



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Patrícia Conolly Liberato

**ESTUDOS DE PARÂMETROS DE QUALIDADE
ACÚSTICA DE SALAS PARA MÚSICA: ANÁLISE
DE SOLUÇÕES DE ACÚSTICA VARIÁVEL E
DIFUSORES SONOROS**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma
Construção Sustentável, no ramo de Acústica e Vibrações em Ambiente Urbano,
orientada pelo Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus e pela Professora
Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira e apresentada ao Departamento de
Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de
Coimbra.**

Março de 2022

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Patrícia Conolly Liberato

ESTUDOS DE PARÂMETROS DE QUALIDADE ACÚSTICA DE SALAS PARA MÚSICA: ANÁLISE DE SOLUÇÕES DE ACÚSTICA VARIÁVEL E DIFUSORES SONOROS

**STUDIES OF ACOUSTIC QUALITY PARAMETERS FOR MUSIC ROOMS: ANALYSIS OF
VARIABLE ACOUSTIC SOLUTIONS AND SOUND DIFFUSERS**

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, no ramo de Acústica e Vibrações em Ambiente Urbano, orientado pelo Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus e pela Professora Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Fevereiro de 2022



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

RESUMO

A arquitetura flexível, com a criação de espaços multiusos, é cada vez mais frequente na sociedade moderna, não só por razões econômicas, mas também pelas crescentes exigências funcionais, onde se incluem os requisitos acústicos.

No caso da acústica, estes espaços multifuncionais devem seguir garantindo o conforto de cada tipo de utilização de maneira individualizada, pois muitos dos usos apresentam condições de conforto distintas.

Se tratando de conforto acústico, os parâmetros acústicos a serem estudados variam para cada tipo de utilização da sala, assim como os valores de referência. Através da acústica variável pode-se projetar espaços multiusos, com materiais e volumes de forma eficiente para alinhar os parâmetros acústicos para cada tipo de uso da sala.

Este trabalho tem como objetivo um estudo prévio dos parâmetros acústicos de qualidade de salas de música, com foco na norma norueguesa NS 8178, aplicável a salas de ensaio e de performance musical e na influência da difusão sonora em ambientes acústicos distintos, criados a partir da introdução de acústica variável. Para o efeito são desenvolvidos modelos computacionais, baseados no método do traçado de raios, de modo a permitir avaliar diferentes parâmetros de qualidade sonora de duas salas de música com diferentes dimensões, uma destinada a sala de ensaio e outra a performance musical, porém ambas utilizadas para a mesma tipologia musical. No que respeita à influência da difusão sonora, são analisadas distintas possibilidades de introdução de difusão considerando dois ambientes acústicos distintos, um reverberante e outro absorvente.

Palavras-chave: Difusão Sonora, Acústica Variável, Salas de Música, Parâmetros de Qualidade Sonora.

ABSTRACT

Multipurpose spaces are increasingly common in modern society, not only for economic reasons, but also due to increasing functional requirements, including acoustic requirements.

In the case of acoustics, these multifunctional spaces must continue to guarantee the comfort of each type of use in an individualized way, as many of the uses have different comfort conditions.

When it comes to acoustic comfort, the acoustic parameters vary for each type of room use, as well as the reference values. Through variable acoustics it is possible to design efficiently multipurpose space, with different materials and volumes to align the acoustic parameters for each type of room use.

The objective is to preliminary study the acoustic quality parameters of music rooms, focusing on the Norwegian Standard NS 8178, applicable to rehearsal, musical performance and on the influence of sound diffusion in different acoustic environments, created from the introduction of variable acoustic.

For this purpose, computational models are developed, based on the ray tracing method, in order to allow the evaluation of different parameters of sound quality of two music rooms with different dimensions, one destined for the rehearsal room and the other for musical performance, but both used for the same musical typology. Regarding the influence of sound diffusion, different possibilities of introducing diffusion are analyzed considering two different acoustic environments, one reverberating and the other absorbing.

Key words: Sound Diffusion, Variable Acoustics, Music Rooms, Sound Quality Parameters.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Objetivos do trabalho.....	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2 ESTADO DA ARTE	4
2.1 Condicionamento Acústico de Salas	4
2.2 Difusão Sonora	6
2.2.1 Difusores Triangulares e Piramidais	9
2.2.3 Difusores de Schroeder	10
2.3 Acústica variável.....	13
2.3.1 Volume Variável	15
2.3.2 Absorção Variável.....	18
2.4 Parâmetros acústicos de salas de música	22
2.4.1 Tempo de Reverberação (TR).....	22
2.4.2 Tempo de Reverberação mais Curto (EDT)	26
2.4.4 Bass Ratio (BR).....	27
2.4.5 Brilho (Brilliance)	28
2.4.6 ITDG (Initial Time Delay Gap)	28
2.4.7 Claridade Musical e Definição (C80 e D50).....	28
2.4.8 Índice de Transmissão da Fala (STI)	29
2.4.9 Força Sonora (Strength G)	30
2.4.10 Nível de Pressão Sonora - SPL	31
2.4.11 Suporte (Stage Support factor- ST1).....	31
2.4.12 Fração de Energia Lateral (Lateral Energy Fraction - LEF).....	32
2.5 Norma Norueguesa NS 8178	33
2.5.1 Tipo de Música.....	34
2.5.1.1 Música Amplificada	34

2.5.1.2 Música Acústica Alta	34
2.5.1.3 Música Acústica Baixa.....	35
2.5.2 Critérios para salas de ensaio e salas de performance musical	35
2.5.2 Critérios para salas de performance musical.....	39
3 ESTUDO DE CASO E METODOLOGIA	42
3.1 Perspectiva da pesquisa	42
3.2 Procedimentos, instrumentos de coleta e análise de informações	42
3.3 Ambientes de Estudo	43
3.4 Hipóteses e Cenários de estudo.	44
3.5 Posicionamento da Fonte e Recetores	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1 Tempo de Reverberação - T_{20} e T_{30} - e EDT	59
4.2 Nível de Pressão Sonora - SPL	62
4.3 Índice De Transmissão Da Fala - STI.....	66
4.4 Definição - D50	69
4.5 Índice De Claridade Musical - C80	72
4.6 Eficiência Lateral – J-LF	73
4.7 Força Sonora - G.....	76
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
ANEXO	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Comparativo entre os efeitos de absorção, reflexão especular e difusão do som (Isbert, 1998).	6
Figura 2: Exemplo de difusão do som produzido por um conjunto de pirâmides (Isbert, 1998).	8
Figura 3: Nível de dispersão sonora do centro de dois triângulos para três angulações, $x=30^\circ$, ente 30° e 45° , 45° respectivamente (Isbert, 1998).	9
Figura 4: Comparação entre as zonas de cobertura associadas a um refletor plano e a uma superfície convexa integrante do difusor policilíndrico (Isbert, 1998).	10
Figura 5: Difusores MLS instalados nas paredes laterais da Sala Pleyel (França): a) amostra unitária; b) seção longitudinal da sala com indicação da localização dos difusores (Isbert, 1998).	11
Figura 6: Perfil de três tipos de difusores unidirecional tipo QRD (Isbert, 1998).	12
Figura 7: Difusão produzida por um difusor QRD de uma onda sonora incidente a um ângulo de 45° em relação a superfície (Isbert, 1998).	12
Figura 8: Recomendação de Johnson para os limites máximos e mínimos do tempo de reverberação de ambientes, de acordo com o tipo de programa exibido (Marshall e Klepper, 1999).	14
Figura 9: Fotografia da Sala São Paulo (PEEL, 2018).	15
Figura 10: Divisórias móveis de alto isolamento acústico (Isbert, 1998).	16
Figura 11: Cavidades reverberantes do Eugene McDermott Concert Hall em Dallas, USA (Isbert, 1998).	17
Figura 12: Cain Auditorium (Isbert, 1998).	18
Figura 13: Painéis móveis reflexivos montados em frente a uma parede com 50% de material absorvente. a) posição com mínimo de absorção; b) posição com máximo de absorção (Isbert, 1998).	19
Figura 14: Painéis perfurados montados na frente de uma parede tratada com material absorvente (vista em planta) a) posição com máxima absorção; b) posição de mínima absorção (Isbert, 1998).	19

Figura 15: Painéis giratórios com um lado reflexivo e outro absorvente, com configuração de instalação igual a uma porta giratória. a) posição de máxima absorção; b) posição de mínima absorção (Isbert, 1998).	20
Figura 16: Painéis giratórios com rotação de 90° (Isbert, 1998).	21
Figura 17: Prisma giratório com diferentes combinações entre os três prismas para uma acústica variável.	21
Figura 18: Representação do decaimento do som para obtenção do tempo de reverberação (Beranek, 2004).	23
Figura 19: Tempo Ótimo de Reverberação, a 500 Hz, para diferentes utilizações (Tadeu et al, 2010).	23
Figura 20: Tempo ótimo de reverberação, para frequência de 500 Hz, para diversos usos e volumes (Mehta et al.,1999).	24
Figura 21: Princípio da influência do Tempo de Reverberação e Força Sonora na percepção da música (Rindel, 2014).	31
Figura 22: Força Sonora G em função do volume e tempo de reverberação. As linhas pontilhadas representam os limites inferiores e superiores do tempo de reverberação em salas de ensaio, para música baixa e alta (NS 8178, 2014).	36
Figura 23: Tempo de reverberação médio, utilizando as bandas de oitava de 500 e 1000 Hz recomendado para as salas de performance e para salas de ensaio (NS 8178, 2014).	41
Figura 24: Corte da Sala de Performance Musical.	44
Figura 25: Planta Baixa da Sala de Performance Musical.	44
Figura 26: Hipótese Sem Difusão - Vista Lateral - Sala de Performance Musical.	46
Figura 27: Hipótese Sem Difusão - Vista Topo - Sala de Performance Musical.	46
Figura 28: Hipótese Com QRD - Vista Lateral - Sala de Performance Musical (em azul estão as superfícies com QRD).	48
Figura 29: Hipótese Com QRD - Vista Topo - Sala de Performance Musical Musical (em azul estão as superfícies com QRD).	48
Figura 30: QRD utilizado na simulação – Modelo: QRD 734 RANDOM INCIDENCE.	49
Figura 31: Hipótese Com Difusores Geométricos - Vista Lateral - Sala de Performance Musical.	51

Figura 32: Hipótese Com Difusores Geométricos - Vista Topo - Sala de Performance.	51
Figura 33: Hipótese Sem Difusão - Vista Lateral - Sala de Ensaio.....	53
Figura 34: Hipótese Sem Difusão - Vista Topo - Sala de Ensaio.....	54
Figura 35: Hipótese com QRD - Vista Lateral - Sala de Ensaio Musical (em azul estão as superfícies com QRD).	55
Figura 36: Hipótese com QRD - Vista Topo - Sala de Ensaio Musical (em azul estão as superfícies com QRD).	55
Figura 37: Posições de Fonte e Recetores para a Sala de Ensaio.	57
Figura 38: Posições de Fonte e Recetores para a Sala de Performance Musical.....	58
Figura 39: Sala de Ensaio com paredes laterais inclinadas.	68

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Sala de Performance Musical - Diferença do SPL em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Reverberante.	63
Gráfico 2: Sala de Performance Musical - Diferença do SPL em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Reverberante.	63
Gráfico 3: Sala de Performance Musical - Diferença do SPL em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Absorvente.	64
Gráfico 4: Sala de Performance Musical - Diferença do SPL em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Absorvente.	64
Gráfico 5: Sala de Ensaio - Diferença do SPL em cada recetor - Cenário Reverberante.	65
Gráfico 6: Sala de Ensaio - Diferença do SPL em cada recetor - Cenário Absorvente..	65
Gráfico 7: Sala de Performance Musical - STI em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Absorvente.....	66
Gráfico 8: Sala de Performance Musical - STI em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Absorvente.....	67
Gráfico 9: Sala de Ensaio - STI em cada recetor - Cenário Absorvente.	68
Gráfico 10: Sala de Ensaio - STI em cada recetor - Cenário Absorvente, com paredes laterais inclinadas.	69
Gráfico 11: Sala de Performance Musical - D50 em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Absorvente.....	70
Gráfico 12: Sala de Performance Musical - D50 em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Absorvente.....	70
Gráfico 13: Sala de Ensaio - D50 em cada recetor - Cenário Absorvente.	71
Gráfico 14: Sala de Ensaio - D50 em cada recetor - Cenário Absorvente, com paredes laterais inclinadas.	71
Gráfico 15: Sala de Performance Musical - C80 em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Reverberante.	72
Gráfico 16: Sala de Ensaio - C80 em cada recetor - Cenário Reverberante.....	73

Gráfico 17: Sala de Performance Musical - J-LF em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Reverberante.....	74
Gráfico 18: Sala de Performance Musical - J-LF em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Absorvente.....	74
Gráfico 19: Sala de Ensaio - J-LF em cada recetor - Cenário Reverberante.....	75
Gráfico 20: Sala de Ensaio - J-LF em cada recetor - Cenário Absorvente.....	76
Gráfico 21: Sala de Performance Musical - G em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Reverberante.....	77
Gráfico 22: Sala de Performance Musical - G em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Reverberante.....	77
Gráfico 23: Sala de Ensaio - G em cada recetor - Cenário Reverberante.	78
Gráfico 24: STI em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Reverberante.	86
Gráfico 25: STI em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Reverberante.	86
Gráfico 26: STI em cada recetor - Cenário Reverberante.	87
Gráfico 27: D50 em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Reverberante.....	87
Gráfico 28: D50 em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Reverberante.....	88
Gráfico 29: D50 em cada recetor - Cenário Reverberante.	88
Gráfico 30: C80 em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Absorvente.....	89
Gráfico 31: C80 em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Absorvente.....	89
Gráfico 32: C80 em cada recetor - Cenário Absorvente.	90
Gráfico 33: G em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Absorvente.	90
Gráfico 34: G em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Absorvente.	91
Gráfico 35: G em cada recetor - Cenário Absorvente.	91

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1: Margem dos valores ótimos de tempo de reverberação para diferentes tipos de salas ocupadas, média das bandas de frequência de 500 Hz e 1 kHz (Isbert, 1998).	24
Quadro 2: Tempo ótimo de reverberação para diferentes tipos de música, média das bandas de frequência de 500 Hz e 1 kHz (Barron, 2010).....	24
Quadro 3: Tempo ótimo de reverberação para diferentes usos, média das bandas de frequência de 500 Hz e 1 kHz (Arau-Puchades, 1997).	25
Quadro 4: Tempo de Reverberação em 1 kHz para salas consideradas secas e medição com salas ocupadas (Beranek, 2004).....	26
Quadro 5: Tempo de Reverberação em 1 kHz para salas com grande aceitação e medição com salas ocupadas (Beranek, 2004).	26
Quadro 6: Critério de mérito para BR (Beranek, 2004).	27
Quadro 7: Avaliação Subjetiva do STI (IEC 60268-16, 2003).	29
Quadro 8: Propriedades para salas de ensaio para música amplificada (NS 8178, 2014).	37
Quadro 9: Propriedades para salas de ensaio para música acústica alta (NS 8178, 2014).	38
Quadro 10: Propriedades para salas de ensaio para música acústica baixa (NS 8178, 2014).....	39
Quadro 11: Propriedades para Salas de Performance Musical até 500 pessoas sentadas (1000 em pé) na audiência (NS 8178, 2014).....	40
Quadro 12: Hipóteses da Sala de Performance Musical e características de modelagem.	45
Quadro 13: Coeficientes de Absorção e Dispersão Sonora para Sala de Performance Musical - Sem Difusão.	47
Quadro 14: Coeficientes de Absorção e Dispersão Sonora para Sala de Performance Musical - Com QRD.....	50
Quadro 15: Coeficientes de Absorção e Dispersão Sonora para Sala de Performance Musical - Com Difusores Geométricos.	52

Quadro 16: Hipóteses da Sala de Performance Musical e características de modelagem.	53
Quadro 17: Coeficientes de Absorção e Dispersão Sonora para Sala de Ensaio - Sem Difusão.	54
Quadro 18: Coeficientes de Absorção e Dispersão Sonora para Sala de Ensaio – Com QRD.....	56
Quadro 19: T_{30} da Sala de Performance Musical para o Cenário Reverberante.	59
Quadro 20: T_{20} da Sala de Performance Musical para o Cenário Reverberante.	59
Quadro 21: EDT da Sala de Performance Musical para o Cenário Reverberante.....	60
Quadro 22: T_{30} da Sala de Performance Musical para o Cenário Absorvente.	60
Quadro 23: T_{20} da Sala de Performance Musical para o Cenário Absorvente.	60
Quadro 24: EDT da Sala de Performance Musical para o Cenário Absorvente.....	60
Quadro 25: T_{30} da Sala de Ensaio para o Cenário Reverberante.....	61
Quadro 26: T_{20} da Sala de Ensaio para o Cenário Reverberante.....	61
Quadro 27: EDT da Sala de Ensaio para o Cenário Reverberante.	61
Quadro 28: T_{30} da Sala de Ensaio para o Cenário Absorvente.....	61
Quadro 29: T_{20} da Sala de Ensaio para o Cenário Absorvente.....	62
Quadro 30: EDT da Sala de Ensaio para o Cenário Absorvente.	62

SIMBOLOGIA

- A - Área equivalente de absorção.
- BEM – Boundary Element Method.
- BR - Bass ratio.
- C80 – Claridade Musical.
- CATT - Computer Aided Theater Technique.
- D50 – Definição Sonora.
- dB - Decibel.
- EDT - Tempo de Reverberação mais Curto.
- G - Força sonora.
- Hz - Hertz.
- IACC - Internacional cross correlation.
- ITDG - Initial time delay gap.
- J-LF - Eficiência lateral.
- kg/m² - Quilogramas por metro quadrado.
- kHz – Quilo Hertz.
- LEF - Lateral energy fraction.
- log - Logaritmo.
- m - Metro.
- m² - Metro quadrado.
- m³ - Metro cúbico.
- MLS – Maximum Length Sequence.
- ms - Milissegundo.
- p² - Energia Sonora.
- PRD - Primitive Root Diffuser.
- QRD – Quadratic Residue Diffuser.
- RT – Reverberation Time.
- s - Segundo.
- SDI – Sound Diffusivity Index (Índice de Difusão Sonora)
- SPL - Nível de pressão sonora.
-

ST1 - Stage support factor (Suporte).

STI - Índice de transmissão de fala.

TR - Tempo de reverberação.

T₂₀ - Tempo de reverberação (Decaimento de 20 dB).

T₃₀ - Tempo de reverberação (Decaimento de 30 dB).

V - Volume.

α - Coeficiente de absorção sonora.

ΔL - Pressão sonora.

λ - Comprimento de onda.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

A arquitetura flexível prevê que os espaços podem variar seus usos de acordo com modificações no interior do ambiente, buscando espaços multifuncionais, podendo ter dois ou mais usos em um mesmo ambiente (Guedes, 2016).

Embora não seja algo novo, a multifuncionalidade de salas de espetáculos, por meio de acústica ajustável, ganhou espaço nos projetos de novas salas nos últimos 40 anos. Muitas vezes as razões econômicas estão envolvidas, visto que se torna mais viável construir uma sala com usos distintos ao invés de múltiplas salas.

Estes espaços multifuncionais devem seguir garantindo o conforto de cada uso de maneira individualizada, pois muitos dos usos apresentam condições de conforto distintas. No contexto de conforto, o condicionamento acústico de salas visa o tratamento sonoro interior, com parâmetros acústicos de qualidade sonora, de modo a trazer conforto e excelência para os usuários do espaço.

Os parâmetros acústicos a serem estudados variam para cada tipo de utilização da sala, assim como os valores de referência. Através da acústica variável pode-se projetar espaços multiusos, com materiais e volumes distribuídos de forma eficiente para alinhar os parâmetros acústicos para cada tipo de uso da sala. Deste modo, com a acústica variável pode-se aumentar a quantidade de usos previstos para determinado espaço, adaptando o ambiente conforme o uso, sem perder o conforto acústico ótimo.

Neste mesmo cenário, a arquitetura moderna tem gerado restrições na acústica de salas, devido a capacidade de difusão quase inexistente das superfícies, gerando defeitos acústicos, como ecos flutuantes.

“Uma boa sala para música é tão importante quando um bom instrumento”, afirmou Mstislav Rostropovich (Sá, 2010), célebre concertista russo. Em salas destinadas a música, as propriedades acústicas são decisivas para uma boa interação entre músicos, instrumentos e público. Durante anos, a arte e a ciência eram dois universos distintos,

sendo que a acústica de salas para música uniu estes mundos, buscando juntos requisitos objetivos e subjetivos para se projetar salas de excelência.

A acústica variável é usualmente utilizada para variação da absorção de salas, porém também é uma estratégia para variação da difusão da sala. Para diferentes tipos de música e tamanho dos grupos musicais, diferentes características de resposta da sala são esperadas.

As grandes salas de concerto construídas até início do século XX eram decoradas com esculturas de superfície irregular e com trabalhos em alto-relevo, assim como adornos e ornamentos em alto-relevo. Estes elementos decorativos tinham função de difusores sonoros, criando condições para uma ampla dispersão das ondas na sala. Ao longo dos anos, as tendências arquitetônicas mudaram e este estilo foi substituído por salas mais simples, com grandes superfícies planas e poucos elementos de ornamentação, e, conseqüentemente, campos sonoros menos difusos (Parreira, 2018).

Deste modo, este trabalho irá trabalhar com os parâmetros de qualidade acústica de salas, englobando a acústica variável de salas, com foco na variação da difusão sonora de salas para música, visando fomentar esta área de conhecimento.

1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo geral deste trabalho é a avaliação de diversos parâmetros acústicos de qualidade sonora de salas, trabalhando com acústica variável com foco na alteração da difusão sonora de salas correntes destinadas à música.

Como objetivos específicos tem-se:

- a) Compreender os parâmetros acústicos de qualidade sonora de salas, identificando valores ótimos e de referência;
- b) Descrever a metodologia de uma das principais normas dedicadas ao tema das salas de música, nomeadamente a norma norueguesa NS 8178 (2014), onde se pretende estabelecer o equilíbrio do tempo de reverberação e da força sonora (G);
- c) Analisar a influência da aplicação de difusores sonoros nos parâmetros de qualidade sonora da sala, para diferentes ambientes acústicos, gerados por aplicação de soluções de acústica variável.

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente documento encontra-se dividido em 5 capítulos, apresentando-se em seguida, de forma resumida, o conteúdo de cada um dele:

- No Capítulo 1, introduz-se o tema do presente trabalho, descrevendo-se o seu âmbito, os objetivos e a organização do mesmo;
- No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão do estado da arte relativa a condicionamento acústico de salas, com ênfase na difusão sonora. Também se estuda a acústica variável, parâmetros acústicos de sala para música e a norma norueguesa NS 8178.
- No Capítulo 3, apresentam-se o estudo de caso em questão, com o ambiente de estudo escolhido, metodologia empregada, as hipóteses e cenários para análise e demais detalhes do modelo.
- O Capítulo 4 dá ênfase aos resultados e discussões resultantes das simulações realizadas e detalhadas no Capítulo 3.
- No Capítulo 5, apresentam-se as considerações finais que sintetizam os aspectos mais relevantes do trabalho desenvolvido. Como consequência destas mesmas considerações, discute-se eventuais caminhos a seguir em trabalhos futuros na sequência desta dissertação.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Condicionamento Acústico de Salas

Condicionamento acústico é o processo pelo qual se procura garantir em uma sala o tempo ótimo de reverberação e, se for o caso, também a boa distribuição do som (ABNT NBR 12.179, 1992). Porém a definição de condicionamento acústico de salas pode ser mais ampla, envolvendo o estudo das formas e das características dos materiais aplicados para obter condições auditivas adequadas e preservação dos sons desejáveis para seu uso, visando a qualidade acústica interior da sala.

Após serem fixados o volume e definidas as formas da sala, deve-se escolher materiais para revestimento adequado para atingir os parâmetros de qualidade sonora ideais da sala. Dependendo do tipo de utilização da sala será necessário potencializar as primeiras reflexões, como é o caso de teatros, e em outros tipos de utilização o objetivo pode ser conseguir uma boa difusão do som, como é o caso de salas de concerto. Deste modo, os três principais efeitos que um material pode ter, frente à energia sonora são: absorção, reflexão e difusão do som (Isbert, 1998).

Em campo livre, a propagação da onda sonora ocorre de forma livre, sem interferência de outras ondas sonora. Já em recintos fechados, as ondas sonoras se sobrepõem, sofrendo interferência das ondas refletidas pelas superfícies, como teto e parede. Quando a onda sonora atinge uma destas superfícies, parte da energia é refletida, parte é absorvida e parte é transmitida pela superfície (Bistafa, 2006).

A absorção sonora é a característica do material que permite absorver parte da energia sonora que incide na sua superfície, sendo influenciada pela espessura do material, porosidades, rigidez, tortuosidade e resistividade ao fluxo de ar. No fenômeno da absorção, parte da energia que incide no material se transforma em outro tipo de energia, geralmente térmica. Em materiais porosos ou fibrosos, o som perde energia por atrito quando passa pelos espaços vazios do material. Lã de rocha e de vidro são exemplos destes materiais absorventes, tendo como característica uma melhor absorção em médias e altas frequências sonoras. Existem outros tipos de absorvedores, como painéis vibrantes

e ressonadores que trabalham por meio de vibração, dissipando energia, sendo estes mais eficientes em absorção de baixa frequência (Bistafa, 2006).

Faz quase um século desde a publicação original de Sabine (1922) que fundou as bases da acústica arquitetônica, relacionando o volume e a absorção sonora como forma de controlar o tempo de reverberação.

Para quantificar a absorção de um material utiliza-se o coeficiente de absorção (α), que é um número variando entre 0 e 1, que trata da proporção da energia incidente que não retorna para o ambiente em forma de reflexão, ou seja, quanto maior o valor de α , mais a energia sonora é absorvida e menos será refletida (Ermann, 2015). Materiais que são considerados como absorventes são aqueles que possuem um coeficiente de absorção sonora de médio a alto; estes geralmente têm valores em torno dos 0,5, enquanto materiais com coeficientes mais baixos geralmente possuem valores menores que 0,20, indicando este valor que o material absorve apenas 20% da energia que incide sobre ele (Egan, 1989).

Os coeficientes de absorção são determinados por medições laboratoriais. Para aplicações de construções típicas, os dados de absorção do som são obtidos a partir de amostras relativamente grandes de um material (cerca de 10 m²), sendo a medição realizada em uma grande câmara reverberante de acordo com procedimentos de teste padronizados (ASTM, 2017).

A espessura total do material, incluindo o espaçamento do material em relação à superfície de apoio influencia a absorção nas baixas frequências. Quanto mais espesso e/ou mais profundo for o espaço de ar atrás da camada absorvente, maiores serão os coeficientes de absorção do som em baixa frequência (Cavanaugh et al, 2010).

Quanto maior a absorção dos materiais em um recinto fechado, menor será o tempo de reverberação, conseqüentemente, outros parâmetros de qualidade sonora de salas serão alterados.

Na reflexão sonora, em contrapartida, a onda incide na superfície reflexiva e retorna para o ambiente, ou seja, não é absorvida. Em superfícies planas e lisas ocorre a reflexão especular, ou seja, as ondas sonoras incidentes na superfície serão refletidas no mesmo ângulo de entrada. Caso esta mesma onda atinja outro tipo de superfície, irregular ou rugosa, e o ângulo de reflexão desta onda for divergente, esta reflexão é denominada difusa. As reflexões especular e difusa dependem do comprimento de onda sonora e das

irregularidades das superfícies. Para ser especular o comprimento de onda deve ser muito maior que as irregularidades da superfície, já para ser difusa o comprimento de onda deve ser compatível com as irregularidades das superfícies. Na Figura 1 apresenta-se os três efeitos já descritos (Mehta et al., 1999).

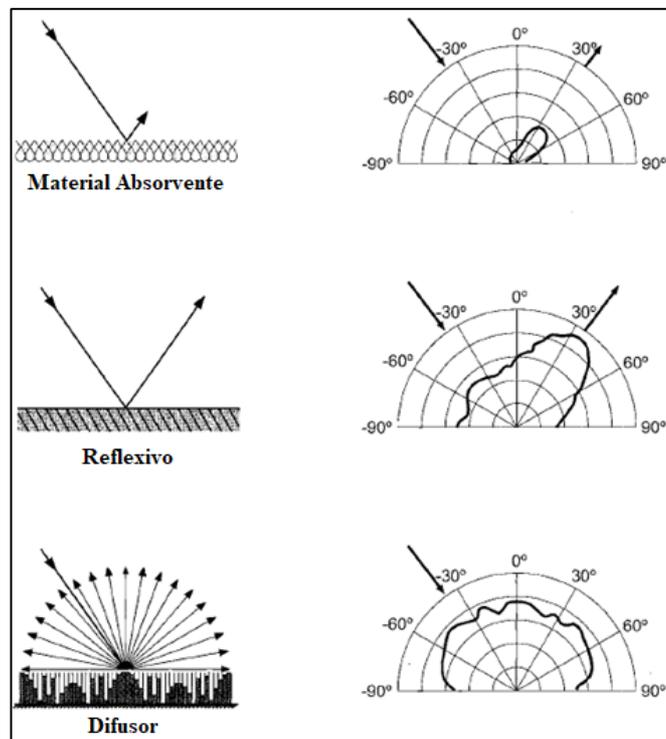


Figura 1: Comparativo entre os efeitos de absorção, reflexão especular e difusão do som (Adaptado de Isbert, 1998).

A existência de difusão da onda sonora em salas de concerto significa que a energia de campo reverberante chegará aos ouvidos do público de forma mais homogênea por todas as direções do espaço, contribuindo para uma avaliação subjetiva positiva da qualidade acústica de salas (Isbert, 1998).

2.2 Difusão Sonora

A energia sonora refletida pode ser classificada como especular ou difusa. Um reflexo especular, como a luz refletida em um espelho, ricocheteia na superfície com o mesmo ângulo de entrada. Ocorre uma reflexão difusa quando a energia sonora é espalhada em direções não especulares. Os três mecanismos da reflexão difusa são: Rugosidade da superfície refletora; Difração da borda; e Tratamento de parede chamado difusor numérico (Rathsam, 2006).

Os difusores acústicos são correntemente utilizados no condicionamento acústico de salas com maior exigência acústica, como estúdios e salas de espetáculos, servindo para garantir uma acústica adequada, sem absorção excessiva e espalhando o som com mais uniformidade pela sala. Eles também ajudam a eliminar os defeitos acústicos como ecos, primeiras reflexões intensas e zonas de sombra (D'Antonio, 1998).

A difusão sonora em uma sala se consegue mediante a colocação de elementos desenhados para dispersar o som, de forma uniforme e em múltiplas direções. A existência de difusor sonoro em salas de concerto permitirá que a energia sonora do campo reverberante chegue aos ouvidos dos espectadores de forma homogênea em todas as direções, criando um som altamente envolvente e aumentando o grau de impressão espacial existente. Quando maior o grau de impressão espacial, melhor será a avaliação subjetiva de qualidade acústica da sala (Isbert, 1998). Para salas de palavra falada, como em teatros, também se percebe o benefício da utilização de difusores para evitar a distorção de reflexões iniciais, que são essenciais para fornecer inteligibilidade (Perry, 2011).

Na Figura 2 está um exemplo de difusão produzida por um conjunto de pirâmides construídas tendo por base um material reflexivo e dispostas sobre uma parede rígida. Nota-se que com a frequência de 100 Hz as reflexões geradas são especulares, pois o comprimento de onda é muito maior que a dimensão das pirâmides. Já com a frequência de 1000 Hz, há uma boa difusão do som, visto que a dimensão máxima de cada pirâmide é do mesmo tamanho que o comprimento da onda.

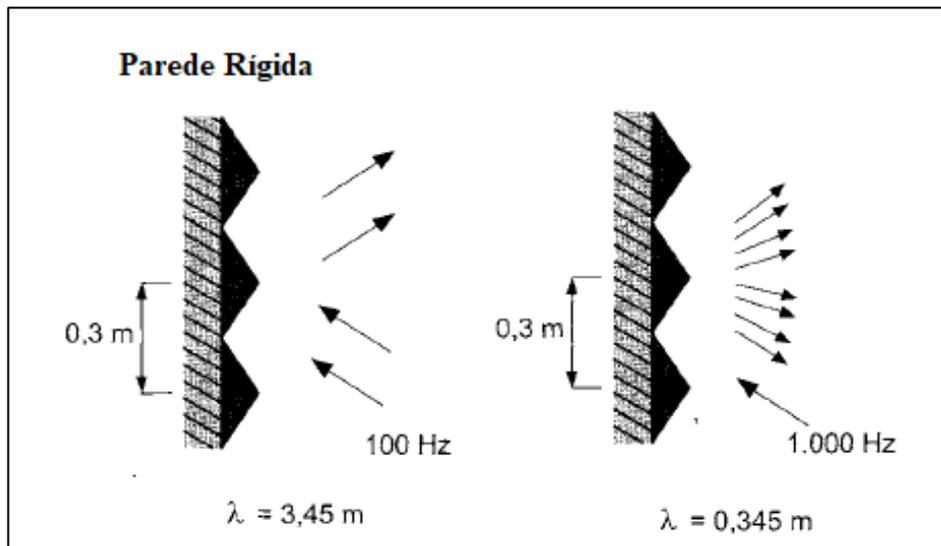


Figura 2: Exemplo de difusão do som produzido por um conjunto de pirâmides (adaptado de Isbert, 1998).

A difusão é muito utilizada para consertar ou prevenir defeitos acústicos em salas, conservando a energia sonora do espaço, sem que modifique a absorção e o tempo de reverberação na sala. É, por isso, hoje em dia consensual que, em locais, como as paredes traseiras de grandes auditórios ou quando existem paredes paralelas, os difusores sejam uma boa forma de tratamento, e podem mesmo superar o desempenho acústico das tradicionais abordagens de absorção (Godinho et al, 2015).

Na norma ISO 17497-1 (2004) e ISO 17497-2 (2012) encontra-se o procedimento para realização da avaliação laboratorial de um difusor sonoro, descrevendo o modo de obtenção das respostas polares, coeficiente de difusão e coeficiente de dispersão de um difusor. A difusão provocada por uma superfície pode ser classificada através de dois coeficientes, são eles:

Coeficiente de difusão (d) – é uma medida da uniformidade do som refletido. A finalidade deste coeficiente é permitir a conceção de difusores, bem como permitir a técnicos de acústica comparar o desempenho e as especificações das superfícies a utilizar.

Coeficiente de dispersão (s) – é uma relação entre a energia do som dispersa de uma forma não especular e o total de energia sonora refletida. A finalidade deste coeficiente é caracterizar a dispersão superficial normalmente para a utilização em programas de modelação baseados em acústica geométrica (Afonso, 2014).

Nos próximos itens detalha-se melhor os tipos mais comuns de difusores.

2.2.1 Difusores Triangulares e Piramidais

Em relação às superfícies triangulares e piramidais, estas têm a capacidade de gerar reflexões especulares ou reflexões difusas, dependendo da angulação entre as placas e sua disposição, conforme pode ser exemplificado na Figura 3 (Cox, Trevor J., 2009).

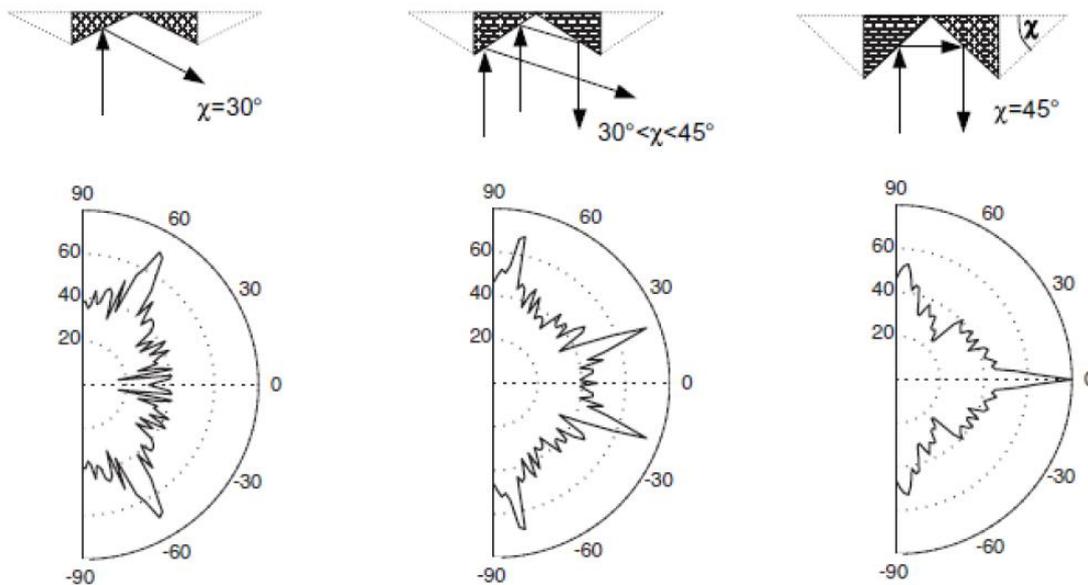


Figura 3: Nível de dispersão sonora do centro de dois triângulos para três angulações, $\chi=30^\circ$, ente 30° e 45° , 45° respectivamente (Isbert, 1998).

Analisando a Figura 3 percebe-se que a variação geométrica/angular dos triângulos tem influência de como o difusor irá dispersar a energia sonora, podendo gerar dispersão, reflexões especulares e direcionamento sonoro. A energia refletida em determinadas direções pode ser reduzida com a utilização consciente de difusores geométricos.

2.2.2 Difusores Policilíndricos

Este tipo de difusor consiste em um conjunto de superfícies lisas de forma convexa dispostas sequencialmente e com um raio de curvatura inferior a cinco metros, aproximadamente. As superfícies convexas com raio superior a cinco metros trabalham refletindo o som, porém de forma similar a uma superfície plana. Raios de curvatura menores que cinco metros aumenta a zona de cobertura de modo que o som refletido já não é concentrado na zona do público, conforme Figura 4 (Isbert, 1998).

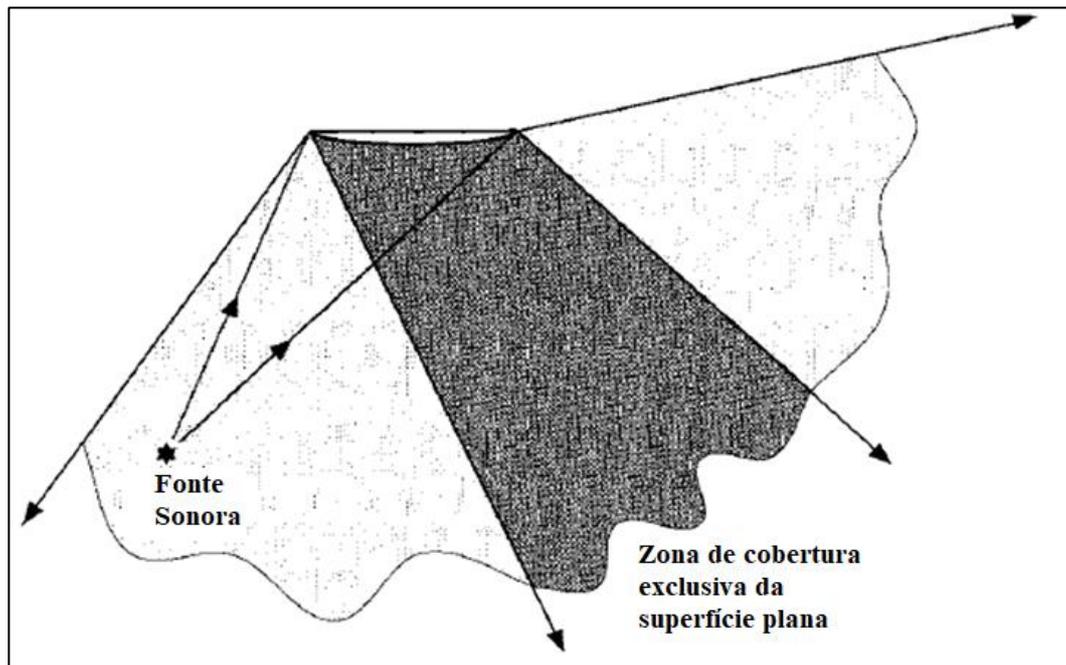


Figura 4: Comparação entre as zonas de cobertura associadas a um refletor plano e a uma superfície convexa integrante do difusor policilíndrico (adaptado de Isbert, 1998).

2.2.3 Difusores de Schroeder

Os difusores de Schroeder popularizam o uso de difusores em projeto acústico de salas, apresentando aspecto a gosto das tendências arquitetônicas modernas. As características de espalhamento sonoro de difusores podem ser atualmente obtidas numérica e experimentalmente, estas últimas com metodologias normatizadas internacionalmente (Bistafa, 2004).

Estes difusores compreendem uma sequência de cavidades cujas profundidades são determinadas por uma sequência pseudo-aleatória de números e, portanto, introduzindo mudanças de fase no campo sonoro refletido (Schröder, 1979).

Este tipo de difusor aplica-se em cima das paredes ou teto, sendo desenhado de modo a atuar como superfície difusora do som em determinadas frequências, calculadas pela teoria dos números criada pelo investigador Manfred R. Schroeder. Os tipos de difusores de Schroeder mais relevantes são: difusores MLS, QRD e PRD.

Os difusores MLS consistem em uma superfície dentada, sendo criada a partir de uma superfície lisa e reflexiva, subdividindo-a em trechos de profundidade igual. Este tipo de difusor apresenta uma menor absorção em baixas frequências, em comparação com o QRD e PRD, podendo ser utilizada em salas de concerto em uma maior percentagem sem

que ocorra uma diminuição excessiva do tempo de reverberação nestas frequências. Na Figura 5 está um exemplo da aplicação dos difusores MLS instalados em 1994 nas paredes laterais da Sala Pleyel, em Paris (Isbert, 1998).

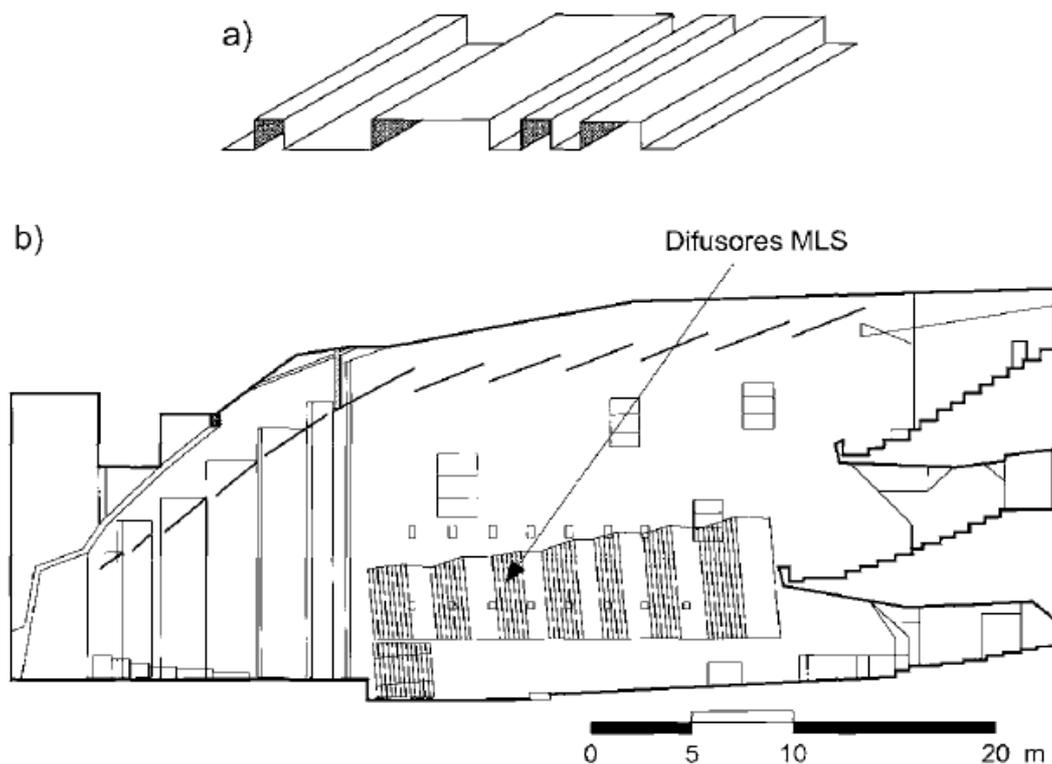


Figura 5: Difusores MLS instalados nas paredes laterais da Sala Pleyel (França): a) amostra unitária; b) seção longitudinal da sala com indicação da localização dos difusores (Isbert, 1998).

Já o difusor QRD pode ser encontrado num formato unidirecional ou bidirecional. Os unidirecionais são os mais utilizados, tanto em salas de concerto quanto em estúdios de gravação. Consistem em uma série de ranhuras paralelas de forma retangular, de igual largura e com profundidades distintas. Na Figura 6 apresentam-se três tipos de QRD com diferentes profundidades e larguras (Isbert, 1998).

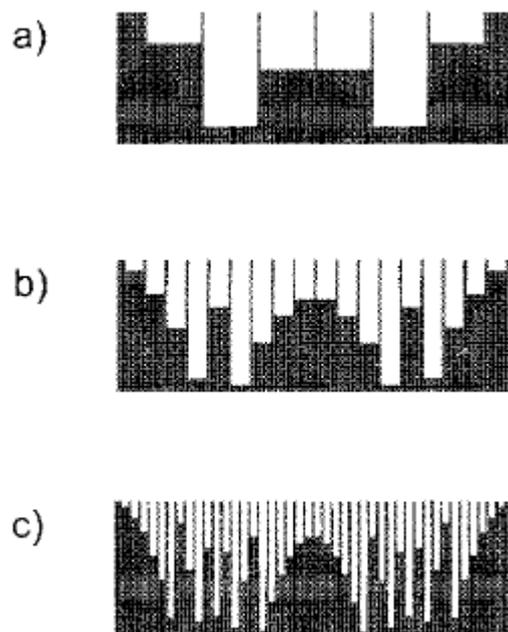


Figura 6: Perfil de três tipos de difusores unidirecional tipo QRD (Isbert, 1998).

Já o QRD bidirecional tem como objetivo obter uma ótima difusão do som em todas as direções do espaço. São compostos por orifícios paralelos de profundidade variável e forma habitualmente quadrada, conforme representado na Figura 7.

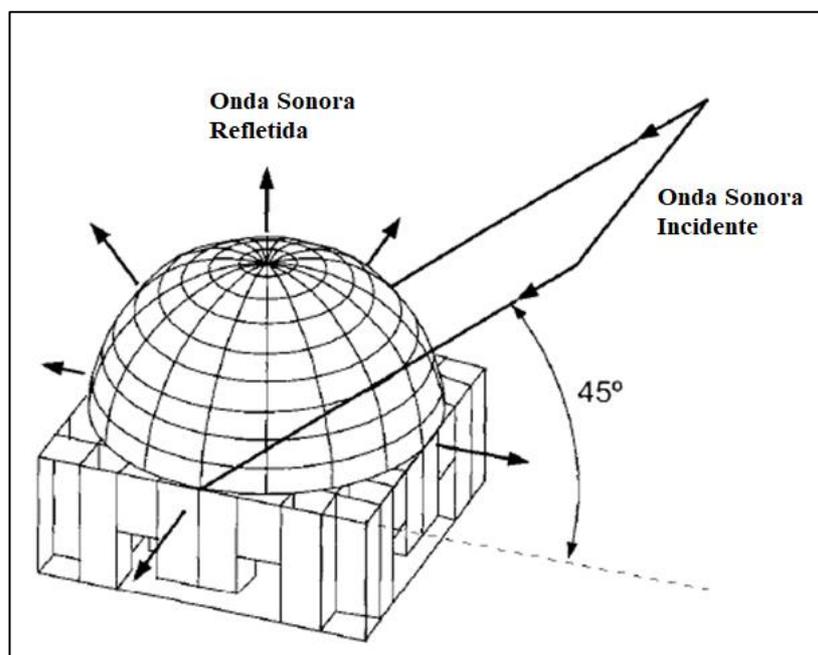


Figura 7: Difusão produzida por um difusor QRD de uma onda sonora incidente a um ângulo de 45° em relação a superfície (adaptado de Isbert, 1998).

Por fim, o difusor PRD é análogo ao QRD unidirecional, com a única diferença na profundidade de cada ranhura que se obtém por cálculos distintos.

Novos tipos difusores podem ser sempre criados e modelados, visando uma aparência mais apelativa com eficiência acústica desejada. Para tal, métodos de cálculos podem ser utilizados para a determinação da resposta destes novos difusores, como o método dos elementos de fronteira (BEM), modelos de Fraunhofer, modelos de Fourier, modelos de diferenças finitas e análises de elementos finitos (Redondo, 2007).

2.3 Acústica variável

O uso de salas para mais de uma finalidade é longe de ser algo recente, porém o design acústico consciente de salas para acomodar mais de um tipo de uso é relativamente novo. Em muitas regiões, não é economicamente viável ter um espaço para somente um uso, sendo a flexibilidade acústica essencial para permitir diferentes utilizações.

Uma forma de proporcionar um desempenho acústico mais adequado para cada função de um auditório é utilizar técnicas de acústica variável para controlar o tempo de reverberação e outros fenômenos acústicos relevantes. Estas soluções podem modificar o ambiente acústico quer através da implementação de sistemas eletroacústicos (acústica variável ativa) quer através de alterações arquitetônicas (acústica variável passiva) (Pereira et al, 2021).

Estudos realizados no ramo da acústica mostram que mudanças físicas em uma sala devem ser substanciais para que sejam perceptíveis ao público, ou seja, para que a acústica variável seja significativa, são necessárias grandes mudanças (Isbert, 1998).

Para acomodar dois ou mais tipos de usos em uma sala com requisitos acústicos distintos, é desejável que ocorra a mudança do tempo de reverberação. Uma abordagem simplificada consiste na introdução de absorvedores acústicos, porém além de diminuir a reverberação acarretará redução do nível de pressão sonora, podendo não ser desejável. Para música popular tem-se preferência por um tempo de reverberação mais baixo, porém se este mesmo ambiente dará espaço para grupos de orquestra, esta reverberação mais baixa não será desejável, pois apesar dos dois usos propostos serem a música, para cada tipo de música existem requisitos e parâmetros acústicos distintos (Barron, 2010).

Alguns autores propõem a adoção de limites máximos e mínimos para o tempo de reverberação em salas multifuncionais, conforme apresentado na Figura 8 a seguir de Johnson (1962, apud Marshall e Klepper, 1999).

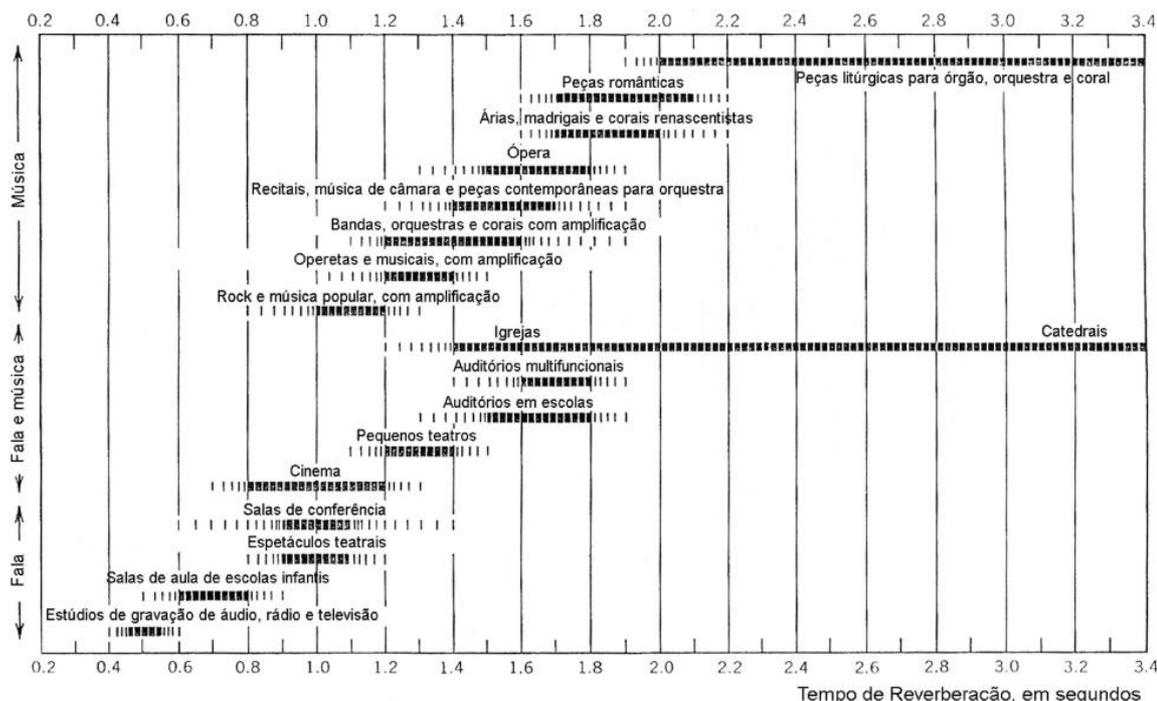


Figura 8: Recomendação de Johnson para os limites máximos e mínimos do tempo de reverberação de ambientes, de acordo com o tipo de programa exibido (Marshall e Klepper, 1999).

Para os autores dos gráficos acima, se o ambiente for multifuncional, o tempo de reverberação deverá estar entre 1,6 a 1,8 segundos. Muitos autores discordam desta abordagem, visto que o ambiente não ficará ideal para nenhum uso, surgindo o conceito da acústica variável, onde se busca a alteração dos parâmetros acústicos, por meio de elementos físicos ajustáveis ou eletroacústica, de uma mesma sala para os diferentes usos.

Se analisarmos a famosa equação de Sabine, tem-se duas principais variáveis que influenciam o tempo de reverberação, sendo o volume do ambiente interno e a quantidade de materiais absorventes. A variação do volume apresenta a vantagem de não alterar o nível de pressão sonora, em comparação com o uso de materiais absorventes, porém muitas vezes torna-se difícil a implementação em certas configurações de salas (Barron, 2010).

2.3.1 Volume Variável

A Sala São Paulo é a primeira sala de concertos no Brasil e é um exemplo clássico de acústica variável por meio de alteração do volume da sala. Esta sala tem capacidade para receber 1388 espectadores e possibilita a apresentação de diversos tipos de concerto com estilos de música distintos, alterando a acústica da sala por meio da presença de um forro com painéis móveis, conforme representado na Figura 9.



Figura 9: Fotografia da Sala São Paulo (PEEL, 2018).

Conforme Isbert (1998), existem quatro métodos para obtenção de um volume variável, sendo a primeira mediante uma partição móvel vertical, a segunda consiste em um sistema que consiga abrir e fechar o teto falso, a terceira mediante cavidades reverberantes acopladas na sala e a quarta que seria por meio de painéis móveis suspensos no teto.

A primeira solução, que seria a utilização de partições verticais móveis acaba por permitir a divisão da sala inicial em dois subespaços diferenciados, diminuindo o tempo de reverberação e criando outro espaço que poderia ser utilizado ao mesmo tempo que a sala principal. Em contrapartida, esta diminuição do espaço acarreta redução do número de assentos disponíveis. Além disso, para as duas salas criadas serem utilizadas ao mesmo tempo, deverá ter uma preocupação redobrada com o isolamento acústico da partição móvel vertical. Na Figura 10 apresentam-se exemplos de divisórias móveis verticais.



Figura 10: Divisórias móveis de alto isolamento acústico (Isbert, 1998).

A segunda solução que permite abrir e fechar o teto falso, também serve para modificar o volume da sala, conforme necessidade. Para esta solução ser efetiva, a percentagem do teto com abertura deve ser no mínimo 40% e o espaço superior, entre o teto falso e laje, deve ser muito reverberante.

A terceira opção para alterar o volume da sala trata-se da utilização de cavidades reverberantes especificamente desenhadas para incrementar o volume e reverberação da sala. Estas cavidades geralmente estão na zona perimetral do ambiente e o acoplamento pode ser realizado por controle remoto. Quando as divisórias deste sistema estão fechadas, a sala tem o seu próprio tempo de reverberação, porém quando se abrem percebe-se um prolongamento da cauda reverberante. A Figura 11 apresenta o esquema do Eugene McDermott Concert Hall, ilustrando as cavidades reverberantes.

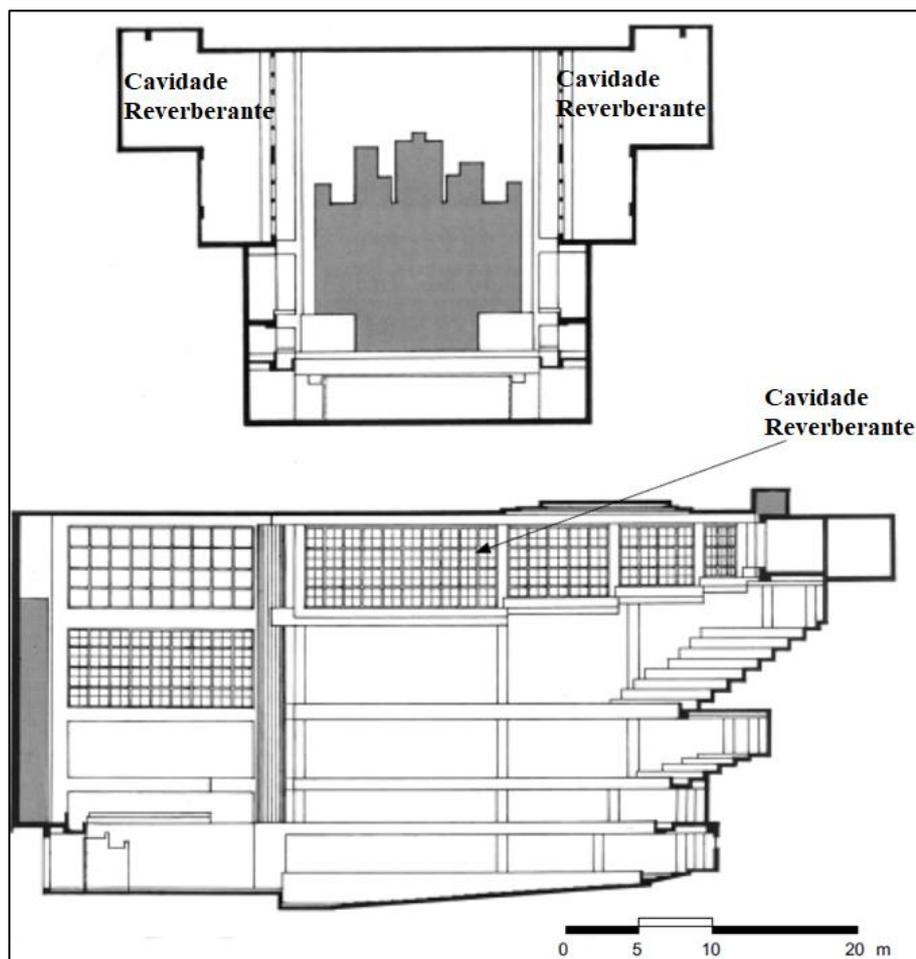


Figura 11: Cavidades reverberantes do Eugene McDermott Concert Hall em Dallas, USA (adaptado de Isbert, 1998).

E por fim, os painéis móveis suspensos no teto também podem ser uma estratégia interessante de acústica variável. Estes painéis suspensos podem ser descidos, reduzindo o volume da sala e consequentemente aumentando a energia das primeiras reflexões com as devidas inclinações dos painéis. Este sistema pode não ser viável em algumas salas devido a compatibilização com o sistema de iluminação e climatização. Segue na Figura 12 o exemplo ilustrativo Cain Auditorium de Manhattan, em Kansas (EUA), onde pode-se perceber a alteração do volume e das primeiras reflexões.

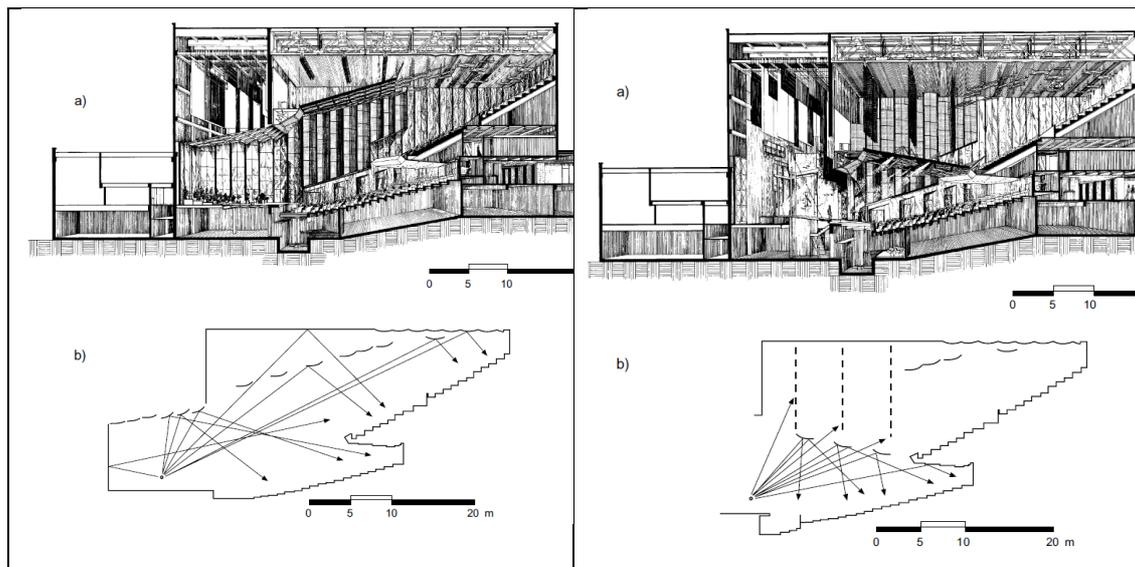


Figura 12: Cain Auditorium (Isbert, 1998).

2.3.2 Absorção Variável

Além da alteração do volume já descrito, a alteração da absorção de uma sala também é uma solução de acústica variável. Para salas grandes deve haver uma significativa alteração na absorção para a variação ser perceptível. Cortinas, painéis móveis e giratórios são exemplos de mecanismos utilizados para a variação de absorção de uma sala.

Para Isbert (1998), a utilização de cortinas na frente de superfícies refletoras é uma solução de acústica variável econômica e eficaz, desde que as cortinas tenham densidade elevada (aproximadamente $0,5 \text{ kg/m}^2$). Este material absorve nas médias e altas frequências, sendo pobre a absorção em baixas frequências, podendo ocasionar em desequilíbrio no tempo de reverberação. Para melhorar sua fragilidade em baixas frequências, pode-se afastar as cortinas da parede.

Outra opção para auxiliar na acústica variável de uma sala seria a utilização de painéis móveis reflexivos na frente de uma parede, que se movem lateralmente por meio de trilhos. Idealmente, a parede é revestida com 50% material absorvente de alto desempenho e dependendo da necessidade de reverberação, este material pode ficar aparente ou tampado com os painéis móveis reflexivos, ou seja, caso se deseje o menor tempo de reverberação na sala deve-se deixar aparente todo material absorvente. Na Figura 13 apresenta-se um esquema de princípio deste conceito, com as duas posições extremas dos painéis móveis.

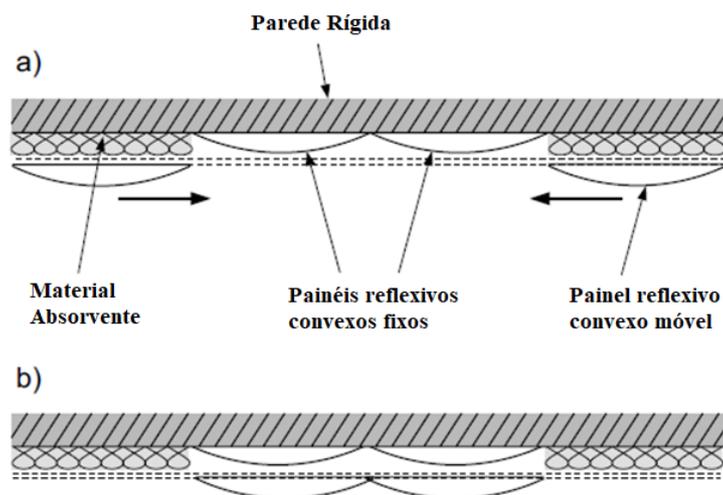


Figura 13: Painéis móveis reflexivos montados em frente a uma parede com 50% de material absorvente. a) posição com mínimo de absorção; b) posição com máximo de absorção (adaptado de Isbert, 1998).

Uma variação dos painéis móveis reflexivos, são os painéis perfurados sobrepostos, que também utilizam painéis reflexivos, porém são duplos e perfurados, sendo um fixo e outro móvel. Na Figura 14 pode-se compreender melhor o funcionamento, porém quando as perfurações dos dois painéis coincidem cria-se um ressonador múltiplo, com o material absorvente aparente e quando as perfurações não coincidem, o painel se torna reflexivo.

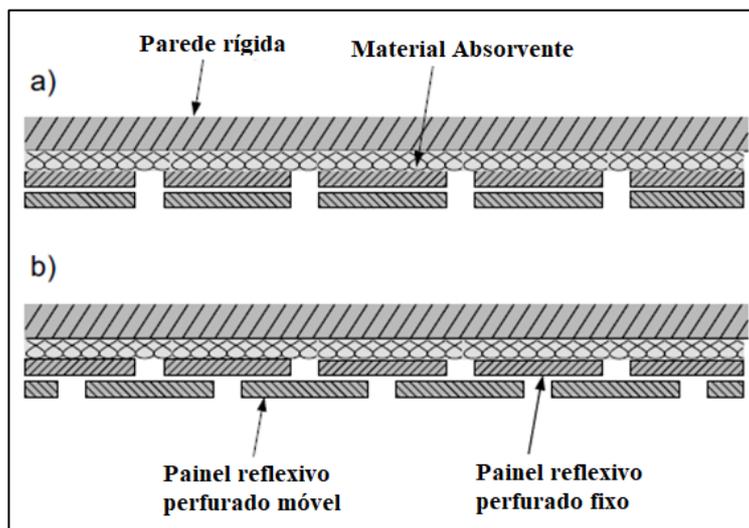


Figura 14: Painéis perfurados montados na frente de uma parede tratada com material absorvente (vista em planta) a) posição com máxima absorção; b) posição de mínima absorção (adaptado de Isbert, 1998).

Estes painéis móveis também podem ser giratórios, com configuração de rotação de 180°, 90° e 360°. Para cada um destes ângulos, mecanismos distintos de ferragens e dobradiças são necessários.

Quando se opta pela rotação de 180°, utiliza-se um painel com uma face absorvente e outra reflexiva. Quando a posição está fechada, oferecem uma superfície reflexiva, já quando abertas tornam-se absorventes, conforme Figura 15.

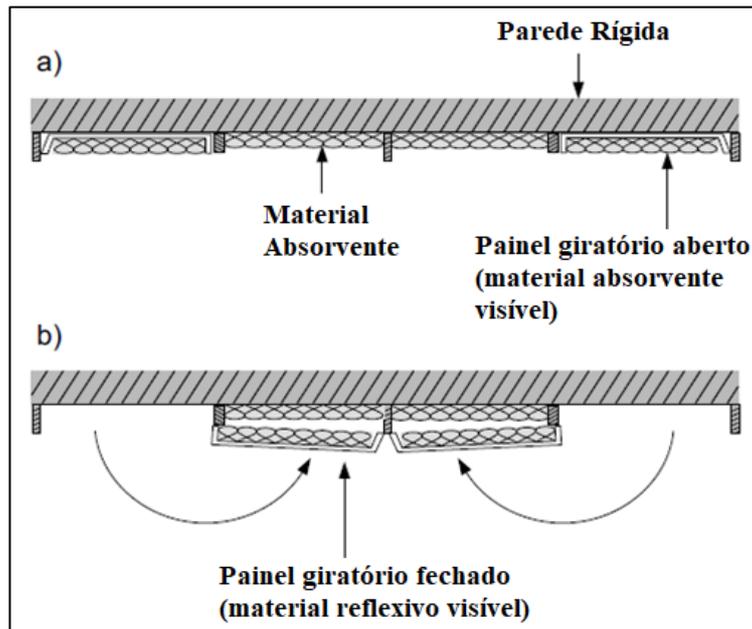


Figura 15: Painéis giratórios com um lado reflexivo e outro absorvente, com configuração de instalação igual a uma porta giratória. a) posição de máxima absorção; b) posição de mínima absorção (adaptado de Isbert, 1998).

Para a rotação de 90°, deve-se aplicar material absorvente em toda a parede sendo o giro e seu sentido representados na Figura 16. Quando o sistema se encontra fechado a superfície reflexiva é convexa, de modo a evitar possíveis ecos. Este sistema apresenta maior variação do tempo de reverberação, devido a maior área absorvente.

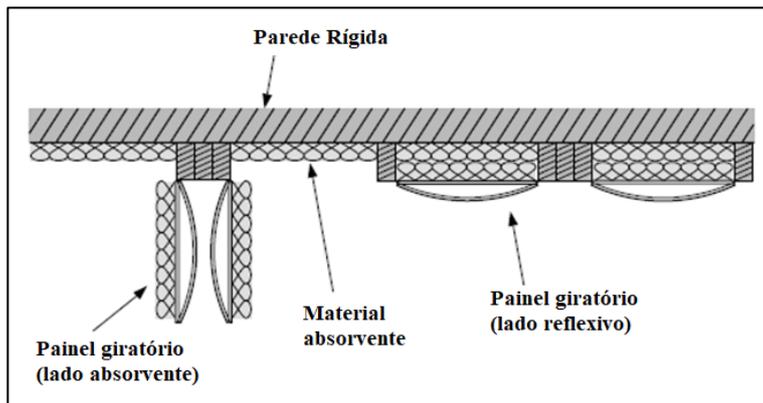


Figura 16: Painéis giratórios com rotação de 90° (adaptado de Isbert, 1998).

Em relação a painéis com rotação de 360°, existem soluções em prismas onde uma superfície é absorvente, uma reflexiva e outra difusora, conferindo ao ambiente onde estão inseridos elevado grau de versatilidade, ilustrado na Figura 17.

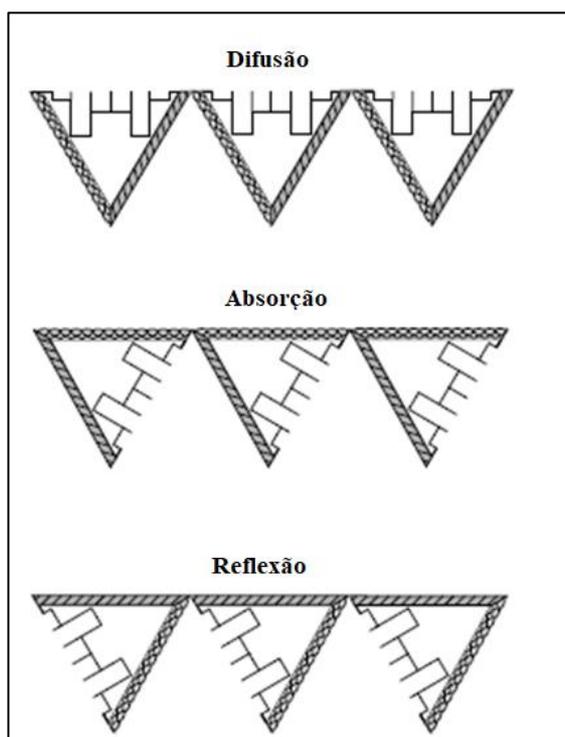


Figura 17: Prisma giratório com diferentes combinações entre os três prismas para uma acústica variável (adaptado de Isbert, 1998).

2.4 Parâmetros acústicos de salas de música

2.4.1 Tempo de Reverberação (TR)

Fogg Art Museum é um auditório na Universidade de Havard que foi inaugurado em 1895, renomado pela sua arquitetura, porém com grandes problemas acústicos, onde os alunos não compreendiam as falas dos professores. Wallace C. Sabine foi chamado para solucionar este problema, realizando ensaios no ambiente. Sabine detectou que o maior problema era que o som ficava muito tempo no ambiente após a fonte sonora ser interrompida, refletindo sucessivas vezes nas superfícies, fazendo com que as sílabas ou notas musicais tocadas se sobrepusessem umas com as outras. Foi notado neste ambiente que o tempo em que o som permanecia na sala dependia da absorção dos materiais presentes nela, sendo desenvolvida a equação (1) abaixo (Ermann, 2015).

$$TR = 0,163 \frac{V}{A} \quad (1)$$

Sabine constatou que o Tempo de Reverberação (TR) é função do volume total V e da área equivalente de absorção A, correspondente à soma das áreas S_i que compõem a superfície de cada elemento da sala pelo coeficiente de absorção de cada elemento, conforme equação (2).

$$A = \sum_i \alpha_i S_i \quad (2)$$

Deste modo, o tempo de reverberação (do inglês “reverberation time”, TR) é o tempo, em segundos, para que o nível de pressão sonora diminua 60 dB (Figura 18), após interrupção da fonte sonora (Kuttruff, 2000).

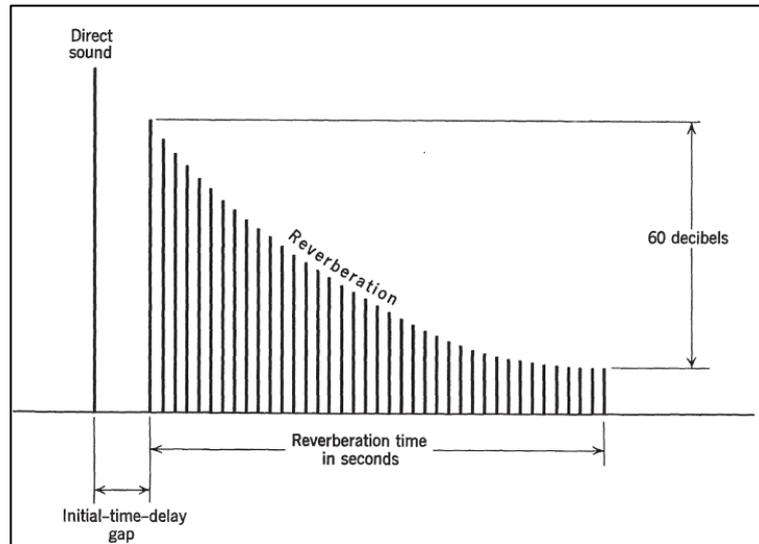


Figura 18: Representação do decaimento do som para obtenção do tempo de reverberação (Beranek, 2004).

O tempo ótimo de reverberação de cada sala varia com a atividade a ser exercida no ambiente. Para salas onde a inteligibilidade da palavra é essencial, busca-se tempos de reverberação mais baixos, já para ambientes destinados à música, tempos de reverberação mais altos são desejados (ABNT NBR 12.179, 1992). Na Figura 19, Figura 20, Quadro 1 e Quadro 2 seguem referências de tempos de reverberação ótimo para diferentes usos e volumes de salas.

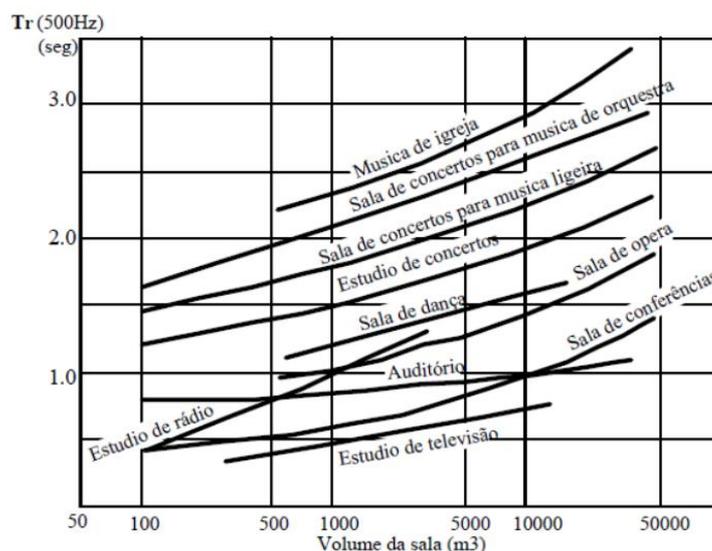


Figura 19: Tempo Ótimo de Reverberação, a 500 Hz, para diferentes utilizações (Tadeu et al, 2010).

Quadro 1: Margem dos valores ótimos de tempo de reverberação para diferentes tipos de salas ocupadas, média das bandas de frequência de 500 Hz e 1 kHz (Isbert, 1998).

TIPO DE SALA	RT _{mid} , SALA OCUPADA (EN s)
Sala de conferencias	0,7 – 1,0
Cine	1,0 – 1,2
Sala polivalente	1,2 – 1,5
Teatro de ópera	1,2 – 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 – 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 – 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 – 3,0
Locutorio de radio	0,2 – 0,4

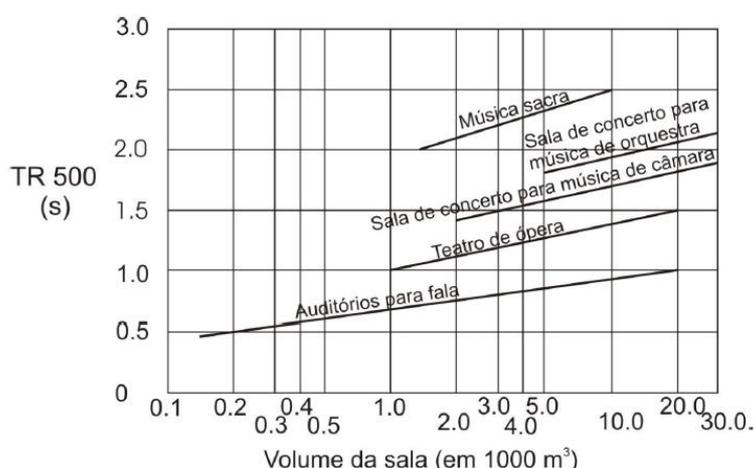


Figura 20: Tempo ótimo de reverberação, para frequência de 500 Hz, para diversos usos e volumes (Mehta et al.,1999).

Quadro 2: Tempo ótimo de reverberação para diferentes tipos de música, média das bandas de frequência de 500 Hz e 1 kHz (Barron, 2010).

Tipo de música	Tempo de reverberação (s)
Organ Music	> 2,5
Romantic Classical	1,8 – 2,2
Early Classical	1,6 – 1,8
Opera	1,3 – 1,8
Chamber Música	1,4 – 1,7

Em salas destinadas à música o TR tem papel principal, sendo que as Salas de Concerto mais famosas apresentam tempos de reverberação nas frequências médias de 1,8 a 2,0 s (salas ocupadas). A reverberação é um componente disponível para os músicos para produzirem efeito musical, permitindo que o espaço entre novas notas quando tocadas

seja preenchido. Em medições realizadas por Beranek (2004), as melhores salas de concerto apresentaram tempo de reverberação de 1,8 a 2,0 segundos, porém dependendo do estilo musical e peça tocada outros tempos são requeridos.

Arau-Puchades (1997) propõe valores para tempos ótimos de reverberação conforme tipo atividade, voltadas à música, estabelecendo níveis mínimos e máximos, conforme descritos no Quadro 3.

Quadro 3: Tempo ótimo de reverberação para diferentes usos, média das bandas de frequência de 500 Hz e 1 kHz (Arau-Puchades, 1997).

Concerto	$Tr_{\text{médio}} \text{ óptimo (máximo)} = 0,60 \cdot V^{0,1325}$ $Tr_{\text{médio}} \text{ óptimo (mínimo)} = 0,5125 \cdot V^{0,1328}$
Câmara	$Tr_{\text{médio}} \text{ óptimo (máximo)} = 0,5123 \cdot V^{0,1328}$ $Tr_{\text{médio}} \text{ óptimo (mínimo)} = 0,4245 \cdot V^{0,1331}$
Ópera	$Tr_{\text{médio}} \text{ óptimo (máximo)} = 0,509 \cdot V^{0,1325}$ $Tr_{\text{médio}} \text{ óptimo (mínimo)} = 0,396 \cdot V^{0,1273}$
Obs: V – volume interior do recinto (m ³).	

Salas com longo tempo de reverberação são ditas salas "vivas", enquanto salas com elevado índice de absorção e que refletem pouco som para o ouvinte são ditas salas "mortas/secas". É uma qualidade relacionada diretamente ao tempo de reverberação da sala (Beranek, 2004).

Uma sala tem vivacidade quando, entre outras ocorrências, apresenta um volume total muito maior que o volume ocupado pela audiência ou quando apresenta superfícies bastante refletoras. Uma sala viva concede "preenchimento sonoro" à música e contribui para a fusão dos timbres instrumentais e melhora a difusão. Vivacidade está relacionada com o tempo de reverberação nas frequências médias entre 350 e 1400 Hz, pois nosso sistema auditivo é mais sensível nestas frequências (Iazzeta et al., 2004).

Seguem, no Quadro 4, valores de tempo de reverberação medido por Beranek em salas consideradas "secas". John Barbirolli, Eugene Ormandy, Fritz Reiner, Pierre Monteux e outros representaram descontentamento em relação a vivacidade das salas. (Figueiredo, 2005).

Quadro 4: Tempo de Reverberação em 1 kHz para salas consideradas secas e medição com salas ocupadas (Beranek, 2004).

Orchestra Hall (Chicago)	1,3 s
Academy of Music (Philadelphia)	1,4 s
Kresge Auditorium (Cambridge)	1,47 s
Royal Festival Hall (Londres)	1,5 s

Deste modo, Beranek concluiu que para uma orquestra sinfônica, o tempo de reverberação mínimo seria de 1,6s para possuir uma vivacidade razoável. Em contrapartida com o quadro anterior, o

Quadro 5 apresenta salas com tempos de reverberação com grande aceitação entre os maestros (Figueiredo, 2005).

Quadro 5: Tempo de Reverberação em 1 kHz para salas com grande aceitação e medição com salas ocupadas (Beranek, 2004).

Grosser Musikvereinsaal (Viena)	2,05 s
Tanglewood Music Shed (Lenox)	2,05 s
Concertgebouw (Amsterdam)	2,0 s
Symphony Hall (Boston)	1,8 s
Teatro Colón (Buenos Aires)	1,8 s
Carnegie Hall (New York)	1,7 s

2.4.2 Tempo de Reverberação mais Curto (EDT)

O tempo de reverberação mais curto (do inglês “*early decay time*”, EDT) é o tempo, em segundos, de decaimento da energia sonora, expresso e medido da mesma maneira que o Tempo de Reverberação, porém baseado nos primeiros 10 dB de decaimento do som. Se o ambiente for extremamente difuso, ou seja, o decaimento for completamente linear, o TR e o EDT serão idênticos. O EDT tem mostrado melhor correlação à análise subjetiva da reverberação que o TR tradicional, visto que o efeito das primeiras reflexões é o mais percebido pelos ouvintes (Atal et al., 1965).

O EDT é uma medida relacionada com as alterações da geometria da sala. Em situações em que a maior parte das primeiras reflexões são direcionadas para a plateia e a menor para a região do palco, os valores de EDT tendem a ser menores que o tempo de reverberação; já no caso em que o campo sonoro é mais difuso na sala como um todo, o tempo de reverberação mais curto tende a ter valores mais próximos do tempo de reverberação (Jordan, 1970).

Quando um músico ou um grupo toca uma música com velocidade rápida, somente a parte inicial do decaimento do som permanece audível entre as notas sucessivas, deste modo o EDT indica a qualidade acústica de salas melhor de que o TR tradicional, pois as notas tocadas por violinistas em composições sinfônicas seguem-se umas às outras muito rapidamente. Estudos realizados por Beranek (2004) consideram valores de referência para as melhores Salas de Concerto, desocupadas, de 2,25 a 2,75 segundos. Para salas menos favorecidas, um limite de 1,4 a 2,0 segundos.

2.4.4 Bass Ratio (BR)

Em acústica de salas, o calor está relacionado como a presença de sons graves. Ocorre quando o tempo de reverberação nas frequências baixas (menores que 250 Hz) é suficientemente grande para garantir que estas frequências sejam claramente distinguidas (Iazzeta et al., 2004).

O indicador mais utilizado para avaliar o calor é o “Bass Ratio” (BR), que consiste na relação entre a soma dos tempos de reverberação (TR) nas bandas de oitava de 125 e 250 Hz e a soma de TR nas bandas de oitava de 500 e 1000 Hz (Beranek, 2004). Beranek também realizou ensaio em diversas salas e utilizando o cálculo do BR chegou no Quadro 6 com valores de referência.

Quadro 6: Critério de mérito para BR (Beranek, 2004).

Categoria	BR250	BR125	BR médio	Pontos
Excelente	1,14	1,27	1,21	15
Boa	1,06	1,03	1,05	9
Regular	0,97	0,95	0,96	5
Pobre	0,90	0,86	0,88	2

Deve-se se atentar para o uso de madeiras finas em salas de concerto, pois a vibração destas chapas acarreta absorção de graves, o que não é desejável.

2.4.5 Brilho (*Brilliance*)

O brilho depende da componente de frequências altas e o indicador utilizado para avaliar o brilho é a Razão de agudos, que é a relação entre a soma dos tempos de reverberação nas bandas de oitava de 2 kHz e 4 kHz e a som nas bandas de 500 e 1000 Hz. O Brilho deve ser maior ou igual a 0,87 para salas de concerto. O brilho está para as altas frequências assim como o calor está para as frequências baixas (Beranek, 2004).

2.4.6 ITDG (*Initial Time Delay Gap*)

Impressão determinada pelo intervalo de tempo entre o som que chega diretamente e sua primeira reflexão proveniente das superfícies refletoras (Iazzeta et al., 2004).

Uma sala possui intimismo acústico se a música tocada em seu interior dá a sensação de estar sendo tocada em uma sala pequena, pois as pessoas geralmente preferem salas menores, onde elas ficam mais próximas das fontes e conseqüentemente escutam as reflexões sonoras logo após o som direto (Siebein e Kinzey, 1999).

Vale ressaltar que podemos ter salas de grandes dimensões com a sensação de intimismo. Uma estratégia para que isto ocorra é o posicionamento de superfícies refletoras em pontos próximos dos ouvintes.

Se a diferença de tempo entre o som direto e a primeira reflexão, também conhecido como ITDG (Initial Time Delay Gap), é pequena, tem-se a impressão de intimismo na sala. Medições acústica realizadas mostram que nas melhores salas de concerto o ITDG fica menor de 25ms (Beranek, 2004).

2.4.7 Clareza Musical e Definição (*C80 e D50*)

O grau em que um ouvinte pode distinguir sons ao ouvir uma apresentação musical ou a palavra falada, é descrita pelos indicadores acústicos Clareza Musical e Definição, respectivamente. Quando a música tocada numa sala soa bem definida, com articulações sonoras límpidas e precisas independentemente da velocidade da música, dizemos que a sala apresenta bom grau de clareza. Estudos psicoacústicos revelaram que os primeiros 50ms (fala) e os 80ms (música), a contar a partir da chegada do som ao ouvido, são particularmente importantes para certas propriedades da percepção sonora, como por exemplo a clareza (Ermann, 2015).

$$C80 = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} [\text{dB}] \quad (3)$$

$$D50 = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt} 100\% \quad (4)$$

Onde p^2 representa a energia sonora.

Nota-se na equação (3) e (4) acima que o tempo de reverberação tem uma relação inversa com a Claridade Musical e Definição.

Deste modo, a Claridade Musical (do inglês “*clarity*”, C80) mede a energia sonora total percebida pelo ouvinte no primeiros 80ms (som direto e principais reflexões), em comparação com a energia sonora total que chega após 80ms (reflexões tardias), utilizando-se das médias de três bandas de frequências (500, 1000 e 2000 Hz). Não se inclui baixa frequência pois o sistema auditivo humano tem um fraco desempenho na diferenciação de efeitos temporais em sons graves, abaixo de 250 Hz.

Os valores de Claridade Musical podem variar de um valor positivo, para salas mortas, para um valor negativo, em salas reverberantes, em uma faixa de +4 a -4 dB. Para referência, as melhores salas de concerto apresentam valores de C80 (desocupados) variando de -4 dB a +1 dB. (Beranek, 2004).

2.4.8 Índice de Transmissão da Fala (STI)

Conforme a norma IEC 60268-16 (2003), o STI é o parâmetro utilizado para quantificar a inteligibilidade da fala. Os valores do STI são expressos entre 0 e 1 com base em contribuições ponderadas de um intervalo de bandas de frequência presentes na fala. A avaliação subjetiva deste parâmetro pode ser analisada no Quadro 7: Avaliação Subjetiva do STI (IEC 60268-16, 2003). Quadro 7 abaixo, onde quanto mais próximo a 1 é o STI, melhor a inteligibilidade da fala.

Quadro 7: Avaliação Subjetiva do STI (IEC 60268-16, 2003).

STI	Avaliação Subjetiva
0 – 0,3	Ruim
0,3 – 0,45	Pobre

0,45 – 0,6	Aceitável
0,6 – 0,75	Boa
0,75 - 1	Excelente

2.4.9 Força Sonora (*Strength G*)

A força sonora de uma sala é definida como a diferença de nível de pressão sonora de uma fonte sonora omnidirecional no centro da sala e o nível de pressão sonora da mesma fonte, porém em campo livre, sendo a medição sempre realizada a dez metros da fonte. A força sonora é dada em decibel (dB) e o objetivo é buscar a amplificação do som na sala (NS 8178, 2014).

A mesma orquestra pode produzir diferentes níveis de pressão sonora em diferentes Salas de Concerto e as evidências mostram que os ouvintes são muito sensíveis a pequenas diferenças (Barron, 2010). O valor de G pode ser encontrado pela equação (5) abaixo.

$$G=10\log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2_{10m}(t) dt} \quad (5)$$

Onde p^2 representa a energia sonora.

A acústica de salas de performance é caracterizada por dois parâmetros, o tempo de reverberação e força sonora, onde juntos criam um ambiente acústico de duas dimensões, conforme apresentado na Figura 21 abaixo (Rindel, 2014).

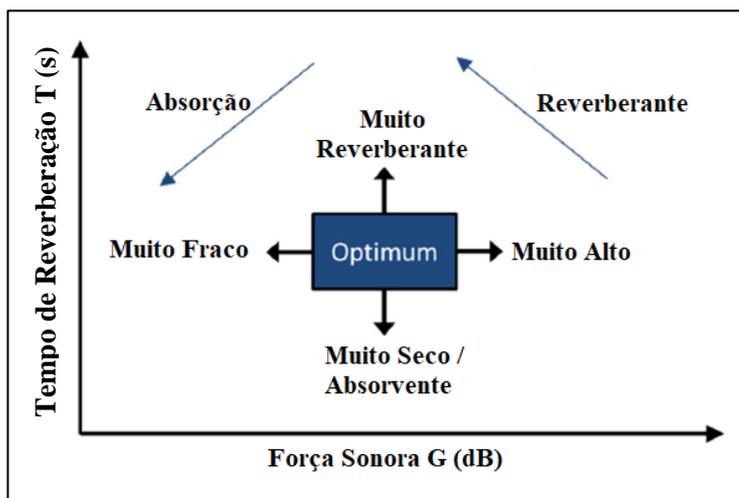


Figura 21: Princípio da influência do Tempo de Reverberação e Força Sonora na percepção da música (adaptado de Rindel, 2014).

2.4.10 Nível de Pressão Sonora - SPL

Conforme Isbert (1998), SPL apresenta a intensidade com que o som chega ao ouvinte. Sabe-se que 0 dB corresponde à ausência de som, e 120 dB o limite em que o ouvinte sente dor. Este parâmetro pode ser muito útil quando se utiliza a diferença do SPL entre dois pontos de recetores na mesma plateia. Idealmente, quando menor a diferença entre recetores, mais homogêneo é a distribuição do som no ambiente. Em relação à percepção da variação entre os níveis sonoros, é preciso pelo menos 5 dB de diferença para que esta diferença seja claramente perceptível pelo ouvinte (Ginn, 1978).

2.4.11 Suporte (Stage Support factor- ST1)

Suporte (ST1) mede o quão bem o músico escuta a si próprio e aos outros músicos perto dele. É a energia do som refletido pelas superfícies que rodeiam os músicos. Este parâmetro está relacionado com a sensação de conjunto dos músicos no palco. Por isso, Beranek fala sobre a importância da presença de superfícies refletoras próximas aos músicos. Salas que possuem o teto muito alto sem refletores dificultam que os músicos se escutem uns aos outros. Ele indica que a altura destas superfícies devem estar entre 7 a 13 metros, sendo ajustada conforme preferência da orquestra, fazendo com que o ST1 esteja entre -12 a -15 dB. (Beranek, 2004).

Esse parâmetro pode ser calculado por meio da seguinte equação (6) abaixo:

$$ST_1 = L_p \text{ direct sound} - L_p \text{ early reflections} \quad (6)$$

onde:

ST_1 nesta fórmula trata-se da média entre as frequências de 250, 500, 1000 e 2000 Hz.

$L_{p \text{ direct sound}}$ é o som direto, em dB, nos primeiros 10ms medido por um microfone a 1 metro da fonte e do chão.

$L_{p \text{ early reflections}}$ é o total do som medido na mesma posição, porém dos 20ms aos 100ms.

2.4.12 Fração de Energia Lateral (Lateral Energy Fraction - LEF)

A fração lateral (LEF) é a razão entre a energia das reflexões laterais e o total da energia das reflexões que chegam nos primeiros 80 ms (MARSHALL e KEPPLER, 1999).

A fração de energia, dada em dB, lateral pode ser calculada pela equação (7):

$$LEF = 10 \log \frac{\int_{5ms}^{80ms} p^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt} \quad (7)$$

Onde p^2 representa a energia sonora.

Esse parâmetro está relacionado à impressão espacial e envolvimento do ouvinte, que é o efeito psicoacústico causado pelas reflexões sonoras que atingem o ouvinte a partir de várias direções (Barron, 2010). A impressão espacial é inversamente proporcional ao grau de correlação entre os sinais biauriculares e está associada ao parâmetro objetivo IACC (*interaural cross correlation*).

A correlação cruzada inter aural (IACC) é a medição da diferença de energia entre os sons que chegam no ouvido direito e no ouvido esquerdo, resultantes de um campo sonoro difuso, com reflexões provenientes de diversas direções (Hidaka e Beranek, 2000). Pode ser obtida pela equação (8):

$$IACC(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_e(t) \cdot p_d(t+\tau) dt}{\left(\int_{t_1}^{t_2} p_e^2(t) dt \cdot \int_{t_1}^{t_2} p_d^2(t) dt \right)^{1/2}} \quad (8)$$

Onde p_e e p_d são as pressões no instante t e $(t+\tau)$ respectivamente;
e p_e^2 e p_d^2 representa a energia sonora.

2.5 Norma Norueguesa NS 8178

A norma norueguesa NS 8178 (2014) tem como tema Critérios acústicos de sala e espaços para ensaio e performance musical.

As propriedades acústicas de uma sala são decisivas para correta interação entre a sala e os instrumentos musicais. Quando a resposta acústica da sala funciona bem com o instrumento, boas condições são atingidas tanto para a audiência quanto para os músicos. Existe uma clara conexão entre o uso desejado da sala, o tipo de música, o tipo de conjunto/grupo e o tamanho da sala. Não é possível alcançar uma acústica satisfatória para todos os tipos de música em uma mesma sala, pois os critérios acústicos para a sala são diferentes.

É necessário dividir os espaços de acordo com a função e número de músicos. São diferentes as necessidades de volume da sala, timbre da sala (tempo de reverberação), altura e geometria da sala. Esta norma faz a divisão entre tipos de salas de modo a refletir as condições práticas para a performance musical. Ou seja, a divisão ocorre em músicos que tocam ou cantam sozinhos (ensaiando ou em aula), pequenos grupos musicais (podendo ser com o mesmo instrumento, grupos de vozes ou grupos de três a seis pessoas) e grandes grupos musicais (coros, grandes bandas, orquestras e outros grupos). Deste modo, a norma descreve critérios para todas as salas utilizadas para ensaio ou performance musical.

2.5.1 Tipo de Música

Os critérios acústicos de salas são diferenciados com base em três tipos de música: música amplificada, música acústica alta e música acústica baixa.

2.5.1.1 Música Amplificada

Música amplificada inclui toda música transmitida por amplificação ou reforço sonoro, por exemplo: bandas de rock, bandas de jazz, grupos vocais, grandes bandas e musicais. Em performances, grupos de música baixa e alta também podem ser amplificados com a utilização de microfones. Eles podem ser enquadrados em ‘música amplificada’ se a maioria do volume sonoro for transmitida através de sistema de alto-falantes.

Grandes bandas geralmente estão classificadas no grupo de ‘música alta’, visto que a produção do som é principalmente acústica. Porém, as grandes bandas também podem ser incluídas no grupo de ‘música amplificada’ quando todos os instrumentos de sopro são amplificados.

Para salas com música amplificada é importante ter atenção as condições abaixo:

- Tamanho de sala apropriada (área e volume);
- Absorção de frequências graves de maneira adequada;
- Baixo tempo de reverberação e que a curva seja suave entre as frequências;
- Resposta às frequências suave;
- Controle das reflexões sucessivas, inclinando as superfícies, utilizando elementos difusores de modo a evitar ecos;
- Ressonância da sala não muito proeminente;
- Bom isolamento sonoro entre as salas adjacentes.

2.5.1.2 Música Acústica Alta

Fazem parte deste grupo músicas que são tocadas em instrumentos acústicos que produzem um som poderoso, por exemplo: bandas de metais, grandes bandas, orquestras sinfônicas e grupos de sopro. O tamanho do grupo afeta a área, volume e tamanho do palco necessário.

Para salas com música acústica alta é importante ter atenção nas condições abaixo:

- Tamanho de sala apropriada (área e volume);
- Altura da sala adequada;

-
- Tempo de reverberação adequada ao propósito e que a curva seja suave entre as frequências;
 - Controle das reflexões sucessivas, inclinando as superfícies, utilizando elementos difusores de modo a evitar ecos flutuantes;
 - Força sonora adaptada para o som do tipo do grupo.

2.5.1.3 Música Acústica Baixa

Fazem parte deste grupo, músicas que são tocadas em instrumentos acústicos que produzem um som mais baixo ou o canto, por exemplo: corais, grupos vocais e grupos com instrumentos de cordas (como violão) sem amplificação.

Para salas com música acústica baixa é importante ter atenção nas condições abaixo:

- Tamanho de sala apropriada (área e volume);
- Altura da sala adequada;
- Tempo de reverberação adequada ao propósito e que a curva seja suave entre as frequências;
- Controle das reflexões sucessivas, inclinando as superfícies, utilizando elementos difusores de modo a evitar ecos flutuantes;
- Força sonora adaptada para o som do tipo do grupo.
- Baixo ruído de fundo.

2.5.2 Critérios para salas de ensaio e salas de performance musical

Salas de ensaio são divididas pelo tipo de música (amplificada, acústica alta e baixa) e o tipo de grupo (número de músicos). A divisão é realizada em Salas de Ensaio Individuais, Salas para Pequenos Grupos, Salas para Médios/Grandes Grupos e Salas para Grandes Grupos.

Salas de Performance Musical são divididas pelo tipo de música (amplificada, acústica alta e baixa).

As propriedades acústicas da sala e a Força Sonora (G) são cruciais para a interação entre a sala e o instrumento musical. A Figura abaixo descreve a relação entre a Força Sonora, Tempo de Reverberação e Volume da Sala.

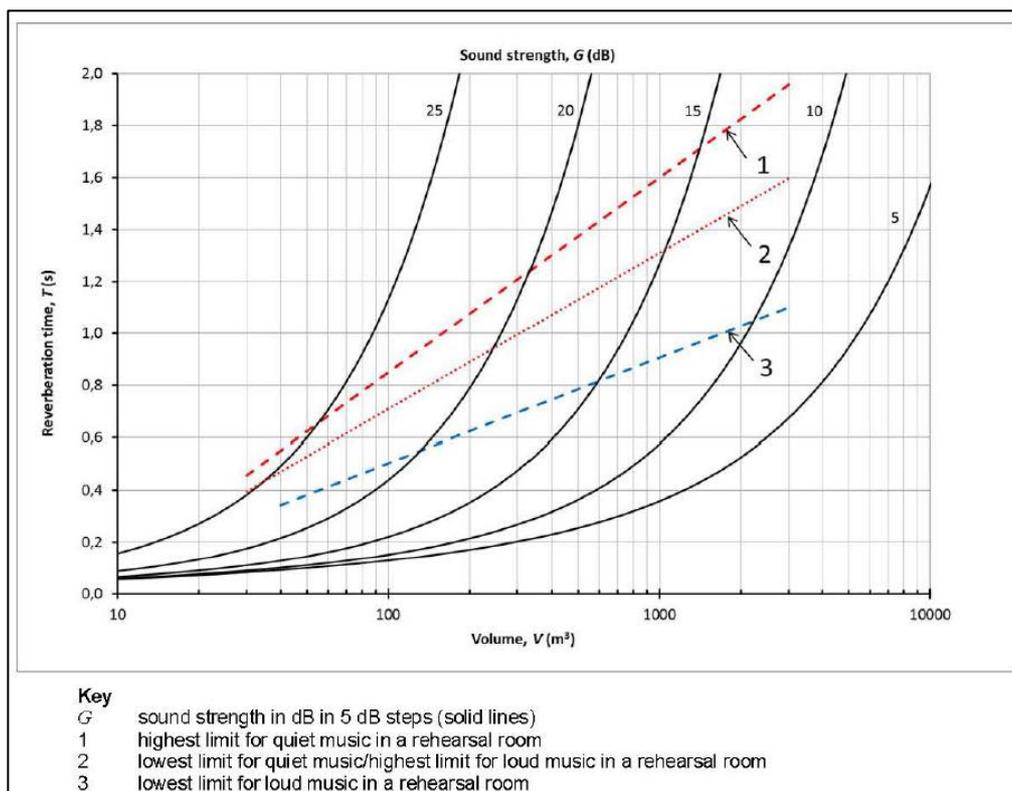


Figura 22: Força Sonora G em função do volume e tempo de reverberação. As linhas pontilhadas representam os limites inferiores e superiores do tempo de reverberação em salas de ensaio, para música baixa e alta (NS 8178, 2014).

- Sala de ensaio individuais

São destinadas para o uso de uma ou duas pessoas. Os requisitos acústicos são similares para um instrumento individual ou o canto, com exceção de salas para percussão.

Quando diferentes salas individuais são localizadas próximas umas das outras, é necessário assegurar um bom isolamento acústico entre as salas.

- Salas para ensaios de grupos

Nesta norma, as salas são divididas pelo tamanho em pequenas, médias/grades e grandes. Salas Pequenas e Médias/Grandes são para grupos de três a doze pessoas. Para mais pessoas, Salas Grandes são indicadas.

Muitos grupos têm de três a doze integrantes, como bandas de rock e pequenos grupos de jazz. Porém, as salas Pequenas e Médias/Grandes também podem ser utilizadas para ensaios de grupo e exercícios vocais, como ensaio de sopranos e ensaio do primeiro violino da orquestra.

Salas grandes devem ter grande volume adaptado para diferentes grupos de música.

Nas tabelas em baixo resumem-se as propriedades que estas salas devem respeitar salas, em função do tipo de música, de acordo com a norma.

Quadro 8: Propriedades para salas de ensaio para música amplificada (NS 8178, 2014).

Rehearsal room for amplified music				
Property	Individual practise room	Small ensemble room	Medium size ^{M1} ensemble room	Large ^{M1} ensemble room
Number of performers	1 – 2	3 – 6	6 – 12	>12
Ensemble type	See 4.1	See 4.1	See 4.1	See 4.1
Average net room height, \bar{h}	$\geq 2,4 \text{ m}^{\text{d}}$	$\geq 2,4 \text{ m}^{\text{d}}$	$\geq 3 \text{ m}$	$\geq 4 \text{ m}$
Net volume, NTV	$> 25 \text{ m}^3$	$\geq 60 \text{ m}^3$	$\geq 180 \text{ m}^3$	$\geq 400 \text{ m}^3$
Net area, NTA ^{M2}		$\geq 20 \text{ m}^2$	$\geq 60 \text{ m}^2$	$\geq 100 \text{ m}^2$
Room geometry ^{M3, M6}	Angled wall	Angled wall		
Acoustic treatment ^{8, M4}	VA, HA, BA, D	VA, HA, BA, D	VA, HA, BA D as required	VA, HA, BA D as required
Reverberation time, T	See figures 1 and 2 ^b			
Background noise level ^c	See NS 8175:2012, class C table 11, for teaching rooms			
Airborne sound insulation ^{M5}	See NS 8175:2012, class C, table 7			
M1 to M6 in the table refer to the following informative notes:				
NOTE 1 Acoustic requirements for medium large and large ensemble rooms may be the same for amplified music and preproduction.				
NOTE 2 For some instruments, for example percussion and piano, there is a need for a greater area than for other musical instruments. This should be taken into account in the planning of rooms for this purpose.				
NOTE 3 The wall should be angled at 7° or more. If inclining is not possible, diffusors should be used.				
NOTE 4 For diffusors, see also Building Research Design Guide 527.304 [11] and 543.424 [12].				
NOTE 5 Be aware of the need for good sound insulation between the individual practise rooms; see 5.1 and 5.2.				
NOTE 6 See Building Research Design Guide 527.300, clause 2.2 [13].				
^a The amount of absorbers shall be determined in detailed project planning. Variable absorption is used for rooms where several types of instrument are played. Key to abbreviations: HA = Ceiling absorbers, VA = Wall absorbers, BA = Bass absorbers, D = Diffusors				
^b For the 1/1 octave bands 63 Hz and 125 Hz in rooms with a net volume of <100 m ³ , the thresholds for reverberation time may differ somewhat due to room modes. See figure 2.				
^c The background noise level is not as critical for amplified music as for other types of music.				
^d See also the regulations from Directorate of Labour Inspection and the Regulations on technical requirements for building works [5] in cases where these may apply.				

Quadro 9: Propriedades para salas de ensaio para música acústica alta (NS 8178, 2014).

Rehearsal rooms for acoustical loud music				
Property	Individual practise room	Small ensemble room	Medium size ensemble room	Large ensemble room
Number of performers	1 – 2	3 – 12	12 – 24	> 25
Ensemble type	See 4.2	See 4.2	See 4.2	See 4.2
Average net room height, \bar{h}	$\geq 2,7$ m	$\geq 3,5$ m	$\geq 4,5$ m	$\geq 5,0$ m ^{M1}
Net volume, NTV ^{a, M2}	≥ 40 m ³	≥ 60 m ³ ≥ 360 m ³ (rel. to number of performers)	≥ 360 m ³ ≥ 500 m ³ for big bands	30 m ³ /performer and at least ≥ 1000 m ³ for concert band, ^{M10} ≥ 1500 m ³ for brass band, ^{M10} ≥ 1800 m ³ for symphony orchestra ^{M10}
Net area, NTA ^{M3}	≥ 15 m ²			≥ 120 m ² + 2 m ² per performer
Room geometry ^{M9}	Angled wall ^{M4} (avoid flutter echoes)	Angled wall ^{M4, M5} (avoid flutter echoes)	Avoid sound focusing, echoes and flutter echoes ^{M6}	Avoid sound focusing, echoes and flutter echoes ^{M6}
Acoustic treatment ^{b, M5}	VA, HA, BA variable acoustics ^{M7}	HA, BA D as required	HA, BA D as required	HA, BA D as required
Reverberation time, T'	See figures 1 and 2			
Background noise level ^c	See NS 8175:2012, class C table 11, for teaching rooms			
Airborne sound insulation ^{M8}	See NS 8175:2012, table 7			
M1 to M10 in the table refer to the following informative notes:				
NOTE 1 For larger ensembles, there may be a need for greater room height.				
NOTE 2 For assessments of sound strength and sound levels from different musical instruments, see annex A.				
NOTE 3 For some instruments, for example percussion and piano, there is a need for a greater area than for other musical instruments. This should be taken into account in the planning of rooms for this purpose.				
NOTE 4 The wall should be angled at 7° or more.				
NOTE 5 In order to achieve a smooth frequency response, it is important to have a favourable proportion between room dimensions; see for example figures 22 and 23 in [14].				
NOTE 6 For diffusors, see also Building Research Design Guide 527.304 [11] and 543.424 [12].				
NOTE 7 In practise, it will often be appropriate to incorporate solutions for variable acoustics to make the room suitable for several types of music. Individual practise rooms will then be able to be used for both quiet and loud instruments.				
NOTE 8 Be aware of the need for good sound insulation between the individual practise rooms; see 5.1 and 5.2.				
NOTE 9 See Building Research Design Guide 527.300, clause 2.2 [13].				
NOTE 10 The ratio between length and width of the room should not exceed 1,6:1.				
^a Telescopic amphii is not included in net volume.				
^b The amount of absorbents shall be determined in detailed project planning. Variable absorption is used for rooms where several types of instrument are played. Key to abbreviations: HA = Ceiling absorbents, VA = Wall absorbents, BA = Bass absorbents, D = Diffusors				
^c Tonal character of the noise is especially disturbing for music rehearsal and should not occur in rehearsal rooms. See also 6.2.				

Quadro 10: Propriedades para salas de ensaio para música acústica baixa (NS 8178, 2014).

Rehearsal rooms for acoustical quiet music				
Property	Individual practise room	Small ensemble room	Medium size ensemble room	Large ensemble room
Number of performers	1 – 2	3 – 12	12 – 20	20 – 35 (string orchestras)
Ensemble type	See 4.1	See 4.1	See 4.2	20 – 80/100 (choirs) See 4.3
Average net room height, \bar{h}	$\geq 2,7$ m	3,5 m – 4 m	$\geq 4,5$ m	≥ 5 m
Net volume, NTV ^{a, M1}	≥ 30 m ³	45 m ³ – 200 m ³ (rel. to number of performers)	≥ 200 m ³	≥ 700 m ³
Net area, NTA ^a	≥ 15 m ^{2 M1}	20 m ² – 40 m ² (rel. to number of performers)	40 m ² – 70 m ² (rel. to number of performers)	≥ 50 m ² + 1,5 m ² per performer
Room geometry ^{M6}	Angled wall ^{M2, M3} (avoid flutter echoes)	Angled wall ^{M2, M3} (avoid flutter echoes)	Avoid sound focusing, echoes and flutter echoes ^{M4}	Avoid sound focusing, echoes and flutter echoes ^{M4} Flat floor (telescopic amphi has other requirements)
Acoustic treatment ^{b, M4}	(VA), HA, BA, D Some variable absorption	(VA), HA, BA, D Some variable absorption	As required: VA, HA, BA, D	As required: VA, HA, BA, D
Reverberation time, T	See figure 1			
Background noise level ^c	See NS 8175:2012, class C table 11, for teaching rooms			
Airborne sound insulation ^{M5}	See NS 8175:2012, table 7			
<p>M1 to M6 in the table refer to the following informative notes:</p> <p>NOTE 1 For assessments of sound strength and sound level from different musical instruments, see annex A.</p> <p>NOTE 2 The wall should be angled at 7° or more.</p> <p>NOTE 3 In order to achieve smooth frequency response, it is important to have a favourable proportion between room dimensions; see for example figures 22 and 23 in [14].</p> <p>NOTE 4 For diffusers, see also Building Research Design Guide 527.304 [11] and 543.424 [12].</p> <p>NOTE 5 Be aware of the need for good sound insulation between the individual practise rooms; see 5.1 and 5.2.</p> <p>NOTE 6 See Building Research Design Guide 527.300, clause 2.2 [13].</p>				
<p>^a Telescopic amphi is not included in the net volume.</p> <p>^b The volume of absorbents shall be determined in detailed project planning. Variable absorption is used for rooms where several types of instrument are played. Key to abbreviations: HA = Ceiling absorbents, VA = Wall absorbents, BA = Bass absorbents, D = Diffusers.</p> <p>^c Tonal character of the noise is especially disturbing for music rehearsal and should not occur in rehearsal rooms.</p>				

2.5.2 Critérios para salas de performance musical

Esta norma engloba salas com audiência de até 500 pessoas sentadas. Para música amplificada até 1000 pessoas em pé.

Há a possibilidade destas salas serem utilizadas para múltiplas funções, sendo adaptadas para diferentes tipos de música. Nestes tipos de sala é necessário o uso de acústica variável de modo a atender as necessidades dos diferentes tipos de músicas e grupos.

Seguem abaixo as tabelas com as propriedades desejadas para cada tipo de sala.

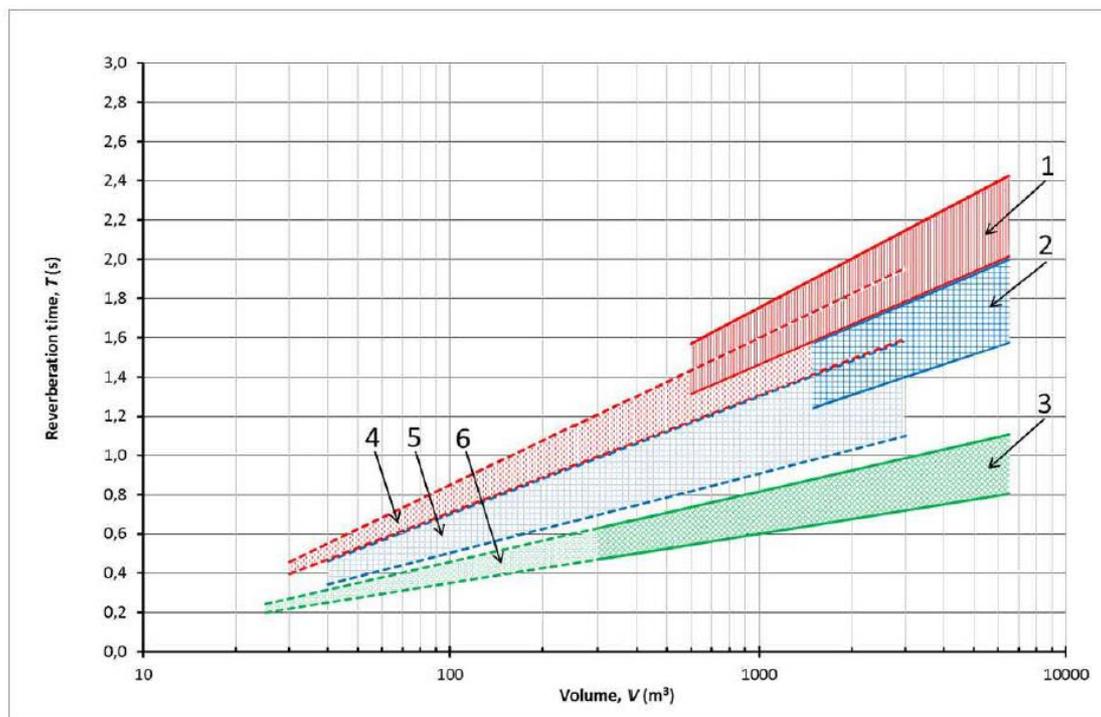
Quadro 11: Propriedades para Salas de Performance Musical até 500 pessoas sentadas (1000 em pé) na audiência (NS 8178, 2014).

Performance hall up to 500 seated (1000 standing) people in the audience ^a				
Property	Amplified music		Loud music	Quiet music
	Club stage	Hall		
Number of people in the audience Ensemble type ^{M1}	100 – 500 See 4.1	≥ 200 See 4.1	≥ 150 ^b See 4.2	≥ 50 See 4.3
Average net room height, \bar{h} ^{M5}	4 m - 6 m ^{M2}	5 m - 8 m	8 m - 12 m	6 m - 12 m
Net volume, NTV ^{M1}	300 m ³ - 800 m ³ (rel. to number of people in the audience)	≥ 600 m ³	≥ 10 m ³ /person incl. performers ^c and at least ≥ 1500 m ³ ^{M1}	≥ 12 m ³ /person incl. performers ^d and at least ≥ 600 m ³
Net area, NTA	100 m ² - 300 m ² (rel. to number of people in the audience)	≥ 150 m ²		
Stage area (net rig area)	≥ 30 m ²	≥ 50 m ²	≥ 100 m ² ^{M3}	≥ 75 m ² ^{M3}
Room geometry ^{M1}			Avoid concave room surfaces and triangular / fan-shaped layouts At least 4 m room height at the back row of the amphi ^{e, d}	Flat floors or slightly sloping amphi gallery ^{M4} Avoid concave room surfaces and triangular / fan-shaped layouts At least 4 m room height at back row of the amphi ^{e, d}
Acoustic treatment ^{e, M1}	D, HA, BA VA	D, HA, BA	Some diffusing surfaces	D Variable absorption
Reverberation time, T	See figures 1 and 2			
Background noise level from service equipment ^{f, M6}	NS 8175:2012, class C table 11, for teaching rooms		NS 8175:2012, class C table 11, for music rooms	
Background noise level from outdoor sound sources ^{f, M6}	NS 8175:2012, class C table 12		NS 8175:2012, class B table 12	
Stage ^{M6}	D T = as in the hall Check the sound level on small stages	D T = as in the hall ^g Partially absorbing rear wall Large room height, at least the same as the hall Stage floor ^h	D T = as in the hall ^g Partially absorbing rear wall Large room height, at least the same as the hall Stage floor ^h	D T = as in the hall ^g Partially absorbing rear wall Large room height, at least the same as the hall Stage floor ^h

M1 to M6 in the table refer to the following informative notes:
 NOTE 1 The number of audience places or seats is a dimensional criterion, together with the maximum number of musicians that is desirable to be placed in the hall.
 NOTE 2 Intimate club stages with lower roof heights may also work if the acoustic conditions are adjusted.
 NOTE 3 Full equipped symphony orchestras require a larger area. Performance halls where a choir and orchestra/marching band perform simultaneously require a larger stage area. The same is true for stages in multi-purpose halls with theatre and dance.
 NOTE 4 Telescopic amphi has usually too steep an incline and should therefore be avoided, because too much of the sound energy is directed towards sound-absorbing surface of the audience.
 NOTE 5 There are often problems with too low room heights in halls. The lowest room height in the table corresponds with the lowest number of people in the audience. These values are indicative for the lowest room heights, and room height should be planned more precisely on the basis of the prioritised application of the hall.
 NOTE 6 Minimum requirements for background noise from service equipment and outdoor noise sources are given in NS 8175:2012 class C. Stricter limit values should be assessed based on the prioritised use of the hall. In practise, noise from stage equipment such as lighting rigs etc. is often the dominant sound source during concerts. It is important to include this in the assessment when making detailed project planning.

^a There may be up to 500 sitting or 1000 standing people in the audience, depending on the type of music. See also 5.4 and 5.5.
^b The number of musicians is determined on the basis of the largest relevant ensemble.
^c Telescopic amphi is not included in the net volume.
^d There should be at least 3,0 m of room height above the rearmost row under the balcony; see also [11].
^e Key to abbreviations: HA = Ceiling absorbers, VA = Wall absorbers, BA = Bass absorbers, D = Diffusers
^f For the rehabilitation of existing halls, a 5 dB higher sound level is acceptable. See also table 4 in [11].
^g There shall be a good acoustic connection between stage and hall; see also [11]. These should constitute the same acoustic space; see note 1 in 5.4.
^h It should be avoided having the stage floor on the same level as the audience floor, when it is not a telescopic amphi; see also [11].

A figura abaixo mostra o maior e menor tempo de reverberação recomendado para salas de performance musical, em função do seu volume, para diferentes tipos de música (sem pessoas). Nesta figura está também representado o tempo de reverberação recomendado para salas de ensaio, podendo observar-se que nestas salas, quando utilizadas para música acústica o tempo de reverberação deve ser menor que em salas de performance.



Key

- 1 upper and lower limit for quiet music in performance halls (solid lines)
- 2 upper and lower limit for loud music in performance halls (solid lines)
- 3 upper and lower limit for amplified music in performance halls (solid lines)
- 4 upper and lower limit for quiet music in rehearsal rooms (dotted lines)
- 5 upper and lower limit for loud music in rehearsal rooms (dotted lines)
- 6 upper and lower limit for amplified music in rehearsal rooms (dotted lines)

Figura 23: Tempo de reverberação médio, utilizando as bandas de oitava de 500 e 1000 Hz recomendado para as salas de performance e para salas de ensaio (NS 8178, 2014).

3 ESTUDO DE CASO E METODOLOGIA

3.1 Perspectiva da pesquisa

A pesquisa é de natureza aplicada, com finalidade e aplicações imediatas, tendo uma abordagem quanti-qualitativa, por se tratar de uma dissertação que visa calcular os parâmetros acústicos comparando com valores de referência. Os objetivos possuem um delineamento descritivo e comparativo, pois visa compreender os conceitos dos parâmetros acústicos destinados a salas de música, realizando comparações dos resultados de cálculos obtidos. Além disso, possui caráter exploratório, por explorar a proposta da norma norueguesa NS 8178 (2014) para avaliação da influência do tempo de reverberação versus a força sonora (G).

Tendo em vista que a pesquisa se baseia em materiais já elaborados, como livros, artigos e normas técnicas da área assumiu-se, com base na análise de dados primários e secundários, a forma de pesquisa bibliográfica.

Para alcançar os objetivos da pesquisa, foi necessário combinar a pesquisa bibliográfica com um estudo de caso, por meio do qual foi realizado o comparativo dos parâmetros acústicos de qualidade sonora para sala de música com diferentes propostas de acústica variável de difusão.

3.2 Procedimentos, instrumentos de coleta e análise de informações

A metodologia é realizada de forma a atender os objetivos específicos, descritos anteriormente, de forma a desenvolver a pesquisa de maneira planejada.

Objetivo a) A pesquisa será realizada, por meio de pesquisas bibliográficas em fontes nacionais e, principalmente, internacionais. Nesta etapa, serão compilados os principais parâmetros acústicos de qualidade sonora de salas, buscando valores de referência para salas de música.

Objetivo b) Estudo da norma norueguesa NS 8178 (2014) de modo a entender o equilíbrio entre o tempo de reverberação e a força sonora (G), utilizando a norma para escolher os modelos e dimensões de salas a serem estudadas.

Objetivo c) Os cálculos dos parâmetros acústicos de qualidade sonora de salas serão realizados baseados em dois estudos de caso. Nestes estudos de caso serão alterados os

materiais e as soluções de acústica variável, com foco na difusão sonora, avaliando a influência no resultado dos diversos parâmetros de qualidade. Para os cálculos e simulações acústicas utilizou-se o software CATT Acoustic v9.1b (build 1.01)- demo version, que realiza simulações de condicionamento acústico de espaços fechados. Este software foi escolhido devido a confiabilidade, com mais de 30 anos de desenvolvimento, e utilização do método de Traçado de raios, facilitando a compreensão dos fenômenos acústicos. Ressalta-se que por se tratar de uma versão demonstrativa, há restrições do número máximo de raios de 5 mil, assim como a difração é limitada a primeira ordem.

3.3 Ambientes de Estudo

A fim de realizar os estudo propostos, optou-se por estudar dois tipos de salas previstas na norma norueguesa NS 8178 (2014), sendo elas uma Sala para Performance Musical, visando um modelo mais complexo, e uma Sala de Ensaio Para Música Alta, sendo uma sala com menores dimensões e modelo mais simplificado.

A Sala de Ensaio trata-se de uma sala simples, retangular em planta e em corte, com dimensões de 7m x 15m e altura livre de 3,5m. Conforme pode ser analisado no Quadro 9, ela é classificada pela norma norueguesa com uma Sala de Ensaio **Pequena** para música alta. Como pode ser analisado neste mesmo quadro, ela suporta de 3 a 12 músicos, atende a altura mínima da sala de 3,5m, e com seu volume de 367 m³, que corresponde ao mínimo requerido pela norma.

Já em relação a Sala para Performance Musical, também apresenta uma geometria retangular em planta, porém em corte, foi representado um palco e o mezanino, conforme Figura 24 e Figura 25 a seguir. A sala apresenta menos de 500 lugares sentados e foi dimensionada para Música Alta de acordo com a norma norueguesa, podendo ser analisados os parâmetros no Quadro 10. A sala apresenta uma altura média de 8 metros, sendo o volume por pessoa maior que 10 m³. A área do palco é de 230 m², ultrapassando o mínimo de 100 m² propostos pela norma.

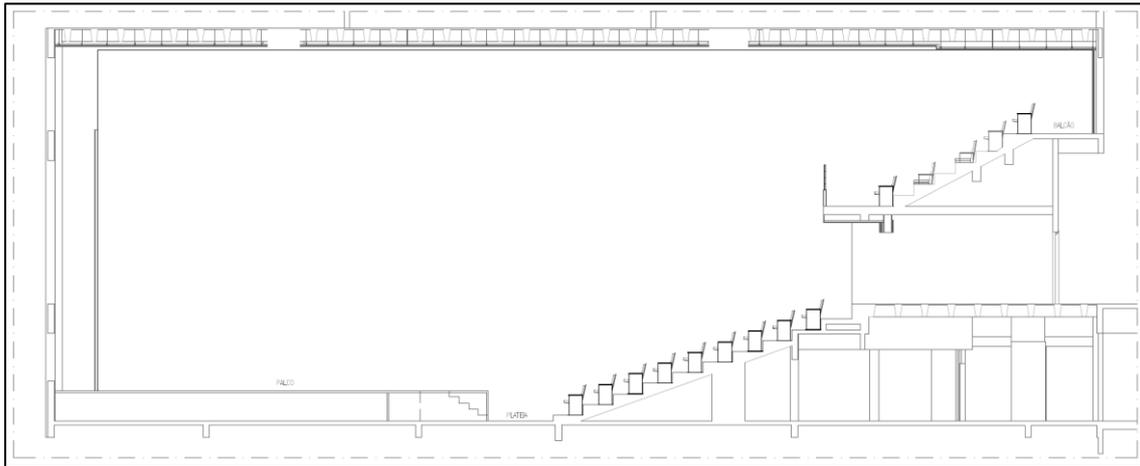


Figura 24: Corte da Sala de Performance Musical.

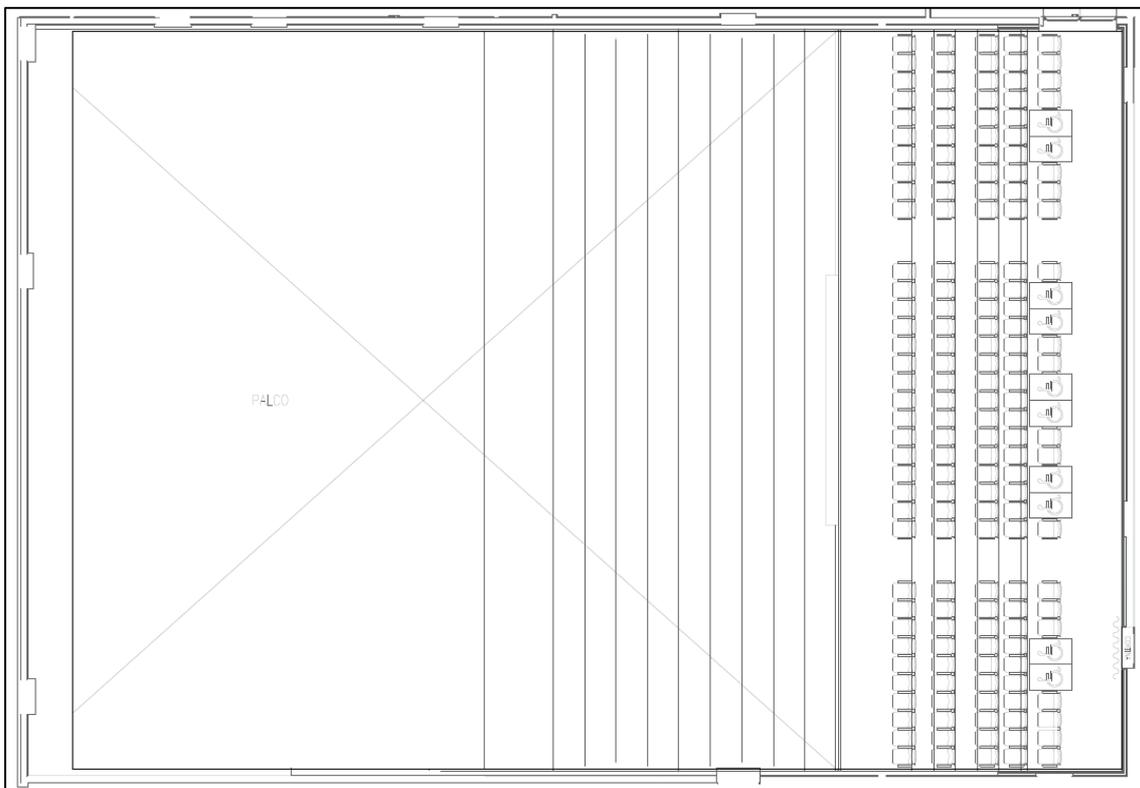


Figura 25: Planta Baixa da Sala de Performance Musical.

3.4 Hipóteses e Cenários de estudo.

Para análise dos efeitos da difusão em variados parâmetros acústicos, optou-se por realizar 3 (três) hipóteses de ambientes na Sala de Performance Musical e 2 (duas) hipóteses de ambientes na Sala de Ensaio. Seguem abaixo as hipóteses da Sala de

Performance musical, sendo no Quadro 12 apresentadas as hipóteses e característica das modelagens e nas Figuras subsequentes as imagens dos modelos 3D do CATT Acoustics, representando cada hipótese. Ressalta-se que foi utilizado somente do coeficiente de dispersão do QRD7, não alterando a absorção do material em si, de modo que a única variável da simulação fosse a difusão. Pode-se ver na Figura 30 o QRD utilizado, sendo o modelo QRD 734 RANDOM INCIDENCE.

Quadro 12: Hipóteses da Sala de Performance Musical e características de modelagem.

Hipótese	Modelagem
Sem difusão	Modelagem com paredes laterais e paredes do palco liso.
Com QRD	Modelagem com as paredes laterais e paredes do palco com difusor tipo QRD.
Com Difusores Geométricos	Modelagem com paredes laterais com quebra de paralelismo, com superfícies em cunha, e paredes do fundo do palco com difusores em forma convexa.

O objetivo de criar a Hipótese com Difusores Geométricos modelados foi com o intuito de criar uma sala mais convencionalmente utilizada e mais econômica, visto que a utilização de QRD em grande quantidade em salas de espetáculo não é convencional.

No Quadro 13, Quadro 14 e Quadro 15 observam-se os materiais, coeficientes de absorção e difusão utilizados nas simulações da Sala de Performance Musical.

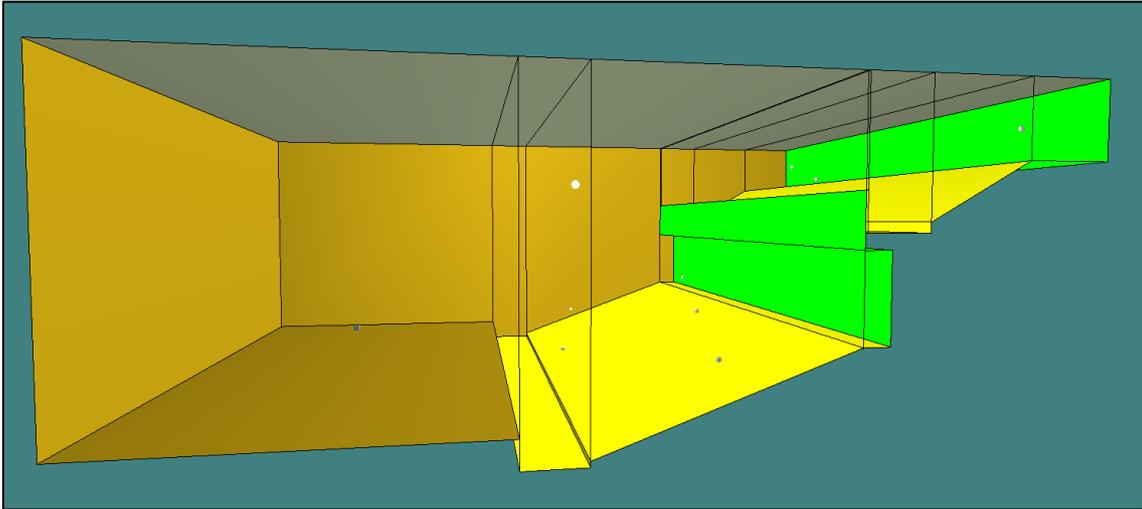


Figura 26: Hipótese Sem Difusão - Vista Lateral - Sala de Performance Musical.

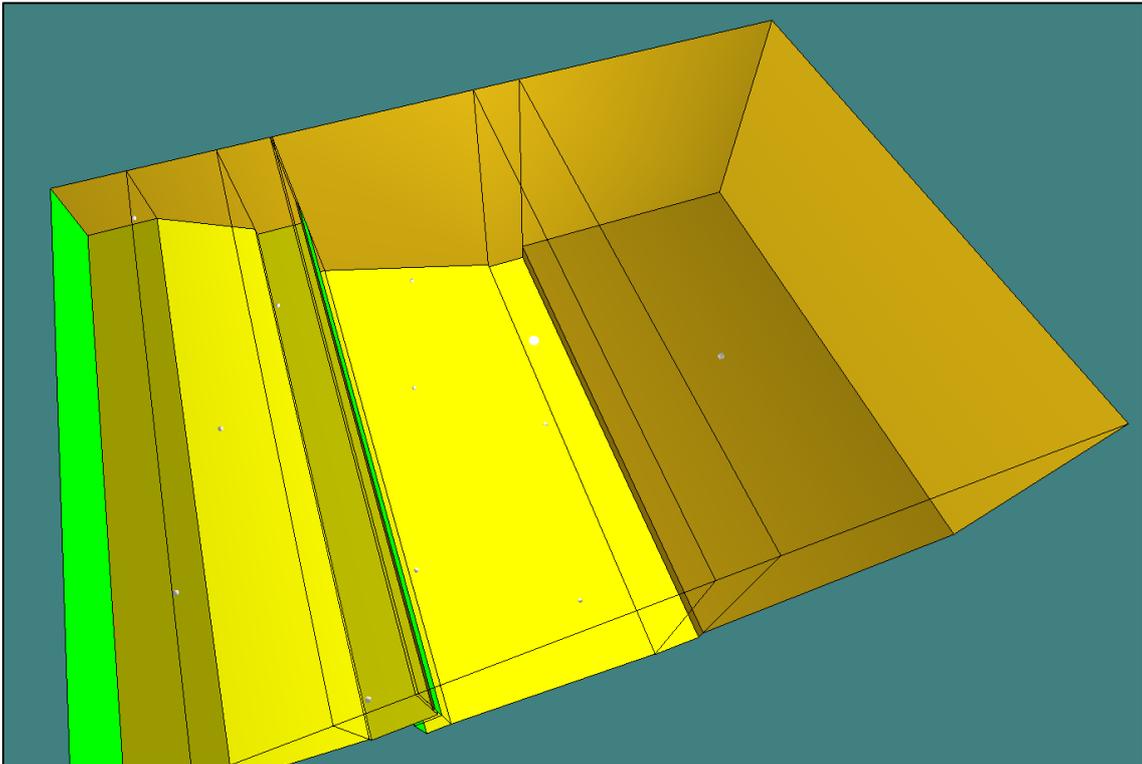


Figura 27: Hipótese Sem Difusão - Vista Topo - Sala de Performance Musical.

Quadro 13: Coeficientes de Absorção e Dispersão Sonora para Sala de Performance Musical - Sem Difusão.

Sala de Performance Musical Sem Difusão			
Elementos	Material	Coeficiente de Absorção (125 Hz/ 250 Hz/ 500 Hz/ 1000 Hz / 2000 Hz / 4000 Hz)	Coeficiente de Dispersão
Paredes Laterais	Madeira Lisa	0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,05 / 0,05	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Parede Fundo do Palco	Madeira Lisa	0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,05 / 0,05	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Paredes Fundo da Sala	Aglomerado de Madeira + Lã	0,20 / 0,58 / 0,99 / 0,75 / 0,70 / 0,90	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Teto	Gesso Liso (Cenário Reverberante)	0,16 / 0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,06	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
	Gesso Perfurado + Lã (Cenário Absorvente)	0,75 / 0,80 / 0,90 / 0,85 / 0,80 / 0,75	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Piso Palco	Madeira Lisa	0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,05 / 0,05	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Piso Plateia	Carpete + Poltronas	0,16 / 0,45 / 0,65 / 0,71 / 0,76 / 0,78	0,30 / 0,40 / 0,50 / 0,60 / 0,70 / 0,70

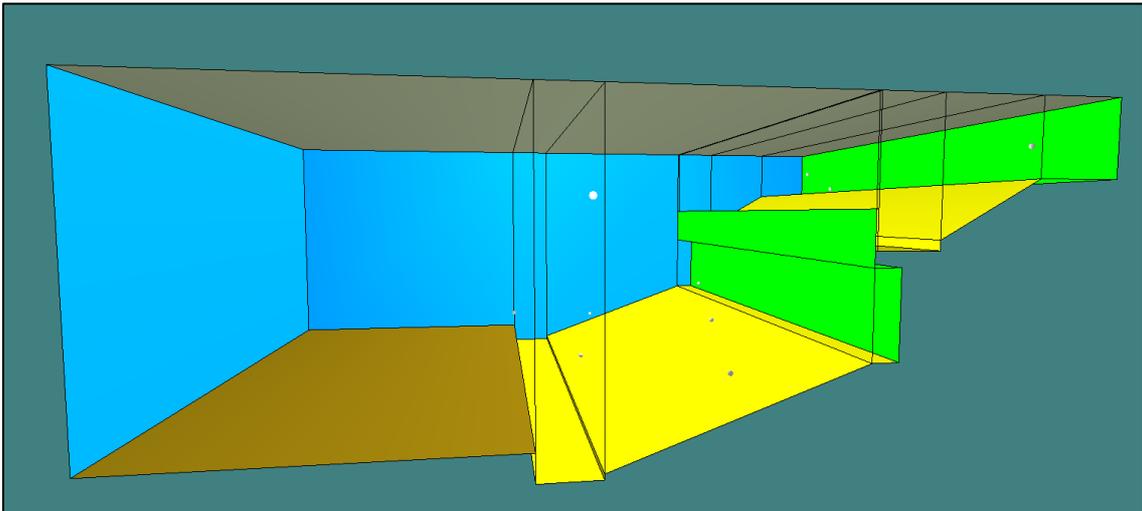


Figura 28: Hipótese Com QRD - Vista Lateral - Sala de Performance Musical (em azul estão as superfícies com QRD).

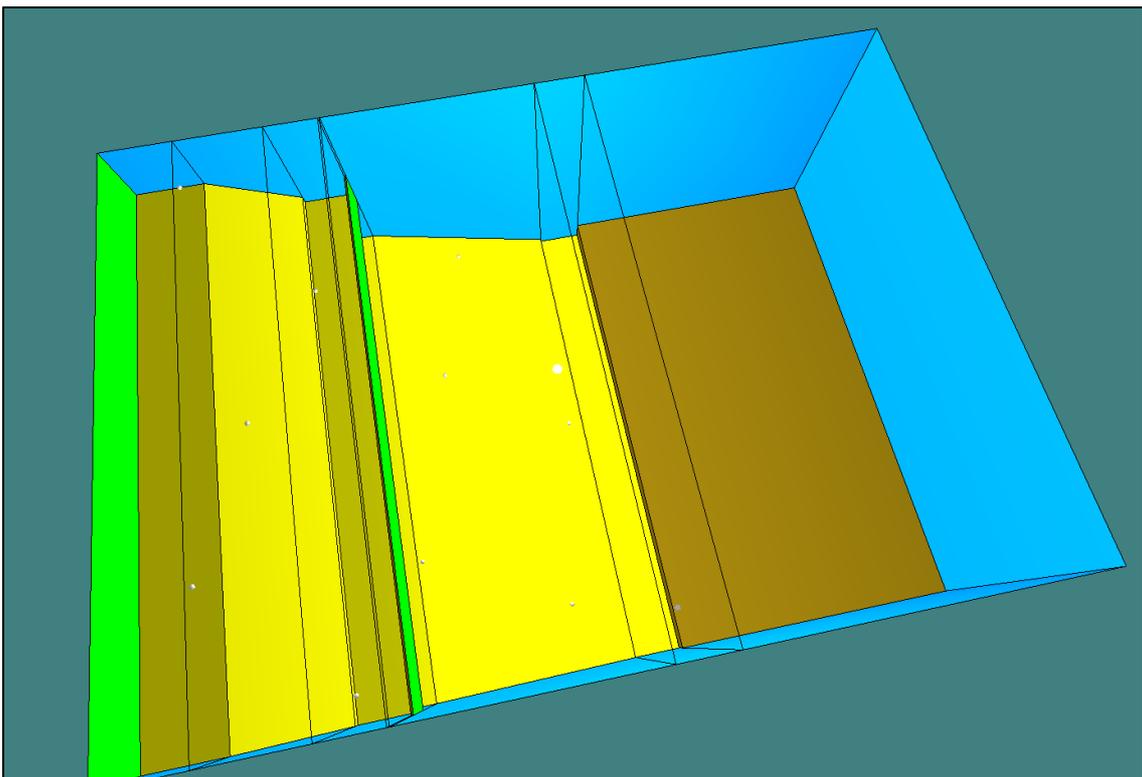


Figura 29: Hipótese Com QRD - Vista Topo - Sala de Performance Musical Musical (em azul estão as superfícies com QRD).

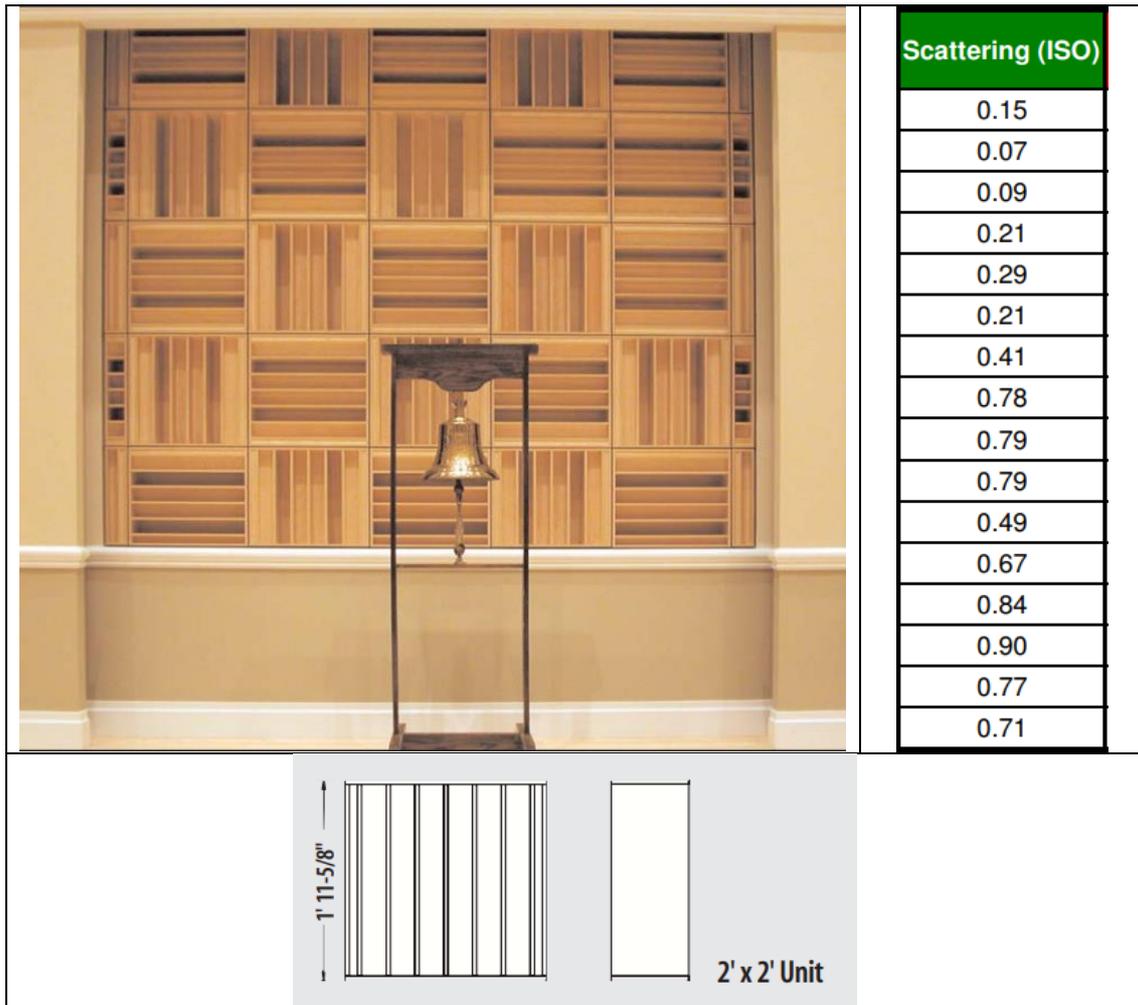


Figura 30: QRD utilizado na simulação – Modelo: QRD 734 RANDOM INCIDENCE.

Quadro 14: Coeficientes de Absorção e Dispersão Sonora para Sala de Performance Musical - Com QRD.

Sala de Performance Musical Com QRD			
Elementos	Material	Coeficiente de Absorção (125 Hz/ 250 Hz/ 500 Hz/ 1000 Hz / 2000 Hz / 4000 Hz)	Coeficiente de Dispersão
Paredes Laterais	QRD	0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,05 / 0,05	0,15 / 0,21 / 0,41 / 0,79 / 0,84 / 0,71
Parede Fundo do Palco	QRD	0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,05 / 0,05	0,15 / 0,21 / 0,41 / 0,79 / 0,84 / 0,71
Paredes Fundo da Sala	Aglomerado de Madeira + Lã	0,20 / 0,58 / 0,99 / 0,75 / 0,70 / 0,90	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Teto	Gesso Liso (Cenário Reverberante)	0,16 / 0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,06	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
	Gesso Perfurado + Lã (Cenário Absorvente)	0,75 / 0,80 / 0,90 / 0,85 / 0,80 / 0,75	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Piso Palco	Madeira Lisa	0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,05 / 0,05	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Piso Plateia	Carpete + Poltronas	0,16 / 0,45 / 0,65 / 0,71 / 0,76 / 0,78	0,30 / 0,40 / 0,50 / 0,60 / 0,70 / 0,70

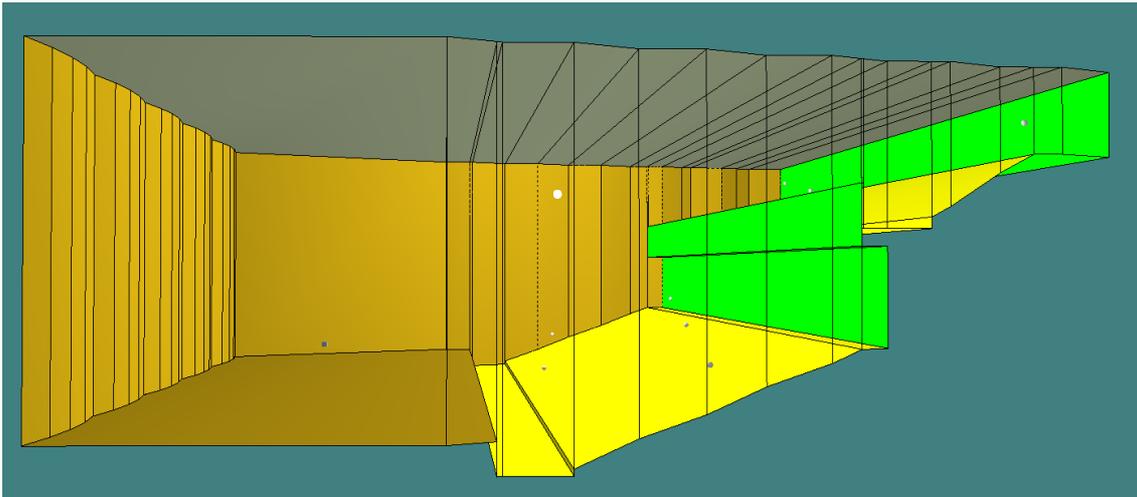


Figura 31: Hipótese Com Difusores Geométricos - Vista Lateral - Sala de Performance Musical.

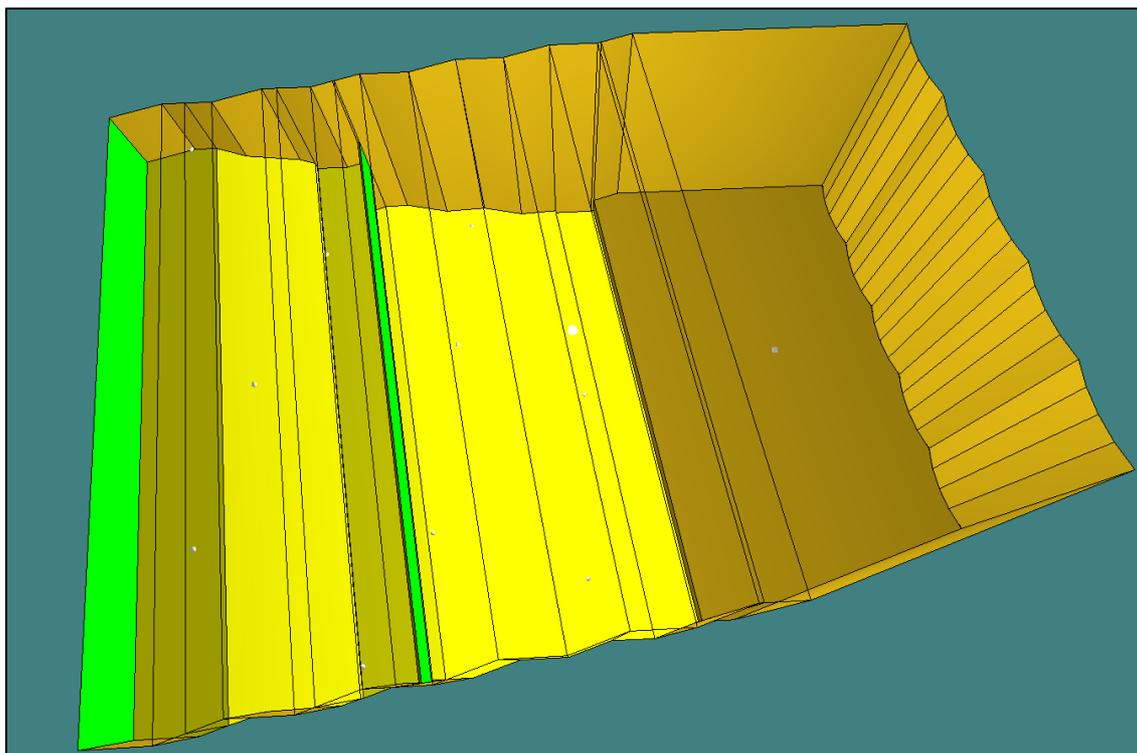


Figura 32: Hipótese Com Difusores Geométricos - Vista Topo - Sala de Performance.

Quadro 15: Coeficientes de Absorção e Dispersão Sonora para Sala de Performance Musical - Com Difusores Geométricos.

Sala de Performance Musical Com Difusores Geométricos			
Elementos	Material	Coeficiente de Absorção (125 Hz/ 250 Hz/ 500 Hz/ 1000 Hz / 2000 Hz / 4000 Hz)	Coeficiente de Dispersão
Paredes Laterais	Madeira Lisa	0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,05 / 0,05	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Parede Fundo do Palco	Madeira Lisa	0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,05 / 0,05	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Paredes Fundo da Sala	Aglomerado de Madeira + Lã	0,20 / 0,58 / 0,99 / 0,75 / 0,70 / 0,90	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Teto	Gesso Liso (Cenário Reverberante)	0,16 / 0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,06	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
	Gesso Perfurado + Lã (Cenário Absorvente)	0,75 / 0,80 / 0,90 / 0,85 / 0,80 / 0,75	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Piso Palco	Madeira Lisa	0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,05 / 0,05	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Piso Plateia	Carpete + Poltronas	0,16 / 0,45 / 0,65 / 0,71 / 0,76 / 0,78	0,30 / 0,40 / 0,50 / 0,60 / 0,70 / 0,70

Já para a Sala de Ensaio está representado no Quadro 16 as hipóteses e características das modelagens e nas Figuras subsequentes as imagens dos modelos 3D do CATT Acoustics, representando cada hipótese. Em ambas as hipóteses foi modelada uma janela, com alguma difusão, em uma das paredes laterais como elemento de quebra de paralelismo, evitando defeitos acústicos. O QRD utilizado é o mesmo da Sala de Performance Musical. No Quadro 17 e Quadro 18 observam-se os materiais, coeficientes de absorção e difusão utilizados nas simulações da Sala de Ensaio.

Quadro 16: Hipóteses da Sala de Performance Musical e características de modelagem.

Hipótese	Modelagem
Sem difusão	Modelagem com todas as paredes em material reflexivo.
Com QRD	Modelagem com as paredes laterais e paredes do fundo dos músicos com difusor tipo QRD.

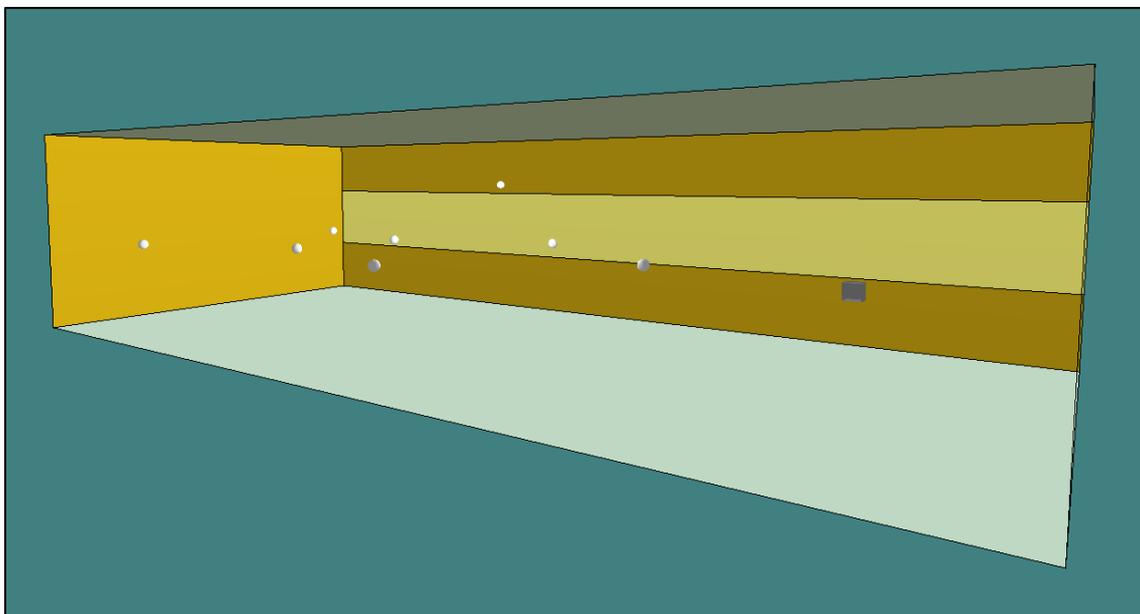


Figura 33: Hipótese Sem Difusão - Vista Lateral - Sala de Ensaio.

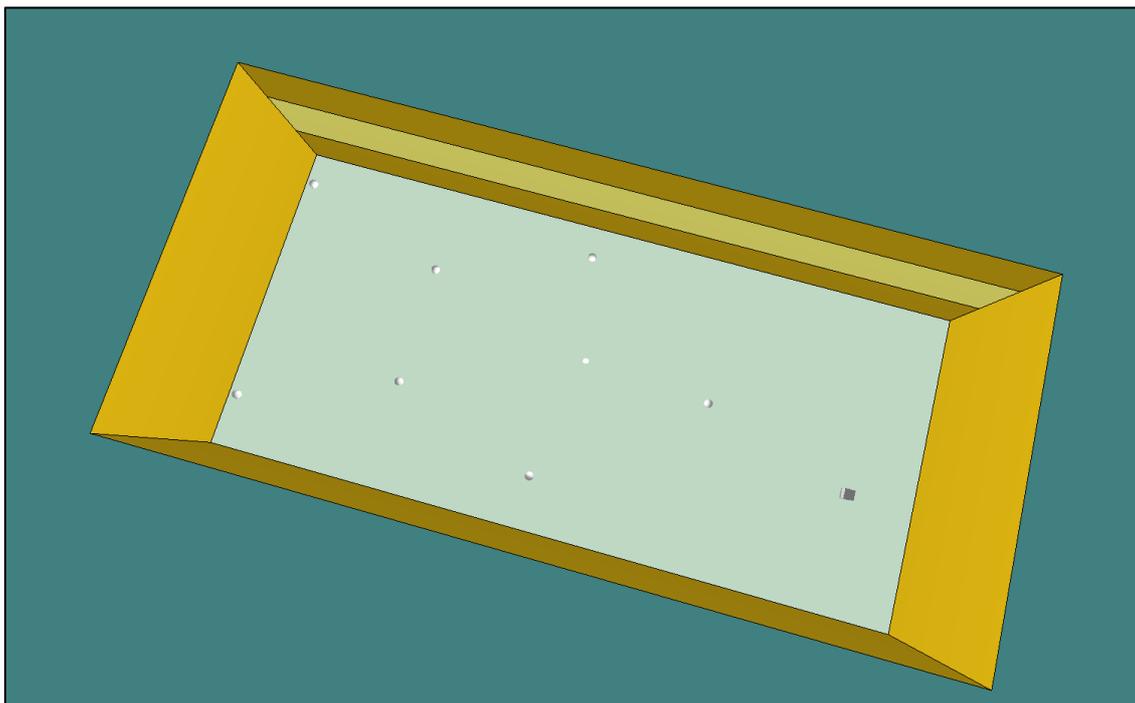


Figura 34: Hipótese Sem Difusão - Vista Topo - Sala de Ensaio.

Quadro 17: Coeficientes de Absorção e Dispersão Sonora para Sala de Ensaio - Sem Difusão.

Sala de Ensaio Sem Difusão			
Elementos	Material	Coefficiente de Absorção (125 Hz/ 250 Hz/ 500 Hz/ 1000 Hz / 2000 Hz / 4000 Hz)	Coefficiente de Dispersão
Paredes Laterais	Madeira Lisa	0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,05 / 0,05	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Parede Fundo do Palco	Madeira Lisa	0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,05 / 0,05	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Paredes Fundo da Sala	Madeira Lisa	0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,05 / 0,05	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Teto	Gesso Liso (Cenário Reverberante)	0,16 / 0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,06	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
	Gesso Perfurado + Lã (Cenário Absorvente)	0,75 / 0,80 / 0,90 / 0,85 / 0,80 / 0,75	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Janela	Esquadria + Vidro	0,15 / 0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,06	0,10 / 0,15 / 0,20 / 0,20 / 0,20 / 0,20
Piso Plateia	Carpete + Cadeiras	0,10 / 0,08 / 0,07 / 0,06 / 0,05 / 0,05	0,20 / 0,30 / 0,40 / 0,45 / 0,50 / 0,50

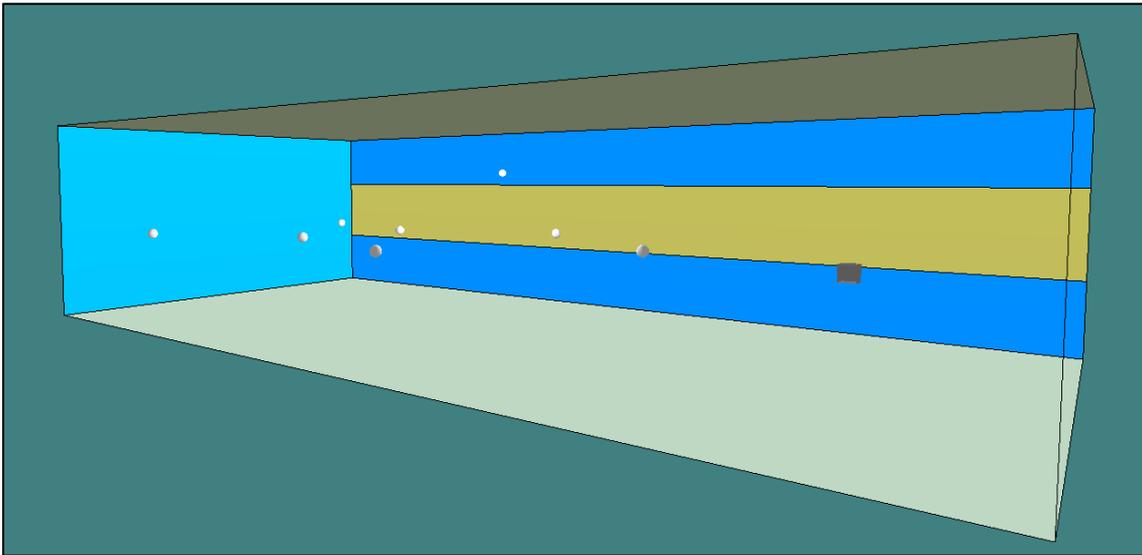


Figura 35: Hipótese com QRD - Vista Lateral - Sala de Ensaio Musical (em azul estão as superfícies com QRD).

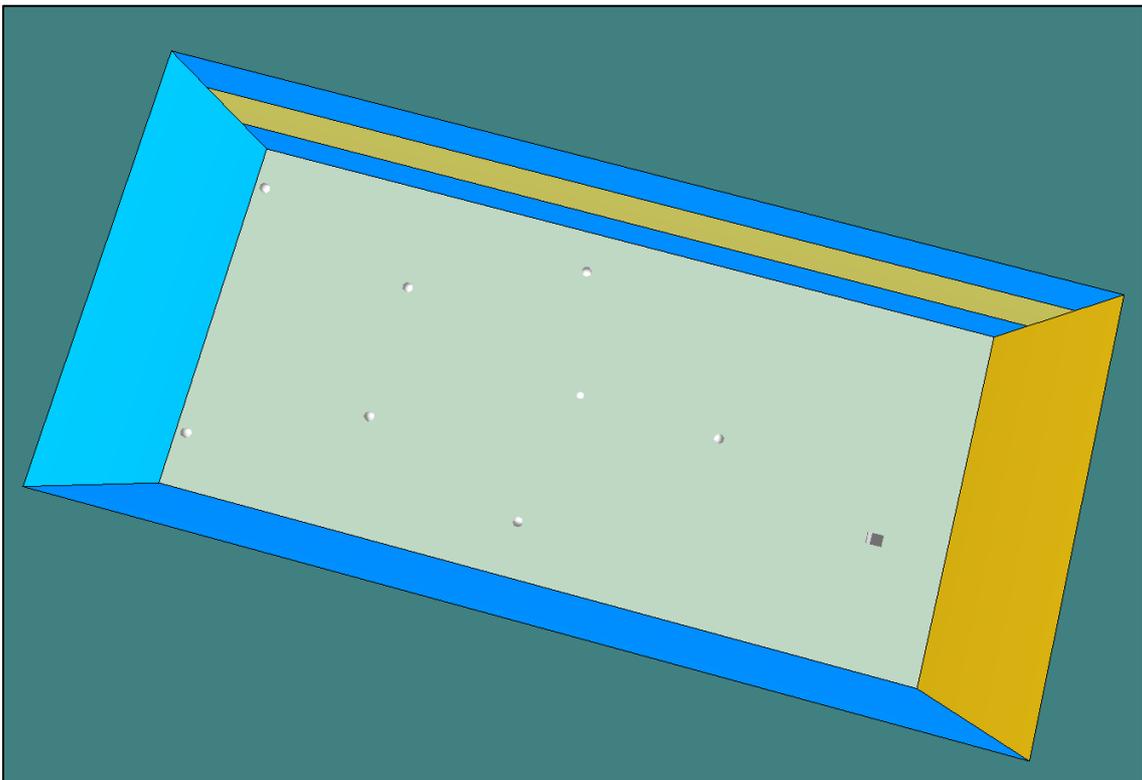


Figura 36: Hipótese com QRD - Vista Topo - Sala de Ensaio Musical (em azul estão as superfícies com QRD).

Quadro 18: Coeficientes de Absorção e Dispersão Sonora para Sala de Ensaio – Com QRD.

Sala de Ensaio Com QRD			
Elementos	Material	Coeficiente de Absorção (125 Hz/ 250 Hz/ 500 Hz/ 1000 Hz / 2000 Hz / 4000 Hz)	Coeficiente de Dispersão
Paredes Laterais	QRD	0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,05 / 0,05	0,15 / 0,21 / 0,41 / 0,79 / 0,84 / 0,71
Parede Fundo do Palco	Madeira Lisa	0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,05 / 0,05	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Paredes Fundo da Sala	QRD	0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,05 / 0,05	0,15 / 0,21 / 0,41 / 0,79 / 0,84 / 0,71
Teto	Gesso Liso (Cenário Reverberante)	0,16 / 0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,06	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
	Gesso Perfurado + Lã (Cenário Absorvente)	0,75 / 0,80 / 0,90 / 0,85 / 0,80 / 0,75	0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10 / 0,10
Janela	Esquadria + Vidro	0,15 / 0,12 / 0,10 / 0,08 / 0,06 / 0,06	0,10 / 0,15 / 0,20 / 0,20 / 0,20 / 0,20
Piso Plateia	Carpete + Cadeiras	0,10 / 0,08 / 0,07 / 0,06 / 0,05 / 0,05	0,20 / 0,30 / 0,40 / 0,45 / 0,50 / 0,50

Além das hipóteses acima, foram gerados para ambos os tipos de sala dois cenários: Reverberante e Absorvente, simulando a acústica variável. A diferença entre estes cenários na modelagem é que no cenário Reverberante o teto modelado é de gesso liso, já para o cenário Absorvente o teto está modelado com gesso perfurado de alta absorção.

3.5 Posicionamento da Fonte e Recetores

Para realização dos estudos, optou-se por posições de fontes e recetores aleatórias nos ambientes, de modo a criar uma amostragem suficiente para análise dos resultados.

Para a Sala de Ensaio optou-se por sete posições de recetores e uma posição de fonte, conforme apresentado na Figura 37.

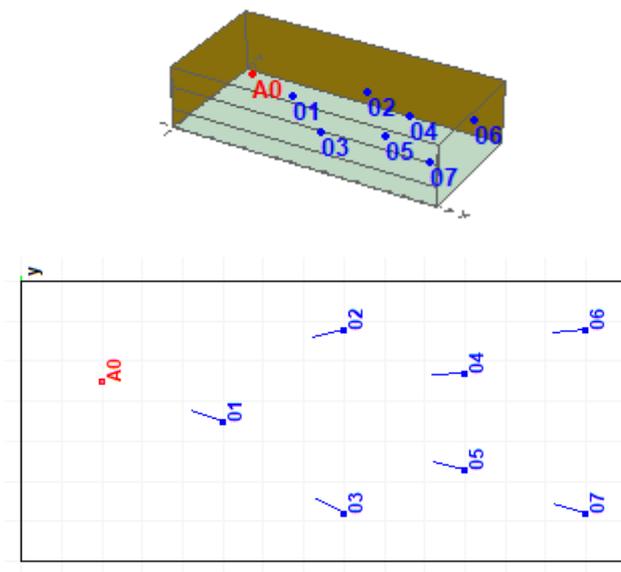


Figura 37: Posições de Fonte (A0) e Recetores (01 a 07) para a Sala de Ensaio.

Já para a Sala de Performance musical optou-se por dez posições de recetores e duas posições de fonte, conforme apresentado na Figura 38.

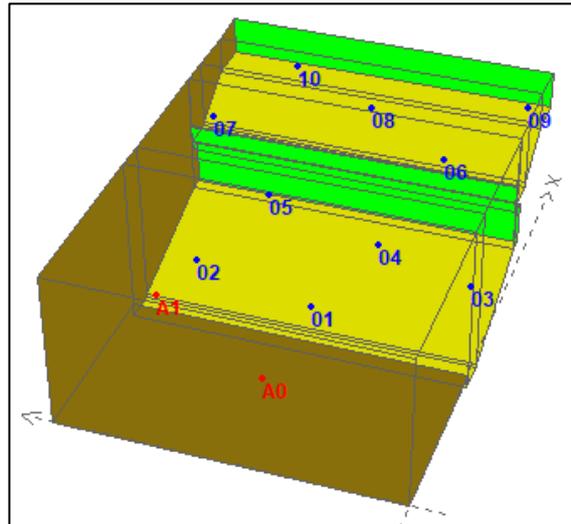


Figura 38: Posições de Fonte (A0 e A1) e Recetores (01 a 10) para a Sala de Performance Musical.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de analisar os efeitos da difusão em variados parâmetros acústicos de salas, foram realizadas as simulações descritas no Capítulo 3, onde a única variável é a difusão. Nos próximos itens serão detalhados cada um dos parâmetros estudados.

4.1 Tempo de Reverberação - T_{20} e T_{30} - e EDT

- Sala de Performance Musical

Optou-se em trabalhar com os T_{30} , T_{20} e EDT, visto que embora sejam parâmetros similares, o espaço de tempo de cada parâmetro torna-os singular. O T_{30} e o T_{20} , representam o tempo de reverberação determinados para decaimentos da energia sonora de 30 dB e 20 dB, respectivamente, excluindo os primeiros 5 dB. Já o EDT, mesmo sendo expresso e medido da mesma maneira que o Tempo de Reverberação (T_{30} e T_{20}), é baseado nos primeiros 10 dB de decaimento do som. Se o ambiente for extremamente difuso, ou seja, o decaimento for completamente linear, o T_{30} , o T_{20} e o EDT serão idênticos. O EDT tem mostrado melhor correlação como o som mais percebidos pelos ouvintes.

Seguem no Quadro 19, Quadro 20 e Quadro 21 os valores do T_{30} , T_{20} e EDT obtidos.

Quadro 19: T_{30} da Sala de Performance Musical para o Cenário Reverberante.

CENÁRIO REVERBERANTE	
HIPÓTESE	T_{30} (s)
SEM DIFUSÃO	2,6
COM QRD	1,7
DIFUSOR GEOMÉTRICO	1,8

Quadro 20: T_{20} da Sala de Performance Musical para o Cenário Reverberante.

CENÁRIO REVERBERANTE	
HIPÓTESE	T_{20} (s)
SEM DIFUSÃO	2,3
COM QRD	1,7
DIFUSOR GEOMÉTRICO	1,8

Quadro 21: EDT da Sala de Performance Musical para o Cenário Reverberante.

CENÁRIO REVERBERANTE	
HIPÓTESE	EDT (s)
SEM DIFUSÃO	1,6
COM QRD	1,6
DIFUSOR GEOMÉTRICO	1,5

Analisando os quadros acima, nota-se grande disparidade no T_{30} e T_{20} em relação a hipótese sem difusão. Os valores do Tempo de Reverberação com QRD e com Difusor Geométrico estão na ordem de 1,7s, já com a hipótese sem Difusão o tempo de reverberação sobe consideravelmente para 2,3s e 2,6s. Nota-se que este aumento da reverberação ainda é maior no T_{30} . Quando se analisa o EDT, nota-se que já não existe este pico na reverberação no ambiente sem difusão.

Trabalhando com acústica variável, alterou-se a absorção do teto da sala, criando um cenário mais absorvente, porém com as mesmas dimensões e hipóteses de difusão. Seguem nos Quadro 22, Quadro 23, Quadro 24 os resultados obtidos.

Quadro 22: T_{30} da Sala de Performance Musical para o Cenário Absorvente.

CENÁRIO ABSORVENTE	
HIPÓTESE	T_{30} (s)
SEM DIFUSÃO	2,2
COM QRD	0,9
DIFUSOR GEOMÉTRICO	1,2

Quadro 23: T_{20} da Sala de Performance Musical para o Cenário Absorvente.

CENÁRIO ABSORVENTE	
HIPÓTESE	T_{20} (s)
SEM DIFUSÃO	2,0
COM QRD	0,9
DIFUSOR GEOMÉTRICO	1,1

Quadro 24: EDT da Sala de Performance Musical para o Cenário Absorvente.

CENÁRIO ABSORVENTE	
HIPÓTESE	EDT (s)
SEM DIFUSÃO	0,9
COM QRD	0,7
DIFUSOR GEOMÉTRICO	0,7

Efeito similar ao cenário reverberante acontece no cenário absorvente. O tempo de reverberação aumenta ainda mais significativamente na hipótese sem difusão, sendo esta

diferença ainda maior no T_{30} . No EDT a diferença diminui, porém a hipótese sem difusão ainda apresenta valor maior.

- Sala de Ensaio

A mesma análise anterior foi repetida para a Sala de Ensaio simulada, visando compreender o fenômeno em uma sala mais simplificada, com menores dimensões e retangular. No Quadro 25, Quadro 26 e Quadro 27 estão os resultados obtidos para o cenário reverberante.

Quadro 25: T_{30} da Sala de Ensaio para o Cenário Reverberante.

CENÁRIO REVERBERANTE	
HIPÓTESE	T_{30} (s)
SEM DIFUSÃO	2,3
COM QRD	2,2

Quadro 26: T_{20} da Sala de Ensaio para o Cenário Reverberante.

CENÁRIO REVERBERANTE	
HIPÓTESE	T_{20} (s)
SEM DIFUSÃO	2,3
COM QRD	2,2

Quadro 27: EDT da Sala de Ensaio para o Cenário Reverberante.

CENÁRIO REVERBERANTE	
HIPÓTESE	EDT (s)
SEM DIFUSÃO	2,2
COM QRD	2,0

Para o cenário reverberante da Sala de Ensaio nota-se pouca disparidade de valores entre hipóteses com e sem difusão, assim como entre os parâmetros T_{30} , T_{20} e EDT, porém o ambiente sem difusão continua com valores maiores que o com QRD.

No Quadro 28, Quadro 29 e Quadro 30 abaixo, podem-se analisar os resultados do cenário absorvente da sala de ensaio.

Quadro 28: T_{30} da Sala de Ensaio para o Cenário Absorvente.

CENÁRIO ABSORVENTE	
HIPÓTESE	T_{30} (s)
SEM DIFUSÃO	1,2
COM QRD	0,6

Quadro 29: T_{20} da Sala de Ensaio para o Cenário Absorvente.

CENÁRIO ABSORVENTE	
HIPÓTESE	T_{20} (s)
SEM DIFUSÃO	1,2
COM QRD	0,6

Quadro 30: EDT da Sala de Ensaio para o Cenário Absorvente.

CENÁRIO ABSORVENTE	
HIPÓTESE	EDT (s)
SEM DIFUSÃO	0,7
COM QRD	0,5

Nota-se que nos resultados acima que no cenário absorvente da Sala de Ensaio, o tempo reverberação volta a ser consideravelmente maior sem difusão na sala, reduzindo um pouco a diferença de valores no EDT.

Os resultados dos tempos de reverberações das simulações apresentadas demonstram a importância da difusão para Salas para Música. O aumento do tempo de reverberação nas hipóteses sem difusão reflete os defeitos acústicos causados, por exemplo, pelo paralelismo da sala.

Nota-se que estes defeitos acústicos são menos percebidos no EDT, visto que este parâmetro está relacionado com o decaimento inicial, ou seja, com as primeiras reflexões. Em contrapartida, se compararmos o T_{20} com o T_{30} , percebe-se que os resultados do tempo de reverberação são maiores no T_{30} , visto que este acaba por medir mais tempo e conseqüentemente recebendo as reflexões mais tardias, reafirmando os defeitos acústicos causados por superfícies paralelas, sem difusão.

4.2 Nível de Pressão Sonora - SPL

Para esta análise, foi utilizada a diferença do SPL entre dois pontos de recetores na mesma plateia. Idealmente, quando menor a diferença entre recetores, mais homogêneo é a distribuição do som no ambiente.

- Sala de Performance Musical

Para a análise da Sala de Performance Musical foram utilizadas duas posições de fonte sonoras, uma no centro do palco e outra na lateral do palco na posição usual do alto-falantes. No Gráfico 1, Gráfico 2, Gráfico 3 e Gráfico 4 está a diferença de nível de

pressão sonora (ΔL) para cada recetor em relação ao recetor mais próximo da fonte sonora.

Gráfico 1: Sala de Performance Musical - Diferença do SPL em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Reverberante.

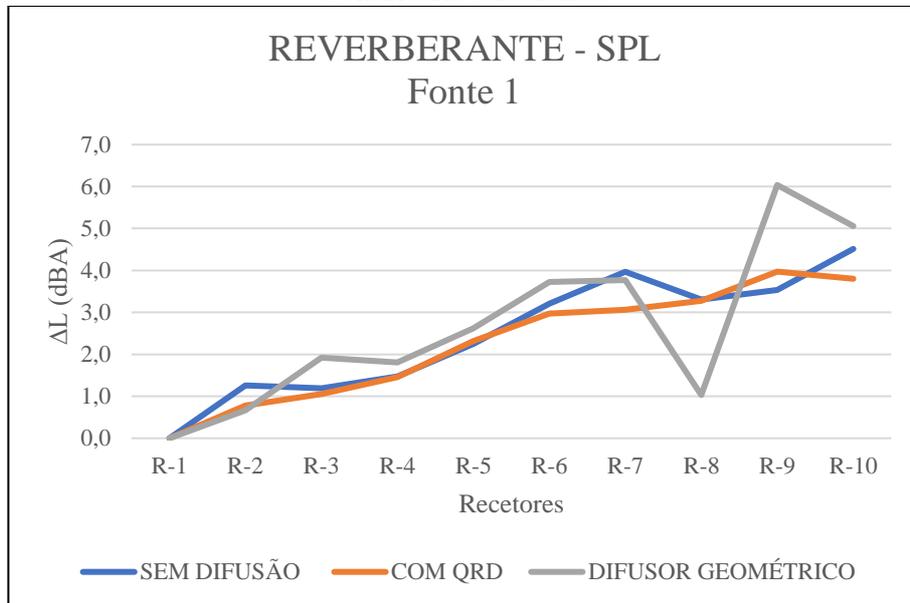


Gráfico 2: Sala de Performance Musical - Diferença do SPL em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Reverberante.

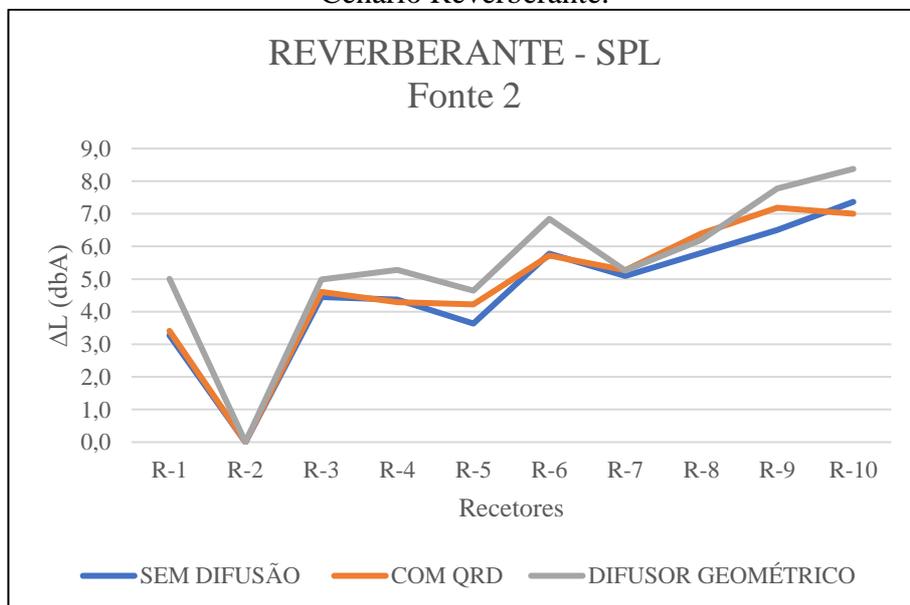


Gráfico 3: Sala de Performance Musical - Diferença do SPL em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Absorvente.

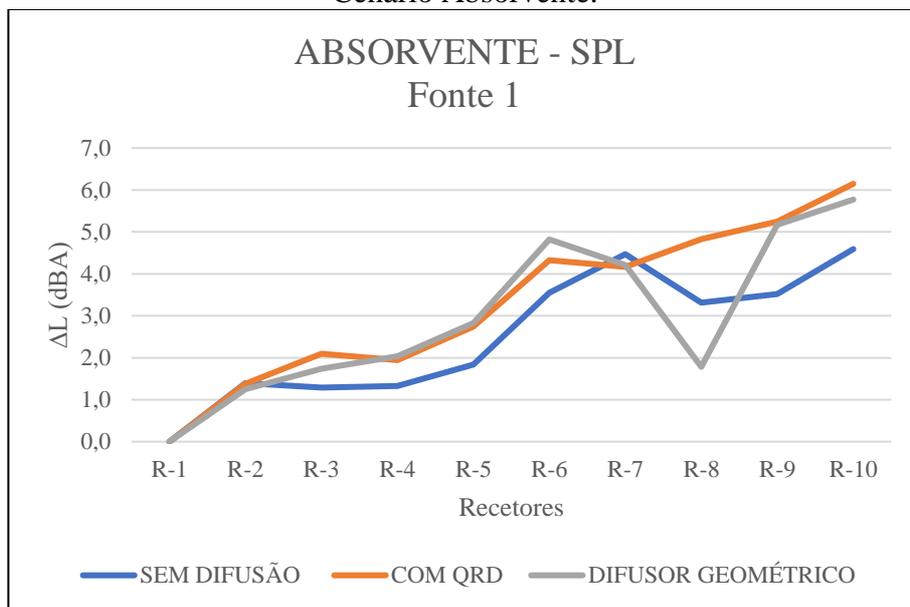
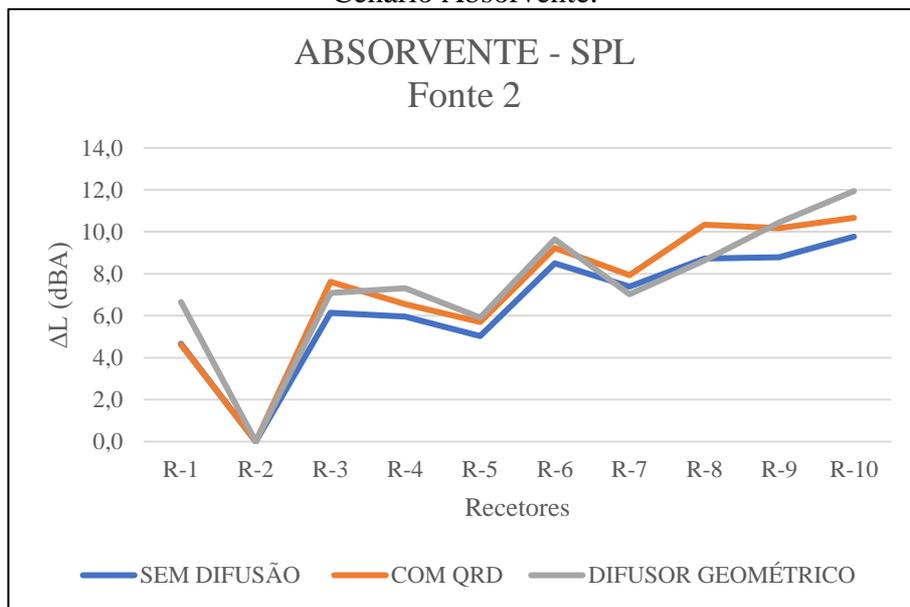


Gráfico 4: Sala de Performance Musical - Diferença do SPL em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Absorvente.



Nos gráficos acima nota-se que a diferença entre os resultados das diferentes hipóteses não é grande, não havendo uma melhoria com a aplicação de difusores.

- Sala de Ensaio

Seguem no Gráfico 5 e Gráfico 6 os resultados da diferença do SPL, para os cenários reverberante e absorvente, para a Sala de Ensaio.

Gráfico 5: Sala de Ensaio - Diferença do SPL em cada recetor - Cenário Reverberante.

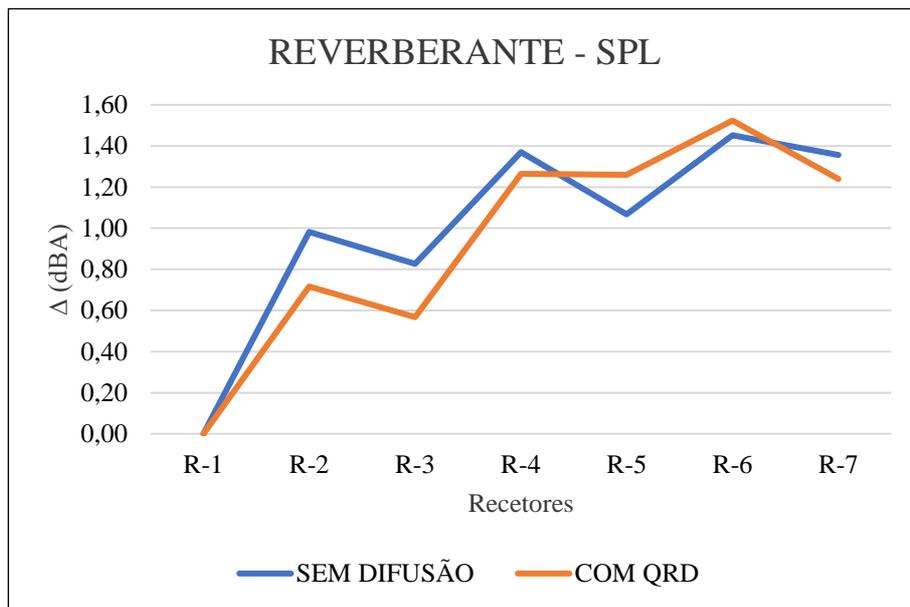
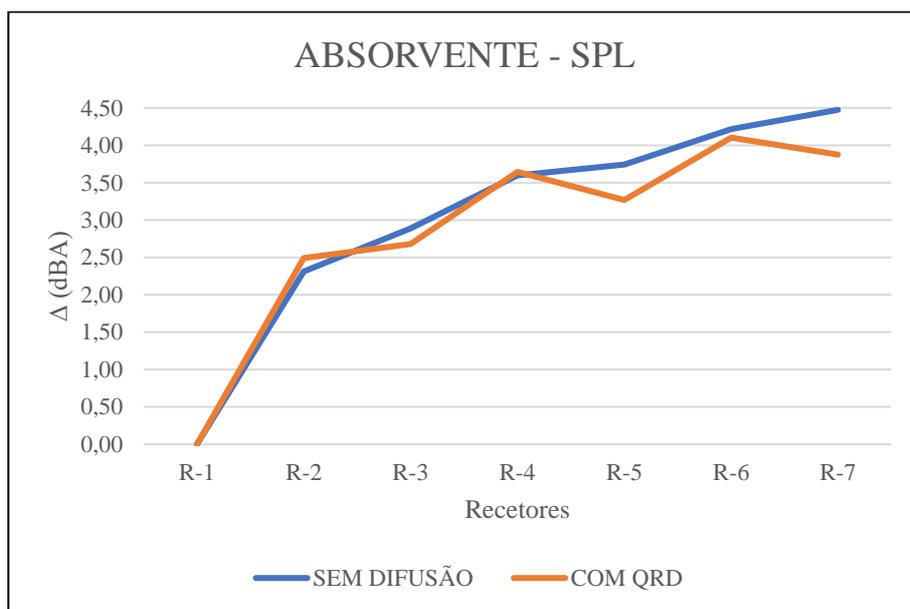


Gráfico 6: Sala de Ensaio - Diferença do SPL em cada recetor - Cenário Absorvente.



Conforme pode ser analisado nos gráficos, para a Sala de Ensaio também não há um padrão entre o ambiente sem difusão em comparação com o ambiente com QRD, ou seja, não se pode falar que a introdução de difusão na sala ajudará a ter maior homogeneidade do som entre os ouvintes. Deste modo, se a intenção é aumentar o SPL no fundo da sala, de modo a ter uma menor diferença do nível de pressão sonora entre o recetor mais próximo a fonte sonora e o mais longe, não se tem interesse em colocar difusão sonora

em toda sala. Soluções mais específicas devem ser estudadas, como a geometria e inclinação de paredes e teto ideal para projeção do som, assim como posicionamento de difusores em lugares estratégicos, como exemplo na parte dos fundos da sala.

4.3 Índice De Transmissão Da Fala - STI

O STI é o parâmetro utilizado para quantificar a inteligibilidade da fala, sendo que quanto maior o valor do STI maior a inteligibilidade da fala. Deste modo, para salas de música, busca-se STI mais baixos, comparados com salas para palavra falada.

Visto que este parâmetro é desejável em ambientes onde o foco é a palavra falada, apresenta-se abaixo somente os resultados para os cenários absorventes, estando em Anexo os cenários reverberantes.

- Sala de Performance Musical

No Gráfico 7 e Gráfico 8 estão representados o STI para cada recetor, hipótese e cenário absorvente.

Gráfico 7: Sala de Performance Musical - STI em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Absorvente.

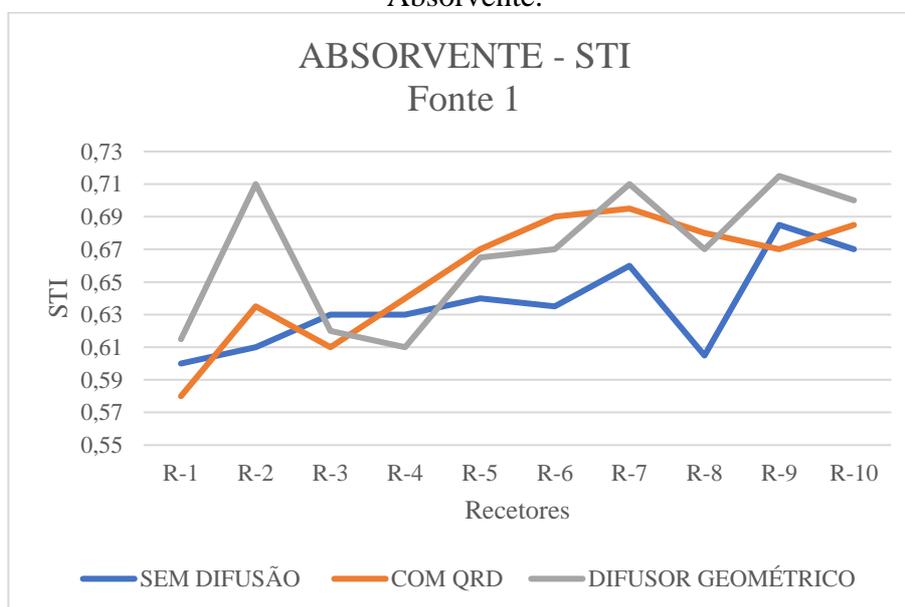
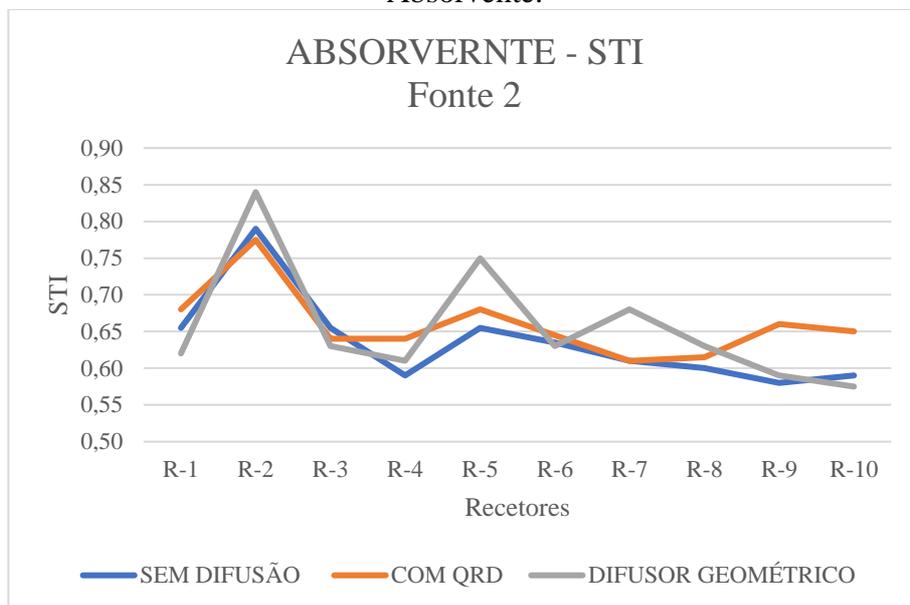


Gráfico 8: Sala de Performance Musical - STI em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Absorvente.



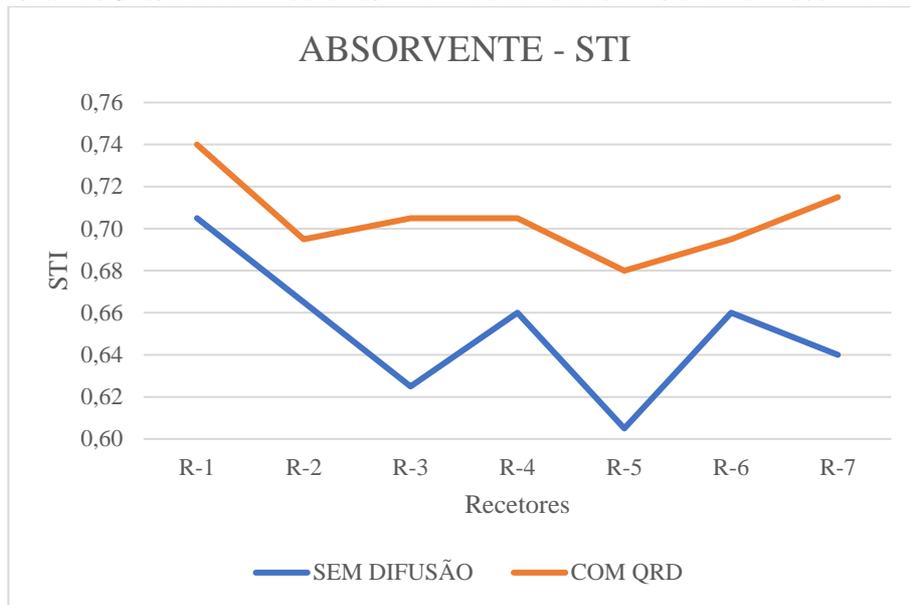
A janela temporal da análise do STI é muito pequena em comparação com o tempo de reverberação, deste modo é mais fácil analisar mudanças substanciais com o tempo de reverberação.

A sala de performance musical, devido a sua geometria mais complexa, apresenta poucos defeitos acústicos, sendo assim, os difusores são menos importantes neste tipo de geometria. Porém, mesmo com estas condições, ainda se nota no Gráfico 7 e Gráfico 8 o aumento médio do STI com aplicação de difusores QRD e geométrico.

- Sala de Ensaio

No Gráfico 9 está representado o STI da Sala de Ensaio para cada recetor, hipótese e cenário absorvente.

Gráfico 9: Sala de Ensaio - STI em cada recetor - Cenário Absorvente.



Pelo fato da sala de ensaio apresentar paredes laterais paralelas, defeitos acústicos ocorrem, podendo mascarar os resultados. Deste modo, para avaliar se a utilização do QRD realmente melhora o parâmetro STI, descartando o efeito dos defeitos acústicos, fez-se outra simulação com as paredes laterais da sala inclinadas, conforme Figura 39.

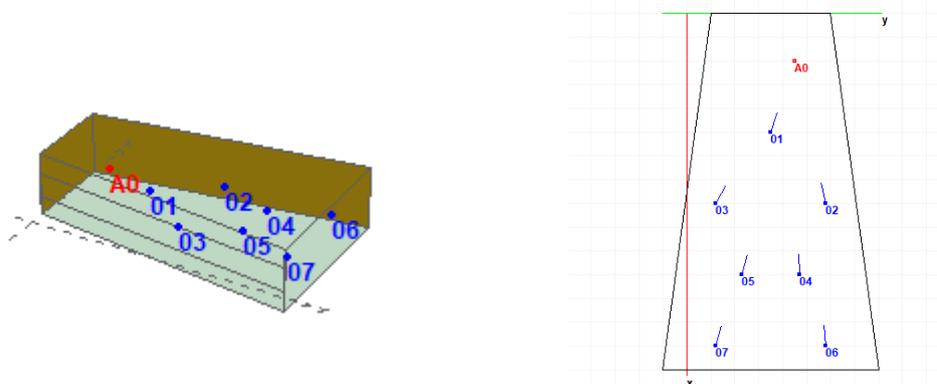
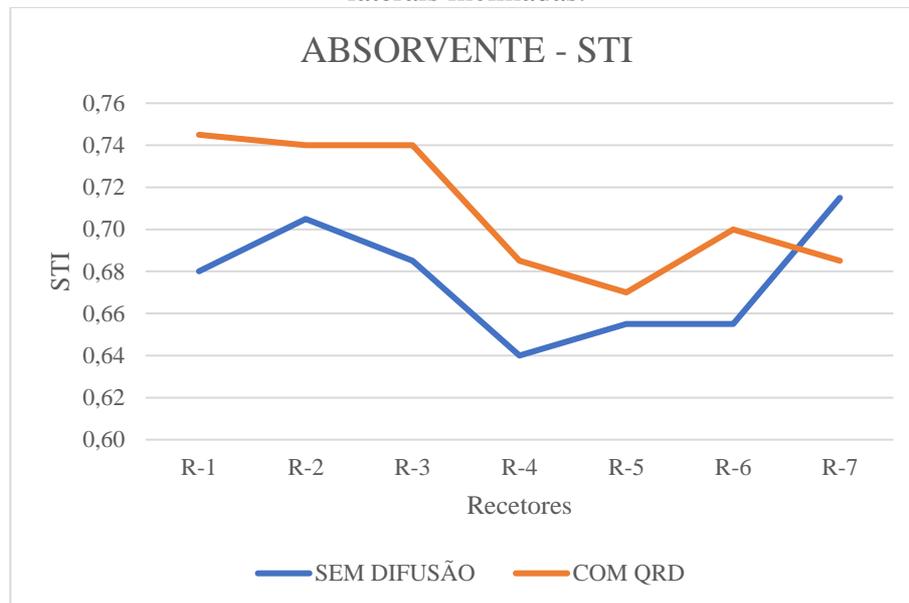


Figura 39: Sala de Ensaio com paredes laterais inclinadas.

Gráfico 10: Sala de Ensaio - STI em cada recetor - Cenário Absorvente, com paredes laterais inclinadas.



Nota-se no Gráfico 10 que as curvas estão mais próximas, ou seja, os defeitos acústicos da sala, gerados pelo paralelismo entre as paredes, tem influência nos resultados. Por outro lado, mesmo corrigindo os defeitos acústicos, percebe-se que a inclusão do difusor QRD aumenta o parâmetro STI, melhorando a inteligibilidade da fala.

4.4 Definição - D50

Este parâmetro é determinado através da relação entre a energia registrada nos primeiros 50 msec e a energia total e quanto maior seu valor melhor será a inteligibilidade da palavra na sala.

Visto que este parâmetro é desejável em ambientes onde o foco é a palavra falada, apresenta-se abaixo somente os resultados para os cenários absorventes, estando em Anexo os cenários reverberantes.

- Sala de Performance Musical

No Gráfico 11 e Gráfico 12 estão representados o D50 para cada recetor, hipótese e cenário absorvente.

Gráfico 11: Sala de Performance Musical - D50 em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Absorvente.

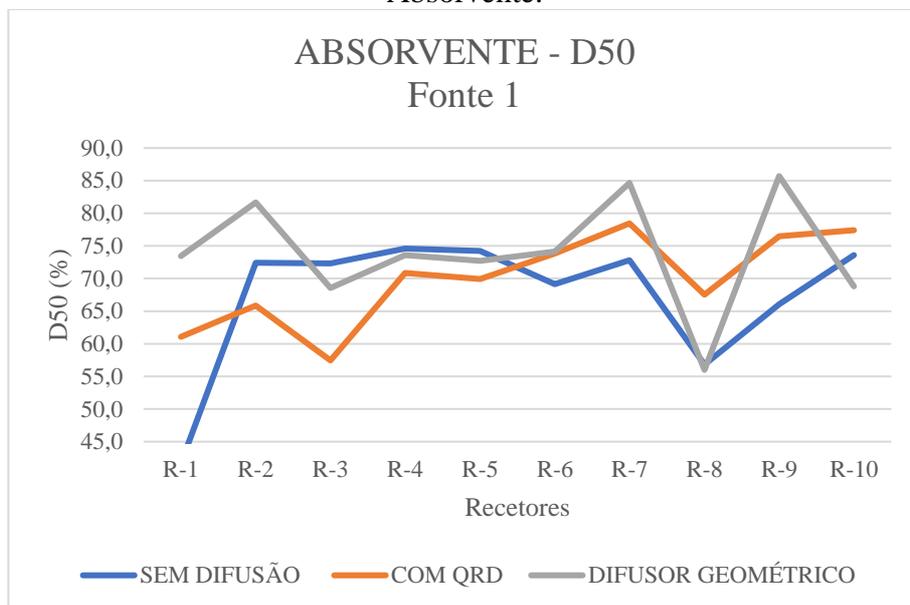
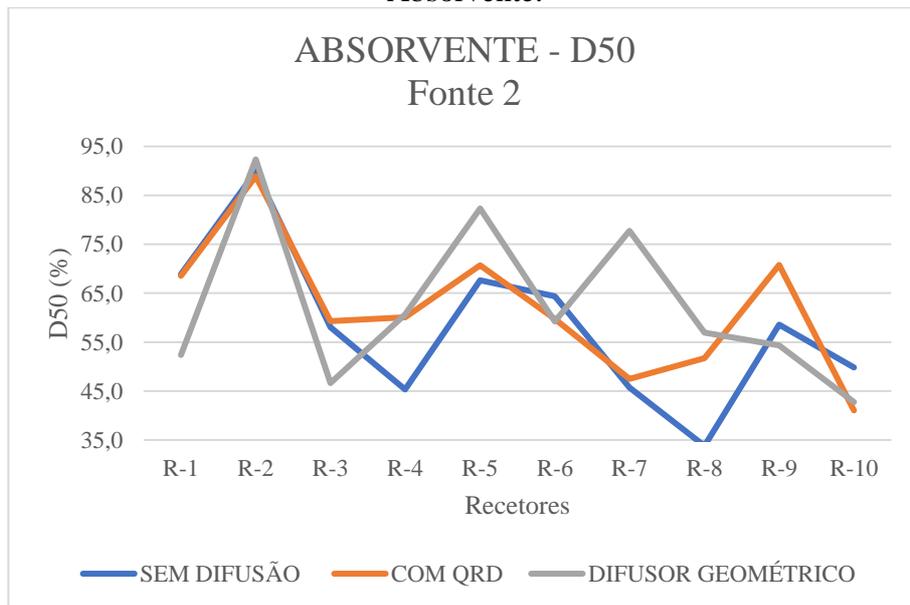


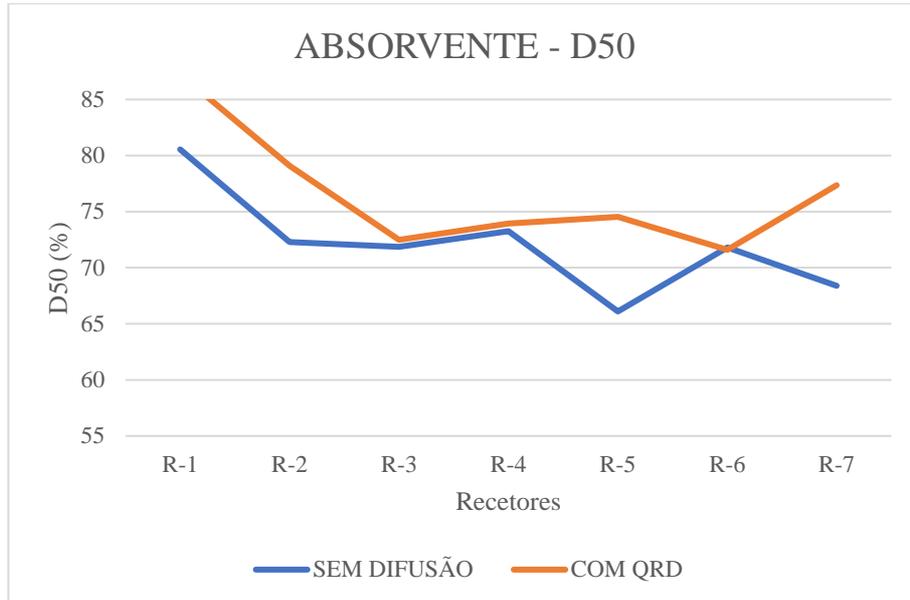
Gráfico 12: Sala de Performance Musical - D50 em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Absorvente.



- Sala de Ensaio

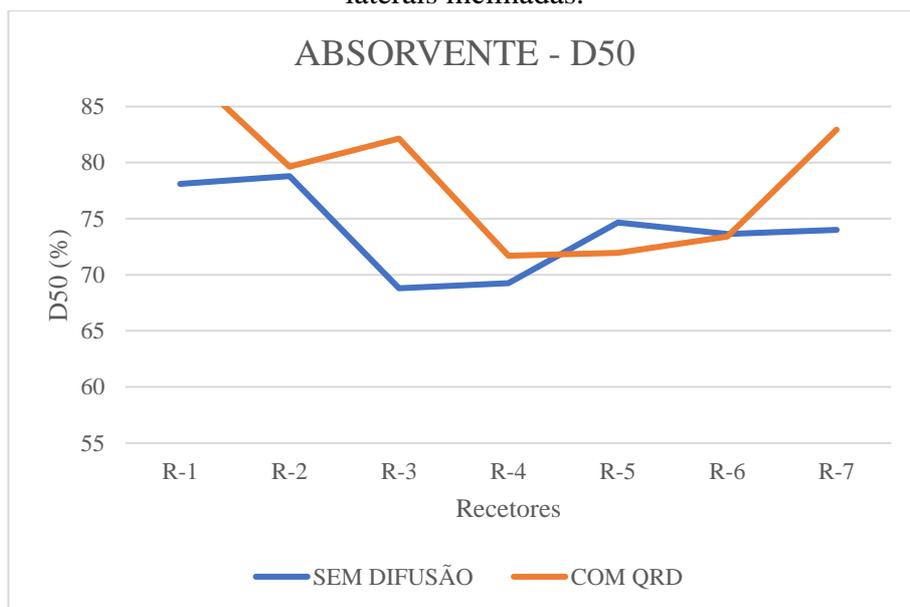
No Gráfico 13 está representado o D50 para cada recetor, hipótese e cenário absorvente.

Gráfico 13: Sala de Ensaio - D50 em cada recetor - Cenário Absorvente.



Nota-se no Gráfico 13 que há um sensível aumento na definição sonora com a utilização dos difusores sonoros, porém não tão significativa quanto o tempo de reverberação, visto que a janela temporal é reduzida para este parâmetro. Assim como no estudo do STI, também foi realizada uma simulação considerando as paredes laterais inclinadas, de modo a verificar se os defeitos acústicos influenciam nos resultados. No Gráfico 14 percebe-se que não houve grande influência no resultado.

Gráfico 14: Sala de Ensaio - D50 em cada recetor - Cenário Absorvente, com paredes laterais inclinadas.



4.5 Índice De Claridade Musical - C80

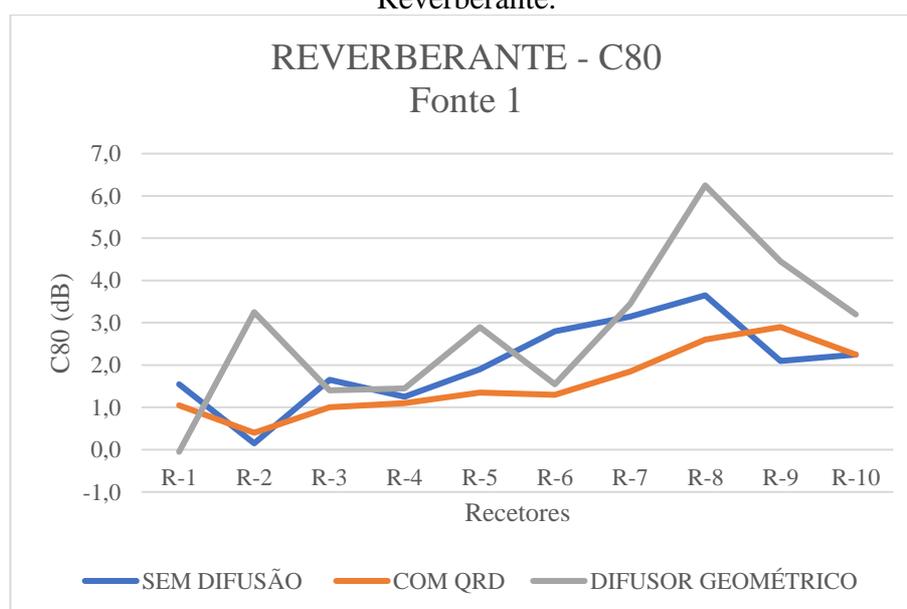
Este parâmetro relaciona a energia registrada nos primeiros 80 msec e a energia a partir do 80 msec. Para salas de concerto, valores menores de C80 são esperados, como o intervalo de -4 dB a +1 dB sugerido por Beranek.

Visto que este parâmetro é desejável em ambientes onde o foco é a música, apresenta-se abaixo somente os resultados para os cenários reverberantes, estando em Anexo os cenários absorventes.

- Sala de Performance Musical

Segue abaixo no Gráfico 15 os resultados encontrados de C80, para o cenário reverberante.

Gráfico 15: Sala de Performance Musical - C80 em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Reverberante.

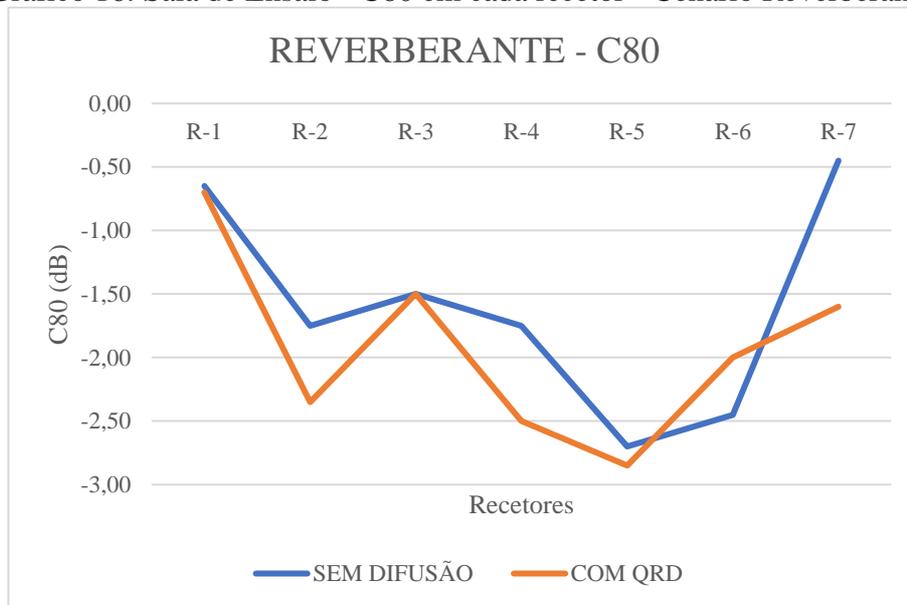


Com a fonte centralizada no palco, percebe-se no Gráfico 15 que a claridade musical diminui com a utilização de QRD, o que é favorável para uma sala de performance musical, mostrando a importância da utilização de difusão sonora nas salas destinadas a música.

- Sala de Ensaio

Segue abaixo no Gráfico 16 e os resultados encontrados de C80, para o cenário reverberante.

Gráfico 16: Sala de Ensaio - C80 em cada recetor - Cenário Reverberante.



Os resultados da Sala de Ensaio seguem os resultados da Sala de Performance musical, ou seja, em geral, com a introdução do difusor QRD a claridade musical diminui.

4.6 Eficiência Lateral – J-LF

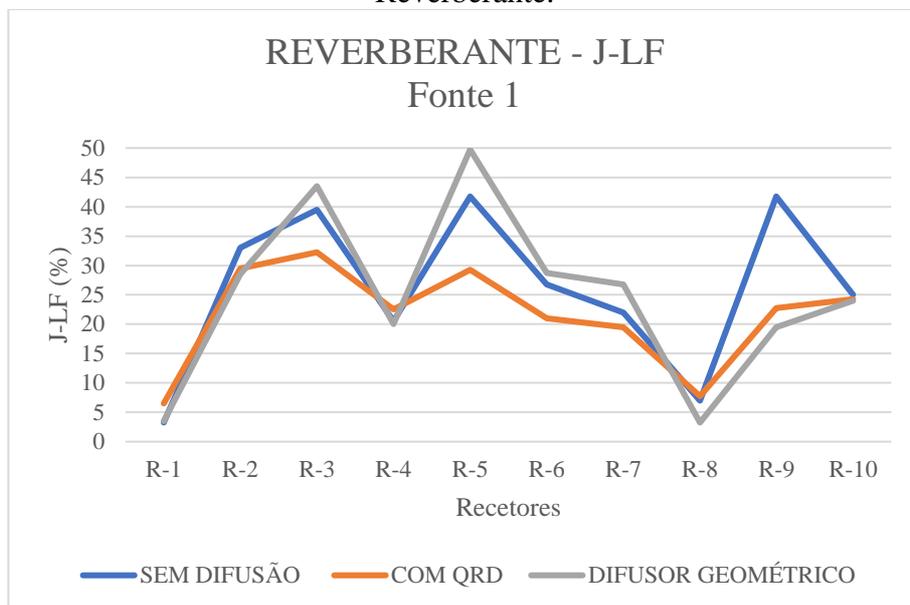
Este parâmetro corresponde à relação entre a energia que chega lateralmente a um ouvinte, dentro dos primeiros 80ms após a chegada do som direto, e a energia recebida em todas as direções no mesmo intervalo de tempo.

- Sala de Performance Musical

Segue abaixo no Gráfico 17 e Gráfico 18 os resultados encontrados de J-LF, tanto no cenário reverberante quanto no absorvente.

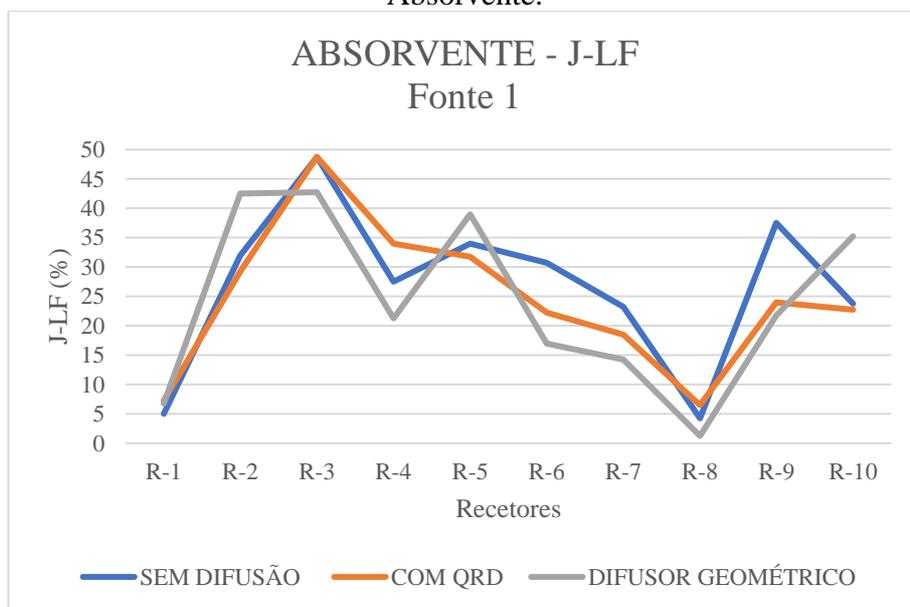
Para este parâmetro foi utilizado para análise somente a Fonte 1, central, visto que não faria sentido analisar a eficiência lateral de maneira não simétrica.

Gráfico 17: Sala de Performance Musical - J-LF em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Reverberante.



Analisando o Gráfico 17 nota-se que a curva com QRD está mais homogênea em relação as demais, ou seja, a utilização do difusor QRD faz com que haja um espalhando melhor do som, apresentando maior uniformidade sonora independentemente da posição do recetor/ouvinte na sala.

Gráfico 18: Sala de Performance Musical - J-LF em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Absorvente.



Já observando o Gráfico 18 nota-se que a difusão sonora não influencia os resultados. Esta diferença ocorre, pois, este cenário tem muita absorção, fazendo com que o campo direto seja mais determinante que o campo refletido/reverberante.

- Sala de Ensaio

Seguem abaixo no Gráfico 19 e Gráfico 20 os resultados encontrados de J-LF, tanto no cenário reverberante quanto no absorvente. Analisando os gráficos percebe-se que os resultados confirmam as conclusões já apresentadas na Sala de Performance Musical, onde no cenário reverberante há uma maior homogeneidade entre os recetores com a utilização do difusor QRD. Já no cenário absorvente não é possível verificar este fenômeno, visto que o campo direto é mais significativo que o campo reverberante.

Gráfico 19: Sala de Ensaio - J-LF em cada recetor - Cenário Reverberante.

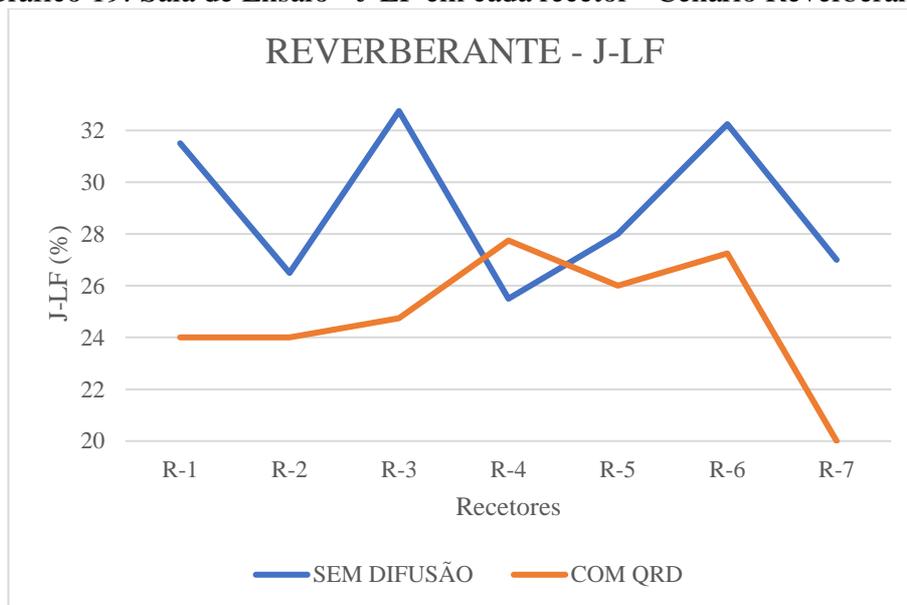
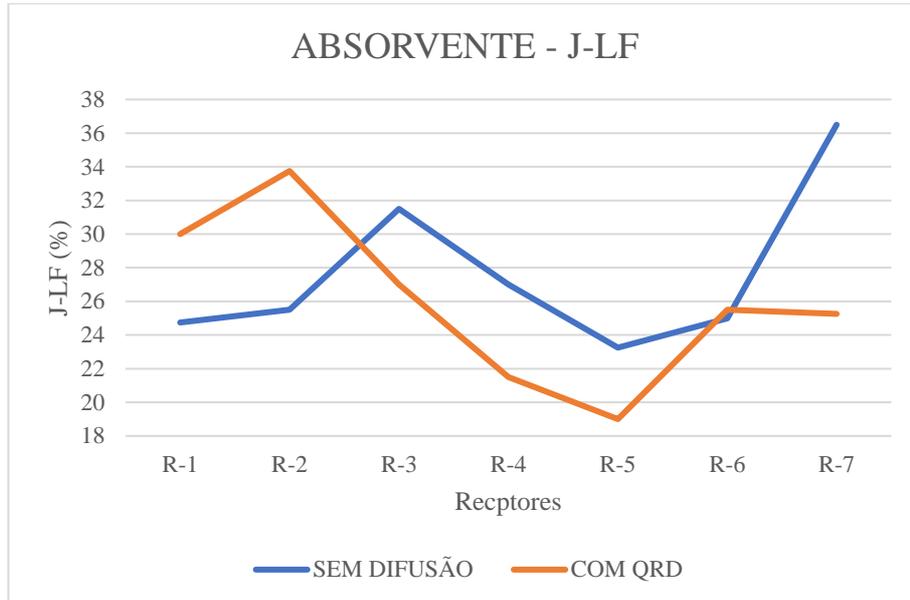


Gráfico 20: Sala de Ensaio - J-LF em cada recetor - Cenário Absorvente.



4.7 Força Sonora - G

Este parâmetro corresponde à diferença entre o nível total de pressão sonora produzido por uma fonte omnidirecional em um recetor em uma sala e o nível sonora produzido pela mesma fonte situada em campo livre e medida a 10 m de distância.

Visto que este parâmetro é desejável em ambientes onde o foco é a música, apresenta-se abaixo somente os resultados para os cenários reverberantes, estando em Anexo os cenários absorventes.

- Sala de Performance Musical

Seguem abaixo no Gráfico 21 e Gráfico 22 os resultados encontrados de G, para o cenário reverberante.

Gráfico 21: Sala de Performance Musical - G em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Reverberante.

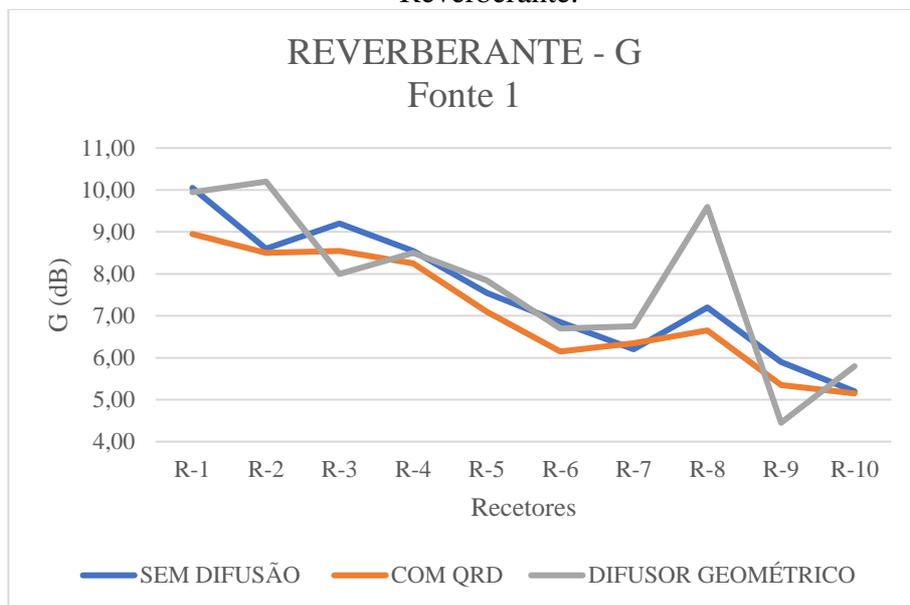
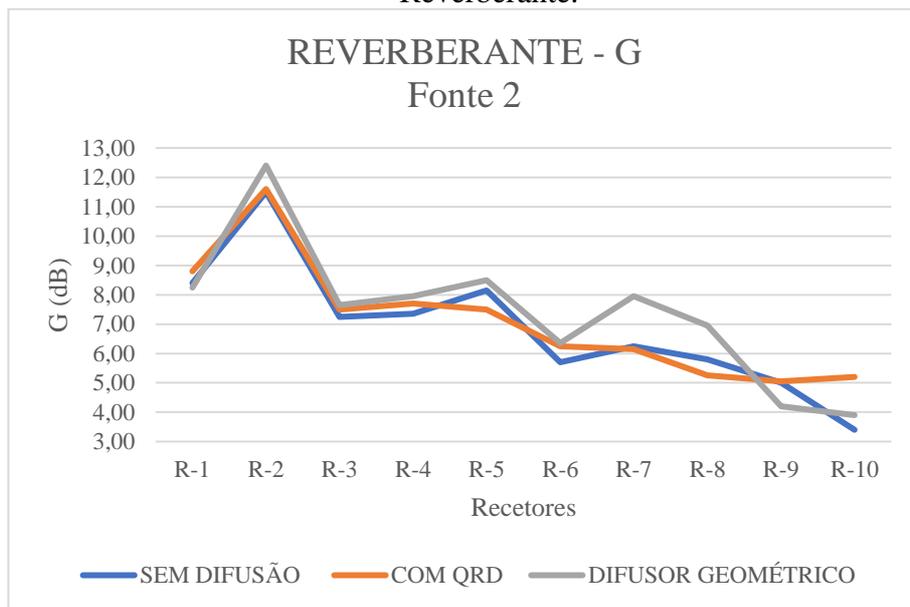


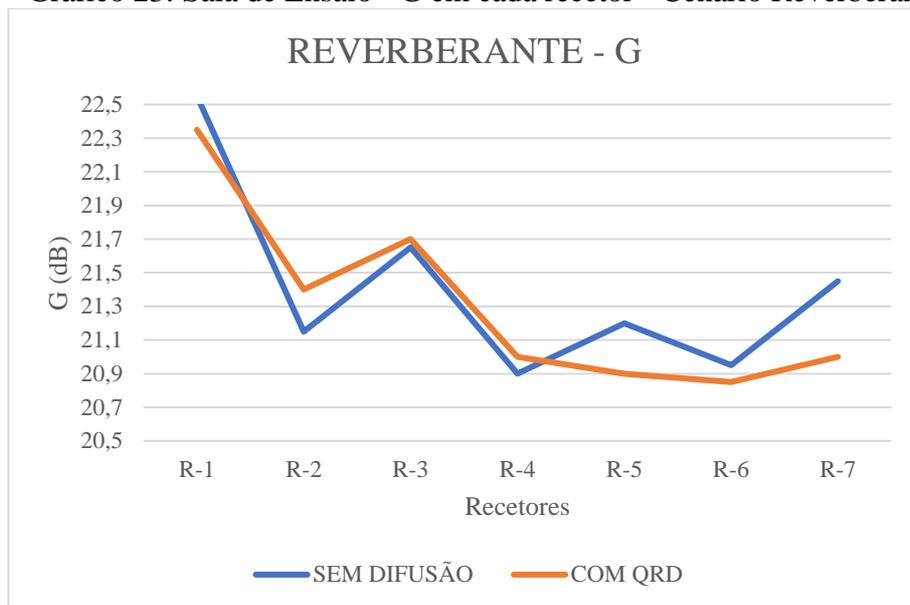
Gráfico 22: Sala de Performance Musical - G em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Reverberante.



- Sala de Ensaio

Segue abaixo no Gráfico 23 os resultados encontrados de G, para o cenário reverberante.

Gráfico 23: Sala de Ensaio - G em cada recetor - Cenário Reverberante.



Nota-se no Gráfico 21, Gráfico 22 e Gráfico 23 que a curva com o QRD é mais homogênea e uniforme que as demais, mostrando-se favorável a utilização de difusão. A difusão faz com que o som alcance os recetores com força semelhante.

Percebe-se nos gráficos da Sala de Performance Musical que há picos no difusor geométrico em alguns recetores. Isto ocorre devido ao efeito de focalização que a forma geométrica pode proporcionar em alguns pontos, mostrando a importância de projetar esta geometria com rigor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os difusores sonoros são comumente empregados no condicionamento acústico de salas com maiores exigências acústicas, como salas de espetáculos e performance musical, estúdio, salas de ensaio. São materiais que visam o espalhamento do som mais uniforme pela sala, sem absorções excessivas e minimizam os defeitos acústico como ecos ou zonas de sombra.

Neste trabalho, apresentaram-se os conceitos associados aos difusores sonoros, acústica variável e parâmetros para salas com foco em música. Por meio das simulações realizadas nos dois estudos de caso (Sala de Performance Musical e Sala de Ensaio), diversas respostas e conclusões podem ser coletadas dos resultados. Ressalta-se que para cada sala foi criado cenários de acústica variável, considerando um ambiente mais absorvente e outro mais reverberante.

Ao avaliar o Tempo de Reverberação da sala, pode-se perceber a importância da difusão sonora em Salas para Música, em particular para salas com formas simples que conduzam aos designados “defeitos acústicos”. O aumento do tempo de reverberação nas hipóteses sem difusão sonora reflete os defeitos acústicos causados, por exemplo, pelo paralelismo da sala.

É interessante perceber os resultados do EDT, pois este parâmetro está relacionado com o decaimento inicial, ou seja, com a respostas das primeiras reflexões. Nota-se que os resultados do EDT não diferem muito entre si, mostrando que os defeitos acústicos são menos percebidos devido a janela temporal ser mais reduzida. Em contrapartida, se compararmos o T_{20} com o T_{30} , percebe-se que os resultados do tempo de reverberação são maiores no T_{30} , visto que este acaba por medir mais tempo e conseqüentemente recebendo as reflexões mais tardias, reafirmando os defeitos acústicos causados por superfícies paralelas, sem difusão.

Avaliando a diferença do Nível de Pressão Sonora (SPL) em diferentes recetores na plateia não se pode afirmar que a introdução de difusão nas salas ajudará a ter maior homogeneidade do som entre os ouvintes. Deste modo, se a intenção é aumentar o SPL no fundo da sala, de modo a ter uma menor diferença do nível de pressão sonora entre o

recetor mais próximo a fonte sonora e o mais longe, não se tem interesse em colocar difusão sonora em toda sala. Soluções mais específicas devem ser estudadas, como a geometria e inclinação de paredes e teto ideal para projeção do som, assim como posicionamento de difusores em lugares estratégicos, como exemplo na parte dos fundos da sala.

O Índice de Transmissão da Sala (STI), é um parâmetro utilizado para quantificar a inteligibilidade da fala, sendo que quanto maior o valor do STI maior a inteligibilidade da fala. Visto que as duas salas simuladas apresentam dois cenários, considerando a acústica variável da sala, para este parâmetro optou-se por analisar o cenário da Sala Absorvente, visto que este parâmetro é desejável em ambientes onde o foco é a palavra falada. A sala de performance musical, devido a sua geometria mais complexa, apresenta poucos defeitos acústicos, sendo assim, os difusores são menos importantes neste tipo de geometria. Porém, mesmo com estas condições, ainda se nota o aumento médio do STI com aplicação de difusores QRD e geométrico. O mesmo acontece com a Sala de Ensaio, mesmo corrigindo os defeitos acústicos, percebe-se que a inclusão do difusor QRD aumenta o parâmetro STI, melhorando a inteligibilidade da fala.

Ao analisar a Definição Sonora (D50) optou-se por analisar o cenário absorvente, pelos mesmos motivos do STI. Tanto para a Sala de Performance Musical quanto para Sala de Ensaio há um sensível aumento na definição sonora com a utilização dos difusores sonoros, porém não tão significativa quanto o tempo de reverberação, visto que a janela temporal é reduzida para este parâmetro.

Para avaliar a Claridade Musical (C80) optou-se pelo cenário reverberante, visto que este parâmetro é desejável em ambientes onde o foco é a música. Tanto para Sala de Ensaio como para a Sala de Performance Musical, percebe-se que com a introdução do difusor QRD a claridade musical diminui, o que é favorável para salas para música.

Considerando o parâmetro Eficiência Lateral foi percebido respostas distintas para o cenário absorvente e reverberante. Para o cenário reverberante, percebe-se que utilização de difusor QRD faz com que haja um espalhando melhor do som, apresentando maior uniformidade sonora independentemente da posição do recetor/ouvinte na sala. Já para o cenário absorvente, não é possível verificar este fenômeno, visto que o campo direto é mais significativo que o campo reverberante. Sabe-se que são para as salas reverberantes (salas de concerto ou de música) onde se faz mais sentido valorizar este parâmetro e sua

homogeneidade, sendo favoráveis os valores encontrados. Salas mais absorventes, para cenários de música amplificada, as colunas laterais acabam por simular e ajudar neste efeito com o som “estéreo”.

Ao analisar o parâmetro Força Sonora (G), para cenário reverberante, nota-se que a curva com o QRD é mais homogênea e uniforme que as demais, mostrando-se favorável a utilização de difusão para este parâmetro. A difusão faz com que o som alcance os recetores com força semelhante. Para a Sala de Performance Musical houve picos nos gráficos no difusor geométrico em alguns recetores. Isto ocorre devido ao efeito de focalização que a forma geométrica pode proporcionar em alguns pontos, mostrando a importância de projetar esta geometria com rigor.

Com a análise de todos estes parâmetros, nota-se grandes vantagens na utilização de difusores sonoros. Para trabalhos e investigações futuras pode-se aprofundar em novas estratégias geométricas de tetos e paredes, que podem ser manufaturadas com facilidade, de modo a avaliar a influência positiva da diferença do Nível de Pressão Sonora (SPL), assim como a Força Sonora (G). Tais estratégias geométricas podem ser trabalhadas tanto no teto quanto nas paredes da sala, tendo como objetivo que o som chegue no fundo das salas com níveis de pressão sonora desejados, apresentando pouco diferencial em relação à primeira fila. Do mesmo modo, ao analisar a Força Sonora, tais estratégias devem evitar a focalização sonora em uma região específica da plateia.

Outros difusores manufaturados, como difusores policilíndricos podem ser estudados de modo a tentar obter os bons resultados do QRD, porém de modo mais viável economicamente. Pode também ser criado uma métrica para avaliar estes difusores manufaturados, avaliando por exemplo a dispersão espacial e temporal da solução adotada (Parreira, 2018).

Considera-se importante realizar outras simulações buscando os locais mais estratégicos para a utilização de difusores sonoros, focando sua utilização nos trechos de parede, por exemplo, estritamente necessários, de modo a otimizar e viabilizar sua utilização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afonso, Marcos Alberto Carvalho (2014). “Estudo numérico de painéis difusores acústicos”. DEC - Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra.

Arau-Puchades, H. (1997). “Dependencia del tiempo de reverberación com el tamaño de audiéncia em salas de pública concurrencia”. Revista de Acústica, 28, 7-12.

Atal, B.S., Schroeder, M.R. and Sessler, G.M. (1965) “Subjective reverberation time and its relation to sound decay. Proceedings of the 5th International Congress on Acoustics, Liege, Paper G32.

Barron, M. (2010) “Auditorium Acoustics and Architectural Design”. 2ª edição, Spon Press, Londres.

Beranek, L. (2004) “Concert halls and opera houses: music, acoustics, and architecture”. 2ª edição, Springer Verlag, Nova York.

Bistafa, S. (2004). “Difusão Sonora em Salas: Paradigmas do Passado e Estado da Arte”. I Seminário Música Ciência Tecnologia: Acústica Musical. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Bistafa, S. R. (2006) “Acústica aplicada ao controle do ruído”. Edgard Blucher, São Paulo.

Cavanaugh, William J., Joseph A. Wilkes, and J. Christopher Jaffe. (2010) "Architectural acoustics: principles and practice", John Wiley Sons Inc, Nova Jersey.

Cox, Trevor J.; D’antonio, Peter (2009). Acoustic Absorbers and diffusers. Theory and Application. 2ª Edição, Spon Press, Londres.

D’Antonio P. and Cox T.J. (1998). "Two Decades of Sound Diffusor Design and Development, Part 1: Applications and Design," J. Audio Eng. Soc.

Egan, M. D., Quirt, J. D., and Rousseau, M. Z. (1989). “Architectural acoustics”.

Ermann, M. (2015) “Architectural acoustics Illustrated”. John Wiley & Sons, New Jersey.

Figueiredo, F. L. (2005) “Parâmetros Acústicos Subjetivos: critérios para avaliação da Qualidade acústica de salas de música”. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Musicologia) - Escola de Música, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Ginn, K. B. (1978). “Architectural acoustics.” Brüel & Kjaer.

Guedes, S.V. (2016). “Lote da Estação Velha Ensaio Sobre Arquitetura Evolutiva, Flexível e Adaptável”. Universidade do Porto.

Godinho, L.; Mateus, D.; Mendes, P.; Pereira, A. (2015). “Difusores Acústicos – apontamentos de apoio”, DEC - Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra.

Hidaka, T.; BERANEK, L. L. (2000) “Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan, and the Americas”. The Journal of the Acoustical Society of America.

Iazzetta, F.H ;Figueiredo, F.L., Masiero, B.S. (2004) “Parâmetros Subjetivos em Salas Destinadas à Prática Musical”. Anais do IV Congresso Ibero-Americano de Acústica, Guimarães, Portugal.

Isbert, A. C. (1998). “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”, Vol. 4, Edição UPC, Univ. Politèc. De Catalunya, Barcelona.

Jordan, V. L. (1970). “Acoustical criteria for auditoriums and their relation to model techniques”. The Journal of the Acoustical Society of America, 408-412.

Kuttruff, H. (2000) “Room acoustics”. 4ª edição, Spon Press, Londres.

Marshall, L.G. e Klepper, D.L. (1999). “Acoustical design: places for listening. In: Architectural acoustics: principles and practice” John Wiley e Sons, Inc., New York.

Mehta, M.; Johnson, J.; Rocaford, J. (1999). “Architectural Acoustics: Principles and design”. Upper Saddle River, Prentice Hall.

Norma ABNT NBR 12.179 (1992), “Tratamento acústico em recintos fechados – Procedimento”.

Norma ASTM, Standard (2017) "Standard test method for sound absorption and sound absorption coefficients by the reverberation room method." C423.

Norma IEC 60268-16 (2003) “Sound System Equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index”.

Norma ISO 17497-1 (2004). “Acoustics. Sound-scattering properties of surfaces. Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room”.

Norma ISO 17497-2 (2012). “Acoustics. Sound-scattering properties of surfaces. Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field”.

Norma ISO 3382-1 (2009). “Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance Spaces”.

Norma NS 8178 (2014), “Acoustic criteria for rooms and spaces for music rehearsal and performance”.

Parreira, R. (2018). “Difusores acústicos 3D com forma orgânica – estudo numérico e otimização”. DEC - Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra.

Peel, M. (2018). <http://www.mikepeel.net>, data da consulta: 18/07/2016.

Pereira, A. ; Gaspar, A.; Godinho, L.; Mendes, P.; Mateus, D.; Carbajo, J.; Ramis, J.; Poveda, P. (2021). “On the Use of Perforated Sound Absorption Systems for Variable Acoustics Room Design”. MDPI, Buildings 2021, 11: 543. <https://doi.org/10.3390/buildings11110543>.

Perry, T. (2011). “The Lean Optimization of Acoustic Diffusers: Design by Artificial Evolution, Time Domain Simulation and Fractals”. Honours Thesis. Faculty of Engineering, University of Victoria, Victoria.

Rathsam, J. and Wang, L. (2006). “A Review of Diffuse Reflections in Architectural Acoustics”. Architectural Engineering – Faculty Publications, University of Nebraska, Lincoln.

Redondo, J., Pico, B., Roig, B., and Avis, M.R. (2007) "Time domain simulation of sound diffusers using finite-difference schemes," Acta Acustica with Acustica, vol. 93.

Rindel, J. H. (2014) “New Norwegian standard on the acoustics of rooms for music rehearsal and performance”. Multiconsult AS, Oslo, Norway.

Sá, L.R.; Acústica e Educação em Música: Estudo Qualitativo Para Sala de Ensino e Prática de Instrumento e Canto. Dissertação de Mestrado em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná, 2010.

Sabine, W. C., "Collected Papers on Acoustics" (1993). Harvard University Press, 1922; republished, Acoustical Society of America.

Schröder, M. R. (1979) "Binaural Dissimilarity and Optimum Ceilings for Concert Halls: More Lateral Sound Diffusion," Journal Acoustical Society of America.

Siebein, G. W.; KINZEY, B. Y. (1999) "Recent innovations in acoustical design and research. Architectural Acoustics: principles and practice".

Tadeu, A.; Mateus, D.; António, J.; Godinho, L.; Mendes, P. (2010). "Acústica Aplicada". Textos de apoio à disciplina de opção "Acústica Aplicada", DEC - Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra.

ANEXO

ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DA FALA - STI

- Sala de Performance Musical

Gráfico 24: STI em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Reverberante.

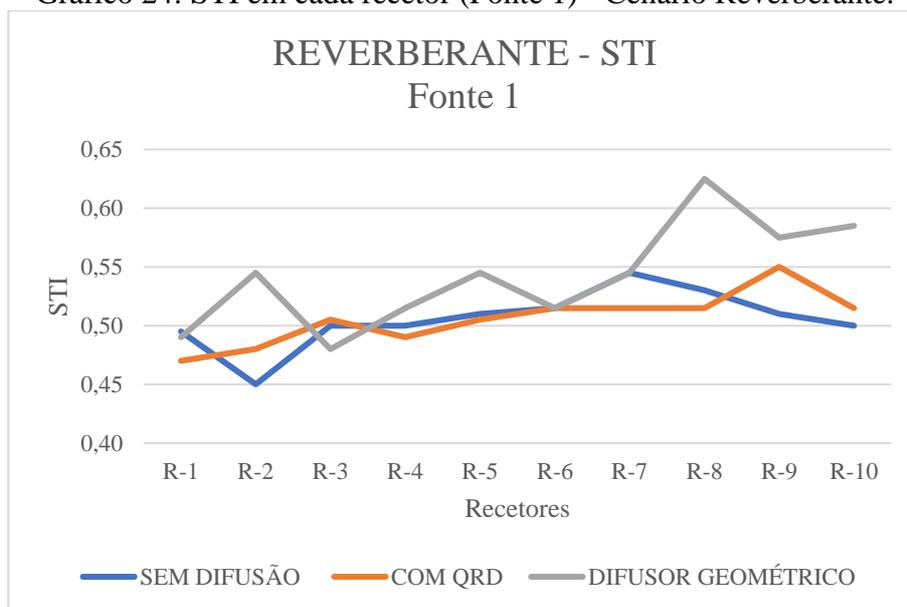
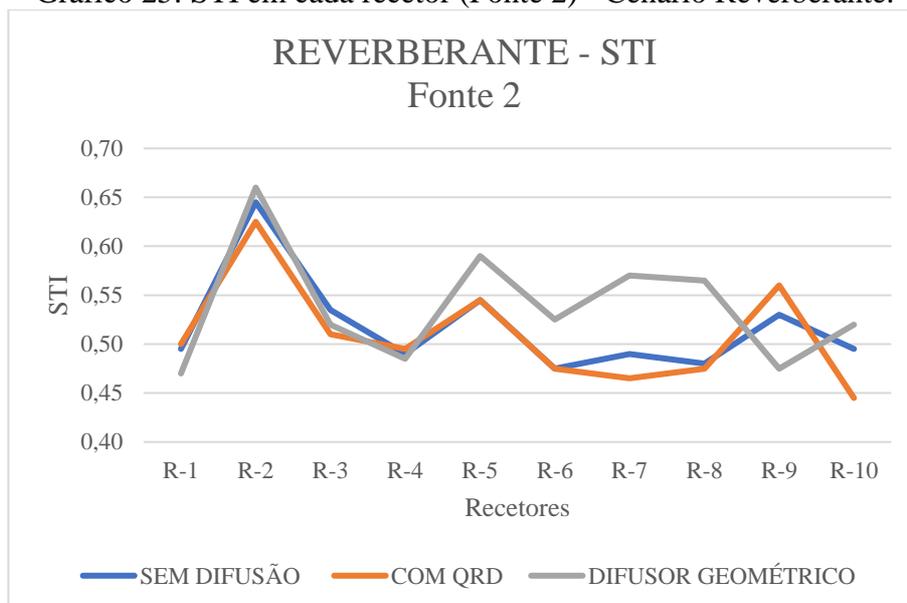
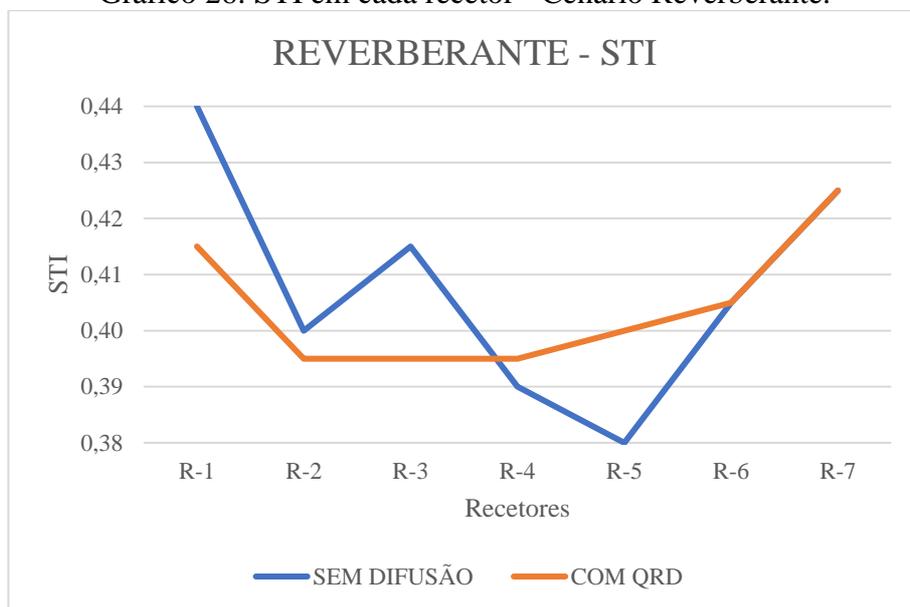


Gráfico 25: STI em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Reverberante.



▪ Sala de Ensaio

Gráfico 26: STI em cada recetor - Cenário Reverberante.



DEFINIÇÃO SONORA – D50

▪ Sala de Performance Musical

Gráfico 27: D50 em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Reverberante.

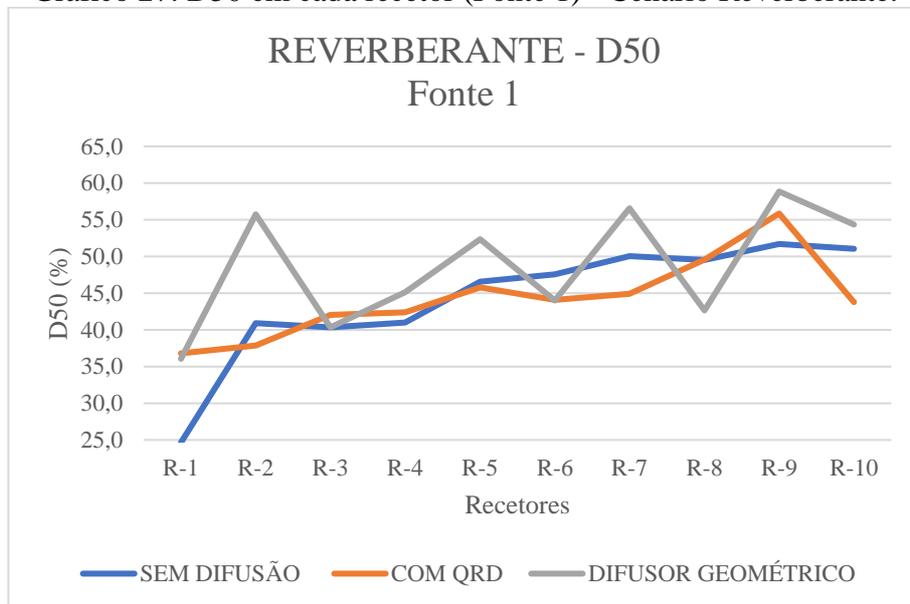
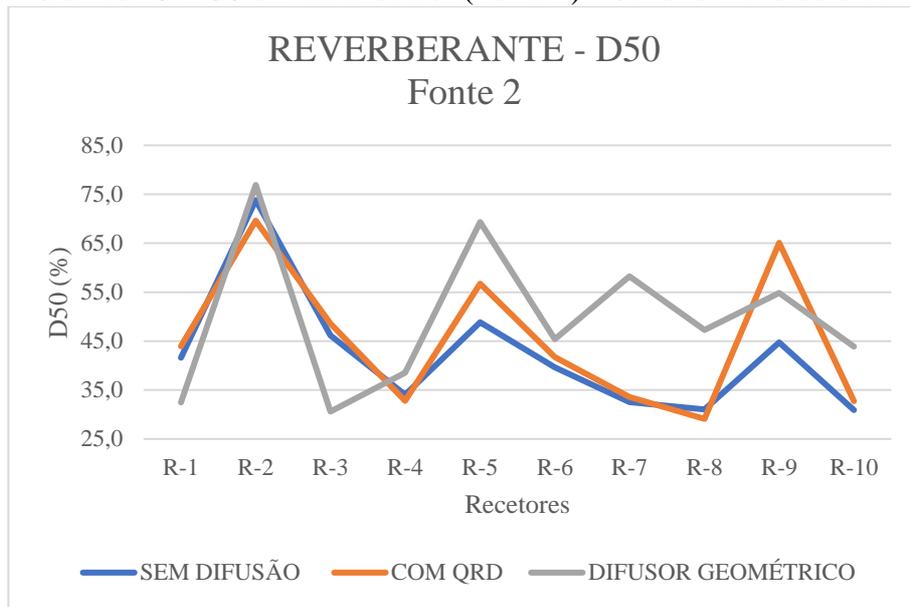
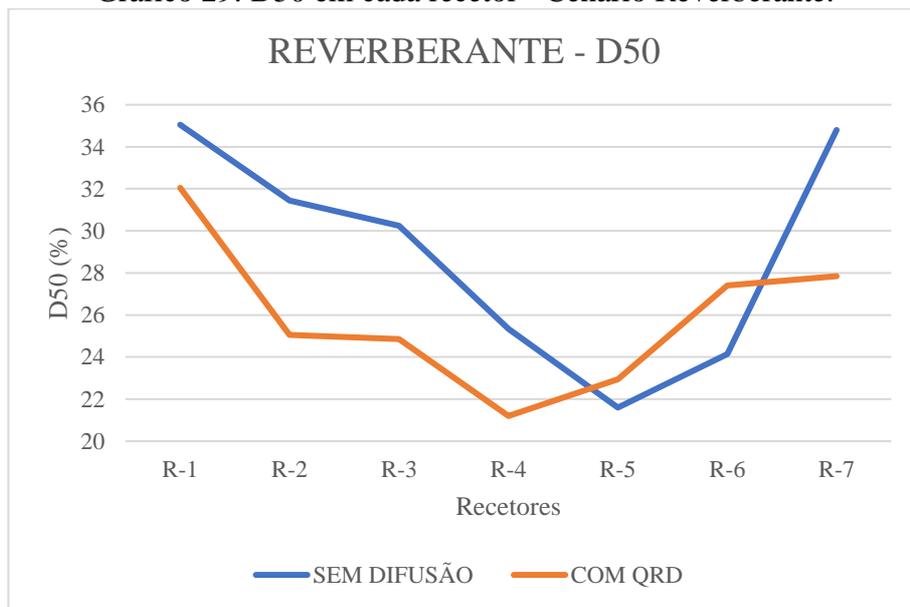


Gráfico 28: D50 em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Reverberante.



▪ Sala de Ensaio

Gráfico 29: D50 em cada recetor - Cenário Reverberante.



CLARIDADE MUSICA – C80

- Sala de Performance Musical

Gráfico 30: C80 em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Absorvente.

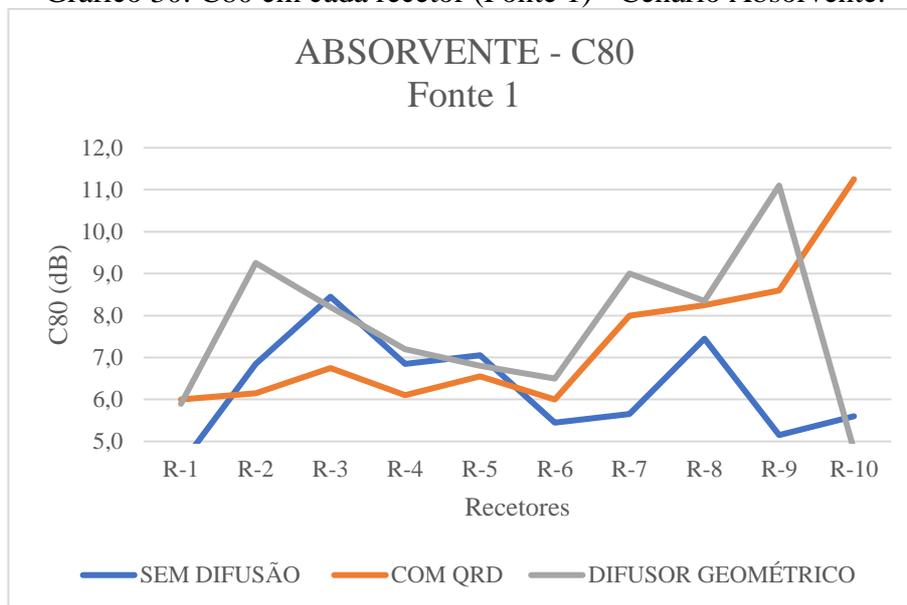
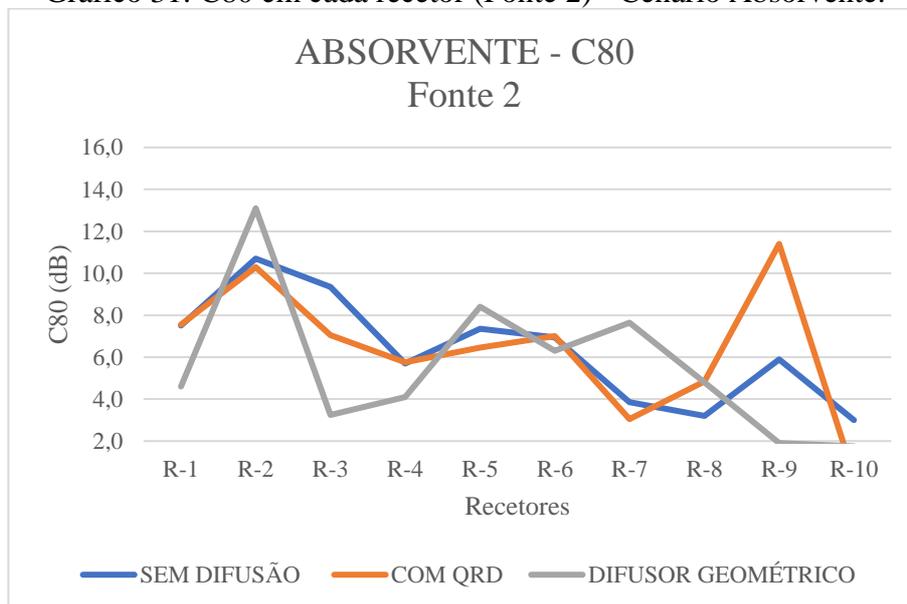
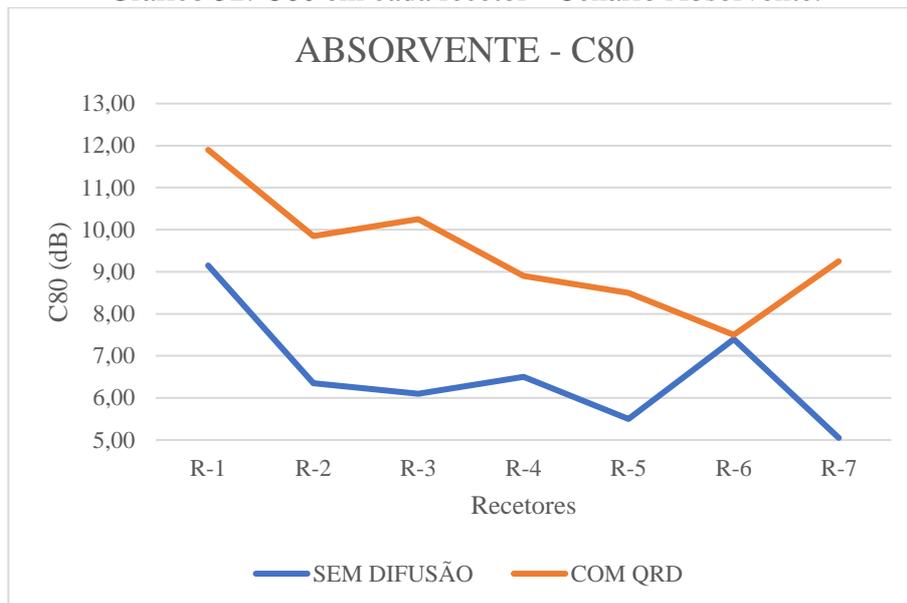


Gráfico 31: C80 em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Absorvente.



- Sala de Ensaio

Gráfico 32: C80 em cada recetor - Cenário Absorvente.



FORÇA SONORA – G

- Sala de Performance Musical

Gráfico 33: G em cada recetor (Fonte 1) - Cenário Absorvente.

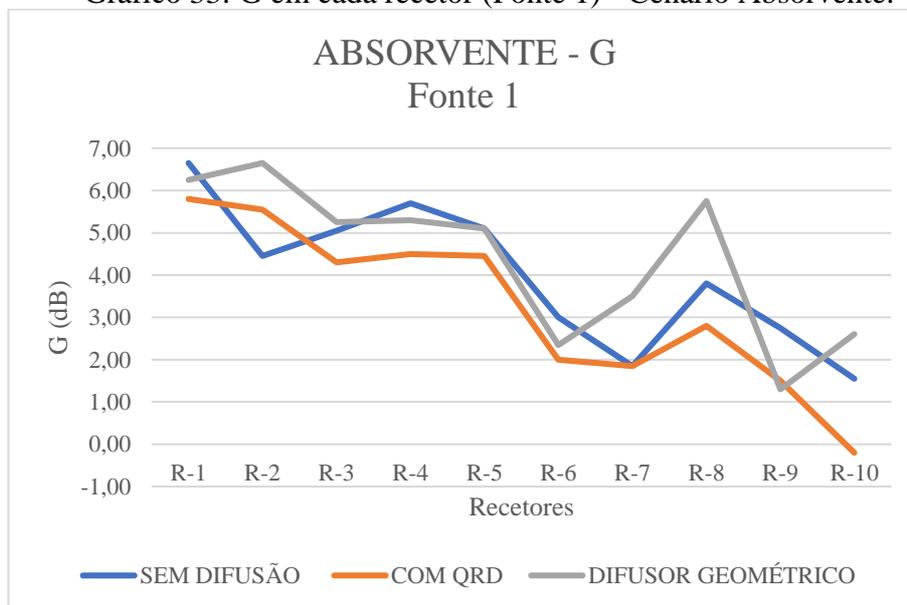
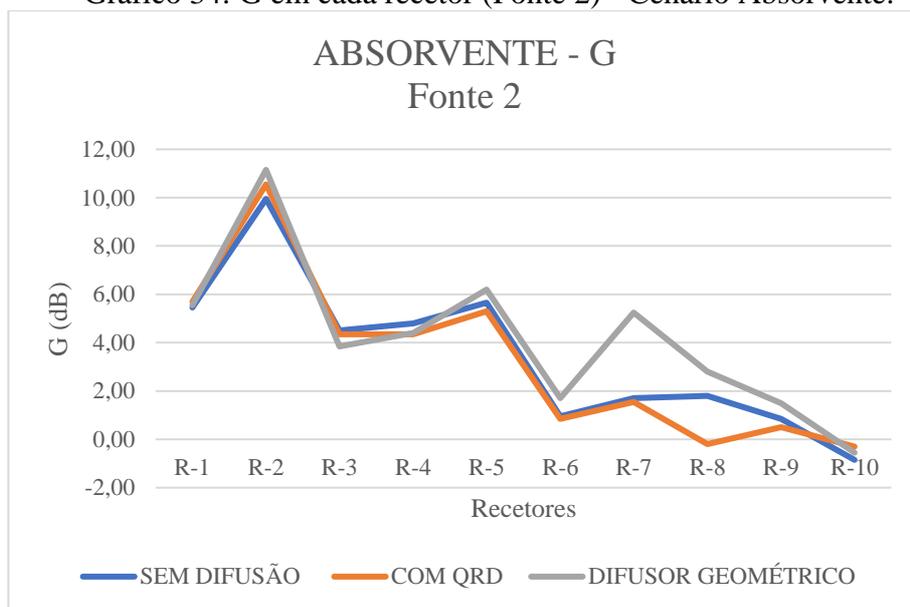


Gráfico 34: G em cada recetor (Fonte 2) - Cenário Absorvente.



▪ Sala de Ensaio

Gráfico 35: G em cada recetor - Cenário Absorvente.

