

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DO COLISEU DO PORTO

JOANA ALVES PAZ DO VALE

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 2026

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2025/2026

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E GEORRECURSOS

Tel. +351 22 508 1901



m.ec@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



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 - 2025/2026 - Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2026*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo 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 electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A meus pais

“O conhecimento dirige a prática; no entanto, a prática aumenta o conhecimento.”

Thomas Fuller

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação não teria sido possível sem o contributo e o apoio de várias pessoas, às quais expresso o meu sincero agradecimento.

Ao meu orientador, Professor António Pedro Oliveira de Carvalho, agradeço a disponibilidade, a orientação rigorosa e a paciência ao longo de todo o processo. A sua dedicação foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

Ao Engenheiro António Eduardo Batista da Costa, agradeço o suporte técnico indispensável e a permanente disponibilidade para esclarecer dúvidas ao longo das diferentes fases deste projecto.

Aos meus colegas e amigos, deixo a minha gratidão pelo apoio, pelas palavras de incentivo e pela amizade que tornaram este percurso mais leve.

Aos meus pais e à minha família, agradeço o amor, a paciência e o apoio incondicional em todos os momentos deste caminho. Foram o meu maior suporte ao longo de todo este percurso e este trabalho é também deles.

Por fim, agradeço à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, ao Coliseu do Porto Ageas e a todas as entidades envolvidas pela colaboração e condições proporcionadas ao desenvolvimento deste estudo.

RESUMO

A qualidade acústica de uma sala de espectáculos é imprescindível para o bem-estar e apreciação da arte. Este factor desempenha um papel fundamental na optimização das condições sonoras, que dependem tanto da tipologia do evento como da lotação da sala, visando garantir uma experiência auditiva de excelência a cada indivíduo.

Esta dissertação foca-se na caracterização acústica do Coliseu Porto Ageas, considerado um símbolo da cidade do Porto. O presente estudo foi realizado através de medições realizadas *in situ*, seguidas da análise dos respectivos resultados.

Inaugurado em 1941, o Coliseu assume-se como um exemplar da arquitectura modernista em Portugal. Projectado por vários arquitectos, esta colaboração conferiu uma pluralidade tipológica à sala de espectáculos, conferindo à mesma versatilidade necessária para acolher ópera, concertos sinfónicos, circo e outros eventos, quicá sem comprometer a sua integridade acústica. Ao contrário de outras salas “à italiana”, o Coliseu possui uma configuração em ferradura com uma capacidade de cerca de 3000 a 4000 pessoas, criando assim um desafio à eficaz propagação do som.

Esta análise inicia-se com a contextualização de conceitos teóricos e de parâmetros acústicos fundamentais: Tempo de Reverberação (TR), Absorção Sonora, Inteligibilidade da palavra, *Early Decay Time* (EDT), Tempo Central (TS), Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}), *Speech Transmission Index* (STI), entre outros. Avaliou-se, com especial atenção, o impacto da introdução de cadeiras na zona da plateia, no rés do chão. Devido à ausência de um sistema de condicionamento de ar no edifício, os possíveis efeitos do AVAC foram desconsiderados nesta análise.

Os ensaios *in situ* permitiram conhecer o comportamento da sala de espectáculos no âmbito do regulamento nacional em vigor (RRAE) e dos valores considerados ideais para os diversos tipos de espectáculos. Com o auditório vazio, os valores médios obtidos, com/sem cadeiras na plateia e sem a utilização de qualquer amplificação sonora, foram os seguintes:

- Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) = 25 dB;
- Curvas de incomodidade: NC = 15 e NR = 18;
- Tempo de reverberação médio (TR) [500, 1.000 Hz]: 2,6/3,5 s com 0% e 2,40/2,71 s com 100% de ocupação (previsão);

- *Speech Transmission Index* (STI) máximo, médio e mínimo: 0,56/0,53, 0,44/0,41, 0,39/0,37;
- Claridade média (C_{80}), [500, 1.000 Hz]: -0,45/-2,15 dB;
- Definição média (D_{50}), [500, 1.000 Hz]: 0,37/0,29;
- Tempo Central médio (TS), [500, 1.000 Hz]: 162/224 ms;
- Rácios de Baixos (BR): 0,85/0,82.

Os resultados demonstraram que o Coliseu do Porto, sem a utilização de um sistema de reforço acústico, não atinge os valores considerados ideais, segundo a literatura, adequados à maioria das funções integradas no seu programa. As grandes reverberações existentes na sala principal tornam a sala não propícia à realização de espectáculos de foco na “palavra”, sem o auxílio de reforço electroacústico. Alguns tipos de música, que beneficiam de um ambiente reverberante, são os mais indicados.

Comparando o Coliseu a vinte e duas salas nacionais e vinte e seis salas internacionais, de volumes aproximados, concluiu-se que apenas recintos de dimensões similares oferecem um termo de comparação relevante. Os valores obtidos, no Coliseu do Porto, alinham-se com os valores para salas internacionais de grande escala.

Após a avaliação e comparação de vários parâmetros acústicos foram sugeridas algumas soluções, para possíveis desenvolvimentos futuros na presente sala, com o intuito de complementar as conclusões obtidas no documento actual.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Tempo de Reverberação, Inteligibilidade da Palavra, Coliseu, Porto.

ABSTRACT

The acoustic quality of a performance venue is essential for the well-being and enjoyment of the arts. This factor plays a key role in optimising sound conditions, which depend both on the type of event and the venue's capacity, with the aim of ensuring an excellent listening experience for every individual.

This dissertation focuses on the acoustic characterisation of the Coliseu Porto Ageas, considered a symbol of the city of Porto. The present study was carried out through on-site measurements, followed by an analysis of the data.

Opened in 1941, the Coliseu stands as a prime example of modernist architecture in Portugal. Designed by several architects, this collaboration endowed the performance hall with a variety of architectural styles, giving it the versatility required to host opera, symphonic concerts, circus performances and other events, without compromising its acoustic integrity. Unlike other 'Italian-style' theatres, the Coliseu has a horseshoe-shaped layout with a capacity of around 3,000 to 4,000 people, thus posing a challenge to the effective propagation of sound.

This analysis begins by setting out the theoretical concepts and fundamental acoustic parameters: Reverberation Time (RT), Sound Absorption, Speech Intelligibility, Early Decay Time (EDT), Central Time (TS), Clarity (C_{80}), Definition (D_{50}) and the Speech Transmission Index (STI), amongst others. Attention was paid to assessing the impact of introducing seating in the audience area on the ground floor. Furthermore, due to the absence of an air-conditioning system in the building, the possible effects of HVAC were disregarded in this analysis.

The on-site tests provided insight into the performance of the auditorium in relation to the current national regulations (RRAE) and the values considered ideal for various types of performances. With the auditorium empty, the average values obtained, with and without seats in the auditorium and without the use of any sound reinforcement, were as follows:

- Equivalent sound level of background noise (L_{Aeq}) = 25 dB;
- Noise Criterion (NC) = 15 and Noise Rating (NR) = 18;
- Average reverberation time (RT) [500, 1.000 Hz]: 2.6/3.5 s at 0% and 2.40/2.71 s at 100% occupancy (forecast);
- Maximum, average and minimum Speech Transmission Index (STI): 0.56/0.53, 0.44/0.41, 0.39/0.37;

- Average Clarity (C_{80}), [500, 1.000 Hz]: -0.45/-2.15 dB;
- Average Definition (D_{50}), [500, 1.000 Hz]: 0.37/0.29;
- Average Center Time (TS), [500, 1.000 Hz]: 162/224 ms;
- Bass Ratio (BR): 0.85/0.82.

The results showed that the Coliseu do Porto does not meet the standards considered ideal in the literature for most of the types of events included in its programme. The significant reverberation in the main auditorium makes it unsuitable for performances centred on the ‘spoken word’ without the aid of electroacoustic amplification. Certain types of music, which benefit from a reverberant environment, are best suited to the venue.

Comparing the Coliseu with twenty-two national venues and twenty-six international venues of similar volume, it was concluded that only venues of similar dimensions provide a relevant basis for comparison. The values obtained at the Coliseu do Porto are in line with those for large-scale international venues.

Following the assessment and comparison of various acoustic parameters, several solutions were suggested for possible future developments in this venue, with the aim of complementing the conclusions reached in the current study.

KEYWORDS: Acoustics, Reverberation Time, Speech Intelligibility, Coliseu, Porto.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO GERAL.....	1
1.2 OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	1
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....	2
2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES	5
2.1 INTRODUÇÃO.....	5
2.1.1 NATUREZA E PROPAGAÇÃO DO SOM.....	5
2.1.2 SISTEMA AUDITIVO HUMANO.....	6
2.2 CONCEITOS TEÓRICOS BÁSICOS.....	8
2.2.1 PRESSÃO ATMOSFÉRICA	8
2.2.2 CELERIDADE E TEMPERATURA	8
2.2.3 INTENSIDADE SONORA E POTÊNCIA SONORA.....	9
2.2.4 PRESSÃO SONORA E NÍVEIS DE PRESSÃO SONORA	10
2.2.5 FREQUÊNCIA	12
2.2.5.1 <i>Definição</i>	12
2.2.5.2 <i>Bandas de Frequência</i>	12
2.2.5.3 <i>Curvas de Ponderação</i>	13
2.2.5.4 <i>Comprimento de Onda</i>	15
2.2.5.5 <i>Análise no Tempo</i>	16
2.3 ABSORÇÃO SONORA	17
2.3.1 INTRODUÇÃO	17
2.3.2 MATERIAIS E SISTEMAS DE ABSORÇÃO SONORA.....	19
2.3.2.1 <i>Conceitos</i>	19

2.3.2.2 Materiais Porosos e Fibrosos	19
2.3.2.3 Ressonadores	20
2.3.2.4 Membranas.....	21
2.4 TEMPO DE REVERBERAÇÃO	22
2.4.1 INTRODUÇÃO.....	22
2.4.2 EARLY DECAY TIME (EDT).....	23
2.4.3 RÁCIO DE BAIXOS (BR).....	24
2.4.4 FÓRMULAS DE PREVISÃO	25
2.5 INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	26
2.5.1 INTRODUÇÃO.....	26
2.5.2 EMISSÃO DA VOZ.....	27
2.5.3 PARÂMETROS DE MEDIDA	28
2.6 ISOLAMENTO SONORO	29
2.6.1 DEFINIÇÃO.....	29
2.6.2 RUÍDO DE FUNDO	29
2.6.3 CURVAS DE INCOMODIDADE	30
2.7 ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA	31
2.7.1 INTRODUÇÃO.....	31
2.7.2 CONDICIONAMENTO ACÚSTICO PELO ESPAÇO ARQUITECTÓNICO.....	31
2.7.2.1 Reflexões.....	31
2.7.2.2 Ecos	32
2.7.2.3 Discos Voadores	33
2.7.2.4 Difusão	33
2.7.2.5 Acústica Variável	33
2.8 PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJECTIVOS.....	34
2.8.1 CLARIDADE (C_{80}).....	34
2.8.2 DEFINIÇÃO (D_{50})	35
2.8.3 TEMPO CENTRAL (TS).....	36
2.9 PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJECTIVOS	36

3 ESTADO DA ARTE.....	39
3.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS SALAS DE ESPECTÁCULO	39
3.1.1 PERÍODO GREGO.....	39
3.1.2 PERÍODO ROMANO.....	41
3.1.3 RENASCIMENTO	43
3.1.4 PERÍODO BARROCO	45
3.1.5 NEOCLASSICISMO	47
3.1.6 ROMANTISMO	48
3.2 ENQUADRAMENTO	49
3.2.1 ASPECTOS GERAIS	49
3.2.2 A VOZ CANTADA	50
3.2.3 CONFIGURAÇÃO DA SALA	52
3.2.4 PALCO E PROSCÉNIO	53
3.2.5 PLATEIA E CADEIRAS DE ORQUESTRA.....	55
3.2.6 TRIBUNAS E CAMAROTES.....	56
3.2.7 FRISAS.....	56
3.2.8 BALCÕES E GALERIAS	57
3.2.9 TECTOS E PAREDES – MATERIAIS E SUPERFÍCIES.....	58
3.3 EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS PARA DIFERENTES ESPECTÁCULOS.....	60
3.3.1 EXIGÊNCIAS PARA A PALAVRA.....	60
3.3.2 EXIGÊNCIAS PARA A MÚSICA.....	61
3.3.3 EXIGÊNCIAS PARA O TEATRO	61
3.3.4 EXIGÊNCIAS PARA A ÓPERA	62
3.3.5 MULTIFUNÇÕES	62
3.4 LEGISLAÇÃO EM PORTUGAL	63
4 COLISEU DO PORTO	67
4.1 ENQUADRAMENTO GERAL.....	67
4.2 CARACTERIZAÇÃO ARQUITECTÓNICA E GEOMÉTRICA.....	72

5	METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	79
5.1	EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO.....	79
5.2	PONTOS DE MEDIÇÃO	81
5.3	PARÂMETROS E PROCEDIMENTOS	84
5.3.1	RUÍDO DE FUNDO	84
5.3.2	OUTROS PARÂMETROS	85
5.3.3	TRATAMENTO E APRESENTAÇÃO DE DADOS	87
6	RESULTADOS	91
6.1	INTRODUÇÃO.....	91
6.2	RUÍDO DE FUNDO	91
6.2.1	MEDIÇÕES <i>IN SITU</i>	91
6.2.2	CURVAS DE INCOMODIDADE NC E NR.....	97
6.2.3	LEGISLAÇÃO NACIONAL (RRAE).....	99
6.3	TEMPO DE REVERBERAÇÃO	100
6.3.1	SALA VAZIA.....	100
6.3.2	SALA OCUPADA – PREVISÃO	107
6.3.3	VALORES IDEAIS – COMPARAÇÃO	111
6.3.4	LEGISLAÇÃO NACIONAL (RRAE).....	112
6.4	RÁCIO DE BAIXOS (BR)	114
6.5	INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA.....	119
6.6	CLARIDADE (C_{80}).....	124
6.7	DEFINIÇÃO (D_{50}).....	133
6.8	TEMPO CENTRAL (T_s).....	141
6.9	EFEITO DE CADEIRAS NA PLATEIA.....	149
6.10	ANÁLISE DE INTERDEPENDÊNCIAS DE PARÂMETROS ACÚSTICOS	150
7	COMPARAÇÃO COM OUTRAS SALAS.....	155
7.1	INTRODUÇÃO.....	155

7.2 SALAS NACIONAIS	157
7.2.1 TEMPO DE REVERBERAÇÃO	157
7.2.2 SPEECH TRANSMISSION INDEX (STI)	163
7.2.3 CLARIDADE (C_{80})	166
7.2.4 DEFINIÇÃO (D_{50})	169
7.2.5 TEMPO CENTRAL (TS)	172
7.3 SALAS INTERNACIONAIS	175
7.3.1 INTRODUÇÃO	175
7.3.2 TEMPO DE REVERBERAÇÃO	176
7.3.3 CLARIDADE (C_{80})	180
7.3.4 ANÁLISE DE INTERDEPENDÊNCIA DE PARÂMETROS ACÚSTICOS	183
8 CONCLUSÃO	185
8.1 CONCLUSÕES	185
8.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	188
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	191

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação do ouvido humano em corte parcial. A orelha capta as ondas sonoras, encaminhando-as pelo canal auditivo até ao tímpano. No ouvido médio, os ossículos convertem e transmitem as vibrações à cóclea. No interior da cóclea, dá-se a conversão, através da perilinfa, da endolinfa e das células ciliadas, da energia mecânica para impulsos eléctricos, que irão ser transmitidos ao cérebro. Adaptado de [3].	7
Figura 2.2 - Relação entre a densidade molecular e a variação da pressão sonora, ao longo no tempo, na propagação de uma onda longitudinal. As zonas de compressão e rarefacção estão correlacionadas com os picos de pressão positiva e negativa [5].	8
Figura 2.3 - Inter-relação entre grandezas acústicas fundamentais: potência (W), pressão (p) e intensidade (I) [7].	9
Figura 2.4 - Relação entre pressão sonora (em μPa) e o nível de pressão sonora (em dB), com exemplos quotidianos e limiares de audição e dor [7].	11
Figura 2.5 – Curvas de Ponderação A, B, C e D [8].	14
Figura 2.6 – Curvas de igual sensibilidade auditiva [10].	15
Figura 2.7 – Ondas directas e ondas reflectidas, adaptado de [13].	22
Figura 3.1 e 3.2 - Planta e fotografia do Teatro de Epidauro, Grécia [27]].	40
Figura 3.3 - <i>Odeon</i> de Herodes Ático, que no passado possuía um tecto de madeira de cedro, em Atenas [28].	41
Figura 3.4 e 3.5 - Planta e fotografia do Teatro Romano de Aspendus, em Belkiz na Turquia [29].	42
Figura 3.6 e 3.7 - Teatro Olímpico de Vicenza, Itália [30][31].	44
Figura 3.8 e 3.9 - Desenho do Teatro <i>The Globe</i> e fotografia da vista do palco e do público no Teatro Globe de Shakespeare (réplica) [32].	44
Figura 3.10 e 3.11 - Teatro alla Scala, Milão, Itália, adaptado de [34].	45
Figura 3.12 - Teatro alla Scala, Milão, Itália [35].	46
Figura 3.13 e 3.14 - Fotografias de Redoutensaal, Viena, e Altes Gewandhaus, Leipzig, [36][37].	47
Figura 3.15 e 3.16 - Festspielhaus de Bayreuth, Alemanha, e do fosso de orquestra coberto, à direita, [38].	49
Figura 3.17 - Conceito de formante do cantor, ou <i>singing formant</i> , desenvolvido pelo investigador sueco Johan Sundberg [41].	51
Figura 3.18 - Padrão de direcções da voz para um cantor barítono [25].	52
Figura 3.19 - Plantas simples a demonstrar as formas de auditórios [25].	53
Figura 3.20 - Um tecto inclinado imediatamente à frente do proscénio, direcciona as reflexões [25].	54
Figura 3.21 - Proporções básicas de balcões para uma sala de concertos, baseando-se na razão entre a profundidade D e a altura H, e o ângulo vertical de visão, θ [25].	57
Figura 3.22 - Reflexões laterais da plateia inferior do Philharmonic Hall, em Nova Iorque, [25].	59
Figura 4.1 - Localização do Coliseu do Porto Ageas, Porto [47][48].	67

Figura 4.2 e 4.3 - Entrada do Salão Jardim Passos Manuel e pequeno palco ao ar livre [43][45][49].	68
Figura 4.4 e 4.5 - Jardim Esplanada e Salão de Festas do Salão Jardim Passos Manuel [43][45][49].	68
Figura 4.6 e 4.7 - Desenhos de Fachada para o Projecto do Coliseu do Porto, por Jan Wils e Cassiano Branco, respectivamente, adaptados de [53][55][56].	69
Figura 4.8 e 4.9 - Alçado Principal: Coliseu do Porto, por Cassiano Branco, e Vista de Fachada de autor não identificado, adaptado de [57][49].	70
Figura 4.10 e 4.11 - Danos causados pelo incêndio de 1996, na Sala Principal do Coliseu do Porto [43][45][49].	71
Figura 4.12 e 4.13 - Reconstrução da plateia, após o incêndio de 1996, na Sala Principal do Coliseu do Porto [43][45][49].	71
Figura 4.14 e 4.15 - Reconstrução do tecto e do fosso de orquestra, após o incêndio de 1996, na Sala Principal do Coliseu do Porto [43][45][49].	71
Figura 4.16 – Coliseu do Porto: Corte Transversal, por Cassiano Branco [adaptado de 71].	72
Figura 4.17 – Coliseu do Porto: corte longitudinal (1937-1939), [adaptado de 72].	72
Figura 4.18 – Coliseu do Porto: Planta de Secções disponíveis para o público [45].	73
Figura 4.19 – Coliseu do Porto: planta de palco, adaptado de [60]	74
Figura 4.20, 4.21 e 4.22 – Elementos de Art Deco e Estilo Transatlântico, no Coliseu do Porto [fotos da autora].	75
Figura 4.23 – Pormenores de construção de escadas de acesso à galeria, em betão armado, por George Tombu [63].	76
Figura 4.24 e 4.25 – Cadeiras levemente acolchoadas, na plateia (esq.) e nos camarotes (dir.) [fotos da autora].	76
Figura 4.26 e 4.27 – Cadeiras e assentos na Galeria Reservada (esq.) e no Geral (dir.) sem qualquer acolchoamento [fotos da autora].	77
Figura 5.1, 5.2 e 5.3 – Equipamentos de medição: Medidor a Laser Hilti PD-I, Fonte Sonora Brüel & Kjaer 4720 e Sonómetro Brüel & Kjær 2260, respectivamente [64][65][72].	80
Figura 5.4, 5.5 e 5.6 – Equipamentos de medição: Calibrador de microfone Brüel & Kjær 4231, Microfone de 13mm Brüel & Kjær 4189, e Tripé portátil Brüel & Kjær UA0049, respectivamente [67][68][69].	81
Figura 5.7 e 5.8 – Equipamentos de medição: Fonte Sonora Brüel & Kjær 4224 e exemplo de utilização do <i>Software</i> DIRAC [71][70].	81
Figura 5.9 e 5.10 – Sala de Espectáculos Principal, do Coliseu do Porto, no 1º e 2º ensaio realizados, respectivamente [fotos da autora].	82
Figura 5.11, 5.12 e 5.13 – Equipamento de medição: Sonómetro Brüel & Kjær 2260 e Fonte Sonora Brüel & Kjaer 4224, resultado obtido durante um ensaio realizado e Fonte Sonora Brüel & Kjaer 4720, respectivamente [fotos da autora].	82

Figura 5.14 – Planta do Coliseu do Porto com a representação da Fonte Sonora (FS) no Palco e dos 20 pontos escolhidos, para a realização dos ensaios de TR, ts, C ₈₀ , D ₅₀ e STI: pontos 1,2,3,4,5,6 e 7 situados na Plateia; 8,9, 10 e 11 situados na Tribuna; 12, 13 e 14 situados nos Camarotes; 15, 16 e 17 situados na Galeria; 18, 19 e 20 situados no Geral [adaptado de 58].	83
Figura 5.15 – Planta do Coliseu do Porto com a representação da Fonte Sonora (FS) no Palco e dos três pontos escolhidos, para a realização das medições do ruído de fundo: 1 e 2 situados na Plateia; 3 situado na Tribuna [adaptado de 58].	84
Figura 5.16 e 5.17 – Realização do estudo no ponto P1, com Sonómetro aplicado no tripé, durante o 2º ensaio (esq.), e fontes sonoras colocadas no palco, durante o 1º ensaio (dir.) [fotos da autora].	86
Figura 5.18 – Planta do Coliseu do Porto com a representação da Fonte Sonora (FS) no Palco, dos 20 pontos medidos (a azul) e dos 20 pontos simétricos, em relação ao eixo central da sala, para a utilização no mapa de isolinhas de vários parâmetros [adaptado de 58].	89
Figura 6.1 – Valores de Níveis de Pressão Sonora (dB) do Ruído de Fundo, para bandas de frequência de 1/3 de oitava, nos pontos RF1, RF2 e RF3, medidos no Coliseu do Porto.	94
Figura 6.2 – Valores de Níveis Sonoros (dB(A)) do Ruído de Fundo, para bandas de frequência de 1/3 de oitava, nos pontos RF1, RF2 e RF3, medidos no Coliseu do Porto.	94
Figura 6.3 – Valores Médios de Níveis de Pressão Sonora (dB) do Ruído de Fundo, para bandas de frequência de 1/3 de oitava, nos pontos RF1, RF2 e RF3, com e sem a curva A, medidos no Coliseu do Porto.	95
Figura 6.4 – Valores Médios de Níveis de Pressão Sonora (dB) do Ruído de Fundo, em bandas de frequência de 1/1 de oitava, nos pontos RF1, RF2 e RF3, com e sem a curva A, medidos no Coliseu do Porto.	97
Figura 6.5 – Comparação dos Níveis de Pressão Sonora (dB) do Ruído de Fundo, para bandas de frequência de 1/1 de oitava, nos pontos RF1, RF2 e RF3, com as curvas NC, no Coliseu do Porto.	98
Figura 6.6 – Comparação dos Níveis de Pressão Sonora (dB) do Ruído de Fundo, para bandas de frequência de 1/1 de oitava, nos pontos RF1, RF2 e RF3, com as curvas NR, no Coliseu do Porto.	98
Figura 6.7 – Valores do Tempo de Reverberação (TR), em bandas de 1/3 de oitava, para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	101
Figura 6.8 – Valores do Tempo de Reverberação (TR), em bandas de 1/3 de oitava, para os 20 pontos medidos, com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	101
Figura 6.9 – Valores das médias do Tempo de Reverberação (TR) por frequência, e respectiva variação, em bandas de 1/3 de oitava, para os 20 pontos medidos, sem e com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	102
Figura 6.10 – Valores do Tempo de Reverberação (TR), em bandas de 1/1 de oitava, para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.	105
Figura 6.11 – Valores do Tempo de Reverberação (TR), em bandas de 1/1 de oitava, para os 20 pontos medidos, com cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.	105
Figura 6.12 – Mapa de Isolinhas do Tempo de Reverberação, TR [500, 1k Hz], em bandas de 1/1 de oitava, para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.	106

Figura 6.13 – Mapa de Isolinhas do Tempo de Reverberação, TR [500, 1k Hz], em bandas de 1/1 de oitava, para os 20 pontos medidos, com cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.	106
Figura 6.14 – Previsão dos valores do Tempo de Reverberação, em bandas de frequência de 1/1 de oitava, para a sala a 100% e 50% de ocupação sem cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	109
Figura 6.15 – Previsão dos valores do Tempo de Reverberação, em bandas de frequência de 1/1 de oitava, para a sala a 100% e 50% de ocupação com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	111
Figura 6.16 - Valores do parâmetro Rácio de Baixos, para os 20 pontos medidos, e da sua média, para o teste sem cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	116
Figura 6.17 – Valores do parâmetro Rácio de Baixos, para os 20 pontos medidos, e da sua média, para o teste com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	116
Figura 6.18 – Mapa de Isolinhas do Rácio de Baixos (BR), para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.	117
Figura 6.19 – Mapa de Isolinhas do Rácio de Baixos (BR), para os 20 pontos medidos, com cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.	117
Figura 6.20 – Comparação entre os valores do parâmetro Rácio de Baixos, para os 20 pontos medidos, e a correspondente variação, para os testes sem e com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto. .	119
Figura 6.21 – Valores do parâmetro STI, para os 20 pontos medidos, e da sua média, para o teste sem cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	121
Figura 6.22 – Valores do parâmetro STI, para os 20 pontos medidos, e da sua média, para o teste com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	121
Figura 6.23 – Comparação entre os valores do parâmetro STI, para os 20 pontos medidos, e a correspondente variação, para os testes sem e com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	122
Figura 6.24 – Mapa de Isolinhas do parâmetro STI, para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.	123
Figura 6.25 – Mapa de Isolinhas do parâmetro STI, para os 20 pontos medidos, com cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.	123
Figura 6.26 – Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, sem cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto.	127
Figura 6.27 – Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, com cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto.	127
Figura 6.28 – Média dos valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, sem e com cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto.	128
Figura 6.29 – Comparação dos valores médios (500, 1kHz) do parâmetro Claridade (C_{80}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, e a média global, sem cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.	128
Figura 6.30 – Comparação dos valores médios (500, 1kHz) do parâmetro Claridade (C_{80}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, e a média global, com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.	129

Figura 6.31 – Comparação dos valores médios do parâmetro Claridade (C_{80}) para os 20 pontos medidos, a respectiva variação, sem e com cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto.	129
Figura 6.32 – Mapa de Isolinhas do parâmetro Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz], para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.	130
Figura 6.33 – Mapa de Isolinhas do parâmetro Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz], para os 20 pontos medidos, com cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.	130
Figura 6.34 – Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, sem cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.	136
Figura 6.35 – Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.	136
Figura 6.36 – Média dos valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, sem e com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.	137
Figura 6.37 – Comparação dos valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, e a média, sem cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.	137
Figura 6.38 – Comparação dos valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, e a média, com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.	138
Figura 6.39 – Comparação dos valores médios do parâmetro Definição (D_{50}) para os 20 pontos medidos, a respectiva variação, sem e com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.	138
Figura 6.40 – Mapa de Isolinhas do parâmetro Definição (D_{50}) [500, 1k Hz], para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.	139
Figura 6.41 – Mapa de Isolinhas do parâmetro Definição (D_{50}) [500, 1k Hz], para os 20 pontos medidos, com cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.	139
Figura 6.42 – Valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, sem cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.	144
Figura 6.43 – Valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.	144
Figura 6.44 – Média dos valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, sem e com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.	145
Figura 6.45 – Comparação dos valores do parâmetro Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] para os 20 pontos medidos, e a média, sem cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.	145
Figura 6.46 – Comparação dos valores do parâmetro Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] para os 20 pontos medidos, e a média, sem cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.	146
Figura 6.47 – Comparação dos valores médios do parâmetro Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] para os 20 pontos medidos, sem e com cadeiras na plateia, e a correspondente variação, do Coliseu do Porto.	146
Figura 6.48 – Mapa de Isolinhas parâmetro Tempo Central (TS), para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.	147
Figura 6.49 – Mapa de Isolinhas parâmetro Tempo Central (TS), para os 20 pontos medidos, com cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.	147

Figura 6.50 – Comparação dos valores médios dos parâmetros Claridade (C_{80}) e Definição (D_{50}) ([500, 1k Hz]) para os 20 pontos medidos, com cadeiras na plateia e linha de tendência (linear), no Coliseu do Porto.	153
Figura 6.51 – Comparação dos valores médios dos parâmetros Claridade (C_{80}) e Tempo Central (T_s) ([500, 1k Hz]) para os 20 pontos medidos, com cadeiras na plateia e linha de tendência (linear), no Coliseu do Porto.	153
Figura 6.52 – Comparação dos valores médios dos parâmetros Definição (D_{50}) e Tempo Central (T_s) ([500, 1k Hz]) para os 20 pontos medidos, com cadeiras na plateia e linha de tendência (exponencial), no Coliseu do Porto.	154
Figura 7.1 – Valores do parâmetro TR [500, 1k Hz] em função do volume de vinte e duas salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (logarítmica).	160
Figura 7.2 – Valores do parâmetro TR [500, 1k Hz] em função do número de lugares de vinte e duas salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (logarítmica).	160
Figura 7.3 – Valores do parâmetro TR [500, 1k Hz] em função do rácio volume/número de lugares de vinte e duas salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (logarítmica).	161
Figura 7.4 – Valores dos parâmetros STI ou RASTI, em função de TR [500, 1k Hz] de vinte e duas salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (logarítmica).	165
Figura 7.5 – Valores dos parâmetros STI ou RASTI, em função do Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}), sem AVAC, de vinte e duas salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (exponencial).	166
Figura 7.6 – Valores da Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz] em função do volume de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (linear).	168
Figura 7.7 – Valores da Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz] em função do número de lugares de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (linear).	168
Figura 7.8 – Valores da Definição (D_{50}) [500, 1k Hz] em função do número de lugares de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (linear).	171
Figura 7.9 – Valores da Definição (D_{50}) [500, 1k Hz] em função do número de lugares de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (linear).	171
Figura 7.10 – Valores do Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] em função do volume de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (exponencial).	174
Figura 7.11 – Valores do Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] em função do número de lugares de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (exponencial).	174
Figura 7.12 – Valores do Tempo de Reverberação (TR) [500, 1k Hz] em função do volume de 26 salas internacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (linear).	179
Figura 7.13 – Valores do Tempo de Reverberação (TR) [500, 1k Hz] em função da capacidade de 26 salas internacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (logarítmica).	179
Figura 7.14 – Valores médios da Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz] em função do volume de 20 salas internacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (logarítmica).	182

Figura 7.15 – Valores médios da Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz] em função da capacidade de 20 salas internacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (linear).	182
Figura 7.16 – Comparação de valores médios da Claridade (C_{80}) e do Tempo de Reverberação (TR) [500, 1k Hz] de 20 salas internacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (logarítmica).	183

ÍNDICE DE TABELAS

Quadro 2.1 – Valores de coeficientes de absorção sonora (α), de alguns materiais ou sistemas [adaptado de 1].....	18
Quadro 2.2 – Valores ideais para o Tempo de reverberação em função do tipo de utilização, adaptado de [1].....	23
Quadro 2.3 – Valores de BR (<i>Bass Ratio</i>) e Tempo de Reverberação em diferentes salas de concertos, com ocupação [16].	25
Quadro 2.4 – Variabilidade da emissão de voz entre as vogais e consoantes, adaptado de [1].	27
Quadro 2.5 – Classificação da inteligibilidade da palavra através da gama de valores obtidos em STI e RASTI [adaptado de 1].	28
Quadro 2.6 – Valores ideais para a Claridade (C_{80}) em função do tipo de utilização, adaptado de [1].	34
Quadro 2.7 – Classificação de valores da Definição (D_{50}) [23][74].	35
Quadro 4.1 – Valores aproximados da altura média, perímetro, área e volume da sala principal do Coliseu do Porto.	77
Quadro 5.1 – Ensaios realizados em cada ponto escolhido, para a medição do Ruído de Fundo, e a distância de cada ponto à Fonte Sonora (FS)	85
Quadro 5.2 – Ensaios realizados em cada ponto escolhido, para a medição do Ruído de Fundo, e a distância de cada ponto à Fonte Sonora (FS).	86
Quadro 6.1 – Valores de Níveis de Pressão Sonora (dB) e Níveis Sonoros (dB(A)), Nível de Pressão Sonora Equivalente (L_{eq}), Nível Sonoro Equivalente (L_{Aeq}), Média Logarítmica e ΔL para bandas de frequência de 1/3 de oitava, nos pontos RF1, RF2 e RF3, medidos no Coliseu do Porto.	93
Quadro 6.2 – Valores de Níveis de Pressão Sonora (dB) e Níveis Sonoros (dB(A)), Nível de Pressão Sonora Equivalente (L_{eq}), Nível Sonoro Equivalente (L_{Aeq}), Média Logarítmica e ΔL , para bandas de frequência de 1/1 de oitava, nos pontos RF1, RF2 e RF3, medidos no Coliseu do Porto.	96
Quadro 6.3 – Valores de NC e NR, calculados nos pontos RF1, RF2 e RF3, e comparados com os valores máximos recomendados, no Coliseu do Porto.	97
Quadro 6.4 – Avaliação regulamentar (RRAE) do Nível Sonoro Contínuo equivalente (L_{Aeq}), no Coliseu do Porto.	100
Quadro 6.5 – Valores do Tempo de Reverberação (TR), em bandas de 1/1 de oitava, e a respectiva média e desvio padrão, para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto (+, - : maior e menor valor em cada coluna).	103
Quadro 6.6 – Valores do Tempo de Reverberação (TR), em bandas de 1/1 de oitava, e a respectiva média e desvio padrão, para os 20 pontos medidos, com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto (+, - : maior e menor valor em cada coluna).	104
Quadro 6.7 – Cálculo da área total de utilização, para a sala a 100% e 50% de ocupação e sem cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	108

Quadro 6.8 – Cálculo da Absorção Sonora (A), a partir da área de utilização e dos coeficientes de absorção, para a sala a 100% e 50% de ocupação e sem cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	108
Quadro 6.9 – Cálculo da previsão de valores do Tempo de Reverberação, para a sala a 100% e 50% de ocupação sem cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	108
Quadro 6.10 – Cálculo da área total de utilização, para a sala a 100% e 50% de ocupação e com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	110
Quadro 6.11 – Cálculo da Absorção Sonora (A), a partir da área de utilização e dos coeficientes de absorção, para a sala a 100% e 50% de ocupação e com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	110
Quadro 6.12 – Cálculo da previsão de valores do Tempo de Reverberação, para a sala a 100% e 50% de ocupação com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	110
Quadro 6.13 – Comparação dos valores obtidos para o Tempo de Reverberação médio com os valores recomendados, nas frequências de 500 e 1k Hz, sem e com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	112
Quadro 6.14 – Avaliação Regulamentar (RRAE) do Tempo de Reverberação médio, nas frequências de 500 e 1k Hz, sem e com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto, para a função “palavra” e “cinema”.	113
Quadro 6.15 – Valores do parâmetro Récio de Baixos, para os 20 pontos medidos, e a respectiva média e desvio padrão, sem e com cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).	115
Quadro 6.16 – Valores do parâmetro Rácio de Baixos e do Tempo de Reverberação, para os 20 pontos medidos, e as respectivas médias, sem e com cadeiras na Plateia, e a comparação com os valores ideais, do Coliseu do Porto.	118
Quadro 6.17 – Valores do parâmetro STI, para os 20 pontos medidos, sem e com cadeiras na Plateia, e as respectivas variações entre ensaios e a comparação com os valores ideais, do Coliseu do Porto. (+, -: maior e menor valor em cada coluna).	120
Quadro 6.18 – Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os 20 pontos medidos, e a respectiva média e desvio padrão, sem cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).	125
Quadro 6.19 – Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os 20 pontos medidos, e a respectiva média e desvio padrão, com cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).	126
Quadro 6.20 – Valores médios do parâmetro Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz], para os 20 pontos medidos, e a respectiva média e variação, sem e com cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).	131
Quadro 6.21 – Comparação dos valores obtidos para a Claridade (C_{80}) média com os valores recomendados [1], na média das bandas de frequências de 500 e 1k Hz, sem e com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.	132

Quadro 6.22 – Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os 20 pontos medidos, e as respectivas médias, desvios padrão e classificação subjectiva (para a palavra), sem cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).	134
Quadro 6.23 – Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os 20 pontos medidos, e as respectivas médias, desvios padrão e classificação subjectiva (para a palavra), com cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).	135
Quadro 6.24 – Valores médios do parâmetro Definição (D_{50}) [500, 1k Hz] para os 20 pontos medidos, sem e com cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna). ...	140
Quadro 6.25 – Valores do parâmetro Tempo Central (T_S) para os 20 pontos medidos, e as respectivas médias e desvios padrão, sem cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).	142
Quadro 6.26 – Valores do parâmetro Tempo Central (T_S) para os 20 pontos medidos, e as respectivas médias e desvios padrão, com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).	143
Quadro 6.27 – Valores médios do parâmetro Tempo Central (T_S) [500, 1k Hz] para os 20 pontos medidos, sem e com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).	148
Quadro 6.28 – Efeito da presença de cadeiras na plateia, nos parâmetros acústicos medidos no Coliseu do Porto.	149
Quadro 6.29 – Valores médios dos parâmetros Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}) e Tempo Central (T_S), para os 20 pontos medidos, com cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).	152
Quadro 6.30 – Coeficientes de determinação (R^2) obtidos nas linhas de tendência das correlações entre parâmetros acústicos.	154
Quadro 7.1 – Comparação de diversas funções, entre vinte e duas salas de espectáculos nacionais.	156
Quadro 7.2 – Volume, Número de Lugares, Volume por assento e Tempo de Reverberação médio [500, 1k Hz] de vinte e duas salas nacionais e do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna) [78][79][80][81][82][83][84][85][86][87][88][89][90][91][92][93][94][95][96][97].	159
Quadro 7.3 – Verificação dos valores ideais do parâmetro Tempo de Reverberação médio [500, 1k Hz] de acordo com vários tipos de função de vinte e duas salas nacionais e do Coliseu do Porto [1]. ...	162
Quadro 7.4 – Volume, Número de Lugares, STI médio e Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) de vinte e duas salas nacionais e do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna) [78][79][80][81][82][83][84][85][86][87][88][89][90][91][92][93][94][95][96][97].	164
Quadro 7.5 – Valores da Claridade (C_{80}) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8k Hz e o valor médio e mediano de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna) [78][79][80][81][82][83][84][85][86][87].	167

Quadro 7.6 – Valores da Definição (D_{50}) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8k Hz e o valor médio e mediano de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto (+,-: maior e menor valor em cada coluna) [78][79][80][81][82][83][84][85][86][87].	170
Quadro 7.7 – Valores do Tempo Central (TS) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8k Hz e o valor médio e mediano de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto (+,-: maior e menor valor em cada coluna) [78][79][80][81][82][83][84][85][86][87].	173
Quadro 7.8 – Lista de 26 Salas de Espectáculo Internacionais e do Coliseu do Porto, com a cidade, país e sigla utilizada nos gráficos do capítulo [21].	175
Quadro 7.9 – Lista de 26 salas de espectáculo Internacionais e do Coliseu do Porto, com siglas, volume, nº de lugares e Tempo de Reverberação médio [500, 1k Hz] (+,-: maior e menor valor em cada coluna) [21].	177
Quadro 7.10 – Lista de 20 Salas de Espectáculo Internacionais e do Coliseu do Porto, com siglas, volume, nº de lugares e Claridade média [500, 1k Hz] (+,-: maior e menor valor em cada coluna) [21].	181
Quadro 7.11 – Coeficientes de determinação (R^2) obtidos nas linhas de tendência das correlações entre os valores médios da Claridade (C_{80}) e do Tempo de Reverberação (TR) com o volume e o número de lugares em salas internacionais e no Coliseu do Porto.	184
Quadro 8.1 – Resumo de parâmetros acústicos obtidos no Coliseu do Porto, com respectivas verificações regulamentares (RRAE) e avaliação funcional.	187

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A	[m ²]	Absorção sonora equivalente
AC		<i>Articulation Class</i>
AI		<i>Articulation Index</i> (Índice de Articulação)
ASHRAE		<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BR		<i>Bass Ratio</i> (Rácio de Baixos)
B	[Hz]	Largura de banda
c	[m/s]	Celeridade
C_{80}	[dB]	Claridade
α		Coefficiente de absorção sonora
λ	[m]	Comprimento de onda
D_{50}		Definição
r	[m]	Distância
EDT	[s]	<i>Early Decay Time</i> (Tempo de Decaimento Curto)
E	[J]	Energia
FS		Fonte Sonora
f	[Hz]	Frequência
f_0	[Hz]	Frequência central - valor médio
f_1	[Hz]	Frequência de limite inferior
f_2	[Hz]	Frequência de limite superior
FEUP		Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
ITDG	[ms]	<i>Initial Time Delay Gap</i>
I	[W/m ²]	Intensidade Sonora
I_0	[W/m ²]	Intensidade Sonora de Referência
K		Constante
K_{tonal}	[3 dBA]	Penalização RGR
$L_{\text{ar,Nt}}$	[dB]	Nível de avaliação padronizado do ruído particular de equipamentos
L_i	[dB]	Nível de Intensidade Sonora

L_p	[dB]	Nível de Pressão Sonora
L_w	[dB]	Nível de Potência Sonora
L_{eq}	[dB]	Nível de pressão sonora contínua equivalente
L_N	[dB]	Nível de pressão sonora estatístico
L_A	[dB]	Nível Sonoro
NC		<i>Noise Criteria</i>
NR		<i>Noise Rating</i>
ρ	[kg/m ³]	Massa Volúmica
p	[Pa]	Pressão
P_{at}	[Pa]	Pressão atmosférica
p_0	[Pa]	Pressão de Referência
RASTI		<i>Rapid Speech Transmission Index</i>
RRAE		Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios
S	[m ²]	Superfície real do material
SIL	[dB]	<i>Speech Interference Level</i>
STI		<i>Speech Transmission Index</i>
T	[s]	Período
T	[K]	Temperatura
t_s	[ms]	Tempo central
TR	[s]	Tempo de reverberação
W	[W]	Potência Sonora
W_0	[W]	Potência Sonora de Referência
θ	[°C]	Temperatura
V	[m ³]	Volume do compartimento

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO GERAL

A Acústica é o ramo da Física que se dedica ao estudo e análise das ondas sonoras, que consistem em variações de pressão mecânicas num meio elástico, da sua propagação e percepção pelo ouvido humano ou animal. A morfologia da envolvente, características de materiais e geometria, possuem também um papel fundamental no comportamento sonoro do local.

Desde a Antiguidade, o som desempenha um papel fundamental em actividades sociais e culturais, funcionando como o principal vector de comunicação e de expressão artística entre seres humanos. Em Arquitectura e Engenharia Civil, a qualidade acústica de um espaço determina o seu sucesso funcional, sendo que a mesma é condicionada pela sua capacidade de propagar o som de modo claro e inteligível, garantindo assim um equilíbrio acústico para satisfazer as exigências de artistas e espectadores.

Ao contrário da realidade actual, a construção e reabilitação de muitos teatros e salas de espectáculos históricos ocorreram na ausência de um projecto acústico específico e sem o apoio de ferramentas rigorosas de modelação acústica. A natureza multiusos de vários destes espaços, como é o caso do Coliseu Porto Ageas, acresce à complexidade da mitigação de anomalias acústicas existentes aquando da busca de soluções que garantam a preservação do património histórico em paralelo com as exigências técnicas requeridas pela engenharia moderna.

1.2 OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objectivo primordial da presente dissertação é a caracterização acústica da Sala Principal do Coliseu Porto Ageas, edifício emblemático situado na cidade do Porto.

A análise de dados obtidos através de medições realizadas *in situ*, utilizando instrumentos de medição facultados pelo Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, forma uma das bases para a realização desta dissertação. O cálculo e a avaliação de parâmetros acústicos objectivos, como o Tempo de Reverberação (TR), Inteligibilidade da Palavra (STI), Claridade (C_{80}), etc., permitem realizar uma análise detalhada da adequabilidade funcional da sala. O intuito é verificar se os valores medidos garantem uma experiência auditiva de elevada qualidade ou se seria necessário concretizar alguma melhoria nas condições acústicas existentes.

Paralelamente, é também necessário confrontar os resultados obtidos com as exigências legais requeridas pelo Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), presentemente em vigor em Portugal, para novas edificações.

Por fim, a comparação de parâmetros acústicos com outras salas de referência, nacionais e internacionais, através de dados de literatura e de estudos realizados em prévias dissertações, permite a contextualização da qualidade acústica do Coliseu do Porto a nível nacional e a nível mundial e fornece uma mais-valia para reafirmar soluções de melhoramento acústico sugeridas *a posteriori*, durante a fase de conclusão do estudo.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A presente dissertação encontra-se dividida em oito capítulos, estruturados de modo a conjugar a análise técnica realizada, com o contexto histórico e fundamentos teóricos referentes a edificações de funções análogas ao Coliseu do Porto.

No primeiro capítulo, “Introdução”, estabelece-se o enquadramento e a motivação do tema de dissertação, assim como os objectivos que se espera concretizar.

No segundo capítulo, “Conceitos e Definições”, são elucidados os fundamentos teóricos necessários para a concretização do estudo acústico presente, garantindo o suporte científico essencial para uma interpretação correcta dos resultados.

No terceiro capítulo, “Estado da Arte”, analisa-se a evolução das características acústicas de salas de espectáculos ao longo da História, as particularidades da edificação em estudo e as várias exigências relativas às diferentes funções, estabelecendo o quadro legal português em vigor (RRAE).

No quarto capítulo, “Coliseu do Porto”, é exposto o caso em estudo através de um enquadramento histórico e funcional do edifício. Apresenta-se também a caracterização arquitectónica e geométrica da sala, dando especial atenção às dimensões e materiais presentes, através de documentação, registos fotográficos, plantas e cortes existentes.

No quinto capítulo, “Metodologia dos Ensaios”, é apresentado o equipamento, os procedimentos e o mapeamento dos pontos onde se concretizaram as medições in situ.

No sexto capítulo, “Resultados”, dá-se a conhecer os dados obtidos nos ensaios previamente apresentados, seguido de uma análise comparativa dos mesmos, a nível regulamentar e com os parâmetros de qualidade acústica ideais.

No sétimo capítulo, “Comparação com Outras Salas”, os resultados obtidos neste estudo são comparados com os da documentação existente sobre outras salas, nacionais e internacionais, dando especial foco às salas internacionais de volume semelhante ao da sala principal do Coliseu.

No oitavo capítulo, “Conclusão”, as considerações finais formadas durante a concretização desta dissertação são expostas. Como complemento, são referidas possíveis melhorias e desenvolvimentos futuros deste tema.

A lista de “Referências Bibliográficas” finaliza este estudo, garantindo o reconhecimento e rigor científico da documentação consultada para a elaboração desta dissertação.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1 INTRODUÇÃO

2.1.1 NATUREZA E PROPAGAÇÃO DO SOM

O som é definido como uma onda mecânica que se propaga através de um meio elástico e que virá a ser detectada pelo ouvido humano. O meio elástico pode ser um meio gasoso (ar), no qual as ondas são longitudinais, um meio líquido (água) ou sólido (por exemplo, elementos construtivos como o betão, aço ou madeira). Este fenómeno ocorre quando a vibração de um corpo considerado como emissor transmite um estímulo mecânico às partículas próximas do meio envolvente, entregando a energia sonora por meio de colisão sucessivas entre partículas vizinhas, sem ocorrer um deslocamento permanente de matéria mas produzindo variações de pressão [1].

Para que o estímulo sonoro ocorra e seja perceptível, é necessária a conjugação de três elementos: o emissor, a fonte das vibrações ou perturbações (como por exemplo, cordas vocais, instrumentos musicais, altifalantes); o meio, o espaço físico onde a onda se propaga e cujas propriedades físicas influenciam as características da transmissão; e o receptor, que detecta as variações de pressão e transformar as mesmas em informação (por exemplo, o sistema auditivo humano, um microfone, os sensores utilizados nos testes realizados) [2].

A propagação do “som” (isto é, das variações de pressão) no ar ocorre, habitualmente, de uma forma esférica concêntrica a partir da fonte. Este movimento vibratório propaga-se através de zonas alternadas de compressão (regiões de elevada pressão e agrupamento de partículas de ar) e de rarefacção (regiões de baixa pressão e densidade molecular). Devido à elasticidade do meio, as partículas tendem a regressar à sua posição inicial, de equilíbrio, após a passagem da

perturbação, transferindo o momento linear de uma partícula para as partículas adjacentes, criando “som” [1][3].

O som pode ser interpretado como um estímulo ou como uma sensação, dependendo se o foco incide sobre a física das perturbações ou na percepção psicoacústica do indivíduo. A psicoacústica é o termo dado ao estudo da estrutura do ouvido humano, das ondas sonoras, da percepção do som e das inter-relações entre os mesmos. O termo “som” é associado a algo agradável e/ou com significado. O ruído, por outro lado, é algo desagradável, indesejado e/ou sem conteúdo útil, com impacto nocivo no bem-estar humano e no conforto acústico do espaço [1][3].

2.1.2 SISTEMA AUDITIVO HUMANO

O sistema auditivo humano é um mecanismo fundamental para a identificação e interpretação dos sons. O mesmo capta, codifica e transmite as ondas sonoras ao cérebro, que tem a missão de as decifrar. Fisicamente, este sistema é responsável, de um modo sequencial, por transformar as variações de pressão existentes no ar, devido à onda sonora, em vibrações mecânicas, ondas de compressão, num meio líquido, e terminando em impulsos nervosos [3].

As três partes elementares do sistema são: o ouvido externo, o ouvido médio e o ouvido interno (Figura 2.1) [1].

O ouvido externo é constituído pelo pavilhão auricular, pelo canal auditivo e pelo tímpano. O pavilhão auricular capta ondas sonoras, modificando-as com informação direccional, e encaminha-as pelo canal auditivo até ao tímpano. O canal auditivo possui um efeito de ressonância que promove a amplificação de certas frequências, nomeadamente as frequências fundamentais para a compreensão da palavra (em torno de 3.500 Hz). O tímpano é uma membrana fina e elástica que entra em vibração ao receber ondas sonoras, com um deslocamento máximo de cerca de 2 mm. No evento de exposição a ruídos intensos e prolongados, o ouvido médio serve como primeira linha de defesa na protecção do ouvido, aumentando a rigidez do mesmo de modo a diminuir a intensidade do som que alcança o ouvido interno [1][3].

O ouvido médio é um espaço preenchido por ar que contém os ossículos: o martelo (ligado ao tímpano), a bigorna e o estribo (ligado à janela oval). Estes são os ossos mais pequenos do corpo humano e têm como função a adaptação do som, de modo a facilitar a passagem das

ondas sonoras do meio aéreo para o meio líquido, existente no ouvido interno. O ouvido médio inclui ainda a trompa de Eustáquio, responsável pelo equilíbrio da pressão do ar ao criar uma ligação com a faringe [1][3].

O ouvido interno é constituído pela cóclea, o órgão sensorial da audição, e pelo sistema vestibular, responsável pelo equilíbrio. A cóclea é uma espiral cónica preenchida por um líquido denominado perilinfa. Possui duas galerias principais, cada uma com uma ligação ao ouvido médio, a janela oval e a redonda. No interior da cóclea, a membrana basilar separa as duas galerias longitudinais. A galeria superior contém ainda uma terceira galeria cujo o fluído interior, denominado endolinfa, que contém cerca de 20.000 células ciliadas, com cílios como extremidades, que vibram em resposta ao movimento da endolinfa. Esta resposta desencadeia um processo electroquímico que converte o estímulo mecânico em impulsos eléctricos, que serão enviados ao cérebro através do nervo auditivo [1][3][4].

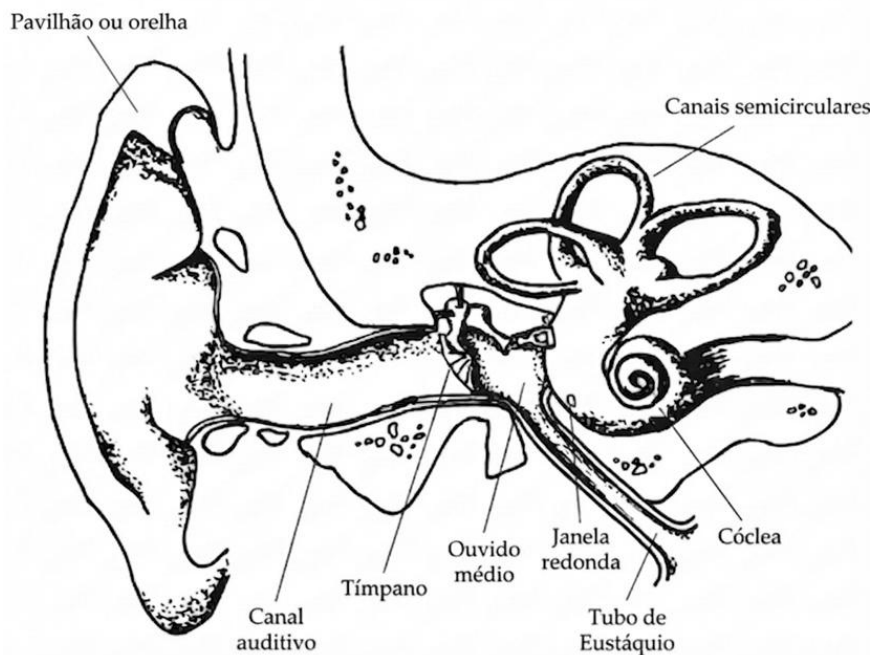


Figura 2.1 – Representação do ouvido humano em corte parcial. A orelha capta as ondas sonoras, encaminhando-as pelo canal auditivo até ao tímpano. No ouvido médio, os ossículos convertem e transmitem as vibrações à cóclea. No interior da cóclea, dá-se a conversão, através da perilinfa, da endolinfa e das células ciliadas, da energia mecânica para impulsos eléctricos, que irão ser transmitidos ao cérebro. Adaptado de [3].

2.2 CONCEITOS TEÓRICOS BÁSICOS

2.2.1 PRESSÃO ATMOSFÉRICA

A criação e a propagação do som, como referido anteriormente, ocorre devido a variações de pressão no meio elástico. No planeta Terra, a pressão atmosférica (P_{at}) ao nível do mar, com um valor aproximado de 101.400 Pa (ou $\approx 10^5$ Pa), é o valor de referência sobre o qual as ondas sonoras actuam. As ondas sonoras consistem em minúsculas oscilações de pressão sobrepostas a essa pressão atmosférica [1][3].

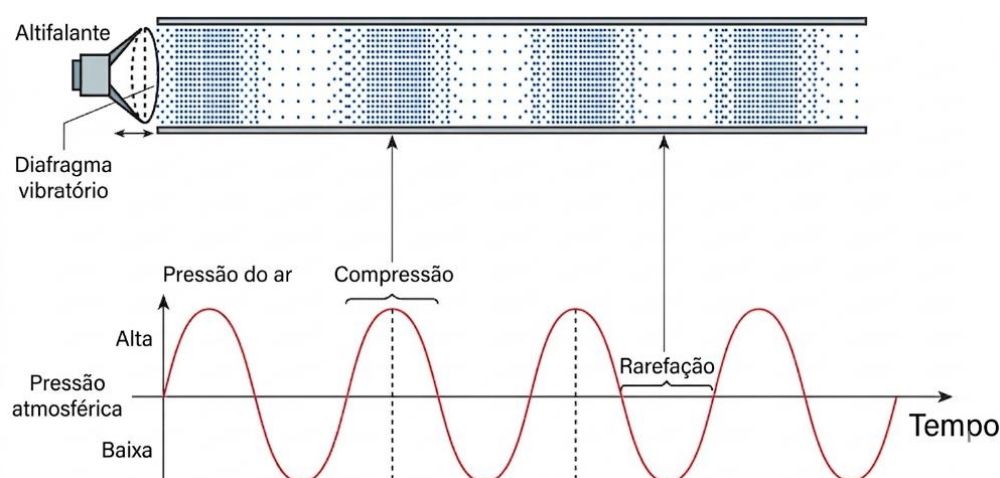


Figura 2.2 - Relação entre a densidade molecular e a variação da pressão sonora, ao longo no tempo, na propagação de uma onda longitudinal. As zonas de compressão e rarefação estão correlacionadas com os picos de pressão positiva e negativa [5].

2.2.2 CELERIDADE E TEMPERATURA

A celeridade é a velocidade de propagação das ondas sonoras e define a rapidez com que a energia sonora se desloca através do meio elástico. Este parâmetro depende essencialmente de dois factores: o estado físico do meio e a temperatura [1][3].

A temperatura desempenha um marcante papel na acústica, pois influencia a celeridade das ondas sonoras no ar. Com o aumento da temperatura ambiente, a transferência de energia sonora intensifica-se, facilitando a sua transferência e o aumento da velocidade de propagação [3].

A transferência de energia é mais eficiente quando a densidade molecular do meio é mais elevada. A propagação dessa energia é mais rápida em sólidos, seguida pelos líquidos e, por

fim, pelos gases. No ar, a humidade relativa também exerce influência, de modo que o som se propaga mais rapidamente em condições de ar húmido [3].

A temperatura é o factor que mais exerce influência sobre o cálculo da celeridade no ar. Em condições de ar seco, ao nível do mar, a velocidade de propagação (c), em m/s, pode ser calculada pela seguinte expressão [1]:

$$c = 20,045 \sqrt{T} \quad (2.1)$$

Nesta equação, T representa a temperatura absoluta em kelvin (K), calculada a partir da temperatura em graus celcius (θ), pela relação da seguinte equação [1]:

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

2.2.3 INTENSIDADE SONORA E POTÊNCIA SONORA

A intensidade sonora e a potência sonora são grandezas fundamentais na análise da propagação das ondas sonoras, acompanhando a pressão [1].

A intensidade sonora é a quantidade média de energia que as ondas sonoras transferem, por segundo, através de uma área unitária, perpendicular à direcção de propagação. Permite avaliar a componente direccional do som, sendo representada por uma grandeza vectorial [1].

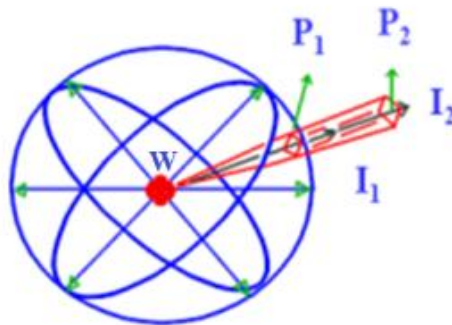


Figura 2.3 - Inter-relação entre grandezas acústicas fundamentais: potência (W), pressão (p) e intensidade (I) [7].

A potência sonora representa a energia acústica total emitida por uma fonte, por unidade de tempo, em todas as direcções, segundo uma forma esférica. Ao contrário da intensidade, a

potência é uma característica intrínseca da fonte e não possui qualquer dependência da distância entre emissor e receptor, nem das propriedades acústicas do ambiente [1][3][6].

A relação entre as duas grandezas, juntamente com a pressão sonora, é dada pela seguinte expressão [1]:

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

Onde:

I – intensidade sonora (W/m²);

W – potência sonora (W);

r – distância (m);

p – pressão sonora (Pa);

ρ – massa volúmica do ar ≈ 1,2 kg/m³;

c – celeridade ≈ 340 m/s.

2.2.4 PRESSÃO SONORA E NÍVEIS DE PRESSÃO SONORA

O sistema auditivo humano, em perfeitas condições, possui uma gama de audibilidade humana extremamente elevada no domínio da pressão de cerca de 10⁷ Pa. O intervalo inicia-se no limiar da audição, de 2x10⁻⁵ Pa, e termina no limiar da dor, a 200 Pa. Devido à grande dispersão de valores de pressão e ao facto da resposta do ouvido aos estímulos não ocorrer de forma linear, adoptou-se uma escala logarítmica, denominada nível de pressão sonora, que se aproxima mais da percepção subjectiva humana da sonoridade. O cálculo da conversão de pressões sonoras para níveis de pressão sonora é feito pela seguinte expressão [1]:

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

Onde:

L_p – níveis de pressão sonora (dB);

P₀ – pressão sonora de referência, 2x10⁻⁵ Pa;

p – pressão sonora (Pa).

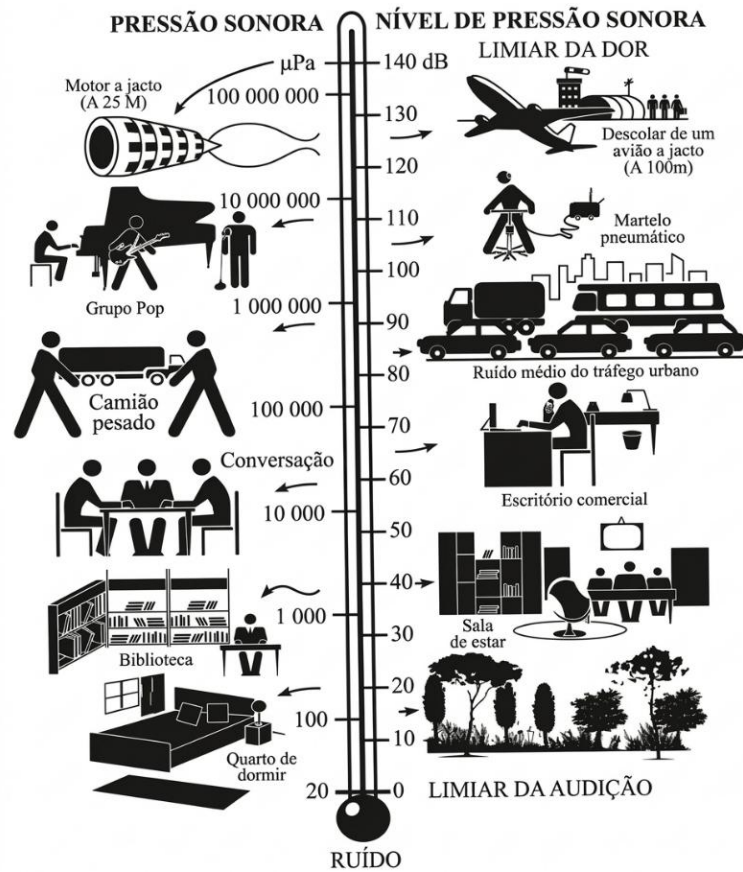


Figura 2.4 - Relação entre pressão sonora (em μPa) e o nível de pressão sonora (em dB), com exemplos quotidianos e limiares de audição e dor [7].

O nível de intensidade sonora (L_I) e o nível de potência sonora (L_W) são também utilizados de forma a caracterizar o fenómeno sonoro, para além da pressão, a que estão associados através da equação 2.3 [1]:

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

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

Com:

I – intensidade sonora (W/m^2);

I_0 – intensidade sonora de referência, $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$;

W – potência sonora (W);

W_0 – potência sonora de referência, 10^{-12} W.

2.2.5 FREQUÊNCIA

2.2.5.1 Definição

A frequência é uma propriedade física do som que representa o número de oscilações ou ciclos completos da pressão por segundo. Depois da pressão sonora, a frequência é considerada a característica mais importante na descrição e caracterização de um sinal sonoro. A sua unidade de medida é o *hertz* (Hz) [1].

O ouvido humano, quando em perfeitas condições de saúde, possui uma gama audível de frequências compreendida aproximadamente entre os 20 Hz e os 20 kHz. Os sons com frequências inferiores a 20 Hz denominam-se infra-sons e, os de frequências superiores a 20 kHz, de ultra-sons. No ser humano, a capacidade de discriminação de pequenas diferenças entre frequências depende do valor da frequência [1].

No âmbito da Acústica de Edifícios, é comum subdividir o espectro audível em três grandes bandas de frequências [1]:

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

As ondas sonoras podem ser divididas em sons puros e sons complexos. O som puro, ou simples, resulta de uma única vibração sinusoidal. O som complexo ou composto resulta da sobreposição de dois ou mais sons puros e apresentam um oscilograma mais irregular do que uma sinusóide [1].

2.2.5.2 Bandas de Frequência

Considerando que uma análise detalhada de cada uma das inúmeras frequências que compõem um estímulo sonoro seria trabalhosa, agrupam-se frequências, em intervalos de dimensão normalizada, designados por bandas de frequência [1].

Uma banda de frequência é definida pelo limite inferior (f_1) e o limite superior (f_2) do seu grupo de frequências. A frequência central (f_0) é calculada pela seguinte expressão [1]:

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

A largura de banda (B), em Hz, corresponde à diferença numérica entre o limite superior e o inferior, sendo que $K = 1$ ou $1/3$ se a banda é proporcional e de 1/1 oitava ou de 1/3 de oitava, respectivamente.

$$B = f_2 - f_1 = \frac{2^K - 1}{\sqrt{2^K}} f_0 \quad (2.8)$$

Em Acústica de Edifícios utilizam-se unicamente bandas proporcionais de 1/1 oitava e de 1/3 oitava [1].

- Banda de 1/1 oitava: a frequência superior é o dobro da inferior ($f_2/f_1 = 2^1 = 2$). Utilizam-se, no domínio do audível, oito bandas com frequências centrais normalizadas de 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k Hz;
- Banda de 1/3 de oitava: divide cada camada em três subcamadas ($f_2/f_1 = 2^{1/3} \approx 1,26$). A frequência central de uma oitava coincide com a frequência central da banda intermédia do respectivo terço de oitava. A banda de 125 Hz, por exemplo, engloba os terços de oitava de 100, 125 e 160 Hz.

2.2.5.3 Curvas de Ponderação

O sistema auditivo humano não possui uma resposta linear a todas as frequências do espectro audível e apresenta uma sensibilidade variável em frequência. É significativamente mais sensível a frequências na zona dos 3.500 Hz (cruciais para a inteligibilidade da voz) e muito pouco sensível a baixas frequências, especialmente inferiores a 125 Hz, e a baixos níveis de pressão sonora [1].

Esta particularidade guiou a criação de filtros electrónicos, designados por curvas de ponderação, de modo a “corrigir” os valores obtidos, integrando a subjectividade da audição humana nos valores finais [1].

Existem quatro curvas principais, designadas pelas letras A, B, C e D (Figura 2.5). A curva A (dB(A)) é a mais utilizada em Acústica de Edifícios e estudos ambientais. Foi concebida para aproximar a resposta do ouvido humano a níveis de pressão sonora reduzida (entre 20 e 55 dB), sendo sensivelmente o inverso da curva isso-sonora dos 40 *fone*. As curvas B e C destinam-se

à avaliação de pressão sonora mais elevada, de 55 a 85 dB e de 85 a 140 dB, respectivamente. A curva D foi desenvolvida especificamente para a medição e avaliação do ruído produzido por aviões [1][3][8].

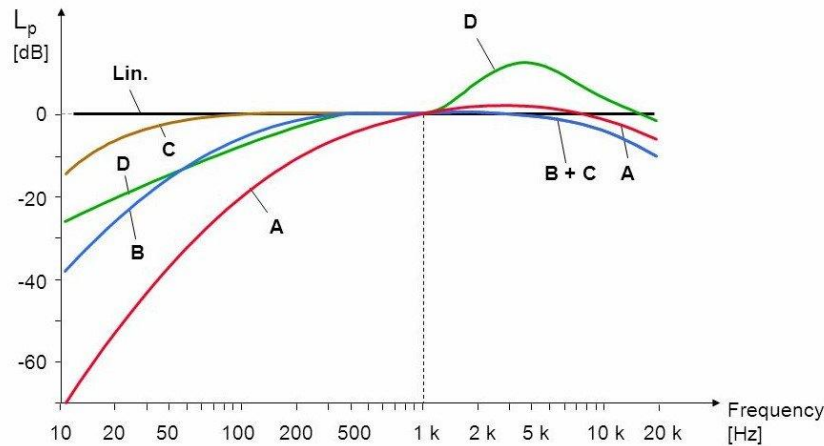


Figura 2.5 – Curvas de Ponderação A, B, C e D [8].

As curvas de igual percepção subjectiva da intensidade sonora (ou sensibilidade sonora) (Figura 2.6), denominadas *isso-sonoras*) encontram-se numericamente parametrizadas com a unidade *fone*, ou a intensidade audível relativa (F), que corresponde ao nível de pressão sonora (em dB) à frequência de referência de 1.000 Hz, conforme a norma ISO 226 [9]. Utiliza-se a unidade *sone*, ou intensidade audível absoluta (S), para estabelecer uma relação de proporcionalidade: um som com 2 *sone* é tido como tendo o dobro da intensidade de um som com 1 *sone*. A relação matemática é expressa pela seguinte equação, válida para a gama dos 40 ao 100 *fone* [1]:

$$S = 2^{(F-40)/10} \quad (2.9)$$

O nível sonoro ponderado obtém-se através da adição algébrica dos valores correctivos (ponderações normalizadas para cada banda de frequência) aos valores obtidos dos níveis de pressão sonora lineares. Os valores finais são depois somados logaritmicamente obtendo-se os níveis sonoros, em dB(A) [1].

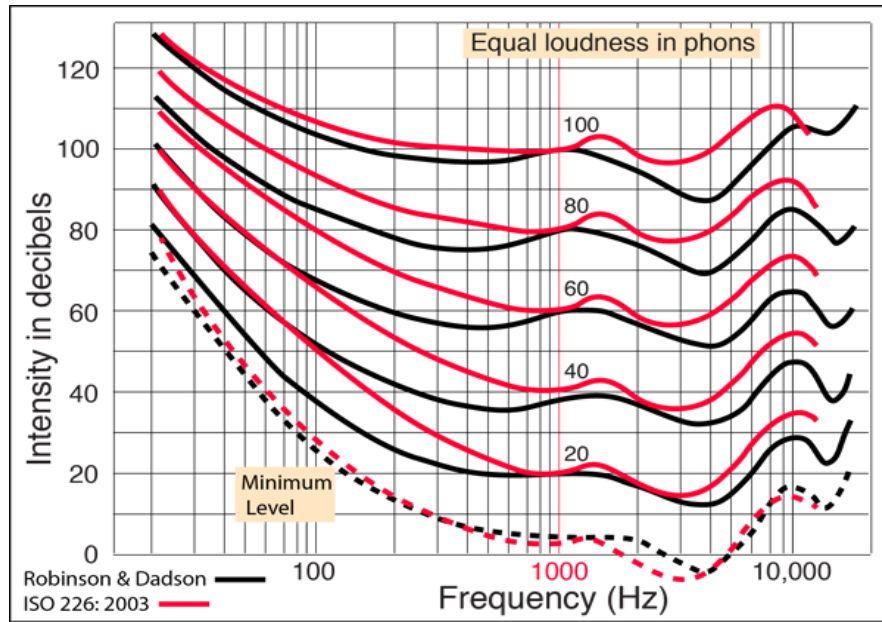


Figura 2.6 – Curvas de igual sensibilidade auditiva [10].

2.2.5.4 Comprimento de Onda

O comprimento de onda é a distância entre dois pontos equivalentes e consecutivos de uma onda periódica (som puro) em cada ciclo de vibração, como, por exemplo, entre duas cristas ou dois vales sucessivos [1].

Esta grandeza é expressa em metros (m) e pode ser calculada utilizando a seguinte expressão [1]:

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (2.10)$$

Com:

λ – comprimento de onda (m);

c – celeridade (m/s);

T – período (s), dado por $T = 1/f$;

f – frequência (Hz).

De acordo com esta relação, conclui-se que o comprimento de onda e a frequência são inversamente proporcionais. A velocidade do som no ar é quase invariante, cerca de 343 m/s, a temperaturas normais ($\approx 20^\circ\text{C}$). Logo, sons com frequências elevadas apresentam

comprimentos de onda curtos e sons de baixa frequência mostram comprimentos de onda longos [1].

Na Acústica de Edifícios, tal conhecimento é fundamental para estudar como o som interage com obstáculos e superfícies. O som tende a ser reflectido por objectos de grandes dimensões, quando comparados com o comprimento de onda existente. Adicionalmente, com aberturas de dimensões iguais ou menores que o seu comprimento de onda, a onda é obstruída e tende a sofrer difracção (contornar) o objecto [1][3].

2.2.5.5 *Análise no Tempo*

A duração de um ruído é um dos factores mais importantes para descrever um sinal sonoro, a seguir à pressão e à frequência. Os sinais sonoros podem ser de duração quase instantânea, quando ocorrem num curto intervalo de tempo (como sons de faíscas ou disparos), ou quase infinitos, quando se prologam por longos períodos de tempo (como o som de uma queda de água) [1].

Devido à instabilidade temporal comum nos níveis de pressão sonora, é necessária a utilização de parâmetros que integrem o factor “tempo” para descrever correctamente o fenómeno sonoro. Os dois parâmetros mais usados são o nível de pressão sonora contínuo equivalente e o nível de pressão sonora estatístico (L_N) [1].

O nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}) define-se como o nível que produziria a mesma energia que o som variável original, se actuasse de forma contante, num determinado intervalo de tempo T . Resumindo, é a média num intervalo de tempo de medição de T , medida em (dB) e calculada pela seguinte expressão [1]:

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \quad (2.11)$$

Com:

L_{eq} - nível de pressão sonora contínua equivalente (dB);

T – período (s);

$p(t)$ – pressão sonora (Pa);

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

O nível de pressão sonora estatístico (L_N) corresponde ao nível excedido durante N% da duração do intervalo de medição. O L_{50} é associado à mediana dos níveis registados. Com a entrada em vigor do Regulamento Geral do Ruído e do Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, o L_{50} e o L_{95} , entre outros, desapareceram do panorama legislativo português, mas ainda existem em legislações internacionais [1].

Em relação à percepção por parte do ouvido humano, existe uma constante de tempo de integração. O ouvido responde às ondas sonoras em janelas temporais de curta duração (de 35 a 50 milissegundos) que são agrupadas pelo cérebro com o som directo. O processo designa-se por fusão temporal. Se os atrasos superarem os 50 a 80 ms, ocorre uma falha na integração e o ouvinte consegue identificar ecos discretos [3].

2.3 ABSORÇÃO SONORA

2.3.1 INTRODUÇÃO

A absorção sonora define-se como a capacidade de um material ou sistema construtivo, de transformarem a energia sonora incidente em qualquer outra modalidade de energia, normalmente a energia térmica. Este fenómeno ocorre através da dissipação da vibração das partículas do ar no interior do material. O calor gerado é inconsequente [1].

Quando a onda sonora atinge um objecto ou superfície, ocorrem simultaneamente três fenómenos distintos: uma parcela da energia é reflectida e volta ao espaço, outra porção é transmitida, através do elemento construtivo, para o espaço adjacente, e a restante energia é absorvida pelo próprio material [1][3].

A eficiência de um material no processo de absorção de energia é quantificada através do coeficiente de absorção sonora (α) (Quadro 2.1), que representa a razão entre a energia sonora absorvida e a energia sonora incidente [1]:

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.12)$$

Esta grandeza é adimensional e varia entre 0 e 1, em que α igual a 0 corresponde a uma superfície completamente reflectora, onde não ocorre qualquer absorção, e α igual a 1 corresponde à absorção total da energia incidente, como por exemplo, no caso de uma janela aberta [1].

Um material é considerado absorvente se o seu coeficiente de absorção sonora é superior a 0,5. Contudo, este valor não é constante no mesmo material e varia com a frequência do som e com o ângulo de incidência [1].

Para a determinação rigorosa deste coeficiente, utilizam-se habitualmente dois métodos normalizados [1]:

- Método do tubo de ondas estacionárias (ou Tubo de Kundt): utilizado para medir o coeficiente de absorção apenas sob incidência normal (perpendicular à amostra). É regido pela norma EN ISO 10534-1 [11];
- Método da câmara reverberante: é considerado mais eficaz em aplicações práticas, pois mede a absorção sob incidência difusa (de todas as direcções). Neste método compara-se o tempo de reverberação da câmara com e sem a amostra em estudo e segue-se a norma NP EN ISO 354. Para além de ser necessário uma grande amostra, de cerca de 10 a 12 m², também é possível obterem-se valores de coeficiente ligeiramente acima de 1, devido a efeitos de difracção nas extremidades da amostra, sendo comum ajustar para o valor limite de 1 [3][12];

Quadro 2.1 – Valores de coeficientes de absorção sonora (α), de alguns materiais ou sistemas
[adaptado de 1]

Material	125	250	500	1k	2k	4k
Argamassa	0,14	0,10	0,06	0,05	0,04	0,03
Gesso cartonado, 2 placas (32mm)	0,28	0,12	0,10	0,17	0,13	0,09
Madeira com caixa de ar de 25 mm	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05
Painéis de contraplacado fino	0,42	0,21	0,10	0,08	0,06	0,06
Blocos de betão com acabamento liso	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05
Vidro espesso	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Pavimento em betão	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Pavimento de betão armado c/ mosaico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Teto de betão rebocado e estucado	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05
Linóleo sobre betão	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Soalho (parquet) de madeira sobre betão	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Soalho sobre vigas de madeira c/ cx ar	0,15	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10

Alcatifa densa sobre betão	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65
Alcatifa densa c/ base em borracha	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73
Alcatifa leve colada sobre o betão	0,02	0,04	0,08	0,20	0,35	0,40
Cortina leve	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortina pesada	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Espelho de água (piscina ou similar)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Audiência: Estofa espesso	0,76	0,83	0,88	0,91	0,91	0,89
Audiência: Estofa médio	0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86
Audiência: Estofa leve	0,56	0,68	0,79	0,83	0,86	0,86
Cadeiras vazias: Estofa espesso	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79
Cadeiras vazias: Estofa médio	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
Cadeiras vazias: Estofa leve	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55

2.3.2 MATERIAIS E SISTEMAS DE ABSORÇÃO SONORA

2.3.2.1 Conceitos

O modo de como ocorre a absorção da energia sonora depende das características físicas fundamentais dos materiais e sistemas utilizados e da configuração de como se inserem no espaço. Em acústica arquitectónica, os mesmos podem ser agrupados em três categorias, distintas na sua eficiência em gamas distintas de frequência [1]:

- Materiais porosos e fibrosos (ou texturados): são mais eficazes na absorção de altas frequências;
- Ressonadores: cuja eficiência aumenta nas médias frequências;
- Membranas: que atenuam as baixas frequências.

2.3.2.2 Materiais Porosos e Fibrosos

Os materiais porosos e fibrosos (ou texturados) são caracterizados por uma estrutura aberta de pequenas dimensões, composta por poros e interstícios interligados. Quando a onda sonora penetra o material, percorre os interstícios e se propaga pelas fibras, transfere parte da sua energia, através do atrito entre as partículas de ar e a estrutura do material. Esta resistência mecânica transforma parte da energia cinética do ar em energia térmica, que resulta na dissipação de energia sonora [1][3].

A eficiência destes materiais é determinada principalmente pelo parâmetro de resistividade ao fluxo de ar. Se a resistência é baixa, o material não é suficientemente denso para uma perda de atrito significativa. Por outro lado, se o material for excessivamente denso, há uma dificuldade de penetração do ar e uma redução na absorção do som [1][3].

Alguns exemplos comuns, utilizados em edifícios, são os tecidos e alcatifas pesadas, lã de rocha e lá de vidro, aglomerados de fibras de madeira e de cortiça, e espumas de célula aberta. Com o intuito de garantir a penetração do som e a sua capacidade de absorção, nas frequências desejadas, é fundamental evitar a pintura da superfície destes materiais [1][3].

Uma limitação característica dos materiais porosos é o seu fraco desempenho nas baixas frequências, devido à necessidade da sua espessura ser semelhante ao comprimento de onda para ser eficaz. Para contornar isto minimamente, recorre-se ao aumento da espessura do material e à criação de uma caixa de ar entre o material e a superfície rígida posterior [3].

2.3.2.3 Ressonadores

Os ressoadores, também conhecidos por ressoadores de cavidade ou ressoadores de Helmholtz, são sistemas projectados para actuarem, com maior eficiência, na absorção de médias frequências, através de ressonância acústica de um volume de ar restringido [1].

Um ressoador consiste num sistema formado por uma cavidade com ar confinado, ligado ao exterior através de uma abertura estreita, designada por gargalo. O ar entra e sai do gargalo, em vibração, como a massa, num sistema massa/mola. O ar no interior do corpo da cavidade é o elemento mola, devido à sua elasticidade [1].

A absorção de energia é máxima na frequência de ressonância natural do sistema, onde a amplitude de oscilação das partículas de ar é mais elevada. A frequência de máxima eficácia depende da geometria do sistema e pode ser aumentada com o alargamento da abertura do gargalo. Pelo contrário, com o aumento do volume da cavidade e do comprimento do gargalo, o seu valor diminui [1].

Este sistema é usado desde a Antiguidade, pelos romanos, e durante a Idade Média, em igrejas. A forma básica de um ressoador é a de uma simples garrafa. O mesmo princípio é aplicado contemporaneamente, através de várias soluções construtivas, como por exemplo blocos acústicos, que possuem ranhuras que comunicam com cavidades internas, e como painéis

perfurados (ressoadores agrupados), aplicados sobre uma caixa de ar e que cada orifício funciona como um mini-ressoador [1][3].

Para amplificar ainda mais a eficácia do sistema e aumentar a faixa de frequências, é comum a introdução de um material poroso no interior da cavidade ou apenas junto à abertura. Deste modo, ocorre uma dissipação da energia através da fricção, como visto no capítulo anterior. A energia sonora não dissipada pelo material poroso vai ser reemitida em todas as direcções, contribuindo assim para a difusão sonora do ambiente [3].

2.3.2.4 Membranas

As membranas, também designadas como painéis vibrantes, são sistemas específicos para a atenuação das baixas frequências. Ao contrário dos materiais porosos, as membranas utilizam o fenómeno de ressonância interna para dissipar a energia sonora, não sendo necessário a utilização de espessuras impraticáveis necessárias para mitigar os grandes comprimentos de onda [1].

O funcionamento deste sistema dá-se através da absorção das ondas sonoras pela vibração de toda a estrutura, constituída por grandes áreas de painéis de pequena espessura, que criam uma caixa de ar com a superfície rígida posterior. Com a vibração da estrutura, dá-se uma transformação para energia térmica, instigada pela fricção das fibras do material quando este entra em flexão. A eficiência é máxima na frequência de ressonância natural do sistema, que é determinada pela densidade superficial do material do painel e pela profundidade da caixa de ar posterior [1][3].

Como ocorre com os ressoadores, é possível aumentar a gama de frequências abrangidas por este sistema, através da introdução de materiais porosos no interior da caixa de ar. Isto leva a um aumento do amortecimento do sistema [3].

Na acústica arquitectónica, as membranas mais comuns são os painéis de madeira de pequena espessura, as placas finas de gesso cartonado e alguns sistemas de soalho de madeira sobre vigas com caixa de ar. Estes sistemas são mais eficazes quando são localizados em zonas de máxima pressão sonora, como em cantos de salas ou com fixações em superfícies rígidas. Além de ajudarem no controlo do tempo de reverberação também contribuem para o equilíbrio tonal do espaço [3].

2.4 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

2.4.1 INTRODUÇÃO

O tempo de reverberação é um dos parâmetros mais importantes na caracterização das condições acústicas de um espaço fechado. Quando a fonte emite energia sonora num compartimento, o receptor capta dois tipos de ondas (Figura 2.7): ondas directas, que viajam em linha recta desde a fonte, e ondas reflectidas, ou reverberadas, que sofrem colisões com a envolvente antes de chegar ao receptor, sucessivamente. Estas colisões levam ao enfraquecimento das ondas, pois são parcialmente absorvidas a cada reflexão, ajudado pelo efeito de absorção do ar [1].

A definição de tempo de reverberação (T_{60}) é o intervalo de tempo, medido em segundos, necessário para que o nível de pressão sonora decaia 60 dB, a partir do momento que a fonte sonora termina a sua emissão. Este valor corresponde a uma redução da pressão sonora original a 1 milésimo do seu valor inicial [1].

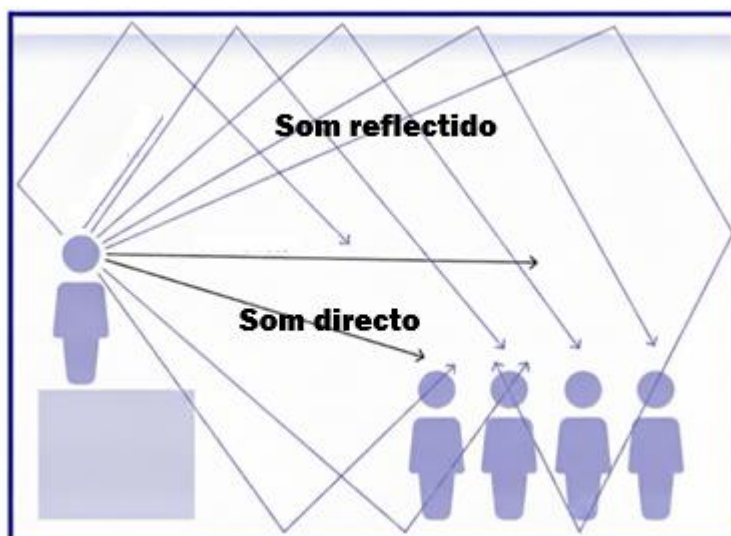


Figura 2.7 – Ondas directas e ondas reflectidas, adaptado de [13].

Na prática, contudo, é extremamente difícil obter um decaimento total de 60 dB devido à interferência do ruído de fundo antes da extinção do som emitido. O mais habitual é tentar obter uma estimativa de T com um decaimento de apenas 20 (T_{20}) ou 30 dB (T_{30}), sendo estes valores os mais importantes para avaliar a qualidade de música e da palavra para o ouvido humano [1][3].

Quadro 2.2 – Valores ideais para o Tempo de reverberação em função do tipo de utilização, adaptado de [1].

Função	TR [500, 1k Hz] (s)
Auditório (palavra)	0,7 – 0,8
Teatro	0,7 – 0,9
Cinema	0,8 – 1,0
Ópera (não wagneriana)	1,3 – 1,7
Ópera (Wagner)	1,8 – 1,9
Música sinfónica Barroca	1,4 – 1,6
Clássica	1,6 – 1,8
Romântica	1,9 – 2,2
Moderna	1,4 – 1,9
Música popular	0,8 – 1,0
Música de órgão	2,5 – 3,5
Coros gregorianos	3 – 4

A qualidade da experiência auditiva é influenciada directamente pelo tempo de reverberação, sendo que os seus valores ideais vão depender da funcionalidade do espaço. No Quadro 2.2 encontram-se os valores ideais do Tempo de Reverberação, para algumas funções comuns em salas de espectáculo [1].

2.4.2 EARLY DECAY TIME (EDT)

O tempo de decaimento curto, ou *Early Decay Time* (EDT), está directamente relacionado com o tempo de reverberação clássico (T_{60}). Define-se como o intervalo de tempo necessário para que o nível de pressão sonora sofra um decaimento de 10 dB, contado a partir do momento em que a fonte sonora é interrompida. Para ser então comparável ao T_{60} , o resultado obtido (T_{10}) é então multiplicado por um factor igual a 6 [1][3].

Ao contrário do tempo de reverberação tradicional, que se foca no rasto sonoro tardio, o EDT concentra-se no decaimento inicial, composto pelas reflexões primárias, que chegam ao receptor dentro da zona de fusão de Haas, que parte do princípio de que o primeiro som a chegar

ao receptor determina a localização da fonte sonora. Estas reflexões juntam-se ao som directo, influenciando directamente a percepção de clareza e definição sonora [3][14].

Em termos de funcionalidade do espaço, os valores de EDT devem ser condicionados de forma adequada ao seu uso pretendido. Um EDT curto diz respeito a um ambiente mais absorvente, que favorece a clareza e a inteligibilidade do discurso necessárias em salas destinadas à palavra. O EDT longo favorece salas de música e concertos, criando um ambiente mais imersivo e ressonante [1].

2.4.3 RÁCIO DE BAIXOS (BR)

O rácio de baixos, ou *bass ratio* – BR, foi proposto com o objectivo de medir o “calor” acústico de uma sala. Este parâmetro é uma sensação subjectiva associada à proeminência de frequências graves em relação às médias, que confere um corpo e sonoridade mais ricos à música [3].

Este rácio é definido como a razão entre a média dos tempos de reverberação das bandas de oitava graves (125 e 250 Hz) e a média das bandas de oitava médias (500 e 1k Hz), como se verifica na expressão seguinte [3]:

$$BR = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1k}} \quad (2.13)$$

Os materiais existentes nas salas influenciam directamente o valor do rácio de baixos. Um valor elevado de BR resulta da aplicação de materiais que absorvem sons de altas frequências e reflectem sons de baixas frequências. Pelo contrário, um baixo valor de BR ocorre quando existem sistemas de absorção de baixas frequências e de reflexão de altas frequências [11].

Segundo Beranek, os valores ideais de rácio de baixos de uma sala estão interligados ao tempo de reverberação e encontram-se enquadrados nos intervalos seguintes [15]:

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

O Quadro 2.3 apresenta os resultados da análise do Rácio de Baixos em várias salas de concertos, assim como os respectivos TR, onde se verifica que os valores obtidos em diferentes salas de concerto, normalmente aproximam-se dos valores ideais [16].

Quadro 2.3 – Valores de BR (*Bass Ratio*) e Tempo de Reverberação em diferentes salas de concertos, com ocupação [16].

Salas de Concertos	BR	TR (s)
Amesterdão, Concertgebouw	1,08	2,0
Boston, Symphony Hall	1,03	1,9
Viena, Gr. Musikvereinssaal	1,11	2,0
Suiça, StadtCasino Basel	1,17	1,8
Berlim, Konzerthaus	1,23	2,1
Cardiff, País de Gales, St. David's Hall	0,96	2,0
Zurique, Großer Tonhalleaal	1,23	2,1

2.4.4 FÓRMULAS DE PREVISÃO

A previsão do tempo de reverberação é essencial durante a fase de projecto de uma sala, de modo a garantir que o espaço cumpra os requisitos acústicos da sua função prevista. Ao longo do tempo, foram desenvolvidas diversas expressões matemáticas [1].

A fórmula de Sabine, foi a primeira equação a estabelecer uma relação entre a absorção, o volume e a reverberação. A expressão é dada por [1]:

$$T = \frac{0,16 \times V}{A} \quad (2.14)$$

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i \quad (2.15)$$

Com:

T – tempo de reverberação (s);

V – volume do compartimento (m³);

A – absorção sonora equivalente (m²);

α – coeficiente de absorção sonora do material;

S – superfície real do material (m²).

A fórmula de Sabine obtém valores próximos da realidade, em ambientes com campos sonoros difusos e onde o coeficiente médio de absorção sonora seja inferior a 0,20. Em salas muito absorventes, esta fórmula tende a produzir erros pois não conta com um tempo de reverberação quase nulo nem com uma absorção quase total [1][3].

A fórmula de Eyring foi criada para superar as limitações da fórmula de Sabine em salas onde a absorção sonora é elevada e distribuída de modo uniforme pelas superfícies. Na fórmula seguinte, S representa a superfície total da envolvente e $\bar{\alpha}$ é a média pesada dos coeficientes de absorção de todas as superfícies [1][3]:

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (2.16)$$

A fórmula de Millington-Sette é recomendada para espaços com coeficientes de absorção bastante diversos entre si. O cálculo é feito através da expressão [1][3]:

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{-\sum_{i=1}^n S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i)} \quad (2.17)$$

Em salas de grandes dimensões e para frequências agudas (acima de 2k Hz), as fórmulas de previsão devem incluir o termo de absorção sonora no ar, pois a dissipação de energia no ar torna-se um factor relevante. As absorção sonoras localizadas, como pessoas ou cadeiras, também devem ser utilizadas, em situações em que se insiram [1][3].

2.5 INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

2.5.1 INTRODUÇÃO

A inteligibilidade da palavra define-se como a capacidade de um ouvinte perceber e distinguir, de forma clara, o discurso que ocorre num determinado espaço. Este é um dos pilares fundamentais da acústica arquitectónica, especialmente em qualquer espaço destinado à comunicação verbal, tais como auditórios, teatros, salas de aula e locais de culto [1][3].

A qualidade da inteligibilidade da palavra em recintos fechados é condicionada por três factores críticos: o ruído de fundo, o tempo de reverberação e as reflexões sonoras. Para garantir uma experiência auditiva de excelência é necessário garantir a projecção uniforme do som em toda a sala, de forma clara, sem distorções e com o mínimo esforço de atenção [1][3].

2.5.2 EMISSÃO DA VOZ

A variabilidade da emissão da voz pode ser caracterizada por quatro factores principais: a frequência, a intensidade, a duração e a direccionalidade [1].

Em relação à frequência, os sons existentes na fala abrangem uma gama muito vasta, de quase seis oitavas. As vogais são produzidas pela vibração das cordas vocais. O som é depois moldado pelas cavidades de ressonância do tracto vocal. A frequência fundamental das vogais predomina nas baixas frequências, entre 100 e 700 Hz. As consoantes resultam das restrições ou interrupções do fluxo de ar e situam-se, no caso das consoantes não sonoras, em frequências mais elevadas, entre os 2.500 e os 6.000 Hz. Estas são as principais responsáveis pela inteligibilidade, apesar de possuírem pouca potência sonora [1][3].

Relativamente à intensidade, verifica-se que as vogais são emitidas com um nível de pressão sonora superior ao das consoantes, com uma diferença máxima de 21 a 28 dB. As consoantes são assim mais vulneráveis a serem mascaradas pelo ruído de fundo [1][3].

No respeitante à duração, em geral, as vogais são mais longas, com uma emissão de cerca de 90 a 100 ms, enquanto as consoantes são transitórias, durando apenas cerca de 20 a 65 ms. Em ambientes muito reverberantes, as vogais podem assim ocultar as consoantes, causando a degradação da inteligibilidade [1][3].

A direccionalidade da voz humana é também condicionada pela frequência. O emissor do som projecta a sua voz predominantemente numa direcção, mas, enquanto nas baixas frequências as ondas são quase omnidireccionais, nas altas frequências ocorre o oposto, chegando a perder cerca de 25 dB na direcção oposta à da emissão [1][3].

A variabilidade destes factores está sintetizada no quadro seguinte:

Quadro 2.4 – Variabilidade da emissão de voz entre as vogais e consoantes, adaptado de [1].

Tipo	Frequência	Intensidade	Duração	Direccionalidade
Vogais	Baixas	Elevado	≈ 90 ms	-5 dB p/ -180°
Consoantes	Altas	Baixo	≈ 20 ms	-20 dB p/ -180°

2.5.3 PARÂMETROS DE MEDIDA

Os métodos utilizados para quantificar a inteligibilidade da palavra num espaço dividem-se em dois grupos distintos: os subjectivos, que dependem da resposta humana, e os objectivos, que se baseiam em medições e expressões matemáticas [1].

Os métodos subjectivos são o PB (*Phonetically Balanced Words*) e o MRT (*Modified Rhyming Tests*), que consistem na realização de testes através de um orador que lê listas de palavras ou frases a um grande número de ouvintes, que devem registar o que percebem. Estes testes estão sujeitos à variabilidade da audição humana [1].

Os métodos objectivos são avaliados através de equipamento e de procedimentos normalizados e repetíveis [1]:

- Índice de Articulação (AI – *Articulation Index*): estabiliza um nível médio de inteligibilidade (de 0 a 1) usando a diferença entre conversação e ruído em cada banda de frequência;
- Nível de Interferência na Conversação (SIL – *Speech Interference level*): é determinado pela média aritmética dos níveis de pressão sonora dos ruídos de fundo nas bandas de oitava de 500 aos 2k Hz;
- Classe de Articulação (AC – *Articulation Class*): semelhante ao AI, mas focado nas bandas dos 200 aos 5k Hz em bandas de 1/3 de oitava;
- Índice de Transmissão da Palavra (STI - *Speech Transmission Index*): varia entre 0 e 1 (Quadro 2.5), paralelamente à inteligibilidade, e avalia as irregularidades no som, incluindo reverberações. Utiliza todas as bandas de oitava, dos 125 aos 8k Hz [17];
- Método RASTI (*Rapid Speed Transmission Index*): é o método simplificado de cálculo do STI. Varia entre 0 e 1 (Quadro 2.5), aumentando com a inteligibilidade e foca-se nos efeitos de reverberação e ruído em bandas de oitava dos 500 e 2k Hz [18].

Quadro 2.5 – Classificação da inteligibilidade da palavra através da gama de valores obtidos em STI e RASTI [adaptado de 1].

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

2.6 ISOLAMENTO SONORO

2.6.1 DEFINIÇÃO

O isolamento sonoro define-se como um conjunto de medidas destinadas a impedir ou minimizar a penetração de ruídos provenientes de fontes externas num determinado espaço. Inversamente, serve também para evitar a propagação para o exterior, ou para áreas adjacentes, de um som produzido no local. Ao contrário da correcção acústica, que visa a optimização da qualidade de um som dentro de um espaço, o isolamento foca-se na barreira física que impede a propagação sonora entre compartimentos distintos [1].

De modo a estudar o isolamento, é necessário conhecer a origem e modo de propagação do ruído [1]:

- Ruídos de percussão (ou de impacto): resultam de uma solicitação mecânica directamente aplicada sobre os elementos construtivos, como pavimentos ou paredes. Existe uma maior facilidade em se propagarem por toda a estrutura do edifício, com pouca perda de energia, alcançando zonas bastante afastadas da fonte. O uso de materiais como alcatifas ou lajes flutuantes ajuda a mitigar a criação de ruído na fonte;
- Ruídos de condução aérea: têm origem na vibração do ar. As ondas sonoras atingem uma divisória, fazendo-a vibrar e irradiar energia para o espaço adjacente, através do ar. Para se melhorar o isolamento nesta situação, é necessário o aumento de massa das separações entre áreas e/ou do dimensionamento correcto das caixas de ar.

Os ruídos podem também propagar-se por duas vias distintas: pela via directa, que ocorre quando a energia atravessa directamente o elemento construtivo separador, ou pela via marginal (secundária ou indirecta), quando transmitida por elementos estruturais adjacentes ao local [1].

A influência do isolamento é severamente comprometida pela existência de fendas ou aberturas, que permitem o transporte do som pelo ar com uma enorme facilidade, sendo por isso importante garantir a estanqueidade das divisões [3].

2.6.2 RUÍDO DE FUNDO

O ruído de fundo pode ser definido como qualquer som não desejado, cuja energia possa alterar o bem-estar das pessoas, influenciando as condições ambientais de um espaço. Ou seja, corresponde ao nível de som residual presente quando não existem fontes de som intencionais a operar. Este ruído é proveniente de fontes externas, como tráfego rodoviário ou ruído de lojas

circundantes, ou de fontes internas, mais concretamente de equipamentos do edifício, como sistemas de climatização e ventilação (AVAC), canalizações e outras instalações prediais [1].

Em Portugal, o ruído dos equipamentos colectivos em edifícios é limitado pelo RRAE (Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios) e é avaliado com a norma NP EN ISO 16032, como representado na equação seguinte [1]:

$$L_{Ar,nT} = L_A + K_{tonal} - 10 \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (2.18)$$

Com:

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

L_A – nível sonoro contínuo equivalente do equipamento, medido durante um intervalo de tempo específico no local de recepção (dB);

K_{tonal} – 3 dB(A) de penalização devido a ruídos com componentes tonais;

T – Tempo de reverberação (s);

T_0 – 0,5 segundos (em geral).

O RRAE prevê o uso de uma margem de incerteza de 3 dB(A), a diminuir os valores obtidos, de modo a garantir os limites máximos legais para os $L_{Ar,nT}$. Em auditórios, é necessário garantir o L_{Aeq} inferior ou igual a 38 dB para salas de cinema, com AVAC, e 30 dB para outras salas, também com AVAC [1].

2.6.3 CURVAS DE INCOMODIDADE

A avaliação da incomodidade causada por ruídos de equipamentos estáveis e contínuos é realizada através de sistemas de classificação designados por “curvas de incomodidade”. Estas curvas descrevem o espectro do ruído, sendo as medições realizadas nos locais mais ruidosos da sala e à altura dos ouvidos dos utilizadores [1]:

- NC (*Noise Criterion*) – é a curva mais utilizada, por exemplo, nos Estados Unidos. Caracteriza-se pelos níveis de pressão sonora em oito bandas de oitava (entre 63 e 8k Hz), utilizando o método da tangente para determinar a classificação;
- NR (*Noise Rating*) – é a curva mais utilizada na Europa. Também utiliza o método da tangente, mas abrange uma gama de frequências ligeiramente superior (32 a 8k Hz);

- RC (*Room Criterion*) – utilizada essencialmente para ruídos de ar condicionado. Utiliza as bandas de frequência de 16 a 4k Hz com o método da média com zonas de vibração. É adoptada pela ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) [19];
- NCB (*Balanced Noise Criterion*) – proposta para melhorar a NC e usada essencialmente para ruídos de ar condicionado. Utiliza as bandas de frequência de 16 a 8k Hz e o método da média com zonas de vibração [1].

2.7 ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA

2.7.1 INTRODUÇÃO

A acústica arquitectónica estabelece uma ligação fundamental entre a ciência, a engenharia e o *design*, com o objectivo de se obter um ambiente sonoro optimizado e equilibrado dentro de um determinado espaço. Este estudo foca-se no modo de interacção entre o som e as superfícies envolventes, analisando a forma como a geometria e os materiais de um edifício influenciam a percepção auditiva dos seus ocupantes [1].

Em salas de espectáculos, como teatros e grandes auditórios, a acústica arquitectónica possui um papel crítico, uma vez que a qualidade da experiência sonora do público depende directamente da capacidade do recinto de propagar o som de forma clara e inteligível. Ao contrário do aspecto estético, que apesar de relevante, não interfere de forma directa na qualidade técnica do espectáculo, um desempenho acústico de má qualidade é causa de destruição completa de um evento [1].

2.7.2 CONDICIONAMENTO ACÚSTICO PELO ESPAÇO ARQUITECTÓNICO

2.7.2.1 Reflexões

As reflexões são um fenómeno básico do comportamento acústico de uma sala. Quando uma onda sonora atinge uma superfície rígida, parte da sua energia é reflectida de volta para o espaço em que se insere. Em salas grandes de espectáculos, um ouvinte pode receber aproximadamente 8.000 reflexões por segundo [1].

A análise das reflexões tem em conta a cronologia de chegada das ondas sonoras ao receptor, e é representado por um reflectograma [1]:

- Som Directo: é a primeira onda, normalmente, a chegar ao ouvinte, viajando em linha recta a partir da fonte;
- Som Inicial (*Early Sound*): consistem em ondas sonoras que atingem o receptor nos primeiros 80 ms após o som directo. Estas reflexões são fundamentais na caracterização da clareza e definição sonora de um recinto;
- Som Tardio (*Late Sound*): corresponde a todas as reflexões que chegam ao ouvinte, após os 80 ms, constituindo a cauda reverberante da sala;
- ITDG (*Inicial Time Delay Gap*): Define-se como o intervalo de tempo entre a chegada do som directo ao utilizador e a primeira reflexão. Em salas de elevada qualidade, este valor, cerca de 20 ms, deve ser bem definido.

2.7.2.2 Ecos

Os ecos consistem em reflexões nocivas que chegam ao receptor com um atraso e intensidade suficientes para serem claramente distinguidas pelo ouvido humano, como ocorrências distintas do som directo. Uma condição para que este fenómeno ocorra é a diferença temporal entre o som directo e o reflectido seja superior a 50 ms [1].

Em grandes salas de espectáculo, os ecos surgem frequentemente devido a reflexões em superfícies rígidas, localizadas a grandes distâncias tanto da fonte como do ouvinte. Existe ainda o fenómeno de eco repetido (*flutter echo*), que surge devido à existência de reflexões consecutivas entre duas superfícies reflectoras paralelas e próximas entre si [1].

Dentro de espaços fechados há o objectivo de se eliminar estes defeitos acústicos. Algumas soluções técnicas são as seguintes [1]:

- a aplicação de material absorvente na superfície reflectora, com o intuito de dissipação de energia;
- a alteração do ângulo da superfície reflectora, de modo a redireccionar a reflexão para uma zona onde não cause perturbações;
- uso de superfícies difusoras para ocorrer a dispersão de energia em várias direcções, algo bastante importante no fenómeno do eco repetidor;
- utilização de formas côncavas na envolvente, usadas para focalizar o som.

2.7.2.3 Discos Voadores

Os “discos voadores”, também referidos como discos suspensos ou nuvens acústicas (*clouds*), são elementos de condicionamento acústico aplicados predominantemente em salas de espectáculo com tectos muito elevados. Estes dispositivos funcionam como superfícies reflectoras intermédias, suspensas entre o tecto original [1].

De forma a aumentar a eficiência destes elementos, deve-se ter em conta a relação entre o comprimento de onda e a dimensão dos painéis, que devem ser, no mínimo, cinco vezes superiores ao comprimento de onda, na frequência mais baixa que se deseja reflectir. Os “discos voadores” podem ser planos ou convexos, sendo que as superfícies convexas são normalmente as preferidas por promoverem uma melhor difusão sonora [15].

Um dos exemplos arquitectónicos mais emblemáticos da utilização desta solução é o *Royal Albert Hall*, em Londres, onde os discos suspensos foram instalados para corrigir problemas graves de focagem sonora e ecos tardios causados pela vasta cúpula [1][15].

2.7.2.4 Difusão

A difusão sonora consiste na distribuição uniforme e aleatória das reflexões de uma onda sonora, em múltiplas direcções, de forma homogénea, quando a mesma atinge uma superfície. Para a superfície ser acusticamente difusora é necessária a existência de irregularidades com algum relevo. A dimensão dessas irregularidades vão condicionar a frequência das ondas sonoras reflectidas, em função dos seus comprimentos de onda, sendo que as altas frequências são mais bem difundidas por superfícies com pequenos relevos e ornamentação detalhada e as baixas frequências exigem elementos de grandes dimensões [1].

2.7.2.5 Acústica Variável

O conceito de “acústica variável” é a resposta à necessidade de criação de espaços multifuncionais, que mantenham uma qualidade sonora optimizada para diferentes tipos de eventos, como teatro, concertos ou conferências. Esta maleabilidade é alcançada através de dois métodos principais [1][15]:

- Variação na absorção sonora, que utiliza dispositivos manuais ou mecânicos para alterar as características acústicas da sala, alternado entre zonas reflectoras e absorventes. Alguns exemplos de soluções são a utilização de materiais absorventes como cortinas pesadas e painéis móveis ou giratórios;

- Variação no volume, que consiste em alterar fisicamente o volume do recinto para ajustar o tempo de reverberação. Esta é uma solução menos comum devido à sua complexidade, mas pode ser implementada através de tectos móveis ou suspensos, que criam um tecto acústico virtual, e também através do uso de divisórias móveis ou cavidades reverberantes.

Como exemplos da tecnologia de variação de volume, temos o *Edwin Thomas Hall*, nos EUA, que utiliza a movimentação do tecto de modo a acomodar concertos, ópera ou teatro, e o *Milton Keynes Theater*, no Reino Unido, cujo ajuste da altura do tecto permite variar o tempo de reverberação entre 1,1 e 1,5 segundos [15].

2.8 PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJECTIVOS

2.8.1 CLARIDADE (C_{80})

A Claridade, também designada como *early to late sound index*, é um índice fundamental para avaliar a qualidade sonora em recintos onde se pretende um equilíbrio entre a percepção de pormenores musicais e a reverberação no espaço, com 80 ms como limiar de perceptibilidade para a música. A expressão é a seguinte [1]:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.19)$$

Com:

C_{80} – Claridade (dB);

$p(t)$ – pressão impulsiva da sala em um determinado ponto (Pa).

No Quadro 2.6 encontram-se os valores ideais para a Claridade (C_{80}) em função do tipo de utilização:

Quadro 2.6 – Valores ideais para a Claridade (C_{80}) em função do tipo de utilização, adaptado de [1].

Função	C_{80} (dB)
Auditório (palavra)	> 6
Teatro	> 6
Cinema	> 5

Ópera (não wagneriana)	3 a 4
Ópera (Wagner)	1 a 2
Música sinfónica Barroca	0 a 2
Clássica	-1 a 0
Romântica	-2 a -1
Moderna	-1 a 0
Música popular	> 6
Música de órgão	< -2
Coros gregorianos	-3 a -1

2.8.2 DEFINIÇÃO (D_{50})

A Definição, também designada por *early energy fraction* ou *early to total sound index*, é a razão entre a energia recebida nos primeiros 50 ms e a energia total recebida. A duração de 50 ms é considerado o limiar de perceptibilidade em relação à palavra. A expressão é a seguinte [1]:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.20)$$

Com:

D_{50} – Definição;

$p(t)$ – pressão impulsiva da sala em um determinado ponto (Pa).

No Quadro 2.7 encontra-se a classificação da Definição de um local, dependendo dos valores obtidos:

Quadro 2.7 – Classificação de valores da Definição (D_{50}) [23][74].

Definição (D_{50})	[0,00 – 0,17]	[0,17 – 0,39]	[0,39 – 0,67]	[0,67 – 0,86]	[0,86 – 1,00]
	Muito Insuficiente	Insuficiente	Suficiente	Bom	Muito Bom

2.8.3 TEMPO CENTRAL (TS)

O Tempo Central descreve a distribuição temporal da energia sonora num recinto, identificando o ponto no tempo em que a energia recebida antes desse instante é igual à energia recebida após o mesmo instante. Utiliza-se em frequências médias de 250 a 2k Hz e é expressa pela expressão [1]:

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.21)$$

Com:

TS – Tempo Central (ms);

t – tempo (ms);

p(t) – pressão impulsiva da sala em um determinado ponto (Pa).

2.9 PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJECTIVOS

Os parâmetros acústicos subjectivos representam as qualidades sonoras compreendidas pelo sistema auditivo humano, de modo subjectivo pela parte dos utilizadores, e que não podem ser avaliadas directamente por instrumentos de medição. Os critérios subjectivos mais importantes, actualmente, na caracterização de grandes salas de espectáculo são os seguintes [1]:

- **Ruído de fundo:** refere-se a todos os ruídos escutados num local que não provêm de uma fonte sonora ou audiência pretendida. Alguns exemplos são o sistema de ventilação, o tráfego rodoviário e todos os tipos de ruído que perturbem a audição e a comunicação;
- **Intensidade do som:** é a sensação de amplitude ou o volume geral do som sentido num determinado ponto da sala, sendo o resultado da combinação das intensidades do som directo e do som reverberante;
- **Clareza do discurso musical:** quantifica o grau de percepção da separação entre diferentes notas musicais no tempo. Esta qualidade depende principalmente da configuração das superfícies reflectoras no interior da sala;
- **Reverberância:** a capacidade temporal de o som perdurar no espaço, após a interrupção da fonte sonora;

- **Eco:** criado por reflexões tardias de um som, que atingem o receptor com intensidade suficiente para ser distinto de outros sons incidentes, como o som directo. Há uma maior probabilidade de ocorrência em lugares próximos do palco de grandes salas, onde o tempo de reverberação é relativamente curto;
- **Intimidade:** proporciona uma sensação auditiva de proximidade com a fonte sonora, dando a impressão de que a música ou o discurso estão a ser apresentados num espaço de pequenas dimensões, mesmo que a sala não o seja;
- **Direccionalidade:** capacidade sensorial de identificar correctamente a direcção de proveniência do som. Em certos casos, reflexões inadequadas podem dar a sensação errada de que som provém de um ponto diferente ao real;
- **Envolvimento:** representa a sensação de imersão do ouvinte no som e depende do tempo de reverberação e da forma de propagação da energia sonora no espaço. Para um envolvimento positivo, é necessário o auditor sentir que recebe a mesma energia sonora de todas as direcções;
- **Equilíbrio tímbrico:** corresponde à percepção de receber todos os componentes do som de forma equilibrada, sem que o receptor consiga distinguir uma proeminência excessiva de frequências baixas (sons graves) ou altas (sons agudos);
- **Impressão geral:** impressão geral da qualidade acústica sentida na sala.

3

ESTADO DA ARTE

3.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS SALAS DE ESPECTÁCULO

3.1.1 PERÍODO GREGO

O desenvolvimento dos espaços de espectáculo no Período Grego, especialmente entre os séculos V a.C. e II d.C., estabeleceu as bases fundamentais da acústica arquitectónica, influenciando o desempenho sonoro através da combinação de escolhas geográficas, geometria rigorosa e inovações técnicas [22][23].

Estes recintos surgiram da necessidade de acolher e celebrar grandes festividades religiosas, como os festivais em honra de Dionísio. Os primeiros teatros gregos aproveitaram as encostas naturais de colinas para formar a zona de audiência, de forma a minimizar os custos de construção e a maximizar a visibilidade e audibilidade [23][24].

A estrutura do teatro grego era composta por três elementos principais: o *koilon* (ou *theatron*), a *orchestra* e a *skene*. O *koilon* é a bancada de assentos, geralmente com uma forma similar a um leque ou a um segmento circular ligeiramente superior a 180°, que envolve a zona de actuação. A *orchestra* é uma plataforma circular central, destinada à dança e ao canto do coro. O *skene*, inicialmente apenas uma estrutura de madeira, evoluiu, ao longo dos séculos, para um edifício de cena, após os actores, que funcionava como pano de fundo e como superfície reflectora do som [22][23][24][15][25].

Exemplos emblemáticos incluem o Teatro de Dionísio em Atenas, considerado o berço do teatro ocidental, e o Teatro de Epidauro, frequentemente citado como o modelo mais perfeito de acústica e preservação da antiguidade, foi construído por volta de 330 a.C. e conseguia receber entre 14.000 e 17.000 pessoas, com o assento mais distante situado a cerca de 70 metros do palco [23][25].

Como referido anteriormente, a qualidade sonora dos teatros gregos era o resultado de observações empíricas e de uma geometria rigorosa. A inclinação acentuada das bancadas, tipicamente entre os 20° e 34° , garantia a linha de visão desobstruída e reduzia a atenuação rasante do som, causada pela audiência presente nas bancadas. A superfície da *orchestra*, geralmente composta por terra densa batida ou pedra, funcionava como um reflector sonoro, que permitia que a voz se propagasse cerca de 40% mais longe do que num espaço aberto sem a mesma superfície. A escolha de locais abertos e isolados, longe de ruído urbano, e o silêncio exigido à audiência garantiam um nível de ruído de fundo baixo, essencial para a inteligibilidade da palavra em grandes espaços. O uso de máscaras equipadas com pequenos megafones cónicos integrados na zona da boca das máscaras utilizadas, ajudavam a reforçar a intensidade das vozes e o coro tinha a função de aumentar a sonoridade através da multiplicidade de vozes em uníssono [22][23][24][15][25][26].

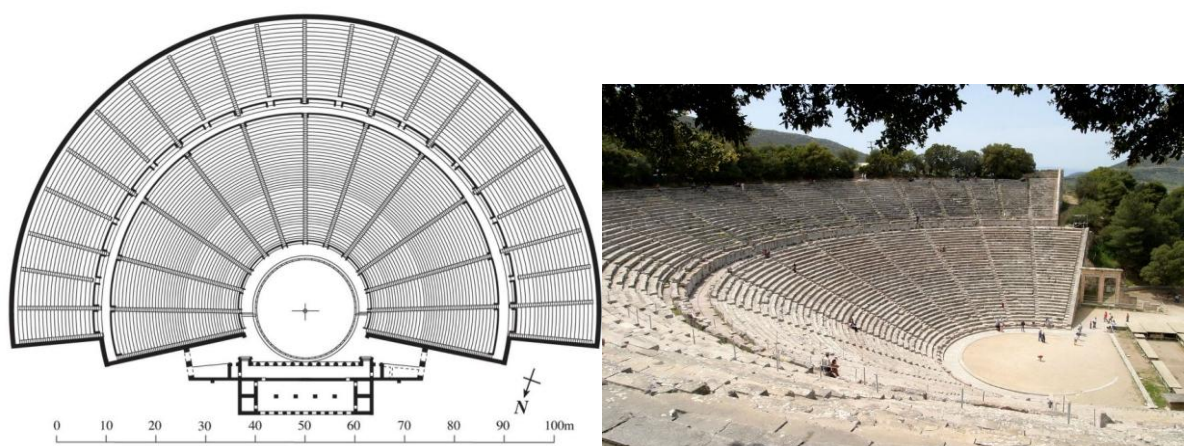


Figura 3.1 e 3.2 - Planta e fotografia do Teatro de Epidauro, Grécia [27].

Os arquitectos, como Policeto o Jovem, responsável pela construção do Epidauro (Figura 3.1 e 3.2), eram altamente instruídos em geometria, matemática e teoria musical. Apesar de não ser considerada uma ciência formal, a acústica já era caracterizada por conhecimento sobre a propagação sonora, comparada frequentemente à formação de círculos concêntricos na água, com filósofos como Aristóteles e Aristoxeno a investigarem a natureza do som e a vibração [22][23].

A implementação de *echea*, vasos ressonantes de bronze ou cerâmica, mencionados por Vitruvius, em cavidades sob os assentos, tinham a intenção de amplificar ou melhorar a clareza ou musicalidade do som e seguiam princípios harmónicos matemáticos. Contudo, a eficácia

destes dispositivos é debatida e pensa-se que a sua função seja mais de absorção do que amplificação [3][22][23].

Além dos grandes anfiteatros ao ar livre, existiam também os *odea* (ou *odeon* no singular), teatros interiores de menores dimensões, destinados a recitais de música e poesia. Estes edifícios eram tipicamente cobertos com telhados de madeira, essenciais para a reverberação do som e exigindo assim uma abordagem acústica diferente. Estes teatros favoreciam actuações mais íntimas e sons de instrumentos mais fracos, como a lira ou a cítara [22][23].



Figura 3.3 - *Odeon* de Herodes Ático, que no passado possuía um tecto de madeira de cedro, em Atenas [28].

3.1.2 PERÍODO ROMANO

O Período Romano, aproximadamente entre o século II a.C. e IV d.C., representou uma evolução técnica fundamental na história das salas de espectáculo, diferenciando-se do período grego através de avanços significativos em engenharia civil, em estruturas mais práticas e independentes do terreno e numa nova organização espacial e social [23][24].

Os romanos utilizaram o seu domínio da abóbada, do arco e do betão (*opus caementitium*) para erguer edifícios como estruturas independentes em terrenos planos. Esta autonomia permitiu a construção de teatros em contextos urbanos densos. Outra inovação crucial foi o desenvolvimento de *vomitoria*, um sistema complexo de passagens e corredores sob as bancadas, que permitia o acesso e a evacuação rápida de milhares de pessoas [24][25].

O teatro romano consolidou uma forma semicircular mais rigorosa em comparação com o formato em "leque" grego. A *orchestra* deixou de ser o local do coro para se tornar um semicírculo destinado a magistrados e senadores, perdendo a sua função acústica de reflector

sonoro. O palco e o proscénio, a área de actuação tornou-se uma plataforma elevada (*proskenion* ou *pulpitum*), mais larga e profunda, aproximando os actores da audiência. A frente de cena, *scaenae frons*, era um edifício de cena monumental, com uma parede traseira ricamente ornamentada que atingia a mesma altura que o topo das bancadas e que fechava o recinto lateral e continuava até ao tecto, criando uma unidade arquitectónica integral. O *velarium* eram grandes telas de lona cuja função era sombrear o público e, embora leves, possuíam propriedades ligeiramente reflectoras que auxiliavam na contenção do som [23][24] [25].

A acústica romana foi documentada extensivamente por Marcos Vitruvius Polio na sua obra *De Architectura*, no século 27 a.C., onde detalhou regras geométricas para garantir a inteligibilidade da palavra. Vitruvius classificou os locais em função da sua resposta acústica como dissonantes, circunsonantes, ressonantes ou consonantes (os ideais). Devido à ocupação da *orchestra* pelo público, a parede monumental de fundo, *scaenae frons*, passou a ser o principal reflector acústico, direccionando a voz dos actores para os lugares mais distantes. Os assentos apresentavam uma inclinação ainda mais acentuada, tipicamente entre 30° e 34° , o que reduzia a atenuação rasante do som provocada pelas cabeças da audiência e garantia as suas linhas de visão directas. Vasos ressonantes, *eches*, e teatros de menores dimensões com tecto de madeira, *odéon*, também estão presentes no período romano [23][24].

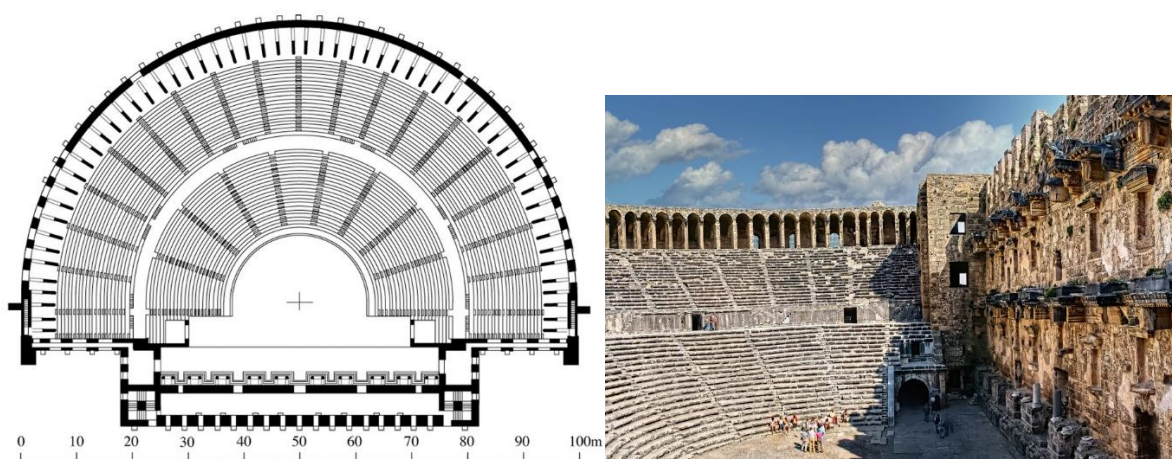


Figura 3.4 e 3.5 - Planta e fotografia do Teatro Romano de Aspendus, em Belkiz na Turquia [29].

O Teatro de Aspendos (Figura 3.4 e 3.5), na Turquia, é considerado o exemplar romano mais bem preservado, com uma capacidade para 7.000 pessoas e uma distância de 53 metros entre o palco e o lugar mais remoto. O Coliseu (Anfiteatro Flaviano) em Roma, uma estrutura oval com capacidade para 40.000 a 50.000 pessoas, foi projectado para espectáculos de massas, onde a

inteligibilidade da palavra era secundária em relação à visibilidade e à escala monumental do edifício [23][24].

3.1.3 RENASCIMENTO

O período do Renascimento, aproximadamente entre 1400 e 1600, marcou o ressurgimento da construção de teatros permanentes na Europa, retomando a evolução arquitectónica deixada pelos romanos, cerca de mil anos antes. Este período é particularmente relevante pela introdução de inovações estruturais como o arco do proscénio e o desenvolvimento técnico da perspectiva e da cenografia [23].

A transição para espaços interiores e o uso de cenografia complexa trouxeram avanços que definiram o teatro moderno. O arco do proscénio passou a actuar como uma "moldura de quadro", separando fisicamente a audiência do palco e permitindo ocultar maquinaria e efeitos mecânicos complexos. Durante o Renascimento, as molduras de cena tornaram-se elementos arquitectónicos permanentes. *Upstage* e *downstage* são termos técnicos de engenharia de palco que surgiram neste período porque o piso do palco era construído com uma inclinação ascendente em direcção ao fundo, de modo a reforçar a ilusão da perspectiva. A necessidade de mudar de cenários levou ao desenvolvimento de painéis laterais (*wings*) e de panos de fundo (*drops*), que podiam ser movidos através de sistemas de calhas ou maquinaria no subsolo, como o sistema de carros e postes (*chariots and poles*) [23][24].

Em termos de desempenho acústico, ao contrário dos teatros gregos ao ar livre, os espaços interiores renascentistas proporcionavam reflexões internas que permitiam aos actores ouvir as suas próprias vozes sem necessidade de esforço vocal excessivo. A procura por uma relação mais próxima entre artista e público conduziu ao desenho de salas mais pequenas, onde a inteligibilidade da palavra era favorecida pela proximidade física [23][25].

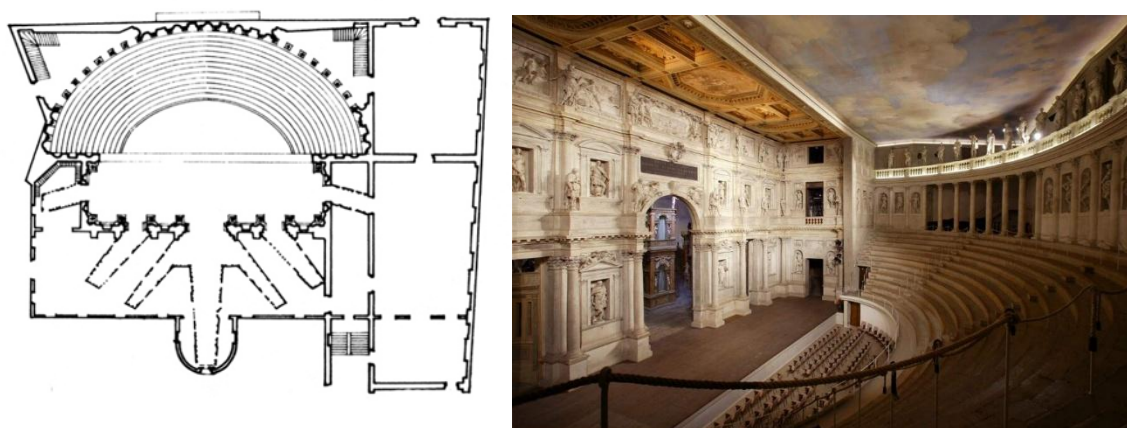


Figura 3.6 e 3.7 - Teatro Olímpico de Vicenza, Itália [30][31].

A construção de teatros permanentes começou em Itália. O Teatro Olímpico de Vicenza (Figura 3.6 e 3.7), construído entre 1580 e 1585, apresenta uma plateia semi-elíptica que segue o padrão clássico romano. A inovação mais notável foi a introdução da perspectiva onde Scamozzi adicionou cinco ruas pintadas em perspectiva forçada atrás das aberturas da *scaenae frons*, criando uma ilusão de profundidade que capturou a imaginação dos *designers* da época. No Teatro all'Antica em Sabbioneta (1588), Scamozzi modificou o plano romano, empurrando a planta semi-elíptica para uma forma em "U" e removendo a parede do palco para favorecer um pano de fundo com um único ponto de fuga na perspectiva [23][25].



Figura 3.8 e 3.9 - Desenho do Teatro *The Globe* e fotografia da vista do palco e do público no Teatro Globe de Shakespeare (réplica) [32].

Paralelamente à evolução italiana, desenvolveu-se em Inglaterra o modelo isabelino, exemplificado pelo *The Globe* (1599). Este teatro consistia numa estrutura poligonal, com 20 lados e com galerias de três níveis em torno de um pátio central a céu aberto. A ausência de

tecto reduziu drasticamente os problemas de reverberação e as paredes altas protegiam o público do ruído externo da cidade. As paredes laterais e as coberturas parciais sobre o palco, conhecidas como *shadows* ou *heavens*, forneciam reflexões precoces benéficas para a compreensão de diálogos complexos, como os de Shakespeare [23][25].

Esta evolução renascentista estabeleceu as bases para o Teatro à Italiana e para a Ópera Barroca, consolidando o modelo de ferradura e a separação clara entre palco e audiência [23][25].

3.1.4 PERÍODO BARROCO

O período Barroco, aproximadamente entre 1600 e 1750, representou uma das eras mais estáveis e influentes na evolução das salas de espectáculo, culminando na criação do modelo de Teatro à Italiana que dominaria a arquitectura europeia durante os dois séculos seguintes e é notável pela transição de estruturas temporárias para edifícios permanentes, altamente mecanizados, onde a acústica e a cenografia se fundiram para apoiar o nascimento e a ascensão da ópera [21][23][25].

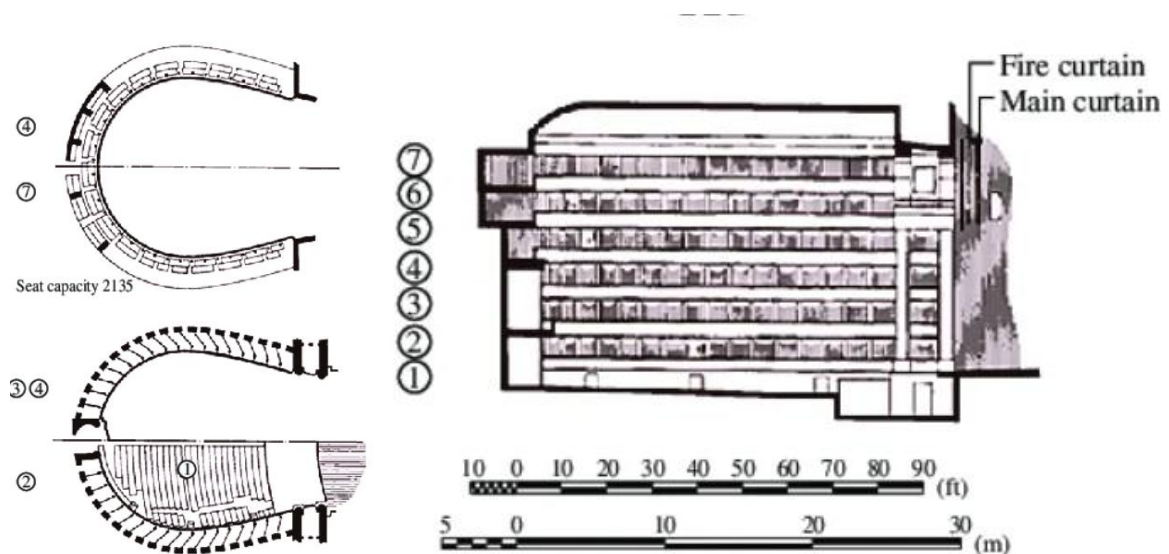


Figura 3.10 e 3.11 - Teatro alla Scala, Milão, Itália, adaptado de [34].

O desenvolvimento da ópera em Itália, a partir do trabalho da *Camerata Fiorentina*, exigiu uma nova configuração espacial que equilibrasse a visibilidade e a acústica, particularmente para a voz humana. Os primeiros teatros barrocos, como o Teatro Farnese em Parma (1618), utilizavam inicialmente uma planta em "U". Contudo, deu-se uma rápida evolução para a planta em ferradura ou elipse truncada, como no Teatro alla Scala em Milão (Figura 3.10, 3.11 e 3.12), inaugurado em 1778. A introdução de múltiplos níveis de camarotes sobrepostos permitiu

maximizar a capacidade para o público e a separar as classes sociais. Acusticamente, as frentes ornamentais destes camarotes funcionavam como superfícies reflectoras e difusoras, enquanto o interior estofado dos camarotes actuava como absorção sonora, ajudando a controlar a reverberação excessiva [21][23][25].



Figura 3.12 - Teatro alla Scala, Milão, Itália [35].

O Barroco introduziu elementos de engenharia de palco que definem os teatros modernos. Pela primeira vez, com a abertura do Teatro San Cassiano em Veneza (1637), a orquestra foi colocada imediatamente à frente e abaixo do nível do palco, com o intuito de equilibrar o nível sonoro entre os cantores e os músicos. Também surgiram palcos de ilusão com sistemas complexos de painéis deslizantes (*wings*) e panos de fundo (*drops*), operados por guinchos e alavancas a partir de torres de cena (*flylofts*). O ruído gerado por esta maquinaria era tão elevado, que os compositores da época escreviam frequentemente passagens orquestrais ruidosas cujo objectivo era disfarçar o som dos cenários a mudar [21][23][25].

Este período assistiu a uma explosão na construção de teatros, especialmente em Veneza, onde abriram nove casas de ópera entre 1637 e 1700. Alguns exemplos marcantes incluem o Teatro SS Giovanni e Paolo em Veneza (1654), com cinco níveis de camarotes e uma planta em "U", e o Teatro Barberini em Roma (1632), com capacidade para 3.000 pessoas. O modelo barroco consolidou-se de tal forma que os compositores passaram a escrever música conseguindo saber exactamente o tipo de resposta acústica destas salas [21][23][25].

3.1.5 NEOCLASSICISMO

O Neoclassicismo, aproximadamente entre 1750 e 1825, caracterizou-se por um "revivalismo clássico", procurando recuperar o espírito e a pureza formal da Antiguidade Grega e Romana. Este período é de especial interesse por marcar o surgimento das primeiras salas construídas especificamente para a audição de música instrumental não teatral. A arquitectura neoclássica foi profundamente influenciada pelo Iluminismo, que defendia que o conhecimento deveria evoluir através da observação cuidadosa e da razão. As escavações de Pompeia e Herculano renovaram o interesse pela perfeição das formas geométricas clássicas, que foram inseridas nos espaços de audição [23].

Durante o período Neoclássico, as obras musicais começaram, pela primeira vez, a ser compostas com salas de concerto formais em mente, em vez de salões privados ou igrejas. As salas evoluíram e consolidou-se o plano rectangular, que viria a ser conhecido como o modelo *shoebox*. Alguns exemplos destas salas são o Hanover Square Rooms (Londres, 1775), que possuía um tecto abobadado e um palco inclinado para garantir boas linhas de visão e som, o Redoutensaal (Viena, 1740/1752), localizada no palácio de Hofburg (Figura 3.13), um espaço rectangular com galerias laterais, utilizado tanto para bailes como para concertos, onde estrearam obras de Haydn, Mozart e Beethoven, e o Altes Gewandhaus (Leipzig, 1781) (Figura 3.14), uma sala com capacidade para 400 pessoas e um tempo de reverberação de aproximadamente 1,3 segundos [23][15][25].



Figura 3.13 e 3.14 - Fotografias de Redoutensaal, Viena, e Altes Gewandhaus, Leipzig, [36][37].

Neste período, surgiram as primeiras tentativas de conjugar a forma arquitectónica com o comportamento acústico. Foram propostas plantas elípticas e circulares que, apesar de

actualmente saber-se do seu perigo devido à focalização sonora em superfícies côncavas, serviram de ponto de partida para o avanço científico em acústica. Vitruvius continuava a ser a principal referência ao influenciar as bancadas inclinadas para otimizar a voz ascendente e garantir a clareza da oratória [25].

As salas neoclássicas tendiam a ser mais pequenas do que as salas românticas posteriores, o que evitava problemas graves de reverberação excessiva. As dimensões seguiam razões simples, como o cubo duplo (1:1:2), acreditando-se que a harmonia visual geraria harmonia auditiva. O uso de gesso espesso, madeira pesada e uma ornamentação densa proporcionavam uma excelente difusão sonora, espalhando as reflexões de forma uniforme pela audiência. Nestas salas, o tempo de reverberação era tipicamente baixo, entre 1,3 e 1,6 s, o que beneficiava a definição e a transparência necessárias para a música de Bach, Mozart e Haydn [23][25][33].

3.1.6 ROMANTISMO

O período do Romantismo, aproximadamente entre 1825 e 1900, representa uma era de transformações profundas na acústica arquitectónica, propulsionada por uma mudança na estética musical e nas exigências sociais das salas de concertos. Durante este período, a música libertou-se da estrutura rígida do Classicismo e evoluiu para uma expressão mais pessoal, emocional e poética. Esta transição criou salas que suportassem orquestras de maiores dimensões e um timbre muito mais rico e denso [23][15].

Ao contrário da música barroca ou clássica, que favorecia a definição e a transparência para facilitar a audição de linhas melódicas independentes (contraponto), o Romantismo favorece um ambiente de elevada plenitude de tom (*fullness of tone*). A música de compositores como Debussy, Brahms, Tchaikovsky e Wagner exige um tempo de reverberação mais elevado, situando-se idealmente entre 1,8 e 2,2 segundos (com a sala ocupada), permitindo que as harmonias complexas se unam. Dá-se também importância às reflexões laterais precoces, que proporcionam ao ouvinte a sensação de estar imerso no campo sonoro, uma característica inerente à experiência sinfónica romântica [23][15].

Neste período, atingiu-se a maturidade do modelo rectangular. As salas foram projectadas com tectos muito elevados, superiores a 15 metros, de modo a alcançar tempos de reverberação longos. A largura foi mantida relativamente estreita para garantir que as reflexões das paredes laterais chegassem rapidamente aos ouvintes, reforçando a clareza dentro da reverberação. As paredes passaram a ser rígidas e pesadas (geralmente gesso espesso sobre alvenaria ou madeira

maciça) para conservar energia sonora, especialmente nas baixas frequências (graves), aumentando o "calor" acústico. A ornamentação densa das salas continuou a desempenhar um papel fundamental na difusão do som, de forma uniforme e evitando ecos indesejados [23][15][26].

Alguns exemplos de salas românticas são: Grosser Musikvereinssaal (Viena, 1870), que possui um TR de 2,0 s e cujas paredes de gesso espeço e elementos decorativos garantem uma difusão perfeita; Concertgebouw (Amesterdão, 1888), com um TR de 2,2 s; Festspielhaus de Bayreuth (1876) (Figura 3.15 e 3.16), que introduziu o fosso de orquestra coberto, que esconde os músicos e ajuda a equilibrar o som da orquestra com as vozes dos cantores, criando uma sonoridade mística; e com audiências até 88.000 pessoas, mas com falta de clareza e níveis sonoros reduzidos, devido ao uso extensivo de vidro [23][15][25].

Com o aumento da popularidade dos concertos orquestrais, surgiu o desafio de engenharia de construir salas de maiores dimensões, acima de 2000 lugares, de como manter a intimidade e a força do som quando as superfícies reflectoras, paredes e tecto, se tornam demasiado remotas devido ao enorme volume necessário para a reverberação do estilo romântico [15][25].



Figura 3.15 e 3.16 - Festspielhaus de Bayreuth, Alemanha, e do fosso de orquestra coberto, à direita, [38].

3.2 ENQUADRAMENTO

3.2.1 ASPECTOS GERAIS

O enquadramento acústico de salas de espectáculo deve ser entendido como a aplicação científica de princípios da física e da engenharia para assegurar a funcionalidade sonora de um espaço construído. Historicamente, a acústica arquitectónica transitou de uma prática baseada

no empirismo e no precedente, para uma disciplina quantitativa e científica no início do século XX, impulsionada pelos estudos de Wallace Clemente Sabine [3][25].

O principal objectivo do projecto acústico em auditórios é garantir que a mensagem sonora, seja ela falada ou musical, chegue a todos os ouvintes com a máxima qualidade e fidelidade. Para que isto ocorra, existem requisitos fundamentais que devem ser harmonizados: a intensidade, onde o som deve ser suficientemente forte para ser ouvido com clareza em todos os lugares, inclusive nos mais remotos; a clareza e a definição, onde é crucial que os sons sucessivos sejam distintos entre si, sendo este equilíbrio frequentemente quantificado pelos parâmetros C_{80} (para a música) e D_{50} (para a palavra); um tempo de reverberação elevado pode enriquecer a música sinfónica, mas prejudica a inteligibilidade da palavra; a imersão do ouvinte no campo sonoro é potencializada por reflexões laterais precoces provenientes das paredes laterais do recinto; a sensação de proximidade física com a fonte sonora está ligada ao *Initial Time-Delay Gap*; a excelência acústica exige níveis de ruído ambiente extremamente baixos para não encobrir os sons mais ténues de um espectáculo; a componente arquitectónica deve prever e mitigar anomalias sonoras como ecos [23][15][25][39].

A concepção de uma sala de espectáculos moderna representa, portanto, um compromisso delicado entre a geometria do recinto, o volume e a selecção de materiais, absorventes, reflectores ou difusores, para conceber o campo sonoro propício à função pretendida [3][23][40].

3.2.2 A VOZ CANTADA

Em salas de espectáculo, e em particular casas de ópera, a voz cantada é considerada uma das fontes sonoras mais complexas e exigentes, apresentando requisitos distintos da oratória ou da música puramente instrumental. O grande desafio acústico reside na capacidade de um solista se fazer ouvir, com clareza e potência, acima de uma orquestra que, em obras do período romântico, pode atingir os 100 músicos [3][21][25].

A característica fisiológica e acústica mais distinta do cantor lírico profissional é o desenvolvimento do chamado formante do cantor (Figura 3.17). Este fenómeno consiste num pico de energia acústica concentrado na gama de frequências entre os 2.500 e os 3.000 Hz [25].

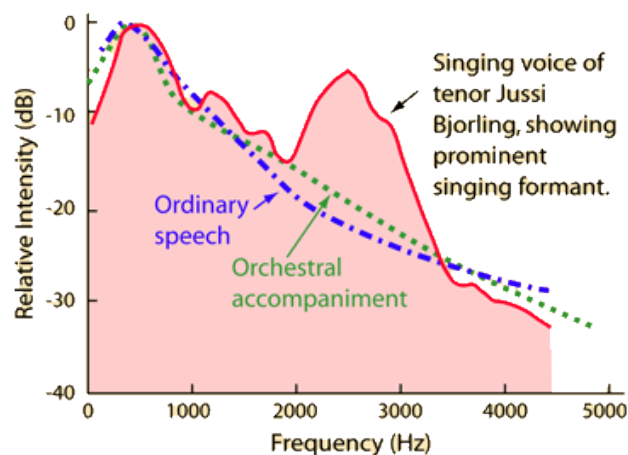


Figura 3.17 - Conceito de formante do cantor, ou *singing formant*, desenvolvido pelo investigador sueco Johan Sundberg [41].

Este formante é crucial porque o espectro sonoro de uma orquestra declina rapidamente acima dos 1000 Hz. Ao concentrar energia nessas bandas de frequência, onde a orquestra é relativamente mais fraca, o cantor consegue transpor a massa sonora instrumental sem ser necessário um esforço vocal incomportável. Nos homens e contraltos, este efeito é obtido através do abaixamento da laringe. No caso das sopranos, que cantam em registos mais agudos, a técnica envolve frequentemente a abertura exagerada da mandíbula, de modo a alinhar o primeiro formante com a frequência da nota cantada, maximizando a saída de som à custa da clareza das vogais [25].

A propagação da voz humana não é uniforme em todas as direcções, tornando-se progressivamente mais direccionada à medida que a frequência aumenta (Figura 3.18). Para as frequências que compõem o formante do cantor (oitava dos 2.000 Hz), a maior parte da energia sonora está confinada a um ângulo de apenas $\pm 35^\circ$ em relação ao eixo frontal do cantor. Pequenas rotações do cantor em palco, superiores a 40° , provocam alterações perceptíveis no timbre e na intensidade recebida pela audiência. Por este motivo, as superfícies reflectoras perto do proscénio são vitais para redireccionar esta energia direccionada para as zonas laterais da plateia [25].

O suporte acústico em palco é vital para o desempenho, sendo que os solistas necessitam de sentir que a sua voz preencha o recinto através do retorno acústico proveniente da sala. Para isto seja eficaz, sem criar ecos perturbadores, as reflexões iniciais devem chegar ao cantor com um atraso inferior a 35 ms. Embora os cantores sejam particularmente sensíveis à reverberação

do auditório, o equilíbrio entre a voz e a orquestra deve ser cuidadosamente gerido através do *design* arquitectónico, utilizando superfícies que reforcem selectivamente o som do palco em detrimento do som do fosso da orquestra [21][25].

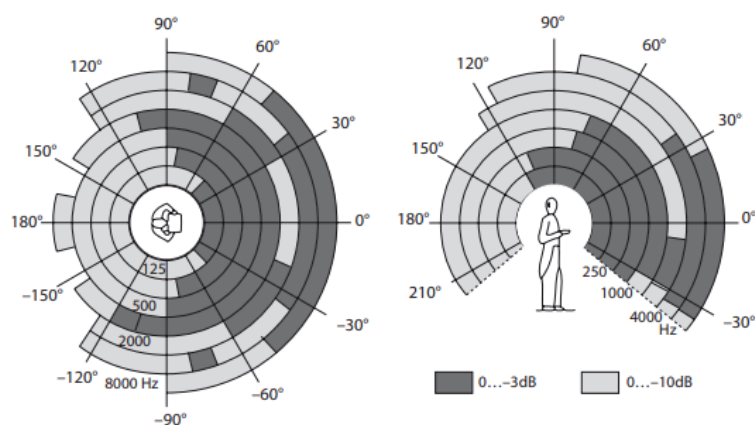


Figura 3.18 - Padrão de direcções da voz para um cantor barítono [25].

3.2.3 CONFIGURAÇÃO DA SALA

A configuração geométrica de uma sala de espectáculos é um dos determinantes primordiais do seu desempenho acústico, influenciando directamente a distribuição da energia sonora, a clareza e a sensação de envolvimento do ouvinte. Historicamente, há quatro formas fundamentais de planta que dominam a arquitectura de auditórios (Figura 3.19): a rectangular (ou *shoebox*), em leque (*fan-shape*), em ferradura (típica da ópera barroca) e a de arena (*terraced* ou *vineyard*) [3][23]:

- Planta Rectangular (*Shoebox*): considerada o padrão de excelência para a música sinfónica, a planta rectangular caracteriza-se pela sua largura estreita e tectos elevados. Possui como vantagens acústicas uma geometria que favorece a criação de reflexões laterais precoces e fortes, que são essenciais para a sensação de imersão e a impressão espacial. As paredes paralelas permitem uma elevada densidade de reflexões, enquanto as superfícies ornamentadas, como nichos e estátuas, asseguram a difusão sonora necessária. A *Grosser Musikvereinssaal*, em Viena, e a *Symphony Hall*, em Boston, são os modelos clássicos deste tipo, apresentando tempos de reverberação ideais para o período romântico;
- Planta em Leque (*Fan-shape*): é muito utilizada em salas multiuso ou cinemas e visa aproximar o público do palco e a optimizar as linhas de visão. Embora seja eficaz

no contexto de oratória e visibilidade, a planta em leque é frequentemente criticada em situações musicais devido à produção de reflexões que chegam predominantemente de frente, reduzindo a sensação de espacialidade. Como a parede posterior tende a ser côncava, pode também gerar focagem sonora e ecos indesejados no palco, exigindo profundos tratamentos de absorção ou difusão;

- Planta em Ferradura (*Horseshoe*): é a forma dominante nos teatros de ópera desde o período barroco e caracteriza-se por múltiplos níveis de camarotes sobrepostos. Esta configuração cria um ambiente acusticamente íntimo no centro da plateia. As aberturas dos camarotes funcionam frequentemente como superfícies absorventes, devido ao mobiliário e público no seu interior, e as frentes decoradas dos camarotes difundem o som. O principal problema reside na má visibilidade e na sombra acústica existente nos lugares laterais e profundos, dentro dos camarotes;
- Planta de Arena ou Socalcos (*Vineyard*): que divide a audiência em pequenos blocos ou "socalcos" que rodeiam a orquestra. O uso de paredes baixas entre os blocos de assentos permite gerar reflexões laterais próximas dos ouvintes, mesmo em salas de grande volume, mitigando o problema das paredes exteriores distantes. A *Philharmonie* de Berlim (1963) começou este modelo, oferecendo uma experiência visualmente dramática e acusticamente clara através de reflectores suspensos (*clouds*) sobre a orquestra.

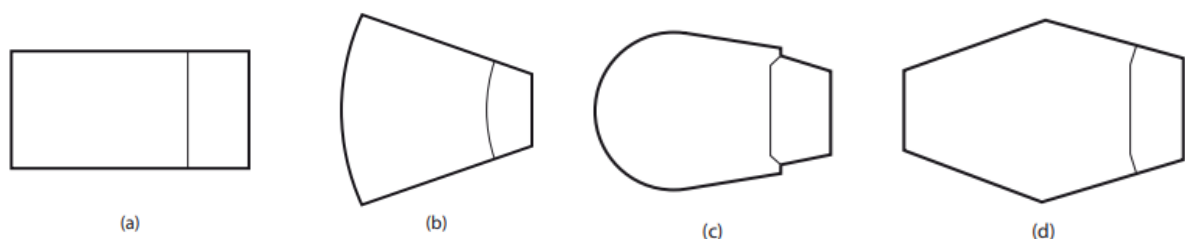


Figura 3.19 - Plantas simples a demonstrar as formas de auditórios [25].

3.2.4 PALCO E PROSCÉNIO

O palco e o proscénio não são apenas áreas funcionais de actuação, mas componentes estruturais críticos que definem a projecção sonora e o apoio acústico aos intérpretes. Historicamente, a transição do teatro grego ao ar livre para o modelo de proscénio moderno mostra uma evolução na gestão de reflexões sonoras. Actualmente, o palco de proscénio é

caracterizado pelo "arco de proscénio", uma moldura arquitectónica que separa fisicamente a audiência da maquinaria de cena e do compartimento do palco [24][25][26].

O proscénio desempenha um papel vital na distribuição do som. As superfícies localizadas imediatamente à frente e ao lado do proscénio (*chanfros* ou *splays*) são cruciais para reforçar selectivamente a voz dos cantores ou actores em relação à massa sonora da orquestra. A zona do tecto sobre o proscénio deve ser preferencialmente convexa e horizontal para direccionar o som para o centro da plateia, a zona mais difícil de cobrir acusticamente. Para que os músicos e cantores consigam monitorizar o seu desempenho, o palco deve fornecer reflexões precoces através de superfícies próximas, como conchas acústicas (*orchestra shells*) ou painéis reflectores suspensos [24][25][26].

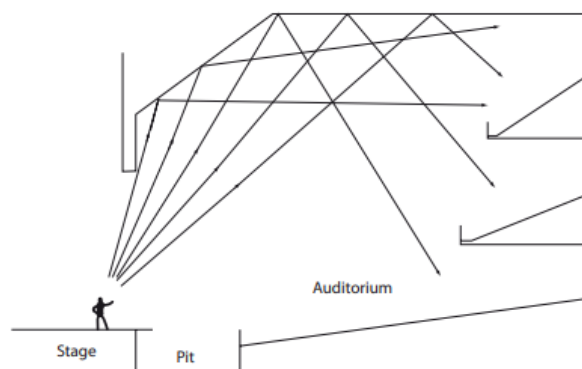


Figura 3.20 - Um tecto inclinado imediatamente à frente do proscénio, direcciona as reflexões [25].

Uma característica herdada do Renascimento é o palco inclinado, que sobe em direcção ao fundo do palco e que foi originalmente concebido para reforçar a ilusão da perspectiva. Esta inclinação também beneficia as linhas de visão e a incidência sonora directa para a audiência, embora a sua utilização tenha diminuído com o advento do realismo cénico no século XX [3][21].

Em teatros de proscénio, quando o fundo de cena está preenchido com cortinas absorventes, o volume do palco torna-se acusticamente morto, o que evita que a energia sonora regresse à sala com atrasos excessivos que causariam eco. Contudo, para concertos sinfónicos, é essencial o uso de uma concha acústica para fechar o palco e agrupar o seu volume de forma útil ao da sala, aumentando a clareza e a sonoridade [23][25][26].

As aberturas típicas de proscénio para ópera situam-se entre os 14 e os 18 metros de largura, com alturas até 9 metros. A coordenação entre a engenharia acústica e a cenografia é

fundamental, uma vez que a presença de cenários sólidos de madeira podem alterar drasticamente o carácter acústico da sala em comparação com cenários de utilização de tela leve [25].

3.2.5 PLATEIA E CADEIRAS DE ORQUESTRA

A plateia representa a maior área de ocupação do público e, consequentemente, a superfície de maior absorção sonora do recinto. Para um desempenho acústico otimizado, a configuração deste espaço deve abordar desafios críticos como a atenuação rasante e o equilíbrio da reverberação [23][15][26].

A inclinação das filas de cadeiras é uma exigência técnica fundamental que visa garantir não só boas linhas de visão, mas também a integridade do som directo. Quando o som se propaga paralelamente a uma plateia sentada num piso plano, a sua intensidade diminui rapidamente devido à absorção pelas cabeças dos espectadores. Em espaços abertos, o nível sonoro na parte traseira da plateia pode ser até oito vezes inferior ao da parte frontal. A inclinação do piso, normalmente superior a 7° ou 8° , aumenta o ângulo de incidência sonora, reduzindo significativamente esta atenuação. Em auditórios para a palavra, a distância máxima recomendada entre o orador e o último lugar da plateia é de aproximadamente 24 metros, para preservar a audibilidade [3] [23][15][26].

A plateia introduz uma atenuação selectiva de baixas frequências, conhecida como *seat dip effect*, que ocorre geralmente entre 125 e 150 Hz. Este fenómeno resulta da interferência sonora entre as filas de cadeiras, que actuam como uma rede de ressoadores.

De modo a diminuir esta perda de resposta nos graves e garantir o calor acústico, é comum elevar o palco ou utilizar reflectores de tecto que direccionem energia sonora para a plateia com ângulos de incidência mais verticais [3][23].

Uma vez que o público fornece cerca de 85% da absorção sonora total numa sala de concertos, as cadeiras devem ser projectadas para minimizar a variação acústica entre a sala vazia e ocupada. Deste modo, é recomendado o uso de cadeiras estofadas com tecido, cujo coeficiente de absorção sonora seja idêntico ao de uma pessoa sentada, garantindo um tempo de reverberação estável, independentemente do nível de ocupação da sala [23][26].

No cálculo da absorção sonora, deve-se também considerar o efeito de borda nos corredores, adicionando uma faixa virtual de 0,5 metros em redor dos blocos de cadeiras para contabilizar a absorção adicional das faces expostas [25][26].

3.2.6 TRIBUNAS E CAMAROTES

No volume principal da sala, os camarotes funcionam como um sistema complexo de tratamento acústico. Enquanto as frentes ornamentadas das varandas actuam como superfícies reflectoras e difusoras, as aberturas dos camarotes comportam-se como grandes áreas de absorção sonora, devido ao mobiliário estofado e à presença do público no seu interior, ambos ajudando a controlar a reverberação [21][23][25].

A experiência acústica dentro de um camarote é frequentemente inferior à da plateia. Para quem não se encontra na fila frontal do camarote, o som sente-se abafado ou fraco, devido à abertura limitada que impede a entrada de grande parte da energia sonora e da reverberação global da sala [21][26].

Devido à geometria curva típica destas estruturas, existe um risco elevado de focagem sonora e ecos indesejados no palco ou na plateia. Para mitigar estes fenómenos, as frentes dos camarotes devem ser criadas com inclinações verticais ou cobertas com superfícies difusoras [26].

Em contextos de ópera, os camarotes sobrepostos podem ser benéficos por anularem parte da reverberação proveniente do tecto, o que confere maior clareza às vozes dos cantores em relação à massa orquestral [21].

Projectos modernos têm procurado democratizar a audição através da remoção das divisórias físicas entre camarotes, como na Academia de Música de Filadélfia, garantindo que todos os espectadores recebam uma quota de energia sonora mais uniforme [21].

Em suma, as tribunas e camarotes permitem aumentar a capacidade da sala e reduzir a distância média entre o público e o palco, mas exigem uma gestão cuidadosa das superfícies para evitar sombras acústicas e garantir a intimidade sonora [21].

3.2.7 FRISAS

As frisas são “camarotes” situados ao nível da plateia ou ligeiramente acima desta e partilham as características acústicas gerais dos camarotes. A sua presença introduz uma fragmentação no

campo sonoro que influencia tanto a experiência do ocupante como a acústica global do recinto. Tal como ocorre com os camarotes, audição dentro das frisas é geralmente considerada inferior à da plateia central e a mesma possui um impacto na sala principal similar ao anteriormente explicado [21][26].

3.2.8 BALCÕES E GALERIAS

Os balcões e galerias são elementos estruturais que permitem rentabilizar o espaço vertical, aproximando uma maior percentagem da audiência ao palco e melhorando as linhas de visão. Contudo, a sua introdução altera significativamente o campo sonoro, criando zonas com comportamentos acústicos distintos, particularmente nas áreas sob as projecções [23][24][25].

A principal preocupação acústica associada aos balcões é a criação de sombra acústica nos lugares situados interiormente sob a sua projecção. Nesses locais, o ouvinte fica protegido de grande parte do som reflectido proveniente do tecto e das partes superiores da sala, resultando numa perda da sensação de encapsulamento. Embora o som directo possa ser preservado, o som tardio, a reverberação, diminui, o que aumenta a clareza (C_{80}), mas torna a música seca, fraca e sem brilho. Para a oratória, as sobreposições profundas são mais toleráveis, pois a redução da reverberação tardia pode até aumentar a inteligibilidade da palavra. Para a música sinfónica, isto é crítico e deve ser minimizado [3][23][24][25].

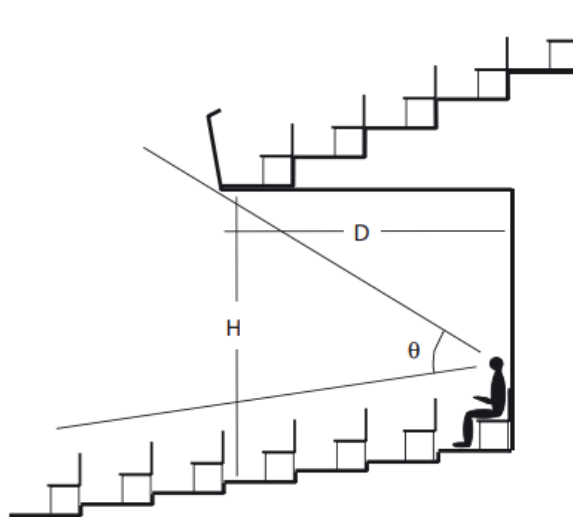


Figura 3.21 - Proporções básicas de balcões para uma sala de concertos, baseando-se na razão entre a profundidade D e a altura H , e o ângulo vertical de visão, θ [25].

Para garantir uma qualidade acústica aceitável sob os balcões, a engenharia acústica estabelece limites geométricos rigorosos (Figura 3.21) baseados na relação entre a profundidade (D) e a altura da abertura (H) [23][24][25]:

- Rácio D/H: Em salas de concerto, recomenda-se que $D/H \leq 1$; em casas de ópera, onde a voz necessita de maior clareza, aceitam-se rácios até 2;
- Ângulo Vertical de Visão (θ): Critérios mais recentes sugerem que o ângulo de visão para o tecto principal não deve ser inferior a 40° em salas de concerto e 30° em óperas;
- Inclinação e Altura: A inclinação das bancadas do balcão não deve exceder os 26° a 30°, para garantir segurança e conforto visual. O topo do balcão mais elevado não deve situar-se a mais de 20 metros acima do palco para evitar sensações de vertigem.

Outras características necessárias são: o intradorso (*soffit*), onde a face inferior do balcão deve ser inclinada ou moldada para reflectir som em direcção às cabeças dos ouvintes, ajudando a compensar a perda de energia reverberante; a frente do balcão (*parapet*) deve ser projectada com formas difusoras ou convexas, para evitar ecos focados ou reflexões tardias prejudiciais, para os músicos no palco ou para a audiência na plateia frontal; e os balcões suspensos (*flying balconies*), que são uma solução avançada que consiste em destacar o balcão da parede posterior, permitindo que a energia sonora circule atrás da estrutura, mergulhando os ouvintes sob o balcão num campo sonoro mais equilibrado [3][23][24][25].

Curiosamente, os lugares na galeria mais elevada, frequentemente designada como "o galinheiro", são muitas vezes os melhores acusticamente em grandes salas. Isto deve-se à proximidade do tecto, que fornece reflexões precoces fortes e uma visão desobstruída de todas as superfícies reflectoras da sala, resultando num som alto, equilibrado e rico em detalhes [25].

3.2.9 TECTOS E PAREDES – MATERIAIS E SUPERFÍCIES

Para salas de concerto e ópera, o objectivo principal é a conservação de energia sonora dentro do recinto para maximizar a sonoridade (*loudness*). Isto exige que as superfícies envolventes sejam rígidas e pesadas. Materiais como betão, alvenaria maciça ou gesso espesso, com 25 a 50 mm, sobre suportes rígidos são fundamentais. O uso de painéis de madeira finos sobre caixas de ar pode ser prejudicial em salas de música, pois estes funcionam como absorções diafragmáticas, dissipando a energia dos graves e reduzindo o "calor" acústico (*warmth*). Se for

utilizada madeira, em muitos casos, esta deve ser pesada, com mais de 25 mm, e, preferencialmente, colada directamente a um suporte sólido [25][23].

O tecto é a superfície mais importante para a distribuição do som directo e das primeiras reflexões. A altura do tecto determina o volume total da sala, o qual é directamente proporcional ao Tempo de Reverberação. Para música sinfónica, recomendam-se tectos altos, com mais de 15 m, para suportar TR longos. Tectos com reflectores convexos são altamente eficazes para espalhar o som uniformemente e aumentar a difusão. Contudo, em auditórios destinados à palavra, o tecto deve ser inclinado ou segmentado para direccionar as reflexões para as zonas mais remotas da audiência. Superfícies côncavas devem ser evitadas ou tratadas, pois provocam a focagem sonora e ecos severos [23][24][26].

As paredes laterais são as principais responsáveis pelas reflexões laterais precoces, essenciais para o envolvimento sonoro. Paredes perfeitamente paralelas geram ecos repetitivos e metálicos (*flutter echo*), cuja solução técnica consiste na inclinação das paredes, de cerca de 5° a 10° , ou na introdução de superfícies difusoras. Nas paredes posteriores, para se evitar o eco de retorno ao palco (*slap-back echo*), a parede traseira deve ser tornada absorvente ou altamente difusora [23][24][26].

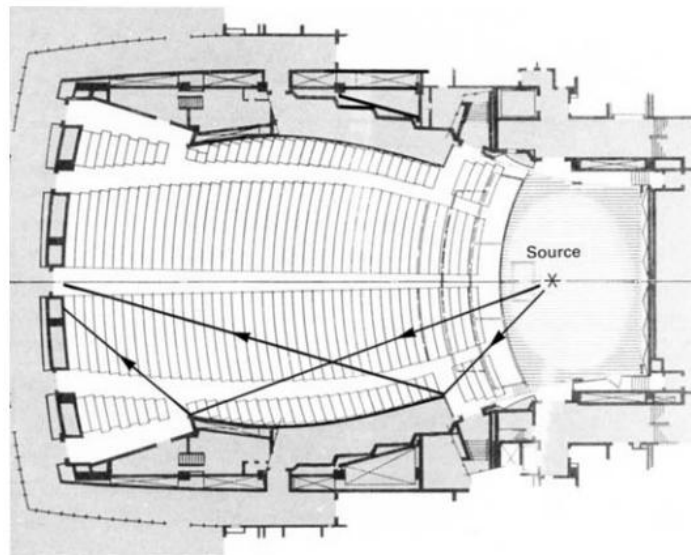


Figura 3.22 - Reflexões laterais da plateia inferior do Philharmonic Hall, em Nova Iorque, [25].

A excelência acústica das salas clássicas é também criada pela sua rica ornamentação, que funciona como difusor “natural”. Para difundir frequências médias e baixas, as irregularidades devem ter profundidades consideráveis, de 0,3 a 0,6 m. Em salas modernas, de linhas mais rectas, utilizam-se difusores ditos de resíduo quadrático ou superfícies onduladas optimizadas

por modelos matemáticos, para garantir que o som chegue ao ouvinte a partir de todas as direcções [23][25][26].

Apesar de a audiência ser o maior absorvente sonoro da sala, materiais adicionais podem ser necessários para o controlo do TR: Tecidos pesados, veludos e carpetes, são eficazes sobretudo nas frequências agudas; membranas e ressoadores de Helmholtz, servem para o controlo selectivo de frequências baixas e médias [3][23][25][26].

3.3 EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS PARA DIFERENTES ESPECTÁCULOS

3.3.1 EXIGÊNCIAS PARA A PALAVRA

A inteligibilidade constitui o requisito fundamental em salas destinadas à palavra. Para que a mensagem seja transmitida com sucesso, é necessário assegurar várias características técnicas [3][23].

O Tempo de Reverberação deve ser mantido baixo para evitar que a cauda sonora de uma sílaba disfarce a sílaba seguinte. Para auditórios e salas de aula, recomendam-se valores médios entre 0,7 e 1,0 segundos, com valores superiores a 1,2 segundos a degradarem significativamente a percepção, especialmente para ouvintes com dificuldades auditivas. O sistema auditivo une o som directo com reflexões que chegam com um atraso de até 50 ms, aumentando a percepção da sonoridade sem perda de clareza. Por cada reflexão forte adicionada, é possível aumentar o alcance da voz inteligível em cerca de 40%. Pelo contrário, reflexões que chegam ao ouvinte após os 50 ms são prejudiciais, pois são interpretadas como ecos discretos ou ruído, reduzindo a definição das consoantes. Devido à atenuação natural do som com a distância, de 6 dB por cada duplicação da distância, o último lugar da audiência não deve situar-se a mais de 20 a 24 metros do orador e recomenda-se o uso de pisos inclinados para evitar a atenuação rasante, provocada pelas cabeças da audiência e tectos reflectores que direccionam o som para a parte posterior da sala [3][23][25][26].

A voz humana não amplificada gera níveis médios sonoros de aproximadamente 65 dB(A). Para uma audição confortável, o nível da voz deve ser, no mínimo, de 10 a 15 dB(A) superior ao ruído de fundo. O ruído ambiente proveniente de sistemas de ventilação ou fontes externas não deve exceder o valor dos critérios das Curvas de Incomodidade NR ou NC. A qualidade para a palavra é quantificada pelo parâmetro Definição (D_{50}), que deve ser superior a 0,65 para uma compreensão clara. O Índice de Transmissão da Palavra (STI) é também utilizado, sendo

valores acima de 0,60 classificados como "bons" e acima de 0,75 como "excelentes" [3][22][23].

3.3.2 EXIGÊNCIAS PARA A MÚSICA

O projecto acústico para a música instrumental (sinfónica) apresenta uma complexidade superior ao da palavra, uma vez que não se limita à inteligibilidade, mas envolve juízos emocionais e subjectivos. O objectivo principal é criar um ambiente sonoro rico, com uma distribuição uniforme da energia, garantindo o equilíbrio entre a clareza das notas e a plenitude do tom [3][33].

Contrariamente à palavra, a música beneficia de TR mais longos para permitir a fusão das notas e acordes sucessivos. Os valores ideais variam consoante o período musical da obra. A sensação de calor é obtida através de um reforço nas baixas frequências. Tecnicamente, isto exige um rácio de baixos superior a 1,1 ou 1,2, o que implica que os tempos de reverberação nas oitavas dos 125 e 250 Hz sejam superiores aos das frequências médias. Para o ouvinte se sentir imerso no campo sonoro, é necessário um *Initial Time-Delay Gap* inferior a 20 ms para que o ouvido integre as reflexões como um reforço do som directo. De modo a evitar defeitos como ecos, as superfícies da sala devem possuir irregularidades e ornamentações densas que espalhem o som em múltiplas direcções [3][23][15].

Apesar da necessidade de reverberação, deve manter-se a capacidade de distinguir os diferentes instrumentos e passagens rápidas. Este equilíbrio é medido pelo parâmetro C_{80} , cujos valores ideais para música sinfónica situam-se geralmente entre -2 e +2 dB [25].

O palco deve também ser projectado para que os músicos consigam ouvir-se mutuamente, utilizando frequentemente conchas acústicas ou reflectores suspensos que redireccionam a energia sonora para a zona de actuação [23].

3.3.3 EXIGÊNCIAS PARA O TEATRO

As salas de teatro são bastante semelhantes à da transmissão da palavra. Devem garantir os requisitos acústicos que garantam a clareza da palavra, a inteligibilidade do som e a imersão do público na actuação. O tempo de reverberação médio ideal, tal como indicado para a palavra, deve encontrar-se no intervalo entre 0,7 e 1,0 segundos. Sem o auxílio de reforços electroacústicos, a capacidade máxima recomendada é de cerca de 1000 lugares para teatros de prosénio, reduzindo-se para 400 em configurações de arena [25][26].

3.3.4 EXIGÊNCIAS PARA A ÓPERA

As exigências acústicas para a ópera representam um compromisso técnico complexo entre a inteligibilidade do texto e a plenitude tonal da orquestra, recomendando-se tempos de reverberação (TR) entre 1,3 e 1,8 segundos para a sala ocupada. Este parâmetro ajusta-se ao repertório: TR mais baixos, de 1,0 a 1,5 s, favorecem a articulação rápida do libreto clássico (Mozart, Rossini), enquanto valores elevados, de 1,6 a 1,9 s, suportam a densidade sonora da ópera romântica e wagneriana. Parâmetros como a Claridade (C_{80}) devem idealmente situar-se entre 1 e 4 dB. O reforço das reflexões próximas ao proscénio para potenciar o "formante do cantor" (pico de energia entre os 2.500 e 3.000 Hz) permite que a voz se sobreponha à orquestra sem a necessidade de utilizar reforços electroacústicos [21][23][25].

3.3.5 MULTIFUNÇÕES

As salas multifunções são projectadas para acolher uma elevada diversidade de eventos (teatro, música, dança, conferências), o que exige uma versatilidade funcional extrema no seu condicionamento acústico. O principal desafio nestes recintos, reside no facto de as exigências para a palavra e para a música serem frequentemente opostos: a primeira requer volumes reduzidos e tempos de reverberação curtos, a segunda o inverso [23].

Para se resolver este conflito, é necessária a implementação de soluções de acústica variável, como o uso de dispositivos mecânicos ou manuais, como cortinas pesadas, painéis de tecido ou painéis rotativos, com faces absorventes e reflectoras, para ajustar o TR consoante o evento. Também ocorre a implementação de tectos móveis ou câmaras acopladas que permitem alterar a volumetria real da sala, adaptando a resposta acústica sem perda de nível sonoro e utilizam-se estruturas amovíveis para selar o palco e a torre de cena durante concertos sinfónicos, aumentando o ganho acústico e o apoio aos músicos [23].

Nestas situações, também se utilizam sistemas de assistência electroacústica (como o LARES ou ressonância assistida) para prolongar artificialmente a reverberação em salas de espectáculos. E, em casos em que é necessário, é frequente optar-se por um tempo de reverberação de compromisso entre fins, entre 1,3 e 1,4 segundos, em salas até 900 lugares [23][25].

3.4 LEGISLAÇÃO EM PORTUGAL

A legislação em Portugal para a caracterização acústica, em salas de espectáculo, é regida pelo Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), instituído originalmente em 2002 pelo Decreto-Lei n.º 129/2002, de 11 de Maio, e posteriormente alterado pelo Decreto-Lei n.º 96/2008, de 9 de Junho de 2008. Esta regulamentação visa assegurar o conforto acústico, a saúde e o bem-estar da população através a definição de parâmetros de desempenho acústico em edifícios, em função dos usos ao que os mesmos se destinam [20].

Este regulamento opera em conformidade com o Regulamento Geral do Ruído (RGR), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 9/2007, estabelece critérios e limites de ruído para prevenção e controlo da poluição sonora, visando a salvaguarda da saúde humana. O ruído exterior criado pela actividade do recinto é controlado por limites rigorosos quanto ao indicador de ruído diurno-entardecer-nocturno (L_{den}) (Artigo 3.º), ao critério de incomodidade (Artigo 13.º), aos valores limites de exposição, em função do tipo de zona, (Artigo 11.º) e ao ruído de equipamentos exteriores, como sistemas de climatização potentes [31].

O Coliseu do Porto Ageas é um edifício multifuncional cujos usos principais abrangem concertos de música, teatro, ópera, dança e outros eventos, como o circo e cinema. Dada a natureza da sua actividade, o edifício enquadra-se na classificação de auditórios e salas de espectáculos, conforme a alínea g) do n.º 2 do Artigo 1.º do RRAE. Este regulamento aplica-se à construção, reconstrução e ampliação ou alteração de edifícios, e detalha os requisitos acústicos específicos para este tipo de recintos no Artigo 10.º-A [20]:

- a) Tempo de reverberação médio (T), em recintos para oratória e cinema (no Artigo 10.º-A, n.º 1): nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500, 1.000 e 2.000 Hz, a considerar para estes recintos, quando mobilados normalmente e sem ocupação, é necessário satisfazer o seguinte:

$$T \leq 0,12 V^{1/3} \quad , \text{ se } V < 250 \text{ m}^3 \quad (3.1)$$

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

$$T \leq 0,05 V^{1/3} \quad , \text{ se } V \geq 9000 \text{ m}^3 \quad (3.3)$$

em que V é o volume interior do recinto, em metros cúbicos. O projecto deve também incluir um estudo específico destinado a assegurar uma característica de reverberação

adequada no restante espectro de frequências e uma boa inteligibilidade da palavra nos diversos locais do recinto.

- b) Tempo de reverberação médio (T), em recintos para música e salas de espectáculo (no Artigo 10.º-A, n.º 2): o regulamento não impõem uma fórmula rígida, contudo, exige que o projecto de condicionamento acústico destes espaços inclua um estudo específico destinado a assegurar a conformação acústica adequada à sua utilização funcional.
- c) Isolamento sonoro e ruído ambiente (no Artigo 10.º-A, n.º 3): as fachadas destes recintos devem assegurar que o isolamento sonoro a sons aéreos ($D_{2m, nT, w}$), corrigido pelos termos de adaptação (C ou C_{tr}), seja suficiente para que o nível sonoro contínuo equivalente do ruído ambiente no interior do recinto (L_{Aeq}), determinado a partir da média espacial de pontos representativos, na ausência de funcionamento das instalações técnicas do edifício, satisfaça o seguinte:

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

- d) Ruído de equipamentos e instalações (no Artigo 10.º-A, n.º 5): no interior dos recintos, o ruído proveniente do funcionamento de instalações de aquecimento, ventilação e ar condicionado, deve, com a sala desocupada, satisfazer os seguintes limites de L_{Aeq} :

$$L_{Aeq} \leq 38 \text{ dB} \quad , \text{ em salas de cinema} \quad (3.4)$$

$$L_{Aeq} \leq 30 \text{ dB} \quad , \text{ nos restantes recintos} \quad (3.5)$$

- e) Verificação de conformidade e factores de incerteza (nos Artigos 10.º-A, n.º 8 e 9): em avaliações *in situ*, para garantir a conformidade do edifício, ou das suas partes, com os requisitos acústicos, é necessário ter em conta um factor de incerteza (I), associado à determinação das grandezas em causa:

- No tempo de reverberação (T), o valor medido deve ser reduzido pelo factor de incerteza I, no valor percentual do limite regulamentar:

$$I = 25\% \quad , \text{ se } V < 250 \text{ m}^3 \quad (3.6)$$

$$I = 35\% \quad , \text{ se } 250 \leq V < 9000 \text{ m}^3 \quad (3.7)$$

$$I = 40\% \quad , \text{ se } V \geq 9000 \text{ m}^3 \quad (3.8)$$

- No valor obtido para os índices de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ($D_{2m, nT, w}$ e $D_{nT, w}$) acresce-se um factor de incerteza de 3 e de 5 dB na diferença ($D_{nT, 0.63 \text{ Hz}}$), para satisfazer os limites regulamentares;
- No ruído particular (L_{Aeq}), o valor obtido deve ser diminuído em 3 dB, para a verificação do limite.

Os projectos de condicionamento acústico devem ser elaborados e subscritos por técnicos qualificados, nomeadamente engenheiros com uma especialização em engenharia acústica concedida pela Ordem dos Engenheiros ou técnicos com qualificações reconhecidas pelas respectivas ordens ou associações profissionais, como referido no Artigo 3.º, n.º 2 do RRAE [20].

4

COLISEU DO PORTO

4.1 ENQUADRAMENTO GERAL

O Coliseu do Porto Ageas constitui um dos exemplares mais significativos do Modernismo em Portugal, sendo considerado um marco na cultura, arquitectura e engenharia civil de salas de espectáculo no país. Foi considerado um Monumento de Interesse Público pela Portaria n.º 637/2012, de 2 de Novembro de 2012, publicada em Diário da República, sendo que já passaram por este palco os maiores artistas do último século, das mais diversas áreas e estéticas [42][43][44][45][46].

O Coliseu do Porto está localizado na Rua de Passos Manuel, entre a Rua de Santa Catarina e a Praça dos Poveiros, no centro da cidade do Porto. A parte traseira do Coliseu confina com a Rua Formosa e demonstra a sua grande dimensão (Figura 4.1) [47][48].



Figura 4.1 - Localização do Coliseu do Porto Ageas, Porto [47][48].

O espaço onde se encontra inserido o Coliseu remonta ao Salão Jardim Passos Manuel (Figura 4.2), inaugurado em 1908, que foi inicialmente chamado de “Salão de Cynematographo”, era uma sala de cinema com apenas capacidade para 70 pessoas. Com o passar do tempo, em 1911, foi remodelado e ampliado para um complexo polivalente que, para além da Sala de Cinema, possuía também um Jardim-Esplanada (Figura 4.4), Salão de Festas (Figura 4.5), Pavilhão Restaurante, Hall ou Salão Central e um pequeno Teatro (Figura 4.3). A grande cultura musical da cidade do Porto levou este local a assumir-se como o centro da actividade musical do país da época, onde actuavam, permanentemente, uma orquestra e dois sextetos. No fim dos anos de 1920, sofre novamente alterações e abre como um café-concerto, onde foi inaugurado o cinema sonoro ao ar livre em Portugal. Em 1938, resultante, em parte, do declínio da sua actividade, o Jardim foi desactivado e posteriormente demolido [43][44][45][46][49][51].

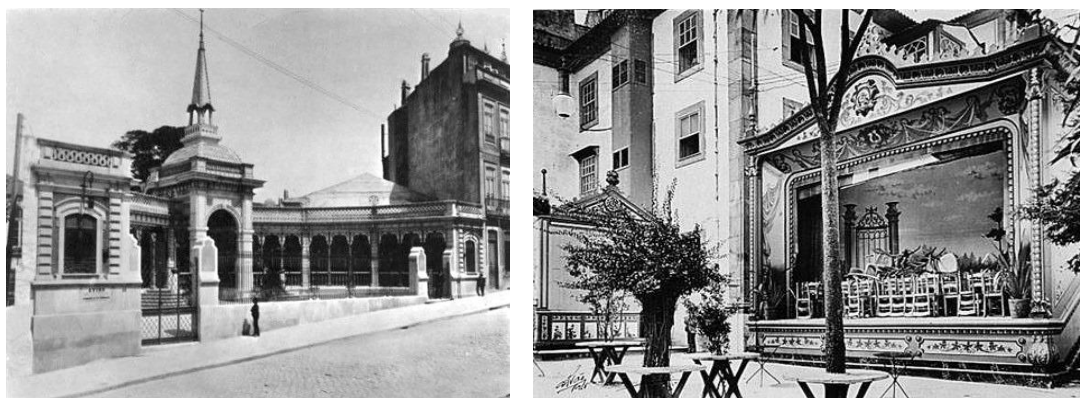


Figura 4.2 e 4.3 - Entrada do Salão Jardim Passos Manuel e pequeno palco ao ar livre [43][45][49].

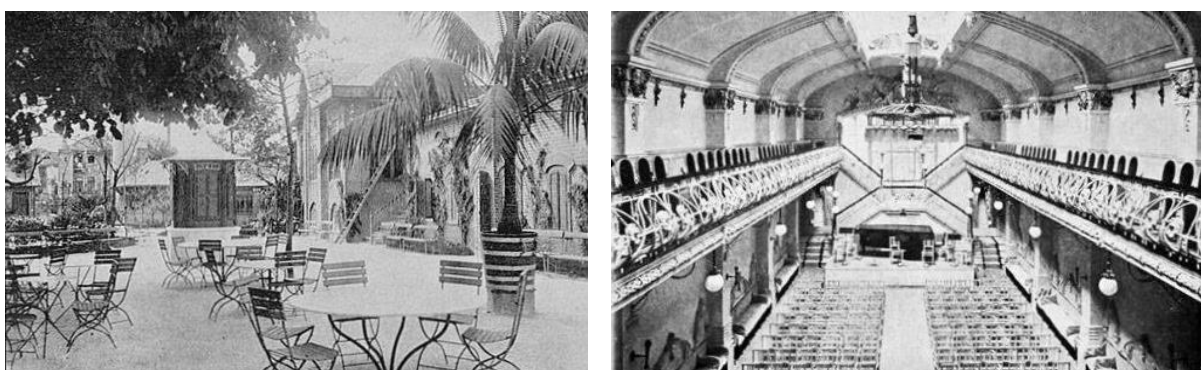


Figura 4.4 e 4.5 - Jardim Esplanada e Salão de Festas do Salão Jardim Passos Manuel [43][45][49].

Como propriedade da companhia de seguros Garantia, a construção do Coliseu do Porto durou 22 meses (1937-1941) e custou 11 mil contos (aproximadamente 55 mil euros, em 2002), um valor elevadíssimo para os padrões do tempo, denotando a inovação cosmopolita e o luxo do edifício, influenciados pela *Art Déco* e Modernismo europeu, que contrastam a arquitectura

mais tradicionalista e austera do Estado Novo. Esta foi uma obra envolta em polémica, marcada por trocas sucessivas de autoria e por conflitos técnicos. O arquitecto José Luís Porto apresentou os primeiros esboços em 1937 e abandonou o projecto rapidamente, sendo que é da sua autoria o anteprojecto da fachada do Coliseu, assim como o interior da sala principal de espectáculos. O arquitecto holandês Jan Wils, um dos fundadores do movimento artístico *De Stijl* ou Neoplasticismo, propôs fachadas envidraçadas e modernas (Figura 4.6), que nunca chegaram a ser executadas. Júlio José de Brito, arquitecto, engenheiro, professor e autor do Rivoli, foi responsável pela estrutura e construção inicial do edifício, cujas propostas de fachada foram sucessivamente recusadas pela Comissão de Estética da Câmara Municipal do Porto. A sua ligação à companhia de seguros Garantia garantiu, contudo, a sua presença ao longo de todo o projecto. Convidado em 1939, Cassiano Branco assume o cargo de arquitecto dirigente em colaboração com Júlio de Brito e com o empreiteiro Georges Tomber, ambos com quem mais tarde entraria em conflito. Cassiano Branco reorganizou o aspecto exterior do Coliseu (Figura 4.7 / Figura 4.8 / Figura 4.9), garantindo que o aspecto moderno exprimisse um “espectáculo permanente de formas e publicidade”. Também reutilizou a caixa muraria, já construída, que delimita a sala de espectáculos, palco e corredores. Charles Siclis participou na arquitectura de interiores do Coliseu, contudo, dos desenhos propostos, apenas as portas e candeeiros foram empregues no projecto e o arquitecto não foi remunerado. Já em fase final de construção, Mário de Abreu projectou alterações no interior, em escadarias, na torre de fachada e retirou as cores néon introduzidas por Cassiano Branco [42][43][44][45][46][49][50][51][52][66].

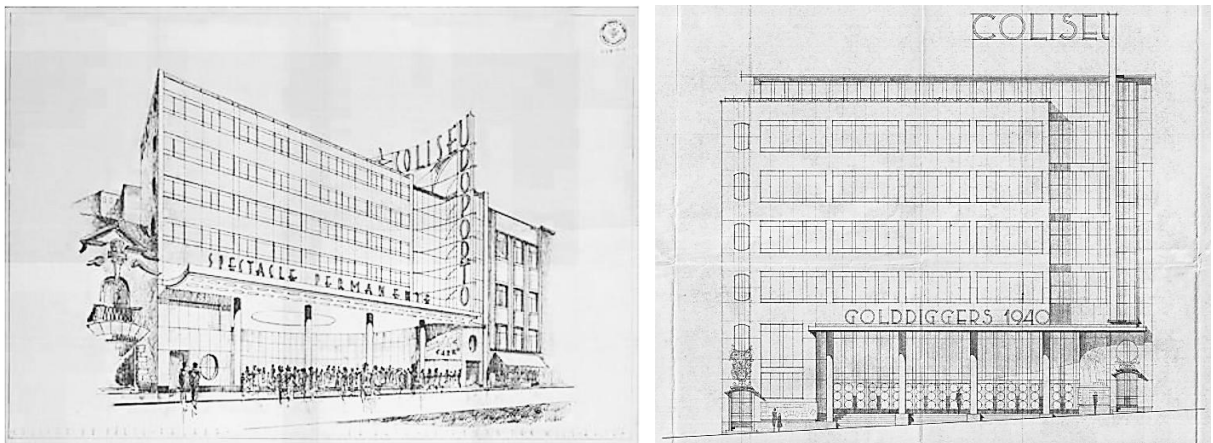


Figura 4.6 e 4.7 - Desenhos de Fachada para o Projecto do Coliseu do Porto, por Jan Wils e Cassiano Branco, respectivamente, adaptados de [53][55][56].

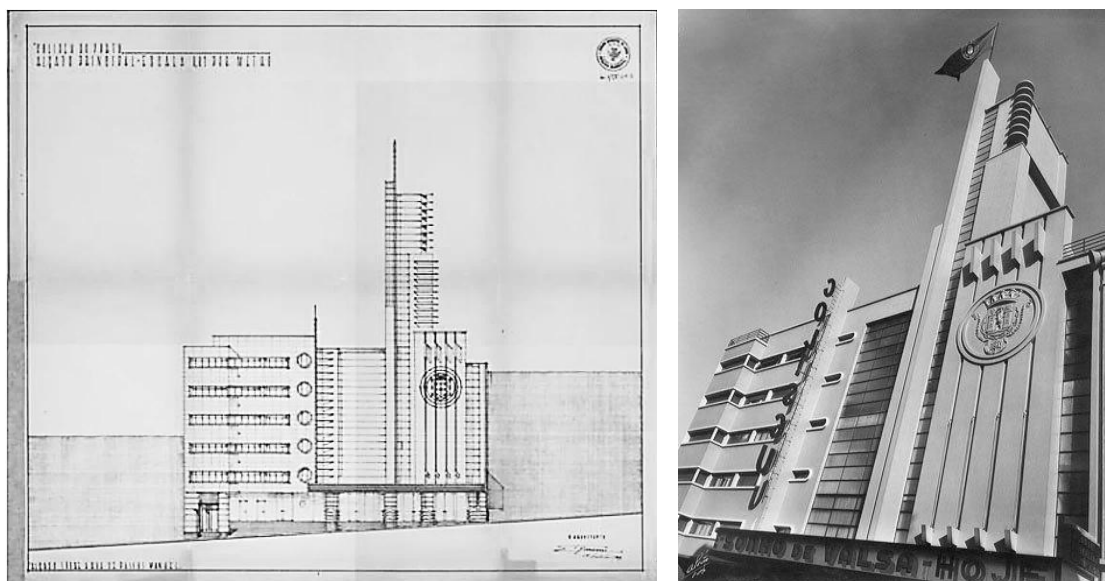


Figura 4.8 e 4.9 - Alçado Principal: Coliseu do Porto, por Cassiano Branco, e Vista de Fachada de autor não identificado, adaptado de [57][49].

A inauguração do Coliseu do Porto ocorreu a 19 de Dezembro de 1941 com um Sarau de Gala e com a Orquestra Sinfónica Nacional, dirigida pelo maestro Pedro de Freitas Branco. Por mais de 80 anos, acolheu os maiores nomes nacionais e internacionais num diverso número de propostas ecléticas, de música, teatro, dança, ópera, circo, comédia, como Montserrat Caballé, Miles Davis, Bob Dylan, Mark Knopfler, Amália Rodrigues, Cesária Évora, Margot Fonteyn, Ray Charles, Philip Glass, Ryuichi Sakamoto, B.B.King, Maria Callas e Radiohead [42][43] [44][45][46].

Perante rumores de venda do Coliseu à Igreja Universal do Reino de Deus, em 1995 ocorreu uma manifestação sem precedentes que originou a criação da Associação dos Amigos do Coliseu do Porto, que adquiriu e gere o edifício desde então. A 28 de Setembro de 1996, um incêndio destruiu a caixa de palco e causou graves danos à sala principal e camarins (Figura 4.10 / Figura 4.11). O Coliseu foi recuperado (Figura 4.12 / Figura 4.13 / Figura 4.14 / Figura 4.15) a tempo do Circo de Natal no mesmo ano, contudo, apenas em 1998, é que se deu por concluída a modernização técnica e a sua total recuperação. Em 2018, o grupo segurador Ageas tornou-se parceiro para garantir a sustentabilidade e a modernização técnica do espaço [42][43][44][45] [46].

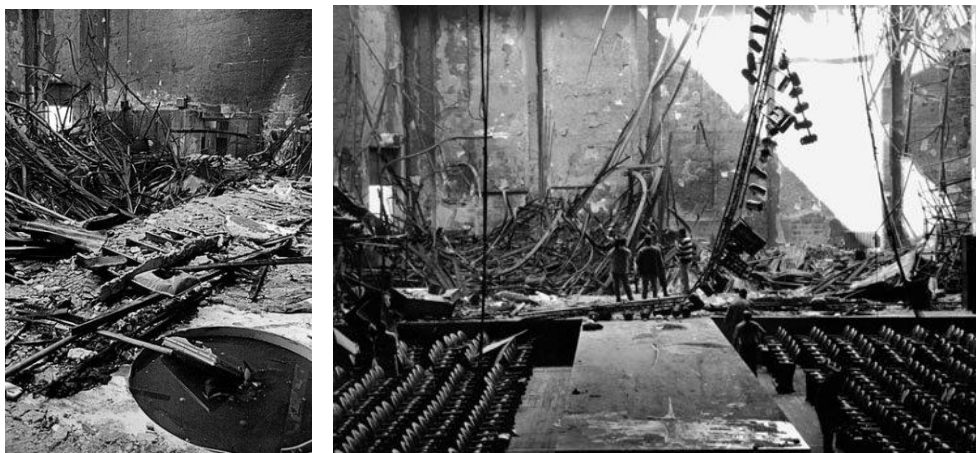


Figura 4.10 e 4.11 - Danos causados pelo incêndio de 1996, na Sala Principal do Coliseu do Porto [43][45][49].

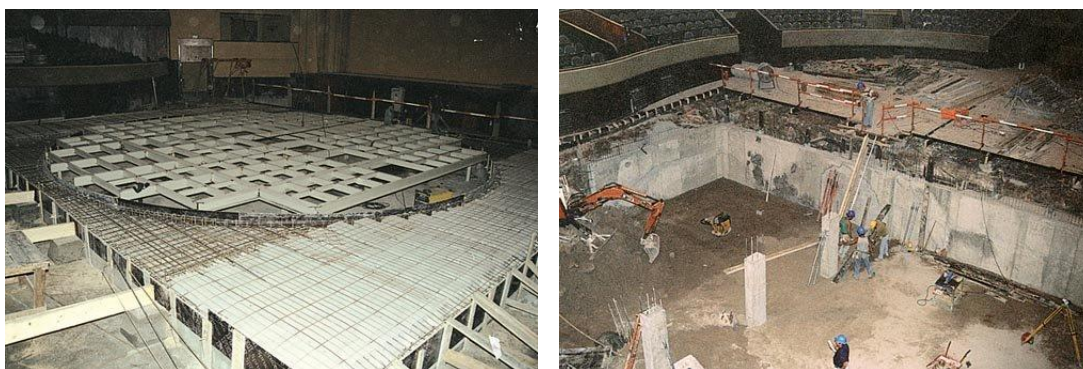


Figura 4.12 e 4.13 - Reconstrução da plateia, após o incêndio de 1996, na Sala Principal do Coliseu do Porto [43][45][49].



Figura 4.14 e 4.15 - Reconstrução do tecto e do fosso de orquestra, após o incêndio de 1996, na Sala Principal do Coliseu do Porto [43][45][49].

4.2 CARACTERIZAÇÃO ARQUITECTÓNICA E GEOMÉTRICA

A sala principal é o núcleo geométrico do Coliseu e foi desenhada com foco na visibilidade e acústica. Apesar de se encontrar inserida numa planta circular, a sala é articulada em forma de ferradura. Esta é uma tipologia clássica otimizada pelo espaço modernista, que permite a distribuição equitativa do som e uma relação de proximidade com o palco. O interior organiza-se em múltiplos níveis: plateia, tribunas, camarotes, frisas, balcões e galerias (Figura 4.16 / Figura 4.17) [42][43][44][45][46][49][50][51][52][66].

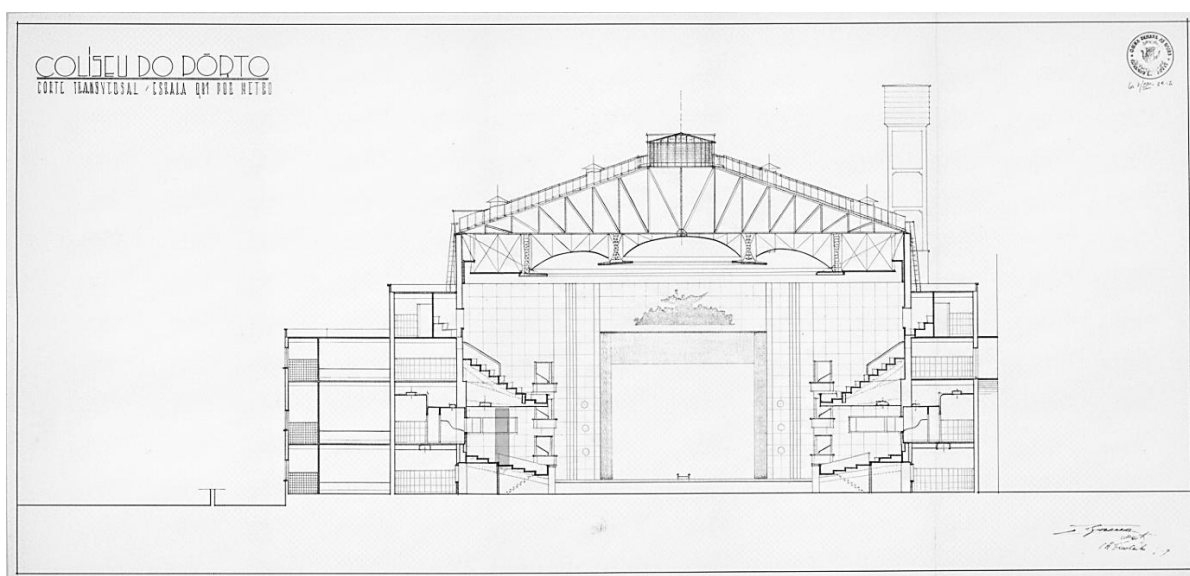


Figura 4.16 – Coliseu do Porto: Corte Transversal, por Cassiano Branco [adaptado de 71].

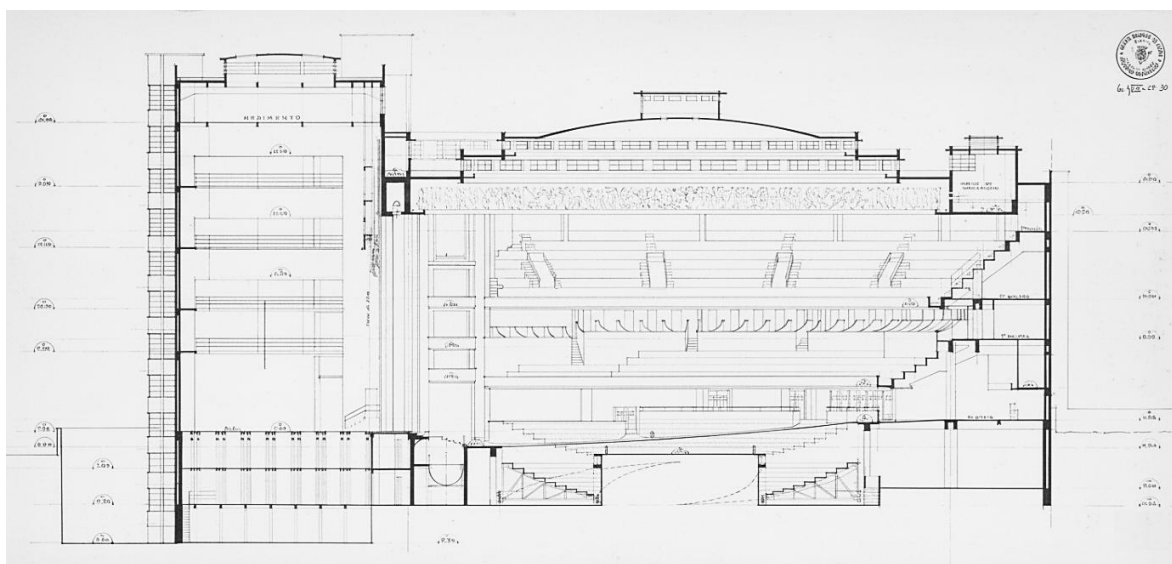


Figura 4.17 – Coliseu do Porto: corte longitudinal (1937-1939), [adaptado de 72].

A sala principal de espectáculos do Coliseu do Porto Ageas possui uma capacidade para 4.000 pessoas, em pé na plateia, e para 2.955 pessoas sentadas. É constituída pelos seguintes elementos, segundo a planta da sala de espectáculos (Figura 4.18) [45][60]:

a) Piso Inferior:

- Cadeiras de Orquestra: 324;
- 1ª Plateia: 388 (sentados);
- 2ª Plateia: 137 (sentados);
- Tribunas: 644;
- Camarotes de 1ª: 192;
- Frisas de 1ª: 66.

b) Piso Superior:

- Balcão Popular: 108;
- Galeria Reservada: 650;
- Geral: 350;
- Camarotes/Frisas 2ª: 96.

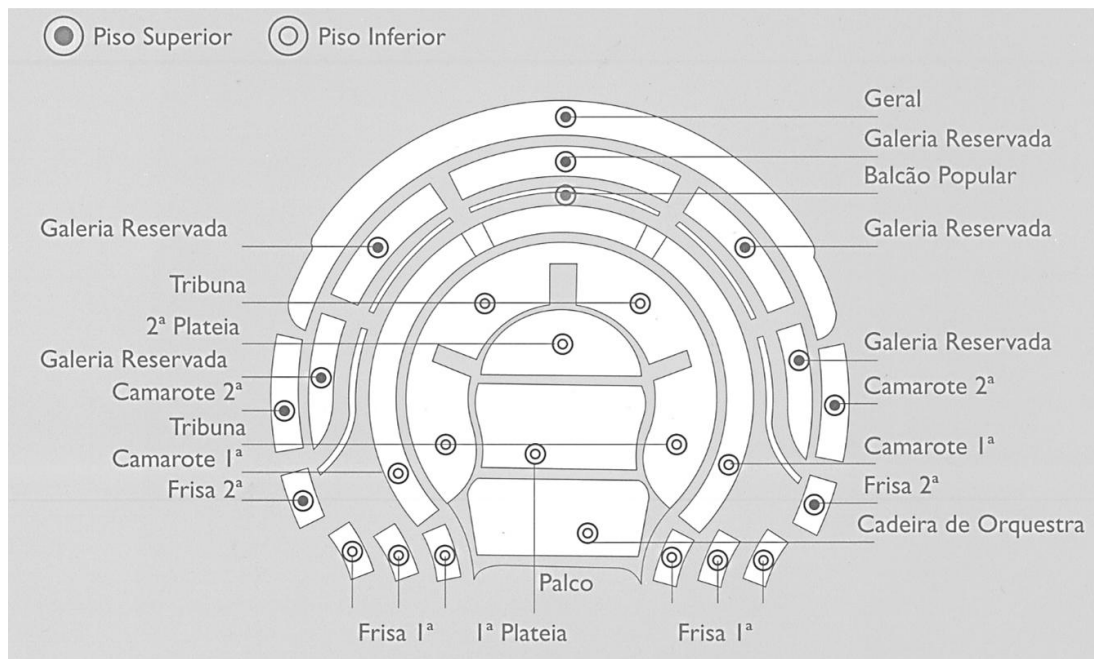


Figura 4.18 – Coliseu do Porto: Planta de Secções disponíveis para o público [45].

c) Palco (Figura 4.19):

- Altura: 1,15 m;
- Boca de cena: 17,25 m;
- Profundidade: 13,20 m;
- Altura útil da caixa: 23,50 m;
- Avanço de cena: 2,50 m.

d) Fossos de Orquestra:

- 2 fossos independentes, com 2,330 metros de profundidade, a partir do palco;
- Capacidade: 65 músicos, cada.

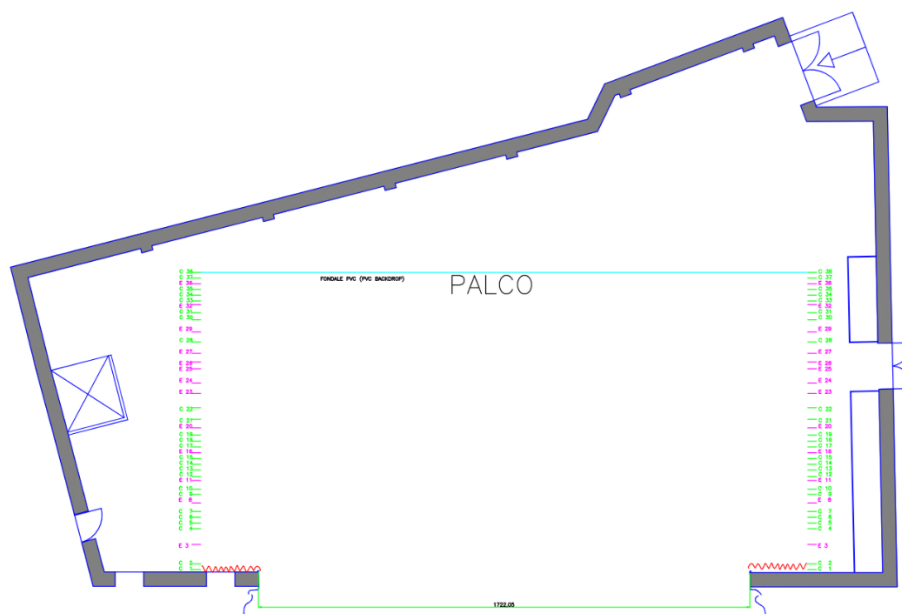


Figura 4.19 – Coliseu do Porto: planta de palco, adaptado de [60]

O edifício do Coliseu é classificado como um ícone do *Streamline Moderne*, ou Estilo Transatlântico, uma vertente do Modernismo influenciada pela estética naval e pelo dinamismo das máquinas, através do uso de orifícios redondos, como no caso das portas, e linhas horizontais (Figura 4.20 / Figura 4.21 / Figura 4.22). O Coliseu apresenta uma “pluralidade de expressões”, integrando também elementos de *Art Deco*, como é o caso de baixos-relevos no *foyer* e o grafismo das letras na fachada. Dá-se também uma sensação de continuidade entre a rua e o edifício, elevando-se o átrio de entrada, criando-se assim um palco sobre a via pública [42][43] [44][45][46][51][61].

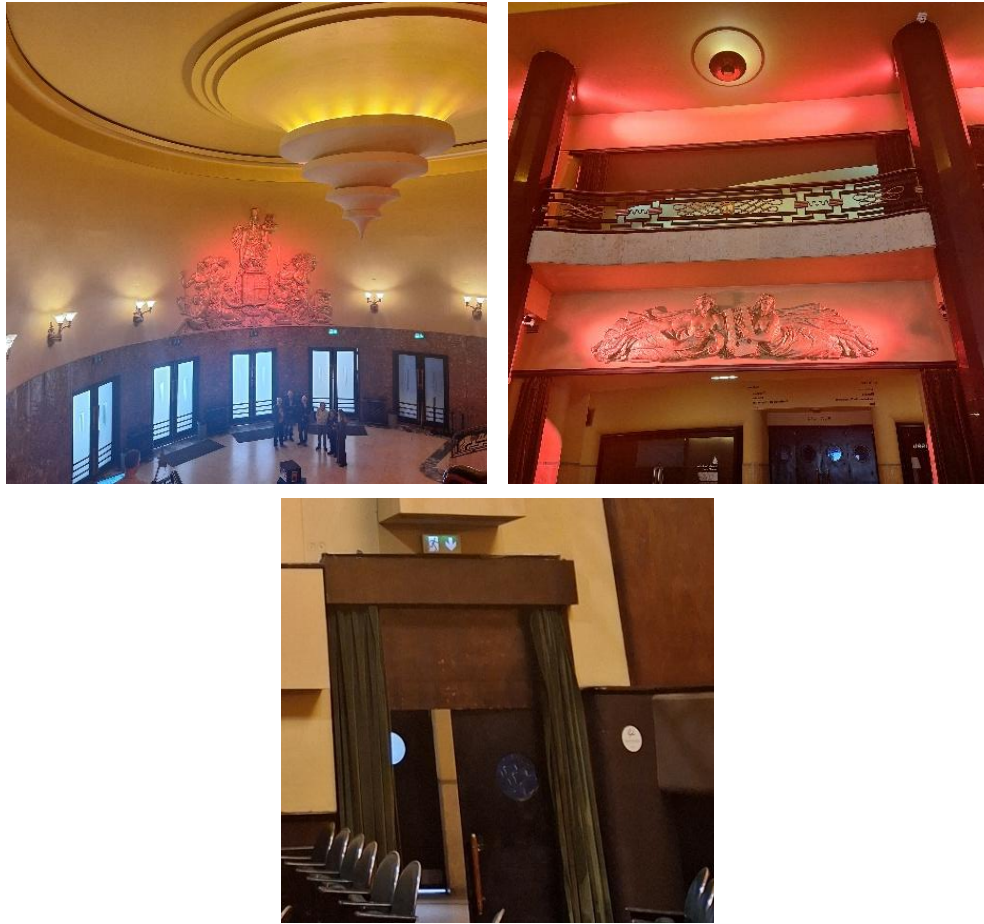


Figura 4.20, 4.21 e 4.22 – Elementos de Art Deco e Estilo Transatlântico, no Coliseu do Porto [fotos da autora]

Em Engenharia, o Coliseu do Porto é caracterizado pelo uso de betão armado (Figura 4.23), criando grandes vãos e estruturas autoportantes, criadas com a colaboração entre Cassiano Branco e o engenheiro belga George Tombu. O alçado principal, os pilares de betão armado e a zona de entrada são revestidos com granito polido de cor. A entrada é composta por betão armado revestido com vidro opalino. A estrutura de suporte da plateia era composta por um travejamento em madeira de pinho, dimensionada para uma carga de 500 kg/m^2 , que assentava sobre uma laje de betão de 10 cm, com 5% de diatomite na sua composição. Os terraços do edifício possuem um sistema de impermeabilização multicamada, com tela isoladora, betume e uma camada de argamassa com diatomita. Nas galerias, os lambris foram executados com cimento. Em 1999 foi colocada uma pista de circo elevatória na plateia (Figura 4.12), com 13 metros de diâmetro, assente numa placa hidráulica [43][44][45][51][62].

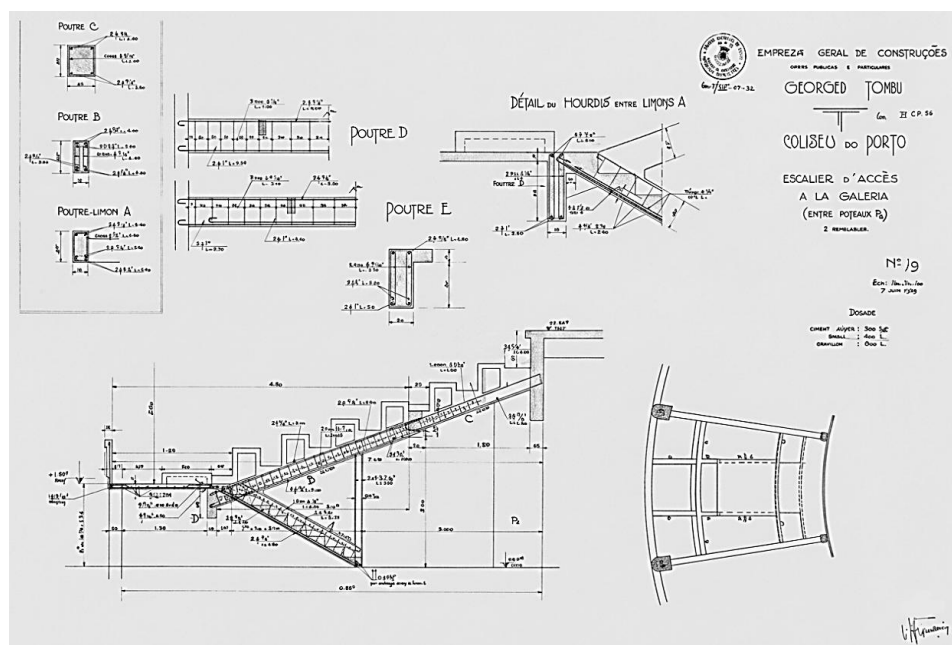


Figura 4.23 – Pormenores de construção de escadas de acesso à galeria, em betão armado, por George Tombu [63].

A utilização de cadeiras acolchoadas em auditórios e em salas de concerto é uma característica fundamental para a estabilidade acústica do recinto, garantindo um nível de absorção sonora similar ao do corpo humano e diminuindo as discrepâncias entre uma sala vazia e uma sala lotada. O Coliseu do Porto possui diferentes tipos de assentos, dependentes da secção da sala em que se inserem.

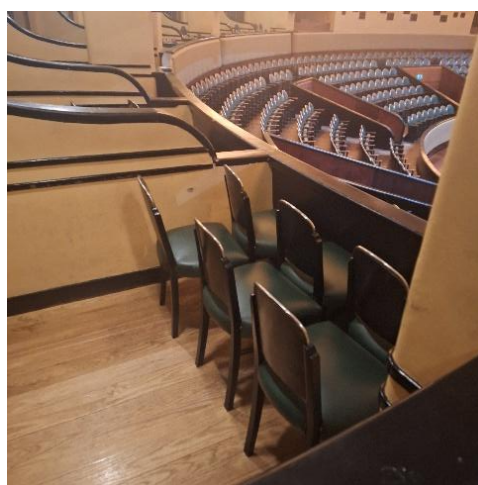
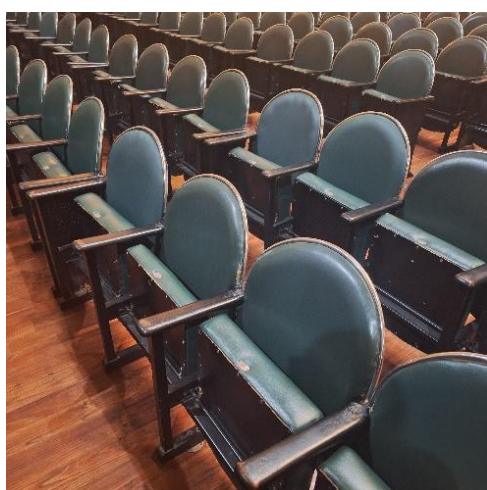


Figura 4.24 e 4.25 – Cadeiras levemente acolchoadas, na plateia (esq.) e nos camarotes (dir.) [fotos da autora].

Na Plateia e na Tribuna, as cadeiras são levemente acolchoadas, com um revestimento a couro (Figura 4.24). Nos Camarotes e Frisos, as cadeiras são apenas acolchoadas na parte do assento

(Figura 4.25). Na Galeria Reservada e no Geral, tanto as bancadas como as cadeiras, não possuem qualquer acolchoamento (Figura 4.26 / Figura 4.27).

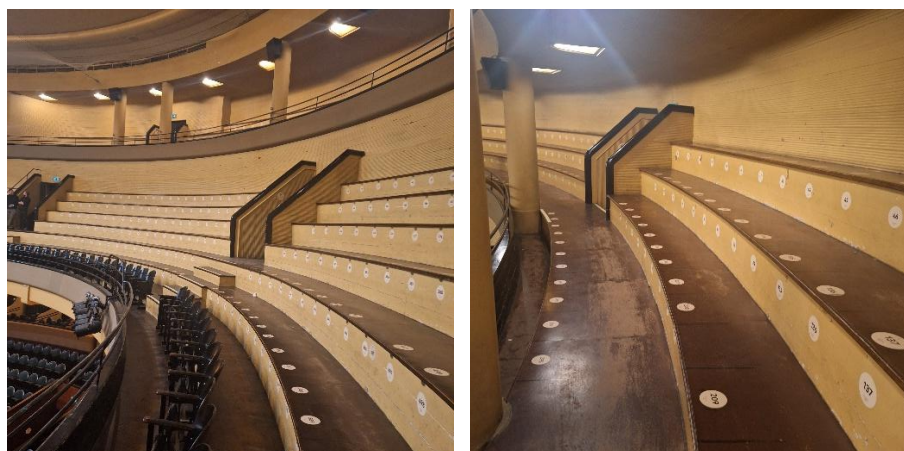


Figura 4.26 e 4.27 – Cadeiras e assentos na Galeria Reservada (esq.) e no Geral (dir.) sem qualquer acolchoamento [fotos da autora].

Os valores do Quadro 4.1, relativos à altura média, área aproximada, volume aproximado e perímetro da plateia foram obtidos a partir de medições a laser, efectuadas no local, e de plantas da sala, obtidas em [60]. Considera-se um erro de precisão de ± 3 mm por metro, devido às superfícies e ao posicionamento do equipamento.

Quadro 4.1 – Valores aproximados da altura média, perímetro, área e volume da sala principal do Coliseu do Porto.

Zona	Altura Média aprox. (m)	Área aprox. (m ²)	Volume aprox. (m ³)
Palco	23,5	407,4	9573,7
Palco - Proscénico	15,5	21,9	338,7
Plateia	17,2	621,5	10667,9
Tribuna	15,7	43,7	685,5
Tribuna Coberta	4,2	145,4	606,3
Camarotes	2,9	220,7	630,0
Galeria Reservada	10,8	145,4	1567,4
Geral	3,0	242,4	729,8
Frisos	2,9	102,1	291,4
Total (excluindo o Palco)		1521	15178
Total (incluindo o Palco)		1950	25090
Perímetro da Plateia (m)			93

5

METODOLOGIA DOS ENSAIOS

5.1 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

Os equipamentos de medição e o *software* utilizados, para a realização dos ensaios acústicos da sala em estudo, foram cedidos pelo Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP):

- **Medidor a Laser Hilti, modelo PD-I:** medidor a laser robusto, com funções de medição inteligentes e *Bluetooth*, para aplicações interiores de até 100 m, com uma precisão de medição de 1,5 mm (Figura 5.1) [64];
- **Fonte Sonora Brüel & Kjær (*Echo Speech Source*), modelo 4720:** emissor de sinais calibrados, criados com o intuito em medir uma variedade de parâmetros com o *software* DIRAC. É possível a calibração do sinal a um nível elevado, possibilitando medições independentes que o ruído de fundo seja significativo. Pode ser utilizado com diversos métodos de excitação, formas e modelos de fontes sonoras (direccionais, omnidireccionais, etc.) (Figura 5.2) [65];
- **Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260:** medidor de nível sonoro portátil de precisão (Tipo 1) capaz de análise e captação de dados de frequências de bandas de oitava e 1/3 de oitava (6,3 Hz – 20 kHz) em tempo real, com distribuições estatísticas de banda larga e monitorização de ruído. Funciona a bateria (Figura 5.3) [66];
- **Calibrador de microfones Brüel & Kjær, modelo 4231:** usado na calibração de medidores de nível sonoro e microfones, garante a veracidade dos resultados das medições. No seu funcionamento são utilizados níveis duplos de pressão sonora

acreditando a fiabilidade mesmo em ambientes sonoros ruidosos e a linearidade nos microfones (Figura 5.4) [67];

- **Microfone de 13 mm Brüel & Kjær, modelo 4189:** utilizado em medições de campo de alta precisão e sensibilidade, em frequências de 6,3 Hz a 20 kHz, converte variações de pressão existentes no ar em impulsos eléctricos. É pré-polarizado, sendo por isso adequado na utilização em conjunção, com equipamentos, a bateria e em ambiente com elevada humidade (Figura 5.5) [68];
- **Tripé portátil Brüel & Kjaer, modelo UA0049:** tripé leve com pernas telescópicas rígidas, com uma variação de altura do suporte de 50 a 140 cm e utilizado para garantir a estabilidade e rigor do equipamento, durante as medições (Figura 5.6) [69];
- **Software de Acústica DIRAC:** usado para medir parâmetros acústicos em campo ou laboratório, de acordo com ISO 3382 (acústica de salas), ISO 18233 (métodos de análise) e IEC 60268-16 (inteligibilidade da palavra) (Figura 5.8) [70];
- **Fonte Sonora Brüel & Kjær, modelo 4224:** gerador de ruído, com amplificador e coluna, capaz de gerar níveis de potência sonora até 115 dB, de 100 Hz a 4 kHz, em bateria e 118 dB com ligação eléctrica. É especificamente criado para medições acústicas em edifícios. Possui um difusor cónico que optimiza a reprodutibilidade dos ensaios *in situ* (Figura 5.7) [71].



Figura 5.1, 5.2 e 5.3 – Equipamentos de medição: Medidor a Laser Hilti PD-I, Fonte Sonora Brüel & Kjær 4720 e Sonómetro Brüel & Kjær 2260, respectivamente [64][65][72].



Figura 5.4, 5.5 e 5.6 – Equipamentos de medição: Calibrador de microfone Brüel & Kjær 4231, Microfone de 13mm Brüel & Kjær 4189, e Tripé portátil Brüel & Kjær UA0049, respectivamente [67][68][69]

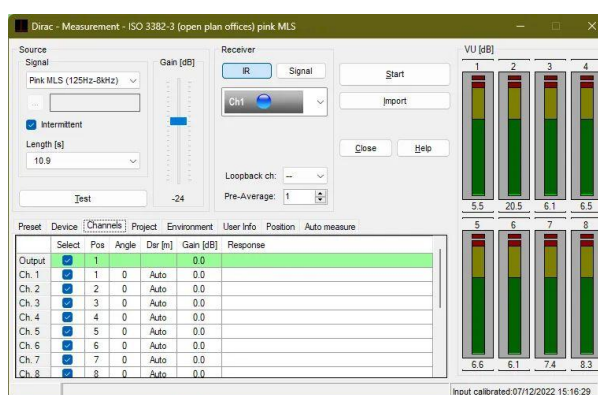


Figura 5.7 e 5.8 – Equipamentos de medição: Fonte Sonora Brüel & Kjær 4224 e exemplo de utilização do *Software* DIRAC [71][70].

5.2 PONTOS DE MEDIÇÃO

Os ensaios foram realizados em duas ocasiões distintas. A primeira sessão realizou-se a 31 de Março de 2026 (Figura 5.9), contudo, devido à sala se encontrar deserta de cadeiras, na parte da plateia, e de não ser possível encerrar a cortina de boca, devido a estar a ocorrer a preparação de um espectáculo, foi pedido, um segundo ensaio à sala. Este deu-se no dia 15 de Abril de 2026 (Figura 5.10), com a presença de todas as cadeiras presentes na sala e com o cortina de boca fechada, de modo a garantir que não ocorram interferências nos ensaios devido ao volume da torre de palco.

Ambos os ensaios foram concretizados pelo Engenheiro António Eduardo Costa e auxiliados pela autora, em pontos de medição idênticos. Foram escolhidos 20 postos de medição para a realização dos ensaios de TR, ts, C₈₀, D₅₀ e STI, devido à elevada dimensão da sala, e 3 pontos de medição do Ruído de Fundo, devido a não existir AVAC no edifício.

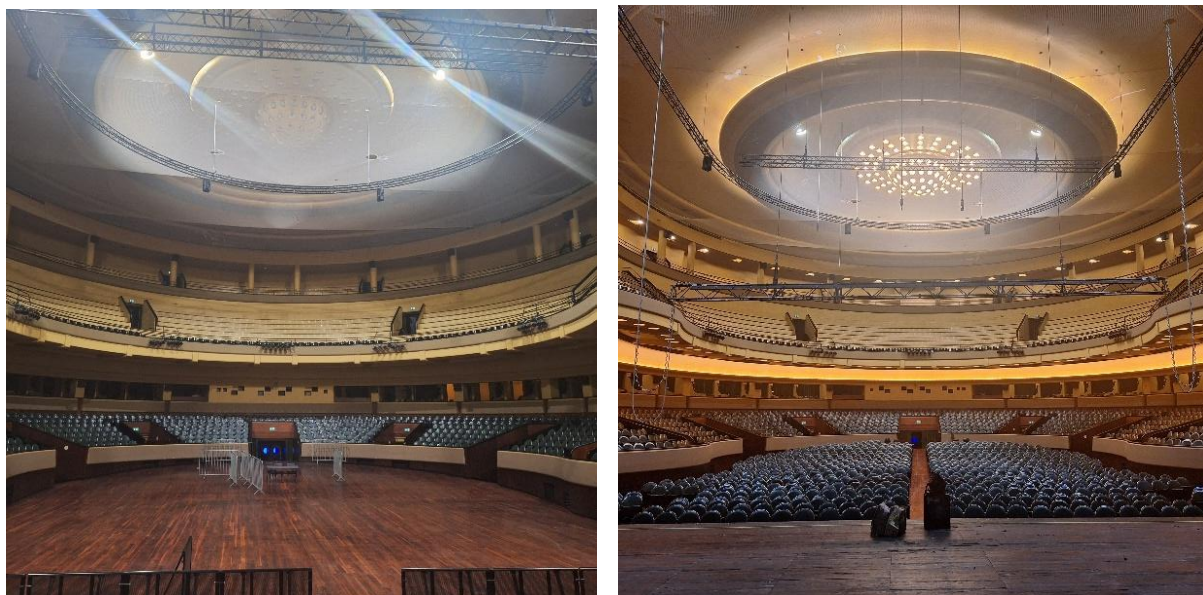


Figura 5.9 e 5.10 – Sala de Espectáculos Principal, do Coliseu do Porto, no 1º e 2º ensaio realizados, respectivamente [fotos da autora].



Figura 5.11, 5.12 e 5.13 – Equipamento de medição: Sonómetro Brüel & Kjær 2260 e Fonte Sonora Brüel & Kjaer 4224, resultado obtido durante um ensaio realizado e Fonte Sonora Brüel & Kjaer 4720, respectivamente [fotos da autora].

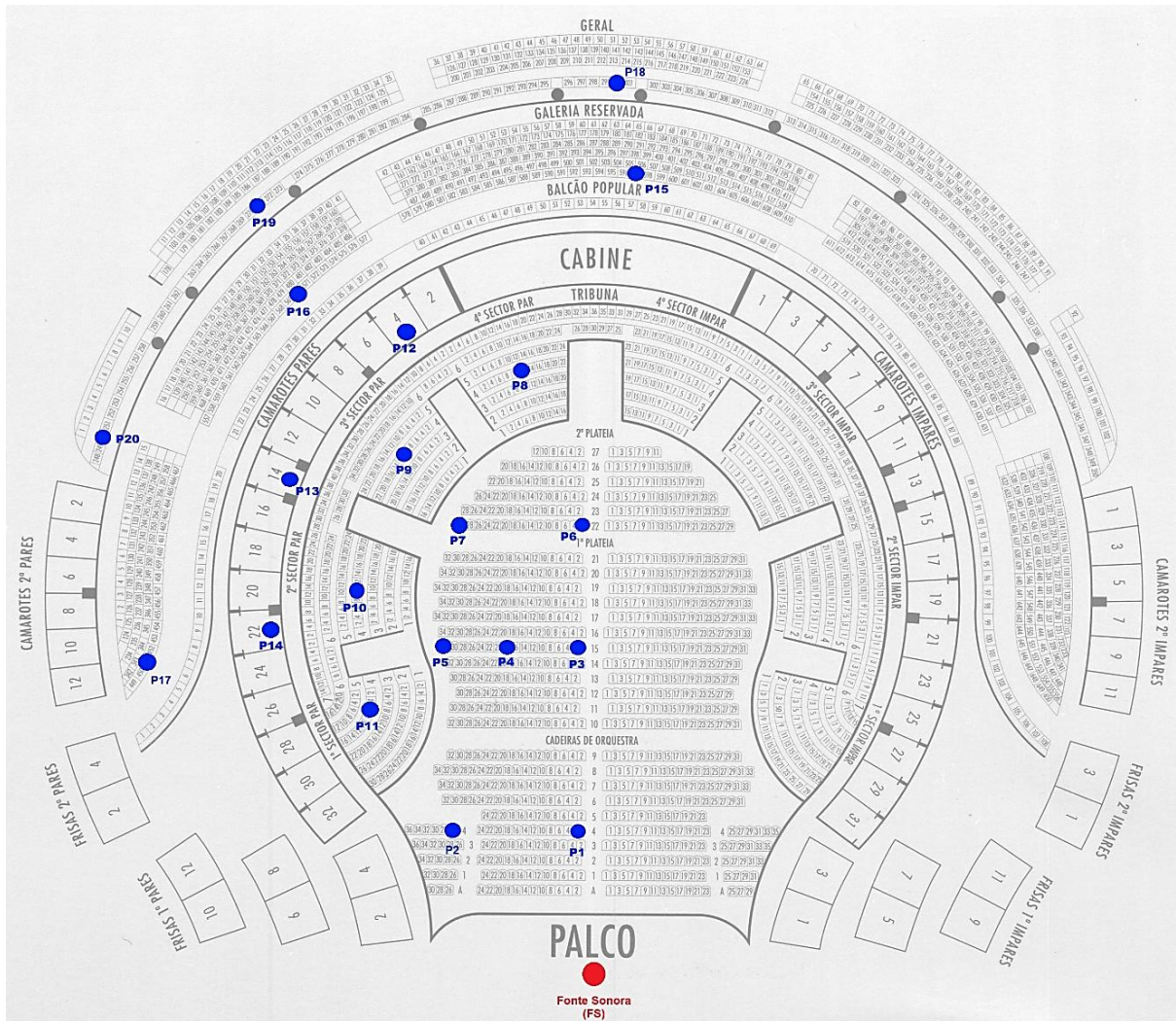


Figura 5.14 – Planta do Coliseu do Porto com a representação da Fonte Sonora (FS) no Palco e dos 20 pontos escolhidos, para a realização dos ensaios de TR, t_s , C_{80} , D_{50} e STI: pontos 1,2,3,4,5,6 e 7 situados na Plateia; 8,9, 10 e 11 situados na Tribuna; 12, 13 e 14 situados nos Camarotes; 15, 16 e 17 situados na Galeria; 18, 19 e 20 situados no Geral [adaptado de 58].

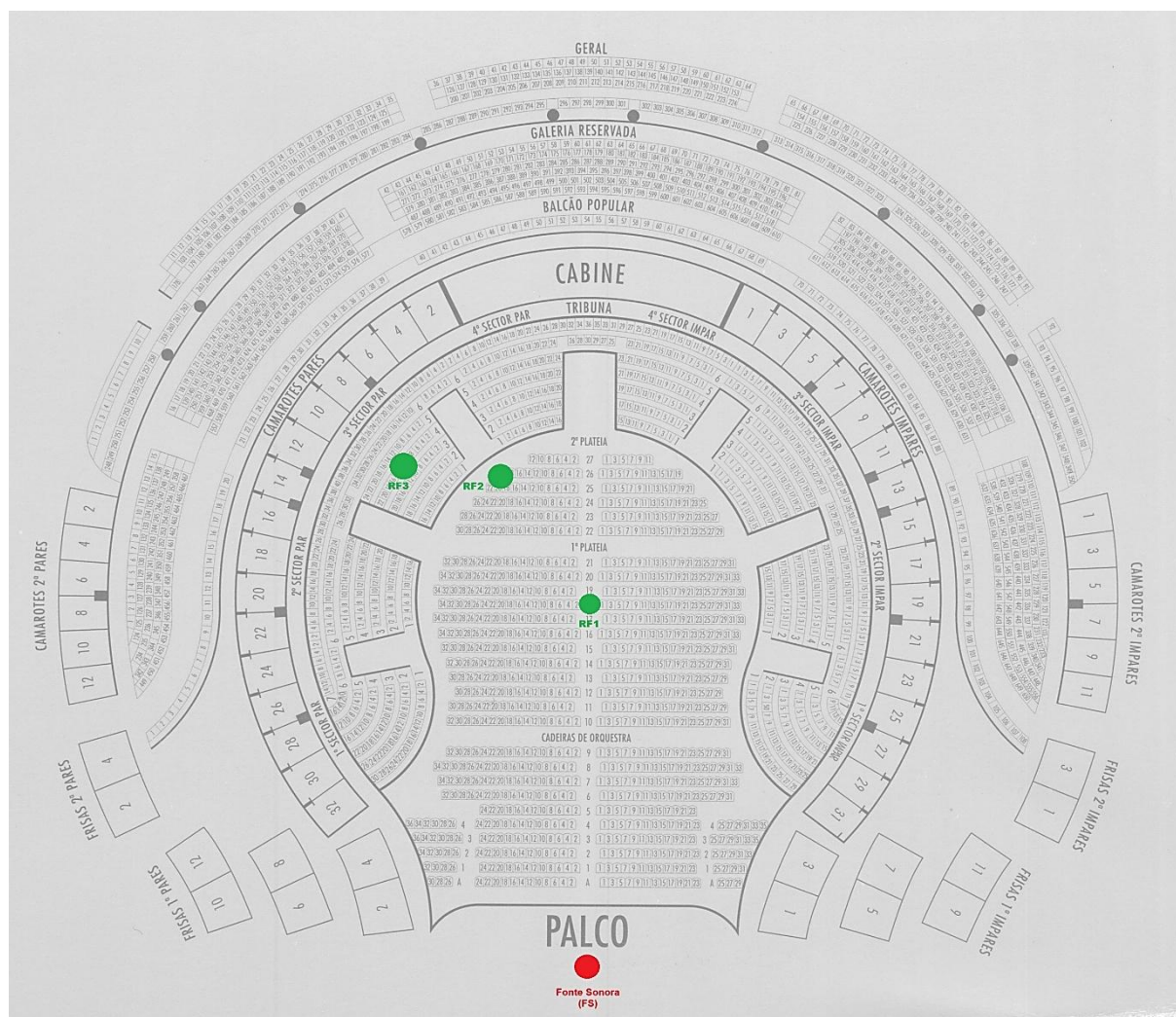


Figura 5.15 – Planta do Coliseu do Porto com a representação da Fonte Sonora (FS) no Palco e dos três pontos escolhidos, para a realização das medições do ruído de fundo: 1 e 2 situados na Plateia; 3 situado na Tribuna [adaptado de 58].

5.3 PARÂMETROS E PROCEDIMENTOS

5.3.1 RUÍDO DE FUNDO

A caracterização do ruído de fundo visa descrever e quantificar o som residual da sala de espetáculos, sem público ou qualquer actividade. Este ensaio determina os níveis de pressão sonora por bandas de frequência (L_p) e os níveis sonoros globais (L_A) resultantes exclusivamente da infra-estrutura do edifício e de fontes externas ao mesmo. Este é um parâmetro fundamental para garantir que o conforto acústico dos espectadores e a inteligibilidade não são comprometidos.

Na realização destas medições foi utilizado o Sonómetro Brüel & Kjær (modelo 2260), montado num tripé à altura de cerca de 1,20 metros, simulando a posição dos ouvidos de um espectador sentado. Realizou-se apenas três pontos de medição do ruído de fundo (Figura 5.15), visto os valores registados serem baixos e da inexistência de AVAC, e do consequente possível aumento dos resultados. As distâncias à Fonte Sonora (FS) foram obtidas com o Medidor a Laser Hilti (modelo PD-I). Em cada ponto realizaram-se dois ensaios, com cerca de 5 minutos, visto a não existência de ruído de fundo a assinalar. Os valores obtidos encontram-se expostos no Quadro 5.1.

Com a aquisição dos espectros sonoros em bandas de terço de oitava, obteve-se os valores do nível de pressão sonora contínuo equivalente (L_{eq}), em dB. Posteriormente, estes valores foram ponderados através da curva de filtragem A, em dB, resultando no nível sonoro equivalente (L_{Aeq}), equiparado à sensibilidade do sistema auditivo humano.

Quadro 5.1 – Ensaios realizados em cada ponto escolhido, para a medição do Ruído de Fundo, e a distância de cada ponto à Fonte Sonora (FS)

Ponto	Sector	Lugar (fila/nº)	Distância FS/ponto (m)*
RF1	1ª Plateia	18/2	22,646
RF2	2ª Plateia	26/20	30,508
RF3	Tribuna – 3º Sector Par	4/10	33,541

* - valores aproximados

5.3.2 OUTROS PARÂMETROS

Nos ensaios realizados, obteve-se a medição e análise de vários indicadores de qualidade acústica necessários em uma sala de espetáculos: o Tempo de Reverberação (TR), o Tempo Central (ts), a Claridade (C_{80}), a Definição (D_{50}) e o *Speech Transmission Index* (STI).

Utilizou-se as fontes sonoras Brüel & Kjær (*Echo Speech Source*), modelo 4720, e o modelo 4224, no ponto central do palco, a uma distância de 0,755 metros do início do palco (Figura 5.16 / Figura.5.17). O sistema de recepção foi constituído pelo Sonómetro Brüel & Kjær (modelo 2260), montado num tripé à altura de cerca de 1,20 metros, simulando a posição dos

ouvidos de um espectador sentado (Figura 5.11 / Figura 5.12 / Figura 5.13). Realizaram-se duas medições, obtidas em 20 pontos distintos, conforme ilustrado na Figura 5.14. Partiu-se do princípio de que, ao obter-se medições em metade da sala, devido à sua simetria, que os valores obtidos na parte oposta seriam similares.



Figura 5.16 e 5.17 – Realização do estudo no ponto P1, com Sonómetro aplicado no tripé, durante o 2º ensaio (esq.), e fontes sonoras colocadas no palco, durante o 1º ensaio (dir.) [fotos da autora].

Os sinais captados foram filtrados em bandas de oitava e processados pelo *software* DIRAC, *in situ*, obtendo-se assim automaticamente o cálculo dos parâmetros pretendidos. Nestes ensaios, a informação de localização de cada ponto e da distância à fonte sonora dos mesmos, encontram-se expostos no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Ensaios realizados em cada ponto escolhido, para a medição do Ruído de Fundo, e a distância de cada ponto à Fonte Sonora (FS).

Ponto	Sector	Lugar (fila/nº)	Distância FS/ponto (m)*
P1	Plateia – Cadeiras de Orquestra	4/2	7,36
P2	Plateia – Cadeiras de Orquestra	4/26	9,29
P3	1ª Plateia	15/2	19,35
P4	1ª Plateia	15/18	19,49
P5	1ª Plateia	15/32	20,19
P6	2ª Plateia	22/2	27,42
P7	2ª Plateia	22/30	27,84
P8	Tribuna – 4º Sector Par	4/12	36,44

P9	Tribuna – 3º Sector Par	4/10	33,54
P10	Tribuna – 2º Sector Par	4/10	27,72
P11	Tribuna – 1º Sector Par	4/6	21,23
P12	Camarotes Pares	4	38,20
P13	Camarotes Pares	14	33,52
P14	Camarotes Pares	22	26,60
P15	Galeria Reservada	597	36,92
P16	Galeria Reservada	570	32,41
P17	Galeria Reservada	451	22,29
P18	Geral	300	42,46
P19	Geral	271	39,05
P20	Geral	250	32,51

* - valores aproximados

5.3.3 TRATAMENTO E APRESENTAÇÃO DE DADOS

O tratamento de dados acústicos brutos, cálculos e produção de gráficos de análise, para todos os parâmetros acústicos estudados, foram realizados em *Microsoft Excel*. A visualização espacial dos parâmetros através de Mapas de Isolinhas, na sala principal do Coliseu do Porto, foi desenvolvida através da linguagem de programação *Python*, em ambiente *Jupyter Notebook* e editada no *Visual Studio Code*, recorrendo às bibliotecas *scipy* e *matplotlib*. Os 20 pontos de medição, presentes na Figura 5.14, foram espelhados em relação ao eixo central da sala, garantindo a simetria da distribuição dos pontos em toda a área da sala, como ilustrado na Figura 5.18 [75][76][77].

De modo a estimar o valor dos parâmetros acústicos em toda a sala, e não apenas nos 40 pontos existentes no mapa da Figura 5.18, recorreu-se a uma interpolação espacial de valores. A mesma foi alcançada através do método *Radial Basis Function* (RBF) com kernel *thin plate spline*, implementada com *scipy.interpolate.RBFInterpolator*. Este foi utilizado de modo a gerar uma superfície contínua e suave em proximidade com qualquer ponto de medição na planta, minimizando possíveis variações repentinas, simulando o comportamento de variação gradual

no espaço, esperada por parte dos parâmetros acústicos na sala. Foi também aplicado um parâmetro de suavização ($smoothing = 0,001$), introduzindo uma tolerância mínima ao desvio em relação aos valores medidos durante os testes realizados *in situ*.

A interpolação é expressa através das seguintes fórmulas [76]:

$$f(x) = K(x, y)a + P(x)b \quad (5.1)$$

$$(K(x, y) + \lambda I)a + P(y)b = d \quad (5.2)$$

$$P(y)^T a = 0 \quad (5.3)$$

Onde:

$K(x,y)$ – matriz de funções RBF, centradas nos pontos de medição y e avaliada nos pontos x ;

$P(x)$ – matriz de monómios polinomiais;

a e b – coeficientes determinados pela resolução do sistema linear nas eq. 5.2 e 5.3;

d – valores medidos nos pontos de medição;

λ – parâmetro de suavização = 0,001.

O *thin plate spline*, aplicado na matriz $K(x,y)$, é definido pela seguinte expressão [76]:

$$\phi(r) = r^2 \log(r) \quad (5.4)$$

Onde $r = ||x - y||$ é a distância, em linha recta, entre o ponto a estimar e cada ponto de medição.

Aplicou-se também um filtro gaussiano, com `scipy.ndimage.gaussian_filter`, de modo a atenuar irregularidades em zonas de menor densidade de pontos [77].

A biblioteca *matplotlib* foi utilizada na produção dos mapas finais, nomeadamente na criação de gradientes de preenchimento de cor (*contourf*) e das isolinhas (*contour*), assim como na configuração da figura, eixos e barras laterais, em *Python* [75].

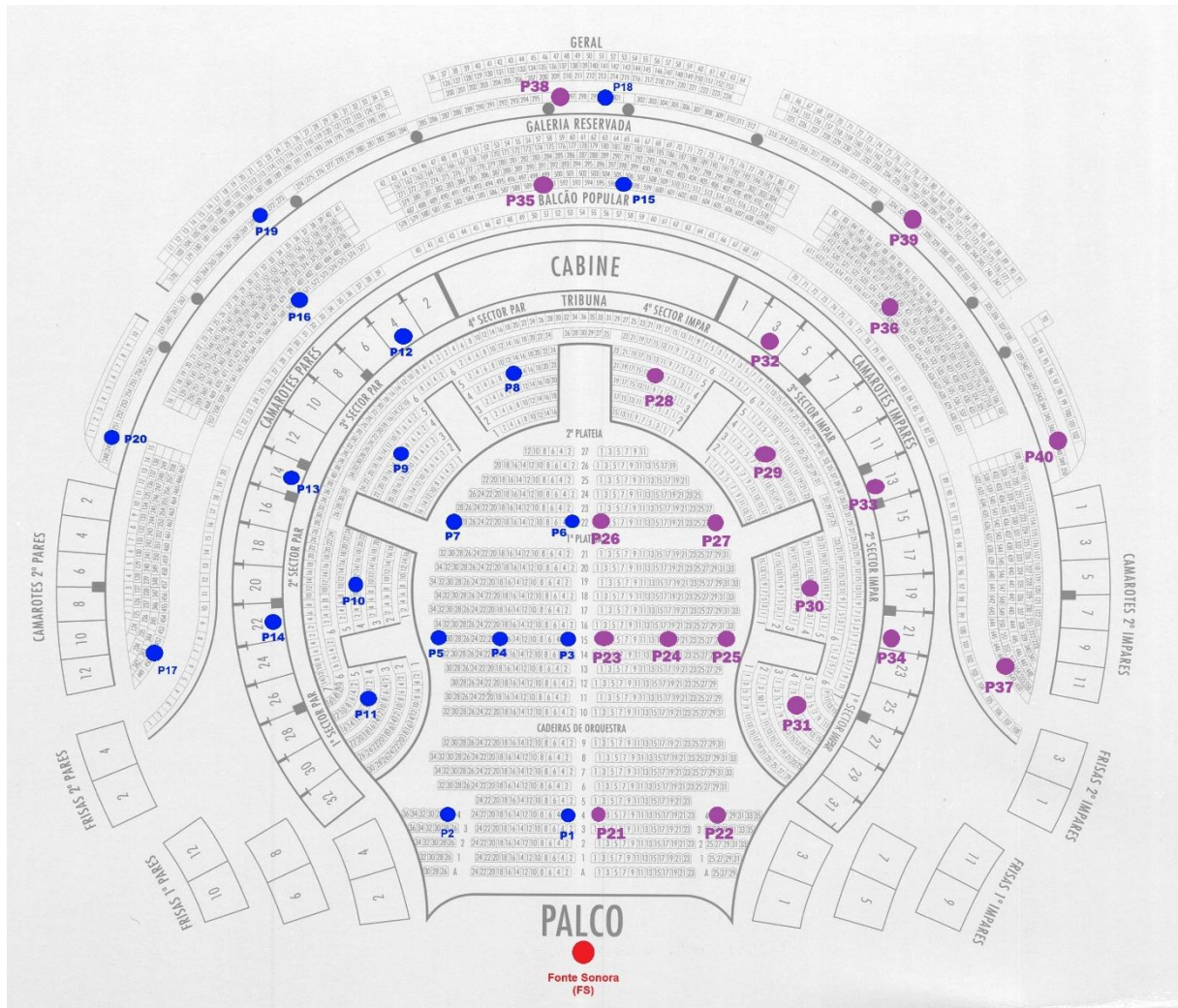


Figura 5.18 – Planta do Coliseu do Porto com a representação da Fonte Sonora (FS) no Palco, dos 20 pontos medidos (a azul) e dos 20 pontos simétricos, em relação ao eixo central da sala, para a utilização no mapa de isolinhas de vários parâmetros [adaptado de 58].

6

RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os dados obtidos através das medições acústicas realizadas *in situ* no Coliseu do Porto Ageas, em conformidade com a metodologia descrita no capítulo 2. Como foram realizados 2 ensaios distintos, conforme indicado no capítulo 5, um sem cadeiras na plateia e o segundo já com a presença das mesmas, foram também realizadas comparações entre ambos os ensaios.

É efectuada uma análise dos resultados em diversos parâmetros acústicos, como o Ruído de Fundo, através de níveis de pressão sonora e curvas de incomodidade NC e NR, e o Tempo de Reverberação (TR), que serão posteriormente confrontados com os valores regulamentares nacionais, estabelecidos pelo RRAE, e com os valores de referência existentes na literatura da especialidade. Também será analisado o Rácio de Baixos (BR_TR), *Speech Transmission Index* (STI), Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}) e o Tempo Central (TS), parâmetros imprescindíveis para caracterizar acusticamente uma sala de espectáculos. Neste capítulo, o objectivo consiste na caracterização do comportamento acústico da sala de espectáculos e avaliar a adequabilidade da sua tipologia abrangente.

6.2 RUÍDO DE FUNDO

6.2.1 MEDIÇÕES *IN SITU*

O ensaio do ruído de fundo constitui uma etapa fundamental na análise acústica de um espaço, uma vez que permite avaliar o nível sonoro residual presente, na ausência de fontes sonoras intencionais, como referido no capítulo 2.6.2. Esta medição é crucial para avaliar o conforto

acústico e as condições da sala em estudo, de modo a garantir o silêncio necessário para uma boa inteligibilidade da palavra ou qualidade musical recebida pelo utilizador.

O ensaio foi realizado em três pontos (RF1, RF2 e RF3), seguindo a metodologia apresentada no capítulo 5. Em conformidade com a mesma, os níveis de pressão sonora foram registados nas bandas de 1/3 de oitava, entre 20 e 20k Hz, sem sistema de ventilação e ar condicionado, visto que não existe um sistema AVAC completo no edifício, apenas aquecimento por parte de uma bomba de calor. As medições decorreram entre 3 e 5 minutos, obtendo-se uma estabilização rápida, devido à inexistência de ruídos concretos na sala.

Através dos dados recolhidos, foi possível obterem-se os valores do nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}) e o nível sonoro equivalente (L_{Aeq}), o último através da ponderação de valores com a curva A. Os mesmos encontram-se presentes no Quadro 6.1, para valores na banda de 1/3 de oitava. Foi também obtida uma média logarítmica e a variação entre todos os pontos, para cada frequência.

Através do Quadro 6.1, obteve-se as Figuras 6.1, 6.2 e 6.3, que demonstram graficamente os resultados obtidos no ensaio de avaliação do ruído de fundo. Através do Quadro 6.1 e da Figura 6.1, verifica-se que existe um nível de pressão sonora mais elevado em frequências baixas, e baixo em frequências altas. A variação do L (dB) entre pontos de medição é pouco significativa, com valores entre 0 e 2 dB na maioria das frequências. As maiores variações ocorrem nas baixas frequências, de 20 a 63 Hz, com a maior variação a chegar aos 7,4 dB nos 25 Hz, sendo que o nível de pressão sonora, nas baixas frequências, aumenta visivelmente com a aproximação do equipamento de medição ao palco.

Nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 é possível verificam-se algumas interferências, sendo que as mais significativas ocorrem nas frequências 25, 50, 125 e 1,6k Hz. As causas destas anomalias podem estar associadas a perturbações causadas por ressonâncias e reflexões que ocorrem na sala, em certas frequências. Como existe um fosso de orquestra na sala em estudo, apesar de o mesmo, aquando do ensaio, estivesse fechado, podem talvez ser criadas ressonâncias para a sala que se encontra em cima, visto que os pontos mais afectados por interferências nas baixas frequências foram os pontos medidos na plateia, RF1 e RF2. Outra possível causa para as flutuações em causa podem ocorrer devido à iluminação ou a equipamentos e condutas instalados em zonas técnicas, especialmente nas proximidades do palco, visto não ser possível desligar os mesmos durante a realização das medições.

Quadro 6.1 – Valores de Níveis de Pressão Sonora (dB) e Níveis Sonoros (dB(A)), Nível de Pressão Sonora Equivalente (L_{eq}), Nível Sonoro Equivalente (L_{Aeq}), Média Logarítmica e ΔL para bandas de frequência de 1/3 de oitava, nos pontos RF1, RF2 e RF3, medidos no Coliseu do Porto.

Frequência (Hz)	Pontos de Medição						Média Logarítmica		ΔL (dB)
	RF1		FR2		RF3		sem filtro A	com filtro A	sem filtro A
	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A			
20	44,5	< 0	42,5	< 0	40,9	< 0	42,9	< 0	3,7
25	46,8	2,1	43,7	< 0	39,4	< 0	44,3	< 0	7,4
31	38,3	< 0	37,4	< 0	35,6	< 0	37,2	< 0	2,8
40	38,0	3,4	38,0	3,4	36,2	1,6	37,5	2,9	1,8
50	40,3	10,1	42,2	12,0	36,1	5,9	40,2	10,0	6,0
63	32,3	6,1	31,7	5,5	30,1	3,9	31,5	5,3	2,2
80	30,1	7,6	29,7	7,2	29,4	6,9	29,7	7,2	0,7
100	32,5	13,4	32,5	13,4	31,2	12,1	32,1	13,0	1,3
125	35,7	19,6	34,8	18,7	33,9	17,8	34,9	18,8	1,8
160	31,2	17,8	30,7	17,3	31,4	18,0	31,1	17,7	0,6
200	27,9	17,0	27,1	16,2	27,2	16,3	27,4	16,5	0,7
250	26,8	18,2	25,8	17,2	24,7	16,1	25,8	17,2	2,1
315	25,6	19,0	24,8	18,2	23,7	17,1	24,7	18,1	1,9
400	23,9	19,1	23,2	18,4	22,3	17,5	23,2	18,4	1,6
500	22,5	19,3	22,4	19,2	21,9	18,7	22,3	19,1	0,6
630	21,5	19,6	20,5	18,6	19,5	17,6	20,6	18,7	2,0
800	19,4	18,6	18,1	17,3	17,2	16,4	18,3	17,5	2,2
1k	18,0	18,0	16,4	16,4	15,2	15,2	16,6	16,6	2,8
1,25k	17,2	17,8	16,9	17,5	15,9	16,5	16,7	17,3	1,3
1,6k	18,1	19,1	16,9	17,9	15,4	16,4	16,9	17,9	2,7
2k	13,3	14,5	12,0	13,2	10,5	11,7	12,1	13,3	2,8
2,5k	10,6	11,9	9,3	10,6	8,3	9,6	9,5	10,8	2,3
3,15k	9,0	10,2	8,4	9,6	7,8	9,0	8,4	9,6	1,2
4k	8,2	9,2	7,8	8,8	7,4	8,4	7,8	8,8	0,8
5k	7,8	8,3	7,7	8,2	7,4	7,9	7,6	8,1	0,4
6,3k	8,2	8,1	8,3	8,2	7,9	7,8	8,1	8,0	0,3
8k	8,0	6,9	8,1	7,0	8,0	6,9	8,0	6,9	0,1
10k	8,4	5,9	8,4	5,9	8,2	5,7	8,3	5,8	0,1
12,5k	8,7	4,4	8,6	4,3	8,4	4,1	8,6	4,3	0,3
16k	8,5	1,9	8,5	1,9	8,5	1,9	8,5	1,9	0,0
20k	12,2	2,9	12,0	2,7	10,8	1,5	11,7	2,4	1,4
L_{eq} (dB)	50,5	-	49,0	-	46,2	-	48,9	-	-
L_{Aeq} (dB)	-	30,1	-	29,3	-	28,5	-	29,3	-

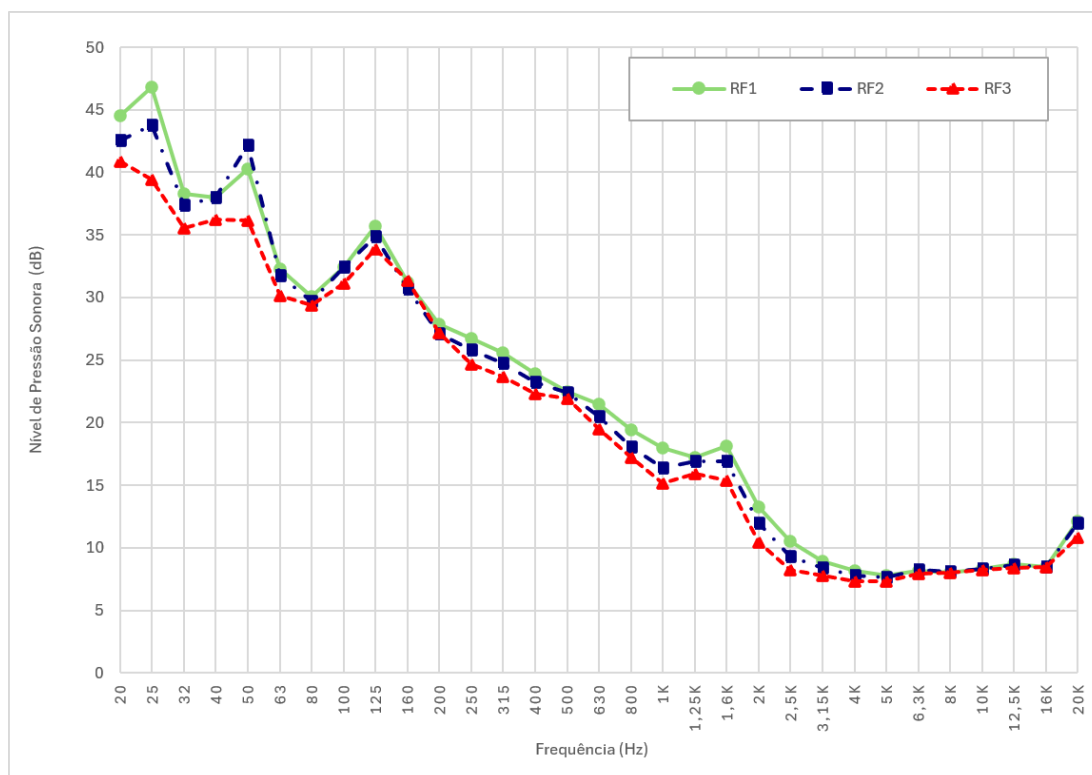


Figura 6.1 – Valores de Níveis de Pressão Sonora (dB) do Ruído de Fundo, para bandas de frequência de 1/3 de oitava, nos pontos RF1, RF2 e RF3, medidos no Coliseu do Porto.

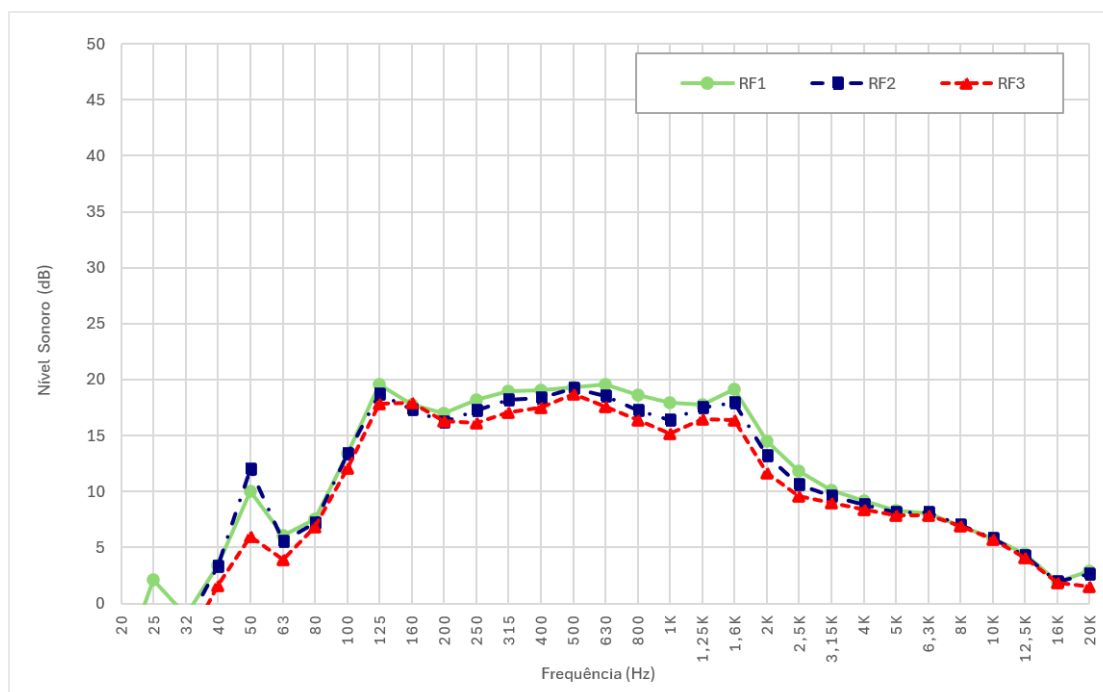


Figura 6.2 – Valores de Níveis Sonoros (dB(A)) do Ruído de Fundo, para bandas de frequência de 1/3 de oitava, nos pontos RF1, RF2 e RF3, medidos no Coliseu do Porto.

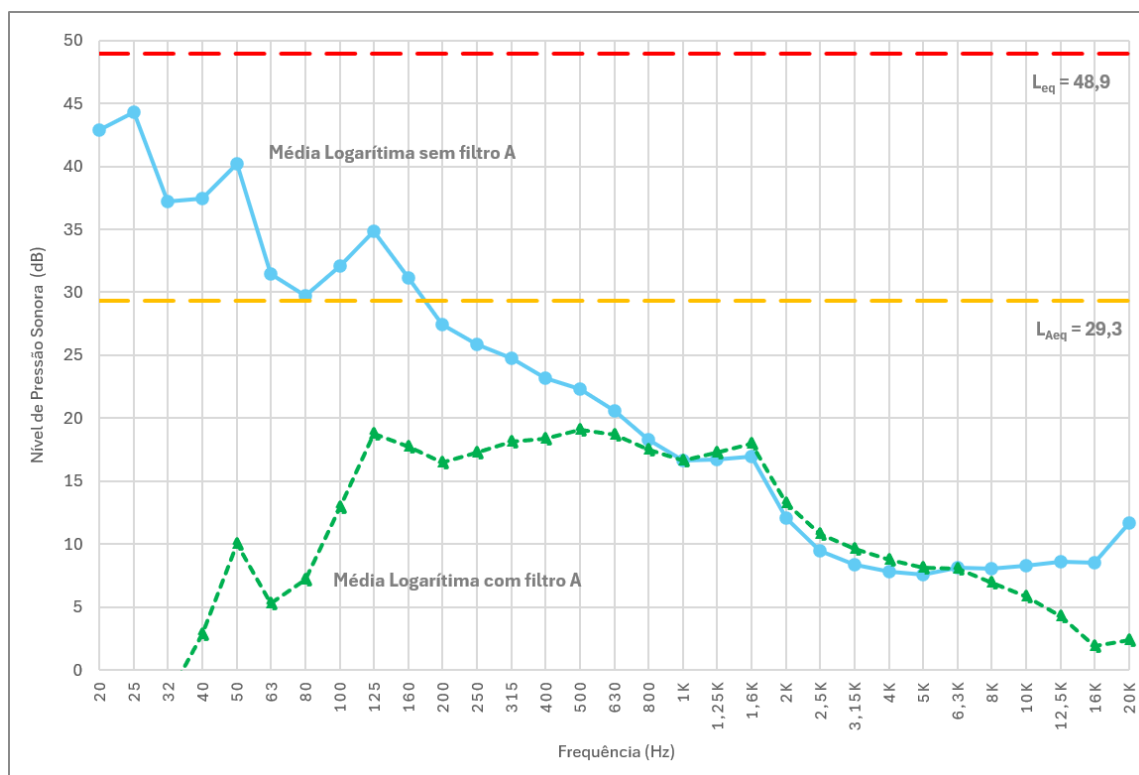


Figura 6.3 – Valores Médios de Níveis de Pressão Sonora (dB) do Ruído de Fundo, para bandas de frequência de 1/3 de oitava, nos pontos RF1, RF2 e RF3, com e sem a curva A, medidos no Coliseu do Porto.

Com a aplicação do filtro A, o nível de pressão sonora baixou significativamente nas baixas frequências, como demonstrado nos níveis sonoros na Figura 6.2, de modo a ajustar os valores medidos à percepção auditiva humana, como referido no capítulo 2.2.4. Deste modo, também foram removidas as maiores variações entre pontos de medição, existentes no nível de pressão sonora.

A Figura 6.3 demonstra a relação entre o ruído existente na sala, sem o filtro A, e o ruído perceptível pelo ouvido humano, onde foi aplicado o filtro A. Como a maior concentração de energia ocorre nas baixas frequências, com um L_{eq} de 48,9 dB, quando é aplicado o filtro A, esse valor baixa significativamente para um nível sonoro equivalente de apenas 29,3 dB(A), onde apenas existe ruído baixo, proveniente das frequências médias. Isto é um indicativo de que esta é uma sala excepcionalmente silenciosa, cujas anomalias são provavelmente associadas a componentes electromecânicos do edifício e à sua morfologia.

O Quadro 6.2 e a Figura 6.4 demonstram os valores do nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}) e o nível sonoro equivalente (L_{Aeq}), para valores na banda de 1/1 de oitava. Foi também

obtida uma média logarítmica e a variação entre todos os pontos, para as bandas de frequência entre 16 e 16k Hz. Ambos afirmam os resultados anteriores, contudo, as interferências existentes nos valores do ruído estão mais atenuadas, devido à mudança de banda de oitava.

Quadro 6.2 – Valores de Níveis de Pressão Sonora (dB) e Níveis Sonoros (dB(A)), Nível de Pressão Sonora Equivalente (L_{eq}), Nível Sonoro Equivalente (L_{Aeq}), Média Logarítmica e ΔL , para bandas de frequência de 1/1 de oitava, nos pontos RF1, RF2 e RF3, medidos no Coliseu do Porto.

Frequência (Hz)	Pontos de Medição						Média Logarítmica		ΔL (dB)
	RF1		FR2		RF3				
	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A	com filtro A	sem filtro A
16	47,2	< 0	45,6	< 0	41,0	< 0	45,3	< 0	6,2
32	43,1	3,1	40,7	0,7	37,4	< 0	41,0	1,0	5,7
63	36,5	10,5	38,0	12,0	33,0	7,0	36,3	10,3	5,0
125	33,6	18,1	33,0	17,5	32,3	16,8	33,0	17,5	1,2
250	26,8	18,3	26,0	17,5	25,4	16,9	26,1	17,6	1,4
500	22,7	19,7	22,2	19,2	21,4	18,4	22,1	19,1	1,3
1k	18,3	18,3	17,2	17,2	16,2	16,2	17,3	17,3	2,1
2k	15,1	16,1	13,9	14,9	12,4	13,4	13,9	14,9	2,7
4k	8,3	9,3	8,0	9,0	7,5	8,5	7,9	8,9	0,8
8k	8,2	7,2	8,2	7,2	8,0	7,0	8,2	7,2	0,2
16k	10,1	3,1	10,0	3,0	9,4	2,4	9,8	2,8	0,8
L_{eq} (dB)	49,1	-	47,6	-	43,5	-	47,3	-	-
L_{Aeq} (dB)	-	25,6	-	24,9	-	24,0	-	24,9	-

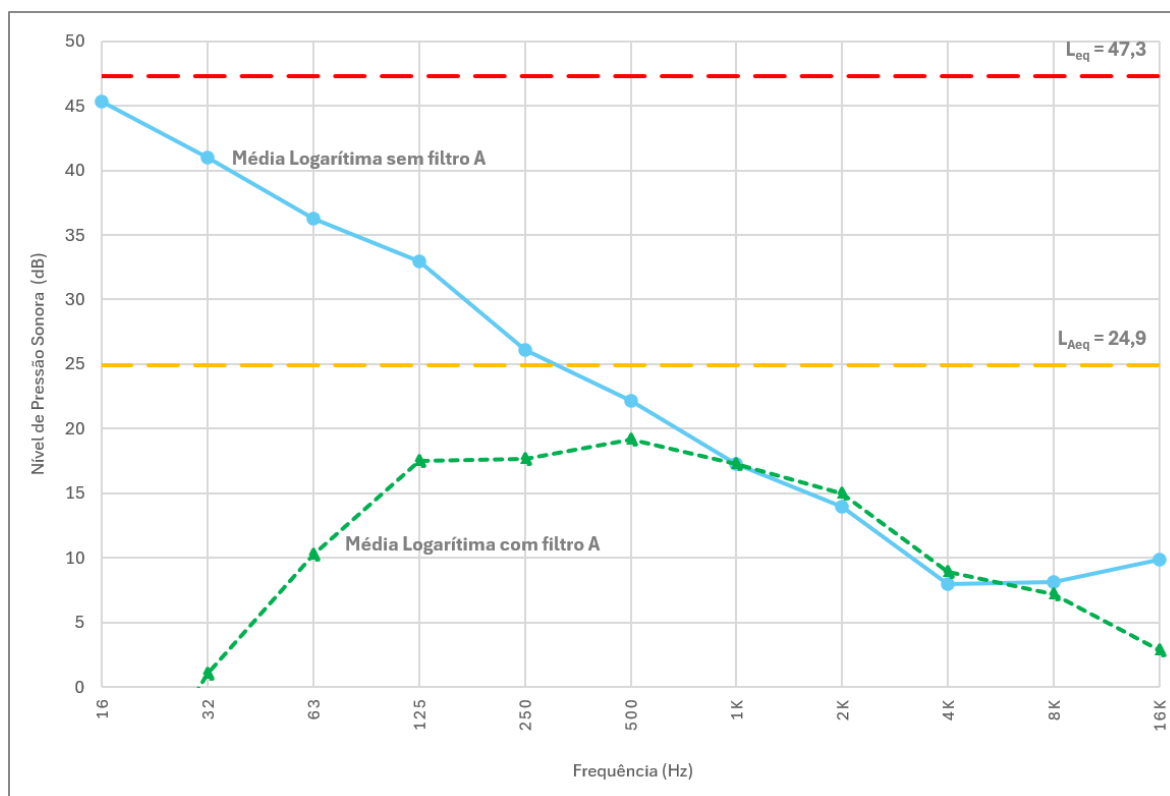


Figura 6.4 – Valores Médios de Níveis de Pressão Sonora (dB) do Ruído de Fundo, em bandas de frequência de 1/1 de oitava, nos pontos RF1, RF2 e RF3, com e sem a curva A, medidos no Coliseu do Porto.

6.2.2 CURVAS DE INCOMODIDADE NC E NR

As curvas NC (*Noise Criterion*) e NR (*Noise Rating*) são critérios fundamentais na avaliação do ruído de fundo contínuo, proveniente de fontes não intencionais, exteriores e interiores, como referido no capítulo 2.6.2. A curva NC caracteriza o local em estudo por bandas de frequências entre os 63 e os 8k Hz. A curva NR possui uma gama de frequências mais alargada, entre 32 e 8k Hz, e é o critério mais utilizado actualmente na Europa.

Quadro 6.3 – Valores de NC e NR, calculados nos pontos RF1, RF2 e RF3, e comparados com os valores máximos recomendados, no Coliseu do Porto.

Utilização	Valores Máximos Recomendados		Valores Obtidos	
	NC	NR	NC	NR
Grandes Salas de Concerto e de Auditórios	20	15		17-19
Salas de Ópera	20	20	14-16	17-19
Salas de Teatro e Música	20 a 30	20		

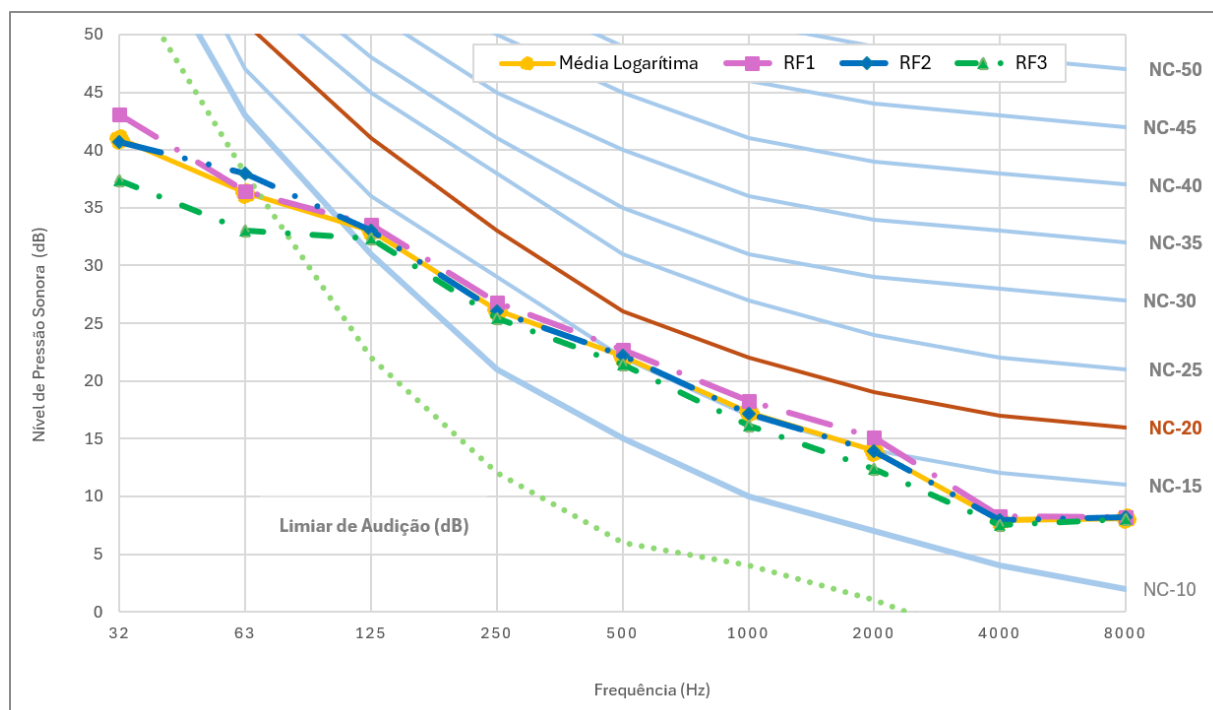


Figura 6.5 – Comparação dos Níveis de Pressão Sonora (dB) do Ruído de Fundo, para bandas de frequência de 1/1 de oitava, nos pontos RF1, RF2 e RF3, com as curvas NC, no Coliseu do Porto.

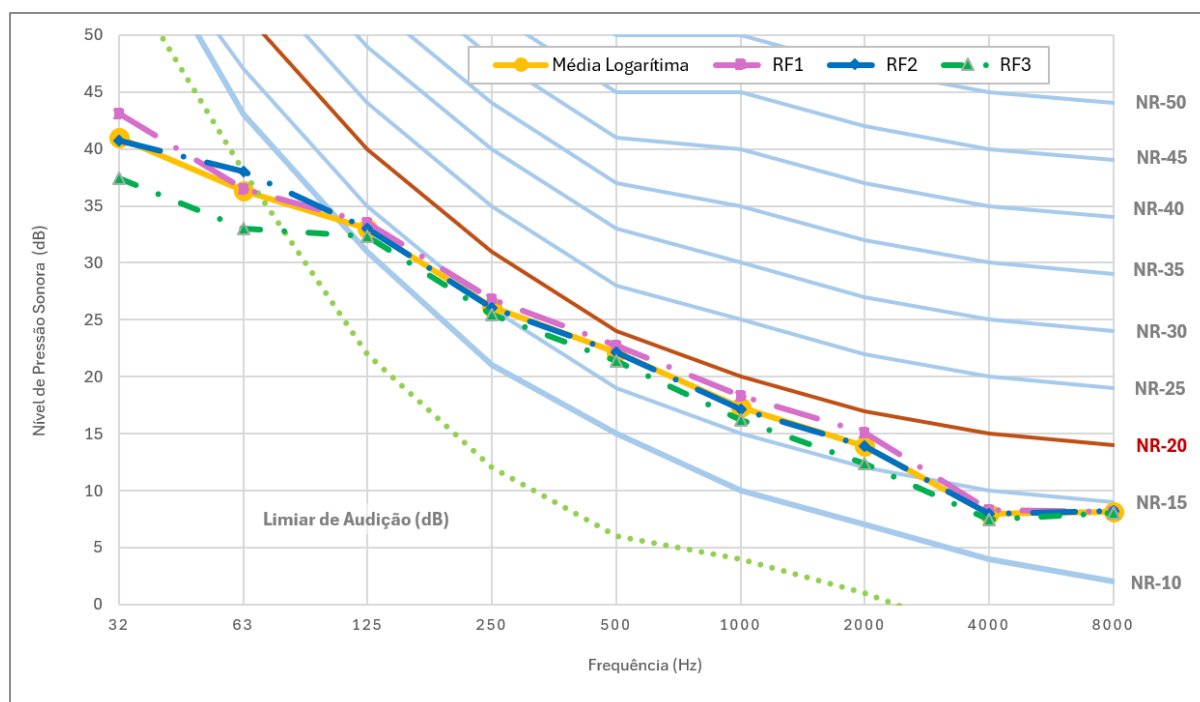


Figura 6.6 – Comparação dos Níveis de Pressão Sonora (dB) do Ruído de Fundo, para bandas de frequência de 1/1 de oitava, nos pontos RF1, RF2 e RF3, com as curvas NR, no Coliseu do Porto.

No Quadro 6.3 encontram-se representados os valores máximos recomendados, em ambas as curvas de incomodidade, para grandes salas de concerto, grandes auditórios, salas de ópera e salas de teatro e música, reflectindo os vários tipos de espectáculos associados ao Coliseu. Foi empregue o método da tangente para chegar aos valores das curvas de referência atingidos pela sobreposição da linha dos níveis de pressão sonora nos três pontos de medição, nas bandas de 1/1 de oitava. Na Figura 6.5 está representada a comparação entre os níveis de pressão sonora e o NC. Na Figura 6.6, a comparação ocorre com as curvas NR. Em ambos os gráficos, foi também incluído o limiar da audição humana.

Com o NC, os valores obtidos encontram-se entre 14 e 16, menor do que o máximo recomendado para todas as tipologias da sala. Com o NR, obtiveram-se valores num intervalo entre 17 e 19, valores menores na utilização da sala para a ópera, teatro e música, mas acima do limite para os grandes auditórios e concertos.

6.2.3 LEGISLAÇÃO NACIONAL (RRAE)

Como referido anteriormente, no capítulo 3.4, de acordo com o RRAE, no interior de recintos de espectáculos, o ruído proveniente do funcionamento de instalações de aquecimento, ventilação e ar condicionado, deve, com a sala desocupada, deve ser inferior ou igual a 38 dB(A), para salas de cinema, e 30 dB(A), nos restantes recintos de espectáculos. O nível sonoro contínuo equivalente do ruído ambiente no interior do recinto (L_{Aeq}), deve também ser assegurado pelas paredes do recinto e o isolamento sonoro a sons aéreos existente, não ultrapassando o valor e 30 dB(A).

O factor de incerteza, também indicado no RRAE, em ambos os casos, é de 3 dB(A), que deve ser subtraído ao nível sonoro contínuo equivalente obtido nos ensaios realizados ao ruído de fundo.

No quadro 6.4 estão expostos os valores do nível sonoro contínuo equivalente (L_{Aeq}), obtido na média logarítmica com a curva A, e a avaliação do mesmo ao encontro das exigências regulamentares do RRAE. Concluiu-se que os valores obtidos nas medições cumprem os limites regulamentares exigidos, algo já esperado, visto que o edifício não possui um sistema AVAC, apenas aquecimento.

Quadro 6.4 – Avaliação regulamentar (RRAE) do Nível Sonoro Contínuo equivalente (L_{Aeq}), no Coliseu do Porto.

Utilização	L_{Aeq} (dB)	Factor de Incerteza (I) (dB)	L_{Aeq} com I (dB)	L_{Aeq} max RRAE (dB)	Avaliação
Recintos de Espectáculos	24,9	3	21,9	30	Adequado
Salas de Cinema				38	Adequado

6.3 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

6.3.1 SALA VAZIA

O Tempo de Reverberação (TR) é reconhecido como um parâmetro mais significativo na caracterização acústica de uma sala. O TR quantifica a persistência do som dentro de um espaço e, como já abordado no capítulo 2.4, é definido pelo intervalo de tempo necessário para a diminuição do nível da pressão sonora em 60 dB, após a interrupção da fonte sonora. No caso do Coliseu do Porto, este é um ensaio extremamente importante, devido à polivalência da sala em estudo. Valores excessivos podem prejudicar a inteligibilidade da palavra e, valores demasiado baixos, podem afectar negativamente certos tipos de música. Ao realizar-se a recolha de dados deste parâmetro com a sala vazia, é eliminada a variável da absorção sonora inerente à presença do público, e determina-se apenas os dados alusivos ao edifício.

No ensaio realizado, foram obtidos os dados do Tempo de Reverberação (T_{30}), em bandas de 1/3 de oitava, para os 20 pontos em estudo, em dois ensaios, sem e com cadeiras na Plateia, como indicado na metodologia do capítulo 5. Os dados obtidos encontram-se demonstrados graficamente na figura 6.7 e na figura 6.8, respectivamente. Os valores médios de ambos os ensaios, por frequência, podem ser visualizados na figura 6.9, onde também se encontra a variação entre os mesmos.

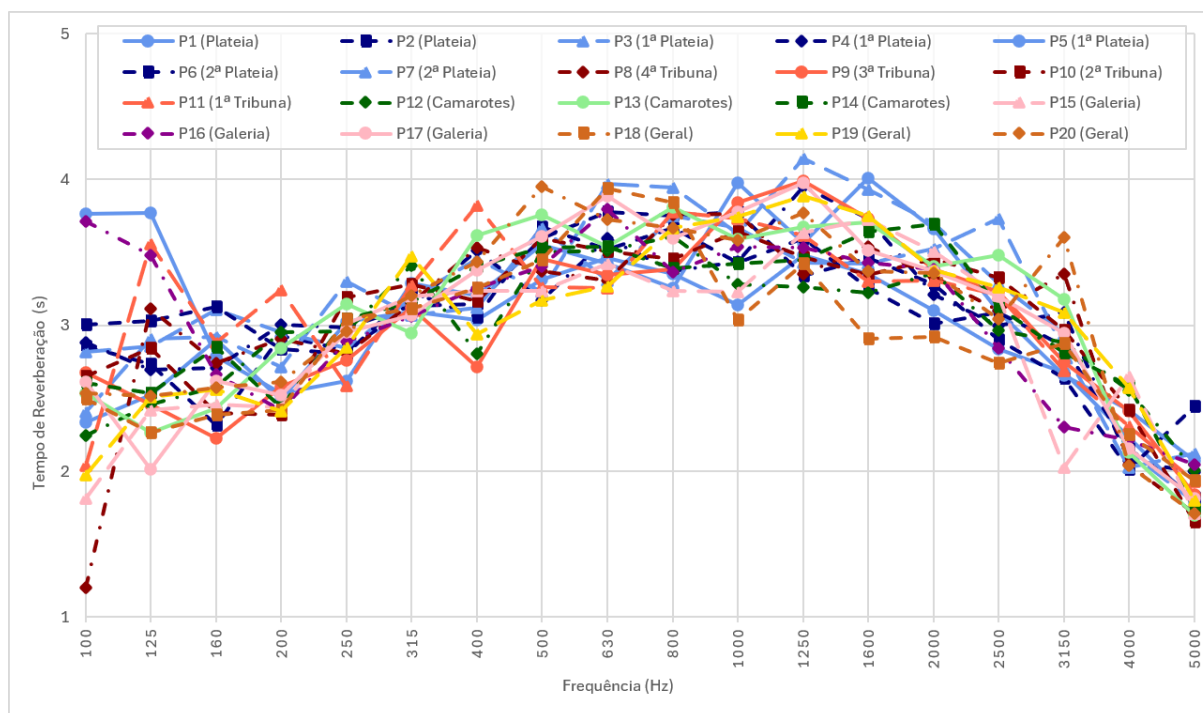


Figura 6.7 – Valores do Tempo de Reverberação (TR), em bandas de 1/3 de oitava, para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

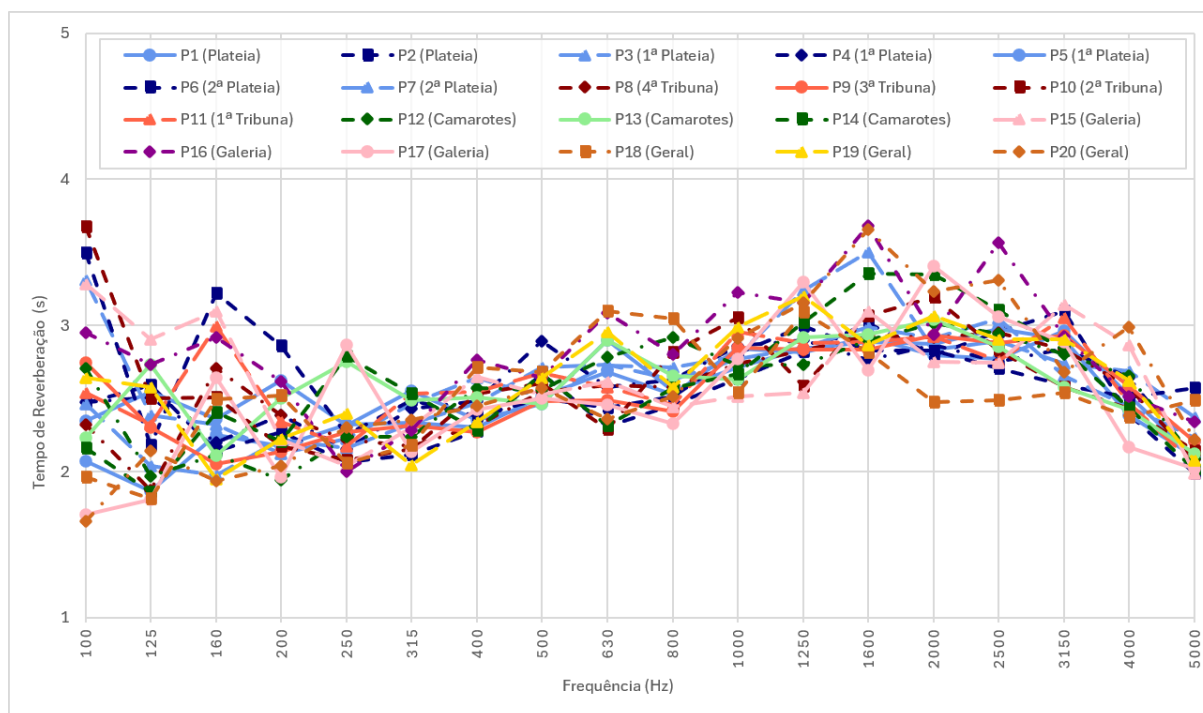


Figura 6.8 – Valores do Tempo de Reverberação (TR), em bandas de 1/3 de oitava, para os 20 pontos medidos, com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

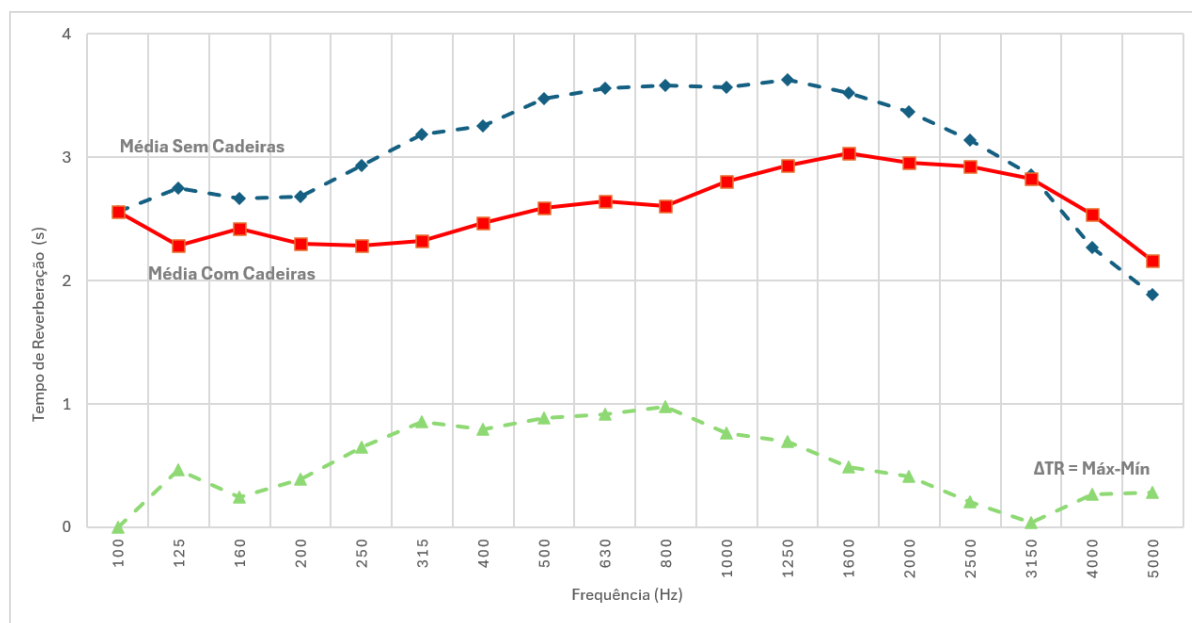


Figura 6.9 – Valores das médias do Tempo de Reverberação (TR) por frequência, e respectiva variação, em bandas de 1/3 de oitava, para os 20 pontos medidos, sem e com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

Os quadros 6.5 e 6.6 representam o Tempo de Reverberação [500, 1k Hz] e [500, 2k Hz], nos 20 pontos medidos, por bandas de frequência de 1/1 de oitava, nos ensaios sem e com cadeiras na plateia, respectivamente. Estes resultados estão graficamente representados nas figuras 6.10 e 6.11, que acreditam os resultados da banda de 1/3 de oitava. As figuras 6.12 e 6.13 representam também estes resultados, em [500, 1k Hz], através de mapas de isolinhas na sala em estudo, em ambos os ensaios, respectivamente. Ambos os mapas de isolinhas foram criados com um gradiente de cores de valores entre 2,20 e 4,00 segundos e revelam diferenças significativas entre os dois ensaios. No ensaio sem cadeiras, o mapa apresenta uma distribuição maioritariamente avermelhada, com valores entre 3,30 e 3,73 segundos. Os valores mais elevados encontram-se no centro da Plateia e em zonas laterais superiores da sala. Os valores mais baixos encontram-se nos pontos junto à fonte sonora e na parte mais afastada da mesma, na Galeria e Camarotes. No ensaio com cadeiras, verifica-se uma diminuição generalizada do TR em toda a sala, onde os valores se encontram entre 2,53 e 2,95 segundos, tornando o mapa predominantemente verde. Os valores mais elevados encontram-se no centro da sala, na Plateia, e em partes da Galeria. Os valores mais baixos encontrados, mantêm-se na zona perto da fonte sonora, nas Cadeiras de Orquestra e nos Camarotes, e nas zonas da Tribuna e Galeria mais afastadas.

Quadro 6.5 – Valores do Tempo de Reverberação (TR), em bandas de 1/1 de oitava, e a respectiva média e desvio padrão, para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto (+, - : maior e menor valor em cada coluna).

Ponto Medição (Posição)	Frequência (Hz)						TR [500, 1k Hz] (s)	TR [500, 1k, 2k Hz] (s)
	125	250	500	1000	2000	4000		
P1 (Plateia)	2,59	2,87	3,27	(-) 3,32	3,10	2,23	(-) 3,30	(-) 3,23
P2 (Plateia)	2,64	2,96	3,51	3,62	3,21	2,36	3,56	3,45
P3 (1ª Plateia)	2,93	2,99	3,55	(+) 3,91	(+) 3,64	2,29	(+) 3,73	(+) 3,70
P4 (1ª Plateia)	2,76	3,04	3,43	3,59	3,31	2,39	3,51	3,44
P5 (1ª Plateia)	(+) 3,44	2,81	3,39	3,60	3,59	2,38	3,50	3,53
P6 (2ª Plateia)	3,06	2,96	3,42	3,57	3,12	2,28	3,49	3,37
P7 (2ª Plateia)	2,74	3,03	3,37	3,62	3,56	2,33	3,49	3,52
P8 (4ª Tribuna)	2,35	2,96	3,41	3,62	3,32	2,37	3,52	3,45
P9 (3ª Tribuna)	2,45	2,82	3,17	3,74	3,45	2,33	3,45	3,45
P10 (2ª Tribuna)	2,63	2,95	3,42	3,52	3,37	2,35	3,47	3,44
P11 (1ª Tribuna)	2,83	3,04	3,45	3,71	3,27	2,31	3,58	3,48
P12 (Camarotes)	2,43	(+) 3,11	3,27	3,38	3,18	2,48	3,33	3,28
P13 (Camarotes)	2,41	2,98	3,64	3,69	3,53	2,33	3,67	3,62
P14 (Camarotes)	2,66	2,88	3,49	3,42	3,49	2,38	3,46	3,47
P15 (Galeria)	(-) 2,23	2,88	3,30	3,37	3,48	(-) 2,13	3,33	3,38
P16 (Galeria)	3,29	2,79	3,48	3,48	3,22	2,19	3,48	3,39
P17 (Galeria)	2,41	2,85	3,63	3,78	3,36	2,30	3,70	3,59
P18 (Geral)	2,38	2,86	3,55	3,43	(-) 2,86	2,36	3,49	3,28
P19 (Geral)	2,35	2,91	(-) 3,13	3,77	3,47	(+) 2,49	3,45	3,45
P20 (Geral)	2,54	2,93	(+) 3,70	3,67	3,26	2,45	3,69	3,55
Média (s)	2,66	2,93	3,43	3,59	3,34	2,34	3,51	3,45
Desvio Padrão (s)	0,32	0,09	0,15	0,16	0,19	0,09	0,12	0,12
ΔTR (s) = Máx-Mín	1,21	0,32	0,58	0,58	0,78	0,36	0,43	0,47

Quadro 6.6 – Valores do Tempo de Reverberação (TR), em bandas de 1/1 de oitava, e a respectiva média e desvio padrão, para os 20 pontos medidos, com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto (+, - : maior e menor valor em cada coluna).

Ponto Medição (Posição)	Frequência (Hz)						TR [500, 1k Hz] (s)	TR [500, 1k, 2k Hz] (s)
	125	250	500	1000	2000	4000		
P1 (Plateia)	2,06	2,28	2,50	2,73	2,83	2,53	2,61	2,68
P2 (Plateia)	2,40	2,15	2,42	2,64	2,92	2,49	(-) 2,53	2,66
P3 (1ª Plateia)	2,67	2,27	2,63	2,91	3,08	2,60	2,77	2,87
P4 (1ª Plateia)	2,39	2,32	2,65	2,80	2,79	2,52	2,73	2,75
P5 (1ª Plateia)	2,42	2,50	2,57	2,70	2,91	2,46	2,64	2,73
P6 (2ª Plateia)	2,96	2,53	2,44	2,77	2,79	2,56	2,61	2,67
P7 (2ª Plateia)	2,16	2,24	2,64	2,75	2,98	2,44	2,69	2,79
P8 (4ª Tribuna)	2,30	2,26	2,48	2,71	2,93	2,50	2,60	2,71
P9 (3ª Tribuna)	2,36	2,24	(-) 2,41	2,70	2,88	2,57	2,55	2,66
P10 (2ª Tribuna)	2,90	(-) 2,14	2,48	2,82	3,03	2,38	2,65	2,78
P11 (1ª Tribuna)	2,62	2,35	2,60	2,76	2,86	2,53	2,68	2,74
P12 (Camarotes)	2,26	(-) 2,14	2,64	2,79	2,95	2,52	2,72	2,79
P13 (Camarotes)	2,36	(+) 2,58	2,62	2,73	2,94	2,37	2,68	2,77
P14 (Camarotes)	2,14	2,51	2,42	2,75	3,27	2,43	2,59	2,82
P15 (Galeria)	(+) 3,10	2,19	2,60	(-) 2,50	2,87	(+) 2,66	2,55	(-) 2,65
P16 (Galeria)	2,87	2,30	2,83	(+) 3,06	3,40	2,59	(+) 2,95	(+) 3,10
P17 (Galeria)	2,05	2,32	2,46	2,80	3,05	(-) 2,36	2,63	2,77
P18 (Geral)	2,09	2,25	(+) 2,83	2,89	(-) 2,59	2,47	2,86	2,77
P19 (Geral)	2,39	2,22	2,65	2,92	2,95	2,54	2,79	2,84
P20 (Geral)	(-) 1,91	2,23	2,46	2,86	(+) 3,40	2,63	2,66	2,91
Média (s)	2,42	2,30	2,57	2,78	2,97	2,51	2,67	2,77
Desvio Padrão (s)	0,33	0,13	0,12	0,12	0,20	0,08	0,11	0,10
ΔTR (s) = Máx-Mín	1,18	0,45	0,42	0,57	0,81	0,31	0,42	0,44

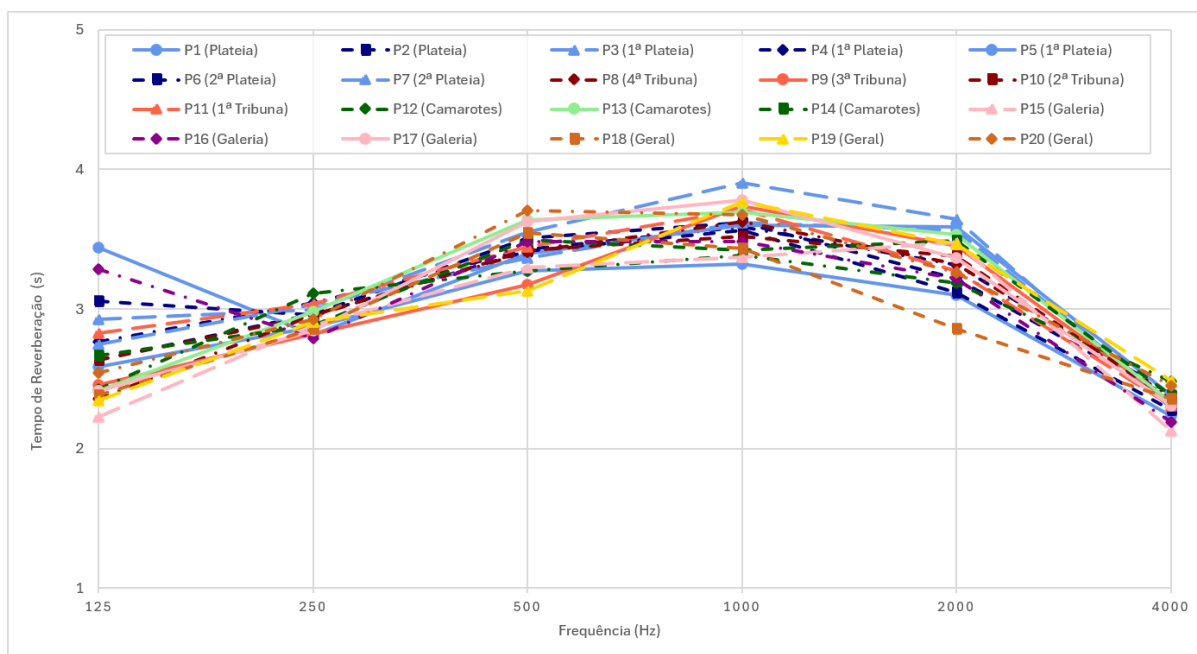


Figura 6.10 – Valores do Tempo de Reverberação (TR), em bandas de 1/1 de oitava, para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.

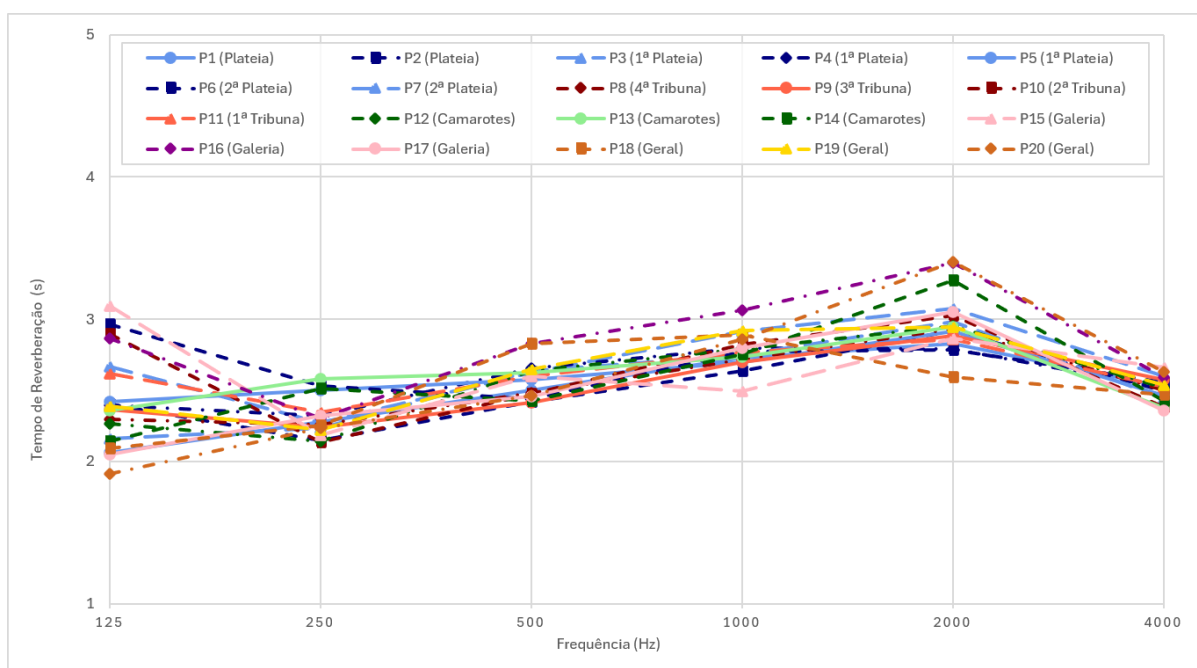


Figura 6.11 – Valores do Tempo de Reverberação (TR), em bandas de 1/1 de oitava, para os 20 pontos medidos, com cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.

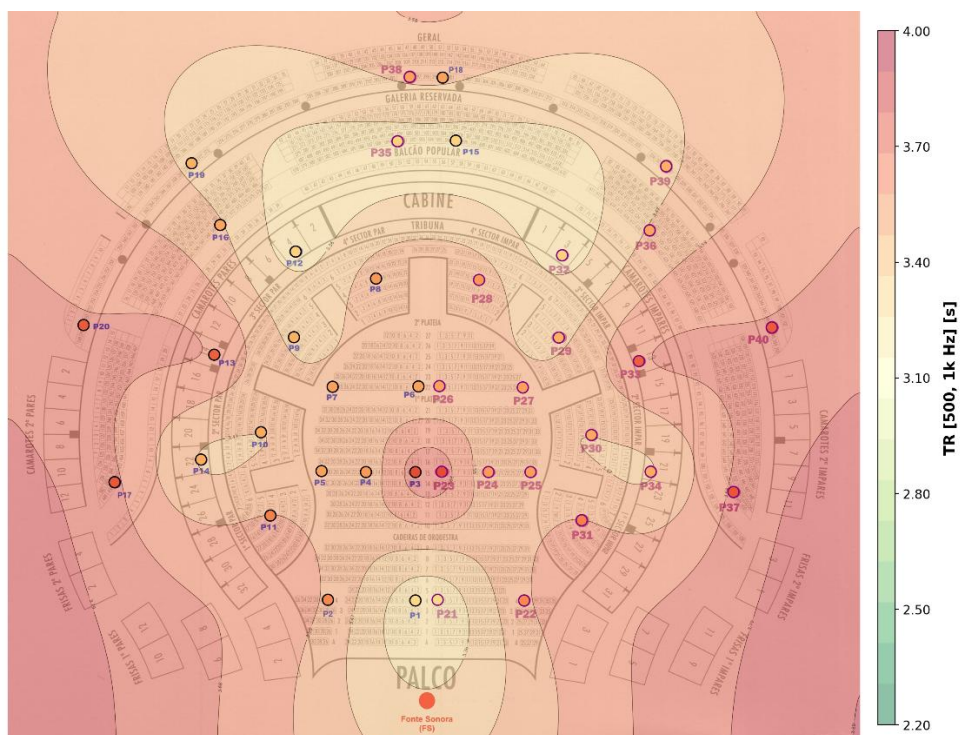


Figura 6.12 – Mapa de Isolinhas do Tempo de Reverberação, TR [500, 1k Hz], em bandas de 1/1 de oitava, para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.

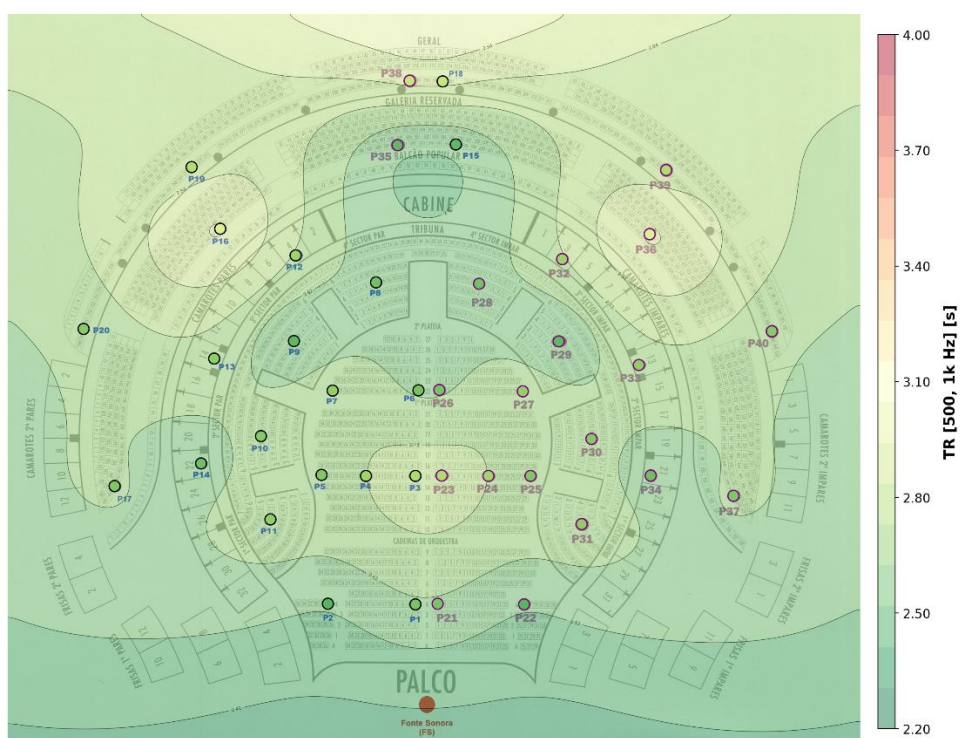


Figura 6.13 – Mapa de Isolinhas do Tempo de Reverberação, TR [500, 1k Hz], em bandas de 1/1 de oitava, para os 20 pontos medidos, com cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.

6.3.2 SALA OCUPADA – PREVISÃO

O Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) exige que as medições do Tempo de Reverberação sejam efectuadas em espaços vazios, contudo, é necessário compreender o comportamento de uma sala de espectáculos na presença do público normal ao seu funcionamento e da absorção sonora por ele gerada, que irá levar a uma diminuição do TR existente na sala vazia.

Como referido anteriormente, foram realizados dois ensaios distintos, um sem cadeiras na plateia e outro com as mesmas presentes, demonstrando assim diferentes disposições possíveis na sala, consoante o tipo de evento. Para a simulação de ocupação de 50% e 100%, com o intuito de previsão do TR com a sala ocupada, considerou-se a situação de não existirem cadeiras na plateia, com o público a pé nessa área, e a situação com cadeiras e com o público sentado.

a) Sem cadeiras na plateia

De modo a iniciar a previsão do TR, no cálculo da área de absorção, considerou-se a área total ocupada por assentos em todas as secções da sala. De acordo com a metodologia de Beranek, à área real dos assentos foi adicionada uma faixa de 0,5 metros à volta do perímetro de zonas onde a audiência não está limitada por superfícies rígidas, na plateia sem cadeiras, simulando o efeito de absorção lateral do público. Como não se obteve informação concreta sobre a disposição do público em situações semelhantes à actual, considerou-se a área de pessoas a pé na plateia e sentadas igual, como se encontra representado no Quadro 6.7.

A metodologia de Beranek, atinge o incremento de absorção sonora (ΔA) através da diferença entre os coeficientes de absorção sonora de cadeiras ocupadas e de cadeiras vazias, referidos no capítulo 2.3.1, multiplicados pela área total de assentos. Nesta previsão foi também considerada a diferença entre o coeficiente de absorção de pessoas a pé, referente à área da plateia. Os resultados, dependentes da taxa de ocupação do recinto, encontram-se no Quadro 6.8, através da equação de Sabine referida anteriormente (eq. 2.14).

Quadro 6.7 – Cálculo da área total de utilização, para a sala a 100% e 50% de ocupação e sem cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

Área (m ²)	Ocupação	
	100%	50%
Sap (pessoas em pé na plateia)	475	238
Sa (assentos restantes)	454	227
Sp (proscénico)	13	6
S = Sa + Sp	466	233

Quadro 6.8 – Cálculo da Absorção Sonora (A), a partir da área de utilização e dos coeficientes de absorção, para a sala a 100% e 50% de ocupação e sem cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α_o (cadeira ocupada com estofa fino)	0,51	0,64	0,75	0,80	0,82	0,83
α_v (cadeira vazia com estofa de couro)	0,40	0,50	0,58	0,61	0,58	0,50
α_{pess} (pessoa a pé)	0,10	0,21	0,41	0,65	0,75	0,71
$\Delta\alpha = \alpha_o - \alpha_v$	0,11	0,14	0,17	0,19	0,24	0,33
$\Delta p = \alpha_{pess}$	0,10	0,21	0,41	0,65	0,75	0,71
$\Delta A = (\Delta\alpha * S_{50\%}) + (\Delta p * S_{ap50\%})$ (m ²)	49,42	82,56	137,09	198,79	234,22	245,71
$\Delta A = (\Delta\alpha * S_{100\%}) + (\Delta p * S_{ap100\%})$ (m ²)	98,84	165,12	274,18	397,59	468,44	491,41

Quadro 6.9 – Cálculo da previsão de valores do Tempo de Reverberação, para a sala a 100% e 50% de ocupação sem cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

Frequência (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
0% Ocupação	TR medido (s)	2,66	2,93	3,43	3,59	3,34	2,34
	A sala (m ²)	1521	1378	1178	1125	1209	1729
	TR [500, 1k Hz] (s)	3,5					
50% Ocupação	TR (s)	2,57	2,77	3,07	3,05	2,80	2,05
	A sala (m ²)	1570	1461	1315	1324	1444	1975
	TR [500, 1k Hz] (s)	3,1					
100% Ocupação	TR (s)	2,49	2,62	2,78	2,65	2,41	1,82
	A sala (m ²)	1620	1543	1452	1523	1678	2220
	TR [500, 1k Hz] (s)	2,7					
Volume (m ³)		25090					

A sala principal apresenta um volume de cerca de 25090 m³, incluindo o palco, valor anteriormente calculado no capítulo 4.2. Através da fórmula de Sabine (eq. 2.14) calcula-se os

valores aproximados do TR para a sala com as taxas de ocupação de 50% e 100%. Estes resultados iniciais foram obtidos através de aproximações e, para uma análise mais aprofundada, teriam de ser utilizados cálculos de uma maior complexidade. Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 6.9 e na Figura 6.14, onde se pode verificar uma diminuição do Tempo de Reverberação de 0,8 segundos, entre 0% e 100% de ocupação da sala. Esta é uma variação significativa, especialmente nas médias e altas frequências, que irá melhorar a inteligibilidade da palavra da sala com a mesma em funcionamento.

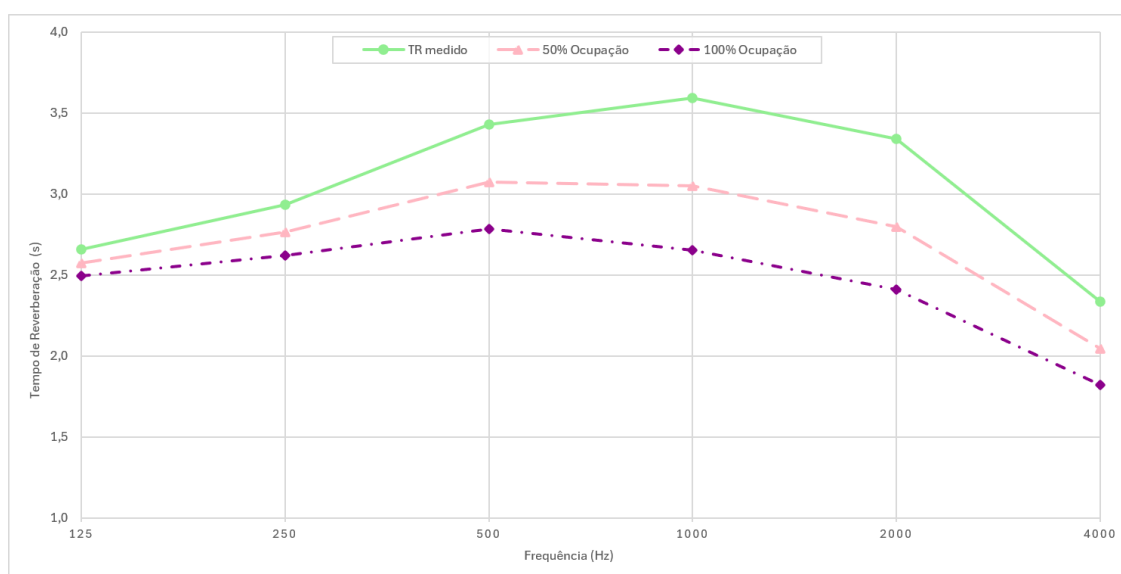


Figura 6.14 – Previsão dos valores do Tempo de Reverberação, em bandas de frequência de 1/1 de oitava, para a sala a 100% e 50% de ocupação sem cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

b) Com cadeiras na plateia

Para a simulação de ocupação da sala, com assentos em todas as áreas possíveis da sala, utilizaram-se as áreas totais de utilização demonstradas, no Quadro 6.10, para a obtenção dos valores de absorção sonora, no Quadro 6.11. Nesta simulação, foram utilizados apenas os coeficientes de absorção entre cadeiras vazias e ocupadas e, recorrendo às fórmulas de Sabine, obteve-se os valores previstos para o TR com as taxas de ocupação de 50% e 100%, alcançados no Quadro 6.12.

Quadro 6.10 – Cálculo da área total de utilização, para a sala a 100% e 50% de ocupação e com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

Área (m ²)	Ocupação	
	100%	50%
Sap (assentos na plateia)	475	238
Sa (assentos restantes)	454	227
Sp (proscénico)	13	6
S = Sa + Sp	466	233

Quadro 6.11 – Cálculo da Absorção Sonora (A), a partir da área de utilização e dos coeficientes de absorção, para a sala a 100% e 50% de ocupação e com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α_o (cadeira ocupada com estofa fino)	0,51	0,64	0,75	0,80	0,82	0,83
α_v (cadeira vazia com estofa de couro)	0,40	0,50	0,58	0,61	0,58	0,50
$\Delta\alpha = \alpha_o - \alpha_v$	0,11	0,14	0,17	0,19	0,24	0,33
$\Delta A = \Delta\alpha * S$ (50% ocupado) (m²)	25,7	32,7	39,6	44,3	56,0	77,0
$\Delta A = \Delta\alpha * S$ (100% ocupado) (m²)	51,3	65,3	79,3	88,6	112,0	153,9

Quadro 6.12 – Cálculo da previsão de valores do Tempo de Reverberação, para a sala a 100% e 50% de ocupação com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

Frequência (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
0% Ocupação	TR medido (s)	2,42	2,30	2,57	2,78	2,97	2,51
	A sala (m ²)	1669	1756	1574	1453	1360	1611
	TR [500, 1k Hz] (s)	2,7					
50% Ocupação	TR (s)	2,38	2,26	2,50	2,70	2,85	2,39
	A sala (m ²)	1694	1789	1614	1497	1416	1688
	TR [500, 1k Hz] (s)	2,6					
100% Ocupação	TR (s)	2,49	2,62	2,78	2,65	2,41	1,82
	A sala (m ²)	1620	1543	1452	1523	1678	2220
	TR [500, 1k Hz] (s)	2,5					
Volume (m ³)		25090					

Nesta previsão, o TR baixa de 2,7 segundos, na sala vazia, para 2,5 segundos, com a sala a 100% de ocupação. A diferença de 0,2 segundos é menor do que a obtida na previsão sem cadeiras e com pessoas a pé na plateia, mas os valores são no geral mais baixos com pessoas

sentadas do que em pé. Os valores obtidos encontram-se demonstrados graficamente na Figura 6.15, onde se pode verificar a ocorrência de uma pequena translação das curvas para valores de frequência mais elevadas, onde o ponto mais elevado encontra-se na banda de frequência dos 2.000 Hz.

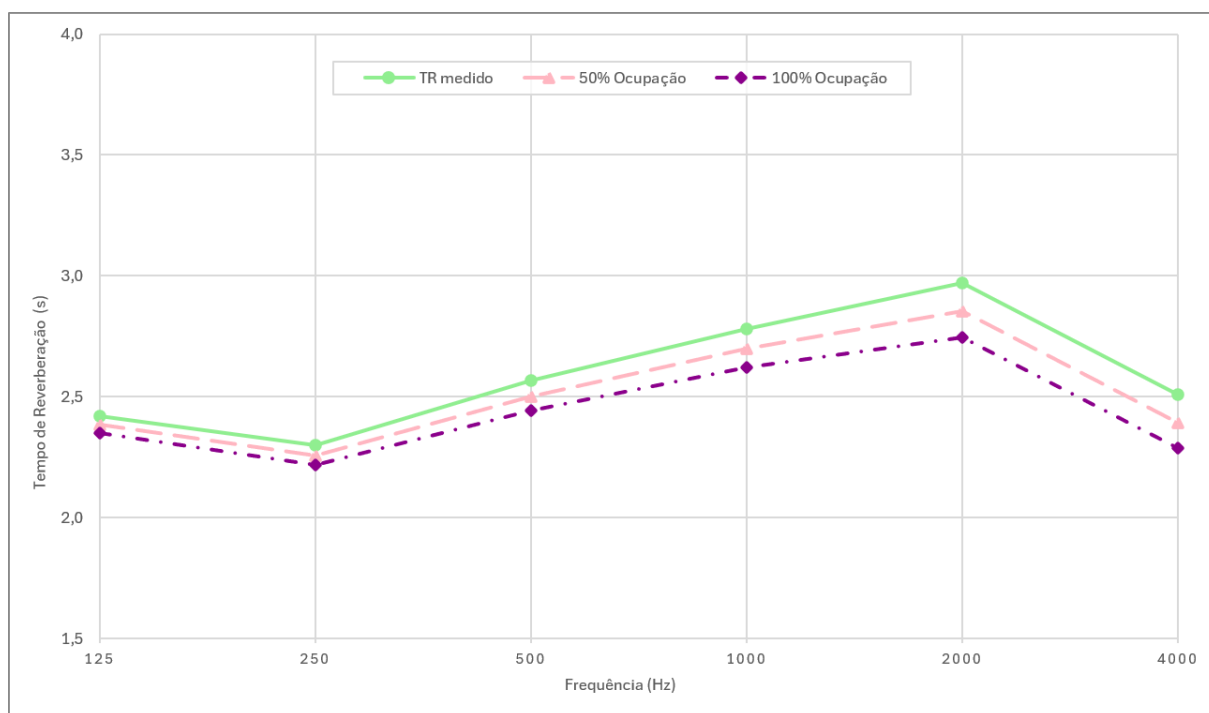


Figura 6.15 – Previsão dos valores do Tempo de Reverberação, em bandas de frequência de 1/1 de oitava, para a sala a 100% e 50% de ocupação com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

6.3.3 VALORES IDEAIS – COMPARAÇÃO

Como referido no capítulo 2.4.1, além da verificação da conformidade regulamentar, é imprescindível avaliar a adequabilidade de uma sala de espectáculos face às exigências funcionais da mesma. O Coliseu do Porto é um espaço polivalente, que recebe diferentes tipos de espectáculos durante todo o ano. Como tal, o seu desempenho acústico deve demonstrar um equilíbrio entre a clareza e a reverberação necessária para reforçar os diferentes géneros musicais.

O Quadro 6.13 mostra a comparação entre os valores ideais para o Tempo de Reverberação médio ($TR_{500-1k\text{ Hz}}$), os valores obtidos em ambos os ensaios, sem e com cadeiras na plateia, e as respectivas previsões para 100% e 50%. Como já anteriormente referido, os valores obtidos são considerados bastante elevados para uma sala de espectáculos. Como se observa, no Quadro 6.13, os valores obtidos nos ensaios encontram-se muito acima dos valores ideais para quase

todas as tipologias demonstradas. Apenas funções como música de órgão e coros gregorianos, podem ser considerados como adequados ou toleráveis, dependendo do ensaio realizado. Concluindo, o Coliseu do Porto não se encontra otimizado para quase nenhuma função específica, nem oferece características aceitáveis para a maior parte dos eventos que ocorrem nesta emblemática sala de espectáculos.

Quadro 6.13 – Comparação dos valores obtidos para o Tempo de Reverberação médio com os valores recomendados, nas frequências de 500 e 1k Hz, sem e com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

Função	Valores ideais (s) [1]	TR [500, 1k Hz] (s)		Avaliação ^{&} com cadeiras (100% ocup.)
		Sem / Com Cadeiras		
		0% Ocupação	100% Ocupação	
Auditório (palavra)	0,7 a 0,8	3,5 / 2,7	2,7 / 2,5	Desadequado
Teatro	0,7 a 0,9			Desadequado
Cinema	0,8 a 1,0			Desadequado
Ópera (não wagneriana)	1,3 a 1,7			Desadequado
Ópera (wagneriana)	1,8 a 1,9			Desadequado
Música sinfónica Barroca	1,4 a 1,6			Desadequado
Clássica	1,6 a 1,8			Desadequado
Romântica	1,9 a 2,2			Tolerável
Moderna	1,4 a 1,9			Desadequado
Música popular	0,8 a 1,0			Desadequado
Música de órgão	2,5 a 3,5			Adequado
Coros gregorianos	3 a 4			Tolerável

[&] - todas estas categorizações foram atribuídas sem a utilização de reforço electro-acústico pelo que utilizando o mesmo, estas conclusões poderão ser distintas.

6.3.4 LEGISLAÇÃO NACIONAL (RRAE)

Como referido anteriormente no capítulo 3.4, o Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios (RRAE) rege a conformidade acústica do Coliseu do Porto. O Tempo de Reverberação médio é calculado nas bandas de 1/1 de oitava de 500, 1k e 2k Hz e deve satisfazer os limites

superiores, impostos no RRAE, em função do volume da sala. Considerando que o volume calculado é superior a 9000 m^3 , obteve-se o limite máximo de TR, imposto pelo regulamento, de 1,46 segundos. Subtraindo-se o valor de incerteza de 40%, também obtido em função do volume ser superior a 9000 m^3 , ao valor médio de TR, chegou-se aos valores indicados no quadro 6.14, onde se encontra uma síntese deste processo.

Pela análise do quadro 6.14, conclui-se que o Coliseu do Porto não cumpriria hoje os requisitos do RRAE para as funções “palavra” e “cinema” para a sua tipologia, pois apresenta valores de TR médio (com o factor de incerteza) de valores acima do limite máximo calculado. No ensaio sem cadeiras na plateia, o valor obtido foi de 2,05 segundos, 0,59 segundos acima do limite máximo. No ensaio com cadeiras, a diferença diminuiu um pouco, contudo o valor obtido foi de 1,76 segundos, 0,30 segundos acima do limite. Conclui-se que, apesar de a existência de cadeiras na plateia gerar uma absorção sonora positiva para o Tempo de Reverberação na sala, como o TR é bastante elevado, não é suficiente para garantir hoje o cumprimento do RRAE actual.

Quadro 6.14 – Avaliação Regulamentar (RRAE) do Tempo de Reverberação médio, nas frequências de 500 e 1k Hz, sem e com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto, para a função “palavra” e “cinema”.

Frequência (Hz)	TR (s)	TR médio (s)	TR max RRAE (s)	Factor de Incerteza (I)	TR médio com I (s)	Avaliação ^{&} para Recintos de Oratória e Cinema
Sem Cadeiras						
500	3,43					
1000	3,59	3,45	1,46	40%	2,87	Não Cumpre
2000	3,34					
Com Cadeiras						
500	2,57					
1000	2,78	2,77	1,46	40%	2,19	Não Cumpre
2000	2,97					

[&] - todas estas categorizações foram atribuídas sem a utilização de reforço electro-acústico pelo que utilizando o mesmo, estas conclusões poderão ser distintas.

6.4 RÁCIO DE BAIXOS (BR)

Como observado anteriormente, no capítulo 2.4.3, o Rácio de Baixos (BR), para o Tempo de Reverberação (BR_{TR}), é fundamental na análise do equilíbrio tonal de uma sala de espectáculos, permitindo avaliar a sensação de calor acústico através da comparação dos tempos de reverberação das baixas frequências (125 Hz e 250 Hz) com os das frequências médias (500 Hz e 1000 Hz).

No quadro 6.15, encontram-se os valores de Rácio de Baixos obtidos, na sala de espectáculos, sem e com cadeiras. A maioria dos valores encontram-se entre 0,8 e 1, garantindo um bom equilíbrio tonal na sala de espectáculos. No ensaio sem cadeiras, existem apenas dois pontos, P18 e P19, a apresentarem um valor menor de 0,7, mostrando um reforço em sons agudos. No ensaio com cadeiras, apesar de a maioria também apresentar valores entre 0,8 e 1, no ponto P15 o valor é de 1,1, o que indica um reforço em sons graves. Os pontos P9 e P19 apresentam um valor de 0,7. Com valores superiores a 1, a sonoridade sentida pelo público pode ser considerada “abafada”.

Também é possível verificar que os valores de vários ponto se mantêm idênticos em ambos os ensaios, com a variação mais comum de apenas 0,10. Ocorre, no entanto, uma excepção no ponto P15, que aumenta 0,30 com a introdução de cadeiras na plateia.

Nas figuras 6.16 e 6.17 encontra-se a representação gráfica dos valores obtidos para o parâmetro do Rácio de Baixos, nos ensaios sem e com cadeiras na plateia, respectivamente. A figura 6.20 demonstra a comparação entre ambos os ensaios e a respectiva variação entre os valores obtidos nos mesmos. Verifica-se que a introdução das cadeiras na plateia criaram resultados mistos no BR. Em alguns pontos o BR aumentou, como o ponto P15, o que indica que existiu alguma absorção do som nas frequências médias (eq. 2.14). Noutros pontos ocorreu o oposto e o valor de BR diminuiu, o que pode resultar de uma maior absorção de frequências baixas por parte das cadeiras ou de algum tipo de cancelamento devido à geometria do edifício.

As figuras 6.18 e 6.19 representam mapas de isolinhas dos valores obtidos no parâmetro de Rácio de Baixos, na sala em estudo, nos ensaios sem e com cadeiras, respectivamente. Ambos os mapas apresentam um gradiente de cores de valores entre 0,65 e 1,15, onde o verde representa valores próximos ou superiores a 1, indicando o equilíbrio entre graves e agudos. No ensaio sem cadeiras, o mapa apresenta uma distribuição maioritariamente avermelhada, com alguns pontos amarelos, sendo que as zonas laterais, as zonas mais afastadas e perto da fonte

sonora são as mais problemáticas. Com a introdução de cadeiras na plateia, obtêm-se um aumento de BR em várias zonas da sala, sendo que a Galeria e a 2ª Plateia possuem pontos verdes. Zonas na tribuna e no fundo da sala são as que possuem valores mais baixos, nesta situação.

Quadro 6.15 – Valores do parâmetro Rácio de Baixos, para os 20 pontos medidos, e a respectiva média e desvio padrão, sem e com cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto	Rácio de Baixos		$\Delta BR = CC-SC$
	Sem Cadeiras	Com Cadeiras	
P1 (Plateia)	0,80	0,80	0,00
P2 (Plateia)	0,80	0,90	0,10
P3 (1ª Plateia)	0,80	0,80	0,00
P4 (1ª Plateia)	(+) 0,90	1,00	0,10
P5 (1ª Plateia)	(+) 0,90	0,90	0,00
P6 (2ª Plateia)	(+) 0,90	0,90	0,00
P7 (2ª Plateia)	0,80	0,80	0,00
P8 (4ª Tribuna)	(+) 0,90	0,80	(-) -0,10
P9 (3ª Tribuna)	0,80	(-) 0,70	(-) -0,10
P10 (2ª Tribuna)	(+) 0,90	0,80	(-) -0,10
P11 (1ª Tribuna)	0,80	0,90	0,10
P12 (Camarotes)	0,80	0,80	0,00
P13 (Camarotes)	0,80	0,90	0,10
P14 (Camarotes)	0,80	0,90	0,10
P15 (Galeria)	0,80	(+) 1,10	(+) 0,30
P16 (Galeria)	(+) 0,90	0,90	0,00
P17 (Galeria)	0,80	0,80	0,00
P18 (Geral)	(-) 0,70	0,80	0,10
P19 (Geral)	(-) 0,70	(-) 0,70	0,00
P20 (Geral)	0,80	0,80	0,00
Média	0,82	0,85	0,03
Desvio Padrão	0,06	0,09	0,09
$\Delta BR = Máx - Mín$	0,20	0,40	0,40

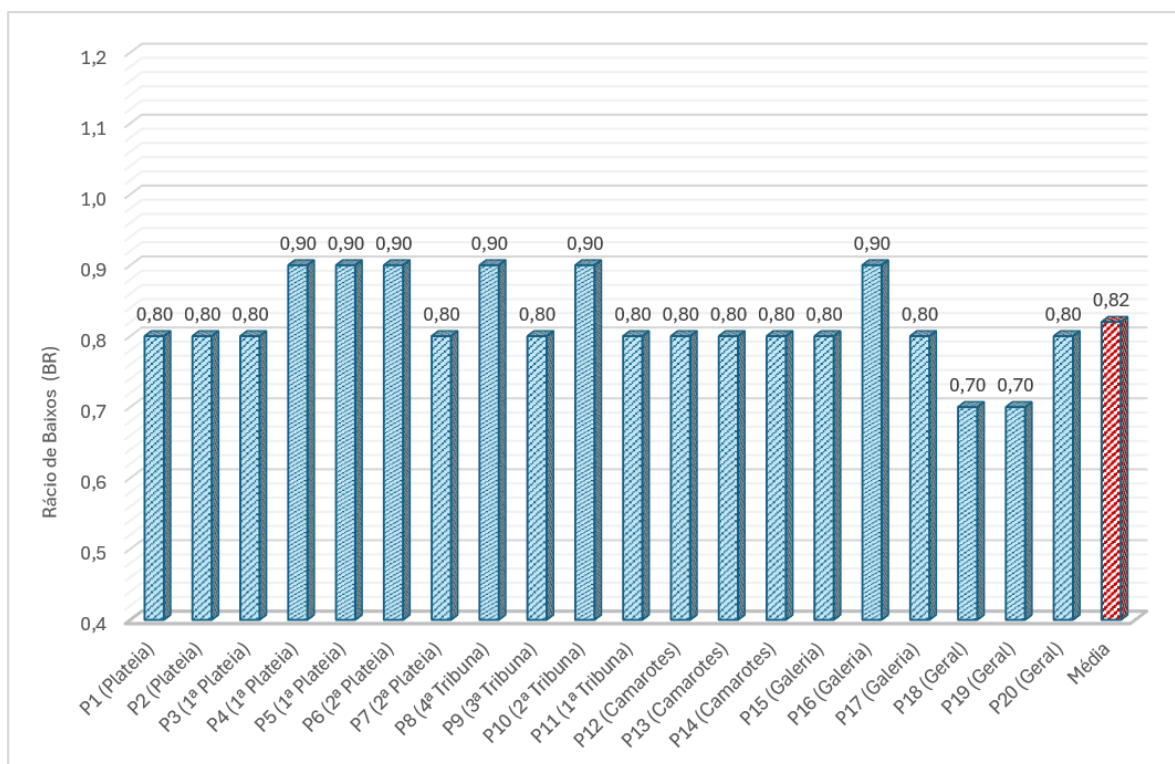


Figura 6.16 - Valores do parâmetro Rácio de Baixos, para os 20 pontos medidos, e da sua média, para o teste sem cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

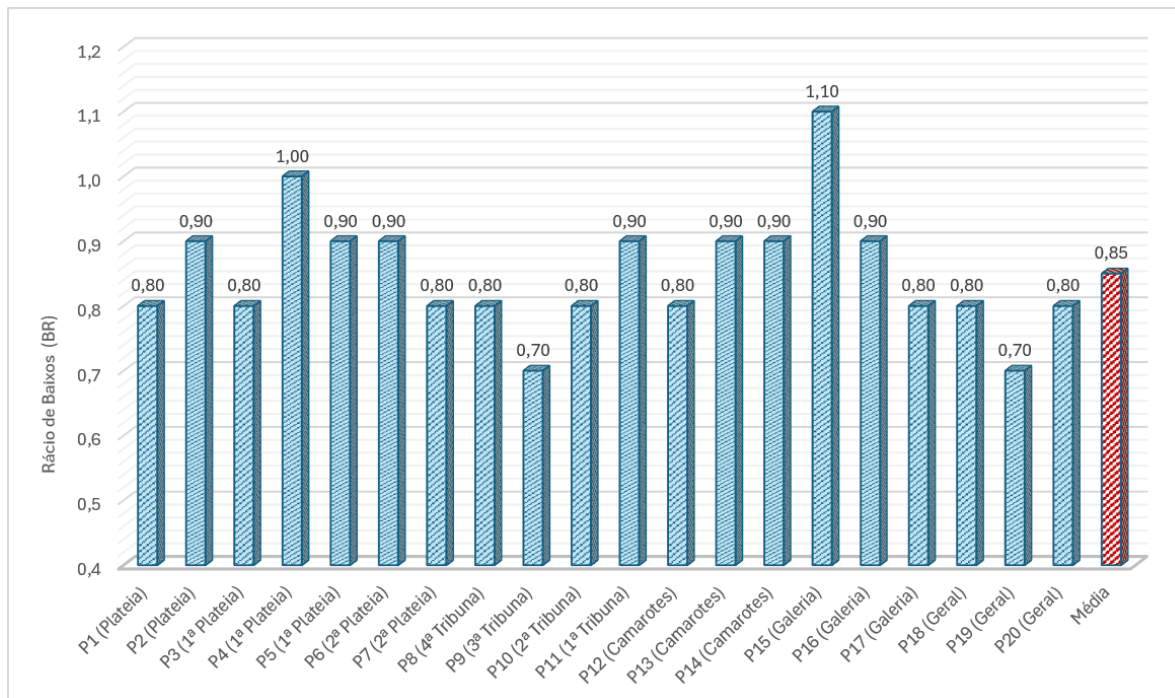


Figura 6.17 – Valores do parâmetro Rácio de Baixos, para os 20 pontos medidos, e da sua média, para o teste com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

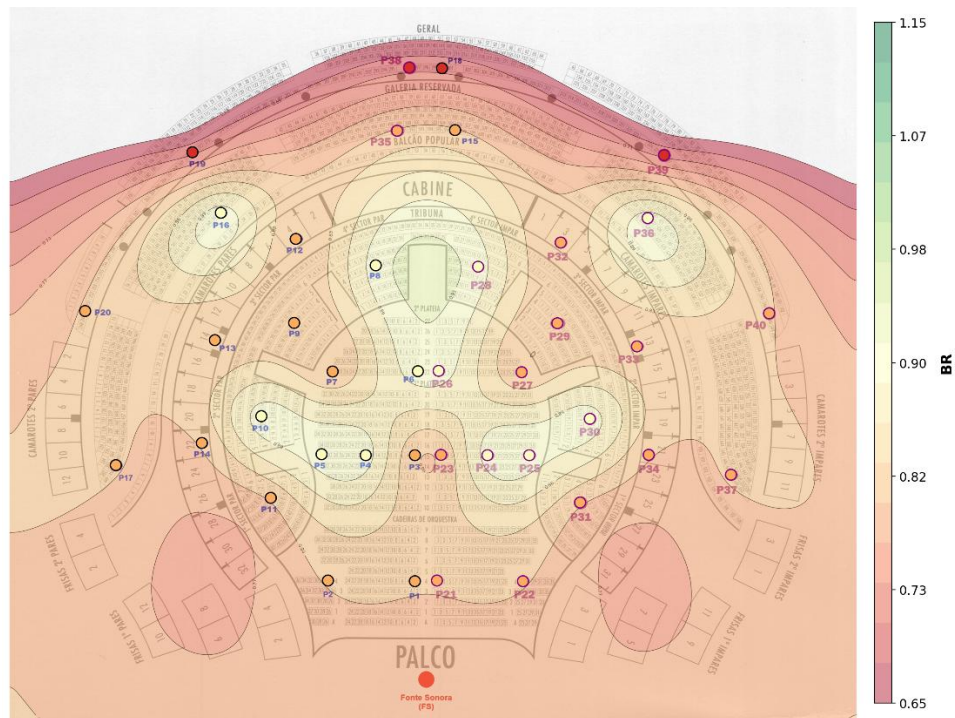


Figura 6.18 – Mapa de Isolinhas do Rácio de Baixos (BR), para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.

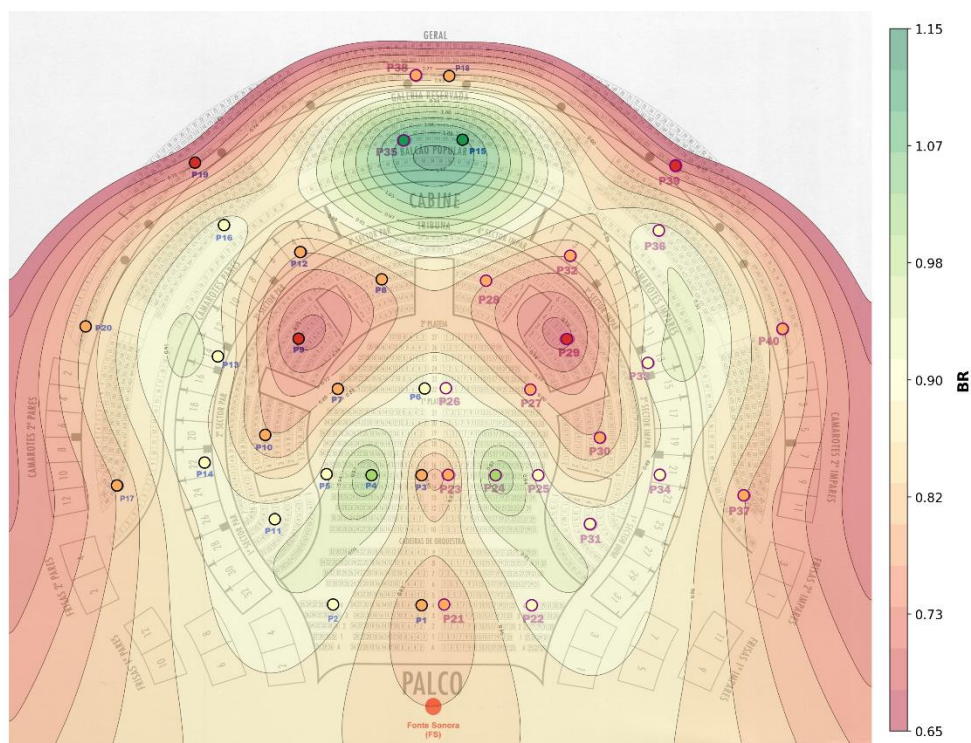


Figura 6.19 – Mapa de Isolinhas do Rácio de Baixos (BR), para os 20 pontos medidos, com cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.

Quadro 6.16 – Valores do parâmetro Rácio de Baixos e do Tempo de Reverberação, para os 20 pontos medidos, e as respectivas médias, sem e com cadeiras na Plateia, e a comparação com os valores ideais, do Coliseu do Porto.

Ponto	Rácio de Baixos (BR)		TR [500, 1k Hz] (s)		1,1 < BR < 1,48 & [16]
	Sem Cadeiras	Com Cadeiras	Sem Cadeiras	Com Cadeiras	
P1 (Plateia)	0,80	0,80	3,30	2,61	
P2 (Plateia)	0,80	0,90	3,56	2,53	
P3 (1ª Plateia)	0,80	0,80	3,73	2,77	
P4 (1ª Plateia)	0,90	1,00	3,51	2,73	
P5 (1ª Plateia)	0,90	0,90	3,50	2,64	
P6 (2ª Plateia)	0,90	0,90	3,49	2,61	
P7 (2ª Plateia)	0,80	0,80	3,49	2,69	
P8 (4ª Tribuna)	0,90	0,80	3,52	2,60	
P9 (3ª Tribuna)	0,80	0,70	3,45	2,55	
P10 (2ª Tribuna)	0,90	0,80	3,47	2,65	Desadequado para música / ópera
P11 (1ª Tribuna)	0,80	0,90	3,58	2,68	
P12 (Camarotes)	0,80	0,80	3,33	2,72	
P13 (Camarotes)	0,80	0,90	3,67	2,68	
P14 (Camarotes)	0,80	0,90	3,46	2,59	
P15 (Galeria)	0,80	1,10	3,33	2,55	
P16 (Galeria)	0,90	0,90	3,48	2,95	
P17 (Galeria)	0,80	0,80	3,70	2,63	
P18 (Geral)	0,70	0,80	3,49	2,86	
P19 (Geral)	0,70	0,70	3,45	2,79	
P20 (Geral)	0,80	0,80	3,69	2,66	
Média	0,82	0,85	3,51	2,67	

& - todas estas categorizações foram atribuídas sem a utilização de reforço electro-acústico pelo que utilizando o mesmo, estas conclusões poderão ser distintas.

No quadro 6.16 são utilizados os valores ideais do Rácio de Baixos para cada ponto, sendo que estes valores estão associados aos respectivos Tempos de Reverberação médios nas frequências de 500 e 1k Hz, em bandas de 1/1 de oitava.

Com este ensaio verifica-se uma escassez de dispositivos ou materiais responsáveis pela absorção do som em médias e altas frequências.

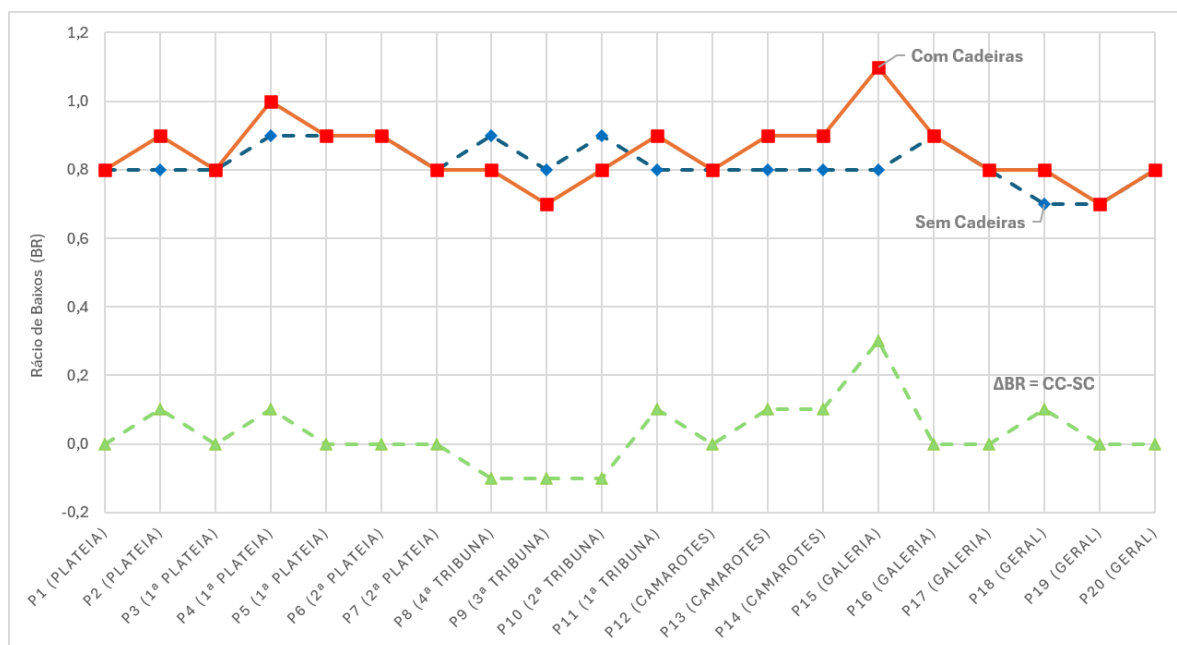


Figura 6.20 – Comparação entre os valores do parâmetro Rácio de Baixos, para os 20 pontos medidos, e a correspondente variação, para os testes sem e com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

6.5 INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

De acordo com o capítulo 2.5, a Inteligibilidade da Palavra define-se como a capacidade de um ouvinte perceber e distinguir claramente as palavras produzidas num certo espaço. Como os resultados dos Tempos de Reverberação, apresentados no capítulo 6.3, são elevados para as principais tipologias do Coliseu do Porto, este torna-se um parâmetro extremamente importante, pois irá indicar se os sons sucessivos são compreendidos correctamente.

Para a avaliação deste parâmetro, utilizou-se o STI (*Speech Transmission Index*), que varia entre 0 e 1, má e excelente inteligibilidade, respectivamente. É espectável que os valores mais próximos da fonte sonora possuam valores de STI mais elevados, pois o som directo é mais predominante. À medida que os pontos se afastam da fonte, em distância e altura, os valores de STI tendem a diminuir devido à influência das reverberações existentes no espaço.

O teste foi realizado em 20 pontos onde se obteve o STI médio global, em ambos os ensaios, sem e com a presença de cadeiras na plateia. No quadro 6.17 encontram-se os valores obtidos para cada ponto de medição, assim como a sua variação. Também foram calculados a média, o desvio padrão e a variação para cada ensaio. Foi realizada uma comparação dos mesmos com os intervalos de valores existentes no capítulo 2.5.3, de modo a conferir uma classificação à

qualidade da inteligibilidade da palavra em cada ponto de medição. A maioria dos valores foram classificados como “Medíocre” ([0,30 -0,45]) com alguns classificados como “Suficiente” ([0,45-0,60]), sendo que o último se encontra mais presente no teste realizado com cadeiras na plateia.

Quadro 6.17 – Valores do parâmetro STI, para os 20 pontos medidos, sem e com cadeiras na Plateia, e as respectivas variações entre ensaios e a comparação com os valores ideais, do Coliseu do Porto.
(+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto de Medição	STI		$\Delta STI^* =$ CC-SC	Limite da perceptibilidade humana*	Inteligibilidade da Palavra &	
	Sem Cadeiras	Com Cadeiras			Sem Cadeiras	Com Cadeiras
P1	(+) 0,53	(+) 0,56	0,03	Não Detectável	Suficiente	Suficiente
P2	0,45	0,49	0,04	Não Detectável	Medíocre	Suficiente
P3	0,40	0,45	(+) 0,06	Detectável	Medíocre	Suficiente
P4	0,39	0,42	0,03	Não Detectável	Medíocre	Medíocre
P5	0,38	0,44	(+) 0,06	Detectável	Medíocre	Medíocre
P6	0,39	0,43	0,04	Não Detectável	Medíocre	Medíocre
P7	0,37	0,41	0,04	Não Detectável	Medíocre	Medíocre
P8	0,41	0,43	0,02	Não Detectável	Medíocre	Medíocre
P9	0,40	0,42	0,02	Não Detectável	Medíocre	Medíocre
P10	0,39	(-) 0,39	(-) 0,01	Não Detectável	Medíocre	Medíocre
P11	(-) 0,37	(-) 0,39	0,02	Não Detectável	Medíocre	Medíocre
P12	0,40	0,42	0,02	Não Detectável	Medíocre	Medíocre
P13	0,43	0,47	0,04	Não Detectável	Medíocre	Suficiente
P14	0,42	0,43	0,02	Não Detectável	Medíocre	Medíocre
P15	0,45	0,49	0,04	Não Detectável	Medíocre	Suficiente
P16	0,41	0,40	0,01	Não Detectável	Medíocre	Medíocre
P17	0,40	0,43	0,03	Não Detectável	Medíocre	Medíocre
P18	0,43	0,45	0,02	Não Detectável	Medíocre	Medíocre
P19	0,43	0,47	0,04	Não Detectável	Medíocre	Suficiente
P20	0,39	0,42	0,03	Não Detectável	Medíocre	Medíocre
Média	0,41	0,44	0,03	-	-	-
Desvio Padrão	0,04	0,04	0,01	-	-	-
$\Delta STI^* = \text{Máx} - \text{Mín}$	0,16	0,17	0,05	-	-	-

* quando $\Delta STI < 0,05$, a diferença não é subjectivamente detectável.

& - todas estas categorizações foram atribuídas sem a utilização de reforço electro-acústico pelo que utilizando o mesmo, estas conclusões poderão ser distintas.

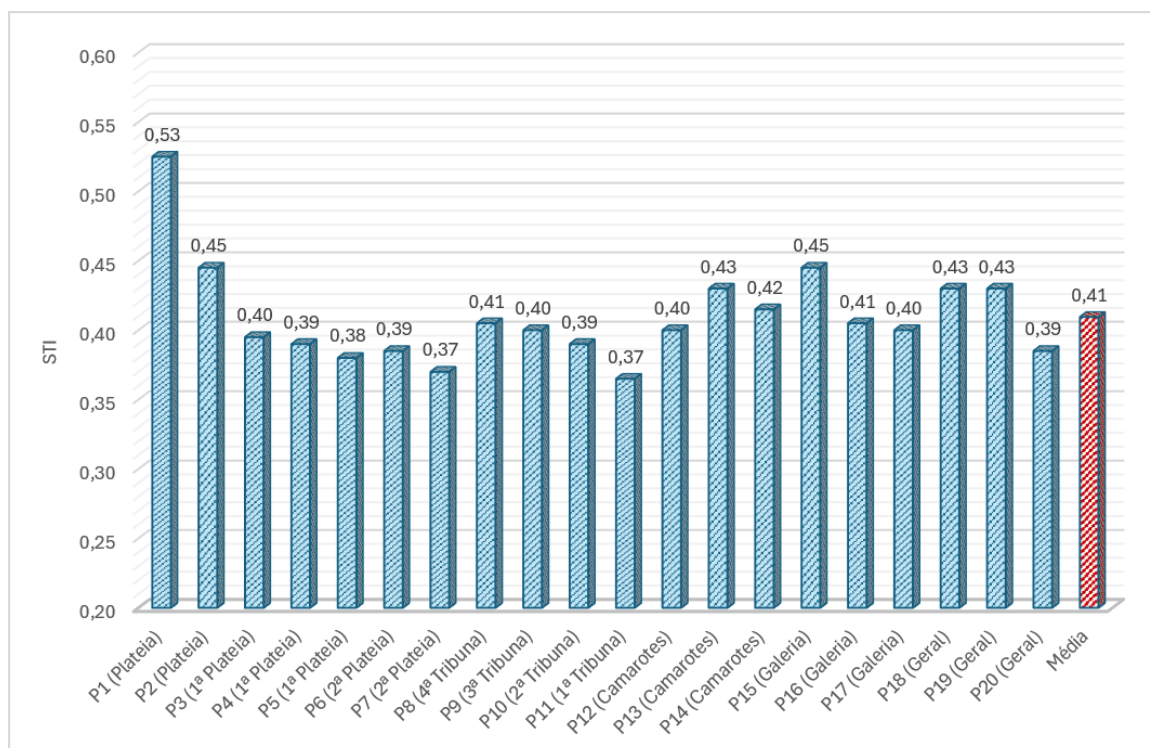


Figura 6.21 – Valores do parâmetro STI, para os 20 pontos medidos, e da sua média, para o teste sem cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

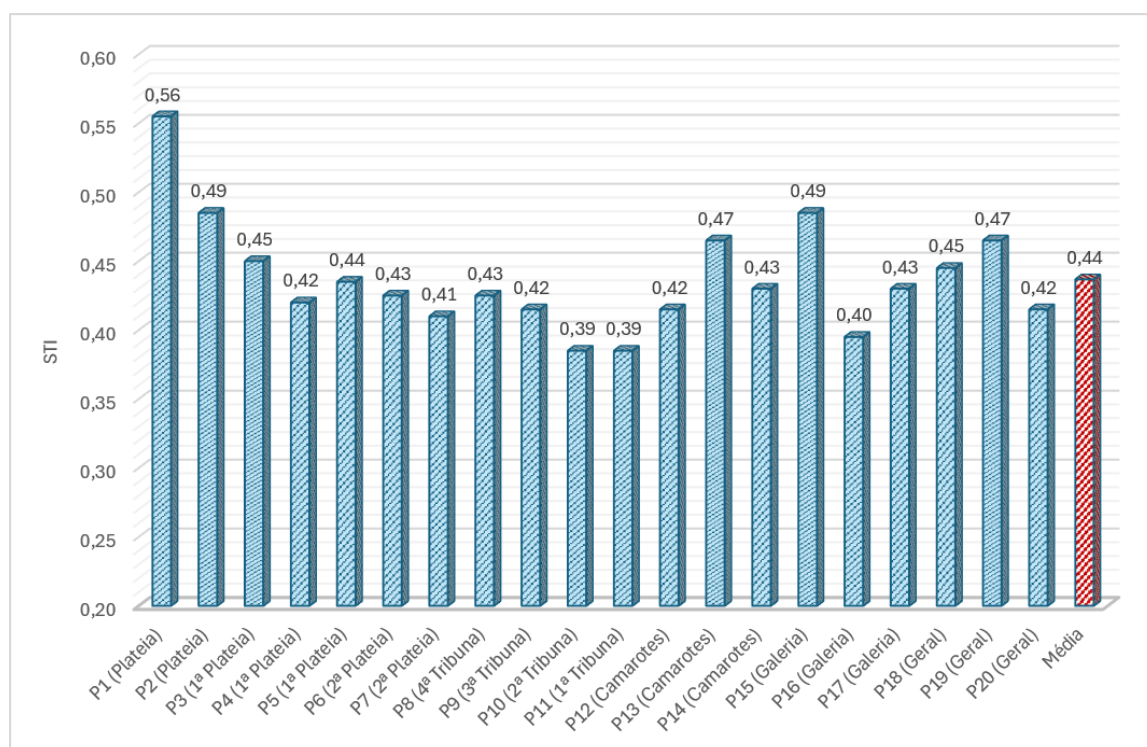


Figura 6.22 – Valores do parâmetro STI, para os 20 pontos medidos, e da sua média, para o teste com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

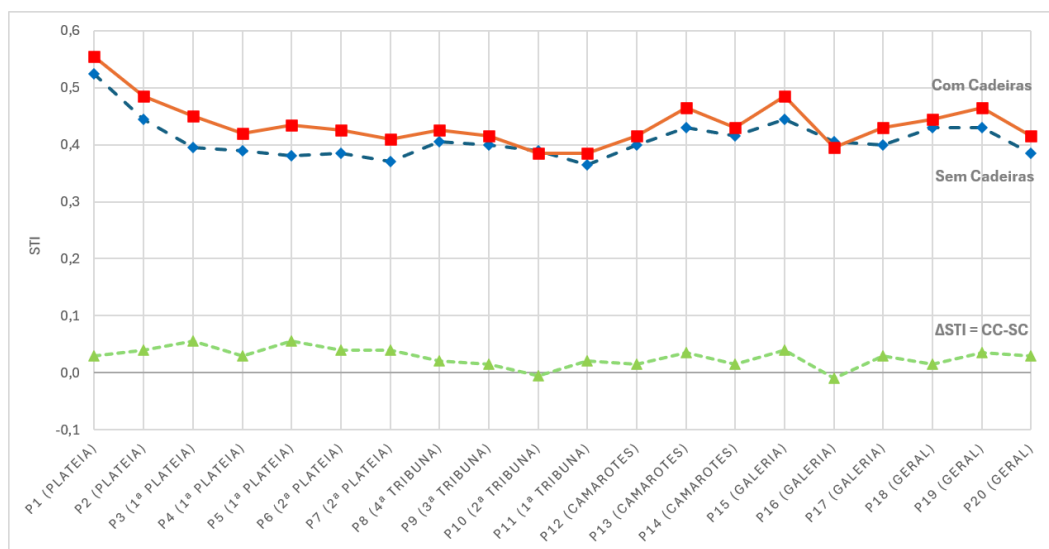


Figura 6.23 – Comparação entre os valores do parâmetro STI, para os 20 pontos medidos, e a correspondente variação, para os testes sem e com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

Os valores mais elevados encontram-se nos pontos P1 e P2, confirmando a ideia de que o STI é mais elevado mais perto da fonte sonora. O desvio padrão em cada ensaio é de 0,04, não existindo uma grande dispersão entre valores. A variação entre ensaios também não é muito elevada, com a exceção nos pontos P3 e P5 que sofreram um aumento de 0,06 com a presença de cadeiras. Os valores mais baixos de STI encontram-se, nos pontos P10 e P11, ambos na Tribuna, que se encontra na lateral e um pouco acima da fonte sonora. As figuras 6.21 e 6.22 demonstram os valores de STI e a sua média, de forma gráfica, em cada ponto de ensaio, para o ensaio sem e com cadeiras, respectivamente. É possível visualizar uma descida do STI, nos primeiros pontos, relativos à plateia, em ambos os ensaios. Nas tribunas, contudo, o oposto ocorre em ambos os ensaios, os pontos mais próximos possuem um STI mais baixo. Isto ocorre um pouco, em ambos os ensaios, mas mais visível no ensaio sem cadeiras, também em todos os pontos mais ou menos central da sala, paralelamente ao palco, nos pontos P7, P11, P14, P17 e P20. Este é provavelmente o fenómeno “*Hole in the middle*” que, em salas de grande volume, ocorre uma redução de energia sonora na zona central da plateia devido à falta de reflexões laterais ou de tecto. As figuras 6.24 e 6.25 representam mapas de isolinhas dos valores obtidos no parâmetro de STI, na sala em estudo, nos ensaios sem e com cadeiras, respectivamente. O gradiente utilizado diz respeito a valores compreendidos entre 0,30 e 0,65. Verifica-se que o STI tende a aumentar, em toda a sala, com a existência de cadeiras na plateia. Em ambos os ensaios, os pontos com os valores menores encontram-se no centro da sala, e os maiores nas Cadeiras de Orquestra, perto da fonte sonora, e na Galeria.

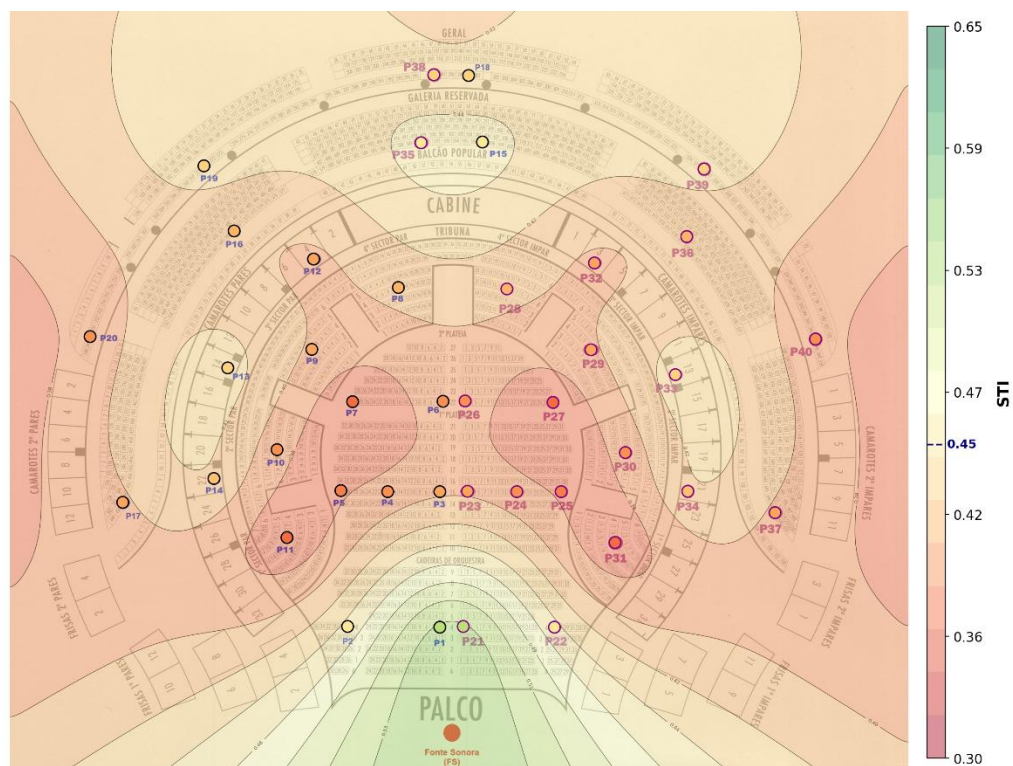


Figura 6.24 – Mapa de Isolinhas do parâmetro STI, para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.

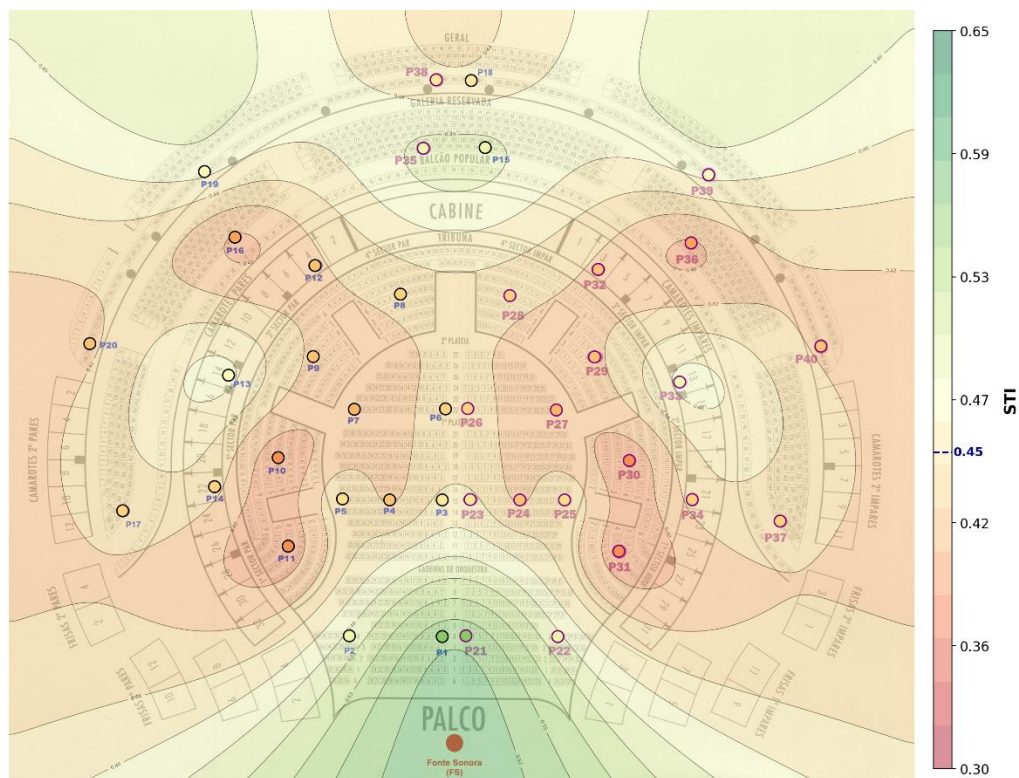


Figura 6.25 – Mapa de Isolinhas do parâmetro STI, para os 20 pontos medidos, com cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.

6.6 CLARIDADE (C_{80})

De acordo com o capítulo 2.7.4.1, a Claridade (C_{80}) é imprescindível na classificação da qualidade musical e na definição de pormenores existentes nos sons presentes num espaço. Este baseia-se no limite de 80 ms, considerado o limiar de percepção musical. Normalmente, os valores elevados são um indicativo de um som mais nítido e definido, onde o som directo da fonte e as primeiras reflexões estão mais presente, em oposição à reverberação. A análise deste parâmetro realizou-se em 20 pontos, na banda de oitava de 1/1 de oitava, como exposto no quadro 6.18, para o ensaio sem cadeiras na plateia e no quadro 6.19, para o ensaio com cadeiras na plateia. São também expostos os valores da média do parâmetro para as frequências de 500 e 1k Hz, assim como a média, desvio padrão e variação, para cada ensaio. Nas figuras 6.26 e 6.27 é demonstrado graficamente os valores obtidos de Claridade para cada ponto de medição, que demonstram a dispersão dos resultados e na figura 6.28, são demonstrados os valores médios deste parâmetro para as frequências de 500 e 1k Hz.

Nas figuras 6.29 e 6.30 é exibida a comparação dos valores médios da Claridade (500, 1k Hz) com a média global obtida, para os testes sem e com cadeiras na plateia, respectivamente. E na figura 6.25 é realizada a comparação entre ambos os ensaios e a sua variação, com os seus valores médios, em cada ponto, com valores obtidos do quadro 6.20. Verifica-se que existem grandes variações entre pontos de medição, com a mais elevada a atingir um valor de 3,89 dB. A existência de cadeiras aproxima a maioria dos valores ao zero, algo extremamente necessário pois no ensaio sem cadeiras os valores predominantes são negativos, com apenas o P1 e P2 acima do zero. Isto é um indicativo de que as reverberações são mais predominantes do que o som directo. Com a existência de cadeiras na plateia, ocorrem absorções sonoras por parte das mesmas, o que diminui a reverberação. Também se verifica uma diminuição dos valores consoante a aproximação dos pontos ao centro da sala. Uma das possibilidades de isto ocorrer é a existência de superfícies curvas e côncavas reflectivas, provenientes das paredes e tecto, que espelham as reverberações para o meio da sala. As figuras 6.32 e 6.33 representam mapas de isolinhas dos valores obtidos no parâmetro de Claridade [500, 1k Hz], nos ensaios sem e com cadeiras, respectivamente. O gradiente de cores utilizado é indicativo de valores entre -5,0 e 3, 0 dB. Verifica-se que a Claridade é mais elevada no ensaio com cadeiras. Em ambos os ensaios, a zona central da sala, na Plateia e Tribuna, assim como o Geral, no último andar, são os que possuem valores mais baixos. As zonas perto da Fonte Sonora, nas Cadeiras de Orquestra, nos Camarotes e na Galeria Reservada, são as que possuem uma Claridade mais elevada.

Quadro 6.18 – Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os 20 pontos medidos, e a respectiva média e desvio padrão, sem cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto de Medição (Posição)	Frequência (Hz)							C_{80} [500, 1k Hz] (dB)
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1 (Plateia)	3,49	-0,17	(+) 2,46	1,13	(+) 0,21	(+) 4,32	9,29	(+) 1,80
P2 (Plateia)	4,23	-0,69	0,52	(+) 1,20	-1,81	-0,40	(+) 9,31	0,86
P3 (1ª Plateia)	-2,76	-1,94	-2,02	-1,97	(-) -5,06	-1,27	3,24	-2,00
P4 (1ª Plateia)	-2,18	-2,41	-2,82	-2,53	-4,24	-1,12	4,16	-2,68
P5 (1ª Plateia)	(-) -6,14	(-) -2,95	-3,81	-4,23	-4,35	-1,76	3,43	-4,02
P6 (2ª Plateia)	1,52	-2,58	-2,55	(-) -5,64	-2,95	-0,03	6,16	-4,09
P7 (2ª Plateia)	-0,05	-2,74	-2,94	-4,76	-4,32	-1,50	(-) 3,01	-3,85
P8 (4ª Tribuna)	2,58	1,26	-4,17	-1,82	-1,52	-0,60	4,37	-2,99
P9 (3ª Tribuna)	0,39	-2,26	-2,54	-2,97	-3,55	-0,40	5,77	-2,76
P10 (2ª Tribuna)	-6,05	-1,94	-0,83	-2,83	-4,23	-0,95	6,27	-1,83
P11 (1ª Tribuna)	1,16	-1,02	-2,44	-5,17	-4,36	(-) -2,62	4,18	-3,80
P12 (Camarotes)	-1,63	1,84	-1,90	-1,69	-3,30	0,06	6,13	-1,79
P13 (Camarotes)	-1,49	-0,33	0,11	-1,10	-2,30	1,87	7,77	-0,50
P14 (Camarotes)	-1,95	-0,92	0,50	-2,58	-4,98	0,30	7,30	-1,04
P15 (Galeria)	-1,12	0,34	-0,76	-0,40	-0,53	0,53	4,24	-0,58
P16 (Galeria)	-4,93	-1,66	-2,92	-1,97	-1,49	-0,17	4,42	-2,45
P17 (Galeria)	1,51	-1,74	-2,38	-2,81	-4,01	-1,42	3,94	-2,60
P18 (Geral)	(+) 5,05	(+) 2,47	-2,94	-2,67	-1,83	-0,01	6,99	-2,81
P19 (Geral)	-0,29	0,29	-1,29	-1,61	-2,10	0,19	5,77	-1,45
P20 (Geral)	0,19	-1,30	(-) -5,11	-3,57	-2,99	-2,21	3,83	(-) -4,34
Média (dB)	-0,42	-0,92	-1,89	-2,40	-2,99	-0,36	5,48	-2,15
Desvio Padrão (dB)	3,13	1,55	1,81	1,81	1,50	1,52	1,91	1,65
ΔC_{80} = Máx - Mín (dB)	11,19	5,42	7,57	6,84	5,27	6,95	6,30	6,13

Quadro 6.19 – Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os 20 pontos medidos, e a respectiva média e desvio padrão, com cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto de Medição (Posição)	Frequência (Hz)							C_{80} [500, 1k Hz] (dB)
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1 (Plateia)	2,17	3,15	(+) 2,83	1,74	(+) 1,47	(+) 4,38	(+) 8,96	(+) 2,29
P2 (Plateia)	1,06	0,35	2,26	(+) 2,20	-0,11	1,11	7,97	2,23
P3 (1ª Plateia)	1,32	-1,56	1,35	-1,26	-2,54	-1,14	3,79	0,05
P4 (1ª Plateia)	1,22	-0,47	1,16	-0,30	(-) -5,04	(-) -2,83	1,39	0,43
P5 (1ª Plateia)	-1,93	(-) -2,55	-0,79	0,52	-1,70	-1,31	1,33	-0,14
P6 (2ª Plateia)	0,72	0,08	(-) -3,38	-2,03	-2,24	-0,43	2,09	(-) -2,71
P7 (2ª Plateia)	0,81	-2,16	-2,79	-2,31	-2,03	-1,69	1,39	-2,55
P8 (4ª Tribuna)	-1,34	0,99	0,02	-1,85	-2,43	-0,87	2,64	-0,92
P9 (3ª Tribuna)	0,88	-0,42	-0,58	-0,87	-3,00	-1,89	2,92	-0,73
P10 (2ª Tribuna)	-3,52	-1,39	-1,89	-1,55	-2,83	-1,97	3,69	-1,72
P11 (1ª Tribuna)	-2,92	-1,79	1,01	(-) -3,10	-4,37	-2,40	4,68	-1,04
P12 (Camarotes)	-2,15	2,95	-1,48	-0,85	-3,18	-0,46	3,55	-1,17
P13 (Camarotes)	-4,04	3,01	1,09	1,49	-2,38	0,99	5,89	1,29
P14 (Camarotes)	(-) -4,22	1,27	0,13	-1,41	-2,96	-1,53	4,67	-0,64
P15 (Galeria)	(+) 3,12	(+) 6,00	0,26	1,32	1,15	0,78	3,22	0,79
P16 (Galeria)	-0,28	-0,69	-0,47	-0,66	-2,75	-1,60	(-) 0,72	-0,57
P17 (Galeria)	2,74	2,62	-0,69	-1,41	-1,87	-0,77	2,85	-1,05
P18 (Geral)	0,76	1,77	-0,01	-1,70	-1,56	-0,61	3,88	-0,86
P19 (Geral)	2,69	2,16	0,88	-0,28	-1,23	0,35	4,91	0,30
P20 (Geral)	-1,90	-0,38	-1,72	-2,90	-2,56	-2,78	2,78	-2,31
Média (dB)	-0,24	0,65	-0,14	-0,76	-2,11	-0,73	3,67	-0,45
Desvio Padrão (dB)	2,34	2,20	1,60	1,53	1,57	1,67	2,12	1,40
ΔC_{80} = Máx - Mín (dB)	7,34	8,55	6,21	5,30	6,51	7,22	8,24	4,99

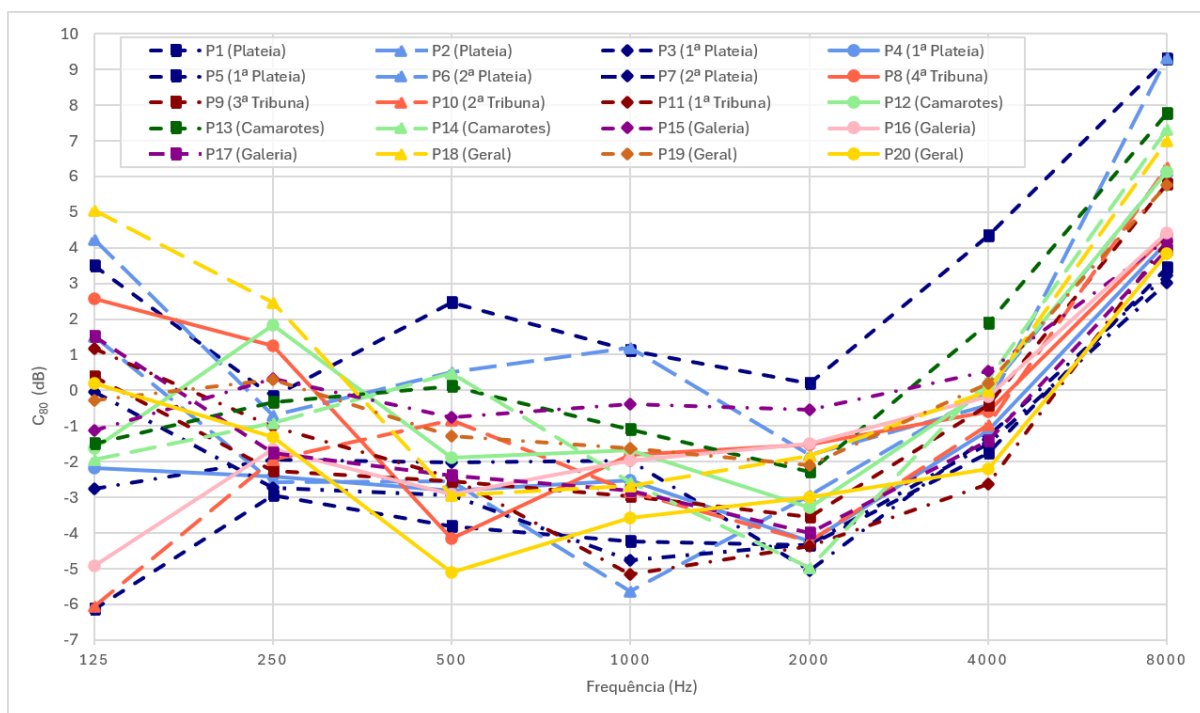


Figura 6.26 – Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, sem cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto.

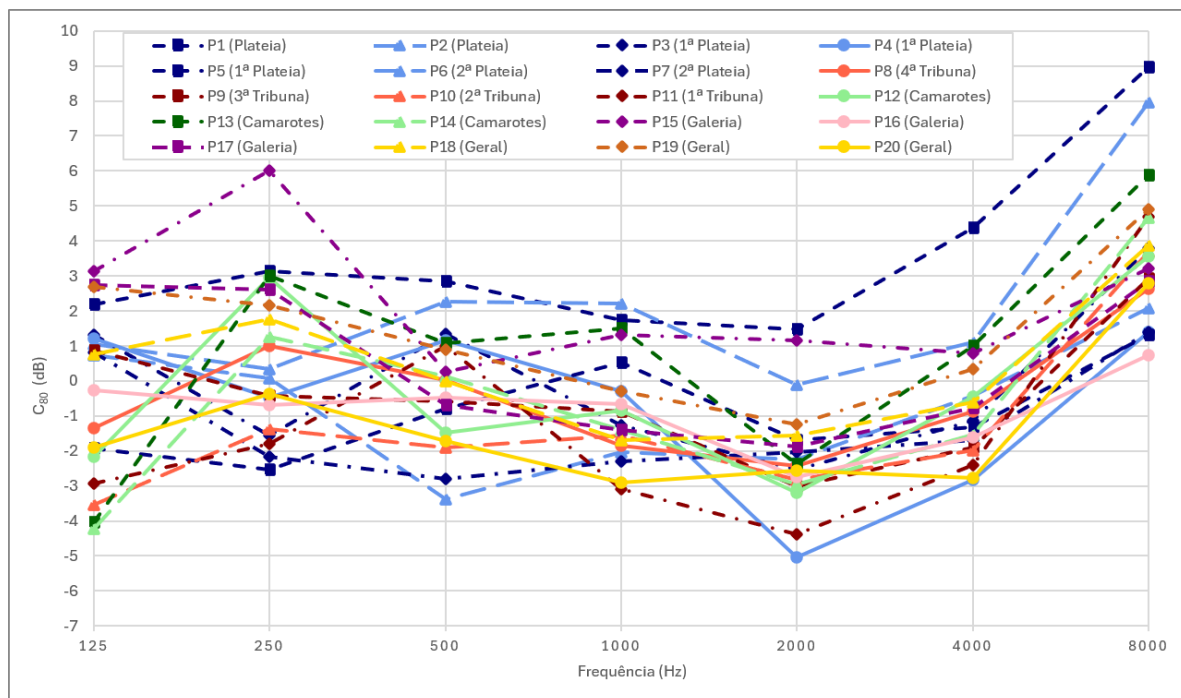


Figura 6.27 – Valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, com cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto.

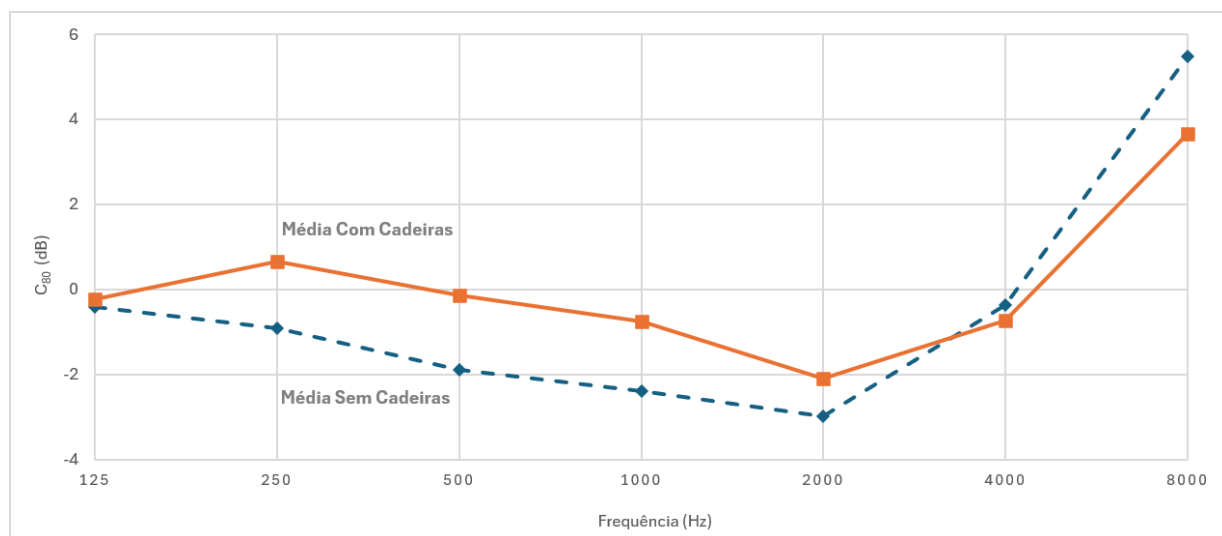


Figura 6.28 – Média dos valores do parâmetro Claridade (C_{80}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, sem e com cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto.

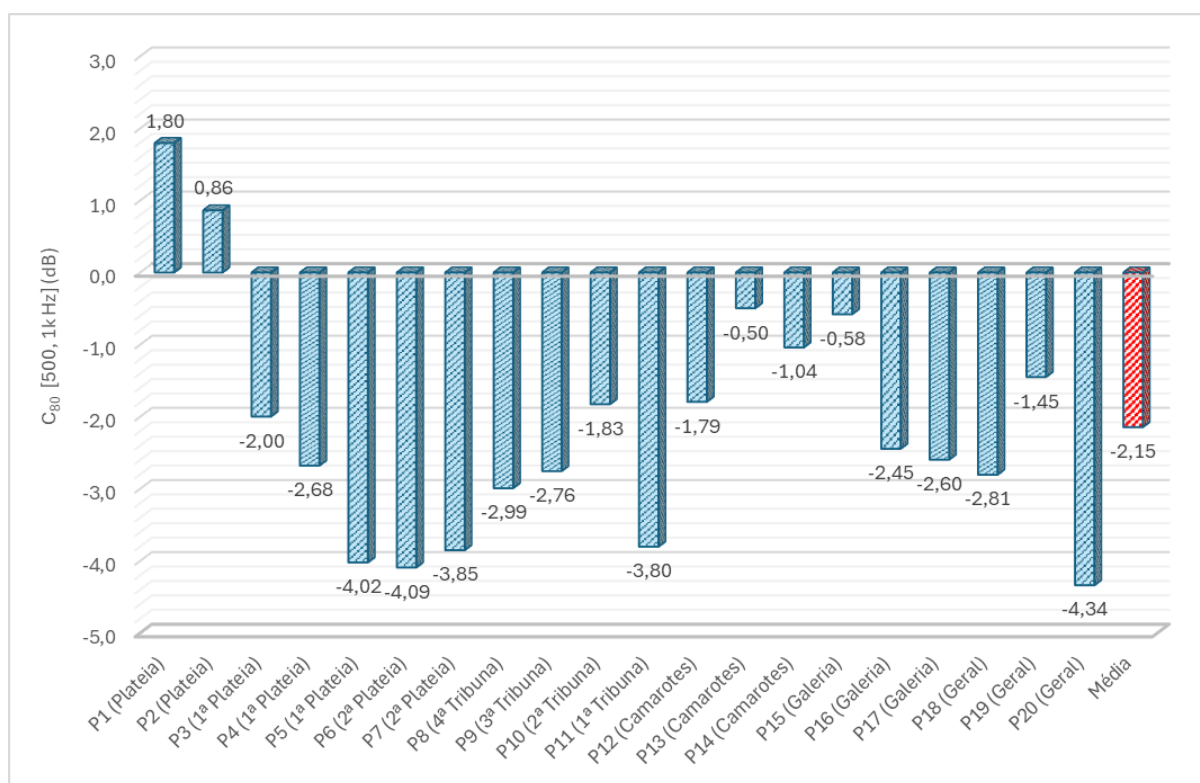


Figura 6.29 – Comparação dos valores médios (500, 1kHz) do parâmetro Claridade (C_{80}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, e a média global, sem cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.

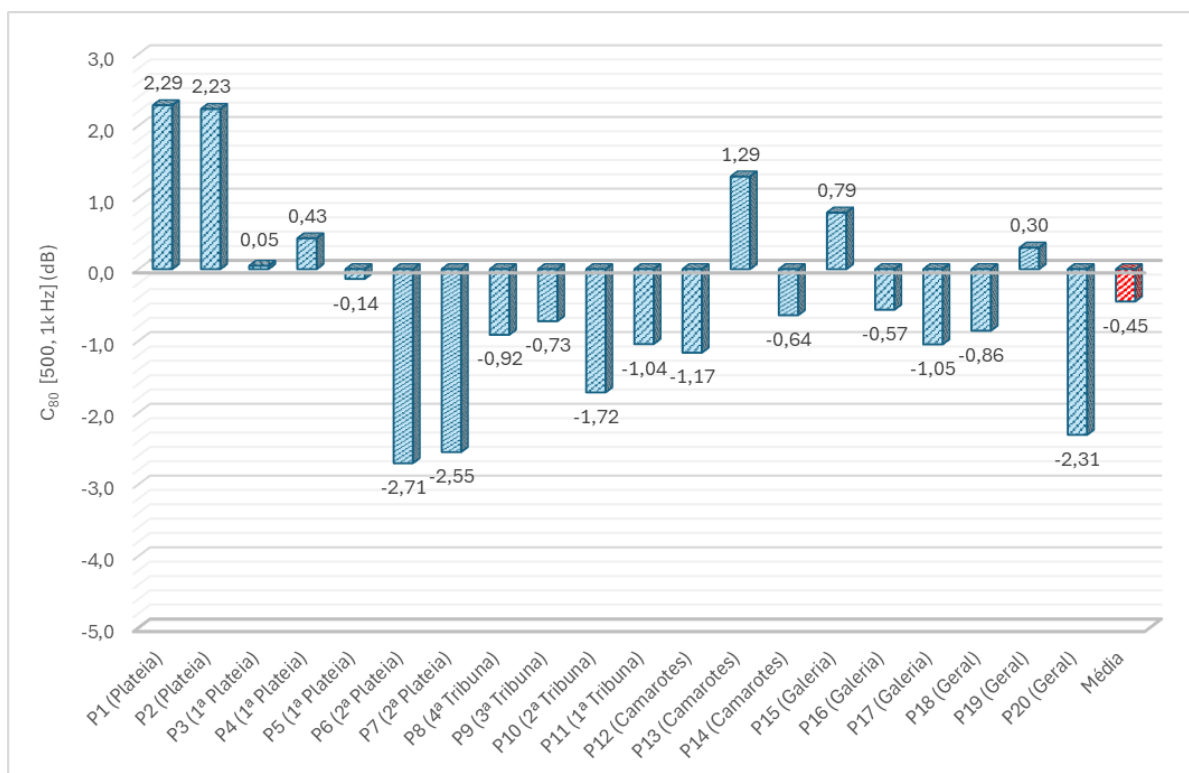


Figura 6.30 – Comparação dos valores médios (500, 1kHz) do parâmetro Claridade (C_{80}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, e a média global, com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.

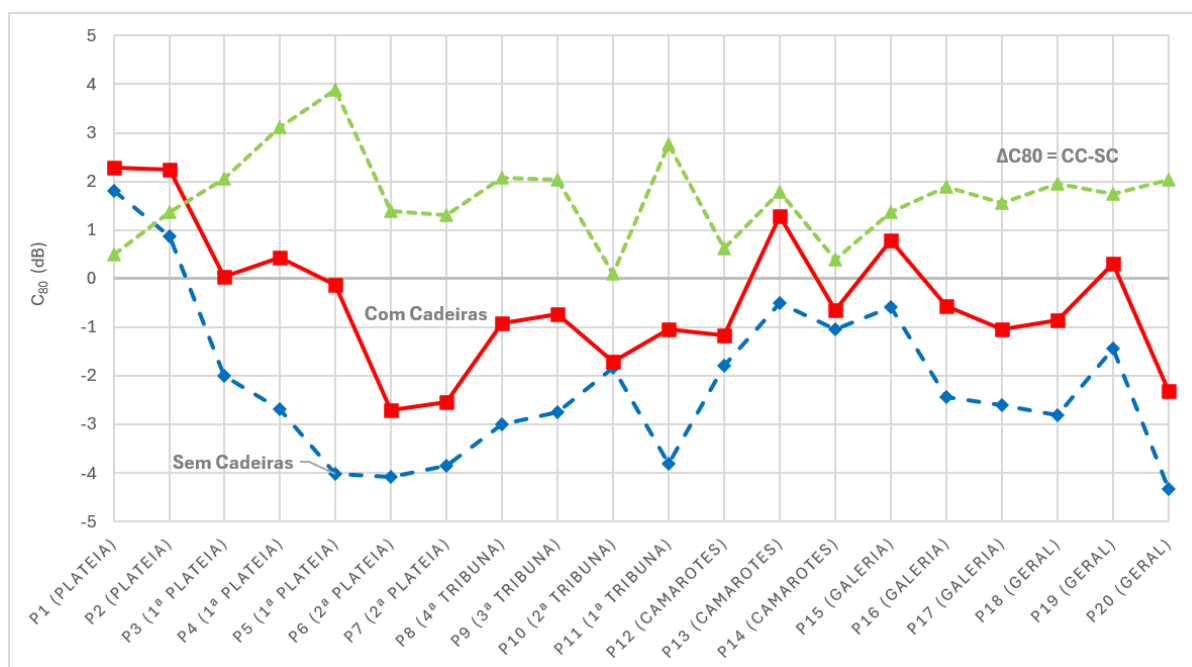


Figura 6.31 – Comparação dos valores médios do parâmetro Claridade (C_{80}) para os 20 pontos medidos, a respectiva variação, sem e com cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto.

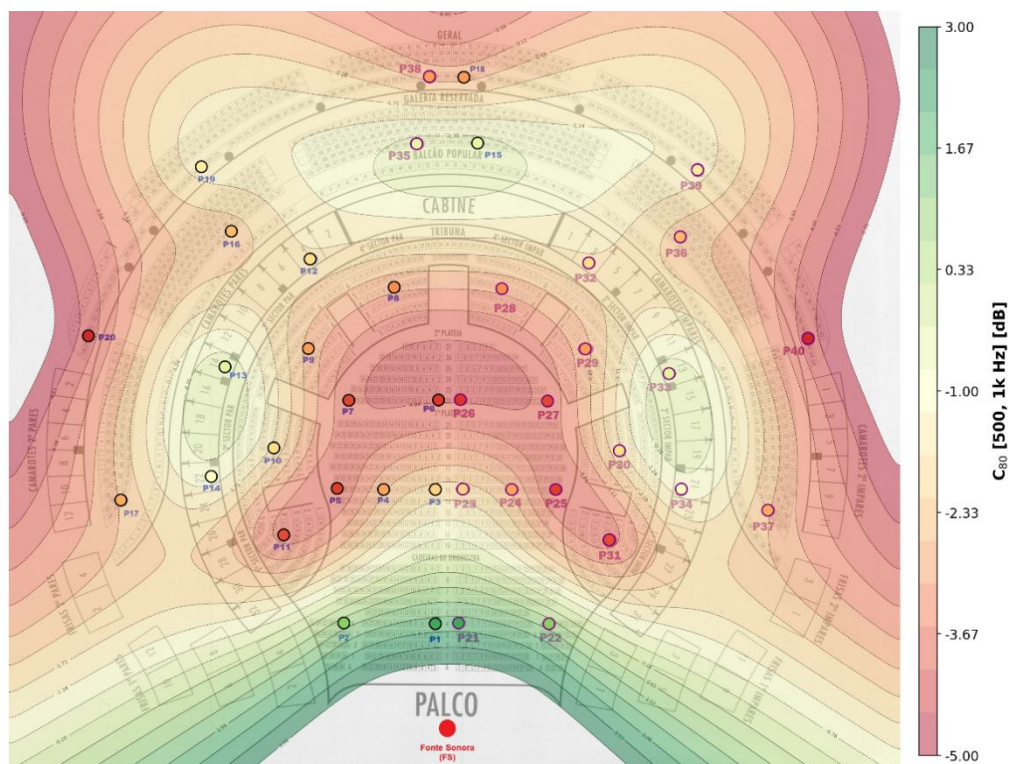


Figura 6.32 – Mapa de Isolinhas do parâmetro Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz], para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.

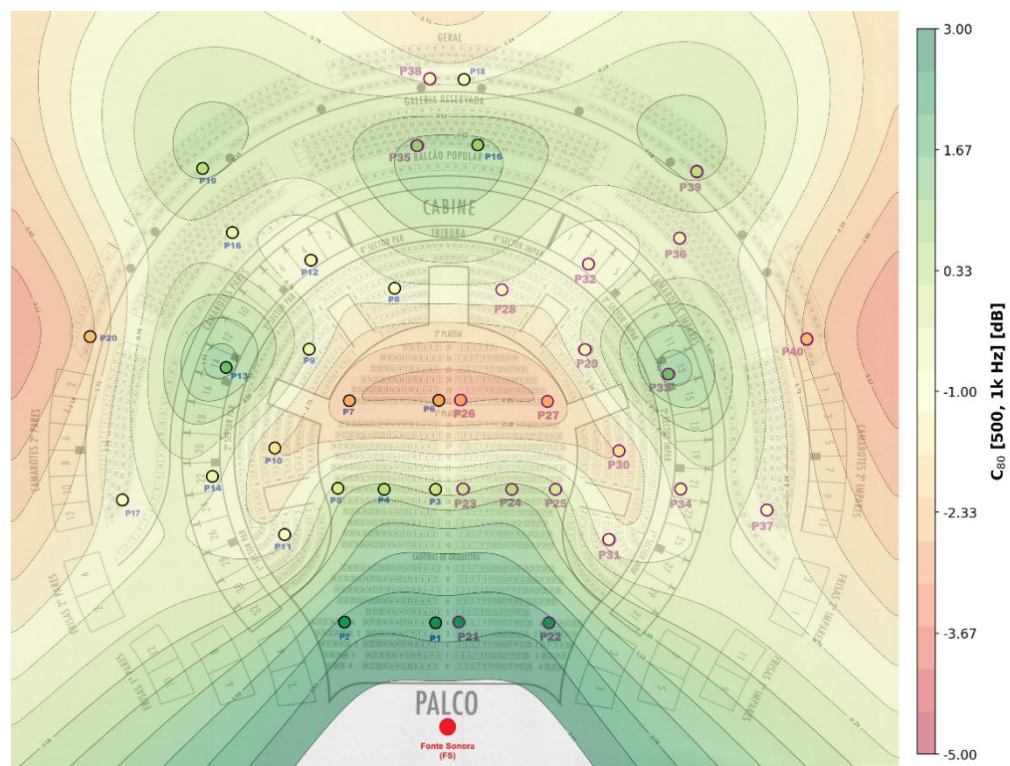


Figura 6.33 – Mapa de Isolinhas do parâmetro Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz], para os 20 pontos medidos, com cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.

Quadro 6.20 – Valores médios do parâmetro Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz], para os 20 pontos medidos, e a respectiva média e variação, sem e com cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto de Medição (Posição)	C_{80} [500, 1k Hz]		$\Delta C_{80}^* = CC-SC$	Limite da perceptibilidade humana*
	Sem Cadeiras	Com Cadeiras		
P1 (Plateia)	(+) 1,80	(+) 2,29	0,49	Não Detectável
P2 (Plateia)	0,86	2,23	1,37	Detectável
P3 (1ª Plateia)	-2,00	0,05	2,05	Detectável
P4 (1ª Plateia)	-2,68	0,43	3,11	Detectável
P5 (1ª Plateia)	-4,02	-0,14	(+) 3,89	Detectável
P6 (2ª Plateia)	-4,09	(-) -2,71	1,39	Detectável
P7 (2ª Plateia)	-3,85	-2,55	1,30	Detectável
P8 (4ª Tribuna)	-2,99	-0,92	2,08	Detectável
P9 (3ª Tribuna)	-2,76	-0,73	2,03	Detectável
P10 (2ª Tribuna)	-1,83	-1,72	(-) 0,11	Não Detectável
P11 (1ª Tribuna)	-3,80	-1,04	2,76	Detectável
P12 (Camarotes)	-1,79	-1,17	0,63	Não Detectável
P13 (Camarotes)	-0,50	1,29	1,79	Detectável
P14 (Camarotes)	-1,04	-0,64	0,40	Não Detectável
P15 (Galeria)	-0,58	0,79	1,37	Detectável
P16 (Galeria)	-2,45	-0,57	1,88	Detectável
P17 (Galeria)	-2,60	-1,05	1,55	Detectável
P18 (Geral)	-2,81	-0,86	1,95	Detectável
P19 (Geral)	-1,45	0,30	1,75	Detectável
P20 (Geral)	(-) -4,34	-2,31	2,03	Detectável
Média	-2,15	-0,45	1,69	-
$\Delta C_{80}^* = \text{Máx} - \text{Mín}$ (dB)	6,13	4,99	3,78	-
Limite da perceptibilidade humana*	Detectável	Detectável	Detectável	-

* quando $\Delta C_{80} < 1$ dB, a diferença não é subjectivamente detectável

Através do quadro 6.20, verifica-se que é detectável uma diferença na claridade, por parte dos ouvintes, entre a presença ou a ausência de cadeiras na plateia na maior parte dos pontos de medição dos testes realizados. Também entre lugares, na mesma configuração da sala, verifica-se que é perceptível a variação da Claridade, mesmo entre lugares que se encontram na mesma zona da sala.

Quadro 6.21 – Comparação dos valores obtidos para a Claridade (C_{80}) média com os valores recomendados [1], na média das bandas de frequências de 500 e 1k Hz, sem e com cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto.

Função	C_{80} [500, 1k Hz] ideal (dB) [1]	C_{80} [500, 1k Hz] (dB)			
		Sem Cadeiras	Avaliação &	Com Cadeiras	Avaliação &
Auditório (palavra)	> 6		Desadequado		Desadequado
Teatro	> 6		Desadequado		Desadequado
Cinema	> 5		Desadequado		Desadequado
Ópera (não wagneriana)	3 a 4		Desadequado		Desadequado
Ópera (wagneriana)	1 a 2		Desadequado		Desadequado
Música sinfónica Barroca	0 a 2		Desadequado		Tolerável
Clássica	-1 a 0	-2,1	Desadequado	-0,5	Adequado
Romântica	-2 a -1		Tolerável		Tolerável
Moderna	-1 a 0		Desadequado		Adequado
Música popular	> 6		Desadequado		Desadequado
Música de órgão	< -2		Adequado		Desadequado
Coros gregorianos	-3 a -1		Adequado		Tolerável

& - todas estas categorizações foram atribuídas sem a utilização de reforço electro-acústico pelo que utilizando o mesmo, estas conclusões poderão ser distintas.

Com o quadro 6.21, realiza-se a comparação entre os valores médios obtidos, em cada ensaio, em 500 e 1k Hz, e os valores ideais para cada tipo de utilização numa sala de espectáculos. Concluiu-se que, para o parâmetro da Claridade, a existência de cadeiras na plateia exerce uma influência considerável nos resultados. Os coros gregorianos, a música de órgão e a música sinfónica romântica são considerados adequados ou toleráveis, para os testes sem cadeira na plateia. No teste realizado com a presença de cadeiras na plateia, o número de funções mais adequadas ou toleráveis aumenta para todos os tipos de música sinfónica e coros gregorianos.

6.7 DEFINIÇÃO (D_{50})

Como já abordado no capítulo 2.7.4.2, a Definição é a razão entre a energia sonora recebida no primeiros 50 ms e a energia total recebida, sendo que 50 ms é considerado o limiar de perceptibilidade das palavras. Os valores variam entre 0 e 1, sendo que a Definição das palavras aumenta com a aproximação à unidade.

No quadro 6.22 e 6.23 encontram-se os dados do parâmetro de Definição para todos os pontos medidos, em ambos os ensaios, na banda de 1/1 de oitava, os valores médios para cada ponto, nas frequências de 500 e 1k Hz e a classificação subjectiva no ponto. Também se calcularam a média, desvio padrão e variação, para cada frequência. Verificou-se um aumento na classificação de pontos como “Suficiente” com a presença de cadeiras na plateia.

Ambos os ensaios possuem desvios de padrão de cerca de 0,10 e variações entre 0,20 e 0,50. Ambos são indicativos de uma grande dispersão nos valores da Definição, que é mais claramente evidenciado com os gráficos existentes nas figuras 6.34 e 6.35, que mostram todos os dados por ponto de medição, em 1/1 de banda de oitava, para sem e com cadeiras na plateia, respectivamente.

As médias dos valores da Definição apresentam uma variação entre cada ensaio, especialmente nas baixas e médias frequências, como se verifica na figura 6.36. Nas figuras 6.37 e 6.38, são apresentadas as comparações entre os valores médios de cada ponto e a média desses valores, para os ensaios sem e com cadeiras, respectivamente. Os valores da Definição tendem a diminuir com a distância à fonte, na plateia e camarotes, contudo, a tribuna mostra valores particularmente baixos no geral. A Galeria e a Geral mostram valores mais baixos tanto no ponto mais afastado da fonte sonora como no mais próximo do centro da sala. Na Plateia, o P2 também sofre algum tipo de acção pelo campo reverberante, possivelmente por se encontrar mais próximo das paredes laterais da sala.

O quadro 6.24 apresenta os valores da média do parâmetro Definição, em 500 e 1k Hz, e as suas variações, tanto por ensaio, como por ponto. A figura 6.39 mostra graficamente estas relações, sendo que é visível uma maior discrepância entre ensaios nos pontos localizados na Plateia e na Galeria. O primeiro pode ser explicado pela absorção de ondas reverberantes, por parte das cadeiras na Plateia, que aumenta a Definição. Nos pisos altos, provavelmente dá-se um aumento na Definição devido a reflexões (*early reflections*) provenientes do tecto e paredes de fundo.

No centro da sala ocorre o que se tem visto em outros parâmetros, onde existe um grande conjunto de reflexões tardias, aumentando a ondas reverberantes.

Quadro 6.22 – Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os 20 pontos medidos, e as respectivas médias, desvios padrão e classificação subjectiva (para a palavra), sem cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto de Medição (Posição)	Frequência (Hz)							D_{50} [500, 1k Hz]	Classificação ^{&}
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
P1 (Plateia)	(+) 0,65	0,41	0,41	0,38	(+) 0,41	(+) 0,63	(+) 0,78	0,40	Suficiente
P2 (Plateia)	0,62	0,34	0,19	0,27	0,28	0,25	0,68	0,23	Insuficiente
P3 (1ª Plateia)	0,24	0,32	0,42	0,38	(-) 0,20	0,34	0,45	0,40	Suficiente
P4 (1ª Plateia)	0,22	0,31	0,33	0,35	0,21	0,30	0,48	0,34	Insuficiente
P5 (1ª Plateia)	0,22	0,30	0,24	0,25	0,21	0,27	0,45	0,25	Insuficiente
P6 (2ª Plateia)	0,36	0,31	0,28	(-) 0,13	0,21	0,36	0,58	(-) 0,21	Insuficiente
P7 (2ª Plateia)	0,41	(-) 0,21	0,27	0,20	0,21	0,28	0,41	0,24	Insuficiente
P8 (4ª Tribuna)	0,46	0,41	(-) 0,16	0,26	0,24	0,23	(-) 0,40	0,21	Insuficiente
P9 (3ª Tribuna)	0,40	0,29	0,25	0,24	0,23	0,32	0,58	0,25	Insuficiente
P10 (2ª Tribuna)	(-) 0,16	0,30	0,20	0,24	(-) 0,20	0,28	0,55	0,22	Insuficiente
P11 (1ª Tribuna)	0,23	0,36	0,29	0,19	0,21	(-) 0,20	0,51	0,24	Insuficiente
P12 (Camarotes)	0,38	(+) 0,52	0,31	0,29	(-) 0,20	0,25	0,46	0,30	Insuficiente
P13 (Camarotes)	0,20	0,37	0,42	0,29	0,28	0,43	0,69	0,36	Insuficiente
P14 (Camarotes)	0,30	0,50	(+) 0,46	0,30	(-) 0,20	0,38	0,65	0,38	Insuficiente
P15 (Galeria)	0,44	0,41	0,41	(+) 0,43	0,35	0,38	0,48	(+) 0,42	Suficiente
P16 (Galeria)	0,20	0,22	0,18	0,28	0,30	0,38	0,47	0,23	Insuficiente
P17 (Galeria)	0,43	0,32	0,37	0,30	0,25	0,31	0,52	0,34	Insuficiente
P18 (Geral)	0,51	0,39	0,20	0,21	0,28	0,32	0,48	(-) 0,21	Insuficiente
P19 (Geral)	0,33	0,41	0,35	0,36	0,28	0,35	0,50	0,36	Insuficiente
P20 (Geral)	0,37	0,36	0,17	0,25	0,29	0,26	0,48	0,21	Insuficiente
Média	0,36	0,35	0,30	0,28	0,25	0,33	0,53	0,29	-
Desvio Padrão	0,14	0,08	0,10	0,07	0,06	0,09	0,10	0,08	-
$\Delta D_{50} = \text{Máx} - \text{Mín}$	0,49	0,31	0,30	0,30	0,21	0,43	0,38	0,22	-

[&] - todas estas categorizações foram atribuídas sem a utilização de reforço electro-acústico pelo que existindo estas conclusões poderão ser distintas.

Quadro 6.23 – Valores do parâmetro Definição (D50) para os 20 pontos medidos, e as respectivas médias, desvios padrão e classificação subjectiva (para a palavra), com cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto de Medição (Posição)	Frequência (Hz)							D ₅₀ [500, 1k Hz]	Classificação ^{&}
	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
P1 (Plateia)	0,53	0,64	0,56	0,46	(+) 0,50	(+) 0,64	(+) 0,75	0,51	Suficiente
P2 (Plateia)	0,46	0,41	0,31	0,40	0,40	0,38	0,69	0,36	Insuficiente
P3 (1ª Plateia)	0,47	0,37	(+) 0,57	0,46	0,30	0,38	0,51	0,52	Suficiente
P4 (1ª Plateia)	0,51	0,45	0,56	(+) 0,49	0,20	0,24	0,42	(+) 0,53	Suficiente
P5 (1ª Plateia)	0,23	0,30	0,43	0,46	0,35	0,30	0,43	0,45	Suficiente
P6 (2ª Plateia)	0,42	0,26	0,28	0,32	0,31	0,37	0,42	0,30	Insuficiente
P7 (2ª Plateia)	0,52	0,28	0,30	0,29	0,30	0,30	0,35	0,30	Insuficiente
P8 (4ª Tribuna)	0,35	0,41	0,27	0,27	0,20	0,28	(-) 0,33	0,27	Insuficiente
P9 (3ª Tribuna)	0,43	0,41	0,34	0,26	0,24	0,25	0,43	0,30	Insuficiente
P10 (2ª Tribuna)	(-) 0,11	(-) 0,24	(-) 0,21	0,23	0,19	(-) 0,20	0,46	(-) 0,22	Insuficiente
P11 (1ª Tribuna)	0,12	0,46	0,38	(-) 0,21	(-) 0,18	(-) 0,20	0,52	0,30	Insuficiente
P12 (Camarotes)	0,28	0,52	0,35	0,31	0,21	0,28	0,43	0,33	Insuficiente
P13 (Camarotes)	0,13	0,68	0,42	0,36	0,27	0,39	0,64	0,39	Suficiente
P14 (Camarotes)	0,12	0,62	0,49	0,38	0,26	0,26	0,55	0,44	Suficiente
P15 (Galeria)	0,52	(+) 0,71	0,41	0,44	0,41	0,44	0,50	0,43	Suficiente
P16 (Galeria)	0,44	0,39	0,37	0,37	0,26	0,27	0,34	0,37	Insuficiente
P17 (Galeria)	(+) 0,56	0,60	0,47	0,39	0,29	0,36	0,50	0,43	Suficiente
P18 (Geral)	0,36	0,46	0,30	0,23	0,30	0,32	0,42	0,27	Insuficiente
P19 (Geral)	0,52	0,56	0,43	0,43	0,30	0,37	0,53	0,43	Suficiente
P20 (Geral)	0,35	0,42	0,33	0,26	0,31	0,31	0,45	0,30	Insuficiente
Média	0,37	0,46	0,39	0,35	0,29	0,33	0,48	0,37	-
Desvio Padrão	0,16	0,14	0,10	0,09	0,08	0,10	0,11	0,09	-
$\Delta D_{50} = \text{Máx} - \text{Mín}$	0,45	0,47	0,36	0,28	0,32	0,44	0,42	0,31	-

[&] - todas estas categorizações foram atribuídas sem a utilização de reforço electro-acústico pelo que utilizando o mesmo, estas conclusões poderão ser distintas.

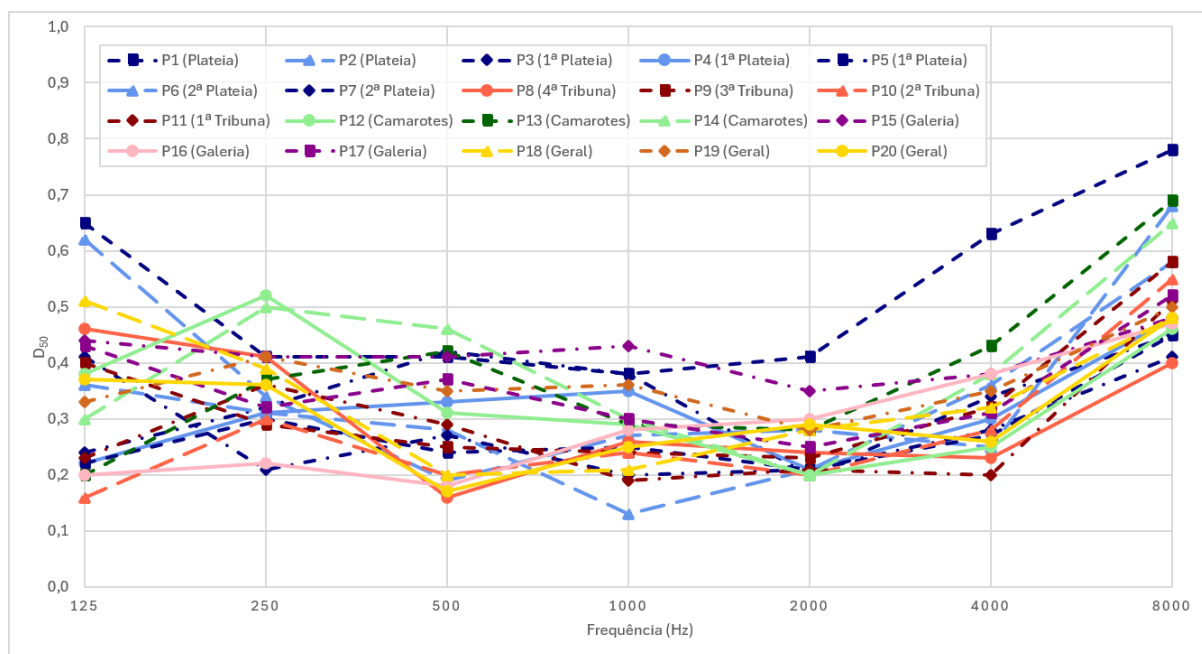


Figura 6.34 – Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, sem cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.

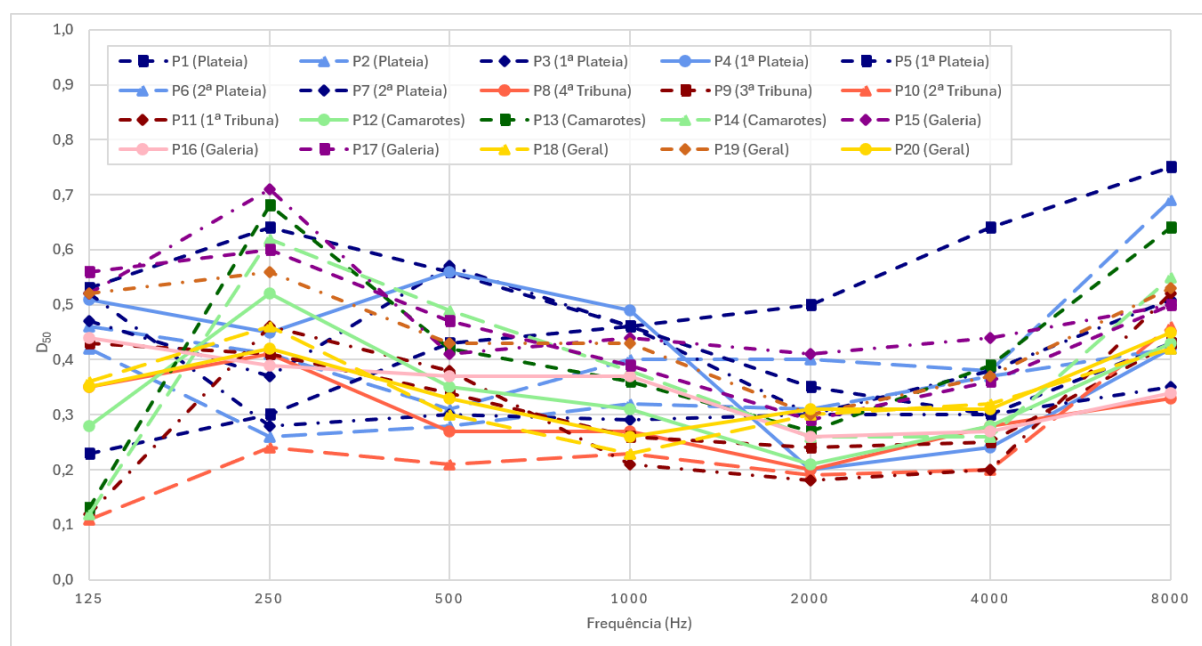


Figura 6.35 – Valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.

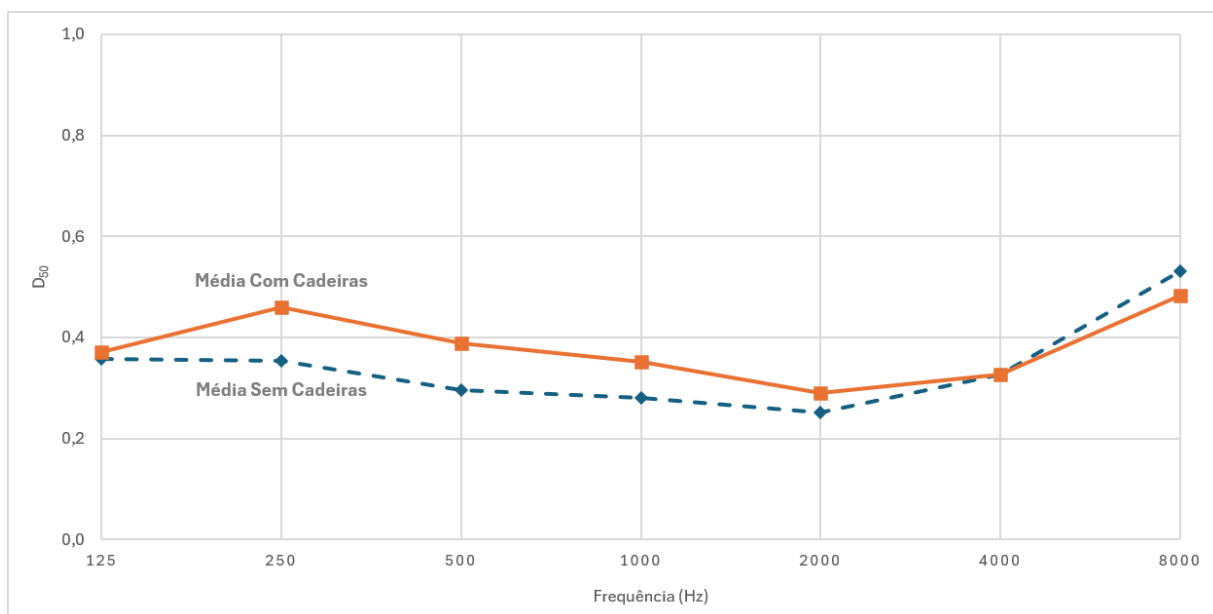


Figura 6.36 – Média dos valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, sem e com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.

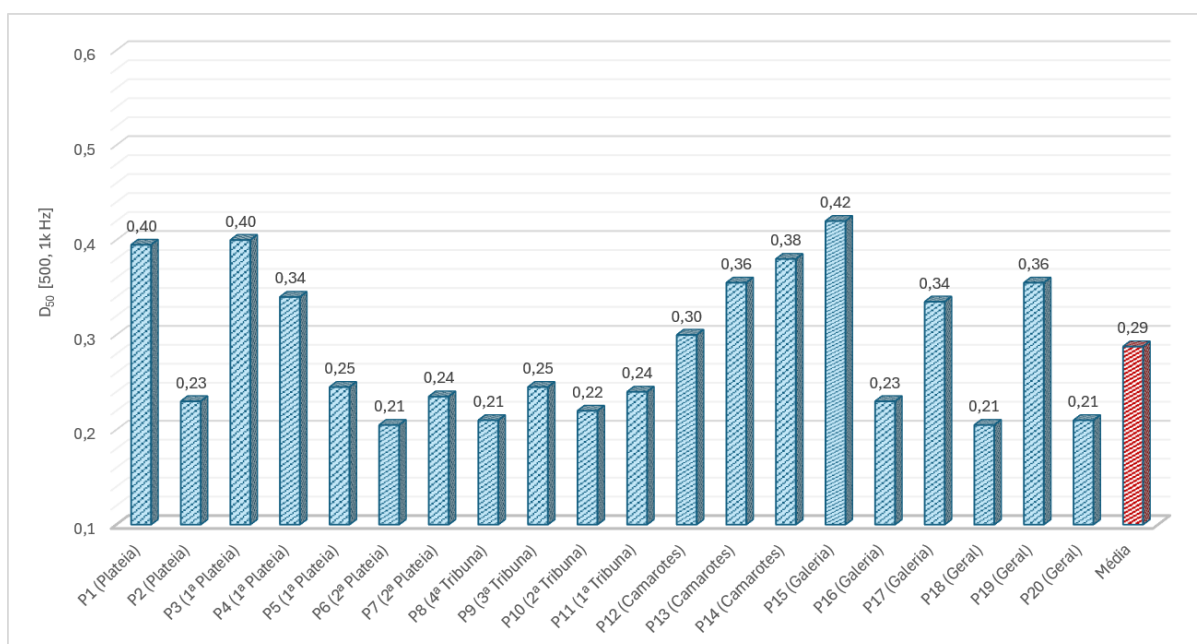


Figura 6.37 – Comparação dos valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, e a média, sem cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.

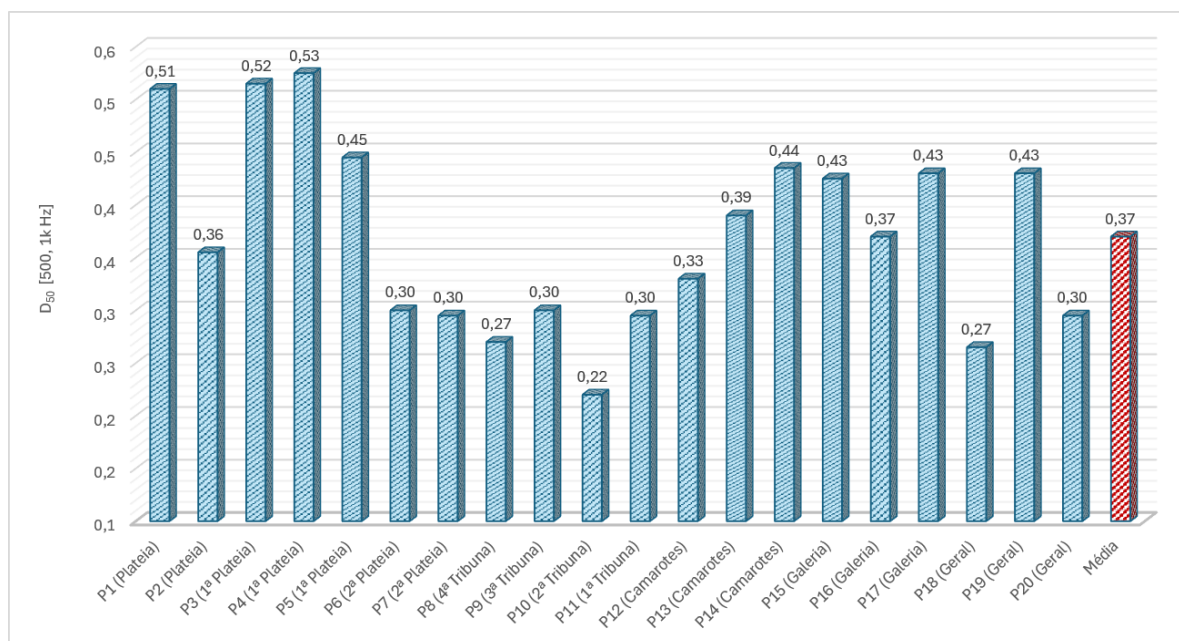


Figura 6.38 – Comparação dos valores do parâmetro Definição (D_{50}) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, e a média, com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.

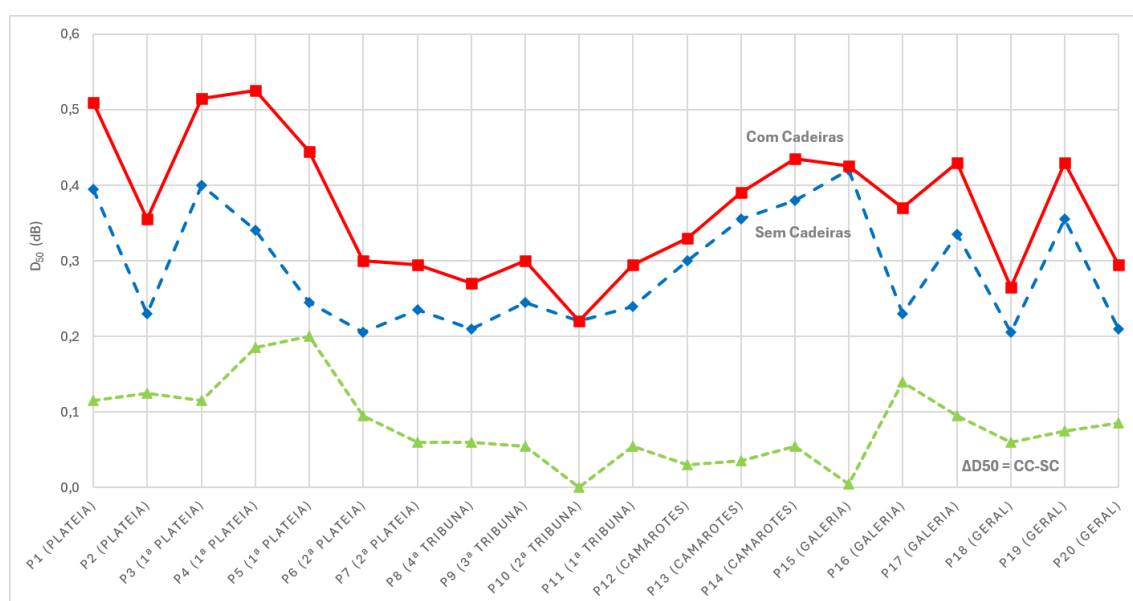


Figura 6.39 – Comparação dos valores médios do parâmetro Definição (D_{50}) para os 20 pontos medidos, a respectiva variação, sem e com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.

As figuras 6.40 e 6.41 representam mapas de isolinhas dos valores obtidos no parâmetro de Definição [500, 1k Hz], na sala em estudo, nos ensaios sem e com cadeiras, respectivamente. O valor do gradiente encontra-se entre 0,15 e 0,60. Verifica-se que a Definição é menor na zona mais distante da Plateia, na Tribuna e nos Frisos e mais elevada nas Cadeiras de Orquestra, 2ª Plateia, Camarotes e Galeria. A D_{50} , no geral, aumenta no ensaio com cadeiras.

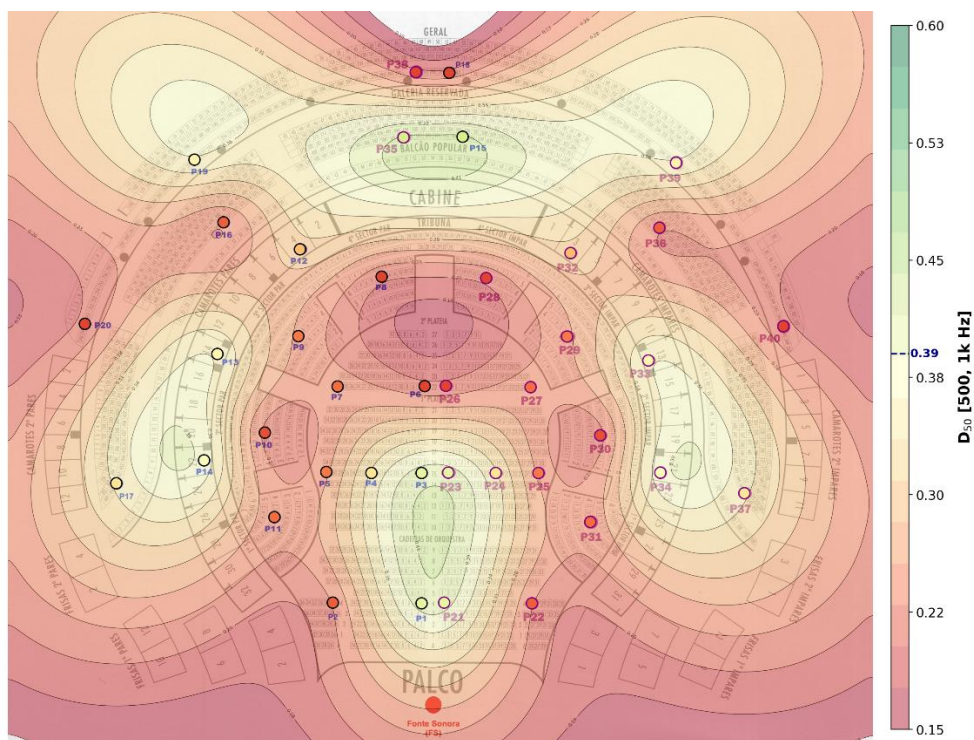


Figura 6.40 – Mapa de Isolinhas do parâmetro Definição (D_{50}) [500, 1k Hz], para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.

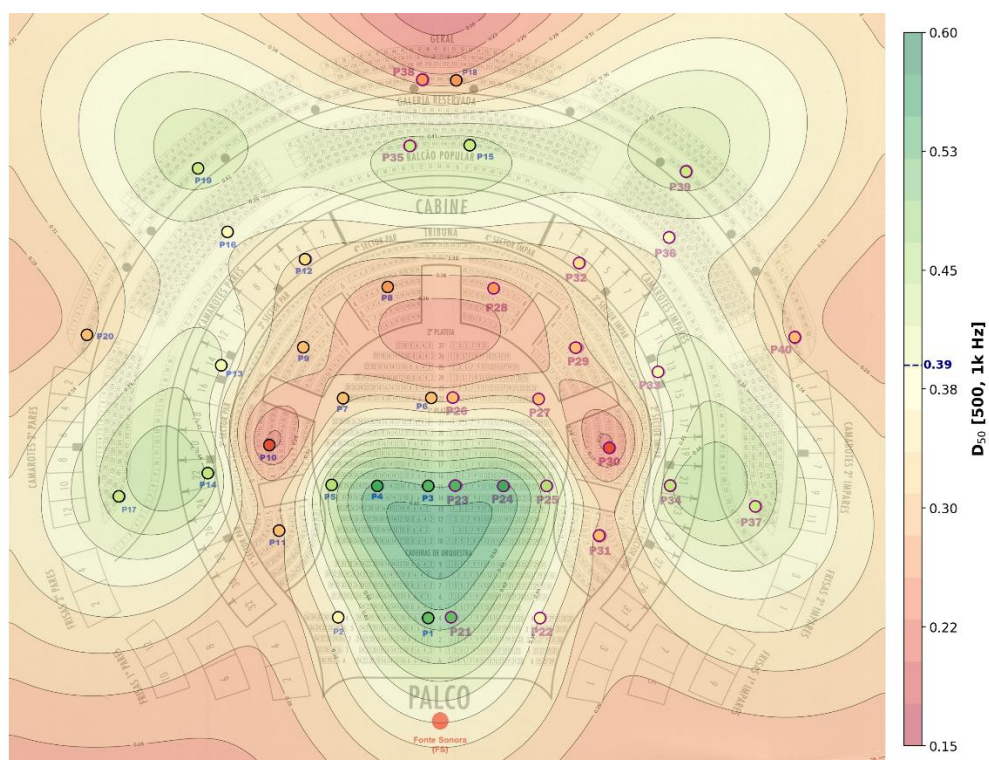


Figura 6.41 – Mapa de Isolinhas do parâmetro Definição (D_{50}) [500, 1k Hz], para os 20 pontos medidos, com cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.

Quadro 6.24 – Valores médios do parâmetro Definição (D_{50}) [500, 1k Hz] para os 20 pontos medidos, sem e com cadeiras na Plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto de Medição (Posição)	D_{50} [500, 1k Hz]		$\Delta D_{50}^* =$ CC-SC	Limite da perceptibilidade humana*
	Sem Cadeiras	Com Cadeiras		
P1 (Plateia)	0,40	0,51	0,12	Detectável
P2 (Plateia)	0,23	0,36	0,13	Detectável
P3 (1ª Plateia)	0,40	0,52	0,12	Detectável
P4 (1ª Plateia)	0,34	(+) 0,53	0,19	Detectável
P5 (1ª Plateia)	0,25	0,45	(+) 0,20	Detectável
P6 (2ª Plateia)	0,21	0,30	0,10	Detectável
P7 (2ª Plateia)	0,24	0,30	0,06	Detectável
P8 (4ª Tribuna)	(-) 0,21	0,27	0,06	Detectável
P9 (3ª Tribuna)	0,25	0,30	0,06	Detectável
P10 (2ª Tribuna)	0,22	(-) 0,22	(-) 0,00	Não Detectável
P11 (1ª Tribuna)	0,24	0,30	0,06	Detectável
P12 (Camarotes)	0,30	0,33	0,03	Não Detectável
P13 (Camarotes)	0,36	0,39	0,04	Não Detectável
P14 (Camarotes)	0,38	0,44	0,06	Detectável
P15 (Galeria)	(+) 0,42	0,43	0,01	Não Detectável
P16 (Galeria)	0,23	0,37	0,14	Detectável
P17 (Galeria)	0,34	0,43	0,10	Detectável
P18 (Geral)	(-) 0,21	0,27	0,06	Detectável
P19 (Geral)	0,36	0,43	0,08	Detectável
P20 (Geral)	0,21	0,30	0,09	Detectável
$\Delta D_{50}^* = \text{Máx} - \text{Mín}$	0,22	0,31	0,20	-
Limite da perceptibilidade humana*	Detectável	Detectável	Detectável	-

* quando $\Delta D_{50} < 0,05$, a diferença não é subjectivamente detectável.

Através do quadro 6.24, verifica-se que é detectável uma diferença na definição da “palavra”, por parte dos ouvintes, entre a presença ou a ausência de cadeiras na plateia na maior parte dos pontos de medição dos testes realizados. Também entre lugares, na mesma configuração da sala, verifica-se que é perceptível a variação da Definição, mesmo entre lugares que se encontram na mesma zona da sala.

6.8 TEMPO CENTRAL (Ts)

O Tempo Central, já abordado no capítulo 2.7.4.3, quantifica o tempo em que a energia recebida antes de um instante é idêntica à energia após o mesmo. É um parâmetro extremamente importante pois permite identificar se a energia sonora se encontra em reflexões iniciais ou nas reverberantes.

Os ensaios deste parâmetro foram realizados em 20 pontos, conforme descrito no capítulo 5, em bandas de 1/3 de oitava, para frequências entre 50 e 10k Hz. Com o tratamento dos dados, obtiveram-se os quadros 6.25 e 6.26, para os ensaios sem e com cadeiras, respectivamente, em bandas de 1/1 de oitava. Também foram calculados os valores médios do TS para frequências de 500 e 1k Hz, para cada ponto de medição, a média, desvio padrão e variação para cada frequência. As figuras 6.42 e 6.43 representam graficamente os respectivos quadros. Verifica-se valores elevados no desvio padrão e grandes variações todas as frequências. Isto encontra-se bem demonstrado nos gráficos 6.42 e 6.43, devido à grande dispersão de valores.

Na figura 6.44 visualiza-se a variação entre o TS médio entre ambos os ensaios, e é possível verificar a diminuição, especialmente nas baixas e médias frequências, do TS médio com a introdução das cadeiras na plateia. Isto confirma o demonstrado em outros parâmetros, de que a introdução de cadeiras na plateia ajudou a suprimir algumas das ondas reverberantes existentes na sala.

As figuras 6.45 e 6.46 mostram a comparação entre os valores médios do Tempo Central, com a média dos mesmos, para os ensaios sem e com cadeiras, respectivamente. Os mesmos demonstram que os valores médios de TS diminuíram com a introdução das cadeiras na plateia e que existe um aumento esperado com o aumento da distância dos pontos à fonte sonora, mas ainda é evidente a presença de uma zona com ondas reverberantes no meio da sala de espetáculos.

Na figura 6.47 é possível visualizar a diminuição dos valores médios do Tempo Central ao introduzir-se as cadeiras na plateia e a maior variação entre ensaios em pontos mais próximos ao centro da sala.

As figuras 6.48 e 6.49 representam mapas de isolinhas dos valores obtidos no parâmetro de Tempo Central [500, 1k Hz], na sala em estudo, nos ensaios sem e com cadeiras, respectivamente. O gradiente de cores utilizado possui valores entre 100 e 265 ms. É visível

uma variação entre os ensaios, sendo que o ensaio sem cadeiras apresenta um mapa maioritariamente a vermelho e o ensaio com cadeiras mostra um mapa predominantemente a verde. Verifica-se que o TS tende a ser mais elevado no centro da sala, na 2ª Plateia, e em zonas laterais. Os valores mais baixos encontram-se perto da Fonte sonora e em zonas mais afastadas da mesma, na Tribuna, Camarotes e Galeria.

Quadro 6.25 – Valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os 20 pontos medidos, e as respectivas médias e desvios padrão, sem cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto de Medição (Posição)	Frequência (Hz)							TS [500, 1k Hz] (ms)
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1 (Plateia)	(-) 126	187	(-) 139	(-) 176	(-) 173	(-) 78	(-) 21	(-) 158
P2 (Plateia)	127	198	200	190	228	155	33	195
P3 (1ª Plateia)	(+) 250	208	229	238	272	168	72	233
P4 (1ª Plateia)	212	213	231	243	251	167	65	237
P5 (1ª Plateia)	238	200	229	247	245	149	64	238
P6 (2ª Plateia)	155	200	233	268	228	143	56	250
P7 (2ª Plateia)	170	(+) 223	235	267	250	163	(+) 76	251
P8 (4ª Tribuna)	137	138	243	214	199	143	63	228
P9 (3ª Tribuna)	172	184	248	237	223	145	50	242
P10 (2ª Tribuna)	246	202	213	240	248	157	51	227
P11 (1ª Tribuna)	160	189	237	(+) 284	256	(+) 188	69	(+) 261
P12 (Camarotes)	174	(-) 123	225	225	231	137	55	225
P13 (Camarotes)	196	162	172	207	228	115	39	190
P14 (Camarotes)	239	166	184	247	(+) 274	139	40	215
P15 (Galeria)	187	172	200	191	187	135	64	196
P16 (Galeria)	202	189	252	220	207	134	59	236
P17 (Galeria)	143	194	206	228	233	160	52	217
P18 (Geral)	130	133	207	221	176	130	47	214
P19 (Geral)	185	171	208	211	201	139	51	209
P20 (Geral)	163	178	(+) 269	251	222	176	65	260
Média (ms)	181	182	218	230	227	146	55	224
Desvio Padrão (ms)	39	26	29	27	28	23	13	25
$\Delta TS = \text{Máx} - \text{Mín}$ (ms)	124	100	131	108	101	109	55	103

Quadro 6.26 – Valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os 20 pontos medidos, e as respectivas médias e desvios padrão, com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto de Medição (Posição)	Frequência (Hz)							TS [500, 1k Hz] (ms)
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
P1 (Plateia)	(-) 121	121	(-) 89	(-) 127	(-) 137	(-) 83	(-) 35	(-) 108
P2 (Plateia)	151	166	139	135	166	133	42	137
P3 (1ª Plateia)	158	169	140	180	209	168	73	160
P4 (1ª Plateia)	140	148	128	160	230	(+) 191	96	144
P5 (1ª Plateia)	196	165	156	148	191	166	92	152
P6 (2ª Plateia)	156	147	(+) 186	181	198	155	92	184
P7 (2ª Plateia)	145	175	181	188	198	173	96	185
P8 (4ª Tribuna)	158	148	154	171	190	153	86	163
P9 (3ª Tribuna)	140	142	170	186	204	169	77	178
P10 (2ª Tribuna)	193	(+) 187	173	191	214	183	78	182
P11 (1ª Tribuna)	192	181	155	(+) 217	(+) 244	185	68	186
P12 (Camarotes)	177	115	136	165	206	147	76	151
P13 (Camarotes)	208	110	137	132	196	130	53	135
P14 (Camarotes)	(+) 221	129	147	185	227	175	63	166
P15 (Galeria)	141	(-) 80	156	145	151	146	86	151
P16 (Galeria)	159	140	156	162	208	173	(+) 108	159
P17 (Galeria)	128	120	184	193	207	163	83	188
P18 (Geral)	153	123	162	177	176	143	73	169
P19 (Geral)	132	122	139	152	177	141	62	146
P20 (Geral)	193	158	183	206	210	182	82	(+) 195
Média (ms)	163	142	154	170	197	158	76	162
Desvio Padrão (ms)	28	27	23	24	25	24	18	22
$\Delta TS = \text{Máx} - \text{Mín}$ (ms)	100	107	97	90	107	107	73	87

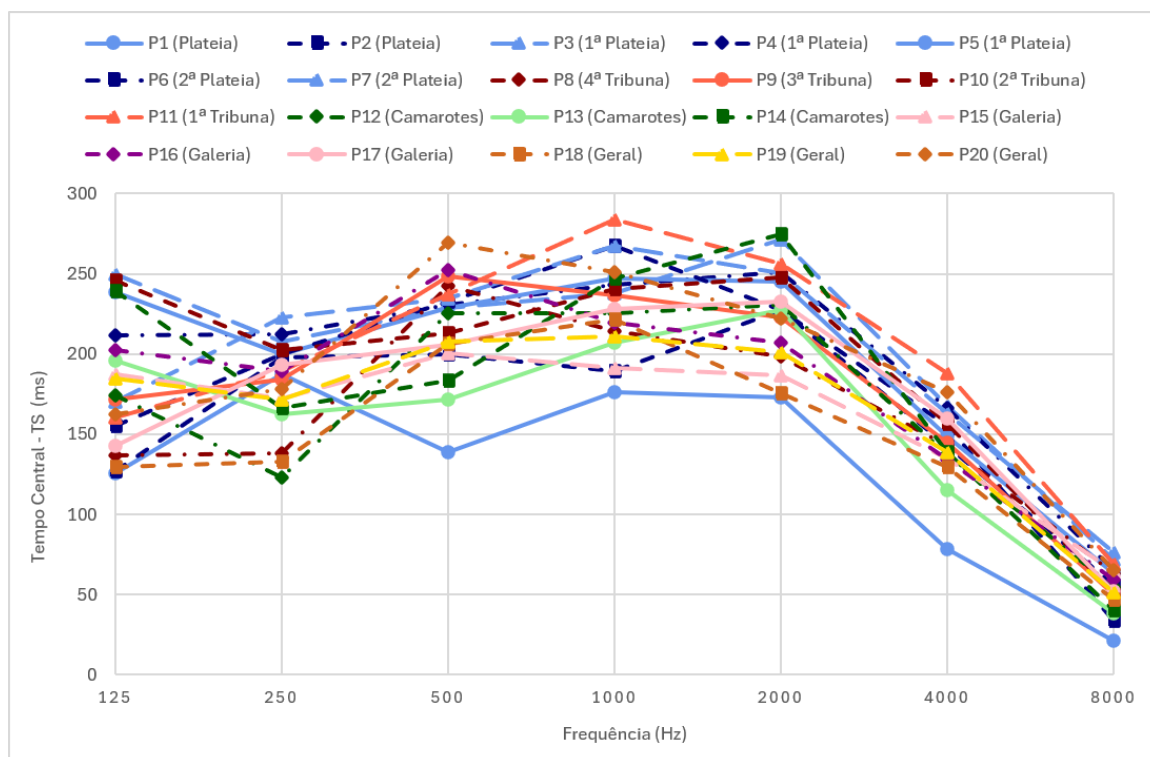


Figura 6.42 – Valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, sem cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.

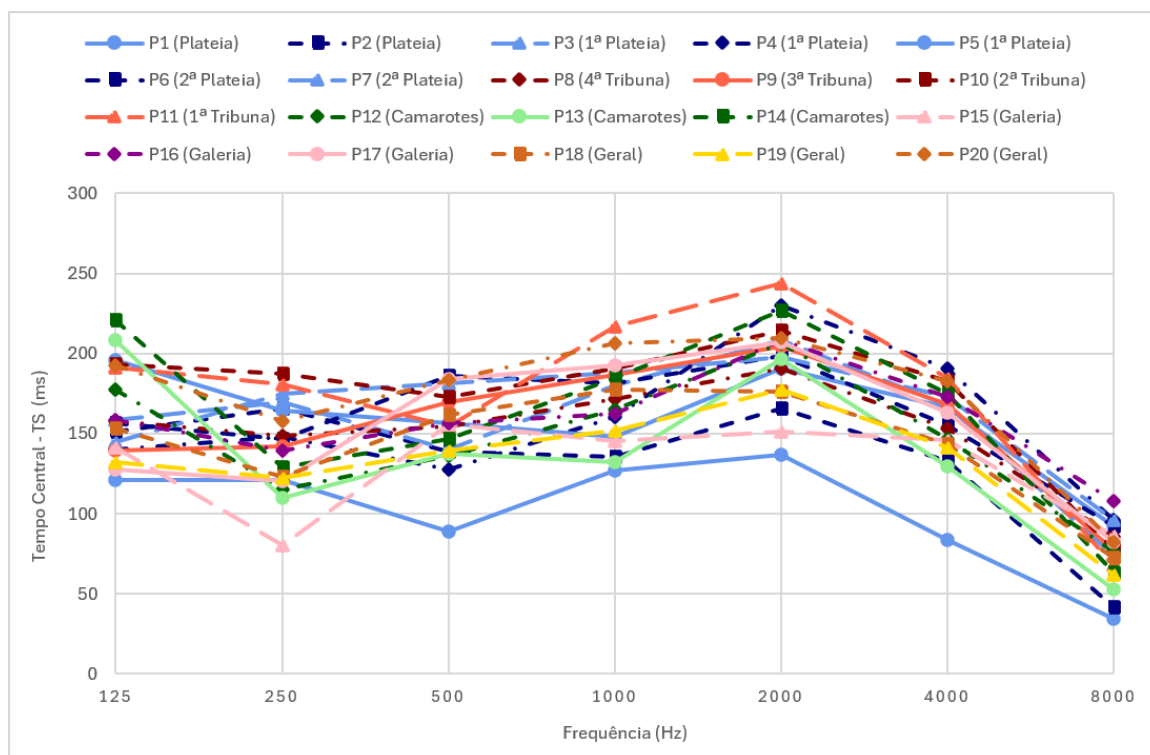


Figura 6.43 – Valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.

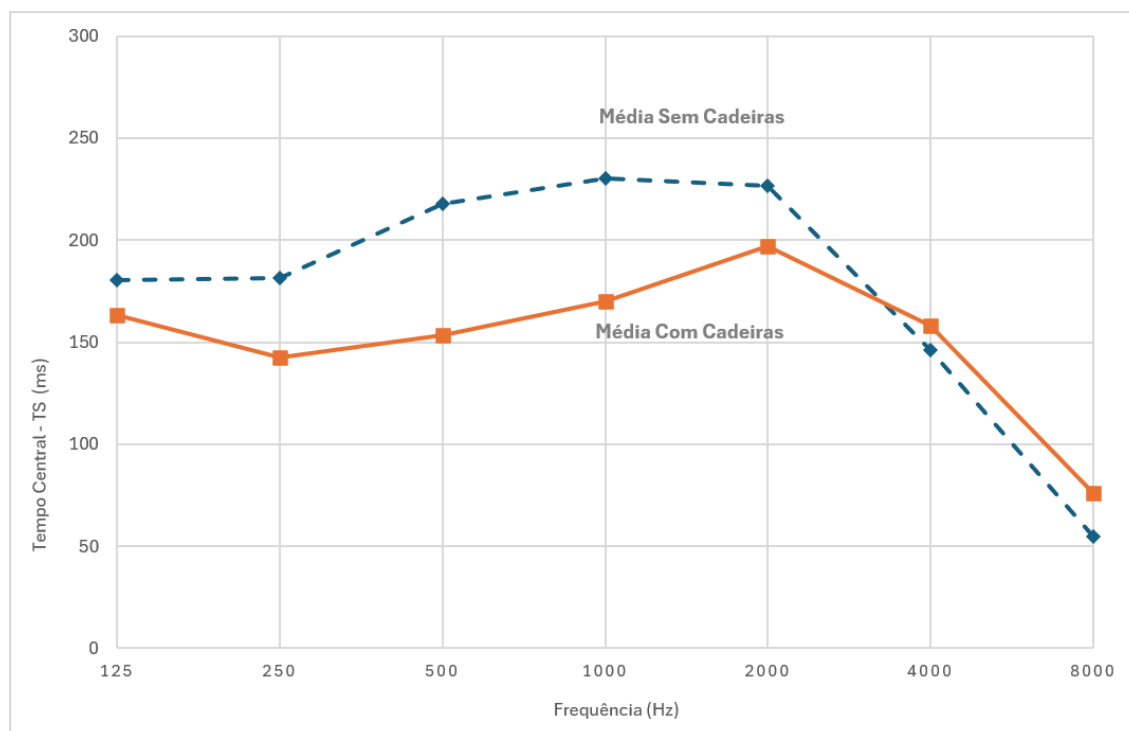


Figura 6.44 – Média dos valores do parâmetro Tempo Central (TS) para os 20 pontos medidos, em bandas de frequência de 1/1 oitava, sem e com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.

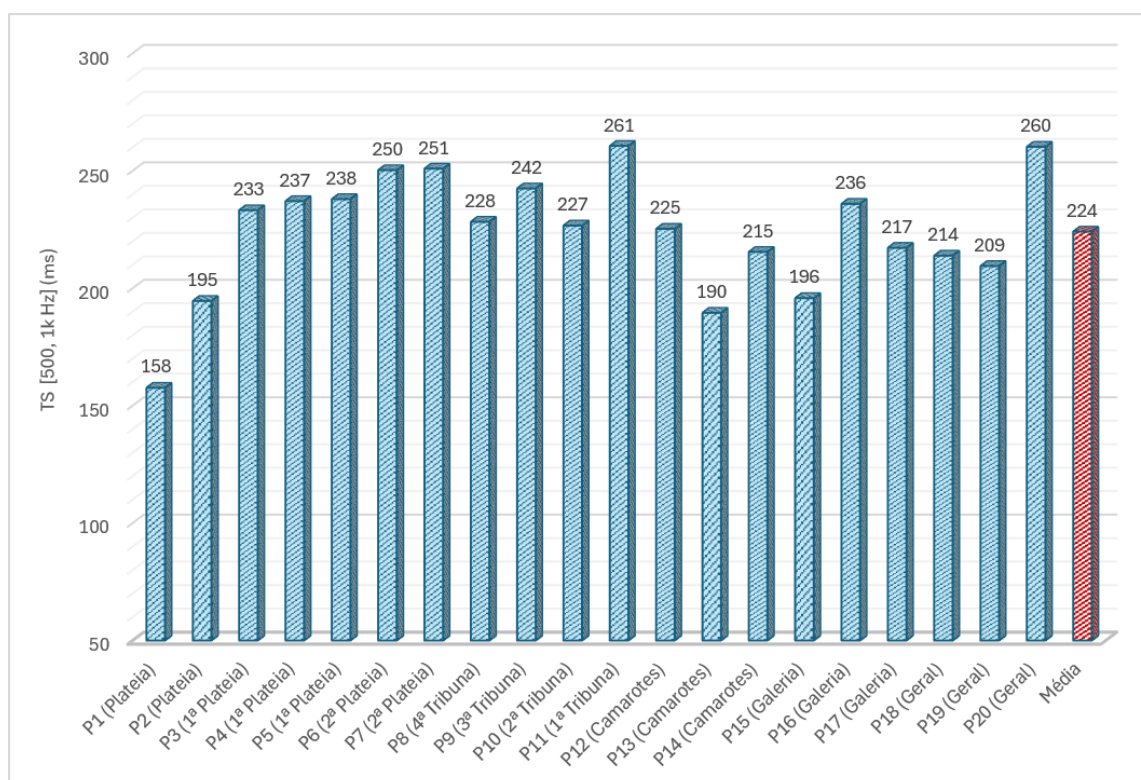


Figura 6.45 – Comparação dos valores do parâmetro Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] para os 20 pontos medidos, e a média, sem cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.

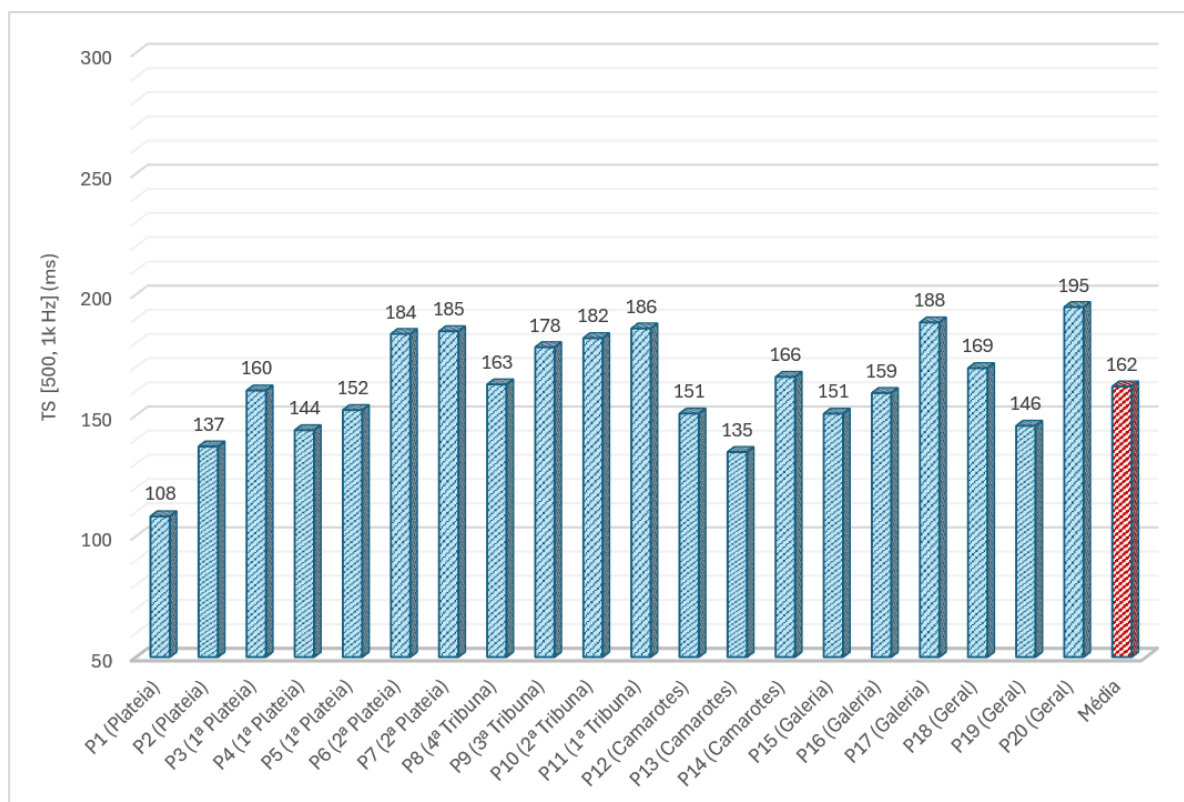


Figura 6.46 – Comparação dos valores do parâmetro Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] para os 20 pontos medidos, e a média, sem cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto.

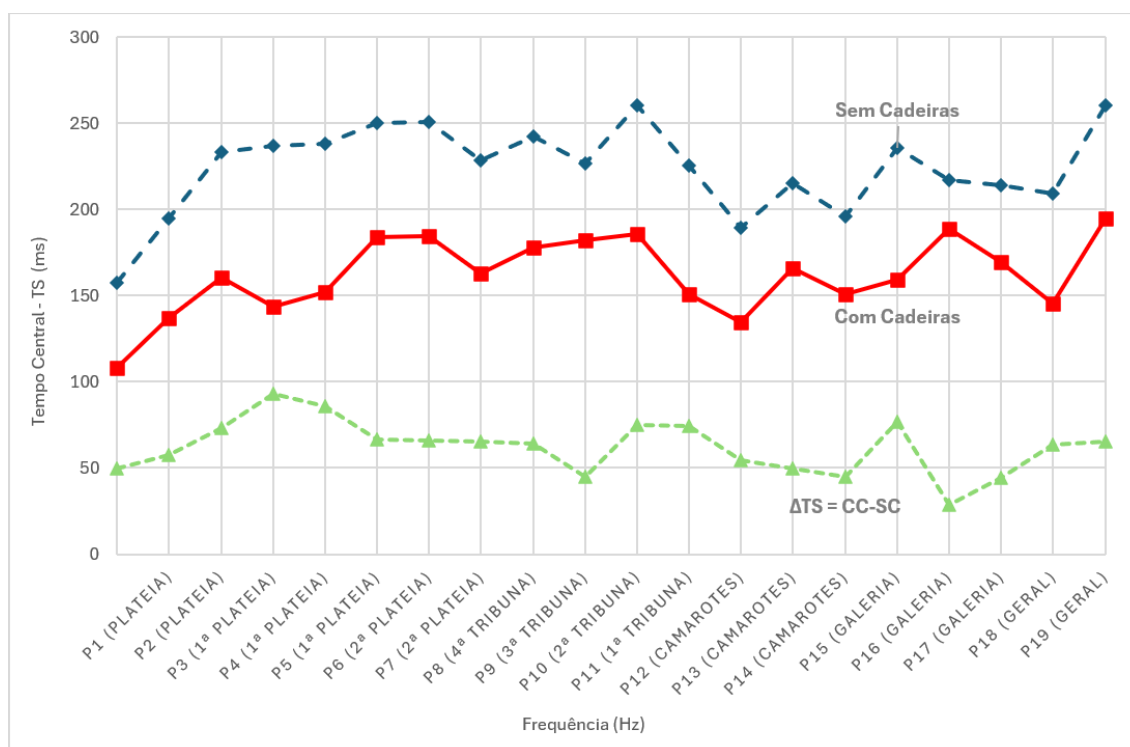


Figura 6.47 – Comparação dos valores médios do parâmetro Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] para os 20 pontos medidos, sem e com cadeiras na plateia, e a correspondente variação, do Coliseu do Porto.

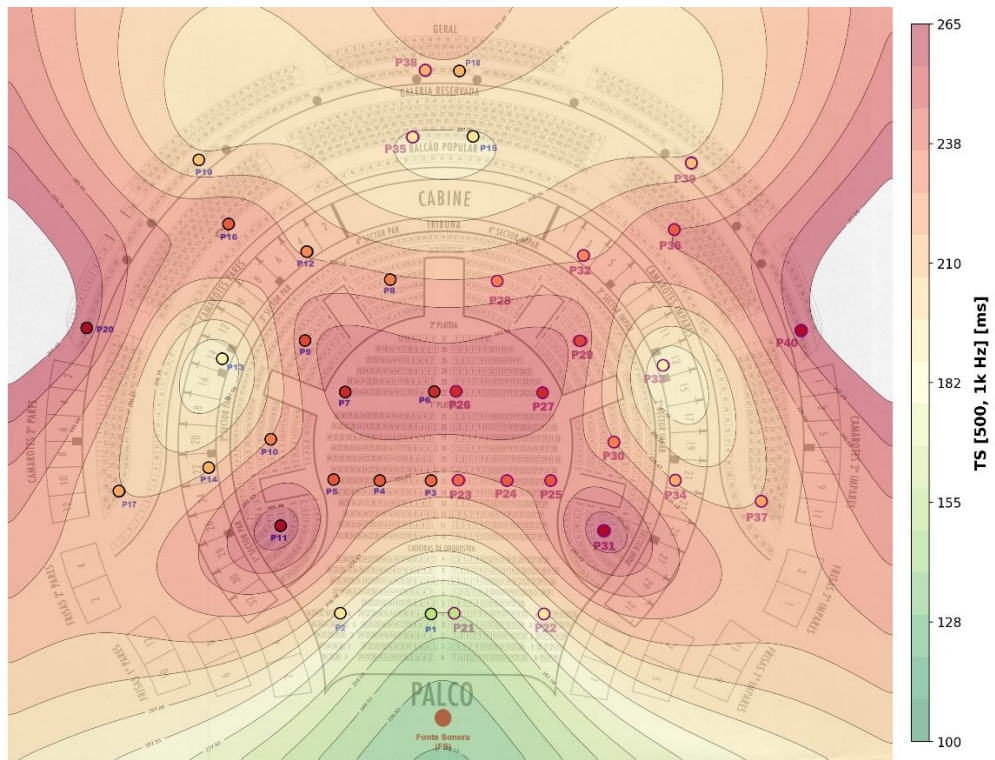


Figura 6.48 – Mapa de Isolinhas parâmetro Tempo Central (TS), para os 20 pontos medidos, sem cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.

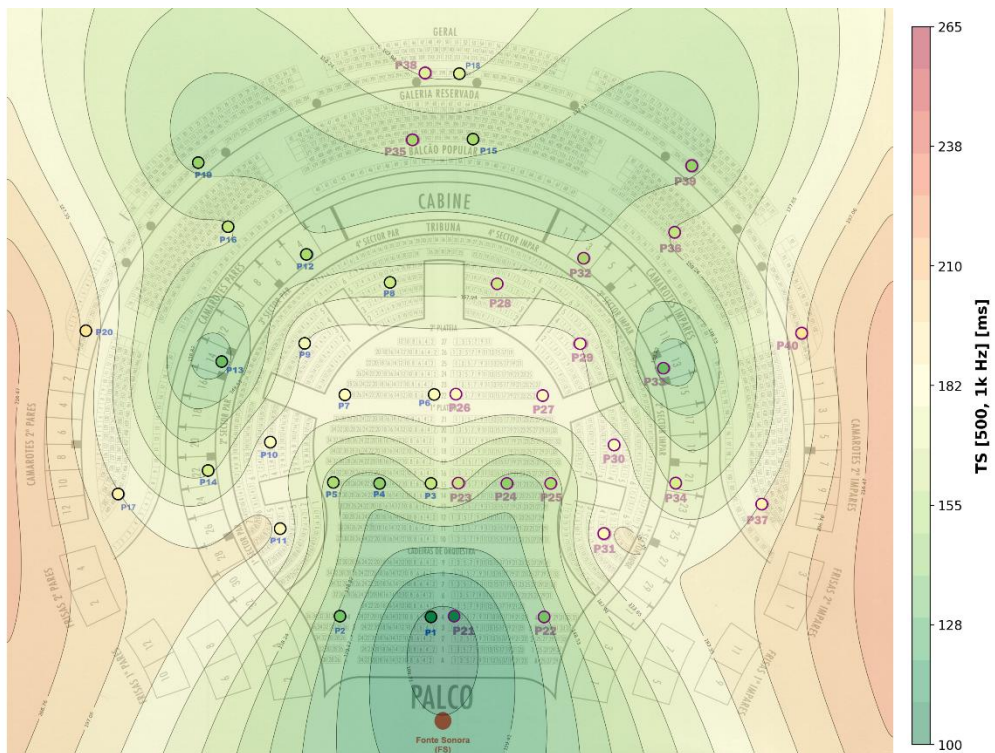


Figura 6.49 – Mapa de Isolinhas parâmetro Tempo Central (TS), para os 20 pontos medidos, com cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto.

Quadro 6.27 – Valores médios do parâmetro Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] para os 20 pontos medidos, sem e com cadeiras na plateia, do Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto de Medição (Posição)	TS [500, 1k Hz] (ms)		$\Delta TS^* =$ CC-SC (ms)	Limite da perceptibilidade humana*
	Sem Cadeiras	Com Cadeiras		
P1 (Plateia)	(-) 158	(-) 108	49	Detectável
P2 (Plateia)	195	137	58	Detectável
P3 (1ª Plateia)	233	160	73	Detectável
P4 (1ª Plateia)	237	144	(+) 93	Detectável
P5 (1ª Plateia)	238	152	86	Detectável
P6 (2ª Plateia)	250	184	67	Detectável
P7 (2ª Plateia)	251	185	66	Detectável
P8 (4ª Tribuna)	228	163	66	Detectável
P9 (3ª Tribuna)	242	178	64	Detectável
P10 (2ª Tribuna)	227	182	45	Detectável
P11 (1ª Tribuna)	(+) 261	186	75	Detectável
P12 (Camarotes)	225	151	75	Detectável
P13 (Camarotes)	190	135	55	Detectável
P14 (Camarotes)	215	166	50	Detectável
P15 (Galeria)	196	151	45	Detectável
P16 (Galeria)	236	159	77	Detectável
P17 (Galeria)	217	188	(-) 29	Detectável
P18 (Geral)	214	169	44	Detectável
P19 (Geral)	209	146	64	Detectável
P20 (Geral)	260	(+) 195	65	Detectável
$\Delta TS^* = \text{Máx} - \text{Mín} \text{ (ms)}$	103	87	16	-
Limite da perceptibilidade humana*	Detectável	Detectável	Detectável	-

* quando $\Delta TS < 10 \text{ ms}$, a diferença não é subjectivamente detectável.

No quadro 6.27 encontram-se os valores médios do Tempo Central, para as frequências de 500 e 1k Hz, assim como as variações entre testes, para cada ponto de medição, e as variações existentes em cada ensaio. Neste quadro é possível visualizar um comportamento mais normal por parte da sala, onde os valores mais baixos se encontram nos pontos mais próximos da fonte sonora e os mais altos, indicativos de reverberações se encontram em pontos mais afastados e em pisos mais elevados. Também se verifica que é detectável uma diferença no Tempo Central, por parte dos ouvintes, entre a presença ou a ausência de cadeiras na plateia em todos os pontos

de medição dos testes realizados. Também entre lugares, na mesma configuração da sala, verifica-se que é perceptível a variação do Tempo Central, mesmo entre lugares que se encontram na mesma zona da sala.

6.9 EFEITO DE CADEIRAS NA PLATEIA

No Quadro 6.28 encontra-se representado um resumo dos valores dos parâmetros acústicos obtidos em ambos os testes realizados, com e sem cadeiras na plateia, no Coliseu do Porto e a variação entre os mesmos. Como neste edifício não existe AVAC, os parâmetros de Nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}), Nível sonoro equivalente (L_{Aeq}) e as Curvas de Incomodidade mantêm-se constantes durante ambos os testes realizados.

Quadro 6.28 – Efeito da presença de cadeiras na plateia, nos parâmetros acústicos medidos no Coliseu do Porto.

Parâmetros		Resultados		
Nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}) (dB)		47,3		
Nível sonoro equivalente (L_{Aeq}) (dB)		24,9		
Curvas de incomodidade	NC (<i>Noise Criterion</i>)	14-16		
	NR (<i>Noise Rating</i>)	17-19		
		Sem Cadeiras	Com Cadeiras	Efeito de Cadeiras na Plateia = CC – SC
Tempo de reverberação [500, 1k Hz] (s)		3,51	2,67	0,84
Tempo de reverberação [500, 1k Hz] (s) (100% ocupação)		2,72	2,53	≈ 0,2
Rácio de Baixos		0,82	0,85	≈ 0
Speech Transmission Index (STI)	máximo	0,53	0,56	≈ 0
	médio	0,41	0,44	≈ 0
	mínimo	0,37	0,39	≈ 0
Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz] (dB)		-2,15	-0,45	1,7
Definição (D_{50}) [500, 1k Hz]		0,29	0,37	≈ 0
Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] (ms)		224	162	-62

Analizando o efeito das cadeiras na plateia, verifica-se que a grande maioria dos parâmetros acústicos não sofre alterações significativas com a introdução das cadeiras, apresentando valores de efeito aproximadamente nulos (≈ 0). O TR [500, 1k Hz] diminui 0,84 segundos com a introdução das cadeiras na plateia, com a sala vazia, e cerca de 0,2 segundos, a 100% de ocupação. Isto demonstra que existe uma maior absorção sonora por parte das cadeiras da plateia do que pelo público (em previsão). É também importante referir que a existência de assentos com bons coeficientes de absorção sonora, em salas de espectáculos, especialmente em condições de ocupação da sala abaixo dos 100%, são extremamente relevantes pois garantem que as condições acústicas da sala se mantêm constantes, independentemente da taxa de ocupação. Outros dois parâmetros registaram desvios assinaláveis. A Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz] apresenta uma variação de +1,69 dB, o que indica que as cadeiras contribuem para um ligeiro aumento da energia sonora precoce em relação à energia reverberante, melhorando a clareza percebida. O Tempo Central (TS) é o parâmetro mais afectado, registando uma redução de 62,21 ms na presença das cadeiras, o que indica que o som útil chega mais cedo ao ouvinte, melhorando a clareza acústica do espaço. Ambos os parâmetros demonstram que a absorção introduzida pelas cadeiras reduz a energia reverberante tardia, aumentando a componente directa e reflectida precocemente do campo sonoro.

6.10 ANÁLISE DE INTERDEPENDÊNCIAS DE PARÂMETROS ACÚSTICOS

Com o intuito de se aumentar a compreensão do comportamento acústico do Coliseu, dificultada pelo grande volume e capacidade, é fundamental analisar a relação entre parâmetros acústicos medidos nos 20 pontos de medição, de forma a averiguar a existência de uma forte relação entre os mesmos ou se variam de forma independente. A Claridade (C_{80}), a Definição (D_{50}) e o Tempo Central (t_s) avaliam a energia sonora com objectivos e características distintas, contudo, todos dependem da geometria do espaço e da distribuição temporal das reflexões sonoras.

Utilizaram-se gráficos de dispersão com linhas de tendência de modo a averiguar se existe uma correlação entre parâmetros, onde um dos parâmetros dita, de forma previsível, o comportamento de outro, nesta sala específica. A linha de tendência e o seu coeficiente de determinação (R^2) são indicadores estatísticos capazes de quantificar o grau de correlação, onde valores mais próximos da unidade indicam a existência de um campo sonoro previsível e, os valores perto de zero, mostram a existência de particularidades imprevisíveis.

O Quadro 6.29 apresenta um resumo dos valores médios dos parâmetros de Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}) e Tempo Central (T_s), nas frequências [500, 1k Hz], para todos os pontos de medição realizados no ensaio com cadeiras, realizado no Coliseu do Porto. Estes valores são posteriormente utilizados, nas figuras 6.37, 6.38 e 6.39 para verificar a correlação entre os três parâmetros.

A figura 6.50 mostra o gráfico de dispersão, com linha de tendência linear, da relação entre a Claridade (C_{80}) e Definição (D_{50}) ([500, 1k Hz]), nos vinte pontos medidos durante o ensaio. Verifica-se uma tendência de aumento de valores quando qualquer um dos parâmetros aumenta. Isto era esperado, visto que ambos os parâmetros classificam a energia sonora entre o som que atinge o utilizador “cedo” e “tarde”, sendo que difere o tempo em que o mesmo é medido (80 e 50 ms). O valor de R^2 de cerca de 0,39 indica que a fórmula linear justifica apenas 39% da variabilidade entre os dois parâmetros, revelando que a relação linear não é suficiente para descrever o comportamento conjunto de C_{80} e D_{50} nos pontos medidos.

A figura 6.51 mostra o gráfico de dispersão, com linha de tendência linear, da relação entre a Claridade (C_{80}) e Tempo Central (T_s) ([500, 1k Hz]), nos vinte pontos medidos durante o ensaio. Consegue-se verificar uma descida acentuada dos valores do Tempo Central, com o aumento da Claridade. Como o T_s é o ponto de equilíbrio da energia sonora no tempo, se a reverberação existente e a energia tardia na sala aumentam, o Tempo Central tem tendência a diminuir. O valor de R^2 de 0,785 indica que a relação linear explica cerca de 79% da variabilidade entre os dois parâmetros, sendo esta a correlação mais robusta das três analisadas.

A figura 6.52 mostra o gráfico de dispersão, com linha de tendência exponencial, da relação entre a Definição (D_{50}) e Tempo Central (T_s) ([500, 1k Hz]), nos vinte pontos medidos durante o ensaio. Tal como ocorre na correlação do gráfico anterior, verifica-se uma descida dos valores do Tempo Central com o aumento dos valores da Definição. Contudo, nota-se uma correlação mais baixa entre estes parâmetros, quando comparados com a correlação anterior. Contudo, o valor de R^2 de 0,37 indica que a expressão exponencial justifica apenas 37% da variabilidade entre os dois parâmetros, sendo a correlação mais fraca das três, o que sugere que a relação entre D_{50} e T_s não é bem capturada por uma tendência simples.

Em suma, a análise de interdependência entre os três parâmetros acústicos mostra que a relação entre C_{80} e T_s é a mais consistente, com a expressão linear a explicar cerca de 79% da variabilidade observada entre os dois parâmetros nos pontos medidos. As correlações

envolvendo a Definição (D_{50}), com valores de R^2 de cerca de 0,37 - 0,39, revelam que a variabilidade deste parâmetro não é bem explicada por relações simples com C_{80} ou T_s , o que pode reflectir a maior sensibilidade de D_{50} a condições locais nos pontos de medição, nomeadamente na janela temporal de 50 ms.

Os valores de R^2 obtidos para cada correlação entre parâmetros acústicos encontram-se sintetizados no Quadro 6.30.

Quadro 6.29 – Valores médios dos parâmetros Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}) e Tempo Central (T_s), para os 20 pontos medidos, com cadeiras na Plateia, no Coliseu do Porto (+, -: maior e menor valor em cada coluna).

Ponto de Medição (Posição)	C_{80} [500, 1k Hz] (dB)	D_{50} [500, 1k Hz]	T_s [500, 1k Hz] (ms)
P1 (Plateia)	(+) 2,29	0,51	(-) 108
P2 (Plateia)	2,23	0,36	137
P3 (1ª Plateia)	0,05	0,52	160
P4 (1ª Plateia)	0,43	(+) 0,53	144
P5 (1ª Plateia)	-0,14	0,45	152
P6 (2ª Plateia)	(-) -2,71	0,30	184
P7 (2ª Plateia)	-2,55	0,30	185
P8 (4ª Tribuna)	-0,92	0,27	163
P9 (3ª Tribuna)	-0,73	0,30	178
P10 (2ª Tribuna)	-1,72	(-) 0,22	182
P11 (1ª Tribuna)	-1,04	0,30	186
P12 (Camarotes)	-1,17	0,33	151
P13 (Camarotes)	1,29	0,39	135
P14 (Camarotes)	-0,64	0,44	166
P15 (Galeria)	0,79	0,43	151
P16 (Galeria)	-0,57	0,37	159
P17 (Galeria)	-1,05	0,43	188
P18 (Geral)	-0,86	0,27	169
P19 (Geral)	0,30	0,43	146
P20 (Geral)	-2,31	0,30	(+) 195

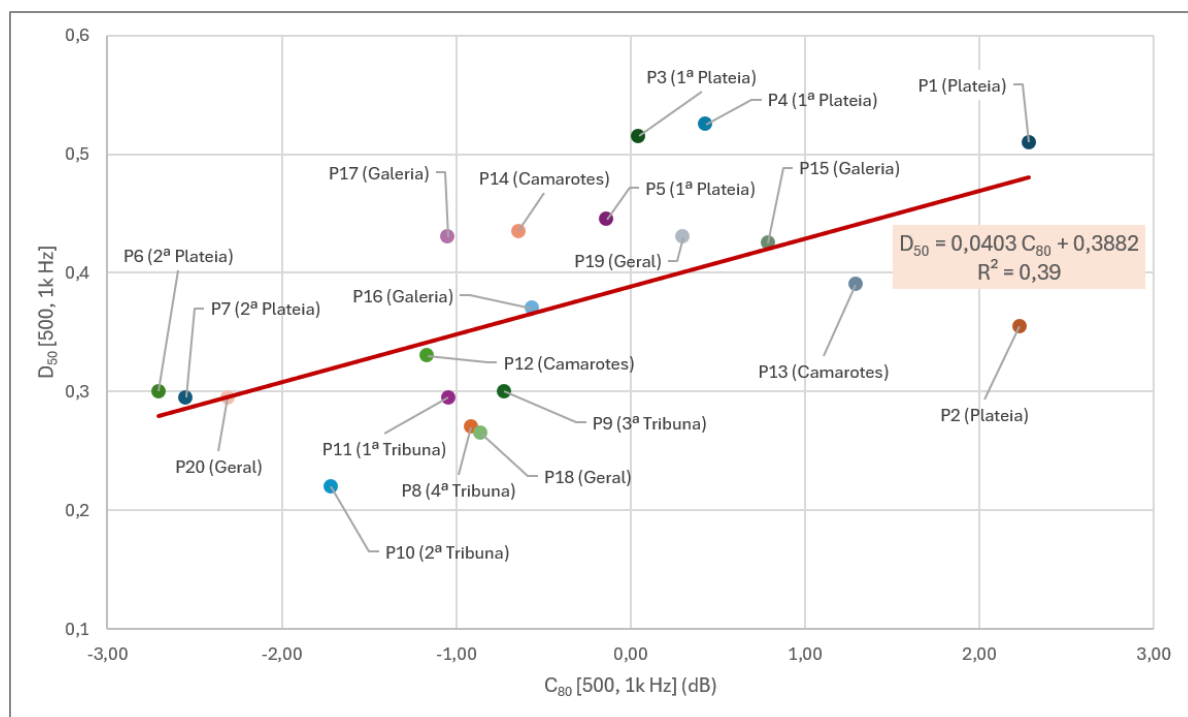


Figura 6.50 – Comparação dos valores médios dos parâmetros Claridade (C_{80}) e Definição (D_{50}) ([500, 1k Hz]) para os 20 pontos medidos, com cadeiras na plateia e linha de tendência (linear), no Coliseu do Porto.

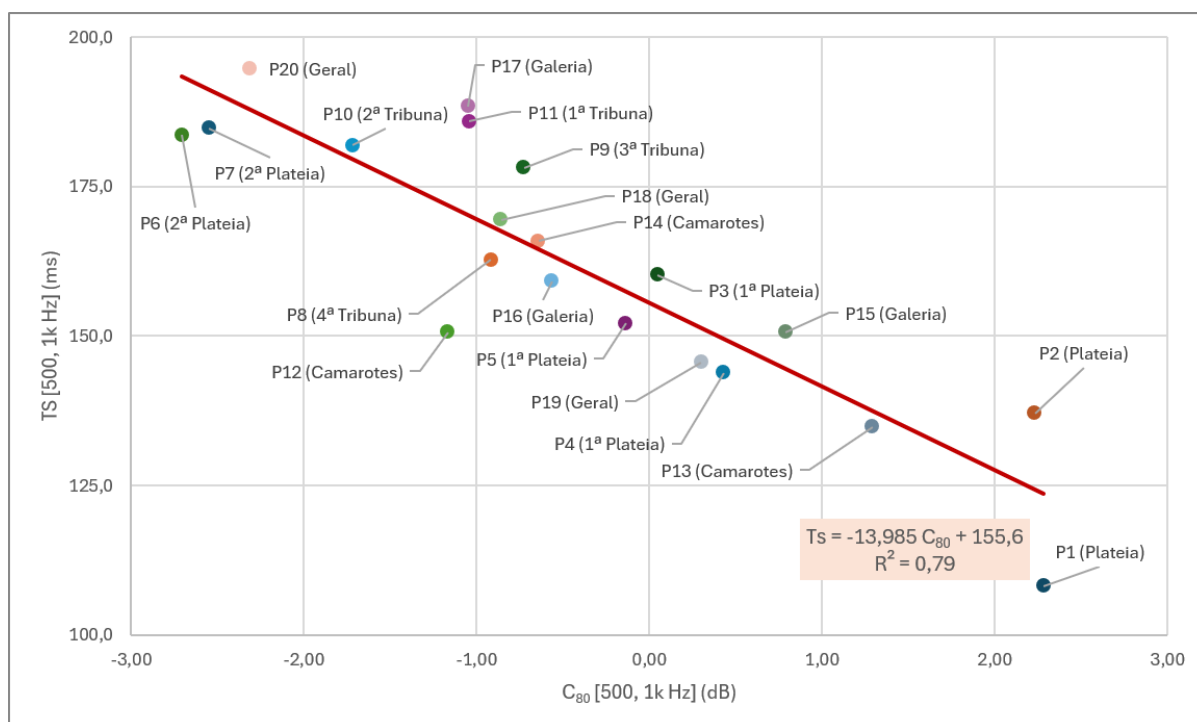


Figura 6.51 – Comparação dos valores médios dos parâmetros Claridade (C_{80}) e Tempo Central (T_s) ([500, 1k Hz]) para os 20 pontos medidos, com cadeiras na plateia e linha de tendência (linear), no Coliseu do Porto.

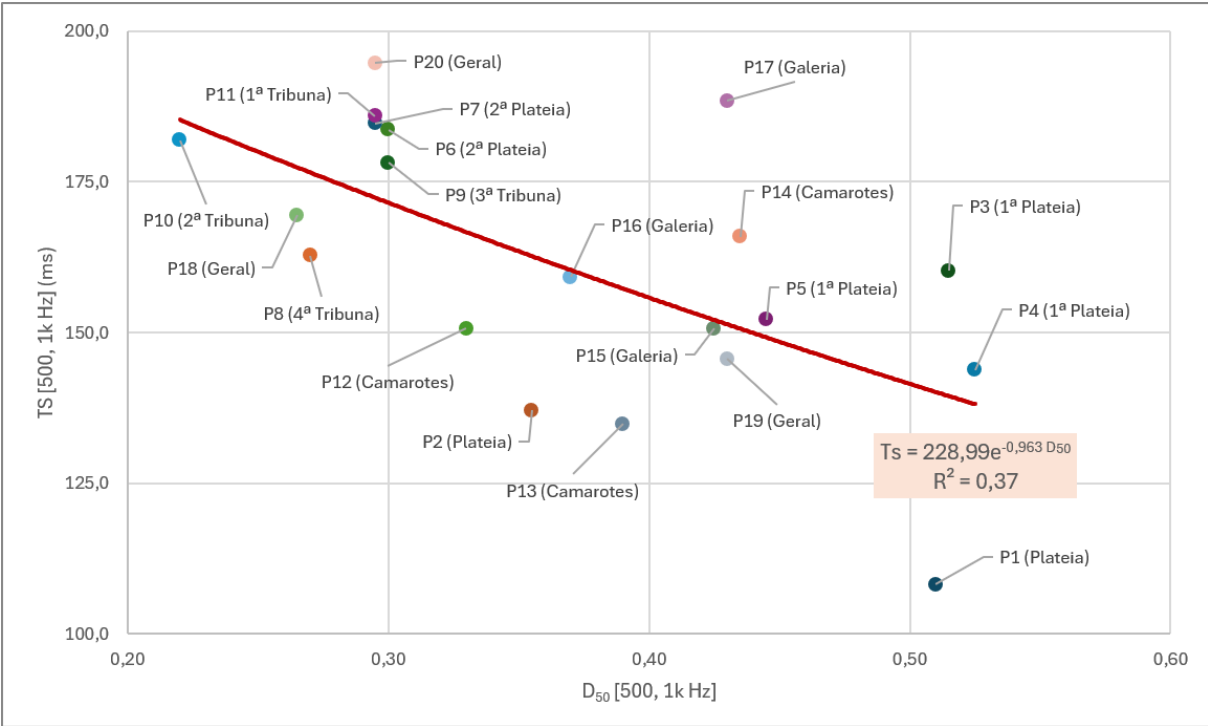


Figura 6.52 – Comparação dos valores médios dos parâmetros Definição (D_{50}) e Tempo Central (T_s) [500, 1k Hz] para os 20 pontos medidos, com cadeiras na plateia e linha de tendência (exponencial), no Coliseu do Porto.

Quadro 6.30 – Coeficientes de determinação (R^2) obtidos nas linhas de tendência das correlações entre parâmetros acústicos.

R^2	C_{80}	D_{50}
C_{80}	-	0,39
D_{50}	0,39	-
TS	0,79	0,37

7

COMPARAÇÃO COM OUTRAS SALAS

7.1 INTRODUÇÃO

A avaliação da qualidade acústica de uma sala de espectáculos não finda na análise dos seus parâmetros acústicos, mas sim no seu enquadramento face a outras salas de referência, permitindo assim avaliar o seu desempenho relativo no panorama nacional e internacional. O presente capítulo aborda a análise comparativa dos resultados obtidos no estudo acústico do Coliseu do Porto, no capítulo 6, com os resultados de medições de salas nacionais previamente caracterizadas em dissertações de mestrado na FEUP.

Embora a sala principal do Coliseu do Porto apresente, em planta, uma configuração em ferradura, a sua integração nesta tipologia é apenas formal. A sua elevada volumetria e a organização espacial distinta dos pisos superiores, introduzem uma disparidade aos modelos puros da tradição italiana. Estas características justificam uma realização comparativa para além das salas de geometria considerada semelhante, abrangendo espaços de diferentes tipologias arquitectónicas. Adicionalmente, a natureza multiusos do Coliseu motiva uma comparação entre os requisitos específicos de diversas funções, procurando um equilíbrio entre a inteligibilidade da palavra e a qualidade do desempenho musical.

Esta análise comparativa assenta nos seguintes parâmetros acústicos:

- Tempo de reverberação médio (TR [500, 1.000 Hz]);
- Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}).
- Claridade média (C_{80} [500, 1.000 Hz]);
- Definição média (D_{50} [500, 1.000 Hz]);

- Tempo Central médio (TS [500, 1.000 Hz]);
- *Speech Transmission Index (STI)* ou *Rapid Speech Transmission Index (RASTI)*;

No Quadro 7.1 é apresentado um resumo das salas abrangidas na presente comparação, contando com a presença das respectivas funções principais e dos seus usos predominantes, associados à palavra, à música ou a ambos, indicado pelo símbolo (X).

Quadro 7.1 – Comparação de diversas funções, entre vinte e duas salas de espectáculos nacionais.

Salas	Funções Usuais	Palavra	Música
Coliseu Porto Ageas	Música, teatro, entretenimento, ópera, dança, circo, cinema, eventos	X	X
Teatro Diogo Bernardes (Ponte de Lima) [78]	Teatro, música, dança	X	X
Teatro Sá da Bandeira (Porto) [79]	Teatro, música, comédia, conferências e eventos	X	X
Cine-Teatro Garrett (Póvoa de Varzim) [80]	Teatro, cinema, palestras, conferências, música e eventos corporativos	X	X
Teatro Carlos Alberto (Porto) [81]	Teatro, eventos de musicais e dança	X	X
Theatro Circo (Braga) [82]	Teatro, espectáculos musicais, dança, palestras e entretenimento	X	X
Teatro Jordão (Guimarães) [83]	Música, teatro, dança e cinema	X	X
Teatro Ribeiro Conceição (Lamego) [84]	Teatro, cinema, espectáculos musicais, danças, palestras e entretenimento	X	X
Teatro Nacional São João (Porto) [85]	Ópera e teatro	X	X
Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo) [86]	Teatro, música, dança e cinema	X	X
Auditório do Conservatório de Música do Porto [87]	Concertos, ciclos de recitais, orquestras, conferências, exposições e espectáculos de dança	-	X
Teatro Municipal de Ourém [88]	Teatro, cinema e eventos corporativos	X	X
Teatro Municipal da Covilhã [89]	Música e teatro	X	X
Cineteatro de Amarante [90]	Espectáculos		X

Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia [91]	Palavra e cinema	X	X
Casa da Cultura de Ílhavo [92]	Espectáculos, congressos, seminários, convenções, eventos corporativos e sociais, cursos, exposições e apresentações	X	-
Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra) [93]	Eventos de música, teatro e entretenimento	X	X
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares) [94]	Cinema, teatro, concertos e palestras	X	X
Centro de Artes de Águeda [95]	Dança clássica e contemporânea, música, teatro e cinema	X	X
Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga [96]	Seminários, conferências, formações e debate	X	-
Grande Auditório do Altice Fórum Braga [96]	Conferências e seminários, espectáculos musicais, infantis, teatro, dança e <i>stand up comedy</i>	X	X
Auditório da FEUP (Porto) [97]	Palavra e música	X	-

7.2 SALAS NACIONAIS

7.2.1 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

No Quadro 7.2 são apresentados os valores do Tempo de Reverberação das vinte e duas salas de espectáculos nacionais e do Coliseu do Porto, assim como o volume, número de lugares e a relação volume por capacidade de lugares.

Os valores médios de TR [500, 1k Hz] das salas nacionais, sem ocupação, analisadas para comparação variam entre 0,5 s (Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga) e 1,5 s (Auditório da FEUP e Grande Auditório do Convento S. Francisco). A média e mediana entre todas as salas comparadas é de 1,1 s e 1,0 s, respectivamente. O Coliseu do Porto, com um TR médio de 2,67 s, situa-se significativamente acima destes valores, demonstrando assim uma resposta acústica extremamente reverberante dentro do panorama das salas de espectáculos nacionais.

A análise da relação entre o Tempo de Reverberação e o volume revela que, apesar de as salas de maior dimensão tendam a apresentar um TR superior, como observado no Grande Auditório

do Convento S. Francisco, com volume de 12000 m^3 e TR médio de 1,5 s, o Coliseu do Porto demonstra um valor muito acima do esperado, se seguindo a tendência logarítmica das outras salas de espectáculos. Espaços com uma acústica mais seca e controlada, com um valor de TR menor, como o Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga, com TR de 0,5 s e volume de 1320 m^3 , são otimizados para a palavra. O Coliseu do Porto reflecte o oposto, ao possuir uma grande capacidade de armazenamento de energia sonora, motivada pela sua grande dimensão, é mais indicado para sessões de música que sejam positivamente afectadas pela grande capacidade reverberante da sala, como por exemplo, seria a música de órgão.

O rácio volume/número de lugares permite verificar o impacto da densidade de ocupação no comportamento de salas de espectáculo. Salas com um rácio elevado, como o Auditório do Conservatório de Música do Porto, com $13,7 \text{ m}^3/\text{lugar}$, tendem a apresentar um TR relativamente alto, de 1,28 s. Espaços com rácios mais baixos, como o Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga, com $5,2 \text{ m}^3/\text{lugar}$, possuem TR médios mais baixos, de 0,5 s. O Coliseu do Porto possui um rácio de $8,5 \text{ m}^3/\text{lugar}$ com 2,67 s de TR médio. Isto é mais um indicativo de um comportamento acústico com uma cauda reverberante dominante e de um distanciamento em relação às salas de espectáculo da amostra em estudo.

Para uma mais fácil visualização do comportamento das salas em comparação, os gráficos de dispersão com linha de tendência logarítmica, apresentam-se pelas figuras 7.1, 7.2 e 7.3, relativas ao valor de TR [500, 1k Hz] em função do volume, da capacidade e do rácio volume/número de lugares, respectivamente. Nos dois primeiros gráficos, figura 7.1 e 7.2, as linhas de tendência possuem um R^2 (coeficiente de determinação) de aproximadamente 0,46, que traduz uma fraca correlação entre os parâmetros, sendo que é possível observar uma dispersão dos mesmos, evidenciando que o volume e a lotação não justificam, por si só, a variabilidade do tempo de reverberação da amostra, não sendo por isso possível prever o TR médio a partir dos mesmos. Na figura 7.3, a linha de tendência possui um R^2 de 0,02 mostra uma ausência de correlação relevante entre o rácio do volume e o número de cadeiras e o TR médio entre as várias salas. Nos três gráficos, para além da grande dispersão das salas é também possível aferir o grande afastamento do ponto indicativo do Coliseu do Porto em relação às outras salas, demonstrando assim o facto de o Coliseu ser um *outlier* em relação às outras salas, tanto acusticamente como volumetricamente.

Quadro 7.2 – Volume, Número de Lugares, Volume por assento e Tempo de Reverberação médio [500, 1k Hz] de vinte e duas salas nacionais e do Coliseu do Porto (+,-: maior e menor valor em cada coluna) [78][79][80][81][82][83][84][85][86][87][88][89][90][91][92][93][94][95][96][97].

Salas	Volume (m³)	N.º de Lugares	Volume/ N.º Lugares (m³)	TR [500,1k Hz] (s)
Coliseu do Porto Ageas	(++) 25091	(++) 2955	8,5	(++) 2,67
Teatro Diogo Bernardes (Ponte de Lima)	2590	245	10,6	0,99
Teatro Sá da Bandeira (Porto)	5520	792	7,0	0,85
Cine-Teatro Garrett (Póvoa de Varzim)	5320	471	11,3	0,99
Teatro Carlos Alberto (Porto)	3315	250	13,3	1,20
Theatro Circo (Braga)	9800	897	10,9	1,18
Teatro Jordão (Guimarães)	2230	386	5,8	0,70
Teatro Ribeiro Conceição (Lamego)	4184	417	10,0	1,05
Teatro Nacional São João (Porto)	4560	614	7,4	1,20
Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo)	2491	378	6,6	1,21
Auditório do Conservatório de Música do Porto	3192	(-) 233	(+) 13,7	1,28
Teatro Municipal de Ourém	3915	441	8,9	1,00
Teatro Municipal da Covilhã	4258	600	7,1	1,40
Cineteatro de Amarante	2700	386	7,0	1,20
Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia	3219	330	9,8	0,80
Casa da Cultura de Ílhavo	3779	491	7,7	1,00
Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra)	(+) 12000	(+) 1093	11,0	(+) 1,50
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares)	2111	275	7,7	1,00
Centro de Artes de Águeda	5066	398	12,7	0,80
Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga	(-) 1320	254	(-) 5,2	(-) 0,50
Grande Auditório do Altice Fórum Braga	9150	998	9,2	1,00
Auditório da FEUP (Porto)	3317	500	6,6	(+) 1,50
Média	5415	609	9,0	1,1
Mediana	3847	429	8,7	1,0

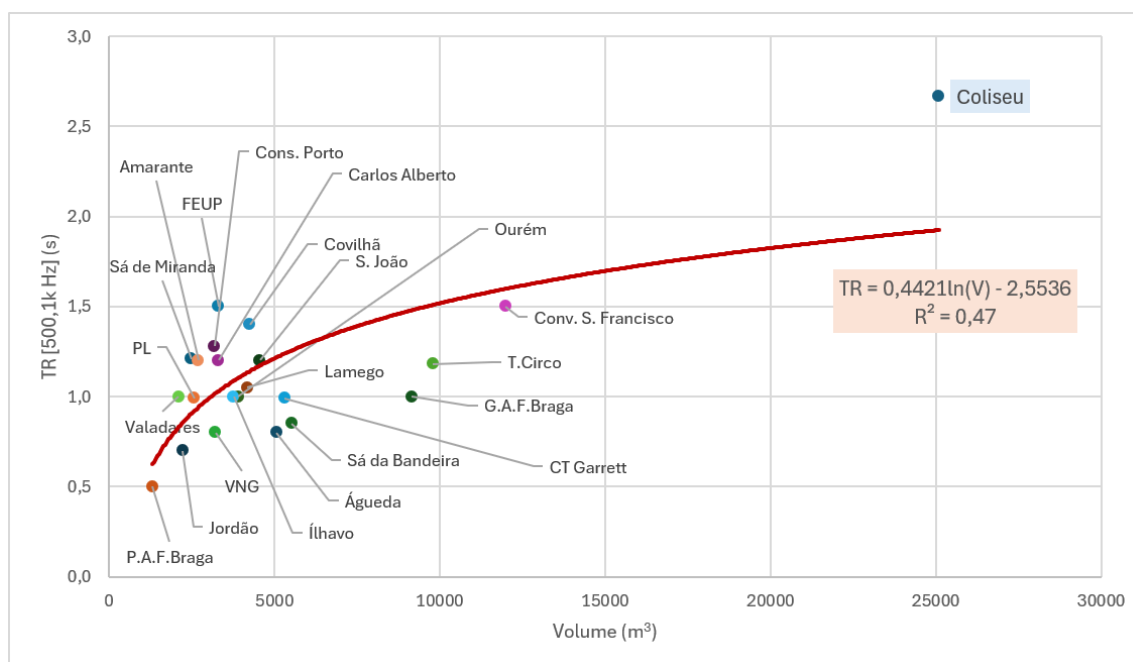


Figura 7.1 – Valores do parâmetro TR [500, 1k Hz] em função do volume de vinte e duas salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (logarítmica).

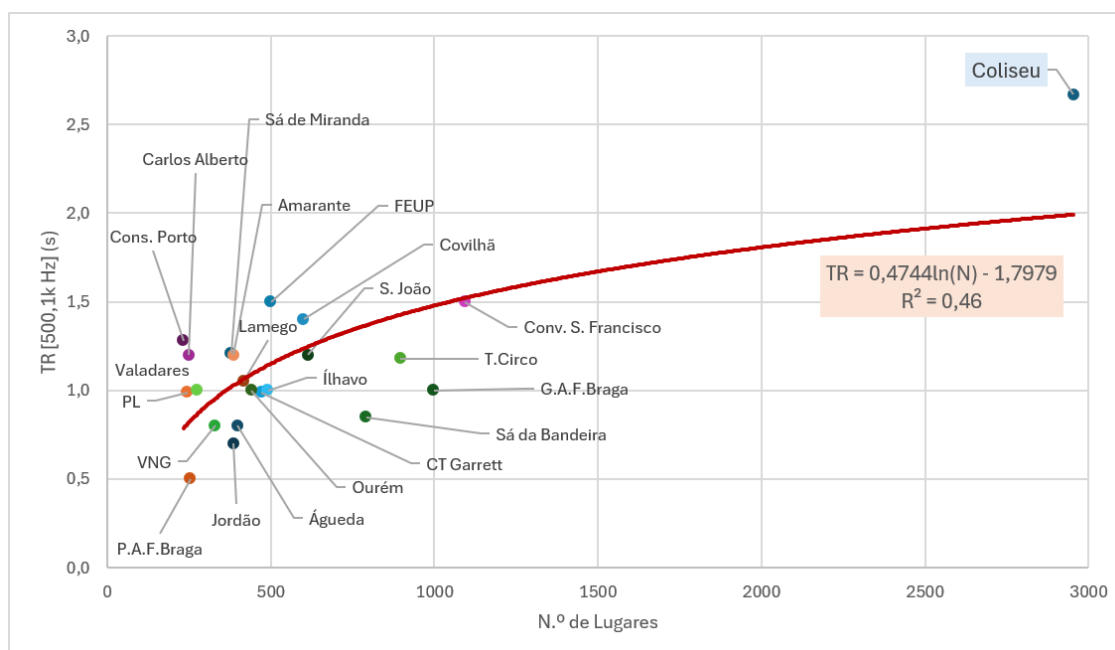


Figura 7.2 – Valores do parâmetro TR [500, 1k Hz] em função do número de lugares de vinte e duas salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (logarítmica).

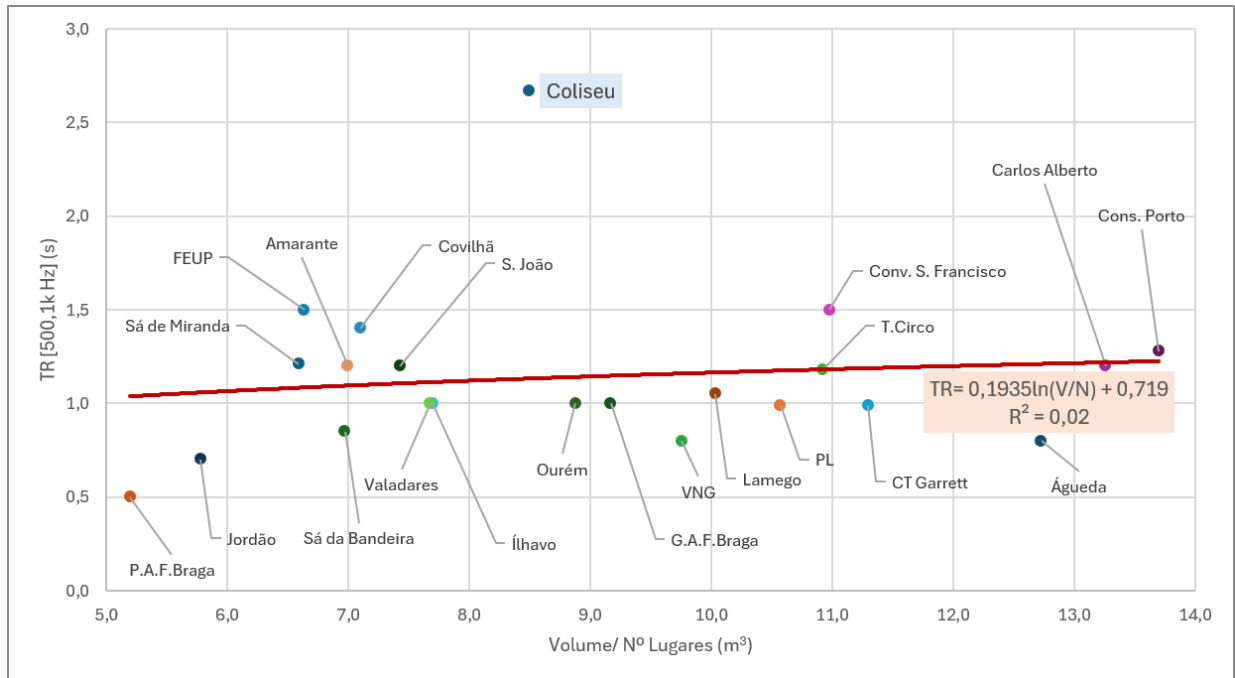


Figura 7.3 – Valores do parâmetro TR [500, 1k Hz] em função do rácio volume/número de lugares de vinte e duas salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (logarítmica).

A avaliação do Tempo de Reverberação médio [500, 1k Hz] em função do tipo de utilização de cada sala permite identificar os usos mais adequados a cada espaço, em actividades com foco na palavra ou nos vários géneros musicais. Os valores de TR considerados ideais a cada uso e as salas em estudo, que se enquadram nos mesmos, encontram-se indicados no Quadro 7.3.

As salas de espectáculos do Teatro Carlos Alberto (Porto), Theatro Circo (Braga), Teatro Nacional São João (Porto), Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo), Auditório do Conservatório de Música do Porto e Cineteatro de Amarante não se encontram no Quadro 7.3 devido ao seus TR médios de cerca de 1,2 s e não se enquadrarem nos valores ideais das tipologias apresentadas e serem indicativos da existência de um equilíbrio entre a música e a palavra. O Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga, com um TR médio de 0,5 s, também não se insere em nenhum intervalo ideal, mas é indicativo de uma preferência a funções dedicadas à palavra. O Coliseu do Porto, seguindo o seu elevado TR de 2,7 s, encontra-se especialmente indicado à produção de espectáculos de música sinfónica romântica, música de órgão ou cantos gregorianos.

Quadro 7.3 – Verificação dos valores ideais do parâmetro Tempo de Reverberação médio [500, 1k Hz] de acordo com vários tipos de função de vinte e duas salas nacionais e do Coliseu do Porto [1].

Função	TR [500, 1k Hz] ideal (s)	Salas Adequadas
Auditório (palavra)	0,7 a 0,8	Auditório Municipal de V. N. de Gaia, Centro de Artes de Águeda, Teatro Jordão e Teatro Sá da Bandeira, Teatro Diogo Bernardes
Teatro	0,7 a 0,9	Auditório Municipal de V. N. de Gaia, Centro de Artes de Águeda, Cine-Teatro Garrett, Teatro Jordão e Teatro Sá da Bandeira
Cinema	0,8 a 1,0	Auditório Municipal de V. N. de Gaia, Casa da Cultura de Ílhavo, Cineteatro Eduardo Brazão, Centro de Artes de Águeda, Grande Auditório do Altice Fórum Braga, Teatro Municipal de Ourém, Teatro Ribeiro Conceição, Cine-Teatro Garrett e Teatro Sá da Bandeira, Teatro Diogo Bernardes
Ópera (não wagneriana)	1,3 a 1,7	Grande Auditório do Convento S. Francisco, Auditório da FEUP, Teatro Municipal da Covilhã e Teatro Nacional São João
Ópera (wagneriana)	1,8 a 1,9	-
Música sinfónica Barroca	1,4 a 1,6	Auditório da FEUP, Grande Auditório do Convento S. Francisco e Teatro Municipal da Covilhã.
Música sinfónica Clássica	1,6 a 1,8	-
Música sinfónica Romântica	1,9 a 2,2	-
Música sinfónica Moderna	1,4 a 1,9	Auditório da FEUP, Grande Auditório do Convento S. Francisco e Teatro Municipal da Covilhã.
Música popular	0,8 a 1,0	Auditório Municipal de V. N. de Gaia, Casa da Cultura de Ílhavo, Cineteatro Eduardo Brazão, Centro de Artes de Águeda, Grande Auditório do Altice Fórum Braga, Teatro Municipal de Ourém, Teatro Ribeiro Conceição, Cine-Teatro Garrett e Teatro Sá da Bandeira, Teatro Diogo Bernardes
Música de órgão	2,5 a 3,5	Coliseu do Porto
Coros gregorianos	3 a 4	-

7.2.2 SPEECH TRANSMISSION INDEX (STI)

No Quadro 7.4 encontram-se indicados os valores da análise comparativa de vinte e duas salas nacionais e do Coliseu do Porto, em parâmetros fundamentais para avaliar a inteligibilidade da palavra de um recinto, como o volume, o número de lugares, o índice de transmissão da palavra (STI/RASTI) e o nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}).

O *Speech Transmission Index* (STI) e o *Rapid Speech Transmission Index* (RASTI), o último utilizado em testes realizados em anos mais distantes, são apresentados com valores mínimos de 0,44, considerado “Medíocre”, no Coliseu do Porto, seguido por 0,53, considerado “Suficiente”, no Teatro Sá de Miranda. O valor mais elevado de STI é de 0,80, relativo ao Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga, que possui uma classificação de “Excelente” [1].

Verifica-se que a maioria das salas possuem valores compreendidos entre 0,6 e 0,7, com uma média global de 0,63 e uma mediana de 0,62, indicativos de uma classificação “Boa” para a inteligibilidade da palavra. Confirma-se uma tendência de valores mais elevados de STI em salas de um volume inferior e valores de STI mais baixos em relação a volumes mais elevados.

A Figura 7.4 apresenta a relação dos valores dos parâmetros STI ou RASTI, em função de TR [500, 1k Hz] entre todas as salas na amostra e demonstra uma linha de tendência logarítmica com um R^2 de 0,65, indicativo de uma correlação moderada e de alguma dispersão entre pontos. Verifica-se que existe uma tendência de o STI diminuir com o aumento do TR [500, 1k Hz].

Analisando o ruído de fundo, no Quadro 7.4, verifica-se que os valores de L_{Aeq} , sem AVAC, se mantêm baixos, com valor médio e mediano de 25 dB. O Coliseu do Porto, com um L_{Aeq} de 24 dB, possui um nível sonoro equivalente do ruído de fundo equivalente ao das outras salas nacionais. Com o funcionamento de AVAC, dá-se um aumento do L_{Aeq} para uma média e mediana de 35 e 34 dB, respectivamente. Neste último, não existem dados do Coliseu do Porto pois o mesmo não possui AVAC.

A Figura 7.5 expõe graficamente a relação dos valores dos parâmetros STI ou RASTI, em função do nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}), sem AVAC, para todas as salas testadas. A linha de tendência exponencial com um R^2 de 0,07 e a grande dispersão dos pontos das salas, são indicativos de uma correlação quase nula entre ambos os parâmetros, não sendo por isso possível prever valores entre os mesmos.

Quadro 7.4 – Volume, Número de Lugares, STI médio e Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}) de vinte e duas salas nacionais e do Coliseu do Porto (+,-: maior e menor valor em cada coluna) [78][79][80][81][82][83][84][85][86][87][88][89][90][91][92][93][94][95][96][97].

Salas	Volume (m ³)	N.º de Lugares	STI/RASTI médio	L_{Aeq} (sem AVAC) (dB)	L_{Aeq} (com AVAC) (dB)
Coliseu do Porto Ageas	(++) 25091	(++) 2955	(-) 0,44	24	NA
Teatro Diogo Bernardes (Ponte de Lima)	2590	245	0,62	24	(-) 26
Teatro Sá da Bandeira (Porto)	5520	792	0,62	24	42
Cine-Teatro Garrett (Póvoa de Varzim)	5320	471	0,67	25	NA
Teatro Carlos Alberto (Porto)	3315	250	0,64	26	31
Theatro Circo (Braga)	9800	897	0,59	29	35
Teatro Jordão (Guimarães)	2230	386	0,69	25	32
Teatro Ribeiro Conceição (Lamego)	4184	417	0,55	25	31
Teatro Nacional São João (Porto)	4560	614	0,55	31	28
Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo)	2491	378	0,53	26	NA
Auditório do Conservatório de Música do Porto	3192	(-) 233	0,62	(-) 22	32
Teatro Municipal de Ourém*	3915	441	0,69	24	37
Teatro Municipal da Covilhã*	4258	600	0,64	23	41
Cineteatro de Amarante*	2700	386	0,62	23	34
Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia*	3219	330	0,68	24	(+) 47
Casa da Cultura de Ílhavo*	3779	491	0,68	25	39
Grande Auditório do Convento S. Francisco (Coimbra)*	(+) 12000	(+) 1093	0,61	27	30
Cineteatro Eduardo Brazão (Valadares)*	2111	275	0,60	(+) 32	37
Centro de Artes de Águeda*	5066	398	0,67	26	31

Pequeno Auditório do Altice Fórum Braga*	(-) 1320	254	(+) 0,80	24	31
Grande Auditório do Altice Fórum Braga*	9150	998	0,67	24	34
Auditório da FEUP (Porto)*	3317	500	0,61	27	43
Média	5415	609	0,63	25	35
Mediana	3847	429	0,62	25	34

* - Sala na qual foi utilizado RASTI; NA – Não avaliado

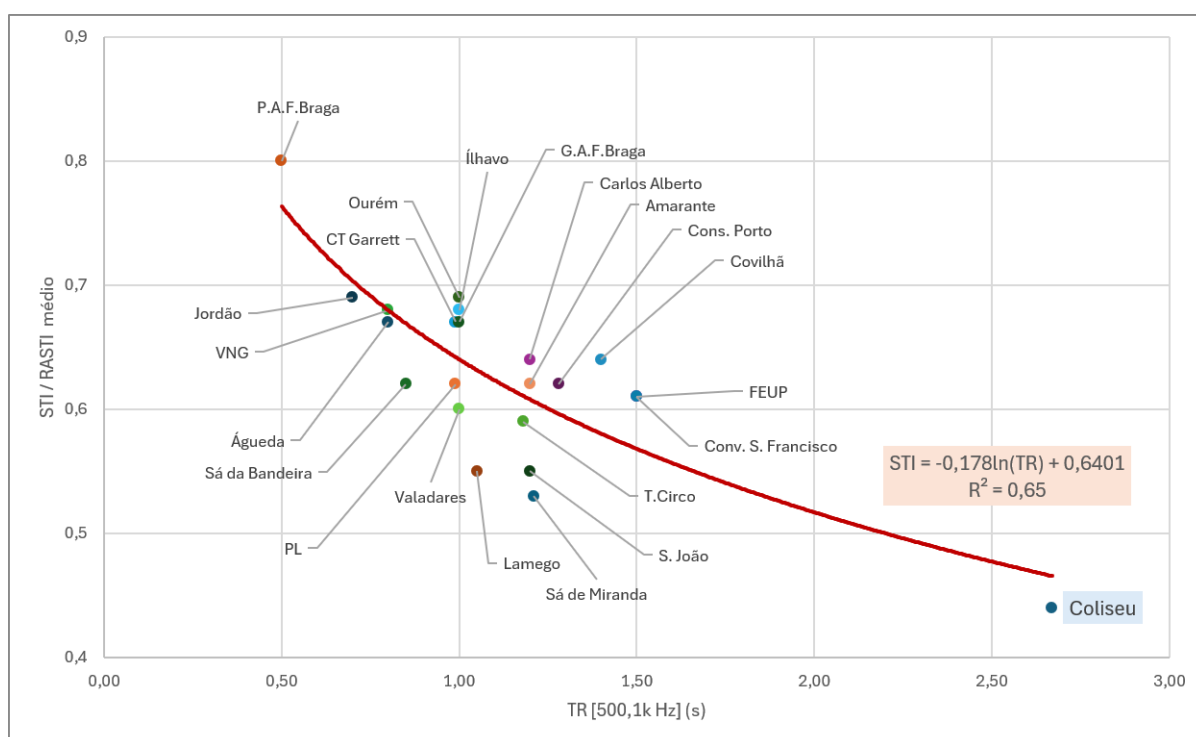


Figura 7.4 – Valores dos parâmetros STI ou RASTI, em função de TR [500, 1k Hz] de vinte e duas salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (logarítmica).

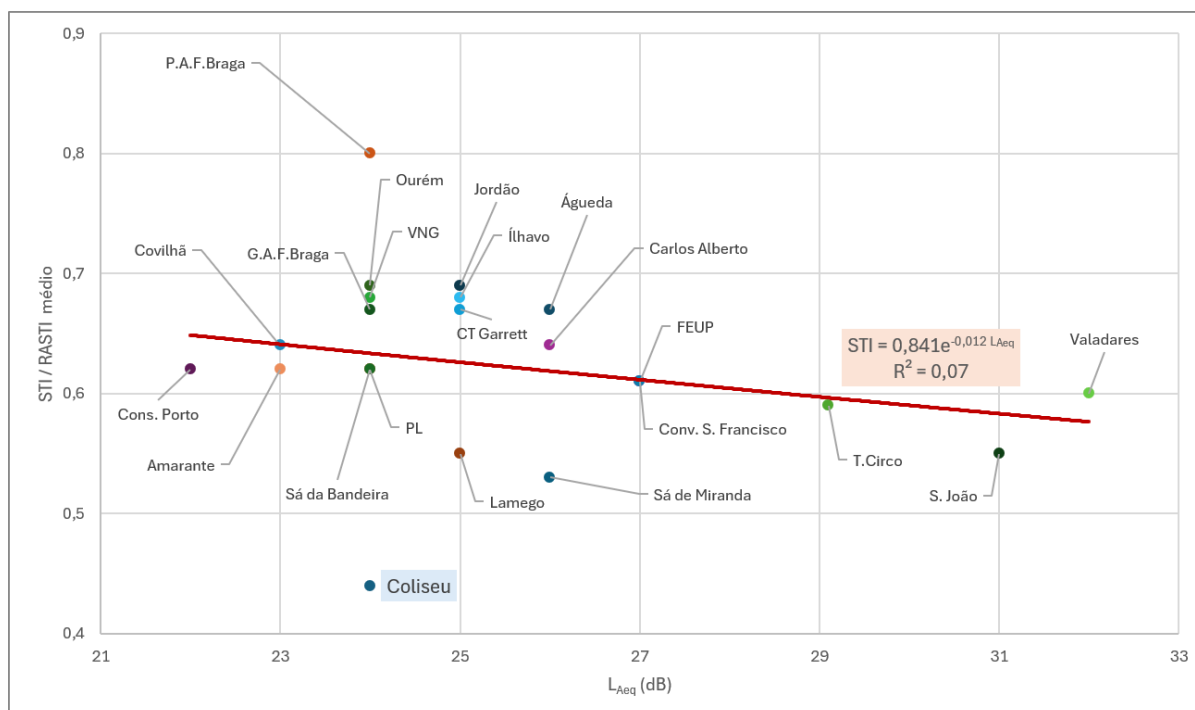


Figura 7.5 – Valores dos parâmetros STI ou RASTI, em função do Nível sonoro equivalente do ruído de fundo (L_{Aeq}), sem AVAC, de vinte e duas salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (exponencial).

7.2.3 CLARIDADE (C_{80})

No Quadro 7.5 são apresentados os valores do parâmetro Claridade (C_{80}), em bandas de 1/1 de oitava, entre os 125 e os 8k Hz, e o seu valor médio C_{80} [500, 1k Hz], para dez salas da amostra em estudo, Teatro Diogo Bernardes (Ponte de Lima), Teatro Sá da Bandeira (Porto), Cine-Teatro Garrett (Póvoa de Varzim), Teatro Carlos Alberto (Porto), Theatro Circo (Braga), Teatro Jordão (Guimarães), Teatro Ribeiro Conceição (Lamego), Teatro Nacional São João (Porto), Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo) e o Auditório do Conservatório de Música do Porto, e para o Coliseu do Porto. A amostra para este parâmetro é menor devido à falta de dados presentes em dissertações de anos mais afastados.

Verifica-se que os valor da Claridade em todas as frequências e em C_{80} [500, 1k Hz] no Coliseu do Porto é muito inferior aos valores existentes em outras salas, na média e na mediana dos mesmos. Como visto anteriormente, no capítulo 6.6, o Coliseu é mais indicado a certos tipos de música, inclusive à romântica, de órgão e a coros gregorianos. As restantes salas possuem valores médios mais elevados, com o valor máximo de 8,4 dB no Teatro Jordão, muito propícios

a funções da palavra, cinema, música popular (C_{80} acima de 6 dB) e ópera não wagneriana (C_{80} acima de 3 dB) [1].

Quadro 7.5 – Valores da Claridade (C_{80}) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8k Hz e o valor médio e mediano de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto (+,-: maior e menor valor em cada coluna) [78][79][80][81][82][83][84][85][86][87].

Salas	Frequência (Hz)							C_{80} [500, 1k Hz] (dB)
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Coliseu do Porto Ageas	-0,2	0,6	-0,1	-0,8	-2,1	-0,7	3,7	(-) -0,5
Teatro Diogo Bernardes (Ponte de Lima)	6,1	5,2	4,3	5,1	4,5	6,3	8,9	4,7
Teatro Sá da Bandeira (Porto)	7,3	6,4	6,2	6,4	6,7	5,4	8,1	6,1
Cine-Teatro Garrett (Póvoa de Varzim)	2,5	5,9	8,4	7,5	6,5	8,6	10,9	7,2
Teatro Carlos Alberto (Porto)	9,1	5,8	6,2	5,3	4,6	5,6	7,6	5,7
Theatro Circo (Braga)	1,9	3,1	4,2	2,9	3,3	5,3	9,8	3,6
Teatro Jordão (Guimarães)	4,3	8,8	9,1	7,7	8,6	10,3	12,9	(+) 8,4
Teatro Ribeiro Conceição (Lamego)	4,7	6,2	5,4	5,8	5,8	7,0	9,5	5,6
Teatro Nacional São João (Porto)	4,2	4,7	4,9	5,2	6,2	7,5	10,5	5,1
Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo)	2,0	3,5	4,1	2,8	4,0	6,5	9,8	3,5
Auditório do Conservatório de Música do Porto	2,9	4,9	5,1	4,3	6,8	9,5	13,8	4,7
Média	4,1	5,0	5,2	4,7	5,0	6,5	9,6	4,9
Mediana	4,2	5,2	5,1	5,2	5,8	6,5	9,8	5,1

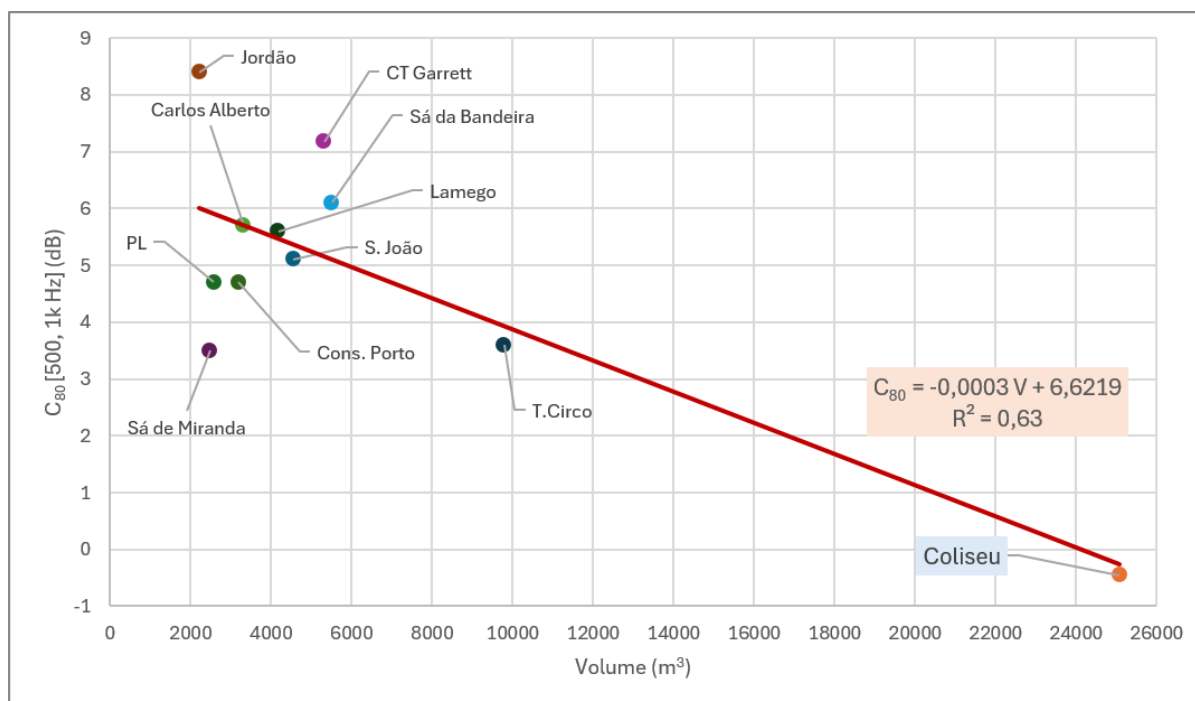


Figura 7.6 – Valores da Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz] em função do volume de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (linear).

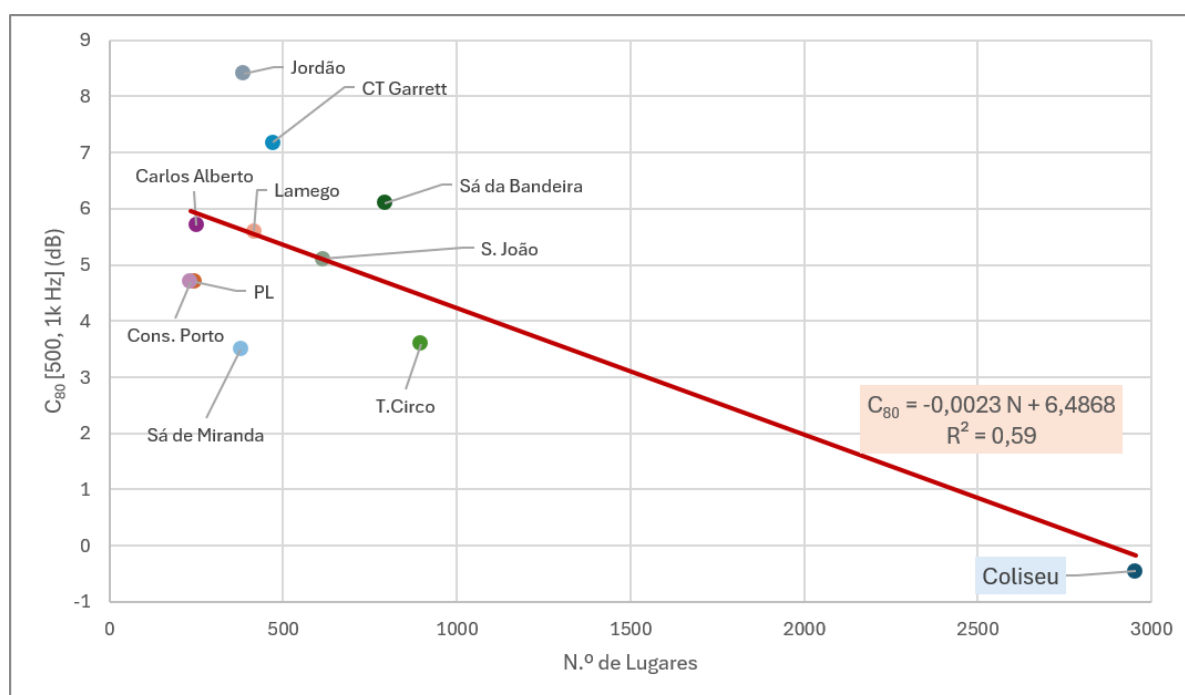


Figura 7.7 – Valores da Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz] em função do número de lugares de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (linear).

As Figuras 7.6 e 7.7 demonstram graficamente a relação entre os valores de C_{80} [500, 1k Hz] e o volume e o número de lugares, respectivamente. Ambas as linhas de tendência lineares

demonstram uma tendência de a Claridade diminuir com o aumento, tanto do volume, como do número de cadeiras. Com R^2 a rondar os 0,60, considera-se que ambas as linhas de tendência apresentam uma correlação moderada entre os parâmetros, apesar da existência de alguma dispersão dos pontos indicativos de salas de espetáculos. Também se verifica neste parâmetro o distanciamento acentuado do Coliseu do Porto a outras salas, dependente do seu grande volume e falta de materiais absorventes na sala.

7.2.4 DEFINIÇÃO (D_{50})

No Quadro 7.6 são apresentados os valores do parâmetro Definição (D_{50}), em bandas de 1/1 de oitava, entre os 125 e os 8k Hz, e o seu valor médio D_{50} [500, 1k Hz], para dez salas da amostra em estudo, Teatro Diogo Bernardes (Ponte de Lima), Teatro Sá da Bandeira (Porto), Cine-Teatro Garrett (Póvoa de Varzim), Teatro Carlos Alberto (Porto), Theatro Circo (Braga), Teatro Jordão (Guimarães), Teatro Ribeiro Conceição (Lamego), Teatro Nacional São João (Porto), Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo) e o Auditório do Conservatório de Música do Porto, e para o Coliseu do Porto.

A Definição no Coliseu do Porto, sendo um parâmetro mais associado à percepção da palavra, segue a propensão de outros parâmetros previamente abordados. Os valores no Coliseu são menores quando comparados com os valores de outras salas, tanto nas bandas de frequências como nos valores médios de D_{50} [500, 1k Hz], sendo que este último é de 0,37, que, quando comparado com o valor máximo de 0,74 no Teatro Jordão, demonstra a insuficiente definição da palavra no Coliseu.

Nas figuras 7.8 e 7.9, demonstra-se graficamente a tendência do parâmetro Definição diminuir com o aumento do volume e com o aumento da capacidade da sala, respectivamente. Com R^2 com valores de cerca de 0,60, considera-se que existe uma correlação de grau moderado, com uma relação visível entre parâmetros, mas com alguma dispersão dos pontos relativos às diferentes salas.

Quadro 7.6 – Valores da Definição (D_{50}) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8k Hz e o valor médio e mediano de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto (+,-: maior e menor valor em cada coluna) [78][79][80][81][82][83][84][85][86][87].

Salas	Frequência (Hz)							D_{50} [500, 1k Hz]
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Coliseu do Porto Ageas	0,37	0,46	0,39	0,35	0,29	0,33	0,48	(-) 0,37
Teatro Diogo Bernardes (Ponte de Lima)	0,62	0,60	0,59	0,59	0,58	0,65	0,77	0,59
Teatro Sá da Bandeira (Porto)	0,66	0,64	0,65	0,63	0,64	0,64	0,77	0,64
Cine-Teatro Garrett (Póvoa de Varzim)	0,49	0,75	0,77	0,72	0,74	0,79	0,83	0,73
Teatro Carlos Alberto (Porto)	0,70	0,64	0,66	0,56	0,67	0,65	0,81	0,61
Theatro Circo (Braga)	0,47	0,56	0,61	0,52	0,54	0,65	0,82	0,56
Teatro Jordão (Guimarães)	0,56	0,76	0,77	0,71	0,76	0,81	0,87	(+) 0,74
Teatro Ribeiro Conceição (Lamego)	0,6	0,64	0,64	0,67	0,67	0,73	0,81	0,65
Teatro Nacional São João (Porto)	0,51	0,6	0,59	0,62	0,70	0,76	0,83	0,61
Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo)	0,48	0,54	0,56	0,51	0,58	0,70	0,82	0,54
Auditório do Conservatório de Música do Porto	0,41	0,63	0,64	0,62	0,73	0,83	0,91	0,63
Média	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,6
Mediana	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,6

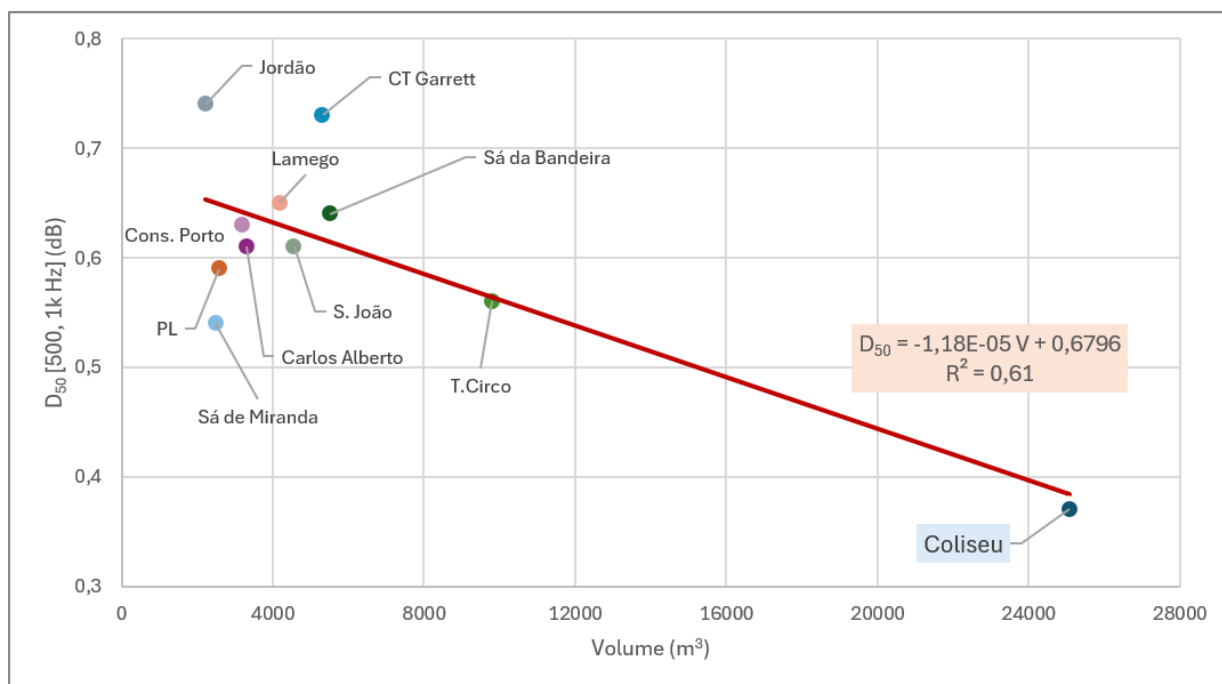


Figura 7.8 – Valores da Definição (D_{50}) [500, 1k Hz] em função do número de lugares de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (linear).

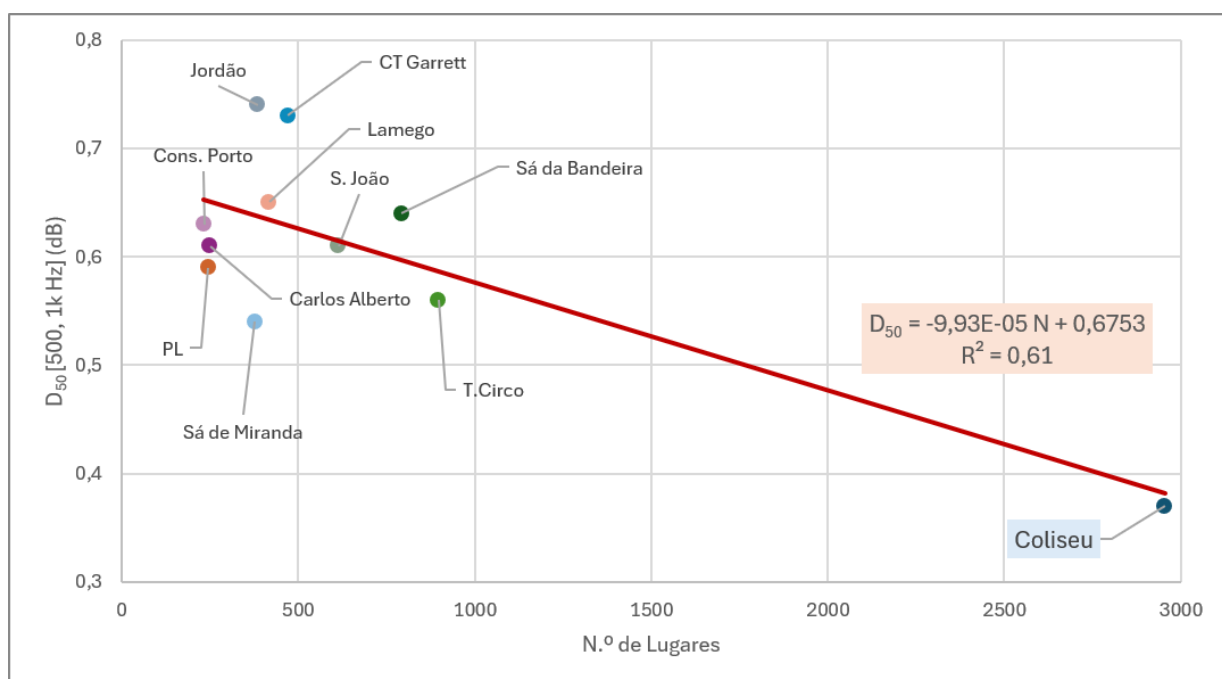


Figura 7.9 – Valores da Definição (D_{50}) [500, 1k Hz] em função do número de lugares de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (linear).

7.2.5 TEMPO CENTRAL (TS)

No Quadro 7.7 são apresentados os valores do parâmetro Tempo Central (TS), em bandas de 1/1 de oitava, entre os 125 e os 8k Hz, e o seu valor médio TS [500, 1k Hz], para dez salas da amostra em estudo e para o Coliseu do Porto.

É possível ver que os valores obtidos no Tempo Central no Coliseu do Porto são muito mais elevados do que os valores correspondentes às outras salas, tanto na banda de frequências, como nos valores TS [500, 1k Hz], com o Coliseu com um TS médio de 162 ms e o Theatro Circo, sendo o segundo valor mais elevado, com 76 ms. Também existe uma grande diferença entre o TS médio do Coliseu com a média e a mediana de todas as salas, que possuem valores de 69 e 60 ms, respectivamente. O valor mais baixo entre todas as salas é de 41 ms no Teatro Jordão. É verificada novamente a grande disparidade de valores entre o Coliseu e as outras salas de espectáculos estudadas, na maior parte dos parâmetros acústicos, que reafirmam a existência de grandes reverberações na sala principal do Coliseu do Porto.

As Figuras 7.10 e 7.11 representam graficamente a relação entre os valores de Tempo Central médio [500, 1k Hz], com o volume e com a capacidade das salas, respectivamente. Ambos os gráficos apresentam linhas de tendência exponenciais com valores de R^2 de cerca de 0,92. Em ambos casos, considera-se que existe uma correlação, entre o Tempo Central e o volume e o número de lugares, muito forte, em que o nível de dispersão dos pontos da sala é mínimo. É neste caso possível utilizar-se a relação entre estes parâmetros para se realizarem previsões em situações diferentes às expostas neste estudo. Pode-se afirmar que o Tempo Central aumenta com o aumento do volume e capacidade.

Quadro 7.7 – Valores do Tempo Central (TS) em bandas de 1/1 oitava de 125 a 8k Hz e o valor médio e mediano de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto (+,-: maior e menor valor em cada coluna) [78][79][80][81][82][83][84][85][86][87].

Salas	Frequência (Hz)							TS [500, 1k Hz] (ms)
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Coliseu do Porto Ageas	163	142	154	170	197	158	76	(+) 162
Teatro Diogo Bernardes (Ponte de Lima)	83	68	68	59	60	49	32	63
Teatro Sá da Bandeira (Porto)	75	64	57	58	54	54	36	57
Cine-Teatro Garrett (Póvoa de Varzim)	126	63	44	50	45	35	24	55
Teatro Carlos Alberto (Porto)	71	66	58	68	56	57	31	63
Theatro Circo (Braga)	118	85	71	80	75	56	28	76
Teatro Jordão (Guimarães)	89	48	40	42	36	28	21	(-) 41
Teatro Ribeiro Conceição (Lamego)	90	69	61	55	51	42	28	58
Teatro Nacional São João (Porto)	84	69	62	59	48	38	24	60
Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo)	97	73	70	75	63	43	26	73
Auditório do Conservatório de Música do Porto	86	54	56	64	45	28	14	60
Média	98	72	67	70	66	53	30	69
Mediana	89	68	61	59	54	43	28	60

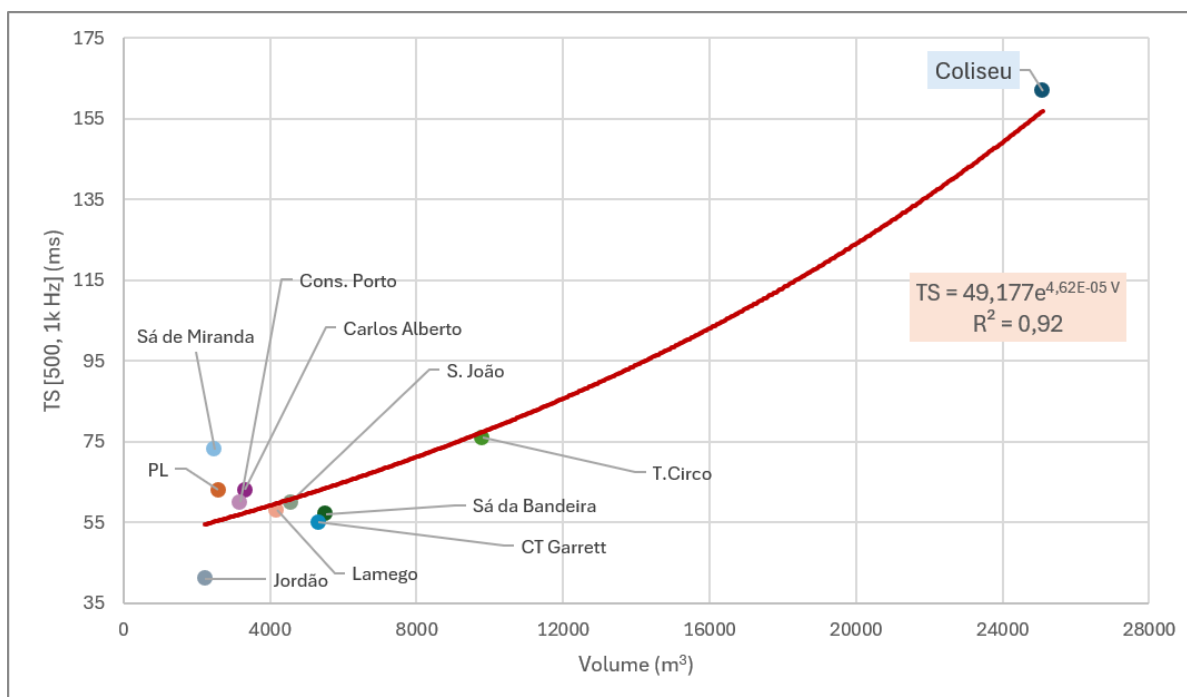


Figura 7.10 – Valores do Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] em função do volume de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (exponencial).

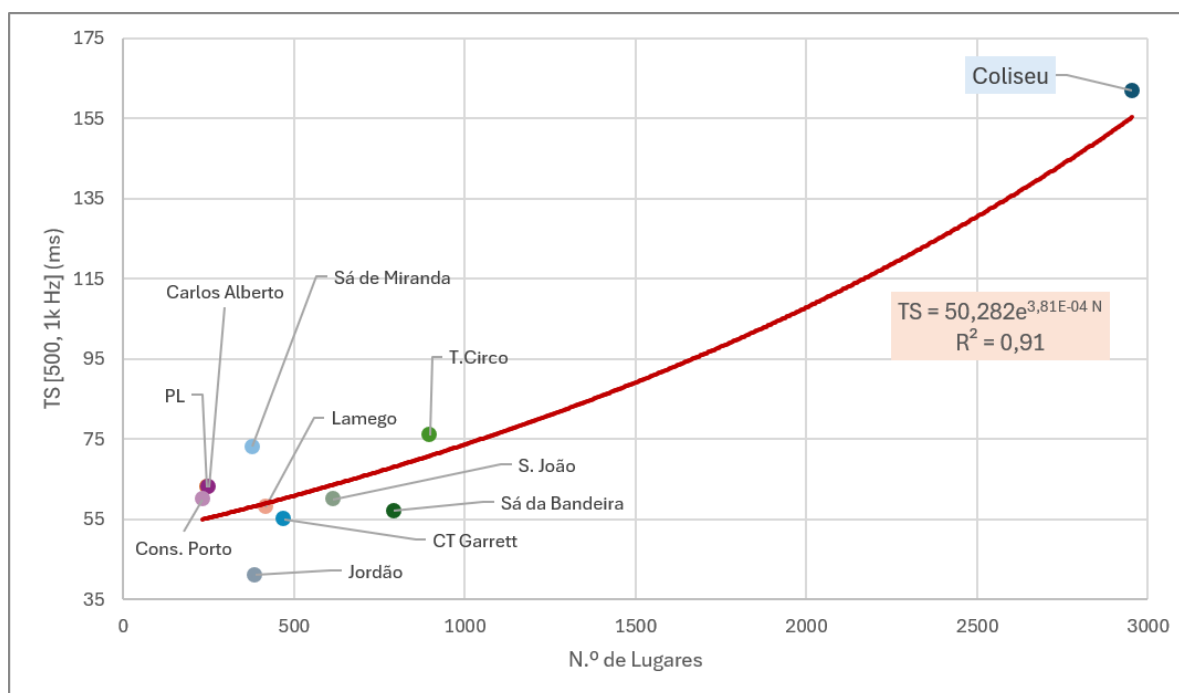


Figura 7.11 – Valores do Tempo Central (TS) [500, 1k Hz] em função do número de lugares de dez salas nacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (exponencial).

7.3 SALAS INTERNACIONAIS

7.3.1 INTRODUÇÃO

Como não foi possível retirar conclusões conclusivas sobre o Coliseu do Porto, quando comparado com outras salas nacionais de espectáculo, devido à grande diferença de volume e capacidade entre as salas e o Coliseu (sala vazia, com cadeiras na plateia), foi considerado essencial realizar uma comparação com salas de semelhante volumetria. Os dados utilizados foram retirados do livro “*Concert halls and opera houses: music, acoustics, and architecture*” de Leo Beranek, onde foram seleccionadas apenas salas de volume compreendido entre 21.000 e 29.000 m³. Retiraram-se apenas valores relativos à média das frequências 500 e 1k Hz, a ensaios realizados com salas desocupadas, nos parâmetros de Tempo de Reverberação e Claridade (C₈₀).

No Quadro 7.8 encontra-se a lista de todas as salas seleccionadas, com a cidade e o país a que pertencem. A utilização de siglas neste subcapítulo foi considerado necessário devido ao elevado número de salas em estudo, assim como o tamanho considerável dos nomes associados às salas, quando utilizado nos gráficos necessários ao estudo.

Quadro 7.8 – Lista de 26 Salas de Espectáculo Internacionais e do Coliseu do Porto, com a cidade, país e sigla utilizada nos gráficos do capítulo [21].

Salas	Cidade	País	Sigla
Coliseu do Porto	Porto	Portugal	COL
Meyerhoff Symphony Hall	Baltimore	Estados Unidos	MHS
Indiana University Auditorium	Bloomington	Estados Unidos	IUA
Segerstrom Hall (OCPAC)	Costa Mesa	Estados Unidos	SCH
McDermott Concert Hall	Dallas	Estados Unidos	MCH
Koussevitzky Music Shed	Lenox	Estados Unidos	KMS
Metropolitan Opera House	New York	Estados Unidos	MOH
Eastman Theatre	Rochester	Estados Unidos	EAT
Davies Symphony Hall	San Francisco	Estados Unidos	DSH
Sydney Opera House (Concert Hall)	Sydney	Austrália	SOH
Northern Alberta Jubilee Auditorium	Edmonton	Canadá	NAJ

Salle Wilfrid-Pelletier	Montreal	Canadá	SWP
Roy Thomson Hall	Toronto	Canadá	RTH
Opéra Bastille	Paris	França	OPB
Philharmonie	Berlin	Alemanha	PHL
Gewandhaus	Leipzig	Alemanha	GWH
Symphony Hall	Birmingham	Reino Unido	SH
St. David's Hall	Cardiff	Reino Unido	SDH
Royal Concert Hall	Glasgow	Reino Unido	RCH
Royal Festival Hall	London	Reino Unido	RFH
Binyanei Ha'oomah	Jerusalem	Israel	BYH
Fredric R. Mann Auditorium	Tel Aviv	Israel	FMA
Metropolitan Art Space	Tokyo	Japão	MAS
NHK Hall	Tokyo	Japão	NHK
Suntory Hall	Tokyo	Japão	STH
De Doelen	Rotterdam	Países Baixos	DED
Aula Magna	Caracas	Venezuela	AUM

7.3.2 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

De modo a se confrontar os valores obtidos no ensaio do Tempo de Reverberação, no Coliseu do Porto, com valores de salas internacionais, utilizou-se o volume e o número de lugares de vinte e seis salas de espectáculos internacionais, de vários países. Isto encontra-se exemplificado no Quadro 7.9, onde se verifica que o TR médio [500, 1k Hz] varia entre os valores 1,45 e 3,43 segundos, relativos às salas de *Indiana University Auditorium* e *Koussevitzky Music Shed*, respectivamente. É também possível verificar que, apesar de ambas as salas possuírem os extremos dos valores do TR desta amostra, ambas possuem volumes de valores médios, quando comparados com as outras salas. Em relação ao número de lugares, *Koussevitzky Music Shed* possui a maior capacidade presente nesta amostra, de 5121, e a *Indiana University Auditorium* um número de assentos também relativamente elevado, de 3760.

Quadro 7.9 – Lista de 26 salas de espectáculo Internacionais e do Coliseu do Porto, com siglas, volume, nº de lugares e Tempo de Reverberação médio [500, 1k Hz] (+,-: maior e menor valor em cada coluna) [21].

Sigla	Salas	Volume (m3)	Nº lugares	TR [500,1k Hz] (s)
COL	Coliseu	25091	2955	2,67
MHS	Meyerhoff Symphony Hall	21524	2467	2,35
IUA	Indiana University Auditorium	25454	3760	(-) 1,45
SCH	Segerstrom Hall (OCPAC)	27800	2903	2,41
MCH	McDermott Concert Hall	23900	2065	2,75
KMS	Koussevitzky Music Shed	24270	(+) 5121	(+) 3,43
MOH	Metropolitan Opera House	24724	3816	1,78
EAT	Eastman Theatre	24735	3347	1,83
DSH	Davies Symphony Hall	24070	2743	2,27
SOH	Sydney Opera House (Concert Hall)	24600	2679	2,49
NAJ	Northern Alberta Jubilee Auditorium	21500	2678	1,66
SWP	Salle Wilfrid-Pelletier	26500	2982	2,01
RTH	Roy Thomson Hall	(+) 28300	2812	2,16
OPB	Opéra Bastille	(-) 21000	2700	1,71
PHL	Philharmonie	(-) 21000	2325	2,17
GWH	Gewandhaus	(-) 21000	(-) 1900	2,20
SH-O	Symphony Hall (Doors Open)	25000	2211	2,51
SH-C	Symphony Hall (Doors Closed)	25000	2211	2,17
SDH	St. David's Hall	22000	1952	2,15
RCH	Royal Concert Hall	22700	2459	1,95
RFH	Royal Festival Hall	21950	2901	1,64
BYH	Binyanei Ha'oomah	24700	3142	2,02
FMA	Fredric R. Mann Auditorium	21240	2715	1,82
MAS	Metropolitan Art Space	25000	2017	2,60

NHK	NHK Hall	25200	3677	1,98
STH	Suntory Hall	(-) 21000	2006	2,58
DED	De Doelen	24070	2242	2,35
AUM	Aula Magna	24920	2660	1,80
Média		23866	2766	2,17
Mediana		24435	2690	2,17

A Figura 7.12 mostra o gráfico de dispersão, com linha de tendência linear, da relação entre o Tempo de Reverberação [500, 1k Hz] e o volume, em m³, das 26 salas internacionais e do Coliseu do Porto. Verifica-se um pequeno aumento do TR com o volume, contudo, ocorre uma grande dispersão dos pontos relativos às diferentes salas. A linha de tendência também demonstra uma correlação quase nula entre o TR e o volume, com um R² de 0,02. O Coliseu do Porto encontra-se, contudo próximo de valores de outras salas, como o *Metropolitan Art Space* e o *Symphony Hall* (com Portas de Reverberação abertas).

A Figura 7.13 mostra o gráfico de dispersão, com linha de tendência logarítmica, da relação entre o Tempo de Reverberação [500, 1k Hz] e a capacidade, das 26 salas internacionais e do Coliseu do Porto. Neste gráfico verifica-se uma pequena descida do TR com o aumento do número de lugares existentes nas salas. Isto pode ser motivado pelo aumento da absorção sonora por parte dos materiais que constituem os assentos, contudo não é possível chegar-se a uma conclusão concreta, devido à grande dispersão de pontos e ao baixo R² da linha de tendência, que, com um valor de cerca de 0,01 infere uma relação inexistente entre o Tempo de Reverberação e o número de lugares.

Em suma, apesar de se avaliar o Tempo de Reverberação obtido nos testes no Coliseu do Porto, com salas de dimensão semelhante, não se consegue averiguar uma relação relevante entre o Tempo de Reverberação e o Volume e/ou a Capacidade das salas. Apenas foi possível verificar que, para salas de uma volumetria semelhante, o valor obtido no Coliseu não é algo invulgar.

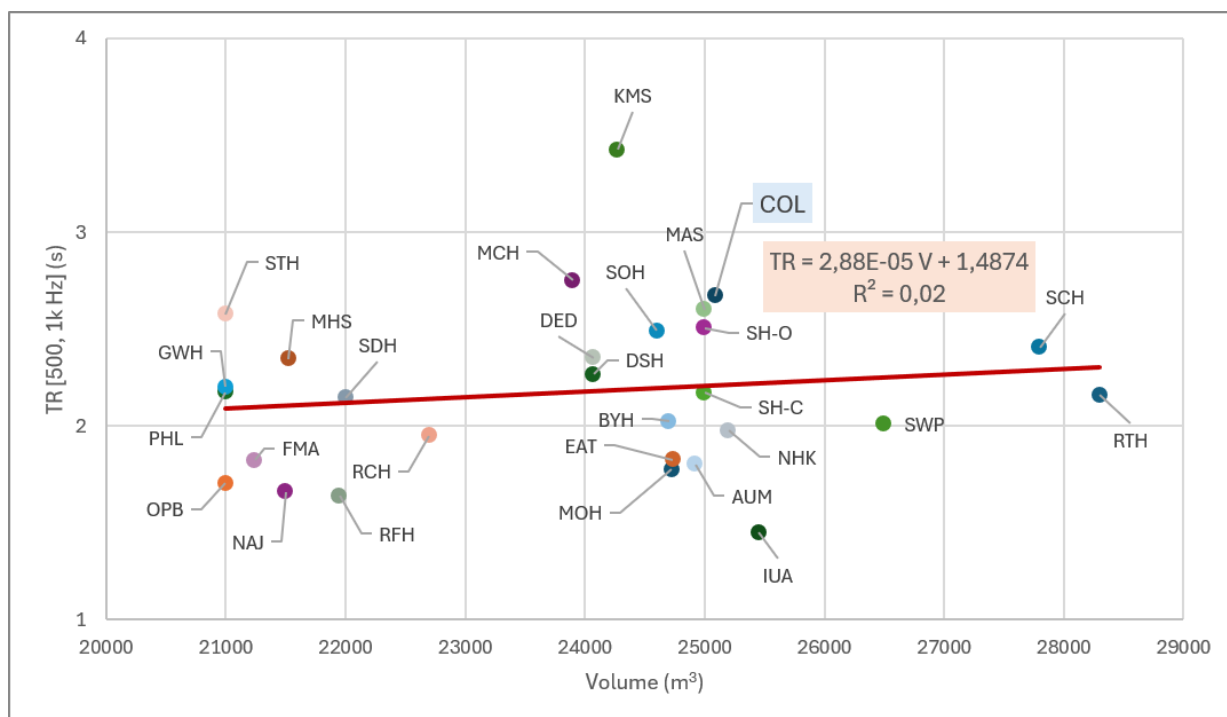


Figura 7.12 – Valores do Tempo de Reverberação (TR) [500, 1k Hz] em função do volume de 26 salas internacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (linear).

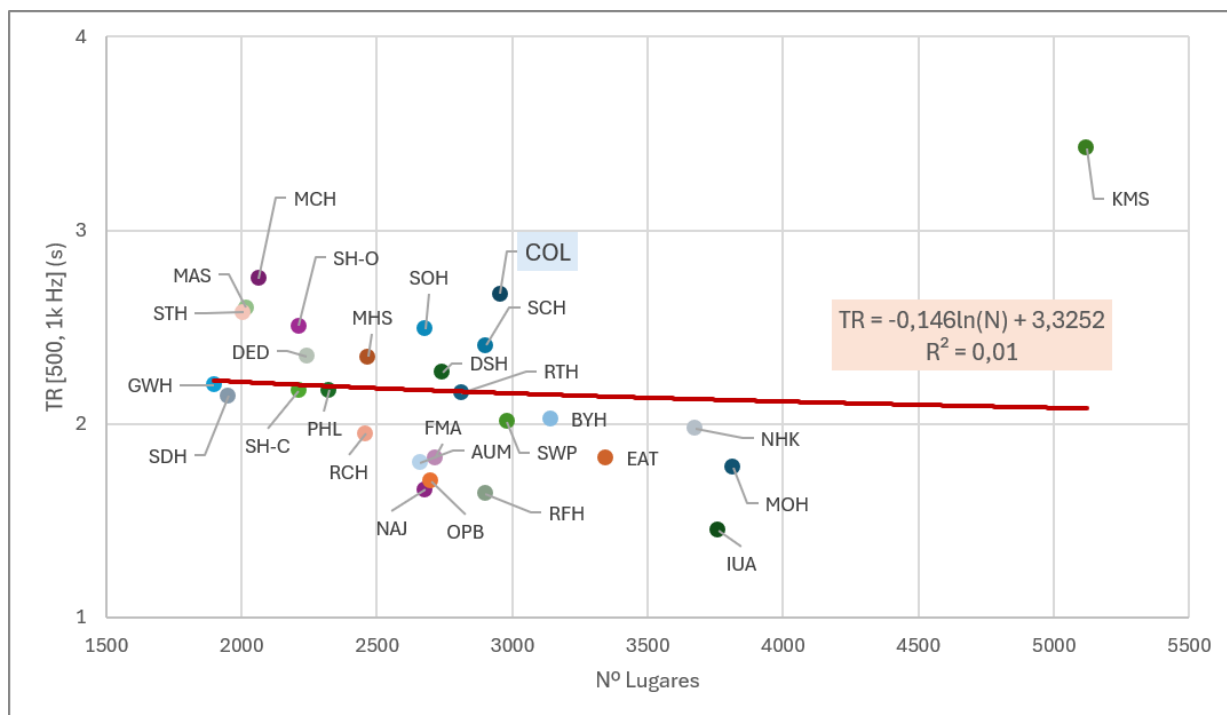


Figura 7.13 – Valores do Tempo de Reverberação (TR) [500, 1k Hz] em função da capacidade de 26 salas internacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (logarítmica).

7.3.3 CLARIDADE (C_{80})

Para a Claridade (C_{80}), de modo a se validar o desempenho acústico do Coliseu do Porto à escala global, utilizaram-se dados de vinte salas internacionais de espectáculos. Este número diminuiu um pouco devido à falta de dados disponíveis, sobre este parâmetro acústico, na bibliografia existente. No Quadro 7.10 verifica-se que os valores da Claridade variam entre -3,77 dB, no *Koussevitzky Music Shed*, e 3,72 dB, no *Northern Alberta Jubilee Auditorium*. O *Koussevitzky Music Shed* possui um volume perto do valor médio, com 24270 m³, e o *Northern Alberta Jubilee Auditorium* possui um dos valores mais baixos desta amostra, com 21500 m³ de volume. Em termos de número de lugares, o primeiro possui a maior capacidade entre todas as salas da amostra e o segundo possui um valor médio, de 2678 lugares. As relações entre estes três parâmetros encontram-se demonstradas nos gráficos seguintes, através das Figuras 7.14 e 7.15.

A Figura 7.14 mostra o gráfico de dispersão, com linha de tendência logarítmica, da relação entre a Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz] e o volume, em m³, das vinte salas internacionais e do Coliseu do Porto. Denota-se uma pequena descida dos valores de C_{80} com o aumento do volume. Verifica-se também uma grande dispersão dos pontos da amostra, com um R^2 de apenas 0,10, que denota uma correlação muito fraca entre a Claridade e o volume das salas. Concluindo, não é possível inferir qualquer relação entre os parâmetros em questão, pelo menos em salas com volumes tão elevados.

A Figura 7.15 mostra o gráfico de dispersão, com linha de tendência linear, da relação entre a Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz] e o número de lugares, das vinte salas internacionais e do Coliseu do Porto. Novamente, é possível verificar a existência de uma grande dispersão dos pontos relativos às salas da amostra, assim como um valor de R^2 bastante baixo, de apenas 0,07. Apesar de a linha de tendência da Claridade diminuir com o aumento do número de lugares, é impossível tirar conclusões e previsões da mesma, devido à inexistente correlação entre ambos os parâmetros.

Concluindo, tal como ocorre nas comparações relativas ao Tempo de Reverberação, em salas de uma grande volumetria, existem várias variações e imprevistos nos campos sonoros devido às características das salas, para se conseguir chegar a algum tipo de previsão substancial.

Quadro 7.10 – Lista de 20 Salas de Espectáculo Internacionais e do Coliseu do Porto, com siglas, volume, nº de lugares e Claridade média [500, 1k Hz] (+,-: maior e menor valor em cada coluna) [21].

Sigla	Salas	Volume (m3)	Nº lugares	C ₈₀ [500, 1k Hz] (dB)
COL	Coliseu	25091	2955	-0,45
MHS	Meyerhoff Symphony Hall	21524	2467	-2,00
SCH	Seegerstrom Hall (OCPAC)	27800	2903	-0,74
MCH	McDermott Concert Hall	23900	2065	-0,50
KMS	Koussevitzky Music Shed	24270	(+) 5121	(-) -3,77
DSH	Davies Symphony Hall	24070	2743	-0,85
NAJ	Northern Alberta Jubilee Auditorium	21500	2678	(+) 3,72
SWP	Salle Wilfrid-Pelletier	26500	2982	-0,33
RTH	Roy Thomson Hall	(+) 28300	2812	0,48
OPB	Opéra Bastille	(-) 21000	2700	3,40
PHL	Philharmonie	(-) 21000	2325	0,08
SH-O	Symphony Hall (Rev. Doors Open)	25000	2211	0,25
SH-C	Symphony Hall (Rev. Doors Closed)	25000	2211	-1,20
SDH	St. David's Hall	22000	(-) 1952	-0,75
RCH	Royal Concert Hall	22700	2459	0,90
RFH	Royal Festival Hall	21950	2901	0,99
BYH	Binyanei Ha'oomah	24700	3142	-0,40
FMA	Fredric R. Mann Auditorium	21240	2715	-0,90
MAS	Metropolitan Art Space	25000	2017	-1,18
NHK	NHK Hall	25200	3677	0,00
STH	Suntory Hall	(-) 21000	2006	0,88
DED	De Doelen	24070	2242	-2,85
Média		23866	2766	0
Mediana		24435	2690	0

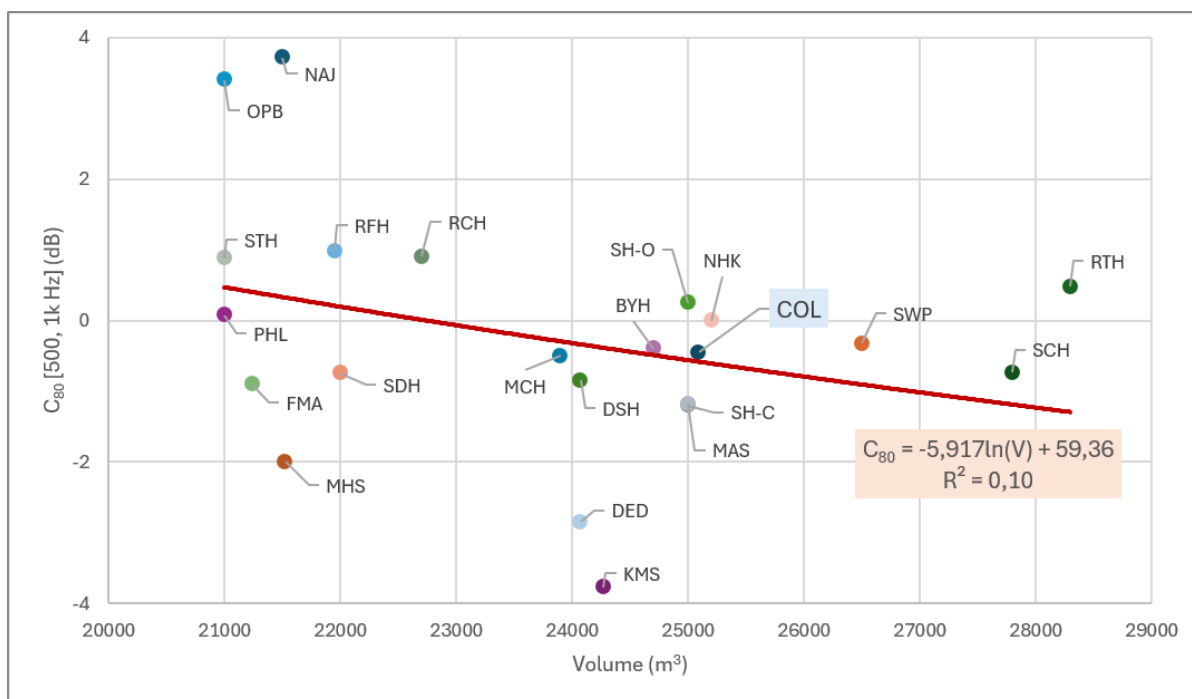


Figura 7.14 – Valores médios da Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz] em função do volume de 20 salas internacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (logarítmica).

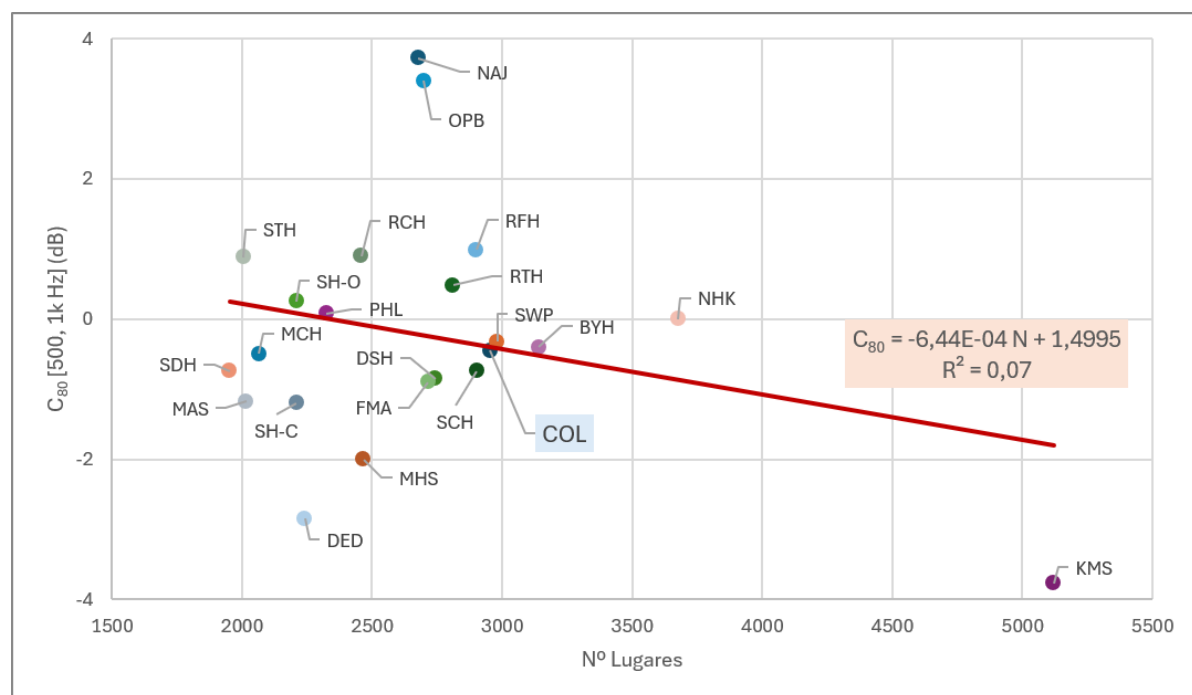


Figura 7.15 – Valores médios da Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz] em função da capacidade de 20 salas internacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (linear).

7.3.4 ANÁLISE DE INTERDEPENDÊNCIA DE PARÂMETROS ACÚSTICOS

A Figura 7.16 mostra o gráfico de dispersão, com linha de tendência logarítmica, da relação entre a Claridade (C_{80}) [500, 1k Hz] e o Tempo de Reverberação (TR) [500, 1k Hz], das vinte salas internacionais e do Coliseu do Porto. Verifica-se uma tendência de descida dos valores de C_{80} com o aumento do TR, o que é esperado, uma vez que salas com maior tempo de reverberação acumulam mais energia sonora tardia, reduzindo a proporção de energia precoce e, consequentemente, a Claridade. O valor de R^2 de 0,47 indica que a expressão logarítmica justifica cerca de 47% da variabilidade entre os dois parâmetros, na amostra considerada.

O Coliseu do Porto encontra-se ligeiramente acima da linha de tendência logarítmica, com um TR de 2,67 s e um valor de C_{80} próximo de -0,45 dB, o que sugere que, para o seu tempo de reverberação, apresenta uma Claridade ligeiramente superior à prevista pela tendência geral da amostra. Contudo, a dispersão existente entre os pontos das restantes salas demonstra que o TR, por si só, não é suficiente para prever o comportamento da Claridade, pois o campo sonoro de cada sala é influenciado por um conjunto de factores geométricos e de materiais que não são demonstrados nesta relação.

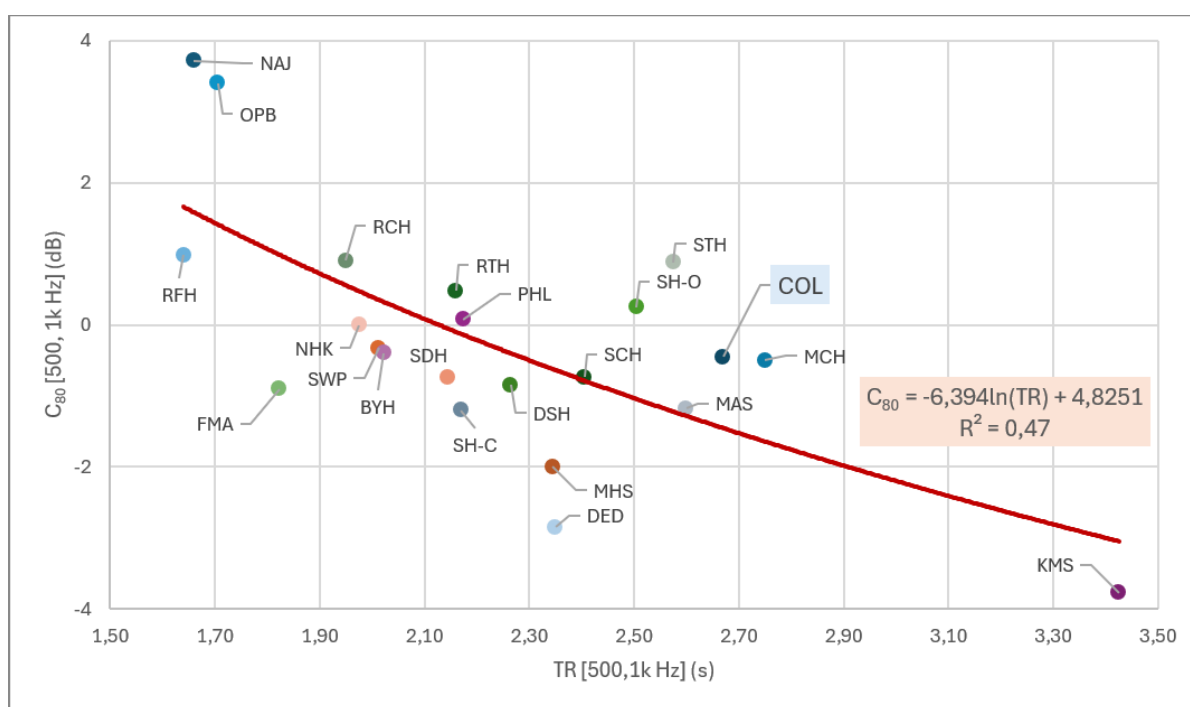


Figura 7.16 – Comparação de valores médios da Claridade (C_{80}) e do Tempo de Reverberação (TR) [500, 1k Hz] de 20 salas internacionais e do Coliseu do Porto, com linha de tendência (logarítmica).

Quadro 7.11 – Coeficientes de determinação (R^2) obtidos nas linhas de tendência das correlações entre os valores médios da Claridade (C_{80}) e do Tempo de Reverberação (TR) com o volume e o número de lugares em salas internacionais e no Coliseu do Porto.

R^2	Volume	Nº lugares
TR	0,02	0,01
C_{80}	0,10	0,07

O Quadro 7.11 resume os valores de R^2 obtidos nas correlações entre a Claridade e o Tempo de Reverberação com o volume e o número de lugares das salas internacionais e do Coliseu do Porto. Verifica-se que todos os valores aqui demonstrados não são suficientemente elevados para se estabelecer qualquer relação de previsão fiável. Estes valores de R^2 são justificados pelo facto que muitas destas salas foram construídas sem a realização de um “projecto acústico” onde se garantiram valores ideais actuais, para os diferentes parâmetros de interesse à tipologia da sala. Também os diferentes tipos de tipologia, geometria e materiais das salas surtiram efeitos na correlações efectuadas, pois torna-se uma amostra muito diversa, o que dificulta o estabelecimento de qualquer tipo de tendência.

8

CONCLUSÃO

8.1 CONCLUSÕES

A Acústica de salas de espectáculo é um factor cada vez mais relevante para o sucesso de qualquer evento, pois afecta directamente a experiência do público. Em espaços como o Coliseu do Porto, que apresentam diferentes tipos de espectáculos, o estudo aprofundado deste ramo da Física, torna-se especialmente relevante, tornando a realização de um “projecto acústico” essencial para mitigar problemas como a reverberação excessiva ou o mascaramento de frequências. Com o objectivo de realizar uma análise detalhada, abrangendo vários parâmetros acústicos, realizou-se a caracterização acústica do “Coliseu do Porto Ageas” através de ensaios *in situ*, aprofundando assim o conhecimento actual do panorama acústico nacional das salas de espectáculo. Foi também realizada a comparação dos valores obtidos com vinte e duas salas de espectáculo nacionais, previamente estudadas em outras dissertações de mestrado da FEUP, e com vinte e seis salas internacionais, de volumes similares ao do Coliseu, com valores retirados da literatura de destaque em Acústica. Um resumo dos valores obtidos durante a análise do Coliseu, complementado com a verificação dos limites regulamentares (RRAE), encontram-se no Quadro 8.1.

Pelo o Quadro 8.1, é possível verificar que o Coliseu do Porto possui um ruído de fundo, de 25 dB(A), adequado à utilização. Com o factor de incerteza do RRAE aplicado, este valor desce para os 22 dB(A), sendo que ambos os valores são menores do que os valores máximos impostos pelo regulamento, de 30 e 38 dB(A), para recintos de espectáculos e salas de cinema, respectivamente. A curva de incomodidade NC (*Noise Criterion*) encontra-se dentro dos valores recomendados. A curva de incomodidade NR (*Noise Rating*) também se encontra dentro dos valores recomendados para salas de ópera, teatro e música.

No Tempo de Reverberação, através da previsão realizada para 100% de ocupação, e da introdução da incerteza prevista, os valores médios obtidos aproximam-se aos valores máximos exigidos pelo RRAE, de 1,46 s, e podem ser considerados toleráveis, entre 1,5 e 1,6 segundos, para valores com e sem cadeiras na plateia, respectivamente. Os valores médios do Tempo de Reverberação e do Rácio de Baixos exibem uma sala com uma reverberação elevada e um desequilíbrio tonal. Os TR [500, 1k Hz] a 100% de ocupação, com 2,5 a 2,7 segundos, ultrapassam um pouco os limites considerados ideais para a maioria das tipologias, enquanto o Rácio de Baixos decai para 0,85 e 0,82. De acordo com Beranek, para tempos de reverberação elevados, com cerca de 2,2 s, os valores ideais do Rácio de Baixos deviam encontrar-se entre 1,1 e 1,25, acima dos obtidos na sala em estudo. Ambos prejudicam a inteligibilidade e a definição musical. Seria necessário promover a absorção de frequências médias e altas e a preservação da energia dos graves. No entanto, quando comparados com valores obtidos em salas internacionais de dimensão semelhante, conclui-se que o Tempo de Reverberação médio do Coliseu do Porto integra-se de forma coerente na amostra de salas de um volume elevado, como realizado no capítulo 7.2.

Ao avaliar a qualidade da percepção da palavra, através do *Speech Transmission Index* (STI), verifica-se que a sala é considerada “mediocre”, com valores médios de 0,44 e 0,41, com e sem cadeiras na plateia, quando não é utilizado um reforço electroacústico. Existem, contudo, zonas da sala que possuem uma inteligibilidade da palavra suficiente, com os valores máximos de 0,56 e 0,53. No que diz respeito à Claridade média, C_{80} [500, 1k Hz], o Coliseu é totalmente propício a actividades que florescem em ambientes reverberantes, como por exemplo, música sinfónica do período romântico. Com -0,45 dB, a sala com cadeiras é adequada à música sinfónica clássica e moderna (-1 a 0 dB) e, com -2,15 dB, a sala sem cadeiras perde claridade e torna-se adequada a música de órgão (menor do que -2 dB) e a coros gregorianos (-3 a -1 dB). Para o parâmetro da Definição média, D_{50} [500, 1k Hz], a sala é considerada insuficiente, com valores de 0,37 e 0,29, a aproximar-se do limite superior do intervalo (0,17 a 0,39), quando existem cadeiras na plateia da sala. Considera-se que o discurso, sem a utilização de um reforço electroacústico, possui uma compreensão por parte do público abaixo da recomendada. O Tempo Central médio, TS [500, 1k Hz], demonstra novamente uma preferência da sala para espectáculos musicais, com valores de 162 e 224 ms.

Quadro 8.1 – Resumo de parâmetros acústicos obtidos no Coliseu do Porto, com respectivas verificações regulamentares (RRAE) e avaliação funcional.

Parâmetros	Condição Cadeiras na Plateia	Simbologia	Valor Obtido	Valor com Incerteza	Valores máximos RRAE	Avaliação			
						Teatro	Ópera	Música	
Ruído de Fundo (dB)		L _{Aeq}	25	22	[30 e 38]	A	A	A	
Curvas de incomodidade		NC	14-16	-	-	A	A	A	
		NR	17-19	-	-	A	A	T	
Tempo de Reverberação ^{&} (s)	Com	TR [500, 1k Hz] desocupado	2,67	2,19	1,46	D	D	D	
	Sem		3,51	2,87	1,46	D	D	D	
	Com	TR [500, 1k Hz] 100% ocupação *	2,53	-	-	T	T	T	
	Sem		2,72	-	-	T	T	T	
Speech Transmission Index ^{&}		STI máximo	0,56	-	-	Suficiente			
		Com	STI médio	0,44	-	-	Medíocre		
			STI mínimo	0,39	-	-	Medíocre		
			Sem	STI máximo	0,53	-	-	Suficiente	
		STI médio		0,41	-	-	Medíocre		
		STI mínimo		0,37	-	-	Medíocre		
Claridade (C ₈₀) ^{&} (dB)	Com	C ₈₀ [500, 1k Hz]	-0,45	-	-	-	T	T	
	Sem		-2,15	-	-	-	T	T	
Definição (D ₅₀) ^{&}	Com	D ₅₀ [500, 1k Hz]	0,37	-	-	D [#]	-	-	
	Sem		0,29	-	-	D [#]	-	-	
Tempo Central ^{&} (ms)	Com	TS [500, 1k Hz]	162	-	-	D	D	A	
	Sem		224	-	-	D	D	A	
Rácio de Baixos ^{&}	Com	BR	0,85	-	-	D	A	A	
	Sem		0,82	-	-	D	A	A	

A - Adequado, D - Desadequado, T - Tolerável, * - Previsão, # - sem reforço electroacústico

& - todas estas categorizações foram atribuídas sem a utilização de reforço electro-acústico pelo que existindo estas conclusões poderão ser distintas.

Através da análise dos dados apresentados, é possível concluir que a sala do Coliseu apresenta uma área algo reverberante, caracterizada por algumas reflexões indesejadas. O seu grande volume, a elevada lotação e a escassez de materiais com boas propriedades de absorção sonora, surgem como as principais causas para estes fenómenos. Adicionalmente, no Capítulo 6, observa-se um comportamento acústico pouco previsível à medida que aumenta a distância em relação à fonte sonora utilizada nos ensaios. Verifica-se, de igual modo, um incremento no tempo de reverberação, nas posições de medição que se aproximam do centro da sala, um fenómeno que levanta a suspeita da existência de um efeito de *hole in the middle problem*.

Conclui-se que o Coliseu do Porto, quanto aos valores médios obtidos nos vários parâmetros estudados, sem a utilização de um sistema de reforço acústico, é uma sala de espectáculos não propícia ao uso da palavra, sem o reforço electroacústico. De uma forma geral conclui-se que o Coliseu obtém valores de energia maiores no som reverberante, da energia tardia, em vez das primeiras reflexões, comprometendo assim a clareza e a inteligibilidade. Permite-se concluir que, de uma forma genérica, a sala é muito mais adequada para actividades de cariz musical que beneficiem de um envolvimento acústico reverberante (como música sinfónica, em especial do Período Romântico, coral, etc.), em vez de actividades focadas na utilização da palavra (teatro, conferências, etc.). Tendo em conta que não se recorreu à utilização de reforço electroacústico, durante a realização dos testes acústicos, não é possível concluir se este permitiria mitigar o efeito de reverberação excessiva e o mascaramento de frequências condutivas à qualidade da palavra, de forma a garantir uma melhor qualidade audível e compreensível para todas as pessoas presentes.

Contudo, comparando com outras salas internacionais, de volume semelhante, e tendo em conta que não foi realizado qualquer projecto de cariz acústico antes do início da construção do edifício, o Coliseu do Porto apresenta valores perfeitamente aceitáveis para os parâmetros acústicos estudados.

8.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A realização do estudo da caracterização acústica do Coliseu do Porto fornece uma base viável, ao nível de vários parâmetros acústicos, para a realização de estudos e comparações futuras. De modo a rematar este trabalho, são sugeridas as seguintes linhas de investigação, com o intuito de aprofundar o conhecimento sobre a acústica existente no Coliseu:

- Realização de ensaios com a sala ocupada, com público real, de modo a quantificar a redução do TR devido à absorção sonora da audiência;
- Efectuar análises do reforço sonoro produzido pelos sistemas electroacústicos actualmente existentes no recinto, de modo a avaliar a sua eficácia na compensação de perda da inteligibilidade da palavra;
- Concretizar simulações de soluções de acústica variável na sala, como cortinas ou painéis absorventes, para avaliar a viabilidade de reduzir o Tempo de Reverberação para valores aceitáveis em eventos de palavra ou de música;
- Obter dados objectivos da sala, medidos através da percepção subjectiva de espectadores e músicos;
- Utilização de modelagem computacional, com o intuito de simular e analisar o comportamento do som nesta sala de geometria curva e irregular. As diversas tipologias do Coliseu poderiam ser favorecidas por diferentes configurações acústicas, obtidas através deste processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CARVALHO, António Pedro Oliveira De. 2004. *Texto de apoio à disciplina de acústica ambiental e de edifícios*. Porto: FEUP.
- [2] LAZZARINI, Victor E.P. 1998 *Elementos de acústica*. Maynooth: Music Department of National University of Ireland.
- [3] EVEREST, F. Alton. 2001. *The Master Handbook of Acoustics*. 4th ed. New York
- [4] MARTIN, Frederick N.; CLARK, John Greer – *Introduction to Audiology*. 12.^a ed. Boston: Pearson, 2015.
- [5] SCIENCE READY – *Introduction to Sound Waves*. Science Ready. Consultado em 15 de Março de 2026. Disponível em https://scienceready.com.au/pages/introduction-to-soundwaves?srsId=AfmBOosjFhbX079DTsWKMpKlPjSyFx1xuJj5suA_WLQi4BDzMEQaxkj
- [6] ACOUSTIC GLOSSARY – *Sound Power and Sound Power Level (L_w)*. Acoustic Glossary. Consultado em 16 de Março de 2026. Disponível em <https://www.acoustic-glossary.co.uk/sound-power.htm>
- [7] APOPARTNER – *Ruído Laboral: Parâmetros de Descrição do Som*. APOpartner, 2021. Consultado em 16 de Março de 2026. Disponível em <https://www.apopartner.pt/ruído-laboral-parametros-de-descricao-do-som/>
- [8] PORTAL ACÚSTICA – *Conceitos Básicos da Acústica (Parte II)*. Portal Acústica, 2020. Consultado em 18 de Março de 2026. Disponível em <https://portalacustica.info/conceitos-basicos-da-acustica-parte-ii/>
- [9] ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE NORMALIZAÇÃO – ISO 226:2023: *Acoustics — Normal equal-loudness-level contours*. Genebra: ISO, 2023.
- [10] HYPERPHYSICS – *Equal Loudness Contours (ISO 226:2003 Revision)*. Georgia State University, [s.d.]. Consultado em 19 de Março de 2026. Disponível em <http://www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Sound/imgsou/eqlou2003.png>
- [11] ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE NORMALIZAÇÃO – EN ISO 10534-1:1998: *Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 1: Method using standing wave ratio*. Bruxelas: CEN, 1998.
- [12] INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE – NP EN ISO 354:2007: *Acústica — Medição da absorção sonora numa câmara reverberante (ISO 354:2003)*. Caparica: IPQ, 2007.

- [13] HUDDLESTONE ACOUSTICS – *¿Qué es la reverberación y el tiempo de reverberación?*. Huddlestone Acoustics, 2021. Consultado em 19 de Março de 2026. Disponível em <https://www.huddlestone.es/reverberacion/>
- [14] EMATERED – *O Efeito Haas: Tudo O Que Precisa De Saber*. eMastered, 2023. Consultado em 16 de Março de 2026. Disponível em <https://emastered.com/pt/blog/haas-effect>
- [15] BERANEK, Leo L. – *Music, Acoustics and Architecture*. Nova Iorque: John Wiley & Sons, Inc., 1962.
- [16] BERANEK, Leo L. – *Concert and Opera Halls: How They Sound*. Woodbury: Acoustical Society of America, 1996.
- [17] RATIONAL ACOUSTICS – *STI, STIPA and Smaart*. Rational Acoustics, 2024. Consultado em 17 de Março de 2026. Disponível em <https://support.rationalacoustics.com/support/solutions/articles/150000188813-sti-stipa-and-smaart>
- [18] FIREWIZE – *Rapid Acoustics Speech Transmission Index (RASTI)*. Firewize, 2017. Consultado em 17 de Março de 2026. Disponível em <https://firewize.com.au/definition/rapid-acoustics-speech-transmission-index>
- [19] ASHRAE – *About ASHRAE*. ASHRAE, [s.d.]. Consultado em 10 de Junho de 2026. Disponível em <https://www.ashrae.org/about>
- [20] *RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho*, Diário da República, 2008.
- [21] BERANEK, Leo L. – *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*. 2.^a ed. New York: Springer, 2004. ISBN 978-0-387-95524-7.
- [22] RINDEL, Jens Holger – Acoustical aspects of the development of Greek theaters in the 4th century B.C.E. *The Journal of the Acoustical Society of America*. ISSN 0001-4966. Vol. 157, n.º 3 (Março 2025), p. 2042–2066. Consultado a 23 Março 2026. Disponível em <https://doi.org/10.1121/10.0036255>
- [23] LONG, Marshall – *Architectural Acoustics*. 1.^a ed. Burlington, MA: Elsevier Academic Press, 2006. ISBN 978-0-12-455551-8.
- [24] HOLLOWAY, John – *Illustrated Theatre Production Guide*. 2.^a ed. Burlington, MA: Focal Press, 2010. ISBN 978-0-240-81204-5
- [25] BARRON, Michael – *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. 2.^a ed. London: Spon Press, 2010. ISBN 978-0-415-44223-7.

- [26] EGAN, M. David – *Architectural Acoustics*. Rossville, GA: J. Ross Publishing, cop. 2007. ISBN 978-1-932159-78-3.
- [27] HINES, Thomas G. – *Epidauros Theatre. (modern Epidauros, Greece)*. WA: Whitman College, cop. 2009. Consultado a 23 de Março de 2026. Disponível em <https://www.whitman.edu/theatre/theatretour/epidauros/epidauros.tour.htm>
- [28] TUDO SOBRE ATENAS – *Odeão de Herodes Ático*. [S.l.]: Tudo sobre Atenas, cop. 2024. Consultado em 24 de Março de 2026. Disponível em <https://www.tudosobreatenas.com/odeao-herodes-atico>
- [29] HINES, Thomas G. – *Aspendus Theatre. (modern Belkiz, Turkey)*. WA: Whitman College, cop. 2005. Consultado em 24 de Março de 2026. Disponível em <https://ancienttheatrearchive.com/theatre/aspendus-theatremodern-belkiz-turkey/>
- [30] COMUNE DI VICENZA – *Architettura*. Vicenza: Musei Civici Vicenza, cop. 2024. Consultado em 24 de Março de 2026. Disponível em <https://www.teatroolimpico.vicenza.it/it/teatro/architettura.php>
- [31] UNESCO – *Advisory Body Evaluation (ICOMOS): City of Vicenza and the Palladian Villas of the Veneto (Italy)*. Paris: UNESCO World Heritage Convention, 1994. Consultado em 24 de Março de 2026. Disponível em <https://whc.unesco.org/en/documents/112695>
- [32] BRITANNICA, The Editors of Encyclopaedia – *Globe Theatre*. Chicago: Encyclopædia Britannica, cop. 2024. Consultado em 24 de Março de 2026. Disponível em <https://www.britannica.com/topic/Globe-Theatre/The-design-of-the-Globe>
- [33] BRÜEL & KJÆR – *Architectural Acoustics*. Nærum, Denmark: Brüel & Kjær, cop. 2015.
- [34] GEIER, Günter – *Architectural Acoustics*. In ROSSING, Thomas D., ed. – *Springer Handbook of Acoustics*. New York: Springer, 2007. Cap. 9, p. 301-344. ISBN 978-0-387-30425-0.
- [35] VIATOR – *La Scala Theatre guided experience*. [S.l.]: Viator, cop. 1997-2024. Consultado em 25 de Março de 2026. Disponível em <https://www.viator.com/pt-PT/tours/Milan/La-Scala-Theater-guided-experience/d512-116773P3>
- [36] HOFBURG VIENNA – *Grosser Redoutensaal*. Vienna: Wiener Kongresszentrum Hofburg Betriebsges.m.b.H., cop. 2026. Consultado em 26 de Março de 2026. Disponível em https://www.hofburg.com/en/rooms/mezzanine/hofburg_redoutensaele/grosser_redoutensaal

- [37] BÖHM, Claudius – *History*. Leipzig: Gewandhausorchester, cop. 2026. Consultado em 30 de Março de 2026. Disponível em <https://www.gewandhausorchester.de/en/gewandhaus/history/>
- [38] KIRK, John – *A Return Visit to Bayreuth*. [S.l.]: The Cultured Traveler, 2016. Consultado em 30 de Março de 2026. Disponível em <https://theculturedtraveler.org/2016/07/25/a-return-visit-to-bayreuth/>
- [39] WITEW, Ingo B. – *Reliability of Measurements in Room Acoustics*. Berlin: Logos Verlag, 2007. ISBN 978-3-8325-1563-8.
- [40] FELLAH, Zine El Abiddine; OGAM, Erick, eds. – *Acoustics of Materials*. London: ISTE Ltd; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2014. ISBN 978-1-84821-657-0.
- [41] NAVE, Rod – *Sundberg's Singing Formant*. Atlanta, GA: Georgia State University, cop. 2017. Consultado em 30 de Março de 2026. Disponível em <http://www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Music/singfor.html>
- [42] WIKIPÉDIA – *Coliseu do Porto*. Wikimedia Foundation, 2026. Consultado em 4 de Abril de 2026. Disponível em https://pt.wikipedia.org/wiki/Coliseu_do_Porto
- [43] COLISEU PORTO AGEAS – *Coliseu Porto Ageas: site oficial*. Porto: Coliseu Porto Ageas, 2026. Consultado em 4 de Abril de 2026. Disponível em <https://www.coliseu.pt/>
- [44] COLISEU PORTO AGEAS – *Espaços*. Porto: Coliseu Porto Ageas, 2020. Consultado em 9 de Abril de 2026. Disponível em https://downloads.coliseu.pt/coliseu_espacos.pdf
- [45] ASSOCIAÇÃO AMIGOS DO COLISEU DO PORTO – *Coliseu do Porto: 60 anos*. Porto: Associação Amigos do Coliseu do Porto, 2001. ISBN 972-95705-2-3. Consultado em 7 de Abril de 2026.
- [46] PORTUGAL. Direção-Geral do Património Cultural – *Coliseu do Porto / Cinema do Coliseu*. Lisboa: DGPC, 2026. (SIPA). Consultado em 4 de Abril de 2026. Disponível em http://www.monumentos.gov.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=5423
- [47] GOOGLE – *Google Maps*. Google, 2026. Consultado em 9 de Abril de 2026. Disponível em <https://maps.app.goo.gl/iG5ghoBeJ1L2534e8>
- [48] COLISEU PORTO AGEAS – *Como chegar*. Porto: Coliseu Porto Ageas, 2026. Consultado em 9 de Abril de 2026. Disponível em <https://www.coliseu.pt/como-chegar>
- [49] LOUREIRO, Jorge – *Coliseu do Porto: O gigante da Invicta*. Cinemas do Paraíso, 2013. Consultado em 4 de Abril de 2026. Disponível em <https://cinemasparaíso.blogspot.com/2013/03/coliseu-do-porto-o-gigante-da-invicta.html>
- [50] BATISTA, Paulo – O apogeu do modernismo em Cassiano Branco: 1928-1939. In *Arquivo Municipal de Lisboa: Um acervo para a História*. Lisboa: Arquivo Municipal

- de Lisboa; Câmara Municipal de Lisboa, 2015. p. 141-157. ISBN 978-989-96300-5-5. Consultado em 5 de Abril de 2026. Disponível em <http://hdl.handle.net/10174/22057>
- [51] HENRIQUES, Ana Lúcia Cavaco – *Cassiano Branco: arquitectura do espectáculo*. Lisboa: Universidade Lusíada de Lisboa, 2016. Dissertação de Mestrado em Arquitectura. Consultado em 5 de Abril de 2026. Disponível em <http://hdl.handle.net/11067/2608>
- [52] WIKIPÉDIA – *Cassiano Branco*. Wikimedia Foundation, 2026. Consultado em 7 de Abril de 2026. Disponível em https://pt.wikipedia.org/wiki/Cassiano_Branco
- [53] WIKIPÉDIA – *Júlio de Brito*. Wikimedia Foundation, 2026. Consultado em 7 de Abril de 2026. Disponível em https://pt.wikipedia.org/wiki/J%C3%BAlio_de_Brito
- [54] WILS, Jan – *Coliseu do Porto: Façade*. Lisboa: Arquivo Municipal de Lisboa, 1938. PT/AMLSB/CB/06/03/11. In PORTUGAL. Arquivo Municipal de Lisboa – *Coliseu, Porto*. Consultado em 5 de Abril de 2026. Disponível em <https://arquivomunicipal3.cm-lisboa.pt/X-arqWeb/Result.aspx?id=1529955&type=PCD&add=20>
- [55] COLISEU PORTO AGEAS – *Coliseu Porto: montra de histórias*. Porto: Coliseu Porto Ageas, 2026. Consultado em 10 de Abril de 2026. Disponível em <https://historia.coliseu.pt>
- [56] BRANCO, Cassiano – *Projeto de teatro-circo "coliseu do Porto". R[ua de Passos Manuel. Porto]. Fachada principal*. Lisboa: Arquivo Municipal de Lisboa, 1937-1939. PT/AMLSB/CB/06/03/09. In PORTUGAL. Arquivo Municipal de Lisboa – *Coliseu, Porto*. Consultado em 5 de Abril de 2026. Disponível em <https://arquivomunicipal3.cm-lisboa.pt/X-arqWeb/Result.aspx?id=1529937&type=PCD&add=20>
- [57] BRANCO, Cassiano – *Coliseu do Porto. Alçado principal*. Lisboa: Arquivo Municipal de Lisboa, 1939. PT/AMLSB/CB/06/03/01. In PORTUGAL. Arquivo Municipal de Lisboa – *Coliseu, Porto*. Consultado em 5 de Abril de 2026. Disponível em <https://arquivomunicipal3.cm-lisboa.pt/X-arqWeb/Result.aspx?id=1529889&type=PCD&add=20>
- [58] BRANCO, Cassiano – *Coliseu do Porto. Corte transversal*. Lisboa: Arquivo Municipal de Lisboa, 1939. PT/AMLSB/CB/06/03/02. In PORTUGAL. Arquivo Municipal de Lisboa – *Coliseu, Porto*. Consultado em 5 de Abril de 2026. Disponível em <https://arquivomunicipal3.cm-lisboa.pt/X-arqWeb/Result.aspx?id=1529890&type=PCD&add=20>
- [59] BRANCO, Cassiano – *[Secção longitudinal do coliseu do Porto]*. Lisboa: Arquivo Municipal de Lisboa, 1937-1939. PT/AMLSB/CB/06/03/30. In PORTUGAL. Arquivo Municipal de Lisboa – *Coliseu, Porto*. Consultado em 5 de Abril de 2026. Disponível

- em <https://arquivomunicipal3.cm-lisboa.pt/X-arqWeb/Result.aspx?id=1530023&type=PCD&add=45>
- [60] COLISEU PORTO AGEAS – *Coliseu Tech Area: downloads*. Porto: Coliseu Porto Ageas, 2026. Consultado em 7 de Abril de 2026. Disponível em <https://sites.google.com/a/coliseu.pt/coliseu-tech-area/downloads?authuser=0>
- [61] TEIXEIRA, Renato Paulo Gaspar de Pimentel – *Metáforas de Viagem. Contributos da Arte Déco e Streamline para a História da Arquitetura Portuguesa no Porto*. Porto: FAUP, 2023. Dissertação de Mestrado Integrado em Arquitetura. Consultado em 7 de Abril de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/151132>
- [62] NAMORA, Filipa – *O Betão Armado em Portugal, Através dos Arquitectos*. Porto: Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto, 2015. Dissertação de Mestrado Integrado em Arquitectura. Consultado em 5 de Abril de 2026. Disponível em <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/84875>
- [63] BRANCO, Cassiano – *Coliseu do Porto. Planta das galerias*. Lisboa: Arquivo Municipal de Lisboa, 1939. PT/AMLSB/CB/06/03/32. In PORTUGAL. Arquivo Municipal de Lisboa – *Coliseu, Porto*. Consultado em 7 de Abril de 2026. Disponível em <https://arquivomunicipal3.cm-lisboa.pt/X-arqWeb/Result.aspx?id=1530025&type=PCD&add=30>
- [64] HILTI – *Medidor laser PD-I*. Porto Salvo: Hilti (Portugal), 2026. Consultado em 15 de Abril de 2026. Disponível em https://www.hilti.pt/c/CLS_MEATool_INSERT_7127/CLS_LASER_METERS_7127/r9121031?itemCode=2212517&salespackquantity=1%20un&activeTab=preconfigured-kits-tabs
- [65] BRÜEL & KJÆR – *Echo Speech Source Type 4720*. Naerum: Brüel & Kjær, 2026. Consultado em 9 de Abril de 2026. Disponível em <https://www.hbkworld.com/en/products/integrated-systems/electroacoustics/accessories/artificial-mouth-and-sound-source/echo-speech-source-4720>
- [66] BRÜEL & KJÆR – *Condenser Microphones and Preamplifiers: Data Handbook*. Naerum: Brüel & Kjær, 1982. BP 1750. Consultado em 16 de Abril de 2026. Disponível em <https://www.bksv.com/media/doc/bp1750.pdf>
- [67] BRÜEL & KJÆR – *Condenser Microphones and Preamplifiers: Data Handbook*. Naerum: Brüel & Kjær, 1982. BP 1750. Consultado em 16 de Abril de 2026. Disponível em <https://www.bksv.com/media/doc/bp1750.pdf>
- [68] BRÜEL & KJÆR – *Sound Calibrator Type 4231*. Naerum: Brüel & Kjær, 2026. Consultado em 9 de Abril de 2026. Disponível em

- <https://www.hbkworld.com/en/products/transducers/acoustic/acoustic-calibrators/microphone/4231>
- [69] BRÜEL & KJÆR – *1/2-inch Free-field Microphone Cartridge Type 4189*. Naerum: Brüel & Kjær, 2026. Consultado em 9 de Abril de 2026. Disponível em https://www.hbkworld.com/en/products/transducers/acoustic/microphone-cartridges/free-field/4189#!ref_bksv.com
- [70] BRÜEL & KJÆR – *Quarter-inch Condenser Microphones Type 4131/32: instructions and applications*. Naerum: Brüel & Kjær, 1996. p. 33. Consultado em 10 de Abril de 2026. Disponível em <https://www.manualslib.com/manual/1857603/Br-El-And-Kj-R-4131.html?page=33>
- [71] BRÜEL & KJÆR – *DIRAC Room Acoustics Software Type 7841*. Naerum: Brüel & Kjær, 2026. Consultado em 10 de Abril de 2026. Disponível em https://www.hbkworld.com/en/products/instruments/handheld/hand-held-software/desktop-applications/dirac-room-acoustics-software-7841#!ref_bksv.com
- [72] BRÜEL & KJÆR – *Product Data: Sound Source Type 4224*. Naerum: Brüel & Kjær, 1974. BP 0066. Consultado em 15 de Abril de 2026. Disponível em <https://www.bksv.com/media/doc/bp0066.pdf>
- [73] LEASAMETRIC – *Brüel & Kjær 2260 Investigator / Evaluator*. Leasametric, 2026. Consultado em 16 de Abril de 2026. Disponível em <https://www.leasametric.com/produit/bruel-kjaer-2260-investigator-evaluator/>
- [75] MATPLOTLIB DEVELOPMENT TEAM – *matplotlib.pyplot.contourf*. Matplotlib 3.10.9 documentation. Consultado em 24 de Junho de 2026. Disponível em https://matplotlib.org/stable/api/_as_gen/matplotlib.pyplot.contourf.html
- [76] SCIPY COMMUNITY – *scipy.interpolate.RBFInterpolator*. SciPy v1.18.0 Manual. Consultado em 24 de Junho de 2026. Disponível em <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.interpolate.RBFInterpolator.html>
- [77] SCIPY COMMUNITY – *scipy.ndimage.gaussian_filter*. SciPy v1.17.0 Manual. Consultado em 24 de Junho de 2026. Disponível em https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.ndimage.gaussian_filter.html
- [78] PIRES, Afonso Pereira Roçadas – *Caracterização acústica do Teatro Diogo Bernardes (Ponte de Lima)*. Porto: FEUP, 2026. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/173498>

- [79] SOUSA, Rafael Machado – *Caracterização acústica do Teatro Sá da Bandeira (Porto)*. Porto: FEUP, 2026. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/173606>
- [80] FERREIRA, Pedro Miguel Gomes – *Caracterização acústica do cine-teatro Garrett (Póvoa de Varzim)*. Porto: FEUP, 2025. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/168621>
- [81] FONSECA, Eduardo de Pinho – *Caracterização acústica do Teatro Carlos Alberto (Porto)*. Porto: FEUP, 2025. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/167635>
- [82] ALVES, Daniel Serra – *Caracterização acústica do Theatro Circo (Braga)*. Porto: FEUP, 2025. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/167240>
- [83] FORTUNATO, Maria Carvalho – *Caracterização acústica do Teatro Jordão (Guimarães)*. Porto: FEUP, 2025. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/168603>
- [84] GOMES, Magda Belmira Governo – *Caracterização Acústica do Teatro Ribeiro Conceição (Lamego)*. Porto: FEUP, 2025. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/165477>
- [85] MOCARZEL, Hannah Serejo Ferreira – *Caracterização Acústica do Teatro Nacional São João (Porto)*. Porto: FEUP, 2024. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/159967>
- [86] FORTE, André Gonçalo Fernandes Portela – *Caracterização acústica do Teatro Sá de Miranda (Viana do Castelo)*. Porto: FEUP, 2024. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/160102>
- [87] PINTO, João Nuno Moreira Baldaia Mendes – *Caracterização acústica do Auditório do Conservatório de Música do Porto*. Porto: FEUP, 2024. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/159980>
- [88] VIEIRA, Filipe Miguel de Amorim da Silva – *Caracterização acústica do Teatro Municipal de Ourém*. Porto: FEUP, 2023. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/152396>

- [89] LEMOS, João Pedro Tavares – *Caracterização acústica do Teatro Municipal da Covilhã*. Porto: FEUP, 2023. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/152371>
- [90] PRADA, Paulo João Pires – *Caracterização Acústica do Renovado Cineteatro de Amarante*. Porto: FEUP, 2023. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/154615>
- [91] HIRAYAMA, André José Queirós – *Caracterização acústica do Auditório Municipal de Vila Nova de Gaia*. Porto: FEUP, 2023. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/152366>
- [92] RIBAS, Manuel João Pereira – *Caraterização Acústica da Casa da Cultura De Ílhavo*. Porto: FEUP, 2023. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/154574>
- [93] MIRANDA, Tiago Sousa Cardoso de Azevedo – *Caracterização acústica do Grande Auditório do Convento de S. Francisco (Coimbra)*. Porto: FEUP, 2023. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/148286>
- [94] SILVA, Diogo Jorge Ferraz da – *Caracterização acústica do Cineteatro Eduardo Brazão*. Porto: FEUP, 2023. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/148278>
- [95] ABELHA, Helena Maria Pinheiro da Costa – *Caracterização Acústica do Centro de Artes de Águeda*. Porto: FEUP, 2022. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/142443>
- [96] ROCHA, Gil Henrique Pereira da – *Caracterização acústica do centro de congressos do Altice Fórum Braga*. Porto: FEUP, 2022. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/142337>
- [97] PINTO, Mónica Henriques Abranches – *Caracterização acústica de grandes auditórios: o caso do auditório da FEUP*. Porto: FEUP, 2012. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Consultado em 14 de Maio de 2026. Disponível em <http://hdl.handle.net/10216/72589>