152	117	89	92	89	80 (+)	37	90
P7	68	49 (-)	32 (-)	47 (-)	55 (-)	36 (-)	21	39 (-)
P8	86	115	49	60	68	55	27	54
P9	66 (-)	89	77	62	68	60	34	69
P10	150	62	69	92	94	54	29	81
P11	107	84	79	113 (+)	95 (+)	54	26	96
P12	91	63	65	84	79	56	20	75
P13	100	90	67	104	73	58	33	85
P14	116	82	75	84	72	46	27	80
P15	102	84	66	76	60	65	34	71
P16	106	92	82	76	59	61	37 (+)	79
P17	97	95	108 (+)	88	82	71	32	98 (+)
Média	117	88	71	80	75	57	28	76
Mediana	107	89	70	84	73	56	29	78
Desvio padrão	33	19	18	16	13	11	6	15
Δ TS (ms)	113	69	76	66	40	44	20	59

Quadro 5.32 - Valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os pontos (P1 a P17) medidos e a respetiva média, mediana e desvio padrão sem AVAC, do Theatro Circo (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto	Frequência (Hz)							TS [500, 1k Hz] (ms)
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
P1	134	78	55	70	65	40	17 (-)	63
P2	142	81	80	79	81	49	29	80
P3	164	107	66	83	78	54	22	74
P4	174 (+)	121 (+)	87	83	91	74	35	85
P5	123	98	69	75	70	38 (-)	20	72
P6	152	116	89	89	88	76 (+)	36	89
P7	75	61	42 (-)	45 (-)	46 (-)	41	21	43 (-)
P8	98	113	42	59	71	54	23	51
P9	74 (-)	81	62	71	52	55	23	66
P10	117	53 (-)	65	95	80	50	28	80
P11	130	66	74	105 (+)	100 (+)	46	25	90
P12	87	55	72	89	77	53	21	81
P13	121	81	72	93	73	60	31	82
P14	120	76	73	79	76	49	22	76
P15	103	89	67	73	64	65	37	70
P16	102	86	77	75	64	60	38 (+)	76
P17	97	106	114 (+)	87	79	73	30	101 (+)
Média	118	86	71	79	74	55	27	75
Mediana	120	81	72	79	76	54	25	76
Desvio padrão	29	21	17	14	13	12	6	14
Δ TS (ms)	100	68	73	61	54	38	21	58

No Quadro 5.33 e na Figura 5.41 representa-se os valores da média do TS para as bandas de frequências médias (500 e 1k Hz) com e sem AVAC e faz-se a diferença entre eles de forma a perceber qual o impacto que o AVAC tem no valor chegando-se à conclusão que é bastante reduzido uma vez que não ultrapassa os 5 ms que acontece no ponto P5.

Em suma, tendo em conta o que referido o capítulo 2.7.2 tanto com AVAC como sem AVAC a sala apresenta valores de tempo central mais indicados para a palavra. O valor recomendado para tal uso é que seja inferior a 80 ms e ao analisar a média do TS médio para as bandas de frequências médias (500 e 1k Hz) com e sem AVAC percebe-se que em ambos está de acordo com o parâmetro (com AVAC 76 ms e sem AVAC 75 ms).

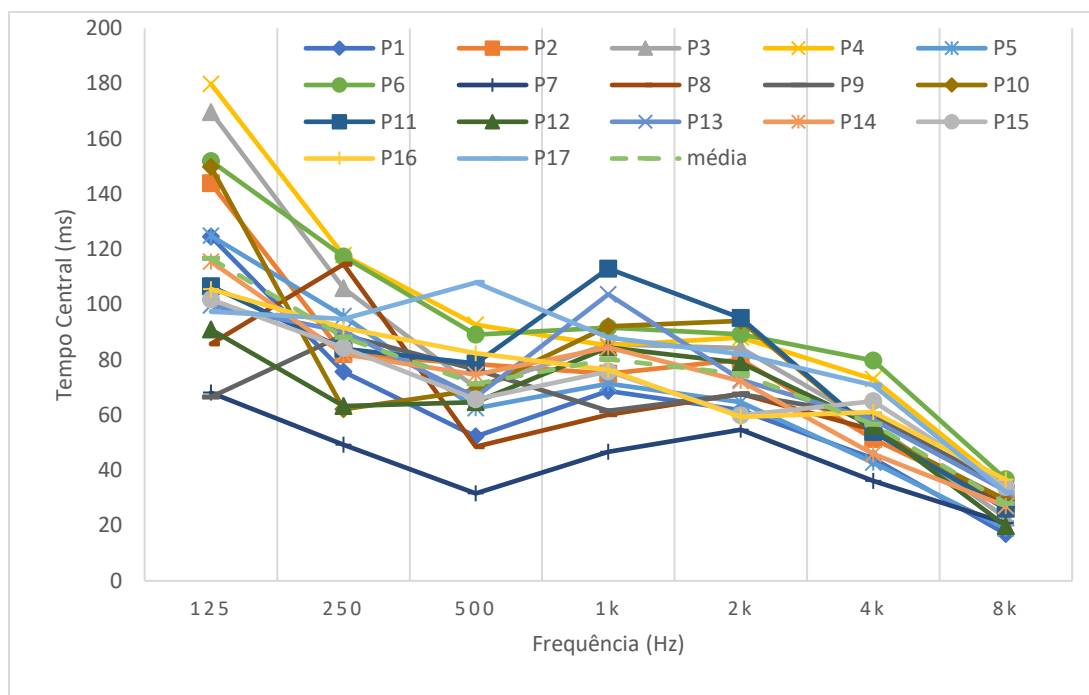


Figura 5.36 - Valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava com AVAC, no Theatro Circo.

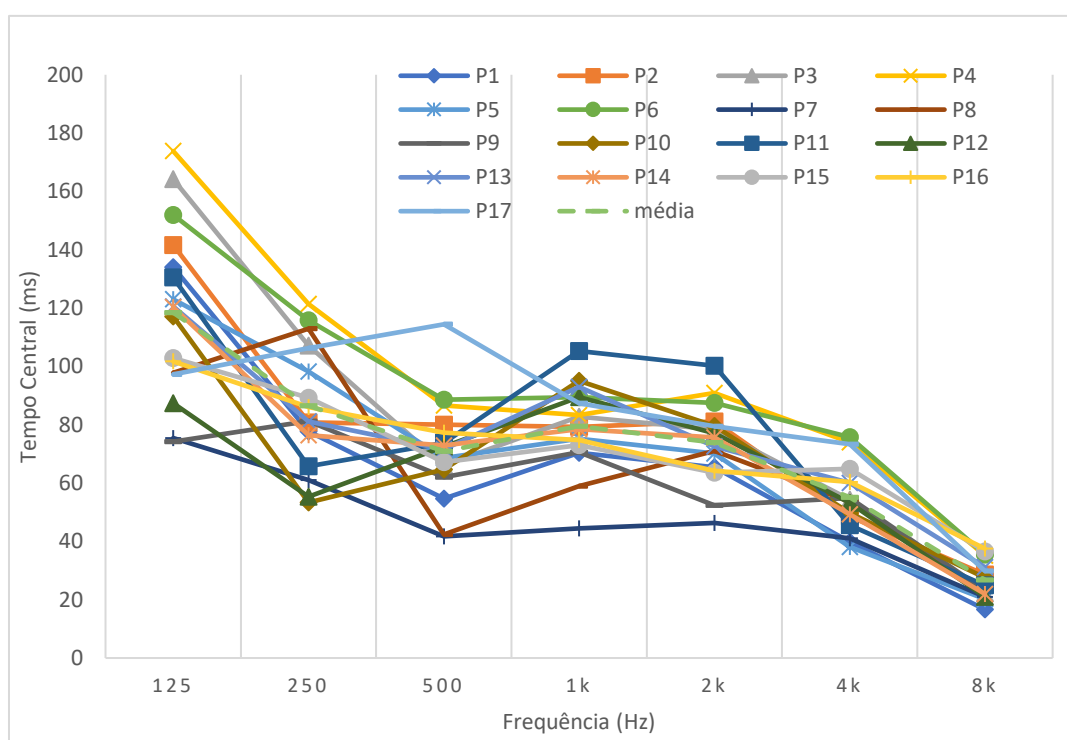


Figura 5.37 - Valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava sem AVAC, no Theatro Circo.

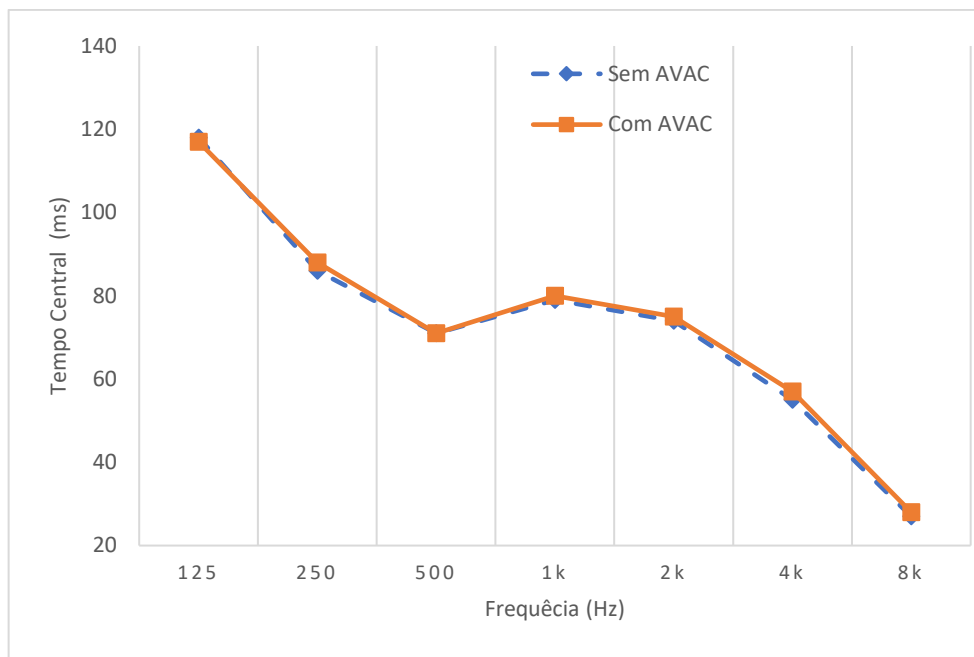


Figura 5.38 – Média dos valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os pontos medidos (P1 a P17) em bandas de frequência de 1/1 oitava, com e sem AVAC, no Theatro Circo.

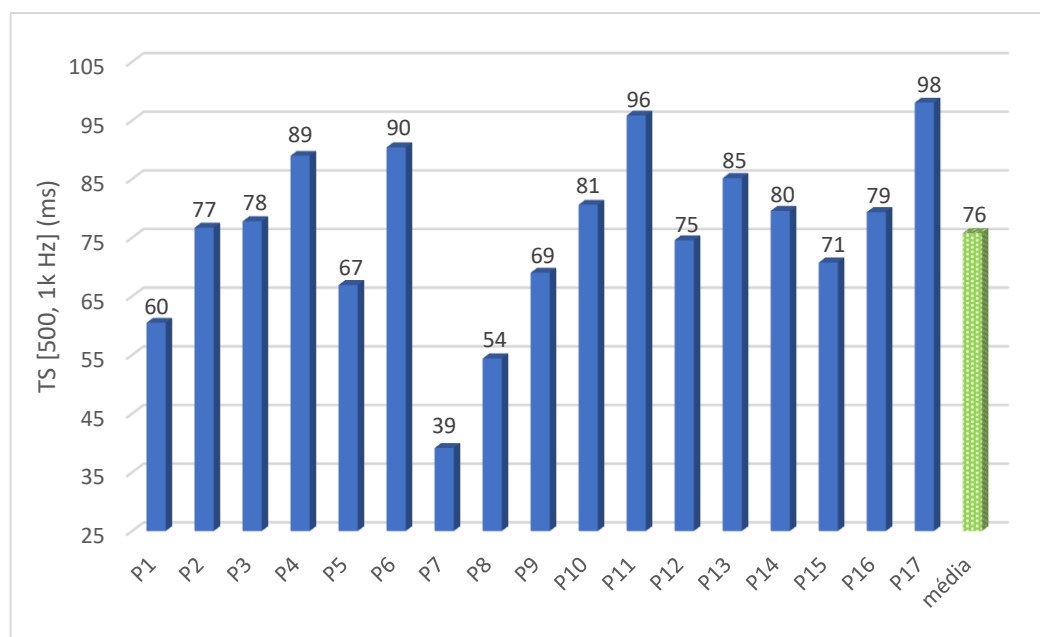


Figura 5.39 - Comparação dos valores do Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] para os pontos medidos (P1 a P14) e a média com AVAC, no Theatro Circo.

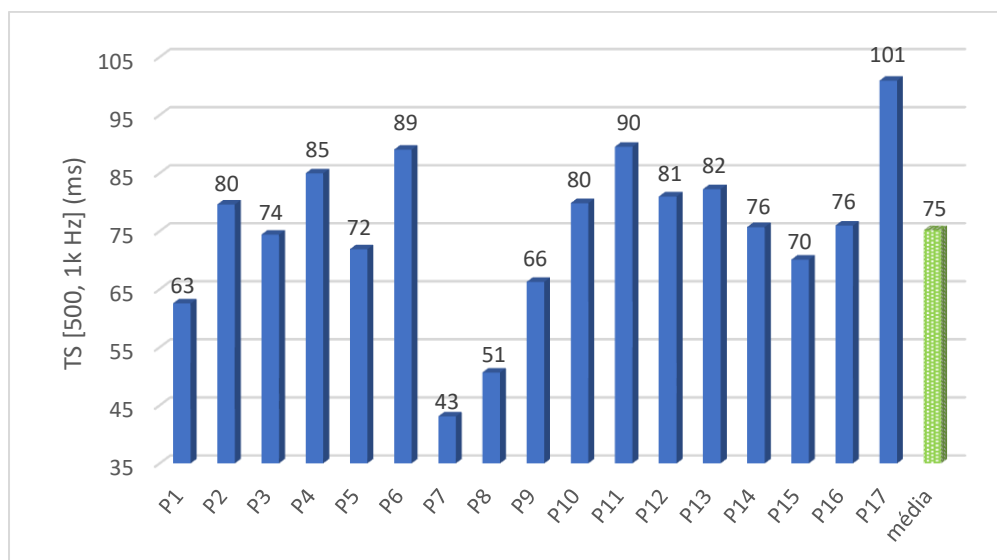


Figura 5.40 - Comparação dos valores do Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] para os pontos medidos (P1 a P14) e a média sem AVAC, do Theatro Circo

Quadro 5.33 - Valores médios do parâmetro Tempo Central (TS) para os pontos P1 a P17 com e sem AVAC e a variação por ele causada, no Theatro Circo (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto	TS [500, 1k Hz] (ms)		ΔTS (ms)
	Com AVAC	Sem AVAC	
P1	60	63	3
P2	77	80	3
P3	78	74	4
P4	89	85	4
P5	67	72	5 (+)
P6	90	89	1 (-)
P7	39 (-)	43 (-)	4
P8	54	51	3
P9	69	66	3
P10	81	80	1 (-)
P11	96	90	6
P12	75	81	6
P13	85	82	3
P14	80	76	4
P15	71	70	1 (-)
P16	79	76	3
P17	98 (+)	101 (+)	3
Média	76	75	1 (-)
Mediana	78	76	2
Desvio padrão	15	14	1 (-)

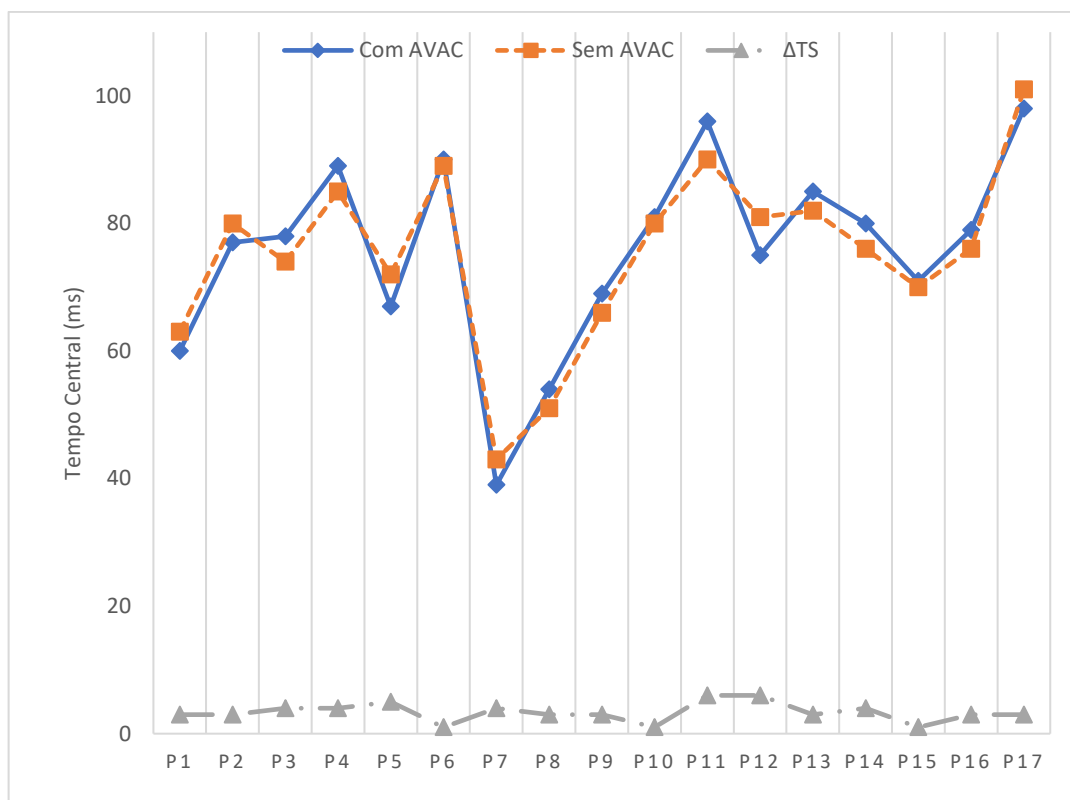


Figura 5.41 - Comparação dos valores médios do parâmetro Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] para os pontos medidos (P1 a P17) com e sem o AVAC e a correspondente variação, no Theatro Circo.

5.9. BALANÇO DO EFEITO DO AVAC

No Quadro 5.34 é apresentado um resumo do efeito do AVAC para os vários parâmetros estudados. Com isto é possível verificar que o AVAC não provoca alterações significativas na Claridade, Definição, Tempo Central, *Speech Transmission Index* e no Rácio de Baixos. Isto acontece pois não houve uma alteração significativa nas características da sala.

O parâmetro que sofreu uma maior alteração foi o das curvas de incomodidade em que na NC houve um aumento de 10 e na NR um aumento de 9. Como as curvas de incomodidade indicam o desconforto acústico este aumento indica que o ruído causado pelo sistema de ventilação tem um elevado impacto no incómodo que os espectadores podem sentir.

O aumento de 6 dB(A) do nível sonoro equivalente quando comparado com o aumento de 1 dB do nível de pressão sonora equivalente pode significar que o sistema provoca um ruído mais intenso nas bandas de frequência mais sensíveis ao ouvido humano o que corrobora o aumento elevado das curvas de incomodidade. Assim percebe-se que o AVAC causa um desconforto elevado podendo abafar os sons desejados para o espetáculo.

Em suma o funcionamento do sistema AVAC apesar de não interferir em alguns dos parâmetros em estudo pode provocar um elevado desconforto acústico para a audiência devido ao aumento do nível sonoro equivalente, através do seu funcionamento contínuo e com uma intensidade mais elevada na zona da plateia.

Quadro 5.34 - Efeito do funcionamento do AVAC nos parâmetros acústicos medidos no Theatro Circo

Parâmetro		Efeito do AVAC
Claridade (C_{80}) (dB) [500, 1k Hz] (dB)		≈ 0
Definição (D_{50}) [500, 1k Hz] (dB)		≈ 0
Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] (ms)		≈ 0
Curvas de incomodidade	NC (<i>Noise Criterion</i>)	+ 10
	NR (<i>Noise Rating</i>)	+9
Nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}) (dB)		+1
Nível sonoro equivalente (L_{Aeq}) (dB)		+6
<i>Speech Transmission Index</i> (STI)		≈ 0
Rácio de Baixos		≈ 0

6

ANÁLISE COMPARATIVA COM
OUTRAS SALAS

6.1. INTRODUÇÃO

Com o intuito de realizar um enquadramento da acústica da sala em estudo procedeu-se a uma comparação com diferentes salas a nível internacional e nacional. De forma a realizar esta comparação da melhor forma possível foram feitos três grupos:

- Salas Internacionais em Ferradura;
- Salas Nacionais em Ferradura;
- Salas Nacionais com formatos diferentes.

Para as salas internacionais foram escolhidas algumas salas com o mesmo formato que a sala em estudo (“ferradura”), onde se realizou uma análise comparativa utilizando os parâmetros Tempo de reverberação médio (TR [500, 1.000 Hz]) e Claridade média (C_{80} [500, 1.000 Hz]). As salas escolhidas para o estudo foram:

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

Nas salas nacionais com formato semelhante (“ferradura”) foram escolhidos três teatros que foram estudados em teses de mestrado na FEUP em anos anteriores sendo eles:

- Teatro Sá de Miranda (Viana de Castelo) [82];
- Teatro Nacional São João (Porto) [83];
- Teatro Ribeiro Conceição (Lamego) [84].

E foram analisados os seguintes parâmetros:

- Tempo de reverberação médio [500 e 1.000 Hz];
- Tempo Central (ts) [500 e 1.000 Hz];
- Claridade média (C_{80}) [500 e 1.000 Hz];
- Definição média (D_{50}) [500 e 1.000 Hz];
- *Speech Transmission Index* (STI).

Por fim para uma análise de maior escala foram utilizadas dezasseis salas que foram alvo de dissertações de mestrado em anos anteriores. No quadro 6.1 encontra-se representados os vários usos das diferentes salas.

Quadro 6.1 - Comparação das dezasseis salas nacionais para diferentes atividades mais exibidas

Salas	Atividades mais exibidas	Música	Palavra
Auditório da FEUP [85]	Palavra		X
Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia [86]	Palavra e cinema	X	X
Casa da Cultura de Ílhavo [87]	Espectáculos, congressos, seminários, convenções, eventos corporativos e sociais, cursos, exposições e apresentações		X
Centro de Artes de Águeda [88]	Dança clássica e contemporânea, música, teatro e cinema		X
Cineteatro de Amarante [89]	Espectáculos	X	X
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares) [90]	Cinema, teatro, concertos e palestras	X	X
Grande Auditório do Altice Fórum Braga [91]	Conferências e seminários, espetáculos musicais, infantis, teatro, dança e stand up comedy	X	X
Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra) [92]	Eventos de música, teatro e entretenimento	X	X
Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga [91]	Seminários, conferências, formações e debate		X
Teatro Municipal da Covilhã [93]	Música e teatro	X	X
Teatro Municipal de Ourém [94]	Teatro, cinema e eventos corporativos	X	X
Auditório do conservatório de música do Porto [95]	Concertos musicais, recitais, conferências, exposições e espetáculos de dança	X	X
Teatro Sá de Miranda (Viana de Castelo) [82]	Artes cénicas, teatro, música e dança	X	X
Teatro Nacional São João (Porto) [83]	Ópera e teatro	X	X
Teatro Ribeiro Conceição (Lamego) [84]	Teatro, cinema, espetáculos musicais, dança, palestras e entretenimento	X	X
Theatro Circo (Braga)	Teatro, espetáculos musicais, palavra e espetáculos de <i>stand up comedy</i>	X	X

Para esta última análise comparativa foram utilizados os seguintes parâmetros:

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

6.2. SALAS INTERNACIONAIS EM FERRADURA

6.2.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

No Quadro 6.2 são apresentados os valores do Tempo de reverberação com a sala ocupada e desocupada para as bandas de frequências médias (500 e 1k Hz) das cinco salas internacionais em análise juntamente com a sala em estudo neste trabalho (Theatro Circo). Ainda no quadro estão introduzidos os valores do volume, número de lugares de cada sala e a diferença que a ocupação da sala tem neste parâmetro. É de salientar que os valores utilizados das salas internacionais são os das medições mais recentes presente no livro de Beranek [81].

Quadro 6.2 - Valores do tempo de reverberação médio (TR [500, 1.000 Hz]), ocupado e desocupado, de cinco salas internacionais com formato “ferradura” e do Theatro Circo, com o respetivo volume e número de lugares (adaptado de [81])

Sala	TR [500, 1k Hz] desocupado (s)	TR [500, 1k Hz] ocupado (s)	Δ TR (s)	Volume (m ³)	Nº de Lugares
Academy of music, Filadelfia	1,35	1,20	0,15	15100	2827
Wiener Staatsoper, Viena	1,55	1,30	0,25	10665	1709
Opera Garnier, Paris	1,22	1,10*	0,12	10000	2131
Royal Opera House, Londres	1,21	1,10	0,11	12250	2120
Teatro alla Scala, Milão	1,36	1,20	0,16	11252	2289
Theatro Circo, Braga	1,18	1,13*	0,05	9800	897

* Previsão

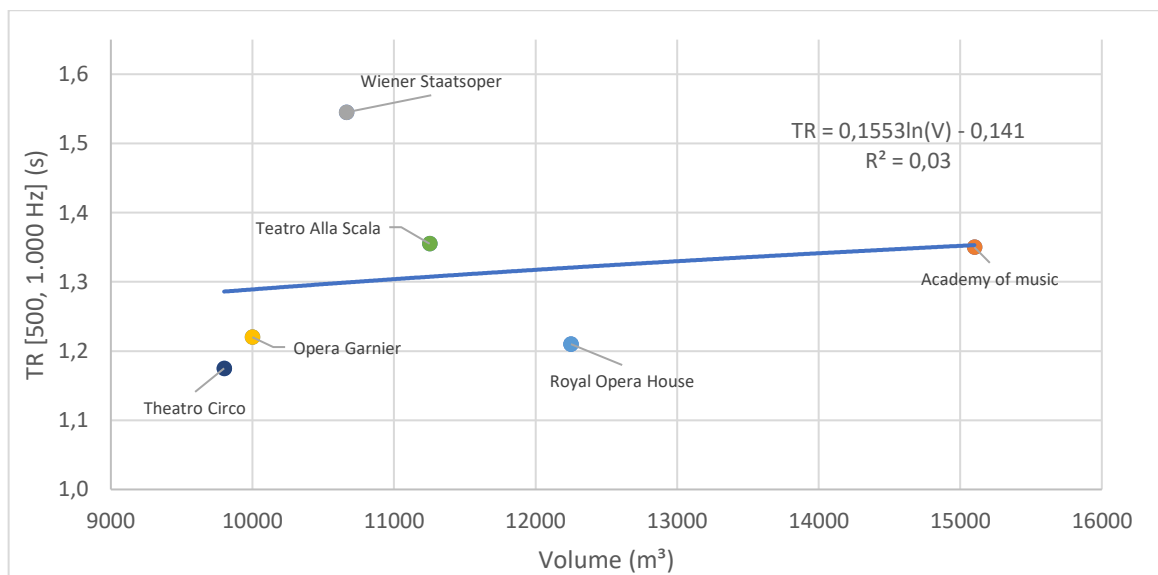


Figura 6.1 - Valores do parâmetro TR [500, 1000 Hz] desocupado em função do volume das cinco salas internacionais com formato “ferradura” e do Theatro Circo, com linha de tendência (logarítmica).

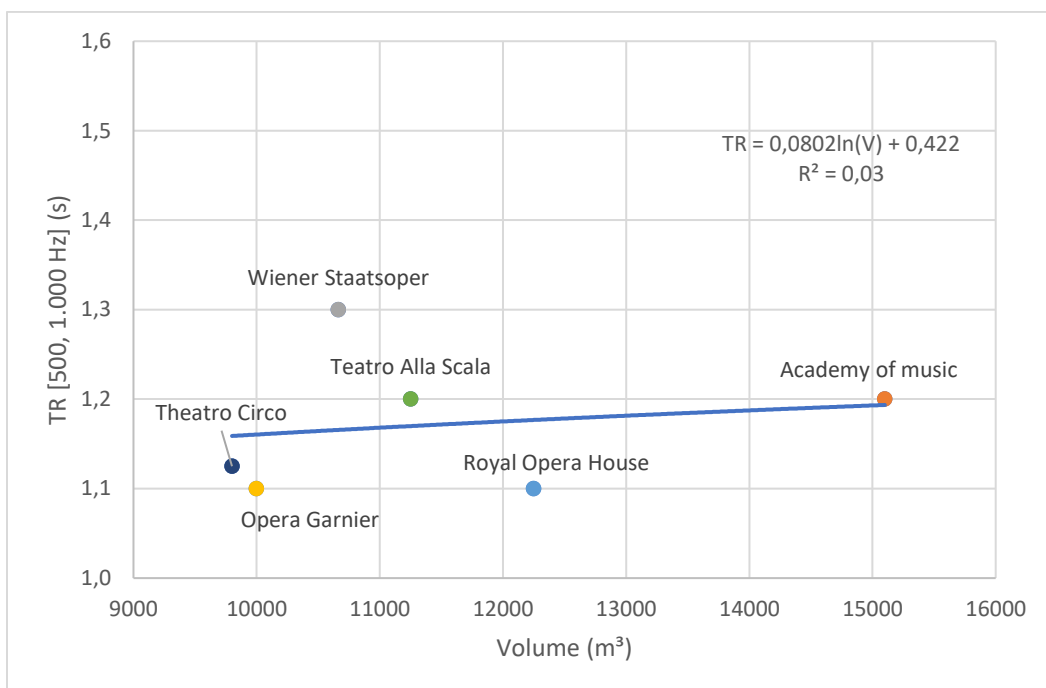


Figura 6.2 - Valores do parâmetro TR [500, 1000 Hz] ocupado em função do volume das cinco salas internacionais com formato “ferradura” e do Theatro Circo (previsão), com linha de tendência (logarítmica).

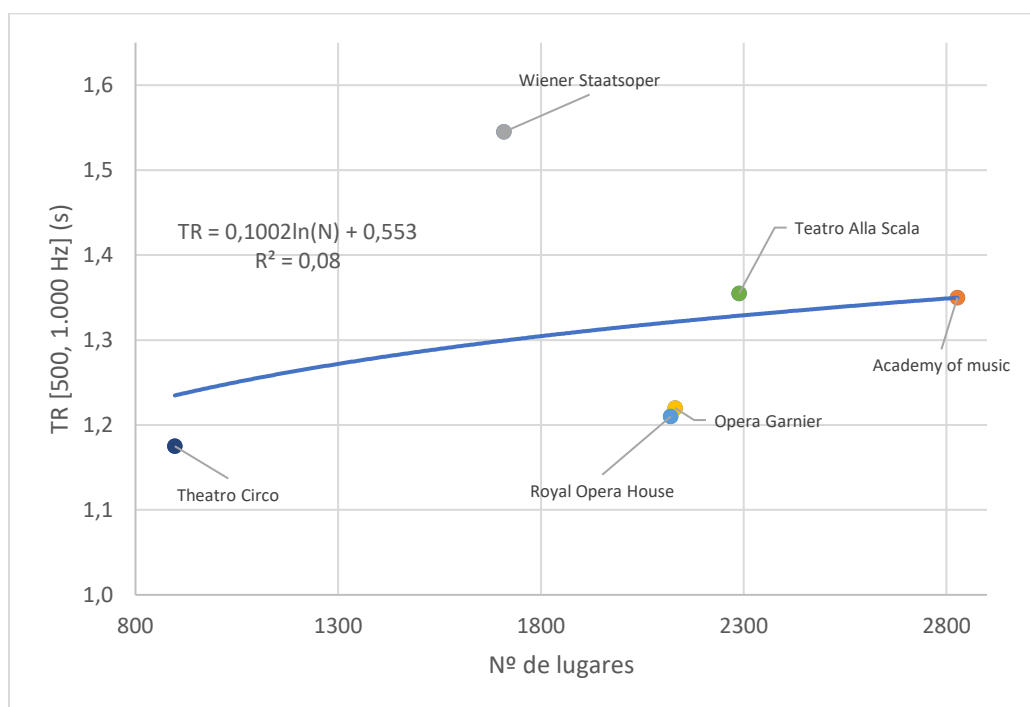


Figura 6.3 – Valores do parâmetro TR [500, 1000 Hz] desocupado em função do número de lugares das cinco salas internacionais e do Theatro Circo, com linha de tendência (logarítmica).

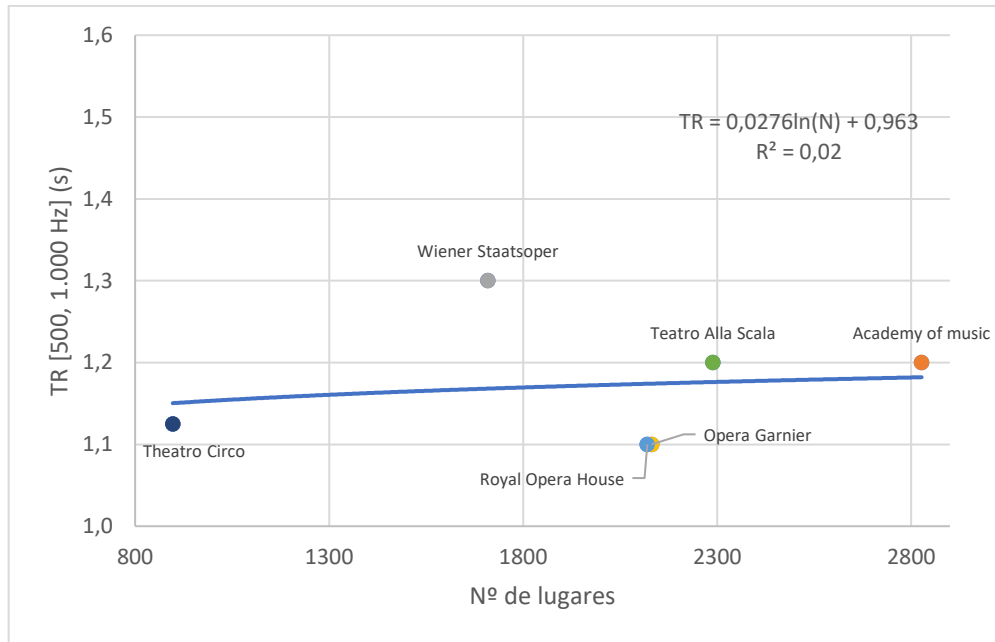


Figura 6.4 – Valores do parâmetro TR [500, 1.000 Hz] ocupado em função do número de lugares das cinco salas internacionais e do Theatro Circo (previsão), com linha de tendência (logarítmica).

Quadro 6.3 – Valores do tempo de reverberação da sala desocupada em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4.000 Hz das cinco salas internacionais com formato “ferradura” e do Theatro Circo, com desvio padrão (adaptado de [81]).

Tempo de Reverberação desocupado (s)							
Sala \ Freq. (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	
Acadamy of music, Filadelfia	1,40	1,40	1,40	1,30	1,30	1,10	
Wiener Staatsoper, Viena	1,84	1,61	1,55	1,54	1,44	1,28	
Opera Garnier, Paris	1,84	1,40	1,26	1,18	1,14	1,02	
Royal Opera House, Londres	1,30	1,26	1,19	1,23	1,16	1,05	
Teatro Alla Scala, Milão	1,81	1,57	1,40	1,31	1,22	1,11	
Theatro Circo, Braga	1,48	1,24	1,17	1,18	1,14	0,95	
Desvio padrão (s)	0,22	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	

Nas Figuras 6.1 e 6.2 pode-se ver relação entre o Tempo de Reverberação e o volume das salas ocupadas e desocupadas. Ao analisar estas é possível concluir que em geral o volume da sala não está diretamente relacionado com o TR, isto é, um maior volume não implica um maior tempo de reverberação. Apesar de todas se afastarem da linha de tendência (logarítmica) existe uma das salas com um grande desvio que é o Teatro Alla Scala em Milão.

Com as Figuras 6.3 e 6.4, onde está representado o Tempo de Reverberação para as salas ocupadas e desocupadas em função do número de lugares, é possível verificar que do mesmo modo que com o volume não existe correlação. Pode-se verificar que o Theatro Circo não está muito próximo das linhas de tendência em ambos os casos (TR vs V e TR vs N).

Quadro 6.4 – Valores do tempo de reverberação da sala ocupada em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4000 Hz das cinco salas internacionais com formato “ferradura” e do Theatro Circo, com desvio padrão (adaptado de [81]).

Tempo de Reverberação ocupado (s)						
Sala \ Freq. (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Acadamy of music, Filadelfia	1,4	1,3	1,2	1,2	1,1	1,0
Wiener Staatsoper, Viena	1,4	1,45	1,4	1,2	1,2	1,15
Opera Garnier, Paris	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Royal Opera House, Londres	1,2	1,15	1,1	1,1	1,0	1,0
Teatro Alla Scala, Milão	1,5	1,4	1,25	1,15	1,1	1,0
Theatro Circo, Braga *	1,4	1,19	1,12	1,13	1,07	0,89
Desvio padrão	0,14	0,13	0,11	0,04	0,06	0,08

* Previsão

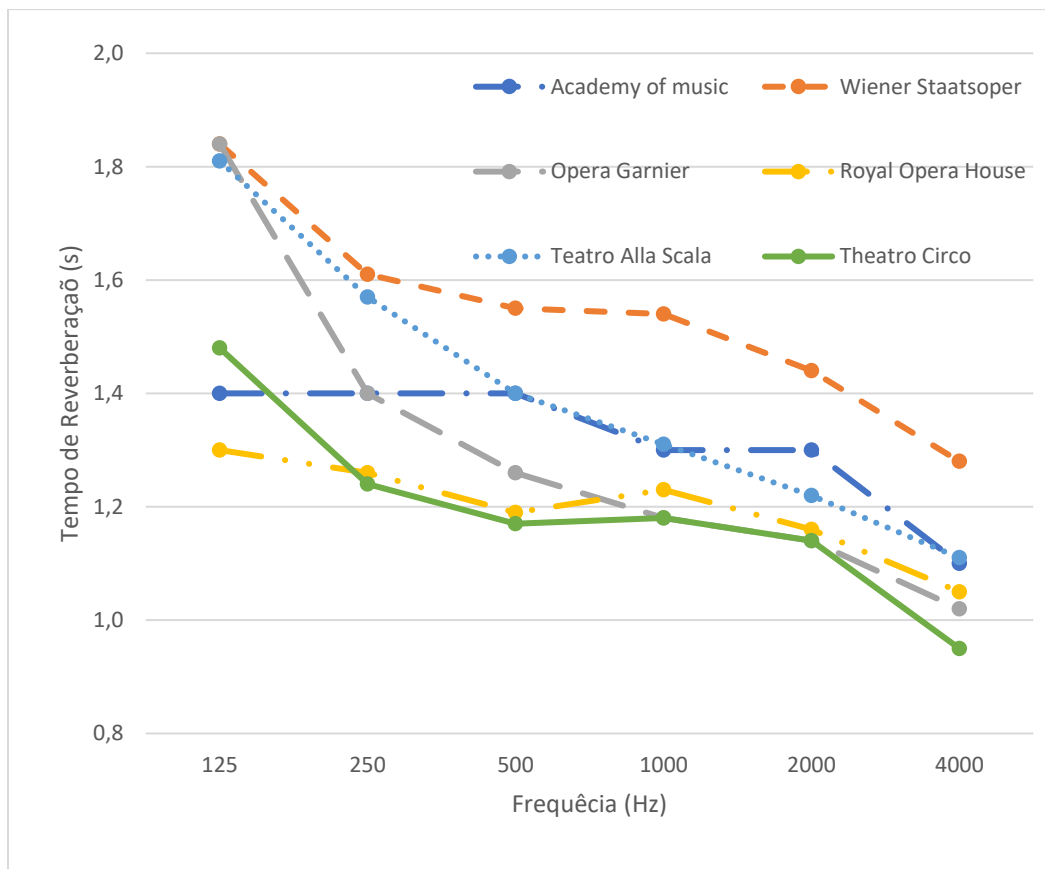


Figura 6.5 - Valores do tempo de reverberação das salas desocupadas em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4000 Hz das cinco salas internacionais e do Theatro Circo.

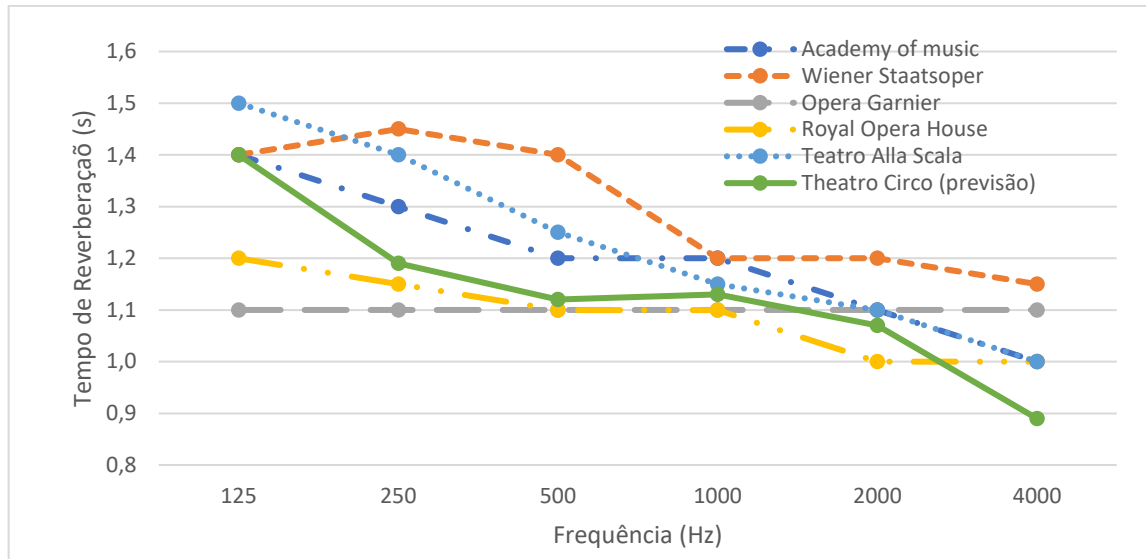


Figura 6.6 - Valores do tempo de reverberação das salas ocupadas em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4000 Hz das cinco salas internacionais e do Theatro Circo.

No Quadro 6.3 e na Figura 6.5 estão representados os valores dos tempos de reverberação de cada sala desocupada para as bandas de frequência de 1/1 de 125 a 4000 Hz. No Quadro 6.4 e na Figura 6.6 estão representados os tempos de reverberação de cada sala ocupada para as mesmas bandas de frequência.

6.2.2. CLARIDADE (C_{80})

No Quadro 6.5 estão representados os valores da Claridade média para as bandas de frequência de 500 e 1000 Hz das cinco salas internacionais e do Theatro Circo assim como o volume e o número de lugares de cada sala. Na Figura 6.7 onde se representou a relação entre a Claridade e o volume e ao realizar uma análise da regressão linear percebe-se a tendência de que com o aumento do volume a claridade diminua e a sala em estudo nesta dissertação segue essa tendência, ao contrário da Opera Garnier em Paris e Royal Opera House em Londres.

Ao analisar a Figura 6.8 é possível evidenciar que a Claridade segue a mesma tendência que no caso do volume, isto é, diminui a Claridade consoante o aumento do número de lugares.

Quadro 6.5 - Valores da Claridade média (C_{80} [500, 1000 Hz]) de cinco salas internacionais e do Theatro Circo com o respetivo volume e número de assentos (adaptado de [81]).

Sala	C_{80} [500, 1k Hz] desocupado (dB)	Volume (m^3)	nº Lugares
Academy of music, Filadelfia	1,65	15100	2827
Wiener Staatsoper, Viena	2,65	10665	1709
Opera Garnier, Paris	4,35	10000	2131
Royal Opera House, Londres	4,75	12250	2120
Teatro Alla Scala, Milão	2,9	11252	2289
Theatro Circo, Braga	3,6	9800	897

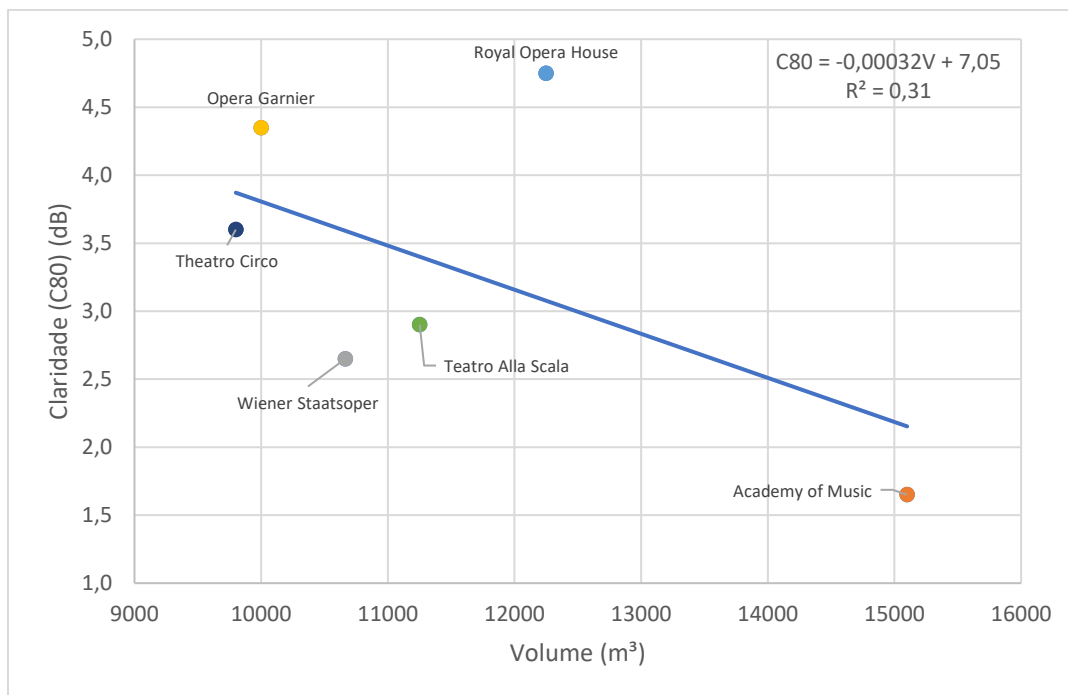


Figura 6.7 - Valores de Claridade média (C_{80} [500, 1000 Hz]) em função do volume com linha de tendência (linear) das cinco salas internacionais e do Theatro Circo.

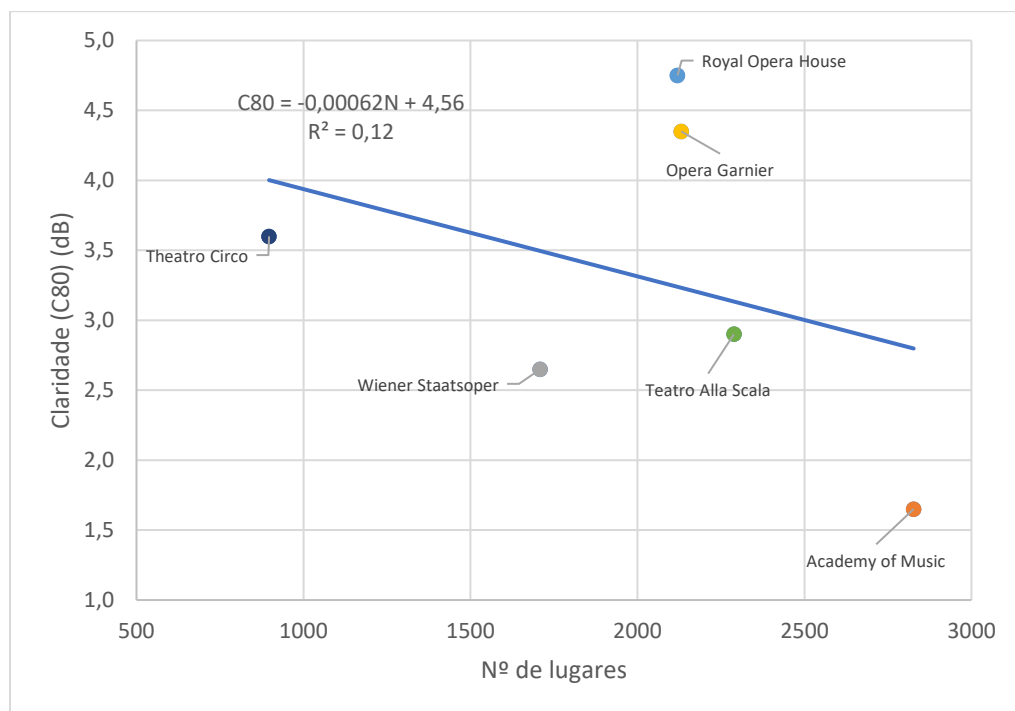


Figura 6.8 - Valores de Claridade média (C_{80} [500, 1000 Hz]) em função do número de lugares com linha de tendência (linear) das cinco salas internacionais e do Theatro Circo, com as salas desocupadas.

6.3. SALAS NACIONAIS

6.3.1. SALA NACIONAIS EM FERRADURA

6.3.1.1. Tempo de Reverberação

No Quadro 6.6 onde são apresentados os Tempos de Reverberação em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4000 Hz das três salas nacionais com o mesmo formato que a da sala em estudo e ainda os do Theatro Circo. Foram também evidenciados os valores do TR médio das bandas médias (500 e 1000 Hz). Ao analisar este quadro é possível verificar que os resultados mais elevados são os da sala do Teatro Sá de Miranda em Viana de Castelo para quase todas as bandas de frequência. Em contrapartida a sala com os menores é o Teatro Ribeiro Conceição em Lamego. Ao comparar os Tempos de Reverberação tendo em conta o volume da sala é possível perceber que estas não seguem a tendência das salas internacionais sendo na sala com menor volume que se registou o TR mais elevado (1,21 s).

Na Figura 6.9 estão representados os tempos de reverberação em bandas de 1/1 oitava entre as bandas de 125 e 4000 Hz das quatro salas e ainda a representação do TR das frequências médias. Com esta figura é possível perceber que o tempo de reverberação do Theatro Circo é o terceiro mais elevado sendo de esperar que devido ao seu volume fosse a sala com o maior, porém esta sala é mais absorvente que a sala de Viana de Castelo.

Quadro 6.6 - Valores do tempo de reverberação (salas desocupadas) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4000 Hz das 3 salas, do Theatro Circo e o valor médio [82], [83], [84].

Tempo de Reverberação (s)				
Frequência (Hz)	T. Sá de Miranda (Viana de Castelo)	T. S. João (Porto)	T. Ribeiro Conceição (Lamego)	Theatro Circo (Braga)
125	1,51	1,46	1,15	1,48
250	1,35	1,20	1,11	1,24
500	1,20	1,11	1,07	1,17
1000	1,21	1,22	1,03	1,18
2000	1,13	1,11	0,97	1,14
4000	0,95	1,05	0,87	0,95
TR médio (s) [500, 1k Hz]	1,21	1,17	1,05	1,17
Volume da sala (m ³)	2491	4560	4184	9800

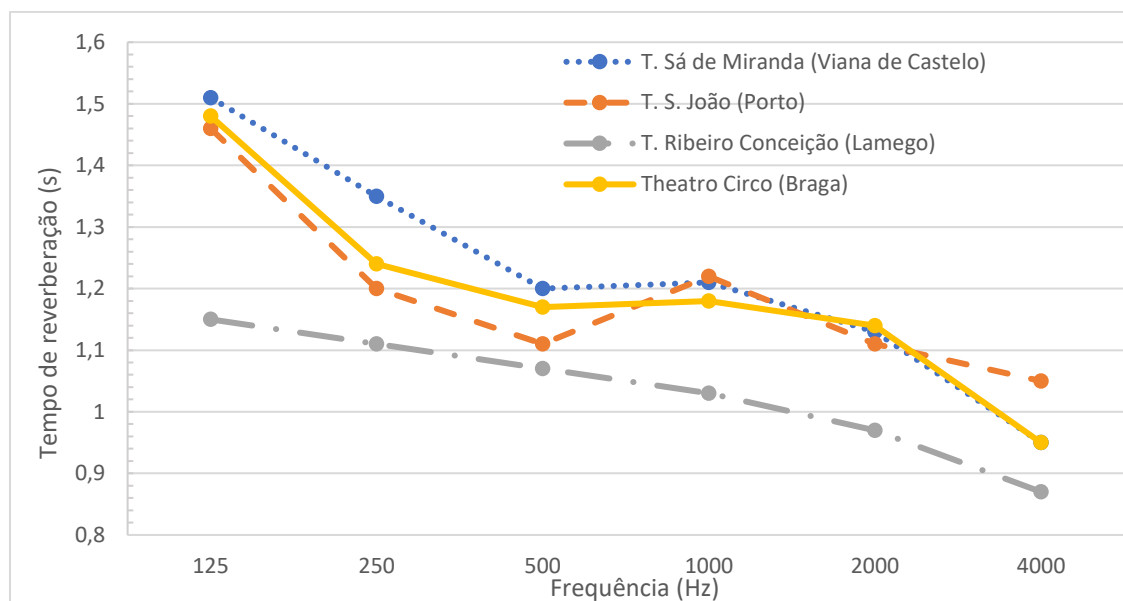


Figura 6.9 - Valores do tempo de reverberação (salas desocupadas) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4000 Hz das três salas, do Theatro Circo.

6.3.1.2. Claridade (C_{80})

Ao analisar o Quadro 6.7, com os valores da Claridade em bandas de 1/1 oitava de 125 e 4000 Hz das quatro salas, pode-se verificar que a sala com o valor mais elevado é a do Teatro Ribeiro Conceição em Lamego com 5,6 dB de C_{80} [500, 1k Hz] enquanto que a com o menor é a sala do Teatro Sá Miranda em Viana do Castelo. O Theatro Circo apresenta o terceiro valor mais baixo das salas em estudo isto pode acontecer devido ao seu volume elevado em relação às restantes.

A Figura 6.10, onde foram representados os valores da Claridade em função da frequência em bandas de frequência de 1/1 oitava de 125 a 4000 Hz, permite visualizar a diferença entre as várias salas.

Quadro 6.7 - Valores da Claridade (C_{80}) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4000 Hz das três salas, do Theatro Circo e o valor médio das bandas de frequência médias [82], [83], [84].

Claridade (C_{80}) (dB)				
Frequência (Hz)	T. Sá Miranda (Viana do Castelo)	T. S. João (Porto)	T. Ribeiro Conceição (Lamego)	Theatro Circo (Braga)
125	2,0	4,2	4,7	1,9
250	3,5	4,7	6,2	3,1
500	4,1	4,9	5,4	4,2
1000	2,8	5,2	5,8	2,9
2000	4,0	6,2	5,8	3,3
4000	6,5	7,5	7,0	5,3
8000	9,8	10,5	9,5	9,8
C_{80} [500, 1k Hz]	3,5	5,1	5,6	3,6

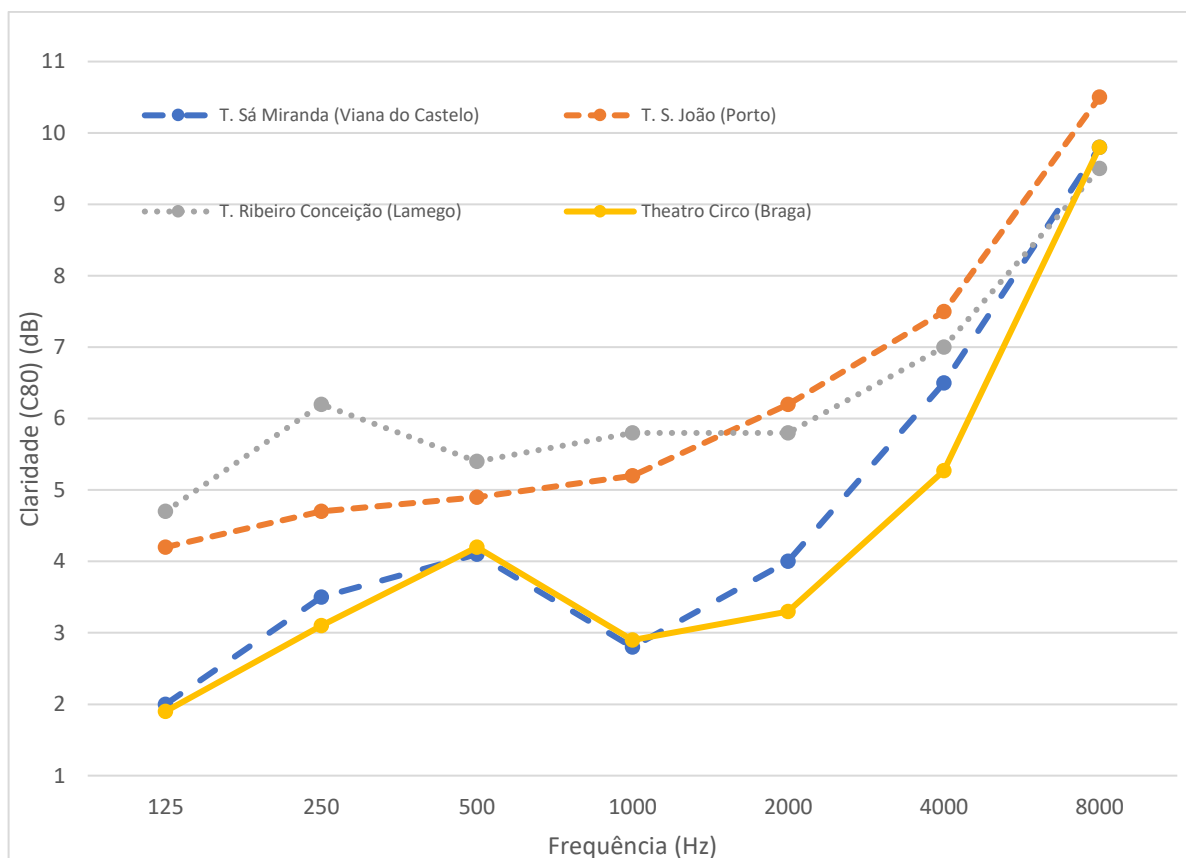


Figura 6.10 - Valores da Claridade (C_{80}) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 4000 Hz das 3 salas, do Theatro Circo.

6.3.1.3. Definição (D_{50})

Com uma análise ao Quadro 6.8 é possível verificar que no parâmetro da Definição os valores das quatro salas são bastante próximos entre si, existindo uma diferença máxima de 0,12 entre os valores de D_{50} [500, 1k Hz] das salas do Teatro Sá de Miranda em Viana de Castelo e do Teatro Ribeiro Conceição. Sendo os valores destes respetivamente o mais baixo e o mais elevado. De igual modo ao que aconteceu no parâmetro C_{80} o Theatro Circo apresenta o terceiro valor mais elevado sendo apenas superior ao da sala de Viana do Castelo.

Na Figura 6.11 pode-se ver que apesar de para as frequências centrais o Theatro Circo não ter a claridade mais reduzida, para as bandas de frequências de 125, 2000 e 4000 Hz apresenta o valor mais reduzido, atingindo o mínimo entre todas as frequências e de todas as salas na banda de 125 Hz. Outro pormenor a realçar é a tendência de subida da Claridade em função da frequência que se verifica nas salas de Lamego e do Porto, porém na sala bracarense e de viana de Castelo existe uma quebra desta tendência uma vez que da banda de 500 Hz para a de 1000 Hz há uma diminuição do valor.

Quadro 6.8 - Valores da Definição (D_{50}) bandas de 1/1 oitava de 125 a 8000 Hz das quatro salas, do Theatro Circo e o valor médio das bandas de frequência médias [82], [83], [84].

Frequência (Hz)	Definição (D_{50})			
	T. Sá de Miranda (Viana de Castelo)	T. S. João (Porto)	T. Ribeiro Conceição (Lamego)	Theatro Circo (Braga)
125	0,48	0,51	0,60	0,47
250	0,54	0,60	0,64	0,56
500	0,56	0,59	0,64	0,61
1000	0,51	0,62	0,67	0,52
2000	0,58	0,70	0,67	0,54
4000	0,70	0,76	0,73	0,65
8000	0,82	0,83	0,81	0,82
D_{50} [500, 1k Hz]	0,54	0,61	0,66	0,56

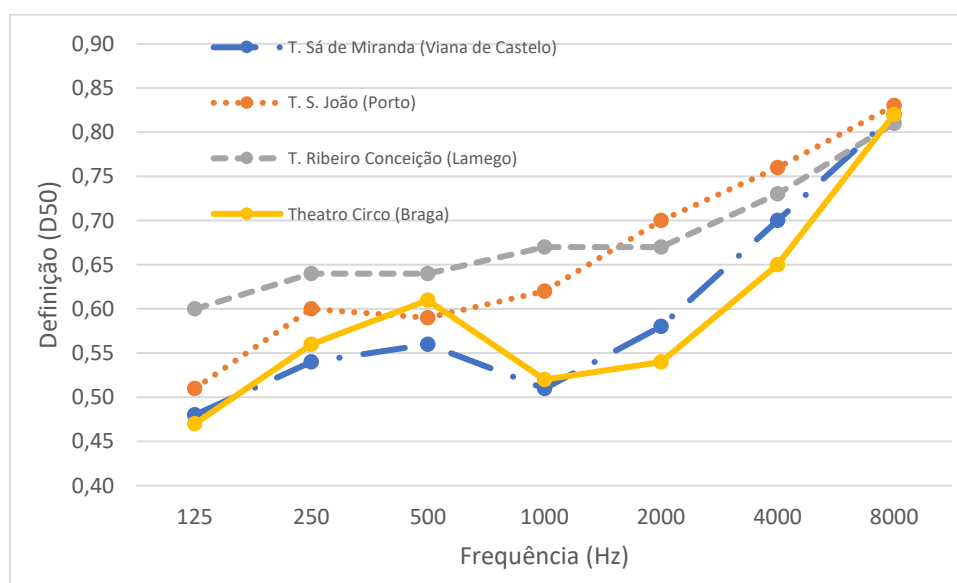


Figura 6.11 - Valores da Definição (D_{50}) bandas de 1/1 oitava de 125 a 8000 Hz das quatro salas, do Theatro Circo e o valor médio das bandas de frequência médias.

6.3.1.4. Tempo central (ts)

Com uma análise ao Quadro 6.9 e à Figura 6.12 é possível perceber que o Theatro Circo no parâmetro Tempo Central apresenta os resultados mais elevados ao contrário do Teatro Ribeiro Conceição que apresenta os mais reduzidos. Os valores das salas do Porto e de Lamego apresentam resultados muito próximos e até em algumas bandas de frequência os resultados são iguais. De igual modo ao que acontece com a Definição, porém inversamente, o Tempo Central do Teatro Nacional São João e o Teatro Ribeiro Conceição vai diminuindo em função da frequência, mas nas outras duas salas existe novamente um quebra dessa diminuição nas bandas de frequência de 500 para 1000 Hz pois aumenta nesta gama.

Quadro 6.9 – Valores do Tempo Central (t_s) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8000 Hz das quatro salas, do Theatro Circo e o valor médio das bandas de frequência médias [82], [83], [84].

Frequência (Hz)	Tempo Central (TS) (ms)			
	T. Sá de Miranda (Viana de Castelo)	T. S. João (Porto)	T. Ribeiro Conceição (Lamego)	Theatro Circo (Braga)
125	97	84	90	117
250	73	69	69	88
500	70	62	61	71
1000	75	59	55	80
2000	63	48	51	75
4000	43	38	42	57
8000	26	24	28	28
t_s [500, 1.000 Hz] (ms)	73	61	58	76

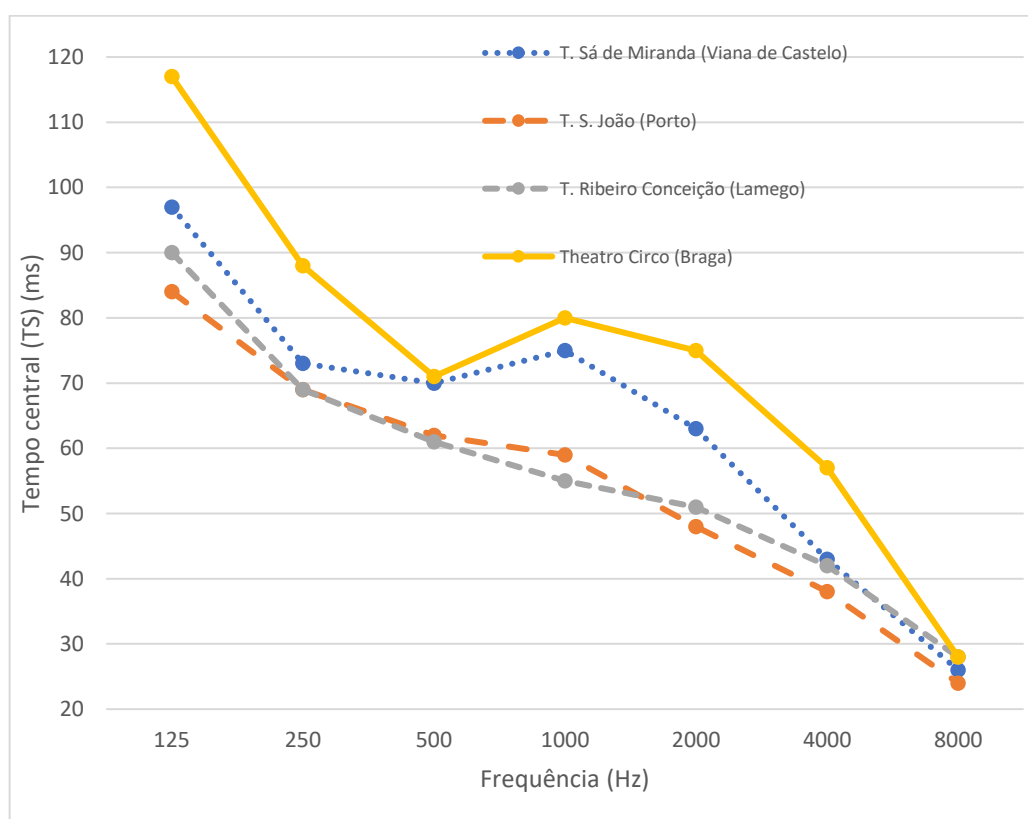


Figura 6.12 - Valores do Tempo Central (t_s) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8000 Hz das quatro salas, do Theatro Circo e o valor médio das bandas de frequência médias.

6.3.1.5. Speech Transmission Index (STI)

Ao analisar o Quadro 6.10, onde se apresenta os valores de STI do máximo, médio e mínimo das 4 salas, pode-se concluir que a sala com melhor inteligibilidade média é o Theatro Circo em Braga (0,59), já com a menor é o Teatro Sá Miranda em Viana de Castelo (0,53). Apesar disto os valores são bastante próximos. Através da Figura 6.13 é possível verificar que apesar da sala de Viana de Castelo ser a com valor médio mais reduzido esta apresenta o STI máximo mais elevado, porém apresenta também o STI mínimo mais baixo o que indica que a sala apresenta ao contrário das outras uma disparidade maior em relação à posição na sala. A elevada amplitude apresentada no Quadro 6.10 corrobora essa conclusão. Ao analisar o STI mínimo percebe-se que o Theatro Circo apresenta também a melhor inteligibilidade entre os lugares com STI mínimo das várias salas.

Quadro 6.10 - Valores do *Speech Transmission Index* (STI) máximo, médio e mínimo das quatro salas e do Theatro Circo [82], [83], [84].

Parâmetro	Speech Transmission Index (STI)			
	T. Sá Miranda (Viana do Castelo)	T. N. S. João (Porto)	T. Ribeiro Conceição (Lamego)	Theatro Circo (Braga)
STI máximo	0,71 (+)	0,66 (-)	0,70	0,68
STI mínimo	0,46 (-)	0,52	0,51	0,53 (+)
STI médio	0,53 (-)	0,55	0,55	0,59 (+)
ΔSTI (= Máx. - Min.)	0,25 (+)	0,14 (-)	0,19	0,15

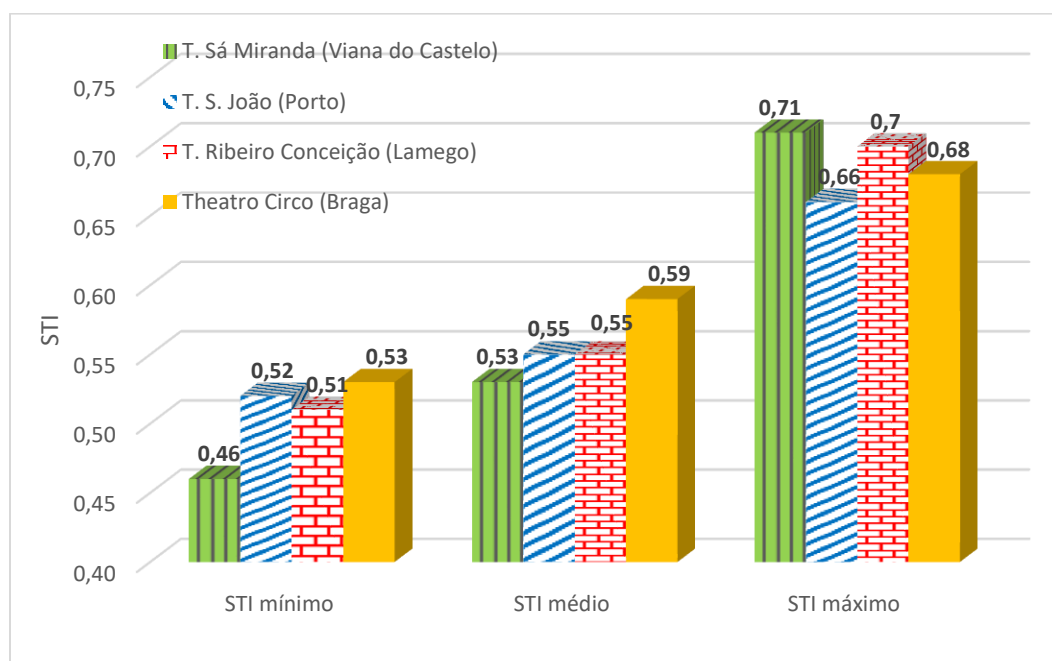


Figura 6.13 - Valores do *Speech Transmission Index* (STI) máximo, médio e mínimo das quatro salas e do Theatro Circo

6.3.2. SALAS NACIONAIS TODOS OS FORMATOS

6.3.2.1. Tempo de Reverberação

No Quadro 6.11 são apresentados os valores do tempo de reverberação médio (500, 1000 Hz), o volume, o número de lugares e ainda a relação entre o volume e o número de lugares, das quinze salas nacionais de outros formatos incluindo ainda o Theatro Circo. Ao analisar este quadro é possível perceber que o Theatro Circo se caracteriza como a segunda maior sala. Quanto ao número de lugares esta é a terceira maior. A sala com uma maior relação entre volume e número de lugares é a Águeda com $12,7 \text{ m}^3$ enquanto que o Theatro Circo apresenta uma relação de $10,9 \text{ m}^3$ sendo a terceira maior.

Ao analisar o tempo de reverberação destas salas é possível perceber que a mais pequena como era de esperar tem o tempo de reverberação mais baixo enquanto que a maior tem o maior valor. Já o Theatro Circo apesar de ser a segunda maior, em volume, apresenta o quinto maior valor de tempo de reverberação sendo igual ao da sala de Amarante e do Teatro Nacional São João.

Quadro 6.11 – Valores do Volume, Número de lugares, Volume por assento e TR médio (500, 1000 Hz) das quinze salas nacionais e do Theatro Circo [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92], [93], [94] e [95] (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Tempo de Reverberação [Hz] (s)				
Salas	Volume (m ³)	Nº de lugares	Volume/ Nº Lugares (m ³)	TR [500, 1k Hz] (s)
Auditório da FEUP	3317	500	6,6	1,5 (+)
Auditório Municipal de V. N. de Gaia	3219	330	9,8	0,8
Casa da Cultura de Ílhavo	3779	491	7,7	1,0
Centro de Artes de Águeda	5066	398	12,7	0,8
Cineteatro de Amarante	2700	386	7,0	1,2
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares)	2111	386	5,5	1,0
Grande Auditório do Altice Fórum Braga	9150	998	9,2	1,0
Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra)	12000 (+)	1093 (+)	11,0 (+)	1,5
Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga	1320 (-)	254	5,2 (-)	0,5 (-)
Teatro Municipal da Covilhã	4258	600	7,1	1,4
Teatro Municipal de Ourém	3915	441	8,9	1,0
Auditório do Conservatório de música do Porto	3162	233 (-)	13,7	1,3
Teatro Sá de Miranda	2491	377	6,6	1,21
Teatro Nacional São João	4560	614	7,4	1,2
Teatro Ribeiro Conceição	4184	417	10,0	1,05
Theatro Circo (Braga)	9800	897	10,9	1,2
média	4691	526	8,7	1,1
mediana	3847	429	8,3	1,1

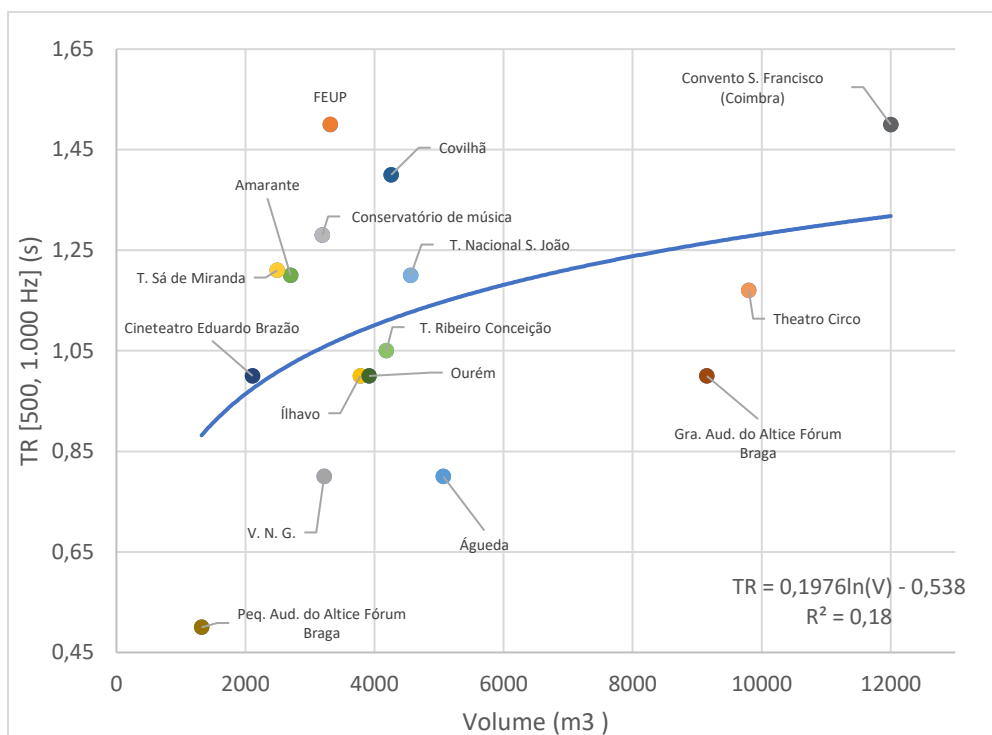


Figura 6.14 – Valores do parâmetro TR [500, 1000 Hz] em função do Volume das quinze salas nacionais e do Theatro Circo com linha de tendência (logarítmica).

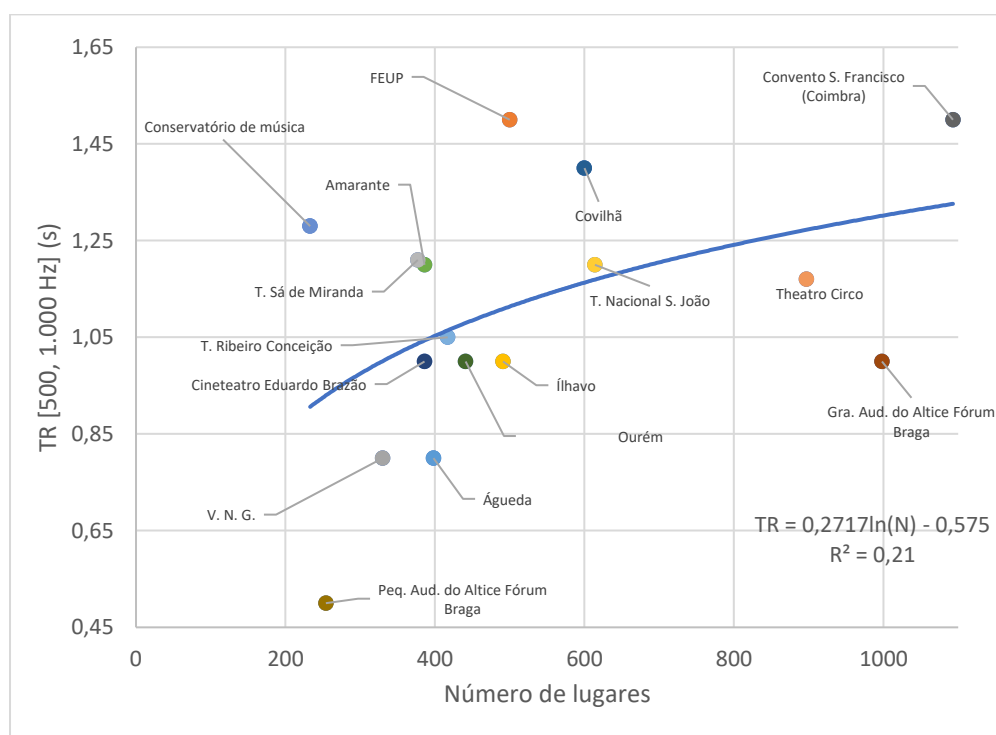


Figura 6.15 – Valores do parâmetro TR [500, 1000 Hz] em função do Volume das quinze salas nacionais e do Theatro Circo com linha de tendência (logarítmica).

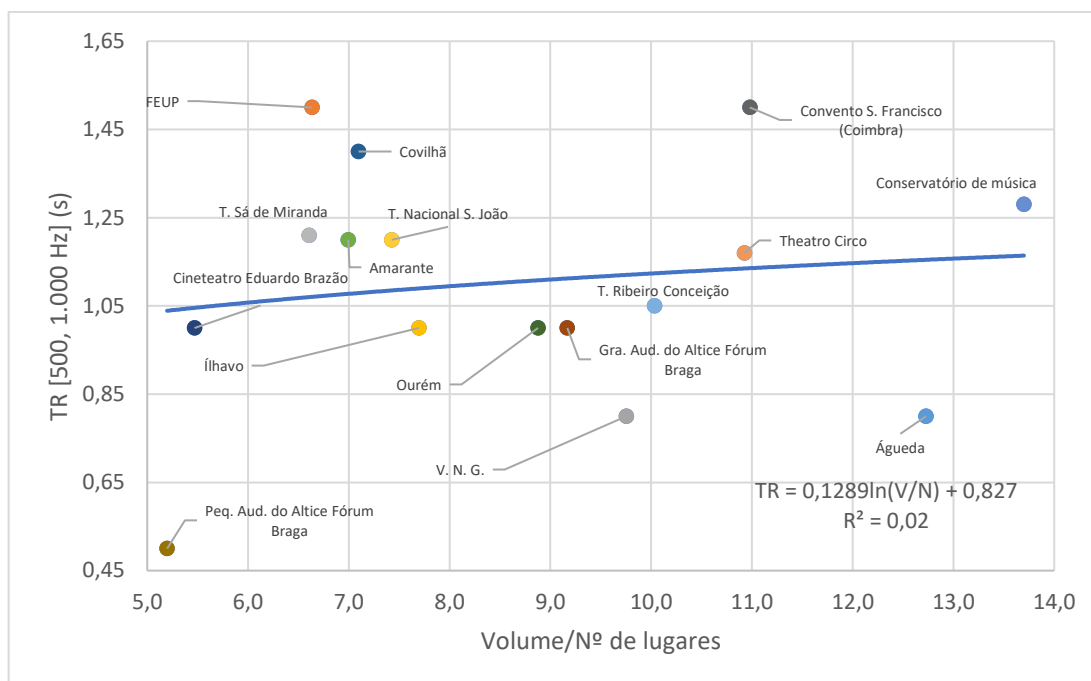


Figura 6.16 - Valores do parâmetro TR [500, 1000 Hz] em função do Volume/Número de lugares das quinze salas nacionais e do Theatro Circo com linha de tendência (logarítmica).

Com a Figura 6.14, onde se representou o tempo de reverberação em função do volume de cada sala, é possível verificar (com a linha de tendência logarítmica) que o tempo de reverberação aumenta em função do volume. Existem, porém, algumas salas que se afastam desta tendência, uma vez que apenas 18% dos valores são justificados pela linha de tendência, como por exemplo o Auditório da FEUP que apresenta um valor igualmente elevado à sala com maior volume entre as estudadas.

Na Figura 6.15 são representados os tempos de reverberação médios das salas em função do seu número de lugares. Ao analisar a figura é possível perceber que primeiramente a regressão ($R^2=0,21$) é muito próxima do que a apresentada na Figura 6.14 ($R^2=0,18$), o que indica que ambas as regressões justificam cerca de 20 % dos valores do tempo de reverberação. Havendo novamente valores com uma elevada discrepância, dos quais Auditório da FEUP e o Grande Auditório do Altice Fórum em Braga. O primeiro caracteriza-se por ter um número de lugares muito reduzido, mas um tempo de reverberação muito elevado, já a segunda é estritamente o contrário apresentando muitos lugares, mas um valor do tempo de reverberação reduzido.

A Figura 6.16 onde se relacionou o tempo de reverberação média em função do volume sobre o número de lugares permite concluir que esta relação é a que menos caracteriza o tempo de reverberação. Uma vez que o ($R^2=0,02$) indica que apenas 2% dos valores são justificados por esta regressão logarítmica. Assim sendo grande parte dos valores estão muito distantes à linha de tendência.

Ao analisar o Quadro 6.12 é possível verificar que ao contrário do Theatro Circo que tendo um TR médio de aproximadamente 1,2 s não tem o valor perfeitamente adequado para nenhum tipo de uso, o Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia apresenta uma maior diversidade de funções sendo assim a sala que mais se adequa a receber vários tipos de espetáculos diferentes. É também possível perceber a afinidade de certas salas para receber espetáculos relacionados com a palavra (por

exemplo o Centro de Artes de Águeda) e outras mais para espetáculos musicais (por exemplo o Grande Auditório do Convento S. Francisco).

Em suma é possível concluir que o Auditório da FEUP apresenta um valor da absorção sonora reduzido uma vez que tem um volume muito reduzido para o tempo de reverberação apresentado. Em contrapartida tem a sala do Grande Auditório do Altice Fórum Braga que apesar do ser umas das salas com maior volume tem um dos tempos de reverberação mais baixos entre as salas em estudo devido a ter tido projeto acústico durante a sua requalificação. O Theatro Circo encontra-se entre a média das salas e segue a proporção de aumento do TR em função do volume.

Quadro 6.12 - Verificação dos valores ideais do parâmetro Tempo de Reverberação médio [500, 1000 Hz] de acordo com vários tipos de função das dezasseis salas nacionais.

Uso	TR [500, 1k Hz] (s)	Salas adequadas
Auditório (Palavra)	0,7 – 0,8	Auditório Municipal de V. N. de Gaia e Centro de Artes de Águeda
Teatro	0,7 – 0,9	Auditório Municipal de V. N. de Gaia e Centro de Artes de Águeda
Cinema	0,8 – 1,0	Auditório Municipal de V. N. de Gaia, Casa da Cultura de Ílhavo, Centro de Artes de Águeda, Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares), Grande Auditório do Altice Fórum Braga, Teatro Municipal de Ourém e Teatro Ribeiro conceição
Ópera (não wagneriana)	1,3 – 1,7	Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra); Auditório da FEUP, Teatro Municipal da Covilhã e Auditório do Conservatório de música do Porto
Ópera (wagner)	1,8 – 1,9	-
Música sinfónica Barroca	1,4 – 1,6	Auditório da FEUP, Grande Auditório do Convento S. Francisco e Teatro Municipal da Covilhã
Clássica	1,6 – 1,8	-
Romântica	1,9 – 2,2	-
Moderna	1,4 – 1,9	Auditório da FEUP, Grande Auditório do Convento S. Francisco e Teatro Municipal da Covilhã
Música popular	0,8 – 1,0	Auditório Municipal de V. N. de Gaia, Casa da Cultura de Ílhavo, Centro de Artes de Águeda Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares), Grande Auditório do Altice Fórum Braga, Teatro Municipal de Ourém e Teatro Ribeiro Conceição
Música de órgão	2,5 – 3,5	-
Coros gregorianos	3 – 4	-

6.3.2.2. Speech Transmission Index (STI)

O Quadro 6.13 apresenta valores do volume, número de lugares, RASTI/STI médio e nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) sem AVAC das quinze salas nacionais e do Theatro Circo. Ao realizar uma análise que a sala com o STI/RASTI médio mais elevado é o Pequeno Auditório do

Altice Fórum Braga (0,80) sendo bem maior que a sala com menor que é a o Teatro Sá de Miranda (0,53). O Theatro Circo apresenta o quarto menor STI. O Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga por ter um volume tão reduzido em comparação com o Theatro Circo pode ser uma das justificações possíveis para tal diferença. Apesar de ser a sala com pior inteligibilidade a diferença para as restantes salas é bastante reduzida com a exceção do com maior inteligibilidade que tem um valor um pouco superior à média das salas.

Ao analisar o nível sonoro do ruído nas salas sem AVAC pode-se perceber que os dois extremos (melhor e pior) do parâmetro do STI/RASTI não são os que possuem o nível sonoro mais baixos ou mais elevado respetivamente. Sendo a sala onde se faz sentir um ruído de fundo mais elevado o Cineteatro Eduardo Brazão em Valadares com um nível sonoro de 32 dB(A) enquanto que a com o menor surge o Cineteatro de Amarante com 24 dB(A). O Theatro Circo é a terceira sala com o ruído de fundo sem AVAC mais elevado com 29 dB(A).

A Figura 6.17 contém os valores do STI/RASTI médios em função do tempo de reverberação para as bandas de frequência médias (500 e 1000 Hz). Ao analisar a linha da regressão (potência) onde se obteve um R^2 de 0,54 é possível perceber que os dois parâmetros estão um pouco relacionados tendo uma relação de 54%. Alguns valores das salas estão bastante próximos à linha de tendência com a exceção do Cineteatro Eduardo Brazão e as salas com o formato em “ferradura” que se afastam um pouco da tendência pela negativa. Isto é apresentam uma inteligibilidade reduzida em função do tempo de reverberação. Com isto é possível perceber que quanto maior for o tempo de reverberação menor o STI/RASTI.

Quadro 6.13 - Valores do Volume, Número de lugares, RASTI/STI médio e Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) sem AVAC das quinze salas nacionais e do Theatro Circo [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92], [93], [94] e [95].

Salas	SPEECH TRANSMISSION INDEX (STI)				
	Volume (m3)	Nº de lugares	TR [500, 1k Hz] (s)	STI/RASTI médio	L_{Aeq} (dB) sem AVAC
Auditório da FEUP	3317	500	1,5	0,61	27
Auditório Municipal de V. N. de Gaia	3219	330	0,8	0,68	24
Casa da Cultura de Ílhavo	3779	491	1	0,68	28
Centro de Artes de Águeda	5066	398	0,8	0,67	26
Cineteatro de Amarante	2700	386	1,2	0,62	23
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares)	2111	386	1	0,6	32
Grande Auditório do Altice Fórum Braga	9150	998	1	0,67	24
Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra)	12000	1093	1,5	0,61	27
Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga	1320	254	0,5	0,8	25
Teatro Municipal da Covilhã	4258	600	1,4	0,64	24
Teatro Municipal de Ourém	3915	441	1	0,69	24
Auditório do Conservatório de música do Porto	3162	233	1,3	0,62	28
Teatro Sá de Miranda	2491	377	1,21	0,53	26
Teatro Nacional São João	4560	614	1,2	0,55	31
Teatro Ribeiro Conceição	4184	417	1,05	0,55	25
Theatro Circo (Braga)	9800	897	1,2	0,59	29

Quadro 6.14- Valores do Volume, Número de lugares, RASTI/STI médio e Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) com AVAC das quinze salas nacionais e do Theatro Circo [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92], [93], [94] e [95].

Salas	SPEECH TRANSMISSION INDEX (STI)				
	Volume (m ³)	Nº de lugares	TR [500, 1k Hz] (s)	STI/RASTI médio	L_{Aeq} (dB) com AVAC
Auditório da FEUP	3317	500	1,5	-	-
Auditório Municipal de V. N. de Gaia	3219	330	0,8	0,65	47
Casa da Cultura de Ílhavo	3779	491	1	-	-
Centro de Artes de Águeda	5066	398	0,8	-	-
Cineteatro de Amarante	2700	386	1,2	-	-
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares)	2111	386	1	-	-
Grande Auditório do Altice Fórum Braga	9150	998	1	-	-
Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra)	12000	1093	1,5	-	-
Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga	1320	254	0,5	-	-
Teatro Municipal da Covilhã	4258	600	1,4	-	-
Teatro Municipal de Ourém	3915	441	1	-	-
Auditório do Conservatório de música do Porto	3162	233	1,3	0,58	28
Teatro Sá de Miranda	2491	377	1,21	-	32
Teatro Nacional São João	4560	614	1,2	-	-
Teatro Ribeiro Conceição	4184	417	1,05	0,52	31
Theatro Circo (Braga)	9800	897	1,2	0,59	35

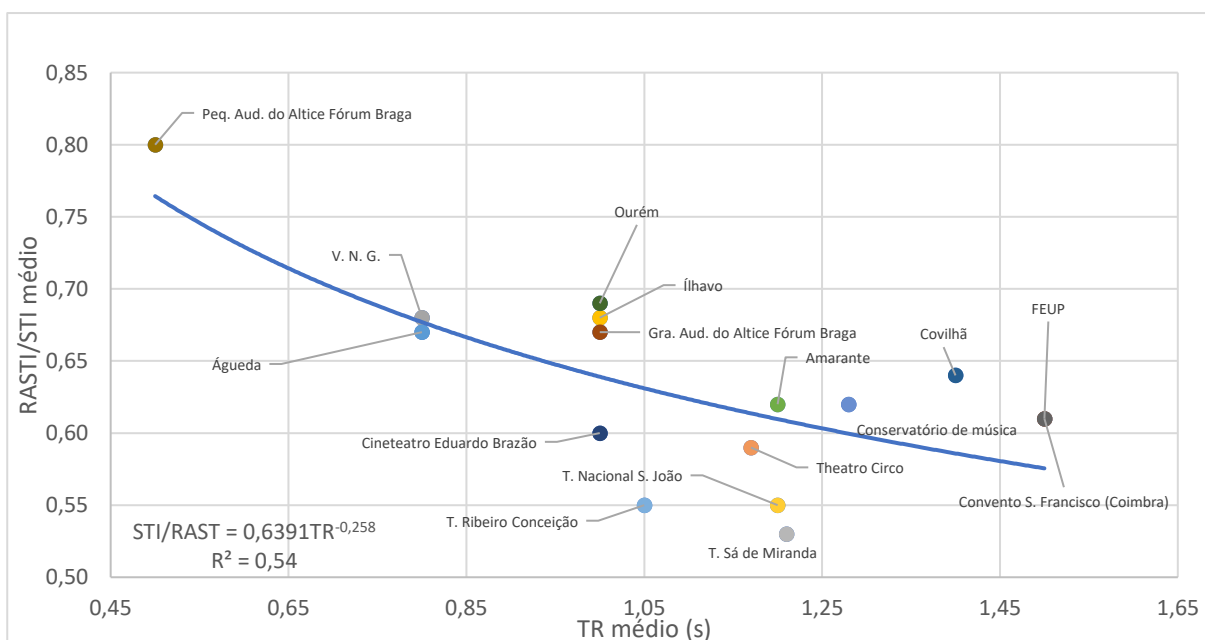


Figura 6.17 – Valores do parâmetro RASTI/STI em função do TR médio (TR [500, 1000 Hz]) das quinze salas nacionais e do Theatro Circo com linha de tendência (potência).

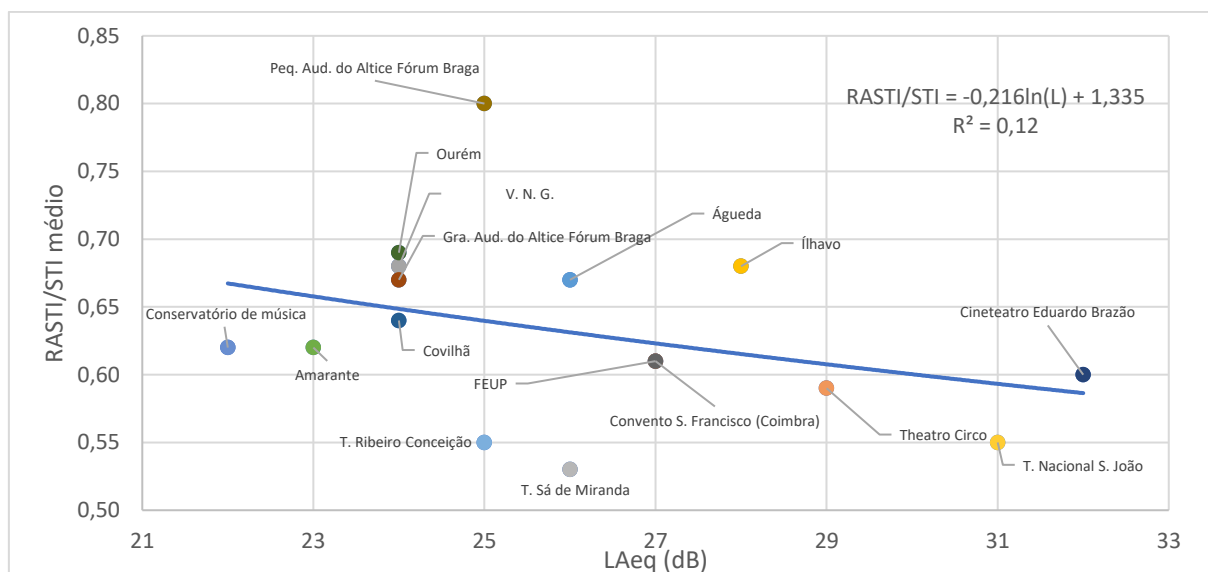


Figura 6.18 – Valores do parâmetro RASTI/STI em função do Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) sem AVAC das quinze salas nacionais e do Theatro Circo com linha de tendência (logarítmica).

No Quadro 6.14 é possível verificar que foram realizados poucos estudos com AVAC no passado tendo apenas valores de quatro salas e ainda ver que o Theatro Circo apresenta um valor muito semelhante ao Conservatório da Música do Porto e um valor muito inferior ao do Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia apesar deste apresentar um nível sonoro do ruído de fundo mais elevado.

Na Figura 6.18 é apresentada a relação do STI/RASTI médio com o nível sonoro do ruído de fundo sem AVAC. Com esta figura é possível perceber o nível sonoro não tem tanto peso na inteligibilidade como o tempo de reverberação da sala uma vez que o R^2 desta relação é 0,12 o que significa que o tempo de reverberação tem um peso superior no STI/RASTI. O valor que mais se afasta da regressão é o do Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga que apresenta um STI/RASTI médio muito superior ao que se esperava tendo em conta o nível sonoro que este apresenta.

Em suma com a análise destes parâmetros é possível perceber que o Theatro Circo em comparação com as várias salas em estudo apresenta resultados um pouco inferiores ao comparar com outras salas multifuncionais como por exemplo o Grande Auditório do Altice Fórum que apresenta um tempo de reverberação e inteligibilidade aceitáveis para uma panóplia de funções. O principal foco necessário seria aumentar a inteligibilidade da sala e tendo em consideração os tipos de uso mais comuns da sala dever-se-ia também adequar o tempo de reverberação, por exemplo utilizando soluções de absorção variável.

6.4. RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS ESTUDADOS

Ao utilizar valores de algumas salas nacionais (Teatro Ribeiro Conceição, Teatro Sá de Miranda, Teatro Nacional de São João, Auditório do Conservatório da música do Porto e Theatro Circo) foi analisada a relação entre os valores médios [500, 1000 Hz] dos parâmetros estudados de forma a perceber quais deles que possuem maior relação entre eles.

Com o auxílio do Quadro 6.15 é possível perceber que os parâmetros com maior relação têm são C_{80} vs TS ($R^2 = 0,93$), D_{50} vs C_{80} ($R^2 = 0,88$) e D_{50} vs TS ($R^2 = 0,90$) o que indica que estes parâmetros estão bastante relacionados uma vez que significa uma dependência de cerca de 90% entre estes parâmetros. Assim os parâmetros que mais têm relação são o Tempo Central e a Claridade com 93%. De forma a visualizar esta relação são apresentadas as Figuras 6.19, 6.20 e 6.21 com as regressões de cada um dos respetivos parâmetros C_{80} vs TS, D_{50} vs C_{80} e D_{50} vs TS. Por outro lado, é possível perceber que o *Speech Transmission Index* e a Claridade não possuem uma relação direta uma vez que o R^2 desta relação é de 0%. É assim possível entender que alguns parâmetros estão fortemente interligados enquanto que outros não possuem qualquer relação.

Quadro 6.15 – Quadro-matriz com os melhores valores de R^2 das várias relações entre os valores médios [500, 1000 Hz] parâmetros estudados obtidos através de regressões com os valores de cinco salas nacionais.

	TR (s)	TS (ms)	C_{80} (dB)	D_{50}	STI
TR (s)	-	-	-	-	-
TS (ms)	0,06	-	-	-	-
C_{80} (dB)	0,28	0,93	-	-	-
D_{50}	0,17	0,88	0,90	-	-
STI	0,28	0,01	0,00	0,06	-

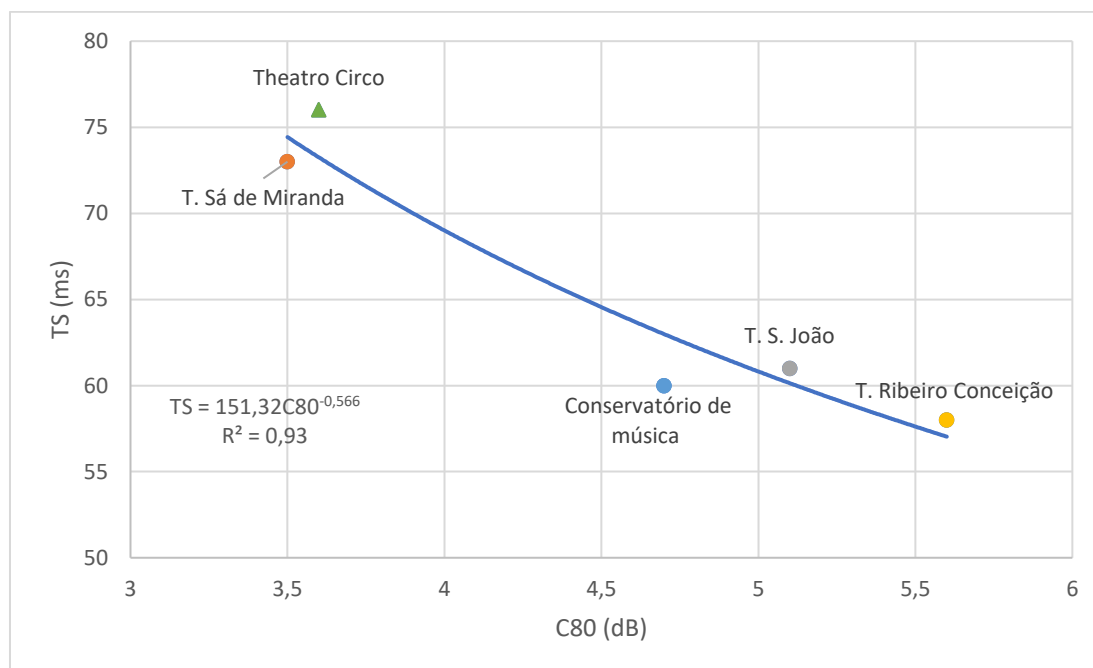


Figura 6.19 – Valores médios [500, 1000 Hz] do parâmetro TS em função da Claridade (C_{80}) de quatro salas nacionais e do Theatro Circo, com linha de tendência (potência)

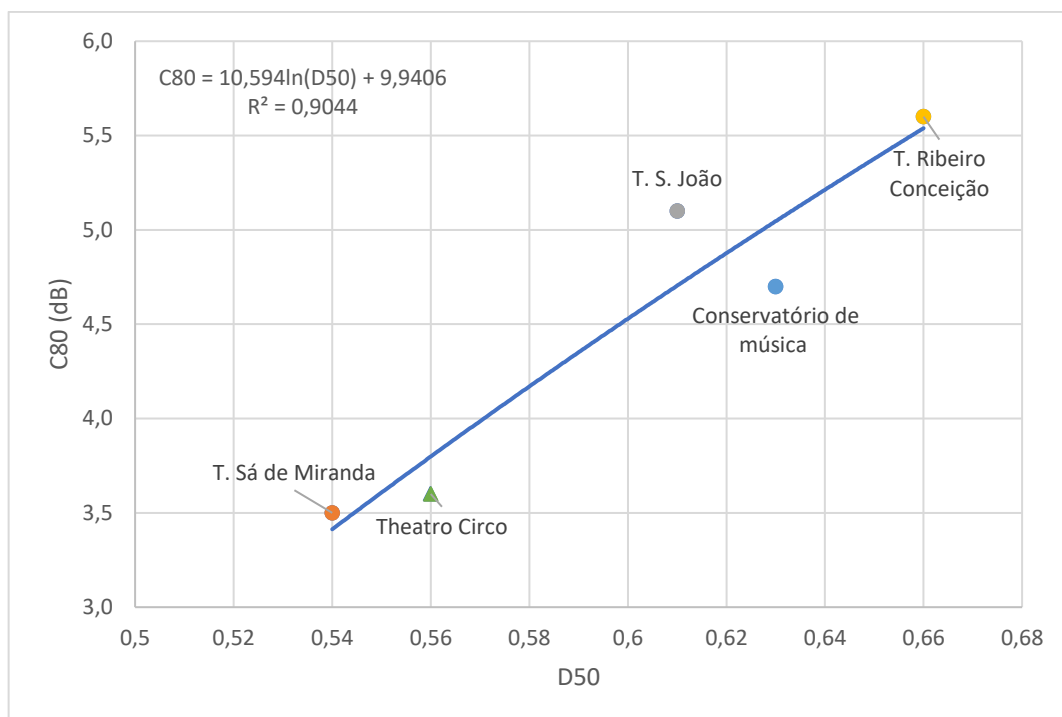


Figura 6.20 – Valores médios [500, 1000 Hz] do parâmetro Claridade (C_{80}) em função da Definição D_{50} de quatro salas nacionais e do Theatro Circo com linha de tendência (logarítmica).

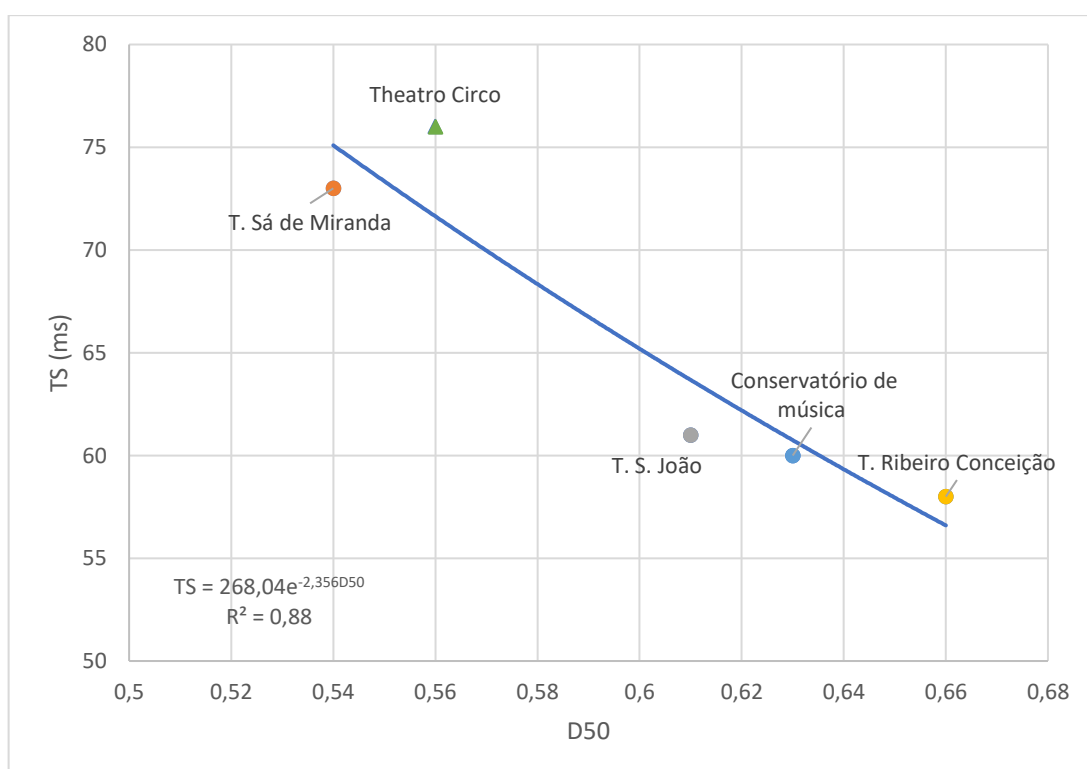


Figura 6.21– Valores médios [500, 1000 Hz] do parâmetro Tempo Central em função da Definição D_{50} de quatro salas nacionais e do Theatro Circo com linha de tendência (exponencial).

7

CONCLUSÃO

7.1. CONCLUSÕES

Nos últimos anos tem existido uma crescente procura da população pelo entretenimento, que ganha cada vez mais destaque nas várias salas do país. Esta procura alinhada à popularização dos espetáculos (tanto musicais como teatro) que deixou de ser algo apenas para as elites, trouxe uma preocupação com a acústica das salas. Não só existe esta preocupação por parte das direções das diferentes salas assim como cada vez mais o público tem essa exigência e expectativa quando vai assistir, escolhendo os lugares tendo em conta não só a visibilidade para o palco, mas também os que lhes parece que terá melhor acústica. Em certos casos de conhecer a sala escolhem lugares próximos aos onde tiveram uma boa experiência no passado. Assim várias salas a nível nacional tiveram intervenções cuidadas ao nível acústico fazendo uso de novas tecnologias e formas de construção (materiais e sistemas) que podem potenciar um melhor desempenho acústico.

De forma a obter a caracterização acústica do Theatro Circo com algum detalhe e abrangência nos vários parâmetros, foram realizadas medições *in situ* dos parâmetros mais comumente estudados. Foi feita através dos resultados obtidos nas medições efetuadas também uma análise comparativa tendo em conta alguns fatores. Primeiramente salas de renome internacionais com o formato semelhante (“ferradura”) ao da sala em estudo na presente dissertação, em segundo lugar foram comparadas as salas nacionais igualmente com o mesmo formato e por fim foram comparadas salas nacionais, porém com os mais variados formatos. Foi também realizada uma análise dos parâmetros abrangidos pela lei portuguesa (RRAE) tendo em vista o cumprimento ou não da mesma. Por último, foram comparados os resultados obtidos nas medições com os valores considerados ideais para os diferentes tipos de utilização de forma a perceber para que tipo de utilização a sala é mais ou menos adequada. No Quadro 7.1 é possível ter um resumo dos resultados obtidos assim como a análise legal e se os parâmetros são ou não adequados para o uso do teatro, música popular e ópera.

É possível verificar que quanto ao ruído de fundo o nível sonoro com o AVAC desligado é de 29 dB(A) o que é inferior ao máximo imposto por lei mesmo antes de ser aplicado o valor da incerteza. Já quando o AVAC está em funcionamento foi obtido um valor do nível sonoro de 32 dB(A) (valor já adicionando a incerteza de 3 dB(A)) o que é superior ao permitido por lei. Devendo ser assim alvo de uma averiguação uma vez que segundo o regulamento neste parâmetro é necessário que o ruído com o AVAC ligado seja inferior a 30 dB(A). Tendo em consideração o ruído de fundo obteve-se as curvas de NC e NR para a situação com o AVAC em funcionamento os valores de 31 e 32 respetivamente o que ultrapassa os valores ideais para conforto na sala.

Quanto ao tempo de reverberação foi feita a medição para a sala sem ocupação, sendo este o valor a analisar segundo a legislação, obtendo para as frequências médias um tempo de 1,2 s. Tendo em conta que segundo o RRAE o valor máximo para o tipo de uso da sala é obtido em função do volume

obteve-se que o valor máximo para esta seria de 1,07 s. Assim o tempo de reverberação é só verificado após se aplicar o legislativo fator de incerteza (35%) sendo o valor final de 0,79 s o que respeita então o máximo exigido. Foi ainda realizada uma simulação do tempo de reverberação para a sala com a ocupação total onde se obteve 1,1 s e será este o valor a considerar quando se analisa para cada tipo de utilização pois é assim que a sala vai estar durante os espetáculos. É então possível perceber que tanto para teatro (ideal entre 0,7 e 0,9 s) como para a ópera (entre 1,3 e 1,7 s) o resultado é “tolerável”, ao contrário de para música sinfónica romântica (entre 1,9 e 2,2 s) para o qual o valor é desadequado.

Com o *speech transmission index* (STI) é possível verificar que o sistema de ventilação não tem grande impacto neste parâmetro quando se averigua os resultados obtidos para as duas medições (com/sem AVAC) e nos valores máximos, médios e mínimos ou tem uma variação quase insignificante ou nem altera. Com o STI máximo de 0,67 (com AVAC) verifica-se que neste lugar (ponto P7 na plateia ao fundo da sala) a inteligibilidade é considerada “boa” (0,60 a 0,75) sendo o lugar da sala com melhor percepção para o uso da palavra. Ao analisar o STI mínimo de 0,52 percebeu-se que mesmo sendo o com menor inteligibilidade da palavra este lugar (ponto P na zona central da plateia) possui uma inteligibilidade considerada “razoável”. Com o valor médio de 0,59 vê-se que em geral a sala tem uma inteligibilidade “razoável”, mas muito próxima de “boa”.

Quanto à Claridade (C_{80}) os valores médios também não sofreram grande alteração com o funcionamento do AVAC (3,5 dB com AVAC e 3,6 dB sem AVAC) porém a sala apresenta valores desadequados para o teatro (ideal >6 dB) e para a música sinfónica (entre -2 a 2 dB) sendo apenas adequada para a ópera (3 a 4 dB). Na Definição (D_{50}) o sistema de ventilação teve também um impacto não perceptível (0,56 com e sem AVAC) sendo um valor considerado “suficiente”. Com um Tempo Central médio de 76 ms conclui-se que é um valor mais indicado para o teatro (<80 ms) mas é também tolerável para a ópera e para a música popular (>80 ms).

Tendo em consideração o STI e a Definição obtidos nas medições é possível perceber que a sala apresenta um desempenho tolerável muito próximo de ser uma boa sala para o uso da palavra. Apesar de ser uma sala um pouco mais reverberante que o indicado para a palavra é possível evidenciar que nos restantes parâmetros é bastante tolerável para este uso uma vez que as primeiras reflexões têm mais energia que as últimas. Outra conclusão que se pode tirar destes resultados é que o AVAC apesar de provocar um ruído de fundo elevado que pode ser prejudicial para a experiência do público, quase não tem impacto nos restantes parâmetros, assim sendo seria apenas necessário corrigir o ruído para que não ultrapasse os valores legais.

Ao comparar os resultados obtidos nos vários locais da sala é possível perceber que a zona com maior Claridade e *speech transmission index* são as zonas do fundo da plateia. Isto significa que para a palavra estes locais são os que vão ter melhor inteligibilidade. Uma das causas para tal é a proximidade com a parede do fundo recebendo assim as primeiras reflexões com mais energia e mais cedo que os restantes locais, não comprometendo o som direto. Para o STI os valores em toda a sala são muito próximos entre si, porém a Definição e a Claridade apresentam uma grande dispersão entre os valores do fundo da plateia e os restantes reforçando a ideia de que a proximidade à parede de fundo tem alto impacto nestes resultados.

Com a análise comparativa com as salas em “ferradura” internacionais é de destacar que era a sala de menor volume entre as estudadas sendo assim de esperar ter o valor do tempo de reverberação mais baixo o que aconteceu quando desocupada, porém, quando ocupada isto não acontecia. Contudo vale destacar que entre as estudadas o Theatro Circo apresenta a melhor Claridade para ópera não wagneriana. Ao comparar com as nacionais em ferradura o Theatro Circo apresenta

resultados muito próximos aos do Teatro Sá de Miranda (Viana de Castelo) mas é de destacar que apresenta entre todas as em estudo o melhor STI apesar de todas elas terem uma maior afinidade para a palavra com por exemplo *stand up comedy* ou peças de teatro (sempre considerando o não uso de sistemas de reforço eletroacústico).

Quadro 7.1 - Resumo dos parâmetros acústicos medidos no Theatro Circo com as respetivas verificações regulamentares e avaliação em função da utilização

Parâmetros	Situação	Valor medição	Valor com incerteza (RRAE)	Valor máximo (RRAE)	Parecer (RRAE)	Avaliação face ao ideal		
						Teatro	Ópera	Música Sinfónica
Ruído de Fundo (L_{aeq} (dB))	(com AVAC)	35,1	32,1	30	Não verifica	-	-	-
	(sem AVAC)	29,1	26,1		Verifica	-	-	-
Curvas de incomodidade	NC (com/sem AVAC)	31/21	-	-	-	T/B	T/B	T/B
	NR (com/sem AVAC)	32/23	-	-	-	T/B	T/B	T/B
Tempo de Reverberação (s) (TR [500, 1k Hz])	desocupado	1,2	0,79	1,07	Verifica	T	T	M
	ocupada 100%*	1,1	-	-	-	T	T	M
Speech Transmission Index (STI)	máximo (com/sem AVAC)	0,67/0,68	-	-	-	Boa		
	médio (com/sem AVAC)	0,59/0,59	-	-	-	Tolerável		
	mínimo (com/sem AVAC)	0,52/0,53	-	-	-	Tolerável		
Clareza (C_{80}) (dB)	(com/sem AVAC)	3,5/3,6	-	-	-	M	B	M
Definição (D_{50})	(com/sem AVAC)	0,56/0,56	-	-	-	Tolerável		
Tempo Central (ms) (ts)		76	-	-	-	B	T	
Rácio de Baixos (BR)		1,05	-	-	-	T	M	

B - Bom, M – Mau, T – Tolerável, * Previsão

Comparando às salas nacionais com diferentes formatos apesar de ser a segunda sala mais volumosa apresenta o quarto tempo de reverberação mais elevado, mas em contrapartida apresenta o STI/RASTI mais baixo entre as estudadas o que se pode justificar por ser também a sala com maior nível sonoro equivalente do ruído de fundo.

Em suma o Theatro Circo não apresenta valores considerados completamente ideais para a grande maioria das atividades que possui no seu reportório de espetáculos, mas não estão distantes a estes. Assim, apresentando resultados aceitáveis para variados usos, algo característico de um espaço que, como o Theatro Circo, recebe uma panóplia de espetáculos de diferentes tipos. Esta característica poderia ser ainda mais potenciada através por exemplo de um sistema de acústica variável que permitiria à sala se adaptar consoante a utilização. Isto através de um estudo da melhor forma sem que seja comprometida a estética do espaço que se tem vindo a preservar desde a sua fundação.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Através do estudo detalhado dos vários parâmetros medidos *in situ* foi possível obter uma análise da acústica do espaço que poderá servir de base para futuras comparações e/ou futuros estudos. Foi possível ao longo do estudo perceber que se poderia efetuar de forma a complementar este estudo, assim como algumas medidas que poderiam ser tomadas de forma melhorar o desempenho acústico da sala, sendo elas:

- Realizar a medição do tempo de reverberação com a sala verdadeiramente ocupada de forma a obter o valor do tempo de reverberação real e comparar este com o que foi estimado;
- Realizar um estudo da opinião popular nos vários locais da sala e para os variados usos da mesma para obter uma avaliação subjetiva da sala e assim entender se o estudo objetivo condiz com a opinião geral subjetiva;
- Efetuar um estudo de eventuais melhorias acústicas com especial atenção aos parâmetros que influenciam a sala para o uso da palavra, que segundo o estudo realizado pode ser o tipo de utilização mais prejudicado, tendo sempre em atenção a manutenção da estética da centenária da sala;
- Realizar ensaios com reforço eletroacústico de modo a entender como os parâmetros se iriam alterar e assim entender também como estes são durante os espetáculos que usam este reforço;
- Realizar manutenções periódicas ao sistema AVAC de forma a este não provocar o ruído excessivo detectado que prejudica a acústica do Theatro Circo;
- Replicar a sala num modelo computacional de forma a conseguir hipóteses para potenciar os valores dos parâmetros acústicos estudados com especial atenção ao STI e ao Tempo de reverberação já que estes são os que mais se encontram afastados do ideal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. P. O. Carvalho, *Acústica Ambiental e de Edifícios.*, Edição 8.21, Porto: FEUP, 2024.
- [2] P. Editora, “Dicionário infopédia da Língua Portuguesa,” Porto Editora, <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/som>. [Acedido em 20 Fevereiro 2025].
- [3] H. Rafael, “Mundo Educação,” <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/o-que-som.htm>. [Acedido em 21 Fevereiro 2025].
- [4] D. B. Yeom, “ENTinfoNZ,” <https://www.entinfo.nz/anatomy-of-the-ear/>. [Acedido em 20 Fevereiro 2025].
- [5] S. acústica. <https://saudeacustica.pt/o-ouvido/>. [Acedido em 20 Fevereiro 2025].
- [6] N. Miguel, “fq.pt,” <https://www.fq.pt/som/propagacao-do-som>. [Acedido em 21 Fevereiro 2025].
- [7] A. L. R. Cassiano, “Yduka,” <https://yduka.com/sumarios-e-licoes-8/item/propaga-som>. [Acedido em 21 Fevereiro 2025].
- [8] “Nacional Oceanic and Atmospheric Administration,” <https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/air-pressure>. [Acedido em 21 Fevereiro 2025].
- [9] N. Miguel, “fq.pt,” <https://www.fq.pt/som/velocidade-do-som>. [Acedido em 21 Fevereiro 2025].
- [10] H. Rafael, “Mundo Educação,” <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/velocidade-intensidade-som.htm>. [Acedido em 21 Fevereiro 2025].
- [11] C. Luis, “dBwave,” <https://dbwave.pt/o-que-e-a-potencia-sonora-como-se-mede-e-para-que-serve/>. [Acedido em 21 Fevereiro 2025].
- [12] d. O. Antonio, “APO partner,” <https://www.apopartner.pt/ruido-laboral-parametros-de-descricao-do-som/>. [Acedido em 21 Fevereiro 2025].
- [13] “Porto Editora,” [https://www.infopedia.pt/artigos/\\$frequencia-\(fisica\)](https://www.infopedia.pt/artigos/$frequencia-(fisica)). [Acedido em 22 Fevereiro 2025].
- [14] “Fluke,” <https://www.fluke.com/pt-pt/saber-mais/blog/aplicacoes-eletricas/o-que-e-a-frequencia>. [Acedido em 22 Fevereiro 2025].
- [15] “Música Sacra e Adoração,” <https://musicaeadoracao.com.br/55511/de-20-20-000-hz-os-limites-da-audicao-humana/>. [Acedido em 22 Fevereiro 2025].
- [16] “Exercicios Brasil,” <https://exercicios.brasilecola.uol.com.br/exercicios-fisica/exercicios-sobre-nivel-intensidade-sonora.htm>. [Acedido em 21 Fevereiro 2025].

- [17] “Física_Química AEPaião,” <https://sites.google.com/agrupaiao.pt/zerog/f%C3%ADsica/f%C3%ADsica-8-%C2%BA/som/atributos-do-som-2-timbre>. [Acedido em 22 Fevereiro 2025].
- [18] “Ameaça Sonora,” <https://ameacasonora12c.blogspot.com/2011/01/sons-puros-e-sons-complexos.html>. [Acedido em 22 Fevereiro 2025].
- [19] “Viagem ao mundo da audição,” <https://www.cochlea.eu/pt/som/>. [Acedido em 22 Fevereiro 2025].
- [20] C. M. S. Domiciano, “Mundo Educação,” <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/velocidade-comprimento-onda.htm>. [Acedido em 22 Fevereiro 2025].
- [21] C. L. F. Lucas, “Concepção acústica,” <https://www.concepcaoacustica.com/post/o-sonometro-e-as-curvas-de-ponderacao>. [Acedido em 22 Fevereiro 2025].
- [22] N. Luiz, “Medição da intensidade sonora,” https://conservatorio0.tripod.com/carac_ouvido_.htm. [Acedido em 23 Fevereiro 2025].
- [23] “Highways England,” <https://virtualengage.arup.com/a358-taunton-to-southfields/documents/Bookcase/PEIR/PEIR%20Appendices/Appendix%2011.1%20Glossary%20of%20Acoustic%20Terminology.pdf> [Acedido em 23 Fevereiro 2025].
- [24] E. Porto, “Infopedia,” [https://www.infopedia.pt/artigos/\\$absorcao-acustica](https://www.infopedia.pt/artigos/$absorcao-acustica). [Acedido em 24 Fevereiro 2025].
- [25] “Diasen,” <https://www.diasen.com/pt-pt/absorcao-sonora/>. [Acedido em 24 Fevereiro 2025].
- [26] “Leca saint-gobain,” <https://www.leca.pt/glossario-leca/coeficiente-de-absorcao-sonora>. [Acedido em 24 Fevereiro 2025].
- [27] “Pladur algiss,” <https://corporativo.pladur.com/pt-pt/solucoes/absorcao-acustica/>. [Acedido em 24 Fevereiro 2025].
- [28] “E-civil,” <https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-coeficiente-de-absorcao-sonora-nrc.html>. [Acedido em 25 Fevereiro 2025].
- [29] NP EN ISO 11654:2023, “Acústica – Materiais absorventes sonoros a utilizar em edifícios – Avaliação da absorção sonora,” em *European Norm Standard*.
- [30] “Vivacity,” <http://www.vivacity.com.br/produtosDetalhes.asp?id=1428&link=Tubos%20de%20Kundt&subCat=1354&idCat=42>. [Acedido em 25 Fevereiro 2025].
- [31] “University of Southampton,” <https://www.southampton.ac.uk/research/facilities/reverberation-chambers>. [Acedido em 25 Fevereiro 2025].

- [32] V. C. Sidney, “Portal acustica,” <https://portalacustica.info/absorcao-sonora-de-um-material-acustico/>. [Acedido em 25 Fevereiro 2025].
- [33] S. Letícia, “Materiais e silenciadores para absorção de ruído,” <https://slideplayer.com.br/slide/355975/>. [Acedido em 25 Fevereiro 2025].
- [34] S. Pablo, “Portal acústica,” <https://portalacustica.info/material-acustico-projetavel/#:~:text=Tecnologias%20que%20envolvem%20ressonadores%20As%20tecnologias%20mais,Ressonadores%20com%20cavidades%20curvas.%20Ressonadores%20com%20microtubos.> [Acedido em 25 Fevereiro 2025].
- [35] R. A. P. Ferreira, “Comportamento acústico de componentes da construção à base de aglomerados de fibras de madeira e cimento,” FEUP, Porto, 2010.
- [36] “Archiproducts Logo,” https://www.archiproducts.com/pt/produtos/fantoni/painel-de-teto-falso-acustico-de-mdf-4for_710089. [Acedido em 26 Fevereiro 2025].
- [37] J. R. P. L. Z. Maekawa, *Environmental and Architectural Acoustics*, UK: CRC Press, 2019.
- [38] “NTI audio,” <https://www.nti-audio.com/pt/aplicacoes/acustica-de-salas-e-edificios/tempo-de-reverberacao-medicao>. [Acedido em 27 Fevereiro 2025].
- [39] EN ISO 3382, “cústica – Medição de parâmetros de acústica de salas – Parte 2: Tempo de reverberação em salas correntes,” em *European Norm Standard*. [Acedido em 27 Fevereiro 2025].
- [40] Blumenau, “Garbe,” <https://garbeindustria.com.br/blog/o-que-e-tempo-de-reverberacao/>. [Acedido em 26 Fevereiro 2025].
- [41] F. V. Erasmo, M. Fernanda e P. Stephan, “Caracterização da qualidade acústica de salas de aula para prática e ensino musical,” Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Porto Alegre, 2016.
- [42] A. Kjellberg, “Effects of Reverberation Time on the Cognitive Load in Speech Communication: Theoretical Considerations,” p. 2, 21 Outubro 2004.
- [43] “Grupo flexivel,” <https://www.grupoflexicel.com/pt/solu%C3%A7%C3%B5es/solu%C3%A7%C3%B5es-ac%C3%BAsticas/ru%C3%ADdo-a%C3%A9reo>. [Acedido em 27 Fevereiro 2025].
- [44] “Soprema,” <https://www.soprema.pt/pt/isolamento-acustico-solucoes-ruído-aéreo>. [Acedido em 27 Fevereiro 2025].
- [45] NP EN ISO 16283-1, “Acústica – Medição *in situ* do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção; Parte 1: Isolamento a sons de condução aérea,” 2014.

- [46] “ISO 10140: Acústica — Medição Laboratorial do Isolamento Acústico de Elementos de Construção,” 2021.
- [47] “Imperialum,” <https://www.imperialum.com/plataforma-imperialum/solucoes-imperialum-2/solucoes-de-isolamento-acustico/sons-aereos-e-de-percussao/>. [Acedido em 28 Fevereiro 2025].
- [48] EN ISO 16283-2, “Acústica – Medição *in situ* do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção – Parte 2: Isolamento a sons de percussão,” 2018.
- [49] “Ambergo,” <https://ambergo.pt/produtos/acustica/maquina-de-percussao-mi006-cesva/>. [Acedido em 28 Fevereiro 2025].
- [50] F. H. Ronald, “Bunker audio,” <https://www.bunker-audio.com/bunker-audio-portal-sonido-documentos.php?id=2>. [Acedido em 1 Março 2025].
- [51] “Archtoolbox,” <https://www.archtoolbox.com/room-sound-levels/>. [Acedido em 1 Março 2025].
- [52] A. Carrión Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, Barcelona: Talleres Gráficos Hostench, 1998.
- [53] “ELTA,” <https://eltauk.com/blog/what-are-noise-rating-levels/>. [Acedido em 28 Março 2025].
- [54] B. B. Eddy, “DPA microphones,” <https://www.dpamicrophones.com/mic-university/background-knowledge/facts-about-speech-intelligibility/>. [Acedido em 2 Março 2025].
- [55] S. Peter, “Siemens,” <https://community.sw.siemens.com/s/article/articulation-index>. [Acedido em 2 Março 2025].
- [56] Macdonald, “Siemens,” <https://community.sw.siemens.com/s/article/sound-metrics-speech-interference-level>. [Acedido em 2 Março 2025].
- [57] D. Foley, “Acoustic fields,” <https://www.acousticfields.com/flutter-echo-apply-room-acoustics/>. [Acedido em 3 Março 2025].
- [58] “Vibrasom,” <https://vibrasom.ind.br/tratamento-acustico/difusor-acustico-de-madeira.php>. [Acedido em 3 Março 2025].
- [59] “Alibaba,” <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/Acoustic-Diffuser-Studio-Music-Recording-Room-1600068011895.html>. [Acedido em 3 Março 2025].
- [60] B. Croce, “Portal acústica,” <https://portalacustica.info/qualificacao-acustica-de-salas/>. [Acedido em 4 Março 2025].
- [61] A. Samuel e Z. Paulo, “Using the parameters of definition, D50, and reverberation time, RT, TO,” *Laboratory of Environmental and Industrial Acoustics and Acoustic Comfort*, Universidade Federal do Paraná –, Brasil, 2016.

- [62] L. Aidar. <https://www.todamateria.com.br/teatro-grego/>. [Acedido em 20 Março 2025].
- [63] Zairon, “Wikimedia Commons,” <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30354378>. [Acedido em 20 Março 2025].
- [64] “Wikipedia,” https://it.wikipedia.org/wiki/Theatre_Royal_Drury_Lane#/media/File:Microcosm_of_London_Plate_032_-_Drury_lane_interior_1808.jpg. [Acedido em 21 Março 2025].
- [65] M. Barron, *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, Londres: Spon Press, 2010.
- [66] “San Francisco Opera,” <https://www.sfopera.com/learn/about-opera/a-brief-history-of-opera/>. [Acedido em 8 Abril 2025].
- [67] J. Machado, “Estrolabio,” <https://estrolabio.blogs.sapo.pt/1308427.html>. [Acedido em 8 Abril 2025].
- [68] “Peroni,” https://www.peroni.com/lang_PT/scheda.php?id=51444&langchange=pt. [Acedido em 15 Março 2025].
- [69] “Royal ALbert Hall,” <https://www.royalalberthall.com/about-the-hall/building-and-history/our-history/mushrooms>. [Acedido em 21 Março 2025].
- [70] RRAE - Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho, Diário da República, 2008.
- [71] “Theatro Circo,” <https://www.theatrocirco.com/>. [Acedido em 13 Março 2025].
- [72] “Wikipedia,” https://pt.wikipedia.org/wiki/Theatro_Circo. [Acedido em 30 Março 2025].
- [73] “Taste Braga,” <https://tastebraga.com/6-factos-theatro-circo-provavelmente-nao-conhecia/>. [Acedido em 30 Março 2025].
- [74] “Andarilho,” <https://andarilho.pt/2022/10/26/theatro-circo-uma-das-mais-bonitas-salas-de-espetaculo-em-portugal/>. [Acedido em 30 Março 2025].
- [75] “Google Earth,” <https://earth.google.com/web/search/Theatro+Circo>. [Acedido em 30 Março 2025].
- [76] T. Circo, “Theatro Circo Dossier Técnico,” https://www.theatrocirco.com/ficheiros/salas/salapdf_1.pdf. [Acedido em 31 Março 2025].
- [77] “WeBraga,” <https://webraga.pt/blog/um-pouco-de-teatro-o-theatro-circo-e-a-freira-fantasma/>. [Acedido em 30 Março 2025].
- [78] Contacto pessoal por e-mail com o Theatro Circo em 8 Abril 2025.
- [79] “Hottinger Brüel & Kjær,” <https://www.bksv.com/pt/transducers/acoustic/calibrators/sound-calibrator-4231>. [Acedido em 2 Abril 2025].

- [80] “Hottinger Brüel & Kjær Logo,” <https://www.bksv.com/pt/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4189>. [Acedido em 2 Abril 2025].
- [81] L. L. Beranek, – Concert and Opera Halls: How They Sound. Acoustical Society of America, 1996.
- [82] A. Forte, “Caracterização Acústica do Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo)”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2024.
- [83] H. Mocarzel, “Caracterização Acústica do Teatro Nacional São João (Porto)”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2024.
- [84] M. Gomes, “Caracterização Acústica do Teatro Ribeiro Conceição”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2025.
- [85] S. Barbosa, “Caracterização Acústica de Grandes Auditórios. O caso do auditório da FEUP”. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [86] A. Hirayama, “Caracterização Acústica do Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [87] M. Ribas, “Caraterização Acústica da Casa da Cultura de Ílhavo”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [88] H. Abelha, “Caracterização Acústica do Centro de Artes de Águeda”. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2022.
- [89] P. Prada, “Caracterização Acústica do Renovado Cineteatro de Amarante”. Dissertação Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [90] D. Silva, “Caracterização Acústica do CineTeatro Eduardo Brazão”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [91] G. Rocha, “Caraterização Acústica do centro de congressos do Altice Fórum Braga”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2022.
- [92] T. Miranda, “Caracterização Acústica do Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra)”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [93] P. Tavares, “Caracterização Acústica do Teatro Municipal da Covilhã”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.
- [94] F. Vieira, “Caracterização Acústica do Teatro Municipal de Ourém”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023.

- [95] J. Pinto, “Caracterização Acústica do Auditório do Conservatório de Música do Porto”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2024.