



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROARQ – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura

**ARTICULAÇÃO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA
AVALIAÇÃO ACÚSTICA: A IGREJA BATISTA ITACURUÇÁ**

Thalles Costa dos Reis

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROARQ – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura

ARTICULAÇÃO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA AVALIAÇÃO
ACÚSTICA: A IGREJA BATISTA ITACURUÇÁ

Thalles Costa dos Res

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura, Linha de pesquisa Arquitetura, Projeto e Sustentabilidade.

Orientadora: Maria Lygia A. Niemeyer

Rio de Janeiro
Fevereiro 2018

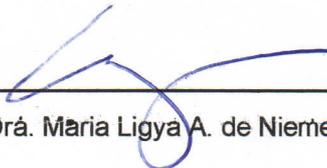
ARTICULAÇÃO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA AVALIAÇÃO
ACÚSTICA: A IGREJA BATISTA ITACURUÇÁ

Thalles Costa dos Reis

Orientadora: Maria Lygia de Alves Niemeyer

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura, Linha de pesquisa Arquitetura, Projeto e Sustentabilidade.

Apróvada por:

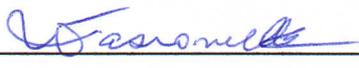


Presidente, Profa. Drá. Maria Ligya A. de Niemeyer



Prof. Dr. Julio Cesar Boschter Torres

Prof. Dr. Leopoldo Eurico Gonçalves Bastos



Profa. Dra. Virginia Maria Nogueira de Vasconcellos

Rio de Janeiro
Fevereiro 2018.

CIP - Catalogação na Publicação

C375a Costa dos Reis, Thalles
Articulação de ferramentas computacionais para
avaliação acústica: A Igreja Batista Itacuruçá /
Thalles Costa dos Reis. -- Rio de Janeiro, 2018.
151 f.

Orientadora: Maria Lygia Alves de Niemeyer.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura,
2018.

1. Acústica. 2. Simulação computacional. 3.
acústica de salas. 4. BRASS. I. Alves de Niemeyer,
Maria Lygia, orient. II. Título.

À minha mãe, Claudia, por ser mãe, pai, conselheira, exemplo e ponto de equilíbrio.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial minha mãe e irmã, que instituem a base da minha vida e das minhas conquistas. Obrigado pelas orações e suportes diários, ainda que a distância.

Ao Ivan pelo carinho, apoio e companheirismo diários e infalíveis.

Aos amigos, especialmente Mari e Jéssica que dividem comigo angústias e alegrias por tantos anos.

À Profª Drª Maria Lygia Niemeyer, pela ligação atendida no dia 22 de março de 2017 e pela paciência, orientação, puxões de orelha, generosidade e, especialmente, por acreditar em mim.

Ao Prof. Dr. Julio Cesar Boscher Torres pela paciência, atenção e disponibilidade prestada tão gentilmente. Agradeço também pela gentileza em ceder a manipulação no BRASS, ferramenta base para o desenvolvimento do trabalho.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Leopoldo Bastos por ter sido o primeiro a me receber nessa casa e, Profª Drª Virgínia Vaconcellos, pela doçura e carinho que sempre me ofereceu.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – pela bolsa de estudos concedida durante o desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores e funcionários do PROARQ pela colaboração ao longo do curso.

À professora Cristina Engel de Alvarez e aos colegas do Laboratório de Planejamento e Projetos (LPP/UFES) por me apresentarem a pesquisa científica e seguirem como parceiros para a vida.

Aos colegas de turma por fazerem esse processo ser tão mais prazeroso.

À Igreja Batista Itacuruçá e seus membros por me receberem carinhosamente e cederem seu espaço para o desenvolvimento desse trabalho.

A todos, que citados ou não, puderam contribuir para a realização desse trabalho.

RESUMO

“Articulação de ferramentas computacionais para avaliação acústica: a Igreja Batista Itacuruçá”

Thalles Costa dos Reis

Orientadora: Maria Lygia Alves de Niemeyer

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura.

Durante sua evolução, as salas de espetáculo foram objetos arquitetônicos que buscaram viabilizar o bom desempenho acústico. No caso das salas de espetáculo, a qualidade acústica do ambiente é de fundamental importância, pois garante que todo o público perceba a mensagem transmitida. A avaliação do desempenho acústico pode ser realizada através de parâmetros acústicos. Estes, ainda que relacionados com a percepção subjetiva, são determinados pelos atributos físicos do espaço. Uma das ferramentas de projeto que pode auxiliar o projetista na tomada de decisões que contribuam para a qualidade acústica do espaço é a simulação computacional. A partir da análise acústica de uma igreja, o trabalho objetivou propor procedimentos para avaliação do desempenho acústico de salas de espetáculo a partir da articulação entre as ferramentas BRASS e AutoCAD. O objeto foi analisado e tratado através de procedimentos para análise do desempenho acústico. Para comprovação do método, medições normatizadas foram realizadas. Comprovou-se a aplicabilidade do BRASS e dos procedimentos construídos por essa pesquisa na articulação de desenho assistido por computador. Esta metodologia revela-se útil a projetistas quando em processos de projeto e *pré-design*, pois, apresenta um direcionamento das soluções em acústica, beneficiando a qualidade sonora do projeto.

Palavras-chave: Acústica de salas, simulação computacional, BRASS.

Rio de Janeiro

Fevereiro 2018

ABSTRACT

“Linkage between computational tools for acoustic evaluation: The Itacuruçá Baptist Church”

Thalles Costa dos Reis

Orientadora: Maria Lygia Alves de Niemeyer

Abstract da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura.

During their evolution, theaters were architectural objects designed to make good acoustic performance possible. An appropriate acoustic quality of the environment is essential for theaters and religious spaces, since it guarantees that the public perceives the transmitted message. The evaluation of acoustic performance can be measured through acoustic parameters. Although these acoustic parameters are related to subjective perception, they are also determined by the theater's physical attributes. One of the tools created to assist designers making decisions that contribute to the acoustic quality of a specific place is the computer simulation. Starting from the acoustic analysis of a church, this work aimed to propose procedures to evaluate the acoustic performance of theaters and religious spaces through the articulation between the softwares BRASS and AutoCAD. We analyzed the church's acoustic performance through direct measures, used as gold standard, and then we compared these data with the computer simulation performed by both softwares. In this way, we could verify in our research the applicability of BRASS and its articulation with computer assisted design. Therefore, this methodology proved to be useful to designers in pre-design and design processes, as it allows solutions in acoustics, benefiting the sound quality of theaters and religious spaces.

Key-words: Room acoustics, computer simulation, BRASS.

Rio de Janeiro

February 2018

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE QUADROS	xiv
LISTA DE TABELAS	xv
SIGLAS E ABREVIATURAS	xvi
GLOSSÁRIO	xvii
INTRODUÇÃO	2
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
1.1. Evolução da forma arquitetônica das salas de espetáculo	11
1.2. Acústica em salas de espetáculo.....	28
1.2.1. Acústica de salas como ciência	29
1.2.1.1. A contribuição de Beranek	32
1.2.2. Conceitos básicos em acústica de salas.....	33
1.2.3. Grandezas sonoras.....	37
1.2.3.1. Potência, Intensidade e Pressão sonora	37
1.2.3.2. A Escala Decibel	37
1.2.3.3. Propagação sonora: Reflexão, Absorção e Tempo de Reverberação	38
1.2.4. Parâmetros subjetivos.....	43
1.3. Desempenho acústico e simulações.....	46
1.3.1. Técnica de traçado de raios.....	50

1.3.2. Método das imagens ou fontes virtuais.....	51
1.3.3. Programas computacionais.....	53
1.3.3.1. Odeon.....	54
1.3.3.2. CadnaR	55
1.3.3.3. RAIOS	56
1.3.3.4. BRASS	57
1.4. Medição	59
2. METODOLOGIA DA PESQUISA.....	65
2.1. Procedimentos	67
2.1.1. Coleta de informações	68
2.1.2. Definição dos materiais e inserção do coeficiente de absorção.....	71
2.1.3. Construção e simplificação do modelo	72
2.1.4. Análise, interpretação e validação dos resultados	73
3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	75
3.1. Estudo de caso: Igreja Itacuruçá.....	76
3.2. Análise dos resultados.....	91
3.2.1. Tempo de Reverberação	91
3.2.2. Clareza.....	99
CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114
APÊNDICES	121
Apêndice A – Plantas e Corte da Igreja Itacuruçá	121

Apêndice B – Ficha Resumo Igreja Itacuruçá	124
Apêndice C – Locação dos pontos no espaço (fontes e receptores)	125
Apêndice D – Áudios exportados	127
ANEXOS	128
Anexo A - Coeficientes de absorção levantados.....	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Teatro de Epidaurus, Grécia.	14
Figura 2: Coliseu de Roma.....	16
Figura 3: Esquema comparativo entre os teatros grego (superior) e romano (inferior).....	17
Figura 4: Teatro Olímpico de Vicenza.	22
Figura 5: Fotografia aérea do interior do Teatro dell'Antica.....	23
Figura 6: Interior do Boston Symphony Hall em Massachusetts, Estados Unidos da América.	31
Figura 7: Representação do comportamento das vibrações sonoras.	34
Figura 8: Representação simplificada de um ciclo ou onda completa.	34
Figura 9: Audiograma normal médio	36
Figura 10: Comportamento do som em a) superfície plana, com a difusão do raio; b) convexa, com uma difusão ainda maior; c) côncava, produzindo concentração sonora.	41
Figura 11: Visão esquemática de um raio refletido.	51
Figura 12: Fontes virtuais de primeira ordem.....	52
Figura 13: Exportação gráfica a partir da ferramenta CadnaR.....	56
Figura 14: Cadeia típica de medição de RI	62
Figura 15: Padrão de resposta por diferentes microfones.....	63
Figura 16: Diagrama das etapas metodológicas.	68
Figura 17: Ilustração do esquema da regra da mão direita.	70
Figura 18: Trecho da biblioteca de coeficientes de absorção.	71
Figura 19: Esquema de locação dos pontos emissores e receptores no espaço	72
Figura 20: Localização da Igreja Batista Itacuruçá.....	76
Figura 21: Fachada frontal da Igreja.	77
Figura 22: Esquema gráfico simplificado da Igreja Itacuruçá.	79
Figura 23: Ilustração da trena laser DLE 70.....	80
Figura 24: Vista no Interior da Igreja.	80
Figura 25: Vista interna da Igreja, parede de fundos.....	81
Figura 26: Captura de tela da ferramenta AutoCad e maquete virtual simplificada da Igreja	84

Figura 27: Locação dos pontos receptores.	86
Figura 28: Maquete eletrônica simulada pela ferramenta BRASS.	86
Figura 29: Microfone omnidirecional em medição.	88
Figura 30: Interface de áudio M-Audio Fast Track Pro.....	89
Figura 31: Captura de tela da interface da ferramenta REW.	90
Figura 32: T30 para P01.	92
Figura 33: T30 para P02.	92
Figura 34: T30 para P03.	93
Figura 35: T30 para P04.	93
Figura 36: T30 para P05.	94
Figura 37: T30 para P06.	94
Figura 38: T30 para P07.	95
Figura 39: T30 para P08.	95
Figura 40: T30 para P09.	96
Figura 41: T30 para P10.	96
Figura 42: T30 para P11.	97
Figura 43: T30 para P12.	97
Figura 44: T30 para P13.	98
Figura 45: T30 para P14.	98
Figura 46: C80 para P01.	101
Figura 47: C80 para P02.	102
Figura 48: C80 para P03.	102
Figura 49: C80 para P04.	103
Figura 50: C80 para P05.	103
Figura 51: C80 para P06.	104
Figura 52: C80 para P07.	104
Figura 53: C80 para P08.	105
Figura 54: C80 para P09.	105
Figura 55: C80 para P10.	106
Figura 56: C80 para P11.	106
Figura 57: C80 para P12.	107
Figura 58: C80 para P13.	107
Figura 59: C80 para P14.	108

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características formais semelhantes entre as tipologias grega e romana.....	18
Quadro 2: Características formais distintas entre os teatros grego e romano..	19
Quadro 3: Síntese das principais geometrias formais utilizadas no teatro italiano.	26
Quadro 4: Principais softwares de acústica de salas comercializados.....	54
Quadro 5: Superfícies e nomenclatura dos layers.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Conversão de dB para dB(A).	38
Tabela 2: Coeficientes de absorção por faixa de frequência atribuídos na Igreja.	83
Tabela 3: Ficha resumo do estudo de caso	124
Tabela 4: Coeficientes de absorção a partir de bibliografia.....	128
Tabela 5: Coeficiente de absorção a partir de NBR 12179.	131

SIGLAS E ABREVIATURAS

CAD - *Computer Aided Design*, ou, desenho assistido por computador.

C50, C80 – Fator de clareza

DXF - *Drawing Exchange Format*

dB – decibéis;

D50 - Definição

EDT - *Early Decay Time*

Hz – Hertz, unidade usada para determinação das frequências;

KHz – Kiloherz, unidade Hertz na escala dos milhares;

STI – Índice de transmissão da fala

T20, T30 e T60 – Tempo de reverberação;

W – Watts

WHO - *World Health Organization*.

GLOSSÁRIO

Audibilidade: qualidade do que é audível.

Audibilização: Técnica que permite que, a partir de sinais anecoicos, se experimente a sonoridade da sala

Bancada: sucessão de assentos individuais arrumados em ordem.

Binauricular ou binaural: respeitante a ambos os ouvidos.

Cena: área que contém os cenários e em que artistas se exibem diante do público; palco.

Inteligibilidade: qualidade do que é inteligível, do que pode ser compreendido.

Onda senoidal: Pode ser entendida como um movimento circular que se propaga ao longo de um eixo.

Proscênio: é a parte do palco situada à frente do cenário.

Ruído de Fundo: nível sonoro de todas as fontes de ruídos externos (tráfego, bomba d'água, etc) ou internos (ar condicionado, ventilação, etc) presentes no ambiente, excetuando os sons produzidos para comunicação da mensagem.

Som surround: É uma técnica para enriquecer a qualidade de reprodução de som para com os ouvintes. A técnica recria um ambiente mais realista de áudio, presente nos sistemas de som de cinemas, teatros, entretenimento em casa, etc.



INTRODUÇÃO

“*Form ever follows function*”, a afirmativa de Sullivan (1896) que em tradução livre significa “a forma segue a função” ficou conhecida como um princípio do design funcionalista associado à arquitetura e design modernos. Sullivan também enuncia que a arquitetura existe para resolver necessidades concretas da vida das pessoas, logo, cada edifício deve cumprir a função determinada para a qual foi projetado.

Independentemente de qualquer posicionamento arquitetônico, esse conceito pode ser associado a uma reflexão a respeito da tipologia¹ arquitetônica das salas de espetáculo. Durante sua evolução, essa tipologia buscou atender às necessidades cênicas e musicais através de soluções projetuais que viabilizaram, dentre outros critérios, o bom desempenho acústico de salas (BARBA, 2013).

Conforme as reuniões em espaços abertos foram agrupando número cada vez maior de pessoas, foi se percebendo que a formação de círculos concêntricos evitava a perda de energia acústica. Como a voz humana é direcional e a audiência perde inteligibilidade quando se distancia do eixo, essa formação logo evoluiu para semicírculo. Foi a partir dessa formação que começaram a surgir os primeiros espaços construídos para esse fim (SOUZA, 2007).

Os conceitos acústicos abordados nesse trabalho tiveram sua evolução acompanhados de técnicas projetuais e arquitetônicas de uma época.

¹ No vocabulário arquitetônico, entende-se por tipologia o conjunto de características formais que compõem as edificações projetadas para dar uma resposta comum que atenda às necessidades que uma determinada atividade.

Entretanto, as técnicas foram interpretadas como ciência apenas com W. C. Sabine, que escreveu a primeira teoria sobre absorção sonora dos materiais, onde apresentou a fórmula de tempo de reverberação (BERANEK, 2008).

Beranek (2008) também identificou atributos a serem considerados em salas de espetáculos, sendo estes, atributos objetivos e subjetivos. Estes conhecimentos são a base teórica dos projetos contemporâneos de acústica de salas com as mais diversas funções (BELIENY; NIEMEYER, 2012).

A identificação desses atributos e a execução de um projeto com qualidade acústica para salas de espetáculo exige um conhecimento técnico específico.

Objeto da pesquisa

Dentre os assuntos de tecnologia, a acústica arquitetônica se destaca pela sua particular complexidade, considerando tanto o fenômeno físico associado, como o necessário processamento fisiológico pelo ouvido humano, faz-se necessário um estudo aprofundado na temática, especialmente entre arquitetos que, pela prática projetual, criam modelos com uma representação sofisticada, mas meramente visual, tendo outros sentidos (como a audição) negligenciados (SCHMID, 2011). Schmid (2011) destaca que é necessário que os ensinamentos de acústica sejam explorados nas escolas de Arquitetura, e para isso, propõe que uma das abordagens seja a introdução de simulação de edifícios como atividade curricular, a exemplo: salas de concerto sendo projetadas, modeladas e ouvidas por meio do processo de audibilização².

² Permite que o usuário, a partir de sinais anecoicos, experimentem a sonoridade da sala através da técnica da resposta impulsiva (calculada) com o sinal que se quer ouvir. Seu conceito será melhor abordado nos capítulos posteriores.

No caso das salas de espetáculo, a qualidade acústica do ambiente é de fundamental importância, pois garante que todo o público perceba a mensagem transmitida pelas fontes sonoras variadas: instrumentos musicais, voz humana cantada, voz humana falada, etc.

Dentre as salas de espetáculos, a tipologia de teatro italiano é a que mais objetos se apresentam (ZILIO, 2010). Por esse motivo, o desenvolvimento dessa pesquisa opta por trabalhar com a tipologia do teatro italiano como objeto de análise da acústica em salas de espetáculo. Essa tipologia, em diferentes níveis de complexidade, serviu como base para os principais projetos de salas de aula, auditórios e igrejas. Ainda, considerando a necessidade da incorporação de análises acústicas no cotidiano do profissional de arquitetura, esse trabalho é motivado a tentar fomentar tipologias arquitetônicas (com ênfase em salas de espetáculo) com qualidade acústica, através da inserção de simulação computacional técnica em ferramentas habitadas por arquitetos.

O objeto de estudo dessa pesquisa, portanto, é uma igreja (de configuração semelhante aos teatros italianos) que foi analisada e tratada através de procedimentos para análise do desempenho acústico de salas de espetáculo, articulando as ferramentas computacionais BRASS³ e AutoCAD. Para comprovação do método de simulação, medições guiadas pela normativa ISO 3382 (1997) foram realizadas.

A análise realizada optou pela tipologia de sala italiana, considerando a tipologia italiana comumente replicada e, com exemplares que apresentam soluções

³ Em processo de desenvolvimento pelo Professor Julio César Boscher Torres (Programa de Engenharia Urbana / POLI-UFRJ).

projetuais e formais que são bases atuais para projetos de salas de espetáculos variadas: igrejas, auditórios, teatros, salas de aula, etc.

Justificativa

Aspectos formais e construtivos são determinantes para o desempenho acústico de salas de espetáculo. Visto que o traçado da sala (volume, geometria dos planos refletivos, relação entre caixa cênica e plateia, conexão com os espaços de apoio e acessos) costuma ser definido nas etapas iniciais do processo de projeto, é fundamental pensar e trabalhar o desempenho acústico também na etapa de concepção do projeto.

Entretanto, nas escolas de Arquitetura, os conceitos acústicos não são devidamente explorados (SCHMID, 2011). A classificação de "disciplina complementar" implica uma consciência e participação tardia no processo de projeto, quando as linhas mestras já estão definidas. As decisões iniciais do processo de concepção repercutem sobre o ambiente acústico, definindo a sonoridade da sala.

A avaliação do desempenho acústico pode ser realizada através de parâmetros acústicos. Estes, ainda que relacionados com a percepção subjetiva, são determinados pelos atributos físicos do espaço (geometria, dimensões, acabamento e rugosidade das superfícies). Diversos autores têm se dedicado a estudar a correlação entre atributos físicos e parâmetros subjetivos, através de expressões matemáticas que geram índices objetivos e grandezas físicas mensuráveis.

Uma das ferramentas de projeto que pode auxiliar o projetista na tomada de decisões a respeito de soluções e diretrizes que contribuam para uma qualidade acústica do espaço é a simulação computacional. Atualmente, substituindo os modelos em escala reduzida, pela facilidade de modificar as características acústicas e geométricas da sala no modelo virtual e pela integração de módulos de audibilização. Através de simulação é possível prever o comportamento acústico em diversos pontos do ambiente durante o processo de modelagem e ajuste dos parâmetros acústicos da sala.

A justificativa da proposição deste trabalho apoia-se, inicialmente, na necessidade de explorar a acústica de salas de espetáculo, em especial a tipologia italiana, como prática projetual para se pensar salas de espetáculo com qualidade acústica. Entende-se que os aspectos inerentes à qualidade acústica são demasiados complexos e, portanto, exigem ferramentas facilitadoras para alcançar e comprovar parâmetros acústicos satisfatórios. Uma dessas ferramentas pode ser a simulação computacional (SCHMID, 2011).

Mesmo sendo uma alternativa mais amigável aos profissionais de arquitetura, se comparados a análises numéricas, os programas de simulação ainda são pouco utilizados por profissionais da área de projeto. Apesar disso, as tecnologias de desenho assistido por computador e de realidade virtual já são familiares ao universo de profissionais e estudantes de arquitetura e urbanismo.

Espera-se que esse trabalho contribua e facilite a tomada de decisões de projeto com foco na qualidade acústica de salas. Contribuindo, dessa forma, com a inclusão da avaliação de desempenho acústico ao processo de projeto.

Objetivos

O *objetivo geral* desse trabalho é o desenvolvimento de procedimentos de análise de desempenho acústico de salas de espetáculo através da interface entre os programas BRASS e AutoCAD.

O estudo visa atender à três principais *objetivos específicos*:

- realizar um estudo a respeito da forma arquitetônica e sua contribuição para o desempenho acústico de salas. Para isso, foi realizada uma reflexão a respeito da evolução morfológica das salas de espetáculo e de suas características formais em contribuição ao desempenho acústico, e sobre conceitos de acústica aplicada à arquitetura
- desenvolver, a partir do software de análise acústica de salas – BRASS- e de ferramentas computacionais de desenho assistido existentes, procedimentos para avaliação de desempenho acústico de salas de espetáculo através da articulação entre os programas computacionais BRASS e AutoCAD.
- comprovar a aplicabilidade da metodologia através de simulação computacional de sala de espetáculo e validação da ferramenta computacional, através de medições em campo. Apresentando assim, pontos favoráveis, críticos e a desenvolver.

Etapas metodológicas

A fim de responder aos objetivos propostos, o método desse trabalho pode ser descrito em três etapas principais.

A primeira etapa consiste de revisão de literatura sobre os conceitos de acústica e a evolução das salas de espetáculo, a fim de identificar as principais características, especialmente da análise da forma, que apresentam impacto significativo e indicam estratégias sobre a qualidade acústica dos ambientes.

A segunda etapa consiste em desenvolvimento dos procedimentos de análise acústica de salas de espetáculo através do software BRASS e sua interface vinculada à programas de desenho assistido.

A partir disso, na terceira etapa, optou-se por validar e verificar a metodologia com a aplicação de simulações computacionais em um objeto arquitetônico: uma igreja com configuração de sala italiana. A ferramenta adotada utiliza-se da técnica de traçado de raios e permite exportar áudios para auxiliar no processo de audibilização, e logo, fomentar uma experimentação sinestésica do espaço no processo de projeto.

Com as simulações finalizadas e validadas, espera-se auxiliar o projetista para a tomada de decisões, especialmente nas fases de concepção e pré-design, para a qualidade acústica de salas, e, contribuir com a inclusão da avaliação de desempenho acústico ao processo de projeto.

Estrutura do trabalho

Este trabalho organiza-se em três capítulos distintos e complementares:

No primeiro capítulo discute-se sobre a evolução da tipologia teatral, suas condicionantes, representatividade, e foco em suas características formais. Desse modo, são introduzidos conceitos, estratégias e soluções de arquitetura que auxiliaram na consolidação do espaço de espetáculos como uma das

principais tipologias arquitetônicas que desenvolveu o tratamento acústico (inicialmente empírico) para obter qualidade funcional do espaço. Ainda, são abordados conceitos de acústica e da importância no tratamento de salas de espetáculo. São introduzidos conceitos e parâmetros objetivos e subjetivos. Posteriormente, são apresentados algumas ferramentas computacionais e métodos de cálculo utilizados nos principais programas computacionais de análise acústica. Ainda, são apresentados os conceitos aplicados pelo software BRASS – escolhido como ferramenta auxiliar ao desenvolvimento desse trabalho.

No segundo capítulo, é apresentada a metodologia proposta por esse trabalho e os procedimentos, caracterização e apresentação dos dados inseridos e potencialidades de aplicação da mesma. O modelo a ser trabalhado nas simulações é apresentado e justificado, bem como suas características e limitações.

Por fim, no terceiro capítulo, são apresentados o modelo simulado e os resultados obtidos através da simulação e validação da metodologia aplicada junto ao software BRASS e plataforma AutoCAD, explorando potencialidades e pontos frágeis. Pretende-se, através de audibilização, apresentar resultados em formato de áudio que comprovem a aplicabilidade da metodologia e do software. Ainda, são apresentadas as análises obtidas pela metodologia aplicada. Posteriormente, são apresentados as conclusões e os desdobramentos possíveis desta pesquisa.



1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo da acústica arquitetônica de salas de espetáculo é um campo complexo que abrange diferentes diretrizes conceituais. Para auxiliar nessa pesquisa, a primeira etapa do trabalho baseou-se na revisão bibliográfica a respeito da evolução morfológica das salas de espetáculo e dos parâmetros acústicos inerentes ao tema e a estreita relação entre forma arquitetônica *versus* adequação acústica ao tipo de espetáculo (música ou drama).

1.1. Evolução da forma arquitetônica das salas de espetáculo

Esse capítulo buscará apresentar a evolução das tipologias de salas de espetáculo, que buscou, durante sua evolução, viabilizar um bom desempenho acústico.

Recorrendo à história das principais tipologias teatrais da cultural ocidental, adotar-se-á, como ponto de partida a arquitetura da antiguidade clássica (BARBA, 2013), destacando características formais dos diferentes modelos e em seus traços acústicos mais relevantes.

A palavra teatro remete a dois significados diferentes: a um gênero da arte ou também ao espaço no qual podem ser representados vários tipos de espetáculos. É este significado que será explorado nesse trabalho.

A etimologia da palavra teatro deriva do grego *theatron* (*theaomai* = ver; *thea* = vista; panorama) (CEBULSKI, 2012). Ainda que o surgimento da atividade teatral não se tenha dado na Grécia, a conformação de um espaço dedicado a espetáculos tem como ponto de partida as tipologias teatrais greco-romanas. Ainda, os estudos destas tipologias se baseiam fortemente na análise de ruínas

de numerosos teatros clássicos, que, com diferentes estados de conservação, persistem como amostras atuais (BARBA, 2013).

Em território grego, a tradição de reservar uma data no calendário para divindades e celebrá-la com grande dramaticidade, aliada à intenção dos seus dirigentes de proclamar um traço identitário, político e cultural, deu origem ao teatro grego, considerado o berço do teatro ocidental (CEBULSKI, 2012)⁴.

Os documentos de fontes escritas da época dão o suporte teórico, que, aliado a restos arquitetônicos, tornam tangíveis algumas interpretações sobre a tipologia teatral grega. Dentre tais fontes conservadas do período greco-romano, o documento escrito de maior importância que faz referência aos edifícios teatrais é o tratado *De Architectura*, escrito por Marcos Vitrúvio Polião⁵ entre os anos 27 e 11 a.C., composto por dez volumes.

Vitrúvio destaca nos Capítulos III ao IX do livro V, uma exaustiva descrição de como traçar a forma da planta dos teatros, dos critérios de seleção da implantação, características e diferenças entre teatros gregos e romanos, descrição e fundamentos do cenário, mecanismos relativos à acústica dos teatros, etc. (BARBA, 2013). Na civilização grega (séculos XI a II a.C.) e romana (séculos V a.C. a V d.C.), os edifícios teatrais abrigavam fundamentalmente atividades de ócio (representações cênicas em geral, declamação, atividades musicais, literárias, etc.) e políticas (assembleias, atividades propagandísticas).

Tais usos implicam em necessidades funcionais concretas: devem ser recintos

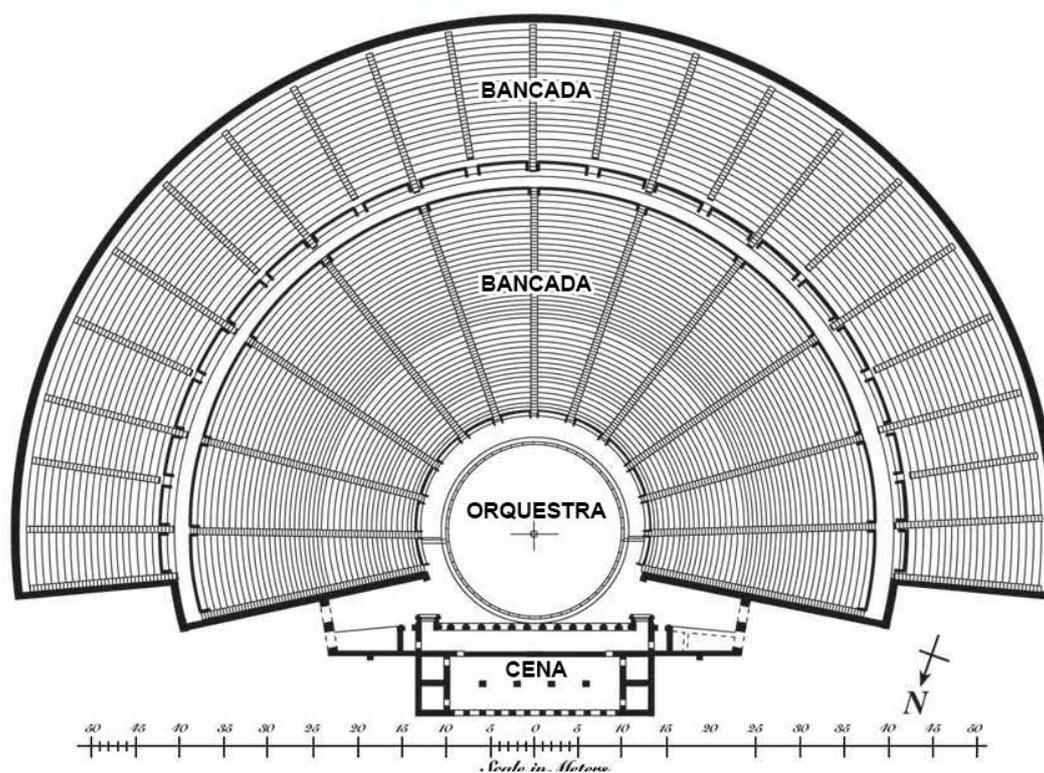
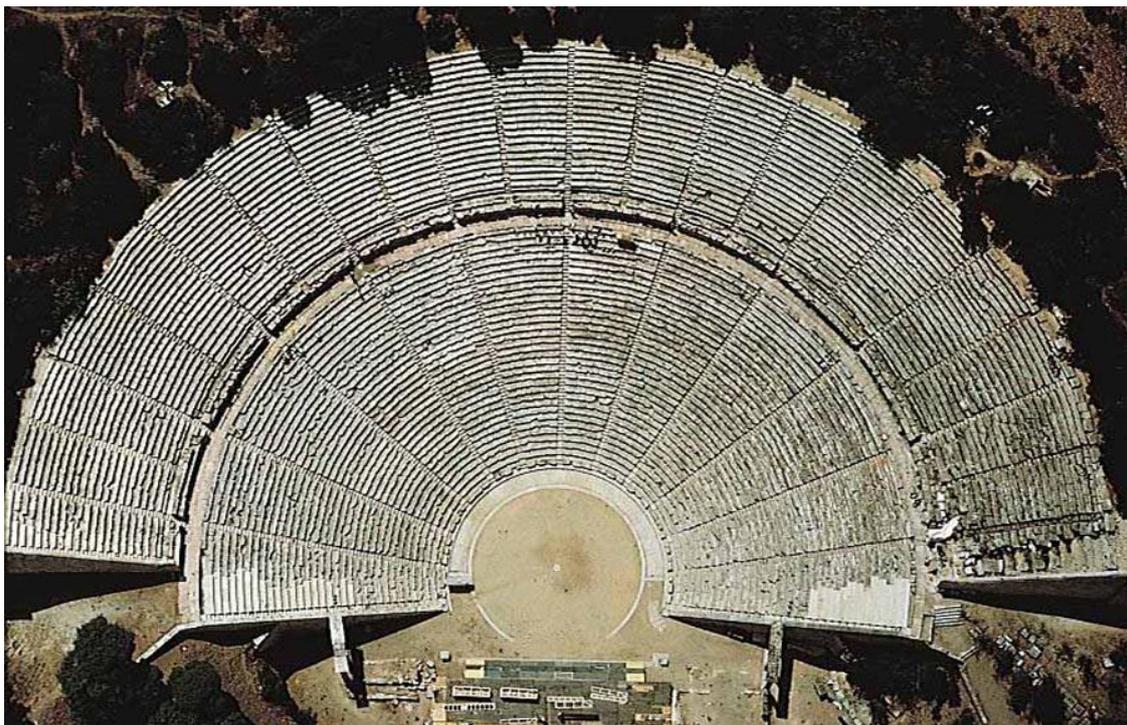
⁴Cebulski (2012) salienta que, ainda que com características diferentes, o teatro (como atividade) já existia no continente asiático mesmo antes de o teatro grego se estabelecer. Todavia, é estabelecido para esse trabalho que a arquitetonicamente, seu surgimento seja considerado a partir da antiguidade clássica, pois foi nesse período que ambientes foram construídos com esse propósito específico.

⁵ Homônimo em latim: Marcus Vitruvius Pollio.

de grande capacidade, onde as condicionantes visuais e acústicas permitam que o público pudesse ouvir e ver o que acontece no palco. Esta é a premissa determinante para compreender a morfologia dos teatros clássicos greco-romanos (BARBA, 2012).

A utilização do teatro grego como cenário religioso, onde os cultos eram acompanhados por corais, danças, rituais e uso de máscaras, configuram a sua forma. Por volta de 300 a.C., constituindo-se como local de representações, o teatro grego, era normalmente implantado em sítios inclinados tirando partido da topografia, tinham forma de semicírculo, e eram voltados para o mar. Esta configuração resultou em menor perda da energia sonora, aproveitando o direcionamento dos ventos do mar em direção a plateia, aproximando verticalmente a plateia do palco e, conseqüentemente, havia maior captação sonora do espectador, um exemplo é o Teatro de Epidaurus (BELIENY; NIEMEYER, 2012; SOUZA *et al.*, 2012). A Figura 1 apresenta uma vista aérea do objeto e esquema gráfico que pode auxiliar na compreensão da configuração do espaço.

Figura 1: Teatro de Epidaurus, Grécia.



Fonte: A partir de UNESCO (2016).⁶

⁶ Disponível em: <<http://www.timetravelturtle.com/2012/07/epidaurus-theatre-sanctuary-greece/>> Acesso em mai. 2017.

Suas setorizações eram simples e bem definidas: a *orquestra* é a zona localizada no ponto mais baixo, em terra batida; as *bancadas* ou *cáveas* estavam dispostas em semicírculo nas vertentes naturais; e o *palco* ou *cena* servia de cenário e camarim para os atores.

Com os romanos, por volta do primeiro século d.C., agregaram-se algumas alterações na forma do teatro grego. Apesar de seguir basicamente o modelo grego, desenvolve-se, muitas vezes, como uma estrutura independente, sem estar vinculado ao aproveitamento da topografia. Essa mudança ocorreu como solução para adequação aos perfis topográficos apresentados em território romano. Assim, utiliza-se de uma estrutura que se apoia em escadas e corredores, que se elevam, criando superfícies verticais mais altas. O espaço também é ocupado de um modo mais rotundo, elevando-se em altura pela sobreposição de arcos e pilares, como o exemplo do Coliseu de Roma (Figura 2) (BARBA, 2013; BELIENY; NIEMEYER, 2012; SOUZA *et al.*, 2012).

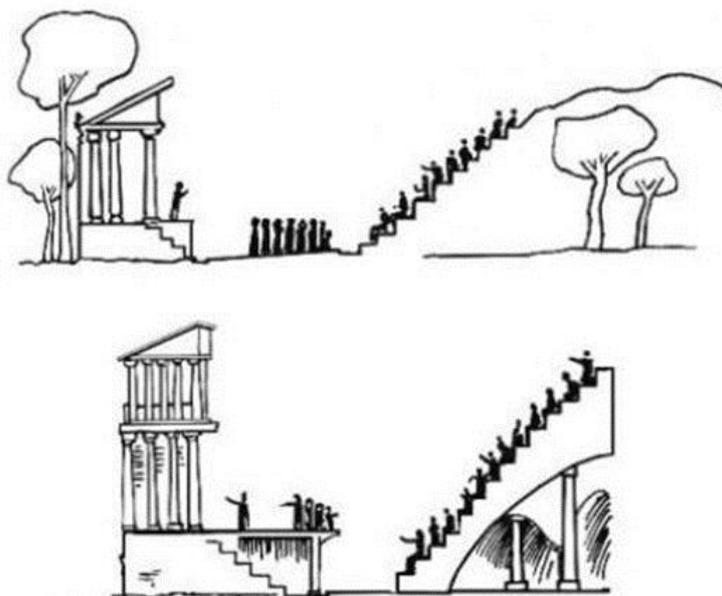
Figura 2: Coliseu de Roma

Fonte: Unsplash (2016).⁷

Em alguns casos, torna-se um espaço fechado, em que o proscênio e a orquestra se revestem de mármore para melhorar a capacidade reflexiva e no topo da cena um grande painel inclinado de madeira direcionava os raios acústicos (BELIENY; NIEMEYER, 2012). Também se observou, em alguns casos, o uso de reforço sonoro, por meio do aumento das superfícies verticais da edificação construída atrás do palco e de reflexões laterais, exercendo funções que atualmente é desempenhado pelas conchas acústicas (SOUZA *et al.*, 2012). A Figura 3 também apresenta esquema comparativo entre as soluções de topografia adotadas pelas tipologias grega (aproveitamento da topografia natural do sitio) e romana (solução construtiva para inclinação da plateia).

⁷ Disponível em: < <https://unsplash.com/photos/JrXm3QOnJic> > Acesso em mai. 2017.

Figura 3: Esquema comparativo entre os teatros grego (superior) e romano (inferior).



Fonte: DIAS (2010).

A comparação entre as tipologias grega e romana foi sintetizada pelo Quadro 1, apresentando as características formais semelhantes.

Quadro 1: Características formais semelhantes entre as tipologias grega e romana.

Características formais semelhantes	
Eixo de simetria longitudinal	A maior parte dos instrumentos musicais e a voz humana, são direcionais, essa <i>direcionalidade</i> impõe o eixo único de simetria nos ambientes.
Hierarquia formal e funcional	A separação entre zonas de público e atores se dá por uma zona intermediária: a orquestra.
Bancada curva e inclinada	A geometria minimiza as perdas acústicas do som direto que o ator projeta sobre a audiência, permitindo que o número de espectadores próximos à cena seja o maior possível. A inclinação permite que todos os espectadores tenham visão direta do palco e atua influentemente na acústica.
Palco elevado	O espaço de representação se eleva em altura em comparação ao plano inferior do público. Melhora a visibilidade e auxilia na projeção da fonte.
Edificações ao ar livre	Aproveitamento das condições climáticas
Uso da pedra	A pedra foi o material construtivo principal.

Fonte: A partir de Barba (2013).

Diante das características formais comuns aos teatros gregos e romanos, também vale destacar as diferenças morfológicas existentes entre ambos os modelos. Derivadas fundamentalmente na necessidade de conceber e ocupar o espaço de maneira distinta, enquanto os gregos tiravam partido da implantação naturalmente inclinada (inclinação pouco intervencionista), o teatro romano ocupa o espaço de modo mais rotundo, elevando-se em altura e fechando-se

para o exterior, sua implantação, devido às condicionantes do terreno, é menos natural que no modelo grego.

As diferenças formais em função das adaptações topográficas foram sintetizadas no Quadro 2.

Quadro 2: Características formais distintas entre os teatros grego e romano.

Diferenças formais nas edificações teatrais da Antiguidade Clássica	
Teatro Grego	Teatro Romano
Bancada disposta sobre a inclinação natural	Bancada disposta sobre estrutura de arcos
Edificação atrás do palco em dimensões reduzidas	Corpo cênico posterior de grande altura (<i>scenae frons</i>). Dava suporte visual às representações e também tinha função de reforço acústico devido às reflexões sonoras que projetava ao público. ⁸
Ambientes abertos, não se fechando para o exterior.	Ainda que descobertos, sua geometria não permitia uma conexão direta com o exterior
Grande capacidade de aforo.	Capacidade mais reduzida que os teatros gregos
Altura média do palco de 3 metros.	Altura do palco reduzida.
Inclinação da zona do pública moderada: 26° aproximadamente.	Inclinação da plateia mais aparente: aproximadamente 32°.
Orquestra circular de pedra.	Orquestra semicircular.

Fonte: A partir de Barba (2013).

Tem-se, de modo geral, características formais que auxiliaram na acústica da tipologia teatral na Antiguidade Clássica. Tais características tiveram

⁸ Ainda que haja um caráter invariável do *scenae frons*, tem-se constatação, da época vitruviana, de prismas triangulares giratórios sobre os palcos dos teatros para ambientar representações. Estes prismas eram posicionados de acordo com a ambientação desejada, girando esses elementos, definia-se o lugar, o caráter ou o ambiente de uma obra ou cena teatral (BARBA, 2013).

fundamental importância para o desenvolvimento acústico de salas de teatro durante as décadas seguintes, sendo comumente incorporadas em salas de espetáculo contemporâneas. As características acústicas identificadas por Barba (2013) são:

- *Baixo ruído de fundo*⁹, devido à seleção de implantação em zonas distantes de centros urbanos e frequentemente protegidos pelas condições orográficas;
- *Recebimento do som direto pela plateia*¹⁰, favorecida pela geometria curva, essa característica é presente no desenho dos teatros da antiguidade clássica. O som, distribuído de forma radial minimizava as perdas acústicas, ainda que favorecesse ao público próximo ao eixo central, devido à proximidade da fonte sonora.
- *Reflexões sonoras* no pavimento da orquestra, enquanto no teatro grego a orquestra circular de pedra envia reflexões ao público, reforçando o som direto e incrementando o nível sonoro, na tipologia romana, a orquestra semicircular próxima ao público limitava seu potencial refletor.
- *Corpo cênico reflexivo* no teatro romano. A altura e a materialidade pétreas formavam uma ferramenta de reforço acústico pelas reflexões do som. Além disso, outorgavam difusão devido à geometria. No teatro grego, as dimensões reduzidas da edificação posterior ao palco não auxiliam da mesma maneira em suas funções acústicas.

⁹ Chama-se *ruído de fundo* o som percebido no ambiente ainda que não sejam realizadas nenhuma atividade que possam proporcioná-lo no ambiente. Sua presença pode produzir um efeito de mascaramento de alguns sons desejados e necessários para o desenvolvimento de atividades musicais e verbais (BARBA, 2013).

¹⁰ Chama-se *som direto* o raio sonoro que une, em linha reta imaginária, a fonte emissora ao receptor (BARBA, 2013).

- *Presença de vasos* que auxiliaram na acústica. Na tipologia romana, Vitruvius refere em seu tratado, que há distribuição de vasos de bronze pela ambientação que poderiam auxiliar na função acústica.

Tomando nota das características formais que auxiliaram na acústica das tipologias teatrais na Antiguidade clássica, novas tipologias foram desenvolvidas, acompanhando as tecnologias da época.

Na Idade Média, com a expansão do Cristianismo, o ambiente teatral foi pouco desenvolvido como tipologia arquitetônica. As funções acústicas do espaço em salas de espetáculo foram tratadas nos ambientes religiosos (SOUZA *et al.*, 2012). A Igreja Católica condenava o teatro, mas o utilizava como instrumento ideológico, a fim de atrair o público e catequisar novos fieis, uma maioria analfabeta (DIAS, 2010; GRAELLS, 1997).

O humanismo italiano renascentista volta o pensamento artístico e cultural para a busca dos valores clássicos de Grécia e Roma, assim, os teatros voltam a se desenvolver como objeto arquitetônico (BARBA, 2013). Dentre os objetos teatrais renascentistas, o mais antigo é o Teatro Olímpico de Vicenza, de 1585, projeto de Andrea Palladio¹¹.

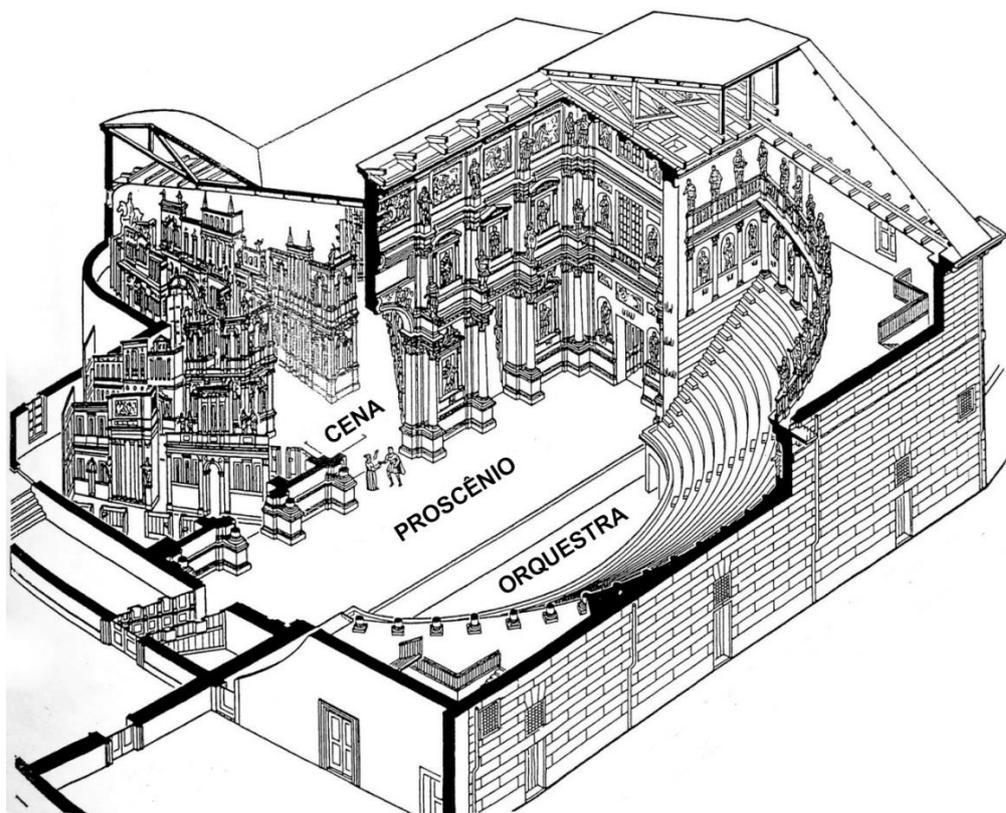
Palladio, em seu projeto, retomou a tipologia do teatro romano. Acrescentou uma cobertura sólida, reduzindo a perda de energia sonora. Também implementou uma inovação na cena, através dos estudos de perspectiva, acrescentou um cenário fixo onde ruas falsas davam a ilusão de infinito à plateia (BELIENY; NIEMEYER, 2012). A adoção das cinco ruas em perspectiva, criando o efeito de

¹¹ Paládio faleceu em 1580, antes da inauguração do Teatro Olímpico. O ambiente foi concluído por seu filho Silla Palladio e pelo seu discípulo Vincenzo Scamozzi (BARBA, 2013).

infinito, ainda que não creditada por alguns estudiosos, parece ter tido autoria de Vincenzo Scamozzi (BARBA, 2013).

O modelo é especialmente importante pois revela os interesses da teoria arquitetônica e da prática teatral do século XVI (BARBA, 2013; DIAS, 2010; MAZZUCATO, 2009; ZILIO, 2010). Mazzucato (2009) destaca que vários dos elementos do teatro paladiano permitiam, também, completar a imagem de outras edificações teatrais hoje perdidas, e assim, reconstruir um momento importante da história do teatro e das representações cênicas. O objeto é apresentado na Figura 4, onde é possível identificar o zoneamento dos espaços internos no esquema gráfico.

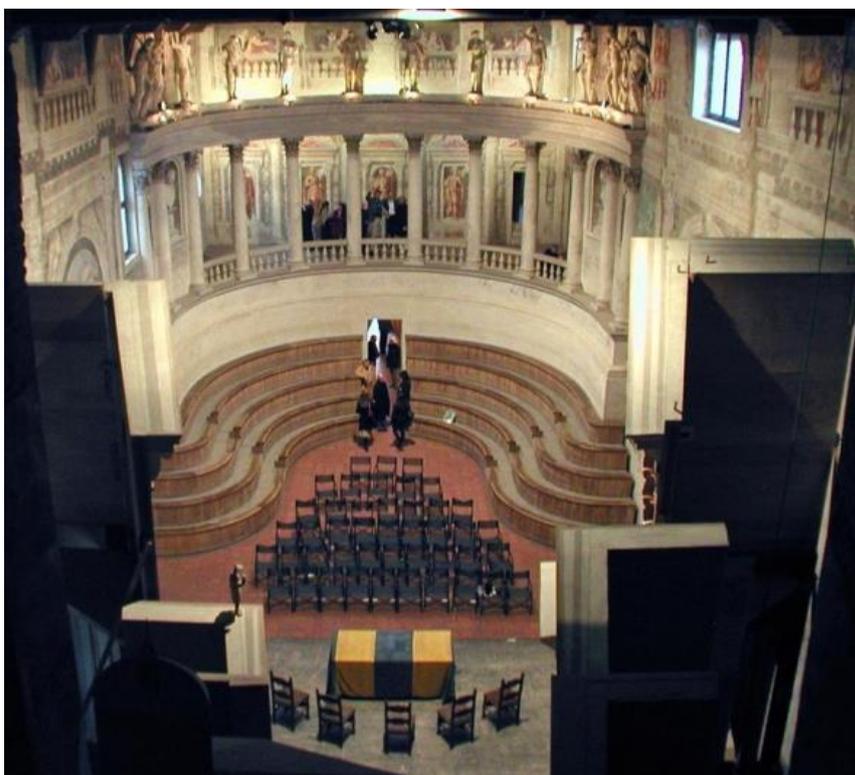
Figura 4: Teatro Olímpico de Vicenza.



Fonte: Adaptado de Tidworth (1973).

Alguns anos depois, Vincenzo Scamozzi projeta o Teatro *all'Antica* de Sabbioneta, na Itália. Scamozzi adotou um formato curvo para a zona de plateia e um desenho de palco com único ponto de fuga central, como apresentado na Figura 5. Inaugurado no carnaval de 1590, possui características também baseadas no modelo clássico, possui orquestra aberta e plateia escalonada em degraus. Apesar de ter abrigado grandes espetáculos, já foi usado no passado como armazém. Mais tarde, foi restaurado e hoje é usado para abrigar eventos musicais e conferências (PRODI; POMPOLI, 2000).

Figura 5: Fotografia aérea do interior do Teatro dell'Antica.



Fonte: Página Studio Amigoni (2013).¹²

Com o surgimento da ópera em Florença, durante os séculos XVI e XVII, a arquitetura teatral desenvolve considerável avanço. As inovações arquitetônicas

¹² Disponível em: < <http://studioamigoni.com> > Acesso em ago. 2017

existem na disposição de plateia em formato circular, de modo mais rotundo. Também, é suprimido os planos fixos que separavam palco da plateia, surgindo, portanto, a “boca de cena”.

As características formais dos teatros renascentistas herdam configurações presentes nas tipologias clássicas, e também incorporam significativas mudanças tipológicas.

Tais características morfológicas (especialmente a definição do espaço fechado de salas de espetáculo) também afetarão no desempenho acústico das salas: *elevados níveis sonoros*, que pela variação do tamanho, compactado ao teatro romano, provoca amplificação da mensagem emitida pela fonte, com uma maior presença de reflexões de som benéficas para a audiência. Há uma percepção sonora em níveis mais elevados (BARBA, 2013; LEÓN *et al.*, 2007). *Comportamento difuso*, trazendo homogeneidade na distribuição do som, devido a presença de revestimentos em madeira (BARBA, 2013). *Reverberação elevada*, aproximando aos três segundos em frequências médias, valores acima dos recomendados, atualmente, para auditórios e teatros de ópera (LEÓN *et al.*, 2007). *Menor valores de reverberação* em frequências baixas, resultado do efeito ressonador (presença de “colchão” de ar junto às superfícies em madeira – elemento predominante nas salas).

Por volta de 1600 d.C., com o movimento Barroco, os teatros assumem a característica de não ter mais o cenário fixo e passam a apresentar os planos móveis que separavam o palco da plateia, a “boca de cena”. Questões técnicas, como a iluminação cênica, a visibilidade dos espectadores, o vestuário e o uso da música, são elaboradas e desenvolvidas, fomentando a configuração de um

novo espaço de representação teatral (DIAS, 2010). Paulatinamente, essa conformação leva a uma separação completa entre plateia e palco, configurando assim, o palco italiano (BELIENY; NIEMEYER, 2012). O teatro italiano¹³ remete às tipologias arquitetônicas do cenário e da sala que definiram a estrutura dos teatros não efêmeros (MAZZUCATO, 2009).

O chamado Teatro de Ópera italiana teve sua hegemonia presente na Europa durante os séculos XVIII E XIX. Muitos tratadistas do século XVIII publicaram escritos que abordavam questões relacionadas ao desenho e com a edificação de salas teatrais e operísticas. Ainda que sem respaldo científico¹⁴, a intuição e experiência permitiram uma melhora constante nos modelos teatrais, otimizando na qualidade visual e sonora das salas (BARBA, 2013).

As características formais dos teatros italianos podem ser destacadas, a *forma curva em planta* é adotada em alguns casos. Havia também a existência de *vários andares*, ou seja, uma sobreposição de planos em altura, o que permitiu aumentar a capacidade da plateia sem aumentar significativamente a distância entre fonte e receptor. Barba (2013) destaca que os grandes coliseus operísticos chegaram a alcançar até seis níveis sobrepostos verticalmente.

A orquestra se localiza em uma posição mais baixa que o palco, ocupando uma situação intermédia entre público e palco.

A *caixa cênica italiana* apresenta um cenário de maior altura, largura e profundidade que as anteriores tipologias renascentistas. Essa caixa cênica

¹³ Homônimo em italiano *teatro all'italiana*

¹⁴ É considerado que a acústica arquitetônica (acústica de salas) como ciência, surge a partir de estudos desenvolvidos por Sabine, entre os séculos XIX e XX (BARBA, 2013; LEÓN *et al.*, 2007).

permitiu incrementar a flexibilidade cenográfica das representações teatrais e operísticas. Também, a volumetria do cenário e o uso da boca de cena permitiram levar ao extremo o uso da estrutura clássica bipartida, a hierarquia formal e funcional herdada dos modelos greco-romanos (BARBA, 2013).

E por fim, o *traçado do teto plano* ou com curvatura bastante sutil, evitando focalizações de som não desejadas. Em alguns casos, arquitetos edificaram com tetos com pronunciada curvatura, como o exemplo de E. L. Boullée, que defendia a cúpula como desenho ideal de Teatro de Ópera (BOULLÉE, 1985).

As propostas formais dos teatros italianos podem ser sumarizadas em quatro geometrias. Os estudos dessas quatro geometrias validam e são uteis para alcançar o melhor conhecimento analítico das tipologias (FORSYTH, 1985; IZENOUR, 1977). As geometrias foram sintetizadas no Quadro 4 e serão melhor abordadas posteriormente.

Quadro 3: Síntese das principais geometrias formais utilizadas no teatro italiano.

Geometrias do teatro Italiano	
Forma Elíptica	Destacada por Patte (1782) como forma geométrica mais favorável para obter uma acústica e visão adequada.
Forma Circular	Tratada por Roubo (1777) e Saunders (1790) como a geometria ideal.
Forma de Sino ou Leque	De grande aceitação durante os séculos XVII e XVIII (BARBA, 2013).
Forma de Ferradura	Bastante presente nos teatros dos séculos XVIII e XIX (BARBA, 2013).

Fonte: A partir de BARBA (2013); PATTE (1782); ROUBO (1777) e SAUNDERS (1790).

Ainda que de forma empírica, para solucionar a complexa problemática das necessidades acústicas das óperas, foram adotadas soluções arquitetônicas e geométricas, dispondo planos com angulações adequadas na plateia e palco, elegendo as geometrias e curvaturas convenientes para a planta, proporcionando altura e profundidade ótimas para o palco e orientando adequadamente a inclinação do arco do proscênio (BARBA; GIMÉNEZ, 2011).

Como consequência, o Tempo de Reverberação é inferior se comparado aos teatros renascentistas; *reverberação* ligeiramente acima dos 1,5 segundos em sala vazia a frequências de 500Hz a 2000Hz, permitindo o brilho e definição exigida na música operística; as plantas curvas também auxiliam de modo que as reflexões são transmitidas e focalizam em uma zona, produzindo incremento sonoro perceptível, gerando *efeitos de focalização benéficos*; assim, o som emitido pela fonte é percebido com bons níveis energéticos nas filas mais distantes da fonte sonora (BARBA, 2013). Também reforçam critérios subjetivos da qualidade acústica que serão apresentados no decorrer desse trabalho. Os palcos como zona central acusticamente beneficiada pela recepção de reflexões. A inteligência acústica já é adotada, com uso de câmaras de ressonância e outras estratégias de auxílio acústico, otimizando a resposta sonora (BARBA; GIMÉNEZ, 2011).

Outra geometria que perdura nas tipologias teatrais atuais são as retangulares. Iniciada na era classicista, aproximadamente em 1750 d.C., as salas de espetáculo passaram a utilizar a forma retangular, permitindo assim, a distribuição mais homogênea do som em salas menores (BELIENY; NIEMEYER, 2012).

Apesar de alguns estudiosos questionarem a reprodução da tipologia italiana, onde o palco localiza-se na frente da plateia e a zona da plateia é, na maioria dos casos, disposta de forma linear e escalonada, a tipologia segue com forte utilização e aplicação em projetos contemporâneos. Para o estudo da acústica em salas de espetáculo, os teatros italianos apresentam soluções projetuais e formais que são base para projetos de salas de espetáculo atuais.

Como já destacado, a arquitetura deve atender a funções que lhe são designadas e sua forma será afetada em função das atividades ali exercidas (SULLIVAN, 1896). No caso das salas de espetáculo, a qualidade acústica do ambiente é de fundamental importância, pois garante que todo o público absorva a mensagem transmitida pelas fontes sonoras variadas: instrumentos musicais, voz humana cantada, voz humana falada, etc.

Ainda que entre as escolas de Arquitetura tenha-se uma popularidade menor, em comparação aos assuntos de projeto, a acústica arquitetônica pode ser tratada e avaliada.

1.2. Acústica em salas de espetáculo

Salas de espetáculos são ambientes que primam por qualidade sonora, e suas características arquitetônicas influenciam seu desempenho acústico. Esses ambientes devem atender a requisitos específicos para uma qualidade acústica adequada, permitindo que o som se propague em todo o ambiente, de forma uniforme, bem definido em suas características e preservado em sua forma original (TAKAHASHI; BERTOLI, 2012).

Como apresentado e, segundo Barron (1981), em cada período da história, a música (barroca, gótica, clássica, popular e contemporânea) foi concebida para

ser executada em um tipo de espaço, cada qual com características diferentes, como a reverberação. Através do desenvolvimento de pesquisas guiadas por alguns profissionais, a acústica de salas ganha importância e passa a ser identificada como ciência, exercendo participação mais ativa em projetos arquitetônicos.

1.2.1. Acústica de salas como ciência

Até o final do século XIX, o projeto de salas de espetáculo se baseou no empirismo e na cópia de objetos já edificadas para tentar alcançar níveis acústicos satisfatórios para determinado objetivo. Wallace Clement Sabine, na transição para o século XX, iniciou os conhecimentos científicos sobre a acústica de salas.

Com a inauguração do novo auditório no *Fogg Art Museum*, na Universidade de Harvard, que acusticamente apresentava problemas na solução acústica, dificultando a compreensão pelos alunos, Wallace C. Sabine, então membro do Departamento de Física, foi chamado para resolver o problema (CARBONI, 2012). Os experimentos realizados no *Fogg Art Museum* mostraram que o seu maior problema era a grande confusão causada pelos sons que ficavam muito tempo ressoando, mesmo depois de desligada a fonte sonora. Como o som era refletido várias vezes, levando muito tempo para ser amortecido, as sílabas faladas, ou as notas musicais emitidas, misturavam-se umas com as outras.

Sabine observou que o tempo em que isso ocorria dependia da quantidade de energia sonora que era perdida devido às características das superfícies (reflexivas ou absorvedoras). Foi a partir desta consideração que iniciou suas

pesquisas que resultaram na construção do conceito de tempo de reverberação (FIGUEIREDO, 2005).

Sabine percebeu uma diferença do tempo de reverberação (TR) entre a sala com a audiência toda preenchida e vazia. Entendeu que as pessoas representavam elementos absorventes do som, eliminando mais rapidamente a energia reverberante. Seus estudos se desenvolveram mostrando que os materiais dos revestimentos das superfícies eram fundamentais para a maior propagação, e conseqüentemente a manutenção das reverberações.

Embora não tenha conseguido melhorar substancialmente a acústica do auditório, Sabine desenvolveu um corpo de conhecimentos científicos fundamental sobre a acústica de salas, publicando-os numa série de artigos escritos entre 1900 e 1915.

Tais conhecimentos só foram postos verdadeiramente à prova na consultoria acústica de uma nova sala: *Boston Symphony Hall*. Foi na realização desse projeto que Sabine consolidou o uso de sua equação. Apesar de não ter tido boa aceitação na época, a *Boston Symphony Hall* viria a ser considerada uma das melhores salas de concerto do mundo (FIGUEIREDO, 2005). A Figura 6 retrata o interior do *Boston Symphony Hall* em atividade.

Figura 6: Interior do Boston Symphony Hall em Massachusetts, Estados Unidos da América.



Fonte: Página da *Boston Symphony Orchestra*¹⁵.

A partir desses estudos, Sabine consolidou a acústica de salas como ciência e definiu o conceito de tempo de reverberação. Defendido como o intervalo de tempo necessário para que o nível sonoro sofra um decréscimo de intensidade de 60 dB¹⁶, tendo-se como referência o instante em que a fonte sonora interrompe sua transmissão (ABNT,1992; FIGUEIREDO, 2005).

Alguns pesquisadores, entretanto, notaram que salas com tempos de reverberação semelhantes soavam de maneiras bastante distintas. Essa constatação deixou evidente que além do tempo de reverberação, outros parâmetros acústicos deveriam ser levados em consideração (FIGUEIREDO, 2005).

¹⁵ Disponível em: <<https://www.bso.org>>. Acesso em dez. 2017.

¹⁶ A escala dB (decibéis) para nível sonoro será apresentada no tópico 3.3.

1.2.1.1. A contribuição de Beranek

Foi Beranek quem abriu as portas para uma nova abordagem sobre a acústica de salas, propondo, além do tempo de reverberação, outros parâmetros acústicos que deveriam caracterizar por completo a qualidade acústica de uma sala de música. Expandido, portanto, os parâmetros de avaliação do comportamento sonoro em salas de espetáculo.

Para isso, Beranek estudou 54 salas e com base nas semelhanças e diferenças acústicas observadas entre os objetos e comparando os resultados com avaliações subjetivas realizadas mediante entrevistas com especialistas em acústica, formulou um conjunto de parâmetros que se consolidaram como fundamentais para a avaliação da qualidade acústica de salas de espetáculo (FIGUEIREDO, 2005).

Em suas investigações, pode comprovar que a qualidade acústica das salas de concerto depende de diversos fatores, como tamanho, materiais absorventes, refletores e difusores, paredes e do teto, balcões, quantidade de pessoas presentes, controle do ruído e, especialmente, geometria e volumetria.

Suas observações possibilitou a elaboração de parâmetros subjetivos para análise da sonoridade das salas. Alguns parâmetros subjetivos serão brevemente abordados no tópico 3.4.

Nesse contexto, vale salientar a constatação de Takahashi e Bertoli (2012) que afirmam que é de suma importância que conceitos de arquitetura e de acústica formem um único corpo, de forma que a arquitetura possa contribuir para a qualidade acústica desses espaços.

1.2.2. Conceitos básicos em acústica de salas

Os conhecimentos científicos e experimentais na área de acústica são atualmente bastante completos (COSTA, 2003). Nesse sentido, para entender como condicionar uma sala de espetáculos, faz-se necessário o entendimento de alguns conceitos básicos.

O som é o resultado das vibrações dos corpos elásticos que se propagam no ar. Essas vibrações tomam o nome de vibrações sonoras, consistindo em ondas de compressão seguidas de dilatação (ou rarefação) que se propagam com velocidade uniforme em todas as direções¹⁷ (CARVALHO, 1967; COSTA, 2003). A essa vibração ou onda mecânica, capaz de produzir no homem uma sensação auditiva, dá-se o nome som (ABNT, 1992). Vale a compreensão entre a distinção entre dois tipos de sons: os musicais e os ruídos.

De maneira subjetiva, entende-se por *som* como percepção desejada e *ruído* como percepção indesejável. De maneira objetiva, *som musical* é harmônico, já o *ruído* é percebido com frequências que não seguem nenhuma lei precisa, e que diferem entre si por valores imperceptíveis ao ouvido humano, sendo na maioria das vezes, um som indesejável (ABNT, 1992). Desse modo, será convencionalizado nessa pesquisa chamar som aos sons musicais e ruído aos não musicais.

A vibração sonora e o ciclo completo de uma onda podem ser demonstrados de maneira simplificada nos modelos apresentados pelas Figuras 7 e 8, respectivamente. Destaca-se, porém, que um tom puro pode ser graficamente

¹⁷ A propagação será dada de maneira uniforme em todas as direções, se a propriedade elástica do meio for igual em todos os pontos, ou seja, se o meio for isótopo (COSTA, 2003).

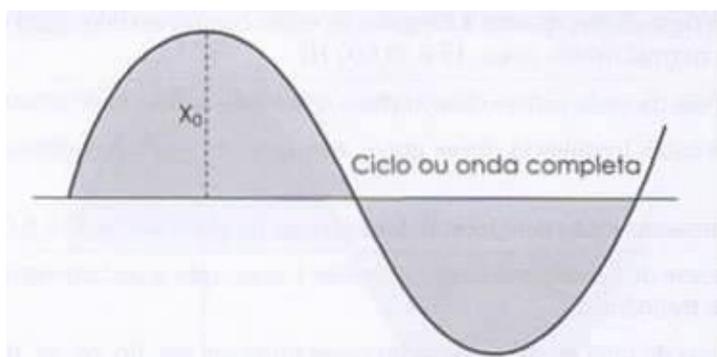
representado como uma onda sonora senoidal (representação das Figuras 7 e 8), mas em situações reais, dificilmente se encontra um tom puro.

Figura 7: Representação do comportamento das vibrações sonoras.



Fonte: COSTA (2003).

Figura 8: Representação simplificada de um ciclo ou onda completa.



Fonte: COSTA (2003).

Para Carvalho (1967) e Costa (2003), os sons podem ser distinguidos entre si por três características:

- A *altura*, que se relaciona com a sequência das vibrações sonoras, isto é, a frequência de seu som fundamental e que corresponde ao número de oscilações completo por segundo.

Será a frequência a responsável por classificar um som como agudo ou grave.

Com ela, também é possível classificar vozes em baixo, barítono, contralto,

soprano, etc., e as notas musicais em diversas escalas (CARVALHO, 1967; COSTA, 2003).

- A *intensidade* do som diz respeito à amplitude da onda sonora, que caracteriza a variação de pressão do meio em que se verifica a sua propagação. Produz no ouvido uma sensação mais ou menos viva, variando de acordo com a distância a que se encontra a fonte sonora, com a energia sonora inicial, com o número de reflexões e com a própria altura do som (CARVALHO, 1967; COSTA, 2003).

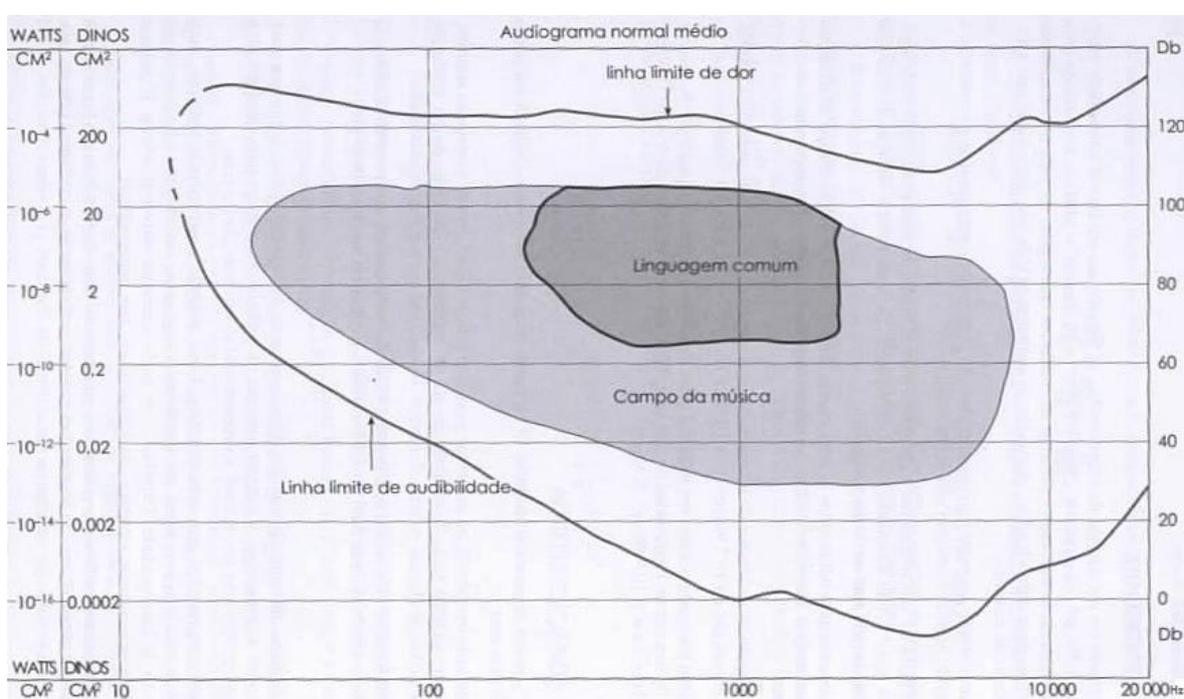
- O *timbre*, que se relaciona com os sons musicais e a composição harmônica da onda sonora, isto é, sua forma, e nos permite identificar a procedência do som, seja emitido por uma pessoa ou instrumento musical. Permite também uma distinguir sons de mesma frequência fundamental. É uma consequência não somente da altura e da intensidade dos sons, mas também do número de harmônicos que entram em sua estrutura, de sua grandeza relativa, frequência própria e diferença de fases dos sons componentes (CARVALHO, 1967; COSTA, 2003).

Dá-se o nome frequência de uma onda sonora ao número de ciclos completos executadas pela mesma em um segundo. É medido em ciclos por segundo (c.p.s.) ou Hertz (Hz).

A faixa de áudio frequência, de uma pessoa jovem e sadia, está situada entre 20 Hz e 20.000 Hz. As frequências da fala, para as quais o ouvido humano apresenta maior sensibilidade, estão compreendidas na faixa entre 100 Hz e 6000 Hz (WHO, 1999).

Os sons musicais estão compreendidos entre as frequências de 30 e 5.000 Hz. Ao som de baixa frequência diz-se grave e ao som de alta frequência diz-se alto ou agudo (COSTA, 2003). A Figura 9 apresenta um audiograma¹⁸ com valores normais médios, onde é possível identificar os níveis sonoros médios (expressos em dB) que compreendem a voz humana (linguagem comum) e os que compreendem o campo da música e seus instrumentos.

Figura 9: Audiograma normal médio



Fonte: COSTA (2003).

Como o homem não é sensível a pequenas variações de frequência, o espectro sonoro foi dividido em faixas (ou bandas) de oitava. As faixas de oitava normalizadas são: 31,5Hz; 63Hz, 135Hz, 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz, 4000Hz, 8000Hz, 16000Hz. Uma oitava é definida por um intervalo em que as frequências máxima e mínima se encontram na razão de dois para um (2/1).

¹⁸ Audiograma é um gráfico representativo da variação do limiar de audibilidade, em função da frequência das ondas sonoras recebidas pelo aparelho auditivo.

Cada faixa é denominada por sua frequência central, que representa a média geométrica entre os extremos.

1.2.3. Grandezas sonoras

1.2.3.1. Potência, Intensidade e Pressão sonora

Potência exprime a quantidade de energia sonora liberada por uma fonte, por unidade de tempo. É medida em Watts (W).

Intensidade é o fluxo médio de energia sonora, por unidade de área, perpendicular à direção de propagação. É medida em Watts por metro quadrado (W/m^2).

Pressão sonora é a variação da pressão do ar, em relação à pressão estática, devido a uma perturbação acústica. Sua unidade é o Pascal (Pa).

1.2.3.2. A Escala Decibel

Bel (B) é a unidade utilizada para exprimir a relação entre dois valores, sejam eles: potência, intensidade ou pressão sonora (EGAN, 1984). O decibel (dB) é a décima parte do Bel. Os valores da escala decibel estão compreendidos entre 0 a 130 dB, que correspondem ao limiar de audibilidade e de dor, respectivamente.

O Nível de Pressão Sonora (NPS) é definido pela relação logarítmica¹⁹ entre a pressão sonora em um dado momento e a pressão de referência (EGAN, 1984).

¹⁹ De acordo com a lei de Weber e Fechner, a sensação sonora é proporcional ao logaritmo da intensidade sonora.

Como o ouvido humano não responde de modo linear aos estímulos que recebe, mas sim de forma logarítmica, o uso do decibel, em escala logarítmica, simplifica a avaliação dos níveis de pressão (SIMÕES, 2011).

O ouvido humano também não interpreta igualmente todas as frequências que compõem um som. Por isso, a escala decibel recebe também ponderações, que permite aplicar correções necessárias para que o som possa ser analisado de maneira a se aproximar da percepção sonora de um indivíduo saudável, essa ponderação recebe o nome de curva dB(A). O dB(A) é o nível de pressão sonora em decibéis ponderado na curva "A". A conversão de dB para dB(A) se processa pela adição ou subtração de valores, por faixa de frequência, aos resultados obtidos nas medições, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1: Conversão de dB para dB(A).

63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
-25	-15	-8	-3	0	+1	+1	-1

Fonte: EGAN (1984).

1.2.3.3. Propagação sonora: Reflexão, Absorção e Tempo de Reverberação

Os sons podem ser classificados segundo sua origem: aéreos ou de impacto. Os sons aéreos são produzidos dentro da massa de ar do ambiente e que se transmite, integralmente através desse meio elástico até os nossos ouvidos. Os sons de impacto são produzidos pelo choque de elementos sólidos, transmitindo-

se através desses elementos até o nosso corpo, sendo percebido sob forma de vibração ou de sensação sonora.

O som se propaga no ambiente através de ondas esféricas concêntricas, tendo a fonte sonora como centro comum. Define-se, assim, como raio sonoro o trajeto percorrido por um ponto de uma onda de som (CARVALHO, 1967).

Os raios sonoros refletidos em um ambiente, sofrem comportamentos diferentes em consequência da superfície refletora. Quando uma onda sonora atinge determinada superfície (uma parede ou obstáculo qualquer), parte da energia incidente é refletida, parte é dissipada pelo obstáculo e parte atravessa o referido obstáculo, transmitindo-se através do meio adjacente (SILVA, 2003).

Em espaços fechados, a propagação é condicionada pelas superfícies envolventes e pelos obstáculos existentes no interior desses espaços. Ambientes com superfícies muito refletoras permitem que quase toda a energia incidente seja refletida, resultando um campo sonoro com pouca variação dos níveis sonoros, mesmo distanciando fonte do receptor.

Além disso, propor uma boa sonoridade a um local significa torná-lo acusticamente compatível para as atividades ali desenvolvidas. Exemplo, um auditório deve permitir que os ouvintes escutem e compreendam sem dificuldades um orador, sem que este precise forçar ou alterar sua voz. O som em uma sala deve ser natural, vivo, porém sem excesso de reflexões, as quais poderão ser controladas por materiais absorventes específicos para cada caso.

Já a característica absorvente das superfícies pode ser entendida pela parcela da energia radiada da fonte sonora que é absorvida. Na prática, a maioria das

salas não são nem totalmente reverberantes nem completamente absorventes, mas sim caracterizadas por modelos intermédios.

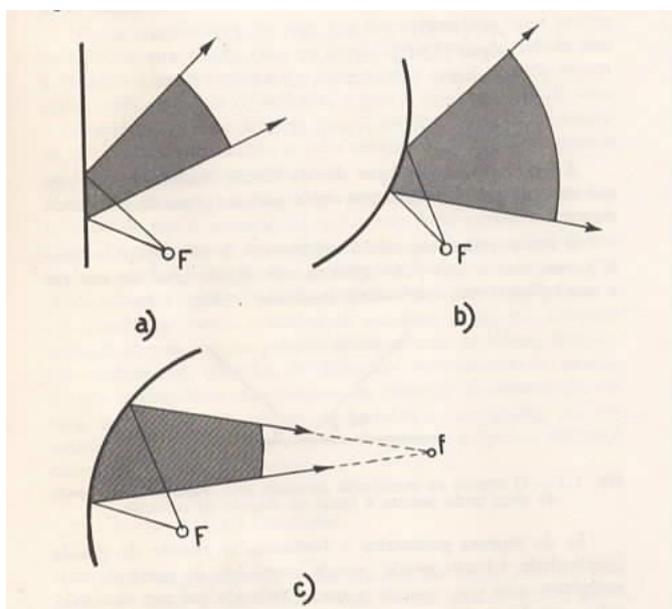
A vibração sonora que chega ao receptor, portanto, pode ser identificada como a composição do som direto e suas reflexões. O intervalo de tempo que existe entre a chegada do raio sonoro direto e a chegada dos raios refletidos é decorrente da distância percorrida por cada um desses raios. Em ambiente fechado, onde ocorrem múltiplas reflexões sonoras, manifesta-se também o fenômeno da reverberação. Ao cessar a emissão da fonte sonora, as sucessivas reflexões ainda podem ser percebidas como um prolongamento do som, fazendo com que sua extinção no ambiente não ocorra imediatamente, mas sim após um determinado intervalo de tempo (tempo de reverberação) (SOUZA; ALMEIDA; BRAGANÇA, 2012). Cada ambiente terá seu tempo de reverberação próprio, em função de seu volume e da composição de seus materiais de revestimento.

Torna-se fundamental, assim, entender como o som se reflete para entender a importância das superfícies e do meio em que se propaga, no caso desse trabalho, as salas de espetáculo. O som se reflete pelo raio sonoro incidente formando com a superfície refletora um ângulo igual ao que faz o raio refletido com esta mesma superfície. Cabe salientar que, quando o raio sonoro é refletido por algum obstáculo ou superfície, volta mais fraco, uma vez que parte de sua energia é refletida, sendo a outra porção, absorvida e transformada no interior do material (CARVALHO, 1967).

A direção do raio refletido depende da forma da superfície sobre a qual ele incide. Se a superfície for plana (Figura 10.a), os raios sonoros serão divergentes e o som difundido; se a superfície for convexa, o som será ainda mais difundido

(Figura 10.b); entretanto, o contrário passará na superfície côncava (Figura 10.c), concentrando o som refletido em um ponto chamado foco²⁰. São estes três tipos de superfícies que se usam, combinadas para o controle direcional ou geométrico do som nas salas sem amplificadores (CARVALHO, 1967). A Figura 10 apresenta o comportamento do raio refletido em superfícies plana, convexa e côncava.

Figura 10: Comportamento do som em a) superfície plana, com a difusão do raio; b) convexa, com uma difusão ainda maior; c) côncava, produzindo concentração sonora.



Fonte: CARVALHO (1976).

Consequências da reflexão sonoras podem ser o eco e a reverberação. O eco é classificado como a repetição de som que chega a um ouvido por reflexão 1/15 de segundo ou mais depois do som direto (CARVALHO, 1967). A reverberação é o som residual ou o fenômeno pertinente às reflexões múltiplas (CARVALHO, 1967; COSTA, 2003).

²⁰ Essa consequência deve ser evitada nos auditórios quando se encontrar situado à altura dos ouvidos dos espectadores (CARVALHO, 1967).

Entende-se a absorção do som quando há uma porcentagem da energia sonora retida, degradando-se em energia mecânica ou calorífica. A absorção ocorre na superfície incidente e é responsável pelo decaimento da energia sonora.

A energia absorvida pode ser transformada em outros tipos de energia (principalmente térmica), produzir nova fonte sonora no material incidente, ou refratar o som para o terceiro (energia transmitida) (METHA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999).

Alguns materiais são classificados como absorventes acústicos, essa nomenclatura indica a capacidade do material em reter parte da energia sonora recebida. Em laboratório, através de medição, o coeficiente de absorção é identificado. Seu valor não é constante, pois varia com a frequência do som incidente. Dessa forma, ao considerar diversos materiais construtivos, pode-se, através dos ensaios de laboratório apropriados, determinar os seus coeficientes de absorção para as várias frequências. Esse coeficiente adota índices que variam de 1 a 0, sendo 1 o índice máximo de absorção, equivalente à 100% e 0 o índice mínimo, equivalente a 0%.

Uma superfície, hipotética, infinitamente rígida e polida seria totalmente refletora e nulo seu coeficiente de absorção. Já uma janela aberta em um recinto é considerada totalmente absorvedora, o que significa que 100% da energia incidente passa para fora do recinto. De modo geral, os materiais construtivos receberão um coeficiente de absorção compreendido entre $0 > \alpha < 1$.

Silva (2003) relata que viveu um período onde, no Brasil, a carência de materiais construtivos era generalizada e notória, tendo o campo da acústica sofrido com

falta de materiais acústicos absorventes para emprego no tratamento de salas. Entretanto, a realidade atual da construção civil adaptou-se à demanda exigida e apresenta uma variedade de materiais com capacidade de absorção acústica disponíveis para tratamento acústico de recintos.

É importante notar que, apesar de alguns materiais trazerem altos coeficientes de absorção, qualquer material é acústico desde que corretamente empregado (SILVA, 2003).

Em 1992, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publica a NBR 12179 que vem sumarizar uma série de materiais com seus respectivos coeficientes de absorção. Essa ação tem como finalidade o tratamento acústico em recintos fechados, criando um manual para auxiliar projetistas no condicionamento acústico de salas, procurando garantir em um recinto o tempo ótimo de reverberação e também, a boa distribuição do som no espaço.

1.2.4. Parâmetros subjetivos

Como descrito anteriormente, foi Beranek que, em 1962, iniciou uma nova abordagem sobre a acústica de salas, propondo, além do tempo de reverberação, uma extensa família de parâmetros acústicos que deveriam caracterizar por completo a qualidade acústica de uma sala de espetáculo (FIGUEIREDO, 2005). Seu objetivo era sistematizar um conjunto de critérios para classificar a acústica de salas de espetáculo. Tendo seu primeiro livro *Music, Acoustics and Architecture* considerado por muitos pesquisadores como um marco histórico para a acústica de salas.

Para Passeri (2008), os parâmetros objetivos da qualidade acústica de salas são definidos como índices numéricos mensuráveis que estão correlacionados com os atributos subjetivos e podem descrever as qualidades acústicas de ambientes, reais ou virtuais. Alguns atributos subjetivos considerados por ele como essenciais para a qualidade acústica de uma sala de espetáculo (TAKAHASHI; BERTOLI, 2012) são brevemente apresentados:

(a) *vivacidade*

Vivacidade é a impressão subjetiva relacionada à reverberação em médias frequências (500Hz e 1000Hz). Influenciando também em outros efeitos, a reverberação aumenta o “preenchimento” sonoro e melhora a difusão. Uma sala com baixo grau de vivacidade é comumente identificada como “seca” ou “morta” (FIGUEIREDO, 2005);

(b) *calor*

O calor acústico pode ser descrito através do parâmetro objetivo denominado razão de graves (BR), seu cálculo se dá dividindo o tempo de reverberação (RT) nas baixas frequências (67Hz, 125Hz e 250Hz) pelo tempo de reverberação nas médias frequências (500Hz e 1000Hz). Beranek observou também que as salas com bom grau de calor acústico dispunham de pouca ou nenhuma superfície de madeira fina no auditório, e que as salas mais deficientes apresentavam maiores quantidades daquele material. O problema se agrava quando existe um espaço livre atrás da madeira, dissipando, assim, energia em baixas frequências, causando perda dos graves;

(c) *brilho*

O brilho é afetado pelo intervalo entre a chegada do som direto e das primeiras reflexões, também está relacionado com a rapidez da chegada da porção significativa da energia nas primeiras frações de segundo;

(d) *clareza*

O critério de clareza também pode ser descrito como definição e caracteriza uma percepção de um som definido. Fisicamente, clareza é a razão da energia que chega nos primeiros 80ms (milissegundos) pela energia remanescente do respectivo sinal. A reverberação é atributo decisivo para o parâmetro clareza;

(e) *intimidade*

A intimidade ou presença é uma sensação que sugere claramente ao ouvinte o tamanho da sala na qual a fonte é emitida;

(f) *audibilidade*

Para a qualidade acústica da sala de espetáculo, o som que viaja diretamente da fonte sonora para os receptores deve apresentar um bom nível de audibilidade, se a intensidade do som direto for insuficiente, ela pode ser mascarada pelo ruído ambiente ou pelo som reverberante;

(g) *impressão espacial*

Essa grandeza é uma medida da diferença entre o que é captado em cada um dos ouvidos ao longo do tempo de exposição. A impressão espacial é inversamente proporcional ao grau de correlação entre os sinais biauriculares;

(h) envolvimento

Está associada à percepção de boa distribuição do som, diretamente ligada à reverberação. Muito importante para a música pois causa a sensação de preenchimento do som do instrumento, voz ou conjunto.

Esses atributos subjetivos relacionam-se com parâmetros acústicos objetivos (TAKAHASHI; BERTOLI, 2012) e podem ser apresentados ou percebidos através de medições ou simulações computacionais.

1.3. Desempenho acústico e simulações

Considerando a complexidade de uma análise de parâmetros acústico para salas de espetáculo, a simulação computacional serve como ferramenta de auxílio para projetistas que buscam dar o necessário condicionamento acústico para seus projetos.

Além disso, com a introdução dos microcomputadores pessoais (PCs) e portáteis no ambiente doméstico e popularização no ambiente de trabalho, nas décadas de 1980 e 1990, os espectadores se configuram também como produtores de conteúdo. Isso significou a mudança da relação receptiva de sentido único, presente no caso com televisores, para o modo interativo e bidirecional que o computador exige (REQUENA, 2007).

Couchot (2003) salienta que o usuário das novas tecnologias de comunicação e informação, vêm desde então, aprendendo a interagir com o universo digital, a partir de uma série de interfaces e utiliza em crescente escala o uso de câmeras digitais, gravadores de vídeo, CDs, DVDs, USBs, smartphones e portáteis.

A revolução digital, trazida com a *cibercultura*, possibilita novas tendências comportamentais do indivíduo e da sociedade e, permite ao homem desfrutar de uma nova cognição e uma nova subjetividade (REQUENA, 2007). Para Couchot (2003), as novas condições de acesso à informação oferecidas pela interatividade numérica privilegiam um visual enriquecido e fortemente sinestésico, em detrimento de um visual sequencial e linear.

Requena (2007) afirma que é possível assistir o desenvolvimento da possibilidade de as máquinas emitirem informações das mais diversas espécies (inclusive auditivas), solicitando ao usuário respostas sensoriais. Destaca também que, com a disseminação da informática nos escritórios de arquitetura no final dos anos 1980 e sua conexão através de internet, nos anos 1990, criou-se um ambiente propício e a infraestrutura necessária para uma significativa modificação no modo de projetar arquitetura.

Arquitetos e profissionais da construção civil aderiram ao uso de programas de representação e modelagem digital, introduzindo no processo de projeto programas que rapidamente se popularizaram entre os profissionais, como o CAD (*computer aided design*, ou, desenho assistido por computador). Desde então o *design* digital expande-se, trazendo mudanças profundas na concepção de arquitetura.

No campo da acústica, para tentar modelar o fenômeno da onda sonora computacionalmente é necessário um modelo matemático, sendo este um dos grandes motivos para os estudos em propagação de ondas sonoras ainda ser pouco utilizado na fase de concepção de projeto arquitetônico. Há complexidade de cálculos matemáticos e computacionais. Porém, com o avanço da arquitetura

e de ferramentas computacionais, tem-se a possibilidade de simplificar estes cálculos e, mediante algumas simplificações dos modelos, poder incluir recursos avançados em simulações computacionais em arquitetura (MOREIRA *et al*, 2012).

Granado-Jr e Bistafa (2012) salientam, no entanto, que é recomendável a participação de usuários treinados para o uso eficiente da ferramenta computacional e que haja estreita integração entre o projetista e o suporte técnico do programa.

As técnicas para simular a propagação de som podem ser classificadas em duas categorias: Acústica Geométrica (GA) e Acústica Numérica (NA). Trabalhos baseados em métodos de acústica numérica são em geral computacionalmente mais custosos e complexos, enquanto que abordagens baseadas em técnicas geométricas não são tão custosas, mas não representam precisamente a física do som. Deixando de considerar certos efeitos sonoros, como difração e dispersão (MOREIRA *et al*, 2012).

Dentre as principais técnicas de cálculo existentes, destacam-se: o método de traçado de raios (*ray-tracing method*) (KULOWSKI, 1984; EMBRECHTS, 1982); método das imagens ou fontes virtuais (*image or virtual source method*) (DANCE; SHIELD, 1997); método de traçado de cones ou de pirâmides (*cone-tracing or pyramid-tracing method*) (FARIA, 2005) e; método de transição de energia (*energy transition method*) (KRUZINS *et al.*, 1982; ALARCÃO *et al.*, 2000).

Uma análise de acústica de salas envolve vários fenômenos pertinentes à propagação do som, como a reflexão, a absorção, a difusão, a difração, a

transmissão e a interferência. Logo, uma análise que utilize mais de um método de cálculo, apresentará maior confiabilidade dos resultados. Por essa razão, experimentos numéricos incorporando combinações desses métodos têm sido realizados, criando-se novos modelos de simulação, que são chamados métodos híbridos (LEWERS, 1993; VORLÄNDER, 1989; RINDEL, 2000; MELO *et al.*, 2007; ZAMPAR-FILHO, 2014).

Os métodos de simulação utilizados se fundamentam basicamente na teoria da acústica geométrica (ZAMPAR-FILHO, 2014). De acordo com Tenenbaum e Camilo (2004), a acústica geométrica modela a onda sonora nas médias e altas frequências, admitindo os pressupostos da ótica geométrica, que admite raios acústicos retilíneos irradiados a partir da fonte sonora. Cada um desses raios possui as informações do espectro de potência e da distância percorrida pela onda. O raio se propaga em linha reta e vai sendo submetido aos efeitos dissipativos (fenômenos de absorção e reflexão) causados pelos agentes do meio, nesse caso o ar e superfícies da sala.

Os modelos mais utilizados nas simulações pelas ferramentas computacionais e comerciais existentes são, o Método do Traçado dos Raios, o Método das Fontes Virtuais e a combinação de ambos - Método Híbrido. (PORTELA, 2008; VORLÄNDER, 1989; TORRES, 2008; ZAMPAR-FILHO, 2014).

Melo *et al.* (2007) atentam que, além da modelagem da propagação sonora, devem-se também modelar outros elementos tais como fontes, receptores e contornos da sala.

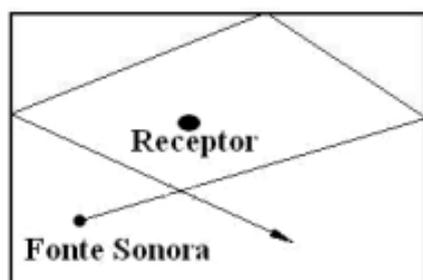
1.3.1. Técnica de traçado de raios

Acústicas geométricas assumem a propagação retilínea das ondas sonoras, portanto, muitas abordagens utilizam da técnica de traçados de raios (homônimo em inglês: *ray tracing*) (MOREIRA *et al*, 2012). A possibilidade de exportar a geometria gerada em AutoCad para programas do tipo “*ray tracing*” é muito atraente para o arquiteto que busca simular o comportamento acústico de uma sala (GRANADO-JR; BISTAFA, 2002).

Descrita pela primeira vez por Krokstrad e Strom, em 1967 (RINDEL, 2000), essa técnica pode ser usada para calcular as trajetórias de ondas acústicas, bem como uma série de parâmetros de propagação. Nessa técnica, a onda sonora é dividida em componentes e para cada um desses componentes, chamados raios, é dada uma certa quantidade de energia. O caminho que cada um desses raios descreve é rastreado, e são aplicadas funções para calcular a perda de energia dos mesmos, nos obstáculos, nas reflexões e perdas para o ar. Concomitantemente, um (ou mais) receptor esférico é posicionado na sala, e a cada iteração, é verificado se algum raio intercepta o receptor. Portanto, a cada reflexão é verificado se os raios interceptam o receptor sonoro e, quando ocorre tal colisão, a energia e o tempo decorridos para o raio chegar até o receptor são computados, a fim de possibilitar o cálculo da Resposta Impulsiva²¹ da sala (KULOWSKI, 1984). A Figura 11 exemplifica a configuração dessa simulação:

²¹ O conceito de Resposta Impulsiva (RI) será melhor descrito posteriormente.

Figura 11: Visão esquemática de um raio refletido.



Fonte: TORRES, 2008.

Associados a outros parâmetros computacionais, tal receptor pode ser modelado e, a partir de dados estatísticos, ser interpretado como uma cabeça humana. Possibilitando, assim, a simulação de áudios binaurais.

1.3.2. Método das imagens ou fontes virtuais

Dentre os métodos de simulação baseados em acústica geométrica, o método das Fontes Virtuais é um dos mais comumente usados para a determinação dos trechos iniciais da resposta impulsiva.

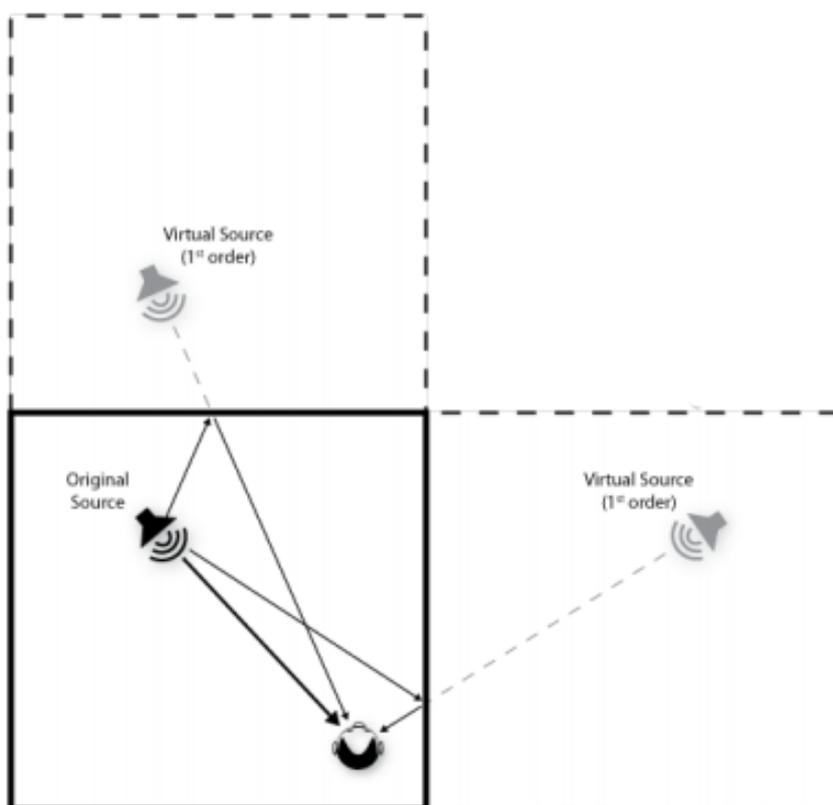
Inicialmente, os objetivos dos autores Allen e Berkley (1979) eram estudar a acústica de escritórios de geometria retangular, facilitar a implementação em um programa de computador e convergir o resultado de uma simulação para a solução da equação da onda. A simulação por esse método resulta em uma resposta impulsiva, ou seja, uma resposta do ambiente simulado a um impulso inicial (TORRES, 2008).

O Método das Fontes Virtuais tem como norteador o princípio de que uma reflexão especular pode ser construída geometricamente ao espelhar a fonte sonora no plano da superfície de reflexão (RINDEL, 2000). Ao obter a imagem

refletida da fonte sonora, o raio original, que sofreria uma reflexão, é substituído por um raio direto que parte dessa imagem refletida da fonte para o receptor. Desse modo, o modelo das fontes virtuais entende que o caminho seguido por um raio em suas várias reflexões, pode ser substituído por uma linha reta que liga o receptor a uma certa fonte virtual.

A Figura 12 representa duas fontes virtuais de primeira ordem. Dá-se o nome de fontes virtuais de primeira ordem às primeiras imagens refletidas. Já as imagens obtidas pela reflexão de fontes virtuais de primeira ordem, denominam-se fontes virtuais de segunda ordem e assim sucessivamente (TORRES, 2008).

Figura 12: Fontes virtuais de primeira ordem.



Fonte: Torres (2008).

Como vantagem, o método das fontes virtuais possibilita garantir que todas as imagens virtuais, a uma certa distância, que possam contribuir com alguma energia para o receptor sonoro, serão encontradas (BORISH, 1984).

Por outro lado, se a sala simulada não for composta por uma geometria simples, a exemplo, uma sala cuboide, a quantidade de fontes virtuais pode crescer muito, tornando a simulação acústica computacionalmente custosa e lenta (TORRES, 2008).

1.3.3. Programas computacionais

A simulação dos fenômenos acústicos são objetos de pesquisa em diversos países e a modelagem computacional, através de métodos numéricos, é a principal ferramenta para auxílio, análise e validação dos modelos (CHRISTENSEN, 1998; CHUANG; CHENG, 1995). Analisar os métodos numéricos de modo detalhado faz-se importante, visto que estes têm a capacidade de transportar a realidade física para a linguagem computacional (ZAMPAR-FILHO, 2014). São capazes de interpretações e de fomentar, portanto, a participação do usuário.

Permite também, a interação sinestésica do usuário com o objeto simulado. Em simulações de acústica, entendidas como complexas, essas ferramentas podem fomentar a qualidade acústica do objeto arquitetônico, bem como, auxiliar projetistas desde a concepção do desenho.

Existem algumas ferramentas computacionais comercializadas e divulgadas que realizam simulações acústicas. A partir de uma busca na ferramenta Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES),

foram identificadas as ferramentas computacionais comerciais com maior número de publicações. As ferramentas foram sintetizadas no Quadro 4.

Quadro 4: Principais softwares de acústica de salas comercializados.

Software	Representante comercial e país
Odeon	Odeon A/S (Dinamarca)
CadnaR	DataKustik (Alemanha)
RAIOS	GROM (Brasil)
CATT-Acoustic	TUCT™ (Suécia)
EASE	AFMG Technologies GmbH (Alemanha)

Fonte: O autor (2018).

Destacando-se pela divulgação de publicações com simulações em acústicas de salas: Odeon, CadnaR e RAIOS. Essas ferramentas têm como principal objetivo, obter resultados reais dos parâmetros de qualidade acústica do ambiente simulado.

1.3.3.1. Odeon

A ferramenta computacional Odeon, é uma ferramenta de cálculo e simulação desenvolvido originalmente por pesquisadores de acústica da Universidade Técnica da Dinamarca. Hoje, o desenvolvimento, as pesquisas e a gestão da ferramenta é de responsabilidade da empresa independente Odeon A/S. A ferramenta oferece resultados como parâmetros acústicos, mapeamento de som, animações e audibilização de som *surround* ou binauricular.

Sua metodologia de cálculo é híbrida, utiliza o método das imagens virtuais e método de traçado de raios. Desse modo, as primeiras imagens refletidas são definidas pela metodologia de imagens virtuais e as imagens de segunda ordem são definidas pelo método de traçado de raios.

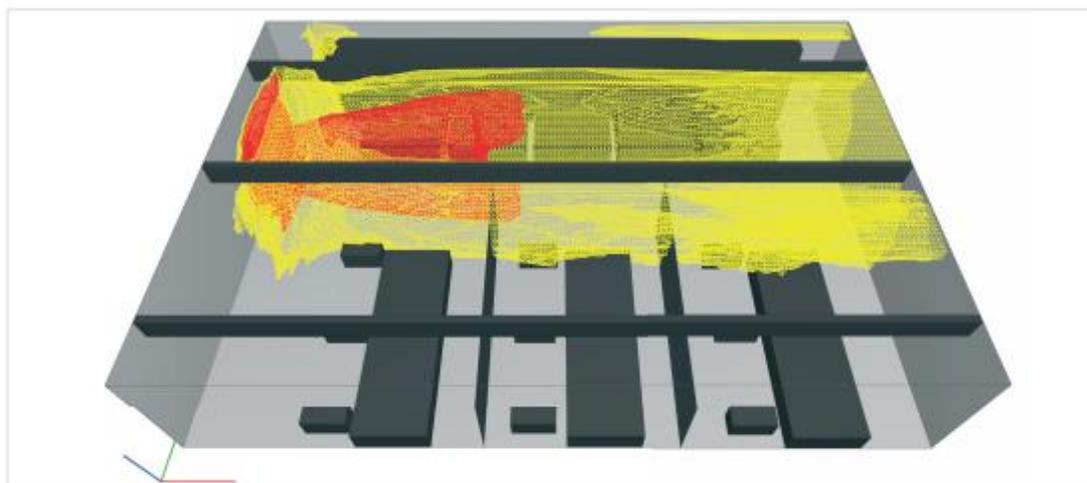
Sua interface permite a importação do modelo em formato DXF (*Drawing Exchange Format*) e também arquivos tridimensionais oriundos das ferramentas computacionais: AutoCAD, Microstation, 3DS max, IntelliCAD, Skechup e Rhino. O usuário deve abastecer a ferramenta com dados de entrada como: coeficientes de absorção, localização de fontes emissores e de receptores, e em casos que o usuário opte pela audibilização, deve também inserir áudios anecoicos.

1.3.3.2. CadnaR

Essa ferramenta computacional da empresa alemã DataKustik é específica para cálculo sonoro em ambientes internos. Seus cálculos utilizam métodos de Acústica Numérica (NA), computacionalmente mais custosos e complexos se comparados aos métodos de Análise Geométrica (GA), entretanto, mais precisos (MOREIRA *et al*, 2012). Possui uma biblioteca própria onde o usuário pode consultar coeficientes de absorção de diversos materiais, e os dados importados e exportados podem ser manipulados em arquivos formato DXF ou texto (DATAKUSTIK, 2017).

A ferramenta em sua última versão lançada (CadnaR v. 2018) ainda não conta com a possibilidade de audibilização do som ambiente, portanto, os dados exportados são obtidos em formatos visuais, não auditivos. A Figura 13 ilustra uma das exportações gráficas possíveis do programa.

Figura 13: Exportação gráfica a partir da ferramenta CadnaR.



Fonte: Página da DataKustik (s/d).²²

1.3.3.3. RAIOS

Essa ferramenta foi desenvolvida pelo Laboratório de Instrumentação em Dinâmica, Acústica e Vibrações – LIDAV do Instituto Politécnico (IPRJ), Campus Regional de Nova Friburgo da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) sob coordenação do Prof. Roberto A. Tenenbaum. Comercializada pela representante GROM Acústica e vibração, seus métodos de cálculos são híbridos, compostos por método de traçado de raios e método de transição de energia.

Seu desempenho foi comprovado e validado inicialmente, através da participação no Round Robin 3 (RR3), projeto de intercomparação de simuladores numéricos organizado pelo Departamento de Acústica do PTB (*Physikalisch-Technischen Bundesanstalt*), na Alemanha. Em 2002, o RR3 contou com 21 participantes de 14 diferentes países, em um total de 10

²² Disponível em: < <http://www.datakustik.com> > Acesso em dez 2017.

diferentes ferramentas computacionais para cálculos numéricos. A ferramenta RAIOS foi a única representante latino-americana.

A ferramenta aceita a importação de arquivos em formato DXF e possui banco de dados de materiais e seus respectivos coeficientes de absorção. Também permite a saída através de audibilização. Entretanto, em trabalho publicado por Granado Junior e Bistafa (2002), verificou-se a disparidade de valores de parâmetros acústicos encontrados entre medição e simulação computacional. Em contato com o suporte, os pesquisadores foram orientados a adotar coeficientes de difusão diferente dos gerados através de critério objetivo. Ainda, a aquisição do *software* demanda alto investimento inicial.

Ainda assim, bons resultados são encontrados através de simulação computacional, firmando os programas de simulação numérica como uma ferramenta já confiável para o projeto acústico de salas (TENENBAUM; CAMILO, 2004).

1.3.3.4. BRASS

Os softwares para análise acústica de salas auxiliam na execução do estudo, permitindo que o processamento dos dados ocorra de maneira mais fácil, imparcial e rápida, além de garantir cálculos de maior confiança, originando relatórios finais de maior consistência. Por possuírem bases de dados disponíveis para simulações, facilitam o gerenciamento de dados e minimizam o tempo com relação à coleta de dados, além de avaliarem o comportamento na sala e gerarem interpretações de maneira gráfica.

Apesar da possibilidade de uso de diversas ferramentas computacionais comerciais, a escolhida foi a BRASS. A ferramenta BRASS foi desenvolvida pelo Professor Dr. Julio Cesar Boscher Torres, docente vinculado ao Programa de Engenharia Urbana da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PEU-POLI/UFRJ) e gentilmente cedida para manipulação colaborativa, não sendo, portanto, comercializada.

O BRASS apresentou-se como uma ferramenta ainda em desenvolvimento, o que permitiria liberdade de manipulação e participação no desenvolvimento da ferramenta, bem como de uma construção de uma interface amigável ao projetista.

A ferramenta possui método de cálculo de traçado de raios, simplificando a simulação e possibilitando uma manipulação de maior aceitação por profissionais não especialistas em acústica. Ainda, como destacado por Granado-Jr e Bistafa (2012) era recomendável a participação de usuários treinados para o uso eficiente da ferramenta computacional e estreita integração entre o usuário e o suporte técnico do programa.

Assim, definiu-se que o uso da ferramenta era pertinente pois significaria:

- Flexibilidade e liberdade na manipulação dos dados de programação;
- Estreita ligação entre usuário e programador;
- Ferramenta com confiabilidade de cálculo através de método de traçado de raios;

- Ferramenta inédita, estando em fase de programação e, portanto, não sendo possível sua comercialização;
- Possibilidade de articulação com ferramentas de desenho assistido (CAD);
- Devido a sua não comercialização, a ferramenta também apresentou vantagem se comparada ao alto valor de investimento inicial de outros softwares semelhantes

1.4. Medição

Zampar-Filho (2014) salienta que as ferramentas computacionais citadas utilizam diferentes métodos de cálculo, contudo, a validade de um modelo está sempre condicionada a um conjunto de restrições que limitam sua aplicação. No caso da acústica de salas, por exemplo, métodos que apresentam bons resultados para altas frequências podem não apresentar resultados precisos em baixas frequências, e vice-versa. Para ele, a acústica de ambientes fechados diz respeito às investigações, através de medições experimentais, e determinações, através de métodos analíticos ou numéricos, das propriedades acústicas de ambientes fechados. Entende-se, portanto, que para validação da eficácia e confiabilidade de *softwares* que auxiliam no cálculo de parâmetros acústicos, há a necessidade de comprovação através de medição e análise dos dados reais e virtuais coletados.

Para aquisição de dados em campo em objeto arquitetônico existente, a NBR ISO 3382 (ISO, 1997) estabelece métodos para a medição do tempo de reverberação e outros parâmetros de acústica de salas aplicados a espaços de

espetáculos artísticos, salas comuns e escritórios. A norma estabelece alguns parâmetros acústicos subjetivos e objetivos que podem ser considerados nas medições. Dentre os quais, optou-se por considerar: tempo de reverberação (RT60) e fator de clareza (C80).

A expressão física da Clareza C80 é a razão logarítmica da energia que chega nos primeiros 80 milissegundos e a energia remanescente. Essa razão também pode ser tomada nos primeiros 50 milissegundos (C50). Seu valor é expresso pela unidade de medida decibel.

Para a tomada dos parâmetros, foram distribuídos pontos de medição no ambiente arquitetônico de forma a considerar a maior área possível, cobrindo de maneira mais homogênea o espaço arquitetônico e obtendo uma sonoridade mais confiável do espaço. Com os pontos locados, é possível calcular a resposta impulsiva da sala.

De maneira simplificada, a *resposta impulsiva* pode ser descrita como a reação do sistema a um estímulo impulsivo. Pode ser entendida como um histórico da pressão acústica entre dois pontos: o de excitação e o de captação (fonte-receptor).

A resposta ao impulso de um ambiente, entre uma fonte sonora e um receptor, é composta pelo som direto e pelas reflexões que a onda sonora sofre no espaço. Quando um som é produzido no interior de um ambiente composto por paredes ou contendo obstáculos, as ondas sonoras se espalham num padrão difuso de reflexões. A maneira como essas ondas interagem com a superfície e

como elas se distribuem pelo espaço estará marcada na resposta impulsiva da sala (FIGUEIREDO, 2005).

Ao identificar a resposta impulsiva é possível determinar com grande precisão o decaimento da energia acústica, e os valores de tempo de reverberação (T20, T30, T60), além de demais parâmetros (FIGUEIREDO, 2005).

Para determinação da resposta impulsiva pode ser usado o método da varredura de senos. O método se baseia em utilizar varreduras senoidais como sinal de excitação sonora. Este método consiste em gerar um sinal sonoro em que a frequência instantânea varia (de 20Hz a 20kHz) ao longo do tempo de emissão. Esta variação pode ser linear ou logarítmica. Neste método, a resposta impulsiva é obtida dividindo o espectro do sinal medido pelo espectro do sinal gerado. Este método foi escolhido para este trabalho porque apresenta uma excelente relação sinal-ruído, principalmente nas baixas frequências (PEREIRA, 2010; DALMONTE, 2013).

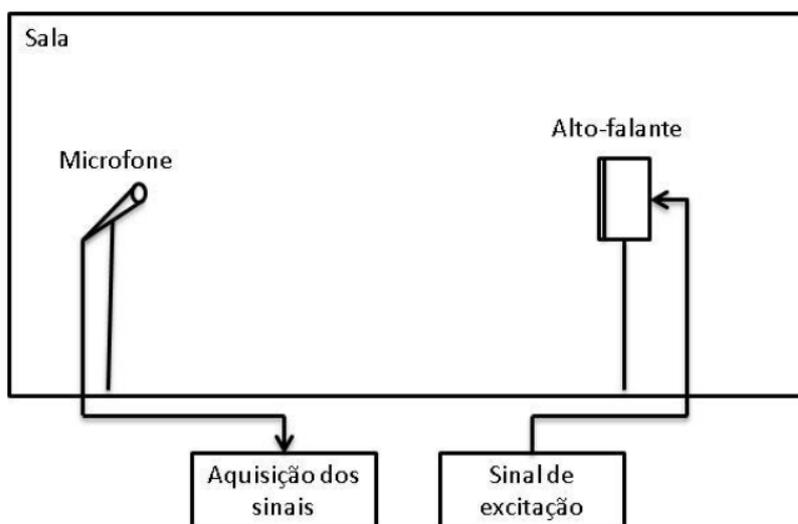
No caso de medição experimental da resposta impulsiva pela técnica dos senos, uma fonte sonora é usada para excitar a sala com um ruído de banda larga (*sweep* ou ruído branco). A resposta é captada por um microfone omnidirecional em uma dada posição (receptor). As respostas, então, são interpretadas com o auxílio de um computador, responsável por processar e calcular os dados.

Através de cálculos que envolvem a pressão sonora medida pelo microfone e o sinal de excitação fornecido ao ambiente, obtém-se a resposta impulsiva.

O sistema de medição pode ser descrito em três etapas principais, como ilustra a Figura 14. A primeira etapa é responsável pela geração, armazenamento e

processamento dos sinais, que inclui o cálculo da RI e dos parâmetros acústicos, os quais são efetuados por um microcomputador. A segunda etapa, responsável pela reprodução e aquisição de sinais sonoros, é implementado por uma placa de áudio. A terceira etapa é caracterizada pela emissão (alto-falante) e captação (microfone) dos sinais.

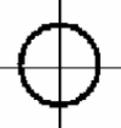
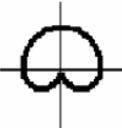
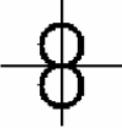
Figura 14: Cadeia típica de medição de RI



Fonte: DALMONTE, 2013.

A medição da resposta impulsiva de uma sala deve ser realizada com microfones omnidirecionais (ISO, 1997). Estes transdutores captam com a mesma intensidade os sinais sonoros provenientes de todas as direções, não privilegiando a captação sonora por nenhuma direção. A Figura 15 ilustra a captação sonora de diferentes microfones.

Figura 15: Padrão de resposta por diferentes microfones

Característica	Omni-direcional	Cardióide	Super-cardióide	Hyper-cardióide	Bi-direcional
Padrão de resposta polar					

Fonte: Cysne, 2000.

Com a obtenção da RI de uma sala, é possível calcular uma série de parâmetros que permitem avaliar a qualidade acústica da sala. Esta ferramenta é especialmente indicada para locais onde a qualidade acústica é fundamental como em teatros, auditórios, igrejas, etc. Hoje em dia, a medição da RI é também empregada para gerar filtros de alta qualidade, utilizados para aplicar uma reverberação realista na produção de trilhas sonoras (para filmes, música, jogos e exposições artísticas) (DALMONTE, 2013).



2. METODOLOGIA DA
P E S Q U I S A

2. METODOLOGIA DA PESQUISA

Ao estudar as questões históricas e arquitetônicas que envolvem o desenvolvimento das tipologias de salas de espetáculos e seus parâmetros acústicos, percebemos a necessidade de explorar o tema e fomentar o tratamento acústico de objetos arquitetônicos como prática projetual nas escolas e escritórios de arquitetura. Especialmente quando analisado a forte influência que ferramentas de desenho assistido têm no mercado arquitetura, observa-se a potencialidade de articulação das ferramentas de desenho com as de análise acústica.

Após levantamento bibliográfico a respeito da evolução morfológica e acústica da arquitetura, dos parâmetros acústicos objetivos e subjetivos para análise de salas de espetáculo, e das ferramentas computacionais existentes e seus respectivos métodos de cálculo, deu-se início a construção da metodologia adotada por esse trabalho.

Como apresentado, as ferramentas computacionais existentes exigem, em sua maioria:

- Alto custo de aquisição inicial e demasiada complexidade de parâmetros acústicos – o que dificulta a simulação;
- Computadores caros e com alto grau de desempenho;
- Mão de obra com conhecimento prévio em acústica.

Algumas ferramentas, entretanto, incorporam métodos de audibilização, o que permite a participação direta, intuitiva e sinestésica do usuário e projetista. Para Kerckhove (2003) a sociedade está mudando de uma cultura de sensibilidade de

leitor, telespectador e espectador, para uma cultura de usuário e interagente. Logo, permitir que o usuário e projetista obtenha uma participação sinestésica durante o processo de projeto pode ser vantajoso para a qualidade do objeto arquitetônico.

Vale salientar que tal prática pode ser exercitada pelas escolas de arquitetura, visto que os estudantes já possuem intimidade com as mídias digitais desde muito jovens²³. A interatividade com meios digitais, portanto, está intimamente ligada ao hábito dos novos usuários.

Nos dias de hoje, a grande maioria dos arquitetos faz uso das máquinas de controle numérico não apenas nas etapas que envolvem criação, como, por exemplo, para produção de modelos para estudo, mas também na fase de construção, na produção de partes do edifício através da tecnologia CAD/CAM.

O termo CAD (*Computer Aided Design*) pode ser traduzido como “Concepção Assistida por Computador”, e trata do processo de projeto que utiliza técnicas gráficas computadorizadas, através de aplicativos de apoio, auxiliando na resolução dos problemas associados ao projeto. Por sua vez, a sigla CAM (*Computer Aided Manufacturing*) pode ser traduzida como “Fabricação Assistida por Computador”, e refere-se a todo e qualquer processo de fabricação controlado por computador (REQUENA, 2007).

A possibilidade de gerar um modelo digital de um objeto arquitetônico que incorpore as informações necessárias para a construção do edifício, redefiniu a

²³ Douglas Ruskoff cunhou o termo “*Screenagers*” para se referir a nova geração de meninos e meninas que já utilizam monitores de imagem como um meio interativo desde muito pequenos e que possuem grande intimidade com videogames, internet e smartphones, por exemplo (KERCKHOVE, 2003; REQUENA, 2007).

relação entre concepção e produção, estabelecendo um fluxo de informação contínua que vai desde as primeiras etapas da concepção do *design* até a construção final, definindo o que Kolaveric (2003) chama de “Digital Contínuo”.

Entendendo que os profissionais da construção civil já estão habituados a utilizarem ferramentas de apoio ao projeto, especialmente às vinculadas a concepção e fabricação assistida por computador, fez-se necessário entender e definir quais ferramentas poderiam articular a tecnologia CAD/CAM com simulações nas áreas de acústica de salas. Avaliando as ferramentas computacionais existentes nas áreas de acústica de salas, fortaleceu-se a opção de trabalhar com a ferramenta BRASS.

2.1. Procedimentos

O estudo visa propor procedimentos para avaliação acústica de salas de espetáculo através da articulação entre ferramentas de desenho assistido e a ferramenta BRASS. Assim, o trabalho foi desenvolvido em duas etapas: na primeira, uma pesquisa bibliográfica e apresentação dos conceitos a respeito da evolução morfológica das salas de espetáculo, dos conceitos de acústica e identificação de ferramentas computacionais existentes e seus métodos de cálculo; na segunda etapa, o Estudo de caso, descrito nos capítulos seguintes, a fim de comprovar os procedimentos adotados e articular as ferramentas computacionais AutoCAD e BRASS.

Passadas as etapas de definição da ferramenta adotada, iniciou-se a capacitação para aprendizado e manipulação no BRASS.

Como ferramenta, ainda em sua fase de programação, não possuía interface gráfica, foi necessário estipular procedimentos de modo a facilitar e alcançar a articulação entre as duas ferramentas computacionais manipuladas. Tais procedimentos foram definidos como resultado final da metodologia aplicada nesse trabalho. A metodologia e suas etapas foram sumarizadas na Figura 16.

Figura 16: Diagrama das etapas metodológicas.



Fonte: O autor (2018).

Foram consideradas as etapas de: (1) *Coleta de informações, Definição dos materiais e inserção dos coeficientes de absorção*, (2) *Construção e simplificação do modelo*, (4) *Análise e interpretação dos dados em paralelo à Validação dos resultados*.

2.1.1. Coleta de informações

A primeira etapa dos procedimentos compreende a interpretação das características arquitetônicas do objeto, bem como a medição, as definições

volumétricas e materiais do ambiente a ser simulado. Ainda, é nessa etapa que se dá a construção e a preparação do modelo a partir do qual será realizada a simulação.

Essa fase implica em digitalização de levantamento arquitetônico (em caso de objeto já existente) ou modelagem tridimensional (em caso de um novo objeto). Optou-se por trabalhar através do software AutoCAD, considerando este o software de desenho assistido mais difundido entre arquitetos e projetistas no Brasil.

Esse procedimento também considera condicionantes climáticas e morfológicas do local. Sabe-se, por exemplo, que a capacidade do ar para absorver os sons é função da umidade relativa do mesmo. Para uma determinada frequência, quanto menor for a umidade relativa, maior será a perda para uma distância prefixada. Além desse fator, influenciam ainda na atenuação dos sons a viscosidade do ar, calor ou radiação e sua capacidade de absorção (SILVA, 2003).

Define-se, portanto, as medidas gerais do volume a ser analisado (profundidade, largura, pé direito, volume e área), e valores de temperatura e umidade.

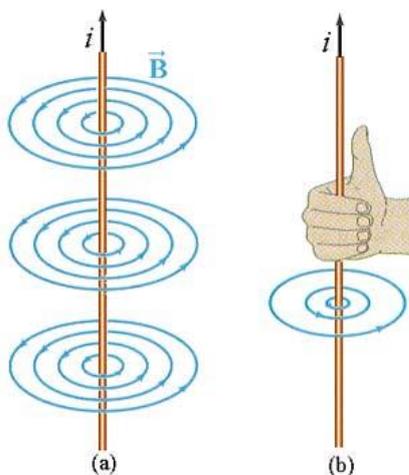
Para definir o trajeto da onda sonora em um recinto fechado, deve-se, portanto, definir suas superfícies incidentes (paredes e obstáculos existentes no recinto) e para obter o controle da parcela de energia refletida, cabe a identificação dos materiais e de seus respectivos coeficientes de absorção.

A construção inicial do modelo, segue, portanto, o segundo procedimento que é o de identificação das superfícies existentes e da caracterização das mesmas.

Nessa etapa foi estabelecido também que para a construção das superfícies em modelo digital CAD e interpretação pelo *software* BRASS, seria necessário que, as faces refletoras das superfícies estivessem voltadas para dentro do recinto modelado.

A partir de uma associação com a Lei de Ampère foi possível construir todas as superfícies voltadas para dentro do recinto fechado. A lei, popularmente conhecida como regra da mão direita define que o polegar da mão direita indica o sentido convencional da corrente elétrica; e os outros dedos, ao envolverem o condutor por onde passa a corrente, dão o sentido das linhas de campo (SILVA, 2003). A Figura 17 exemplifica o funcionamento da regra.

Figura 17: Ilustração do esquema da regra da mão direita.



Fonte: Silva (2003).

Apesar de não haver associação direita, a regra permite informar ao programa BRASS a construção dos planos para que sua face refletora garanta as devidas reflexões dentro do ambiente. Salienta-se que tal estratégia foi adotada para interpretação pela ferramenta BRASS.

2.1.2. Definição dos materiais e inserção do coeficiente de absorção

O tratamento acústico dos recintos, por materiais absorventes do som, age, influenciando na redução do tempo de reverberação, redução do nível interno de ruído e influi quando circunscreve os ruídos produzidos nas zonas próximas de sua origem (SILVA, 2003). A definição dos respectivos coeficientes de absorção, portanto, é imprescindível.

Para evitar a inconfiabilidade dos dados e facilitar a inserção dos dados de entrada, em paralelo foi construída uma biblioteca com diversos coeficientes de absorção para cada faixa de frequência (de 125Hz a 4000Hz). Os dados foram obtidos através da NBR 12179 (ABNT, 1992), catálogos de fabricantes e bibliografia consultada. Depois, sintetizados pela ferramenta Microsoft Excel 2016 em tabelas e agrupados de acordo com sua materialidade ou função. Na Figura 18 é revelado um trecho retirado da tabela completa (pode ser consultada no Anexo A).

Figura 18: Trecho da biblioteca de coeficientes de absorção.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Coefficientes de absorção acústica (NBR 12179 - 1992)						
2	Materiais	Frequências (Hz)					
3		125	250	500	1000	2000	4000
4	Materiais de construção usuais, densos, revestimento, pintura						
5	Reboco áspero, cal	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
6	Reboco liso	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06
7	Teto pesado suspenso (de gesso)	0,02	-	0,03	-	0,05	-
8	Estuque	0,03	-	0,04	-	0,07	-
9	Superfície de concreto	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
10	Revestimento de pedras sintéticas	0,02	-	0,05	-	0,07	-
11	Chapas de mármore	0,01	0,01	0,01	-	0,02	-
12	Revestimento aderente de vidro	0,04	-	0,03	-	0,02	-
13	Revestimento de vidro espaçado a cada 5 cm de parede	0,25	0,20	0,10	0,05	0,02	0,02
14	Vidraça de janela	-	0,04	0,03	0,02	-	-
15	Assoalhos						
16	Tapetes de borracha	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
17	Taco colado	0,04	0,04	0,06	0,12	0,10	0,17
18	Linóleo	0,02	-	0,03	-	0,04	-
19	Passadeira fina porosa	0,03	-	0,17	-	0,40	-
20	Tapete de boucle duro	0,03	0,03	0,04	0,10	0,19	0,35
21	Tapete de 5 mm de espessura	0,04	0,04	0,15	0,29	0,52	0,59

Fonte: A partir de ABNT (1992).

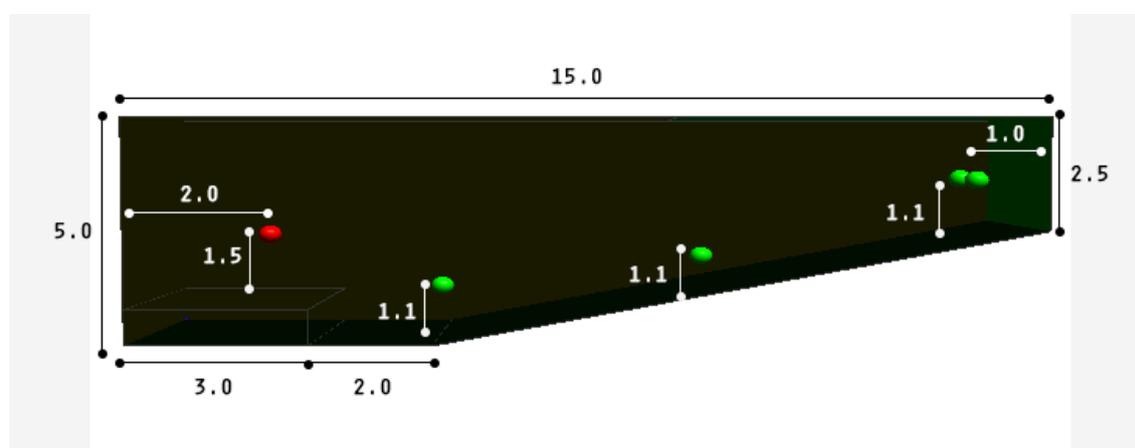
2.1.3. Construção e simplificação do modelo

Com a obtenção dos dados de caracterização e dos coeficientes de absorção dos materiais das superfícies, é possível a construção do modelo simplificado. A construção inicialmente deve ser manipulada na ferramenta AutoCad 3D, suas superfícies devem ser construídas através de uma poligonal. Com as poligonais fechadas é possível definir a criação de um volume. A construção das superfícies foi manipulada pelo comando “*3dpoly*” do AutoCad.

A partir da maquete eletrônica construída, é feita a conversão do arquivo para leitura na ferramenta BRASS.

No arquivo resultado da conversão pelo BRASS, deve-se inserir dados levantados de temperatura, umidade e coeficientes de absorção. Também deve ser especificado a localização das fontes emissoras e dos receptores, considerando as coordenadas cartesianas x,y e z como as distâncias dos pontos no espaço. A Figura 19 exemplifica a locação das coordenadas dos pontos no espaço.

Figura 19: Esquema de locação dos pontos emissores e receptores no espaço



Fonte: O autor (2018).

2.1.4. Análise, interpretação e validação dos resultados

O último procedimento compreende a análise e interpretação dos resultados obtidos pela simulação. Nessa etapa, deve-se analisar os dados de saída do *software*, avaliando os dados quantitativos (expresso em valores numéricos) e os dados qualitativos (expressos nos áudios exportados). Nessa etapa também, é possível ouvir os áudios²⁴ binaurais e ter percepção espacial do ambiente simulado e dos parâmetros subjetivos do comportamento sonoro.

Concomitantemente, a validação é feita através de medição em objeto arquitetônico real, obtendo resultados dos parâmetros de acústica reais e comparados aos obtidos por meio de simulação computacional. A medição foi guiada pelos procedimentos internacionais de medição acústica em salas de espetáculo, estabelecidos pela ISO 3382 (ISO, 1997).

²⁴ Aconselha-se, para melhor compreensão dos resultados, a utilização de fone de ouvido



3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir da construção dos procedimentos, observou-se a necessidade de comprovação das etapas através de experimentação com *estudo de caso*.

A primeira simulação efetuada com o BRASS, tinha como objetivo a manipulação da ferramenta e identificação de possíveis pontos críticos em sua primeira versão. Alguns testes foram realizados com volumetrias hipotéticas a fim de estabelecer intimidade com a ferramenta computacional.

Foram simuladas três salas teste, com uma mesma volumetria, com uma única fonte emissora e com três receptores. Foi experimentado o comportamento sonoro em diferentes configurações e coeficientes de absorção. Os resultados foram exportados em formato de áudio²⁵. Sendo possível a percepção subjetiva de parâmetros como reverberação, brilho e clareza.

A partir desses resultados, deu-se início ao processo de simulação em uma sala real, ainda como exercício de aperfeiçoamento na ferramenta, mas respeitando os procedimentos construídos e adotados para análise através do BRASS e AutoCad.

Por fim, com o domínio da ferramenta e a fim de comprovar a confiabilidade e aplicabilidade dos procedimentos, foi escolhida uma sala de espetáculo com configuração tipo italiano²⁶: a Igreja Batista Itacuruçá no bairro da Tijuca na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. A escolha do objeto deu-se devido à proximidade e facilidade de acesso para medições e gravações.

²⁵ Os áudios podem ser consultados no Apêndice D.

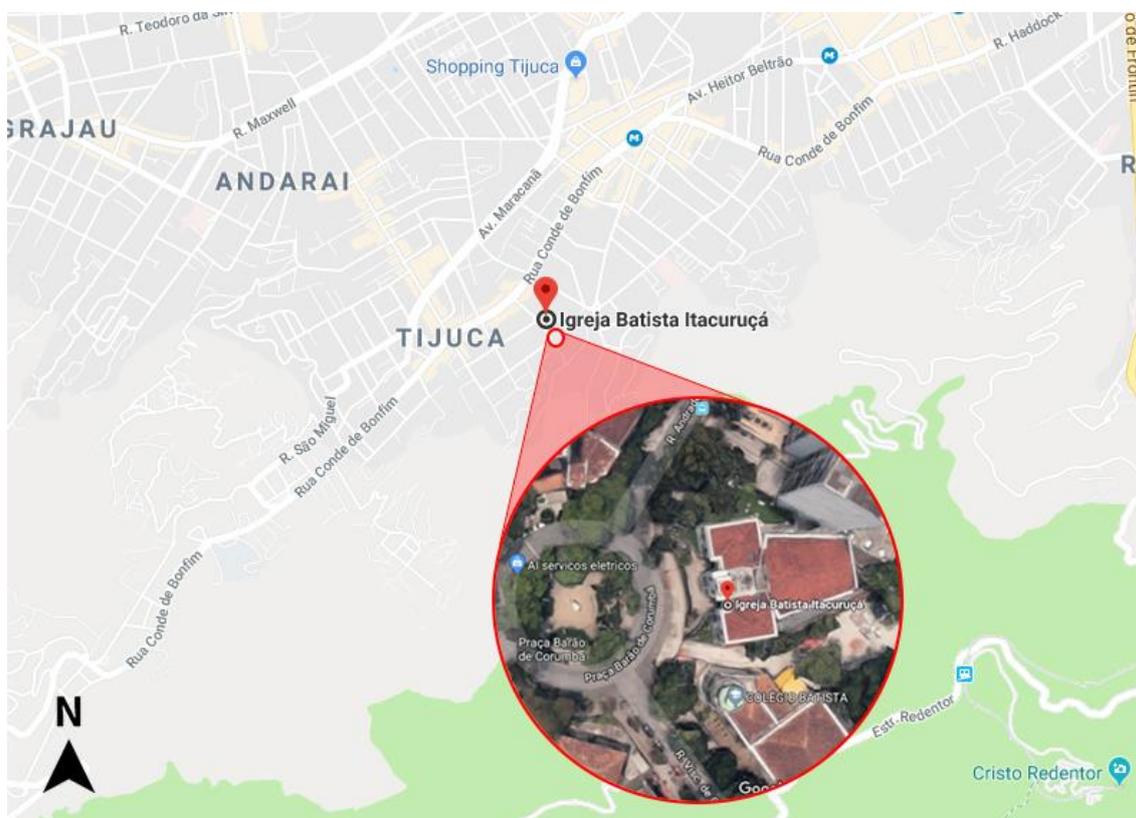
²⁶ Atenta-se que a nomenclatura “tipologia italiana” é usada para designar salas de teatro, entretanto, sua configuração é adotada por diversas tipologias de salas de espetáculo, incluindo igrejas.

Além disso, a sala compreende atividades de um templo religioso que além de exigir a inteligibilidade da fala como parâmetro, exige também uma boa compreensão de instrumentos musicais.

3.1. Estudo de caso: Igreja Itacuruçá

Fundada em 1936, a Igreja Batista Itacuruçá localiza-se no bairro da Tijuca, zona norte do município do Rio de Janeiro. De acordo com a lei estadual complementar número 111, o zoneamento onde a edificação está inserida é classificado como Zona Residencial de subgrupo 2 (sigla ZR-2), caracterizando uma zona predominantemente residencial unifamiliar e multifamiliar (RIO DE JANEIRO, 2011). A Figura 20 localiza o objeto de estudo.

Figura 20: Localização da Igreja Batista Itacuruçá.



Fonte: Adaptado de Google (2018).

A edificação é setorizada em duas zonas: (1) administrativo e salas de educação religiosa e (2) área do templo. A Figura 21 ilustra a fachada frontal da edificação.

Figura 21: Fachada frontal da Igreja.



Fonte: O autor (2018).

Para esse estudo, foi simulado o ambiente do salão principal na área do templo, onde ocorrem os cultos religiosos. A fim de comprovar a confiabilidade dos dados extraídos das simulações computacionais, também foi realizado medição e gravação no local. A partir das comparações entre os dados encontrados pela simulação computacional e os dados reais medidos, pode-se comprovar a viabilidade e confiabilidade da ferramenta BRASS e dos procedimentos propostos por esse trabalho.

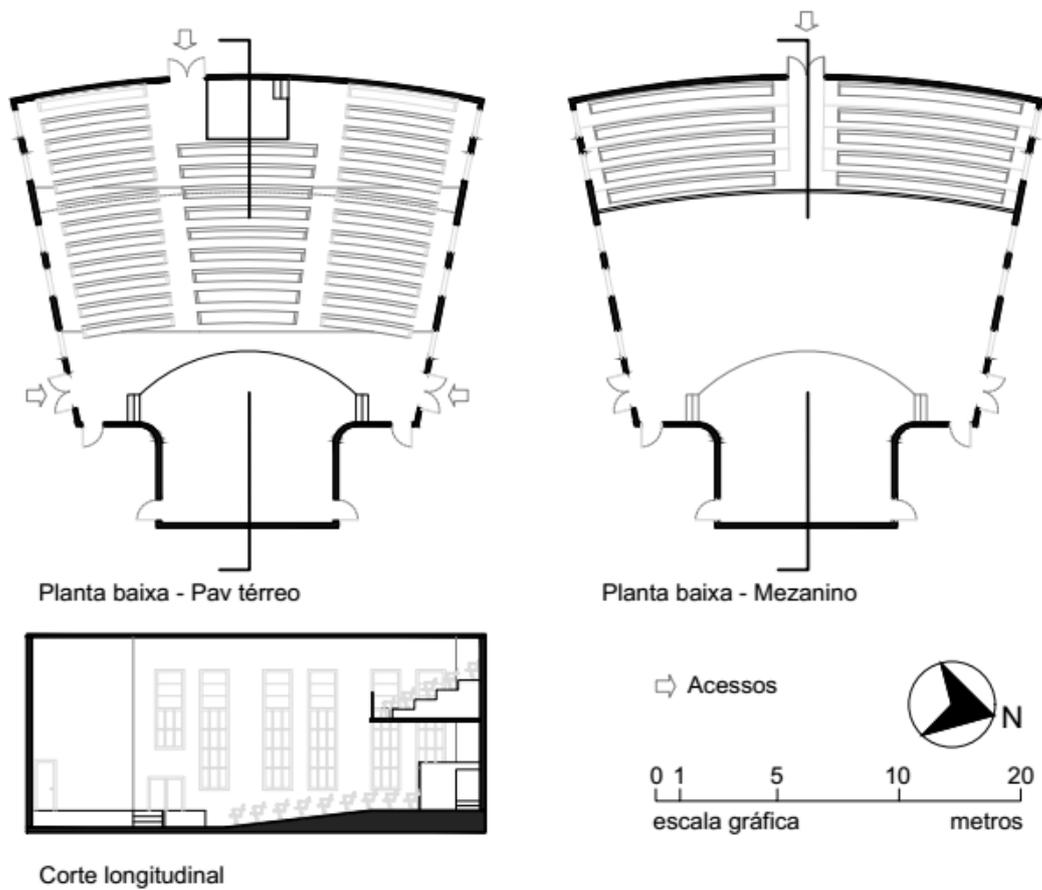
A primeira etapa dentre os procedimentos metodológicos propostos é a **coleta de informações**. Para isso, foi necessário levantamento dimensional do objeto e análise das superfícies e características do recinto. A Figura 22 apresenta o esquema gráfico do ambiente, de modo simplificado. Sua planta tem *forma*

semicircular com *zonas delimitadas* de área de palco e plateia. Possui planta com *sobreposição de planos*: térreo e mezanino. Totaliza cerca de 300m², possui pé direito máximo de 7,9m e quatro acessos (dois laterais, um na área no pavimento de mezanino e um na área de plateia no pavimento térreo). Observa-se, também, um *eixo de simetria longitudinal*. Tais características provêm do traçado dado a salas de espetáculo italianas.

O objeto estudado é caracterizado pela disposição frontal da plateia ao palco. O palco, de tipologia italiana é o mais conhecido e utilizado em diversas salas de espetáculo. Diferenciando-se das salas de teatro, o altar da igreja não possui urdimento, bambolinas ou coxias, entretanto, há ambiente de bastidores laterais com acesso direto do palco. Apresenta também espaço à frente da boca de cena, conhecido nas tipologias teatrais como proscênio.

Os dados dimensionais foram obtidos junto ao projeto arquitetônico disponível e dados complementares foram obtidos através de medições no local. Os dados completos do objeto arquitetônico podem ser consultados no Apêndice A.

Figura 22: Esquema gráfico simplificado da Igreja Itacuruçá.



Fonte: O autor (2018).

O levantamento do espaço físico foi realizado com equipamento de medição a laser modelo DLE 70 Professional da marca BOSCH (Figura 23). As fotografias foram tomadas pela câmera digital Dslr D3400 com lente de 18-55mm da marca Nikon e; para maior angulação da fotografia, pela câmera digital GoPro Hero 5, da marca GoPro.

Figura 23: Ilustração da trena laser DLE 70



Fonte: Bosh (2008).

A Figura 24 apresenta fotografia interna da sala estudada onde é possível identificar as áreas de palco, plateia, circulação e acessos.

Figura 24: Vista no Interior da Igreja.



Fonte: O autor (2018).

As medições foram guiadas pela NBR 10152 (ABNT, 2017) que estabelece procedimentos para execução de medições de níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações e pela ISO 3382 (ISO, 1997) que especifica métodos de medição do tempo de reverberação (TR) e outros parâmetros acústicos para recintos fechado, salas de espetáculo e escritórios.

O reconhecimento do espaço e o levantamento dos dados de volumetria e superfícies ocorreram em dezembro de 2018 no período vespertino.

As superfícies que compõem o objeto também foram identificadas e caracterizadas. Silva (2003) destaca que a caracterização das superfícies é de suma importância para definir o comportamento sonoro no ambiente. A Figura 25 apresenta fotografia do interior do ambiente onde é possível a identificação das principais superfícies. É possível observar a área do mezanino, cabine de controle e área de plateia do pavimento térreo.

Figura 25: Vista interna da Igreja, parede de fundos.



Fonte: O autor (2018).

O Quadro 5 sumariza as superfícies identificadas, classificando com códigos de 1 a 11 (número de diferentes superfícies simplificadas e consideradas nas simulações) e apresenta a nomenclatura utilizada como *layer* na ferramenta de desenho assistido AutoCad 3D.

Quadro 5: Superfícies e nomenclatura dos layers.

Cód.	Superfície	Layer CAD
1	Janelas	Janela
2	Paredes	Parede
3	Forro	Teto
4	Luminárias	Luminárias
5	Portas	Porta
6	Piso taco	Piso
7	Piso carpete	Carpete
8	Plateia vazia	Plateia
9	Cabine	Cabine
10	Tablado	Tablado
11	Mezanino	Balcao

Fonte: O autor (2018).

A partir da identificação e caracterização dos objetos e das superfícies que o compõe, foram atribuídos valores para os coeficientes de absorção nas frequências de 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz e 4000Hz dos diferentes materiais de revestimentos das onze superfícies.

Para os coeficientes de absorção compreendidos nas frequências inferiores à 125Hz e superiores a 4000Hz, adotou-se repetir o valor de coeficiente atribuído à faixa de frequência mais próxima (em faixas de oitava). A adaptação ocorreu devido à dificuldade em encontrar dados disponíveis para as faixas não compreendidas entre 125Hz e 4 kHz.

A identificação dos valores serve para preenchimento dos dados de entrada na ferramenta BRASS e foram, para esse trabalho, sumarizados em uma ficha completa que pode ser consultada no Apêndice B.

A Tabela 2 apresenta os coeficientes de absorção atribuídos a cada superfície e adotados para essa simulação.

Tabela 2: Coeficientes de absorção por faixa de frequência atribuídos na Igreja.

Layer CAD	Materiais	Coeficiente por frequência					
		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Janela	Vidro plano de 3-4mm, com 50 mm de espaço e amortecimento nas bordas	0,23	0,11	0,09	0,01	0,01	0,03
Parede	Reboco liso	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06
Teto	Teto pesado suspenso (de gesso)	0,02	0,02	0,03	0,02	0,05	0,05
Luminárias	Vidro	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Porta	Portas de madeira, fechadas	0,14	0,14	0,06	0,06	0,10	0,10
Piso	Taco colado	0,04	0,04	0,06	0,12	0,10	0,17
Carpete	carpete 5mm de espessura	0,04	0,04	0,15	0,29	0,52	0,59
Plateia	Cadeira de assento dobradiço, de madeira vazia	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08	0,05
Cabine	Painéis de madeira de 6 mm armação de madeira	0,58	0,22	0,07	0,04	0,03	0,07
Tablado	Madeira compensada de 3 mm, a 50 mm da parede, espaço vazio	0,25	0,34	0,18	0,10	0,10	0,06
Balcao	Reboco liso	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06

Fonte: A partir de ABNT (1992).

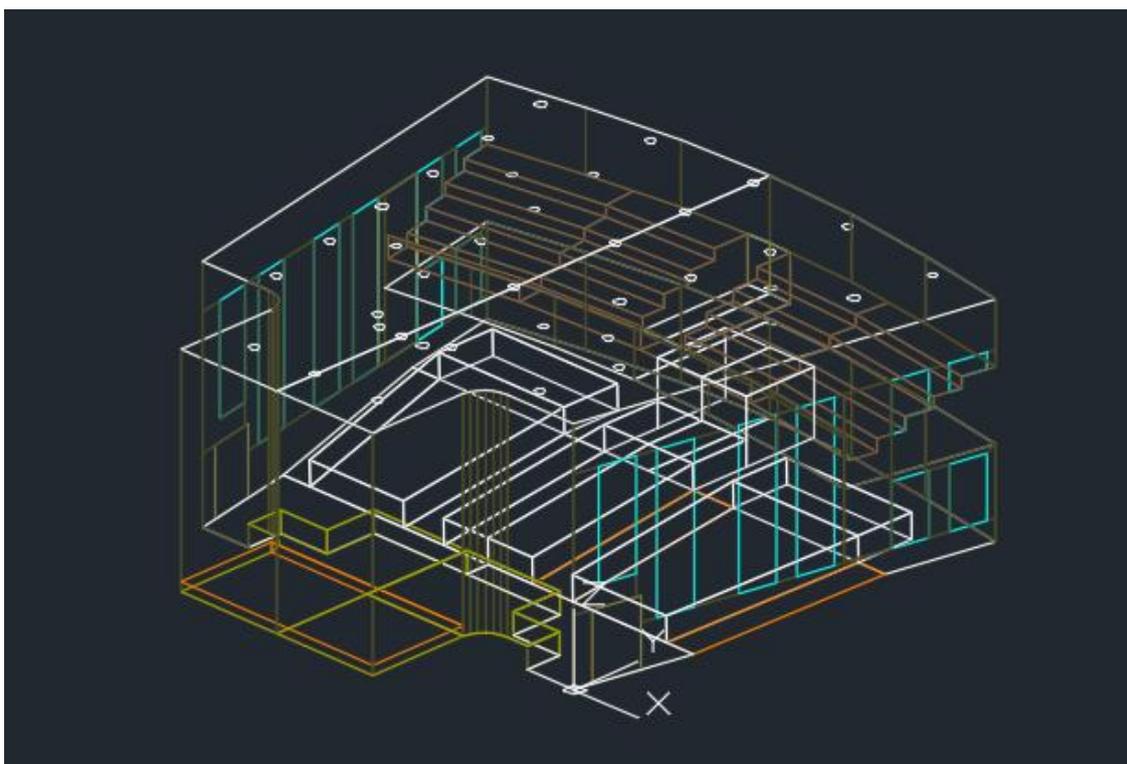
Os valores dos coeficientes de absorção considerados e selecionados para compor a base de dados, foram obtidos através de levantamento bibliográfico, considerando normas técnicas, catálogos, manuais e bibliografia específica.

Com a identificação das superfícies e das características que compõe o volume da igreja, foi possível gerar digitalmente a maquete eletrônica simplificada através da ferramenta AutoCAD 3D.

Como destaca Moreira (2012), através de modelos simplificados interpretados por ferramentas computacionais é possível incluir recursos avançados em simulações computacionais em arquitetura e calcular, por exemplo, análises acústicas com confiabilidade.

A Figura 26 representa a volumetria simplificada construída através da ferramenta AutoCad 3D.

Figura 26: Captura de tela da ferramenta AutoCad e maquete virtual simplificada da Igreja



Fonte: O autor (2018).

Com a construção do modelo simplificado, fez-se necessário a importação do arquivo pela ferramenta BRASS. Para isso, foi feita a conversão dos parâmetros

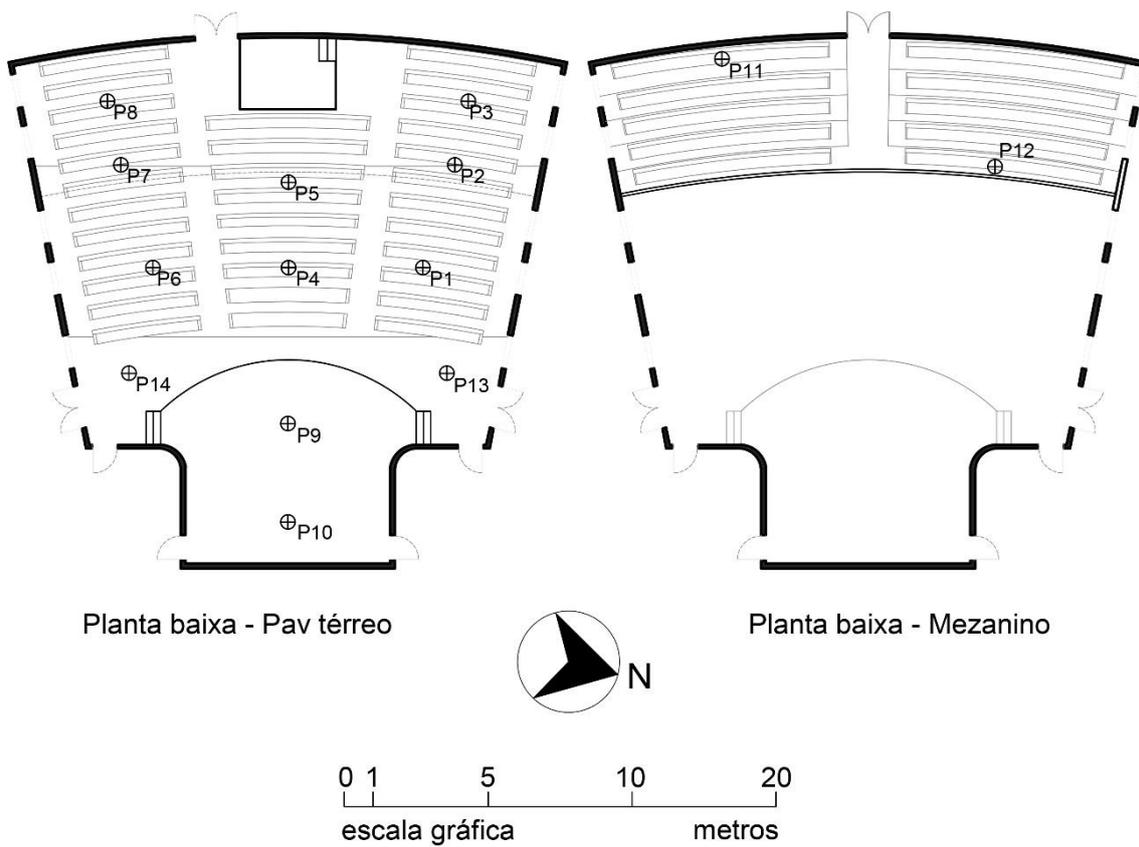
incorporados na volumetria para arquivo de texto (extensão *.txt*). A própria ferramenta BRASS pode fazer essa conversão, apresentando dados e parâmetros de acústica e da volumetria em formato textual²⁷.

Com a conversão dos parâmetros da maquete digital em arquivo textual, foram realizadas as inserções dos dados de: umidade e temperatura. Em seguida, com os dados de entrada já definidos, deu-se sequência à definição e locação das fontes e receptores no espaço virtual. Optou-se por locar 14 (quatorze) receptores no ambiente e duas fontes emissoras, de forma a cobrir de maneira mais homogênea o espaço arquitetônico e obter uma sonoridade mais confiável do espaço. Todos os pontos foram posicionados a 1,50 metros de altura e em uma distância mínima das paredes de 1,50 metros. Os pontos são discernidos na Figura 27. Para maior detalhamento dos dados, consultar Apêndice C.

Logo, a interpretação dos dados de entrada pela ferramenta BRASS se converteu em uma maquete tridimensional que possibilita uma melhor compreensão do espaço simulado, apresentado na Figura 28.

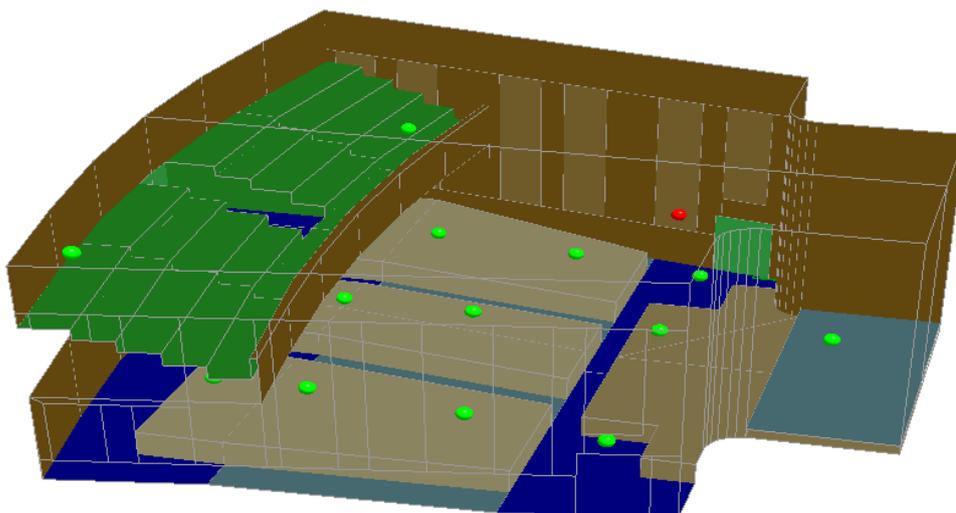
²⁷ Para preservar os direitos da ferramenta que ainda se encontra em sua versão de programação, os dados completos não serão apresentados nesse trabalho. Todavia, o resumo dos dados inseridos e interpretados, podem ser consultados no Apêndice B.

Figura 27: Localização dos pontos receptores.



Fonte: O autor (2018).

Figura 28: Maquete eletrônica simulada pela ferramenta BRASS.



Fonte: O autor (2018).

Com os pontos locados, a definição dos coeficientes de absorção das superfícies e a maquete digital simplificada construída, é possível a verificação de parâmetros sonoros objetivos e subjetivos. Através da exportação de áudios binaurais, também é possível obter uma análise do espaço, criando uma experiência sinestésica. O objeto alcança, portanto, a última etapa dos procedimentos: *a análise e validação dos resultados*.

A fim de possibilitar a comparação com os parâmetros obtidos através da simulação computacional, e, validar o uso da ferramenta BRASS e dos procedimentos adotados, foi realizada a medição e gravação no espaço real. A campanha de medição ocorreu em janeiro de 2018, no período vespertino, iniciando-se às 14:30 com duração média de quatro horas. Foi identificada temperatura média interna no ambiente de 27°C e umidade relativa (UR) de 64%, dados que foram considerados na inserção dos parâmetros para a simulação computacional.

As medições ocorreram de modo a permitir que as características de transmissão acústica entre o conjunto fonte-receptor sejam descritas pela resposta impulsiva (RI) da sala (SARRIS; CAMBOURAKIS, 2003).

Para o cálculo da resposta impulsiva, foi utilizada a técnica de varredura dos senos. Nesse método, a excitação na sala foi empregada através da reprodução de um sinal de banda larga em um alto-falante em dois pontos da sala (lado direito e esquerdo), como apresentado na Figura 29.²⁸ A captura do sinal sonoro

²⁸ Para consulta do detalhamento da locação dos pontos emissores e receptores, olhar Apêndice C.

se dá através de um microfone omnidirecional, que foi locado nos quatorze diferentes pontos considerados na simulação.

Para essa medição, o modelo utilizado foi o Microfone para Medição Behringer ECM8000 Ultra Linear. A Figura 29 apresenta o objeto no ambiente real.

Figura 29: Microfone omnidirecional em medição.



Fonte: O autor (2018).

De acordo com a ISO 3382 (ISO, 1997), a posição do microfone não deve ficar muito próxima a fonte de som de forma a não permitir uma grande influência do som direto. Aconselha-se que esse valor não seja inferior a 1,50 metros.

As medições foram realizadas respeitando a ordem numeral dos pontos enunciados anteriormente, que foram nomeados de P01 a P14, respectivamente. As fontes sonoras foram nomeadas L e R, referenciando-se ao homônimo em inglês de esquerda e direita.

Foram realizadas vinte e oito gravações, sendo 14 a percepção da relação receptor-Fonte L e 14 a relação receptor-Fonte R. As trinta gravações foram nomeadas de acordo com a numeração do ponto e direção da fonte sonora, iniciando-se em P01-L; P01-R; P02-L; P02-R; P03-L; P03-R, e assim sucessivamente.

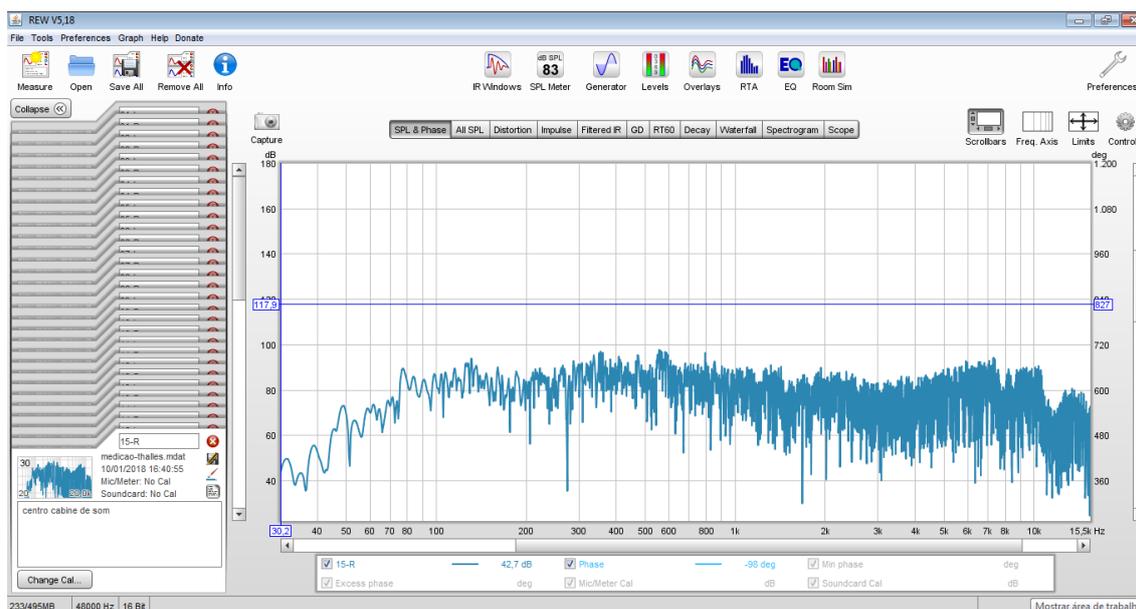
Com o processamento dos sinais foi possível o cálculo dos parâmetros acústicos. O processamento foi auxiliado pela interface de áudio *M-Audio Fast Track Pro*, apresentada na Figura 30, e pela interpretação dos dados pela ferramenta computacional comercial *REW – Room EQ Wizard* em sua versão 5.1. A REW é uma ferramenta computacional que auxilia na medição e análise sonora de salas, calculando a partir da RI de banda larga, diversos parâmetros, como T20, T30 e EDT. Sua interface é ilustrada na Figura 31.

Figura 30: Interface de áudio M-Audio Fast Track Pro



Fonte: Dalmonte (2013).

Figura 31: Captura de tela da interface da ferramenta REW.



Fonte: REW (2018).

Os parâmetros acústicos obtidos experimentalmente através da medição foram tratados e sumarizados. De forma geral, os parâmetros podem ser divididos em critérios de tempo e de energia, e estão associados à forma como a energia sonora evolui ao longo do tempo dentro da sala analisada (PEREIRA, 2010). O processamento envolvido no cálculo dos parâmetros acústicos foi realizado com o auxílio do programa *MatLab*. O Matlab (Matrix Laboratory) é um programa produzido pela *The Mathworks Inc* que trata matrizes e números complexos.

Para esse estudo, o parâmetro de maior contribuição foi o Tempo de Reverberação, descrito anteriormente e obtido através da ponderação dos valores de T30 exportado pela ferramenta REW. Com ele, foi possível analisar a participação dos materiais de absorção especificados para as superfícies e o comportamento sonoro da sala.

Os valores de tempo de reverberação encontrados nos pontos medidos foram sumarizados e comparados aos encontrados nas simulações computacionais pela ferramenta BRASS.

3.2. Análise dos resultados

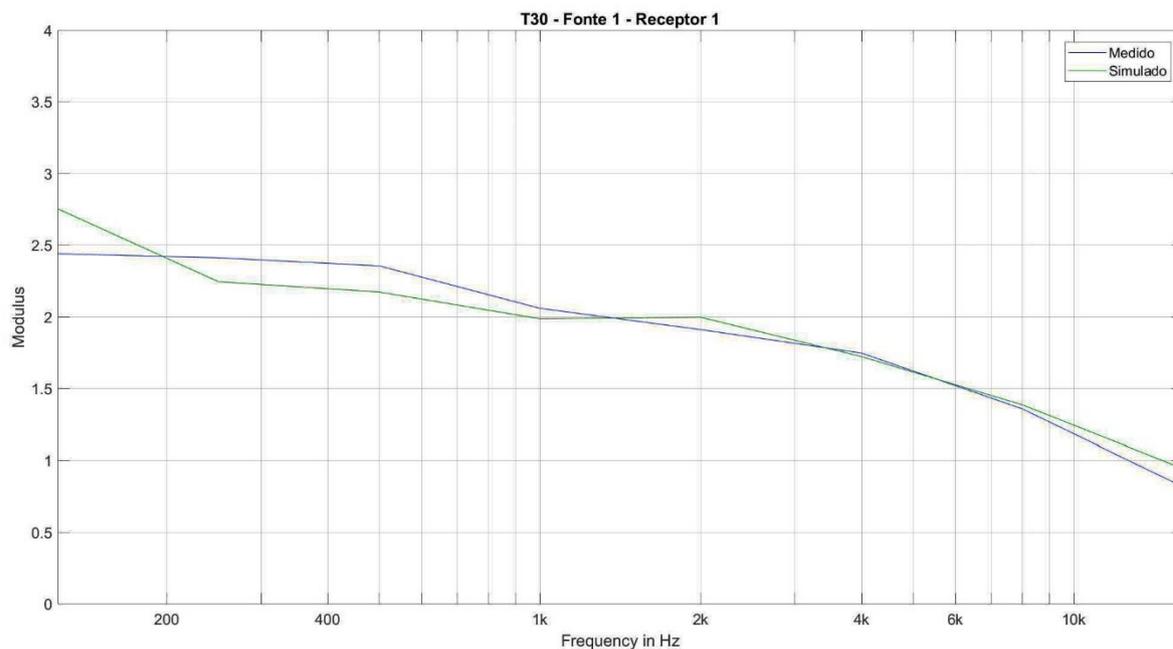
Para chegar a um resultado único de parâmetros referentes a cada posição foi preciso fazer no MatLab a média aritmética das respostas impulsivas e a partir da resposta impulsiva média, extrair os parâmetros analisados.

Os resultados obtidos neste trabalho são os parâmetros acústicos calculados a partir da RI medida pelo método de varredura exponencial de senos. Os resultados das medições foram comparados com os extraídos pela maquete virtual e simulação pela ferramenta BRASS. A comparação desses resultados serviu para validação do *software* BRASS.

3.2.1. Tempo de Reverberação

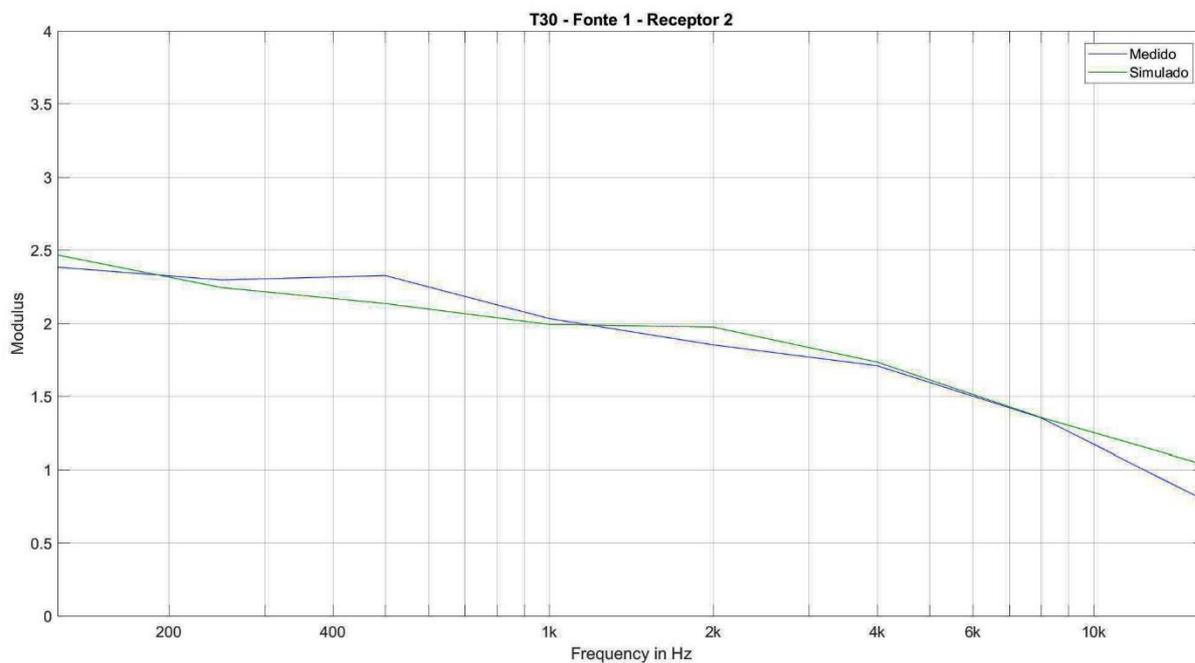
Os valores de T20, T30 E T40 são os RT60 calculados a partir de uma extrapolação linear tomada nos primeiros 20 dB, 30dB ou 40 dB de decaimento, respectivamente (FIGUEIREDO, 2005). Os valores de T30 encontrados nas simulações e nas medições foram comparados através de curvas expressas nas Figuras 32 a 45. Nas curvas, o eixo x é dado pelas frequências em Hz.

Figura 32: T30 para P01.



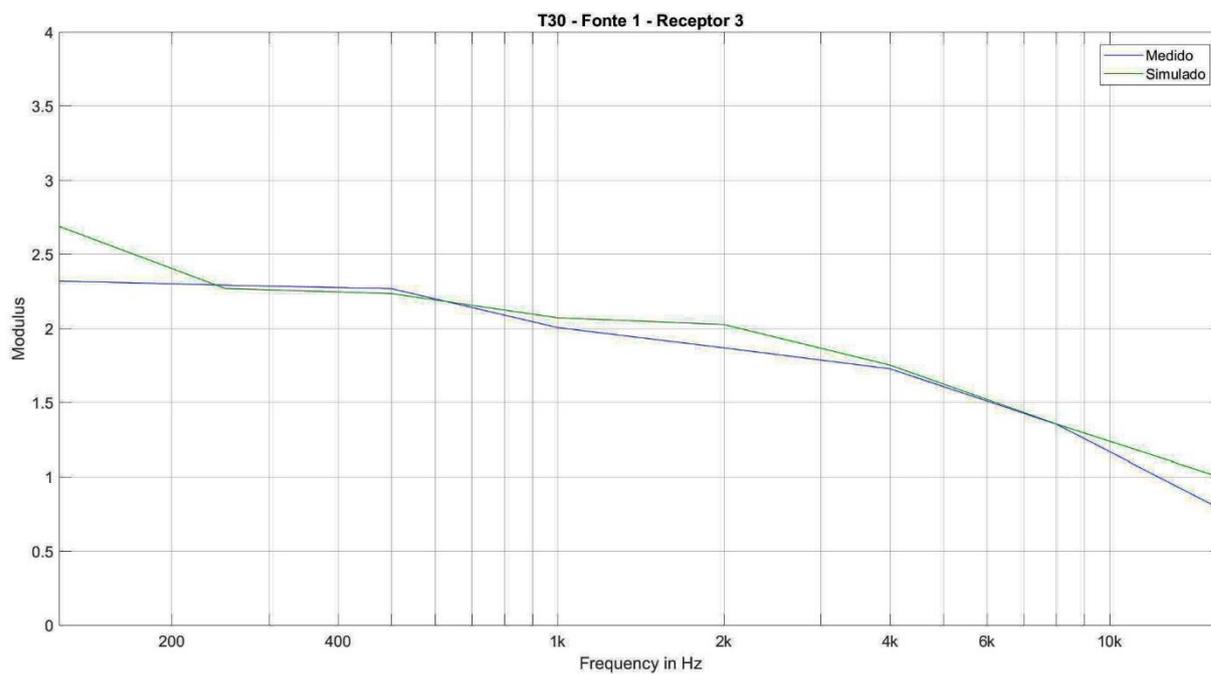
Fonte: O autor (2018).

Figura 33: T30 para P02.



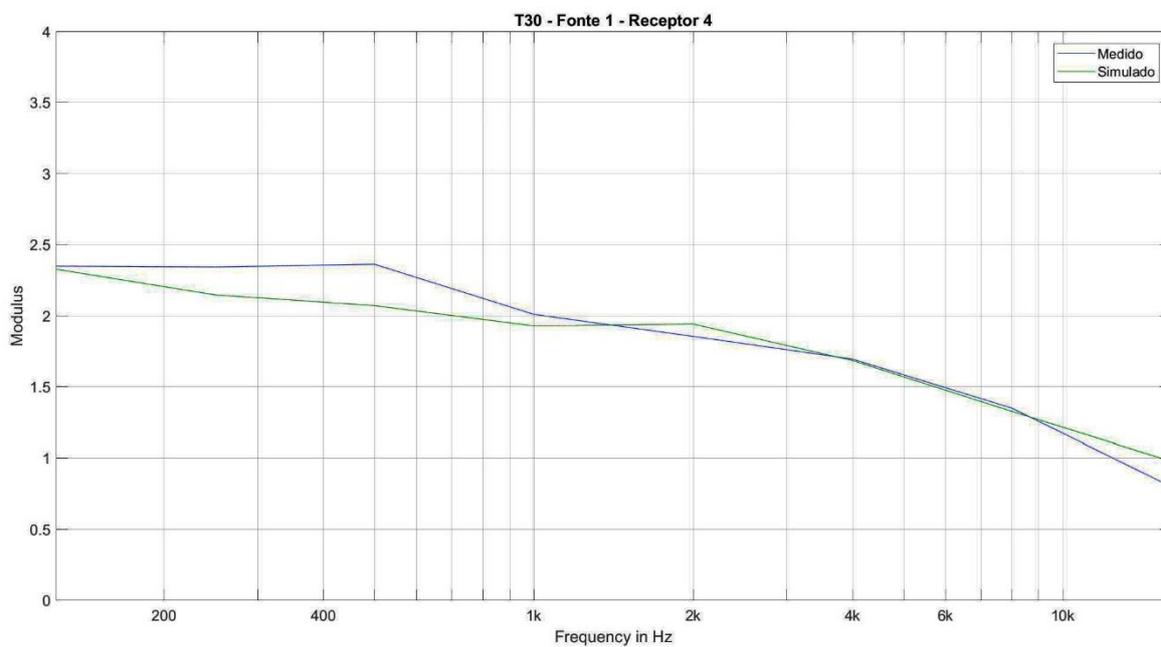
Fonte: O autor (2018).

Figura 34: T30 para P03.



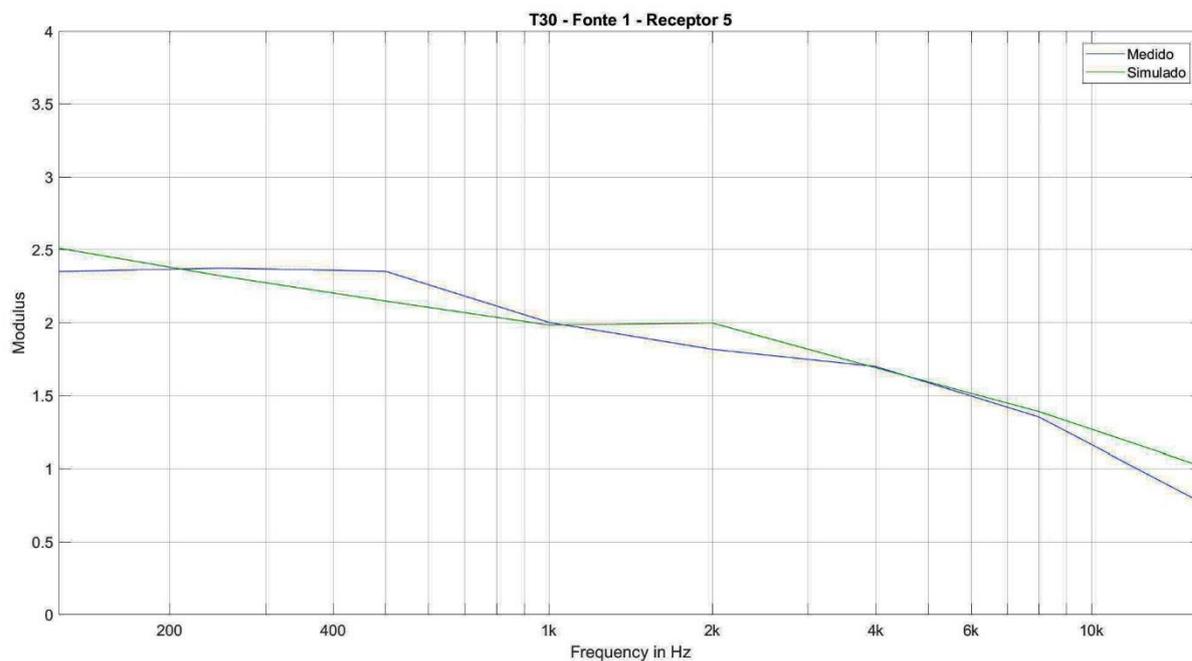
Fonte: O autor (2018).

Figura 35: T30 para P04.



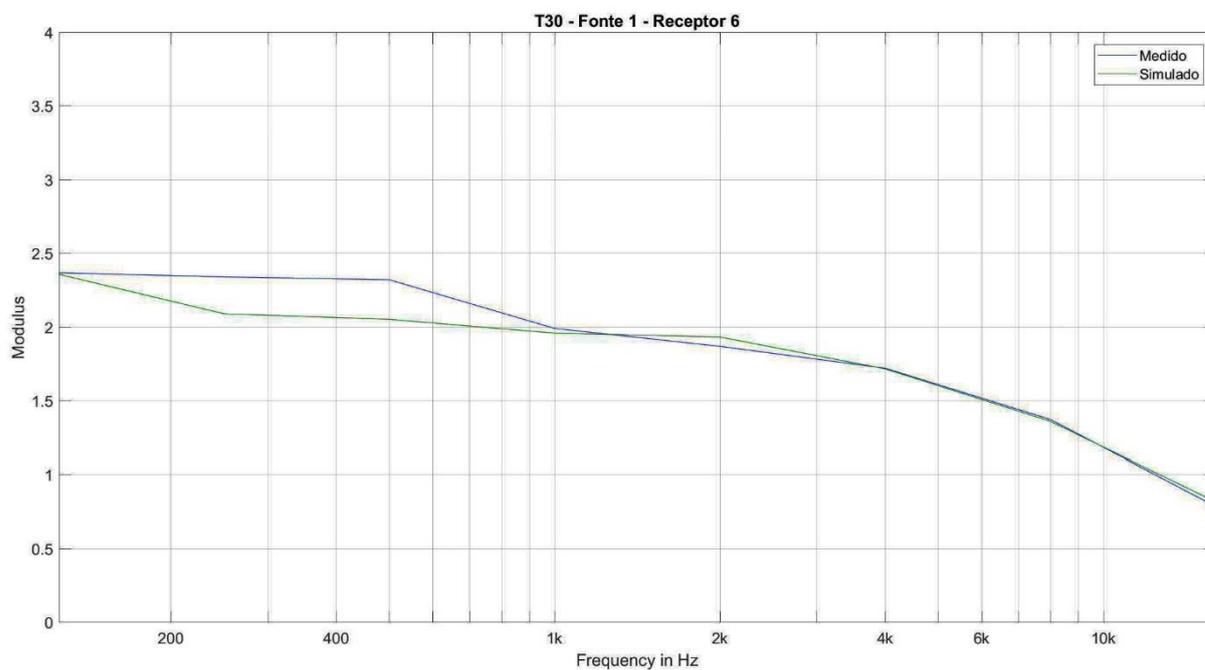
Fonte: O autor (2018).

Figura 36: T30 para P05.



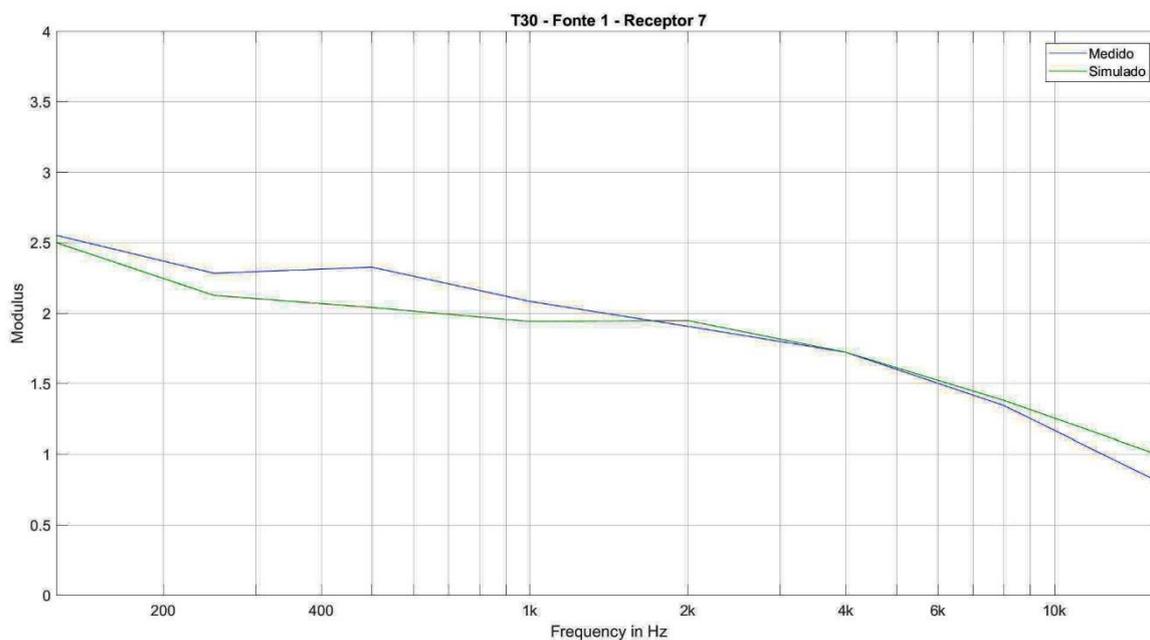
Fonte: O autor (2018).

Figura 37: T30 para P06.



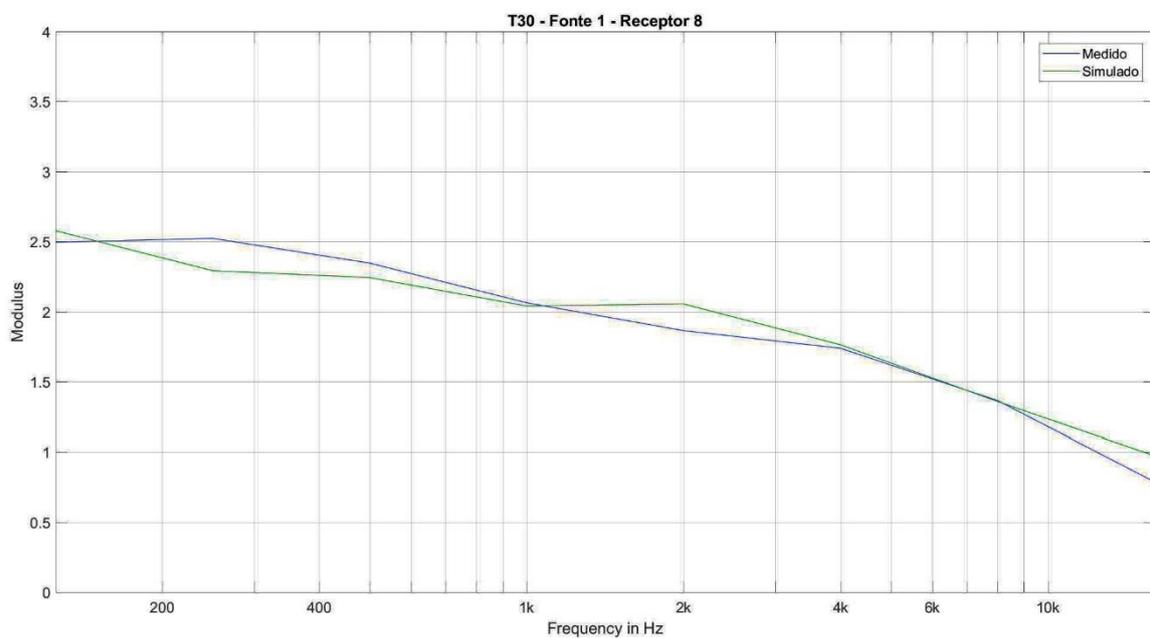
Fonte: O autor (2018).

Figura 38: T30 para P07.



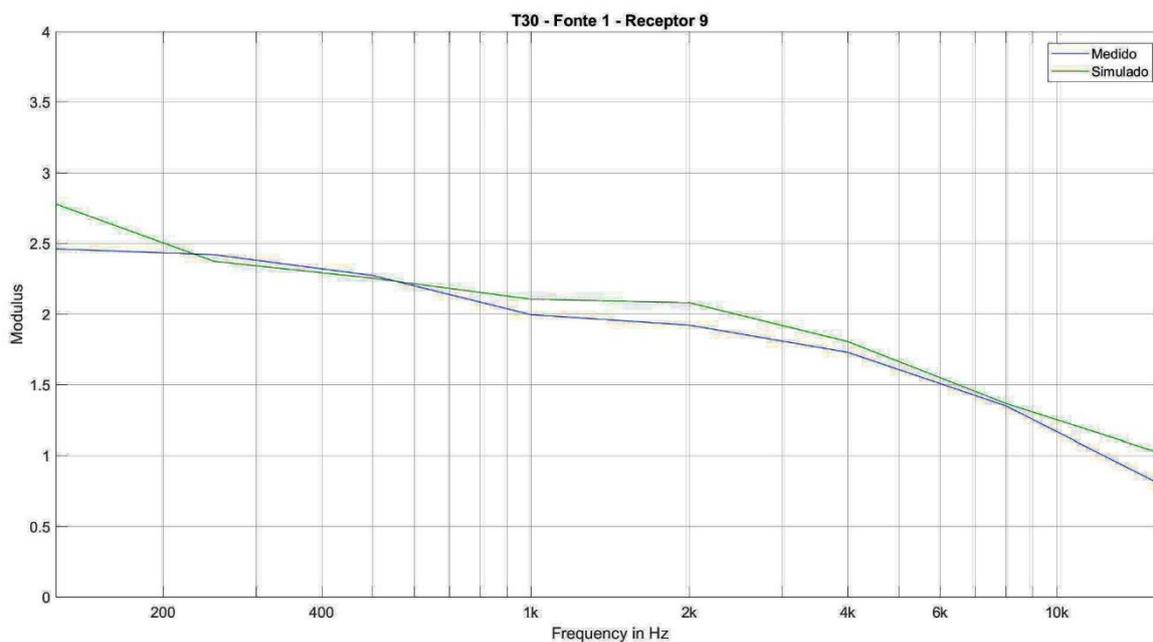
Fonte: O autor (2018).

Figura 39: T30 para P08.



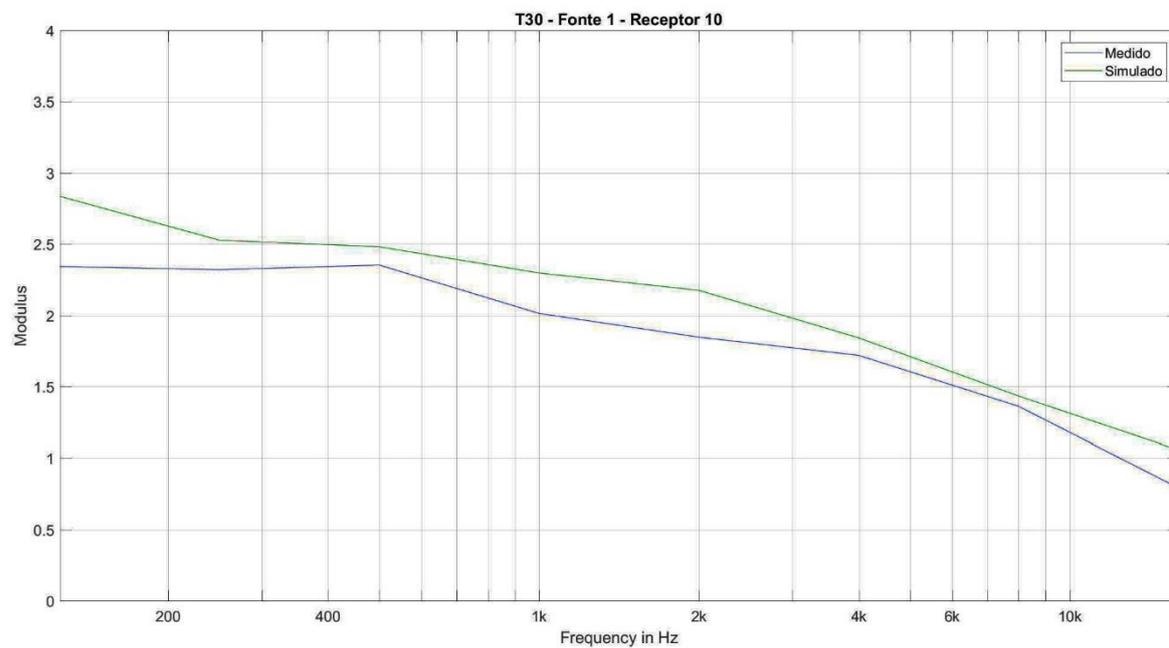
Fonte: O autor (2018).

Figura 40: T30 para P09.



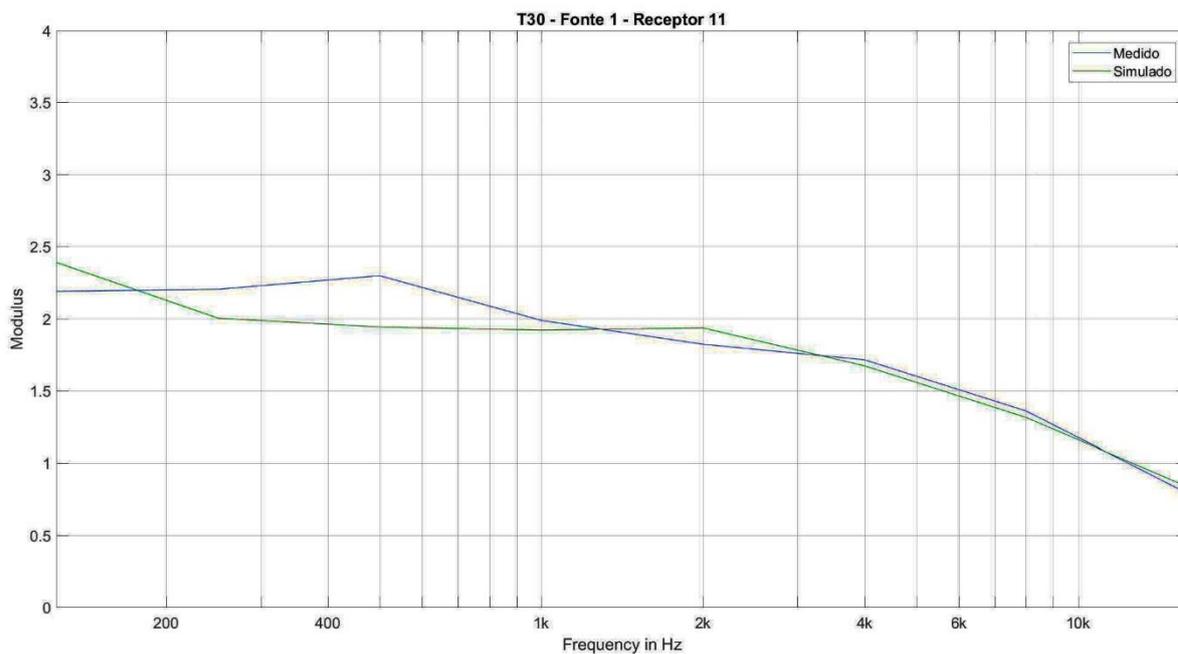
Fonte: O autor (2018).

Figura 41: T30 para P10.



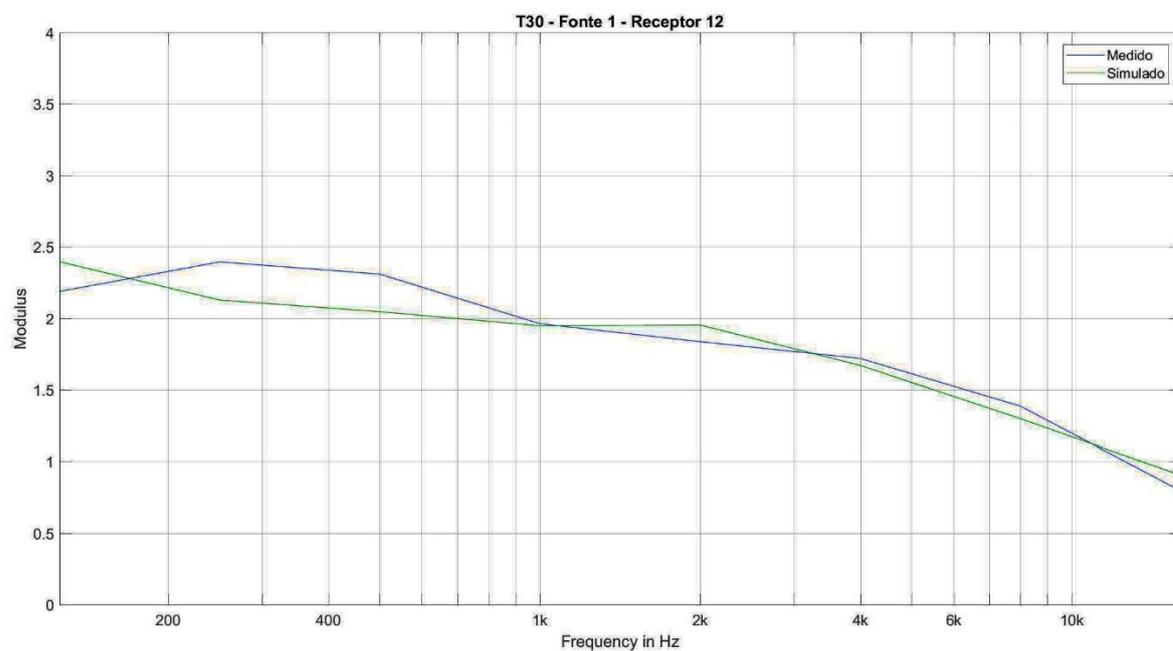
Fonte: O autor (2018).

Figura 42: T30 para P11.



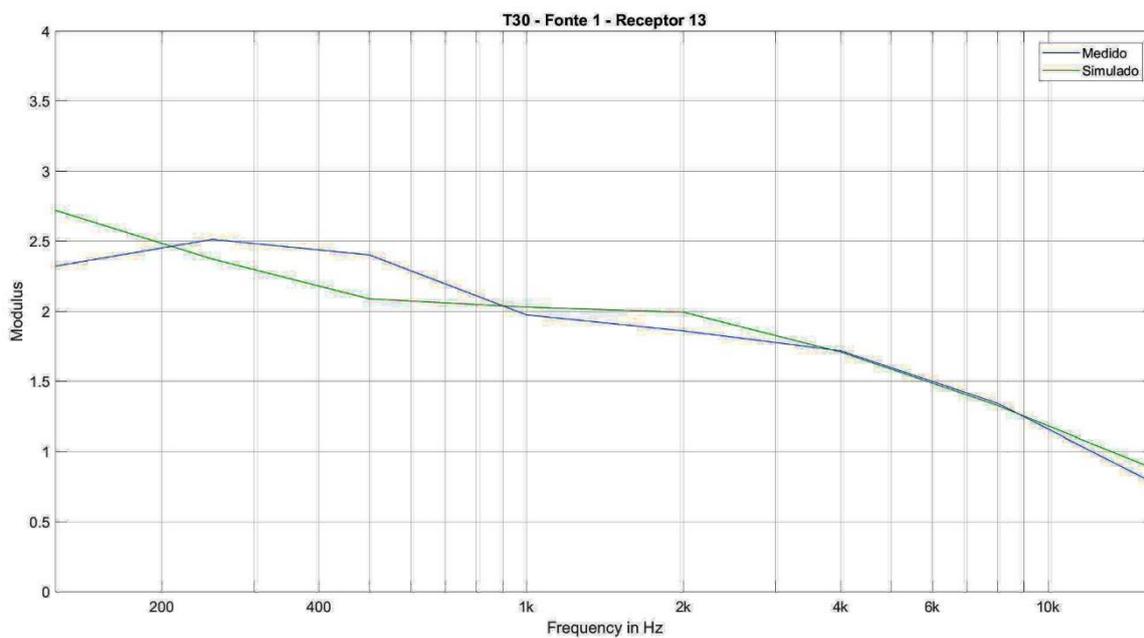
Fonte: O autor (2018).

Figura 43: T30 para P12.



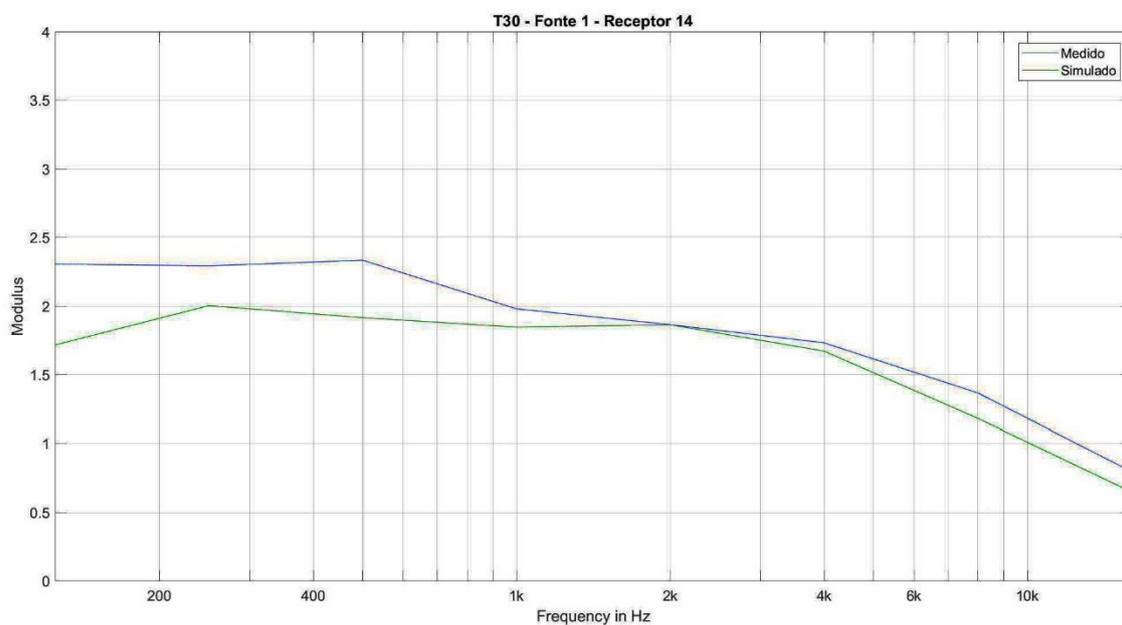
Fonte: O autor (2018).

Figura 44: T30 para P13.



Fonte: O autor (2018).

Figura 45: T30 para P14.



Fonte: O autor (2018).

Observa-se que, comparando as curvas de resultados entre os dados obtidos através do *software* BRASS e os simulados, encontram-se valores bastante semelhantes em todas as frequências. Variações mais significativas foram encontrados em comparações nas baixas frequências.

Os valores do tempo de reverberação encontrados comprovam a eficácia do BRASS em simular computacionalmente o comportamento sonoro de uma sala. Entretanto, observadas algumas variações dos valores, fez-se necessário a análise de outros parâmetros.

Observa-se ainda que, os valores encontrados no tempo de reverberação indicam um ambiente arquitetônico pouco absorvente, com alto índice de reverberação. Isso pode ser explicado pela configuração formal da igreja: pé direito alto, teto plano, grande volume e grandes áreas de superfícies com baixo coeficiente de absorção.

As superfícies em alvenaria rebocada e pintada compõem grande parte do volume arquitetônico. Devido ao baixo coeficiente de absorção dessa materialidade, identificam-se altos valores no tempo de reverberação dos pontos. No caso de igrejas, esse valor pode criar uma sensação de dramaticidade na percepção sonora da sala, mas dificultar na clareza da mensagem emitida.

3.2.2. Clareza

O parâmetro C80 mede a razão entre a energia acústica que chega em um ponto de captação nos primeiros 80 milissegundos e a energia remanescente. Essa distribuição de energia ao longo do tempo é determinada por características peculiares de cada sala.

O RT60 informa quanto tempo dura o decaimento, mas o C80 informa como esse decaimento se dá. Para um mesmo tempo de decaimento podemos ter várias possibilidades de distribuição de energia ao longo do tempo, ou seja, para um mesmo valor de RT60 há diversos valores possíveis de C80 (FIGUEIREDO, 2005).

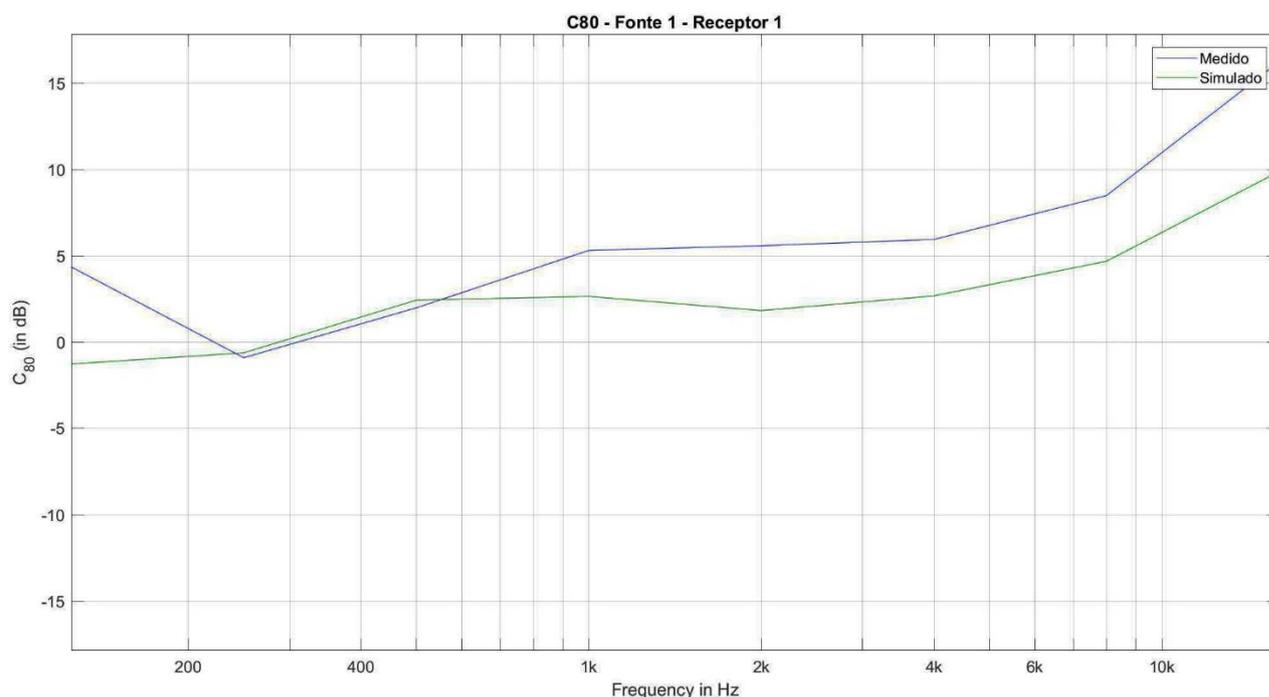
Os valores obtidos em cada parâmetro nos permitem fazer uma avaliação da qualidade acústica da sala medida. Os valores sugeridos de clareza para uma sala sujeita ao som de uma música de câmara é de 3dB e para sinfonia é de -1dB (ROSSING, 2007). No caso dos resultados obtidos, se analisadas as curvas dada pela medição pode-se inferir que, em situações como a do receptor 4 (P04), receptor 6 (P06), receptor 7 (P07), receptor 9 (P09) e receptor 15 (P015) há níveis de clareza abaixo do recomendado na maioria das frequências, especialmente nas baixas e médias frequências. Já para os valores extraídos pela simulação computacional nesses pontos, apresenta-se uma curva de valores dentro do recomendado.

Essa discrepância dos valores no C80 medido e simulado pode ser justificado pela direcionalidade das fontes. A norma ISO 3382 (1992) convencionou o uso de uma fonte sonora omnidirecional para o cálculo dos parâmetros acústicos. Na realização dos trabalhos de campo tal fonte não estava disponível, por isso foi utilizada uma fonte direcional (alto-falantes). Arruda e Guedes (2000) e Figueiredo (2005) destacam que alguns parâmetros são mais sensíveis à direcionalidade da fonte. O parâmetro RT60 sofre pouca variação, mas o parâmetro C80 sofre uma variação maior.

Ainda que as caixas acústicas se aproximem da omnidirecionalidade para baixas frequências (difusas), com o aumento da frequência elas se tornam gradativamente direcionais. Isso pode explicar os relativos altos valores de clareza em altas frequências (especulares) que é observado nos resultados, uma vez que, nessa faixa, a sala como um todo é bem menos excitada do que quando exposta à difusão de uma fonte omnidirecional. Assim, é de se esperar que no estudo de caso o microfone capte menos energia reverberante em altas frequências, gerando valores maiores de C80.

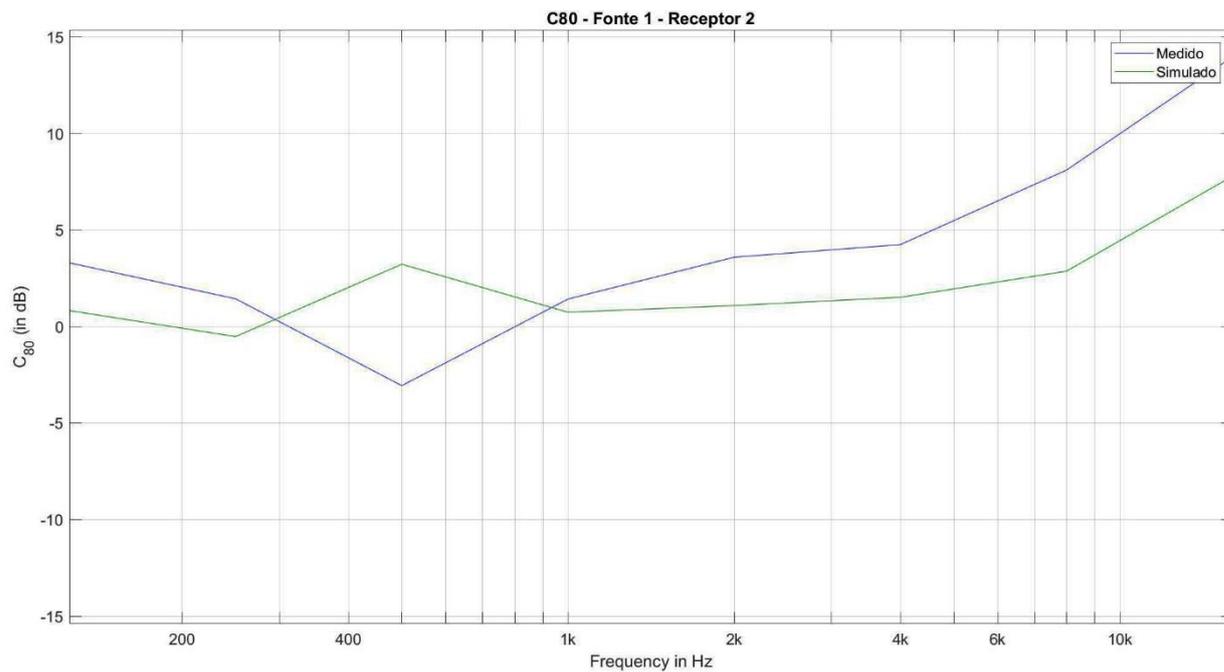
Os resultados obtidos foram expressos nas Figuras 46 a 60.

Figura 46: C80 para P01.



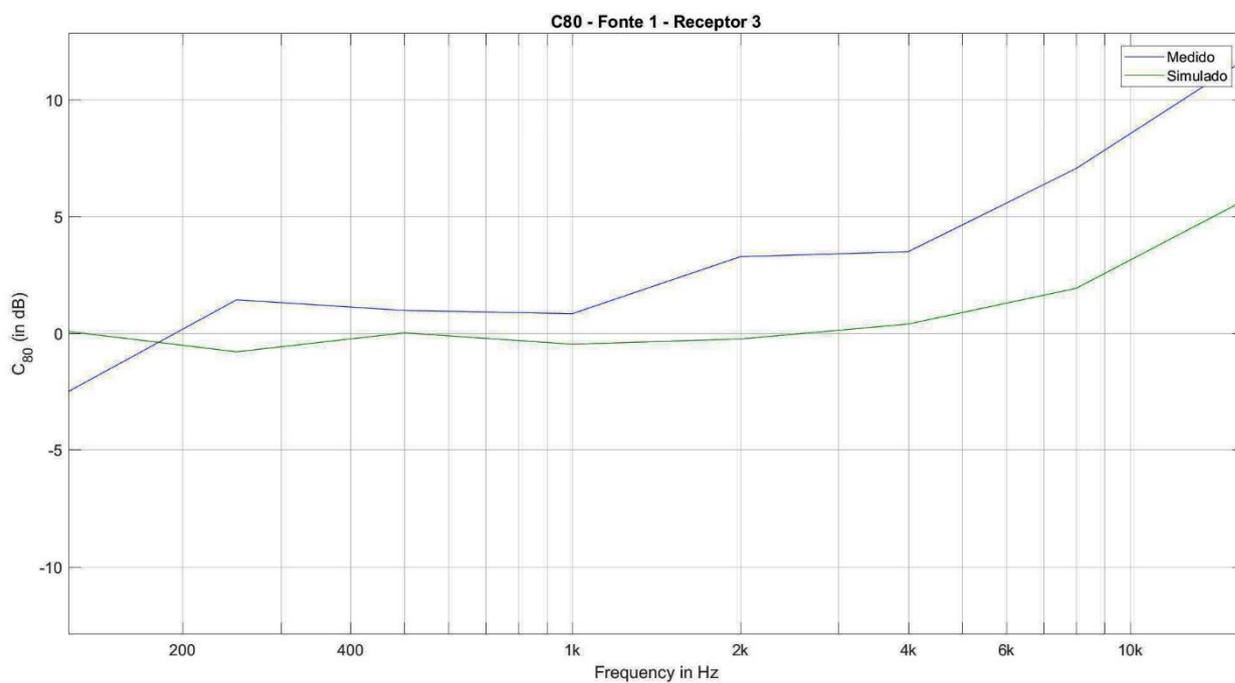
Fonte: O autor (2018).

Figura 47: C80 para P02.



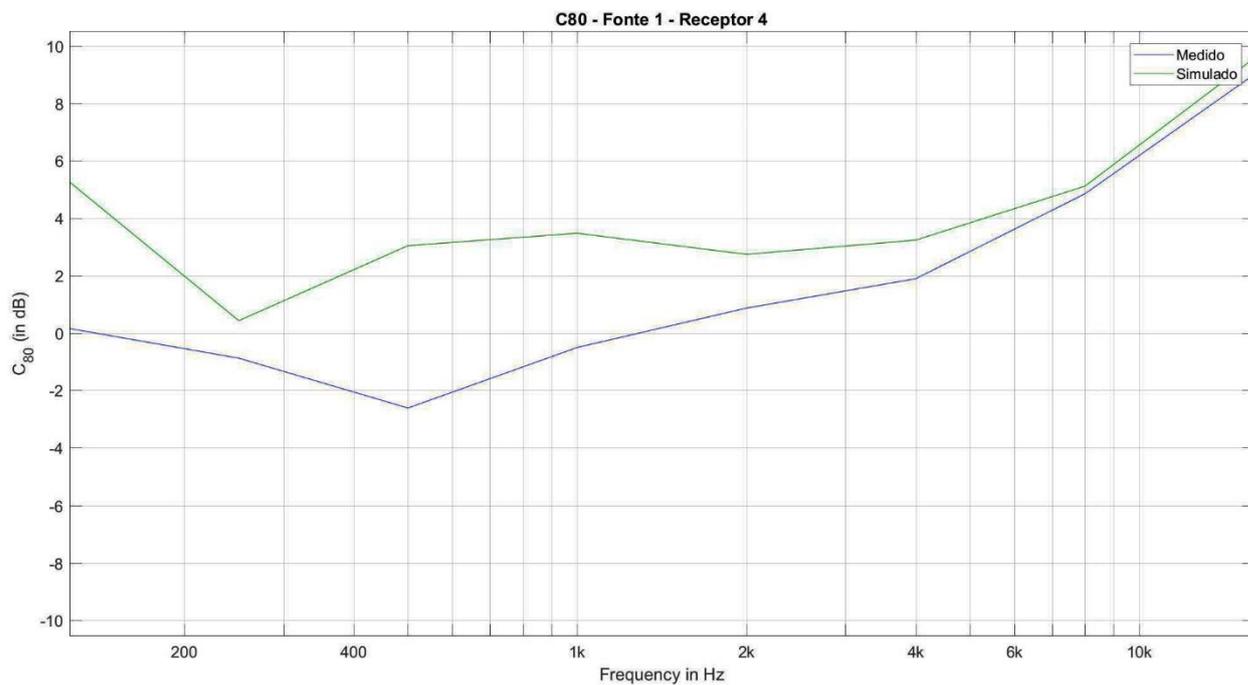
Fonte: O autor (2018).

Figura 48: C80 para P03.



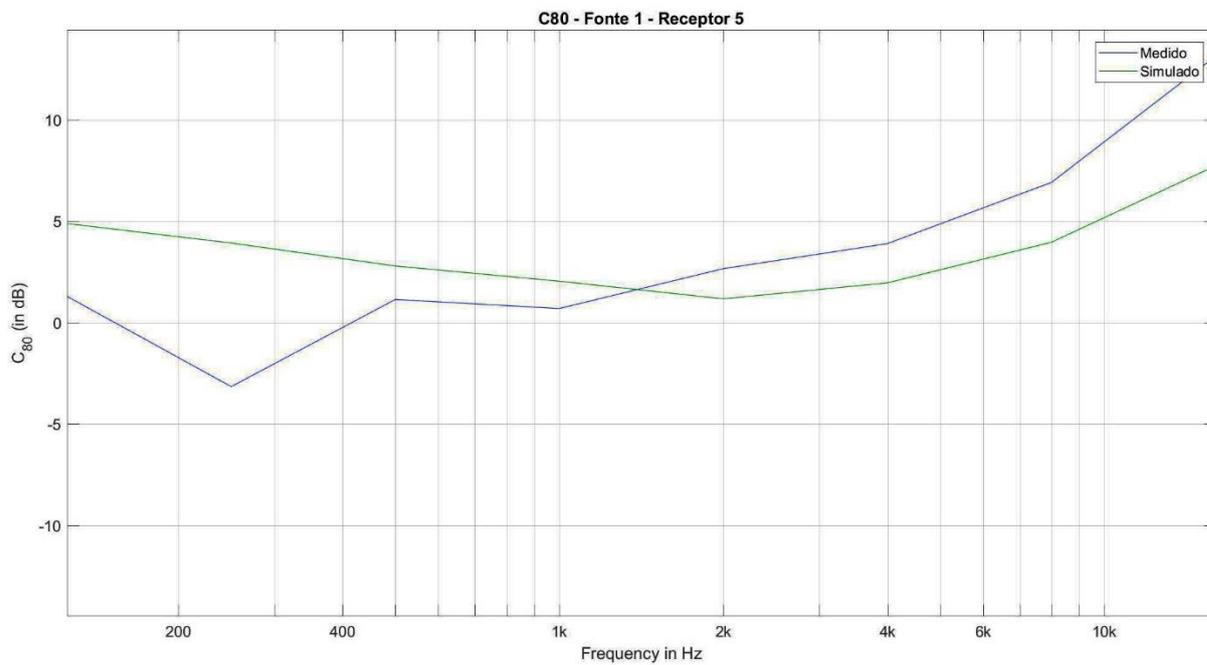
Fonte: O autor (2018).

Figura 49: C80 para P04.



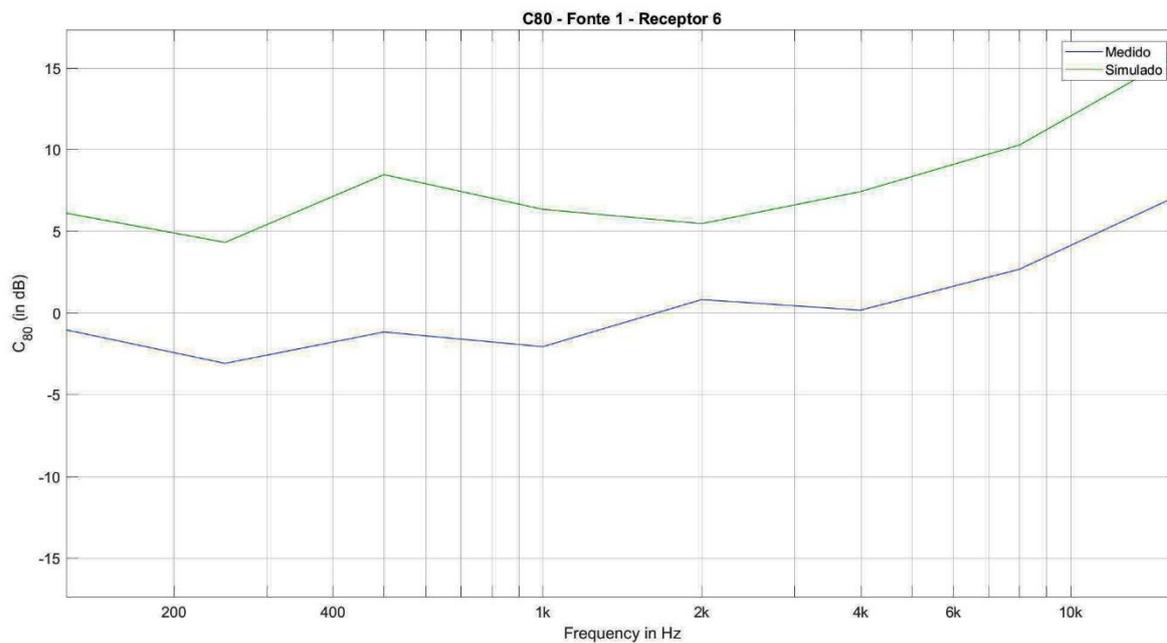
Fonte: O autor (2018).

Figura 50: C80 para P05.



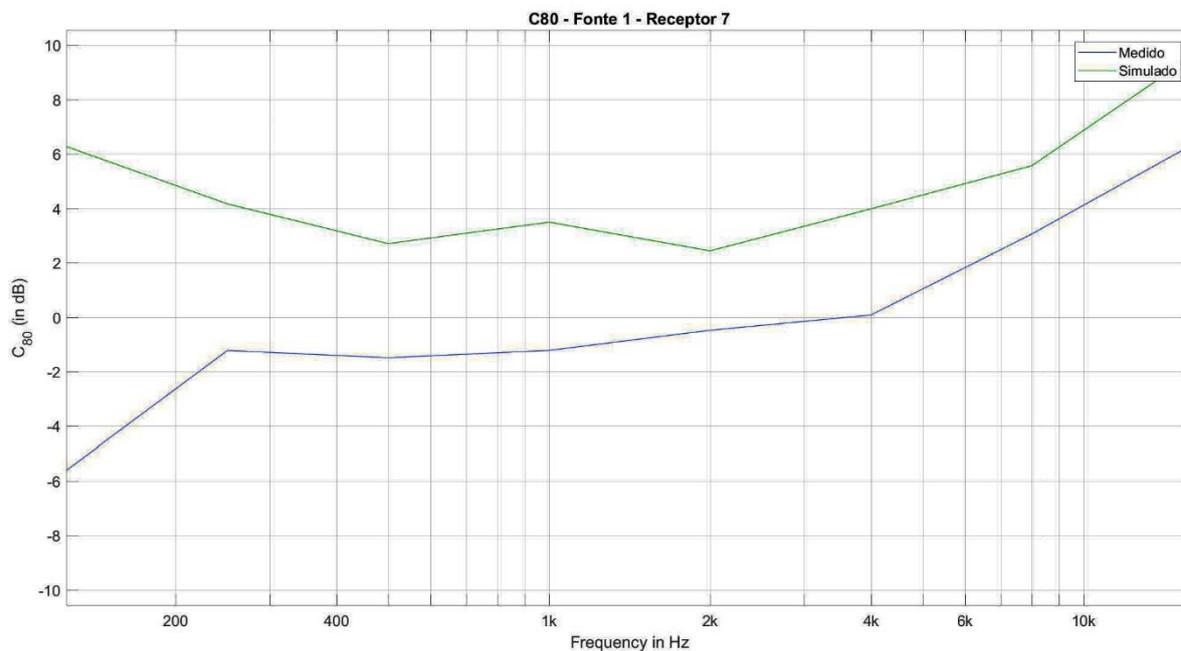
Fonte: O autor (2018).

Figura 51: C80 para P06.



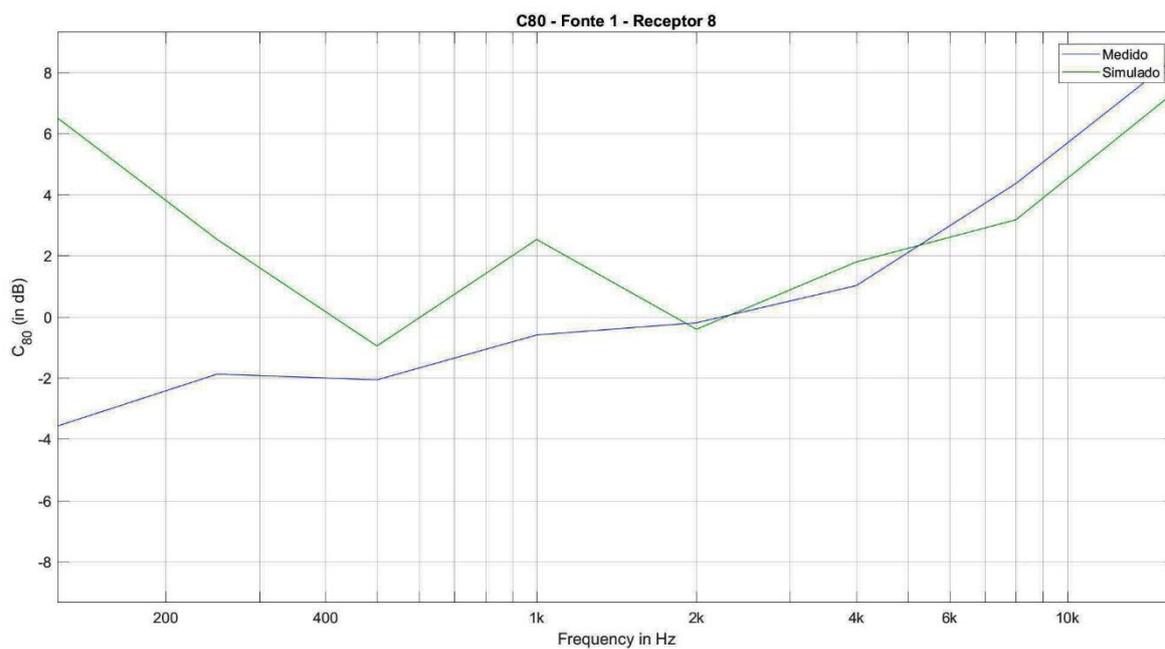
Fonte: O autor (2018).

Figura 52: C80 para P07.



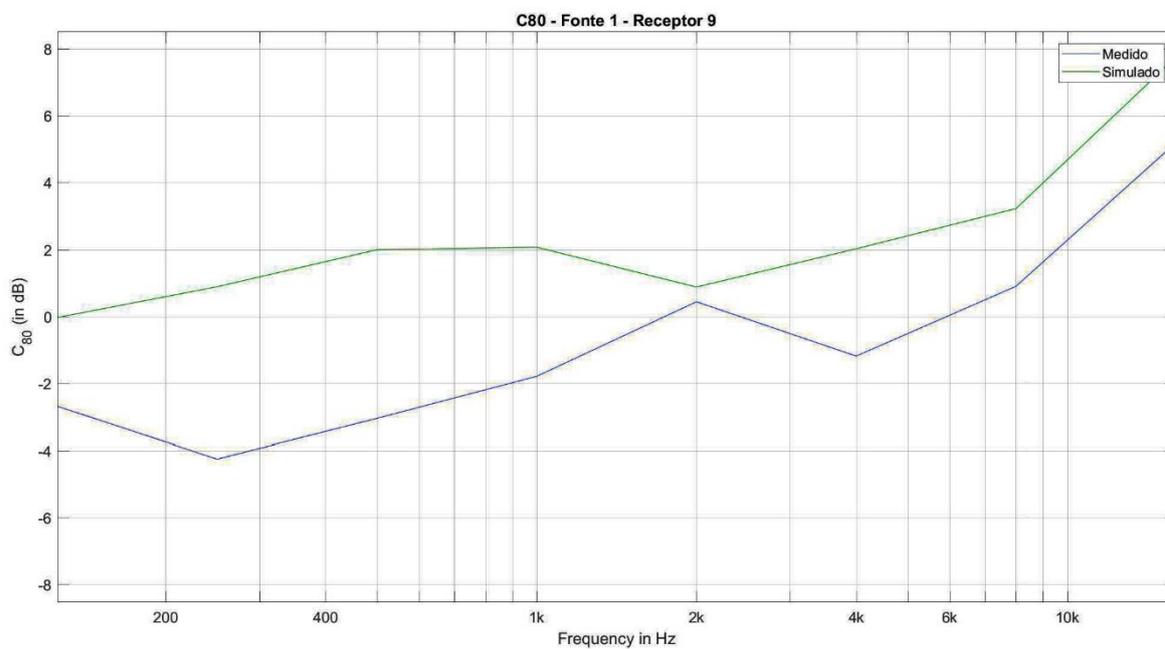
Fonte: O autor (2018).

Figura 53: C80 para P08.



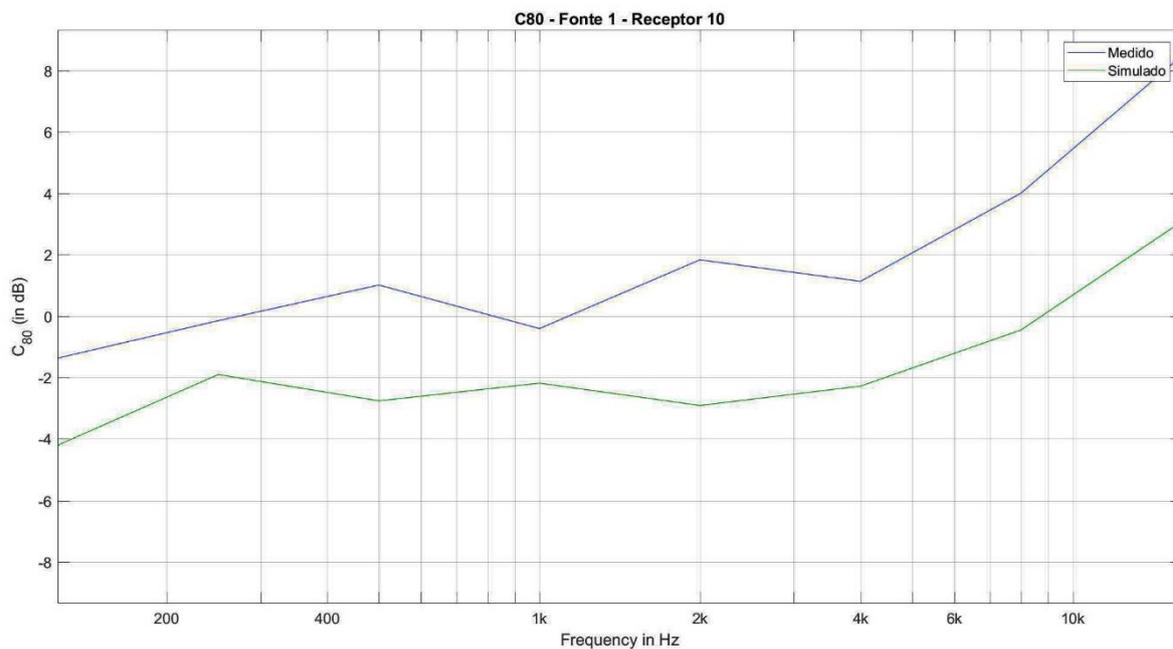
Fonte: O autor (2018).

Figura 54: C80 para P09.



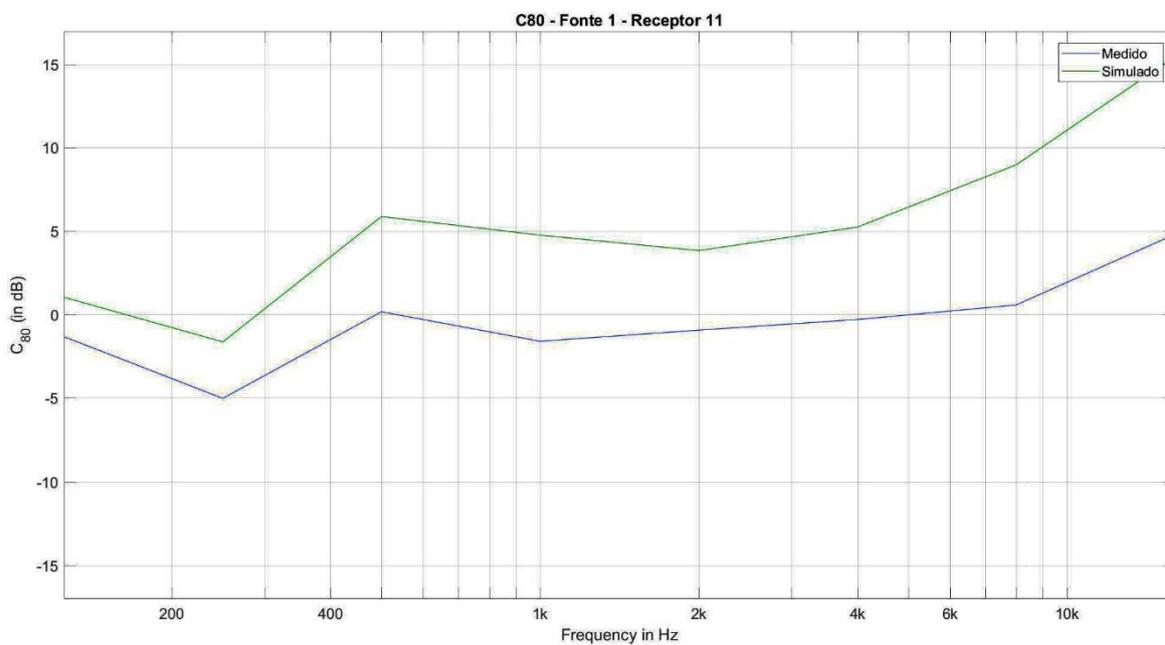
Fonte: O autor (2018).

Figura 55: C80 para P10.



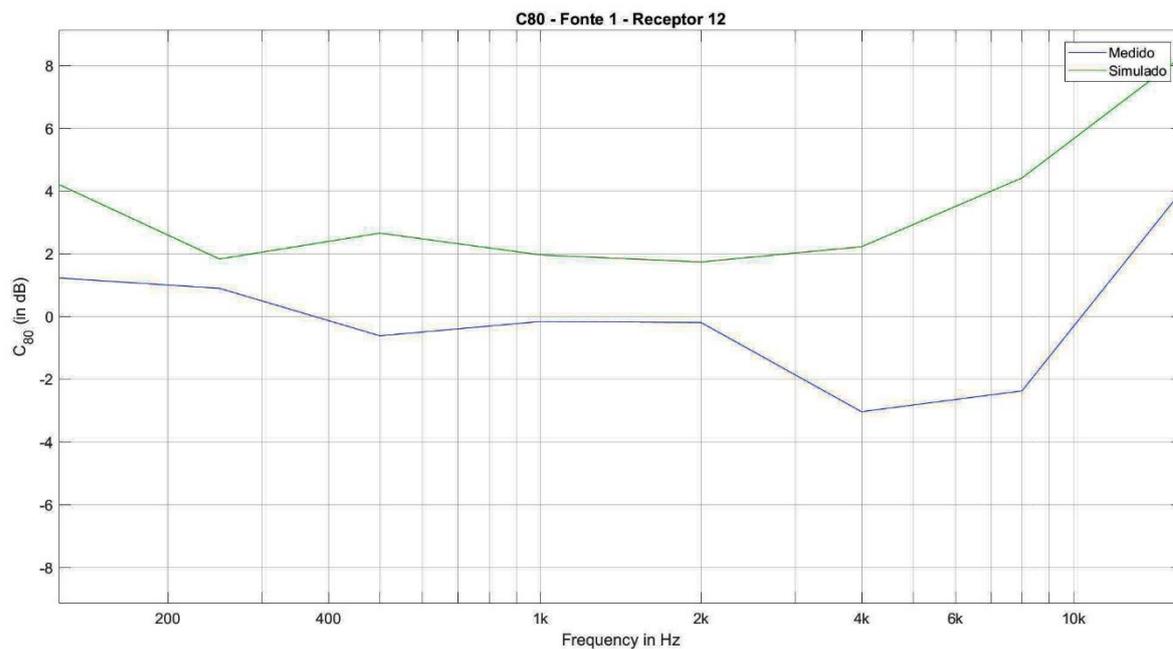
Fonte: O autor (2018).

Figura 56: C80 para P11.



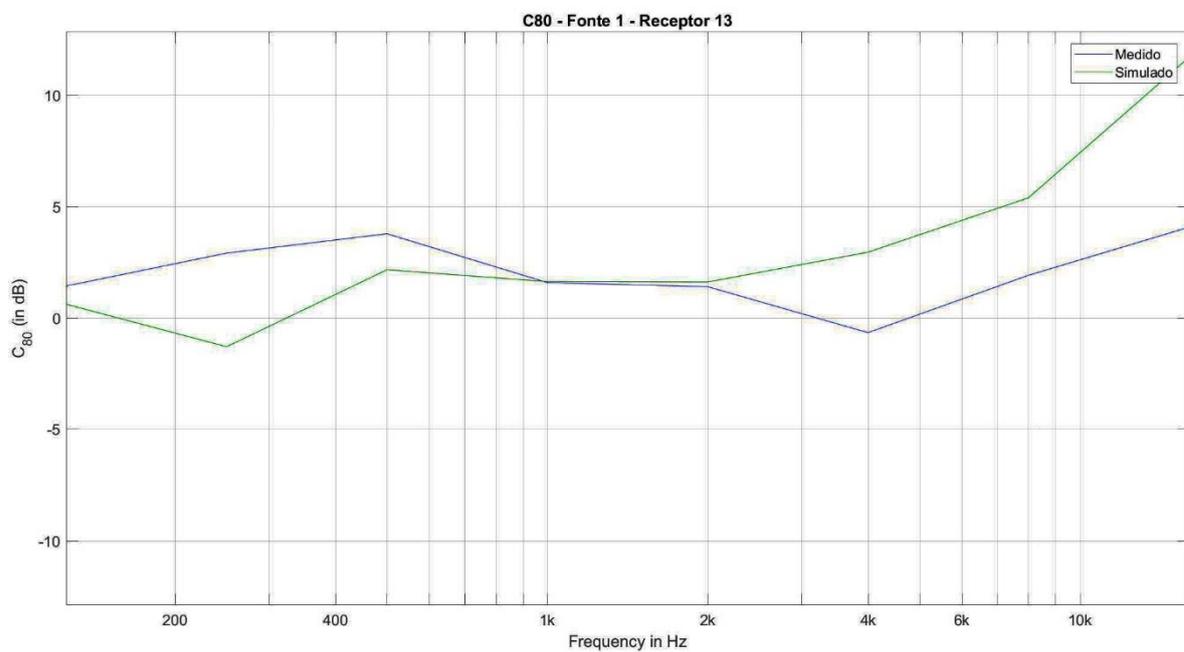
Fonte: O autor (2018).

Figura 57: C80 para P12.



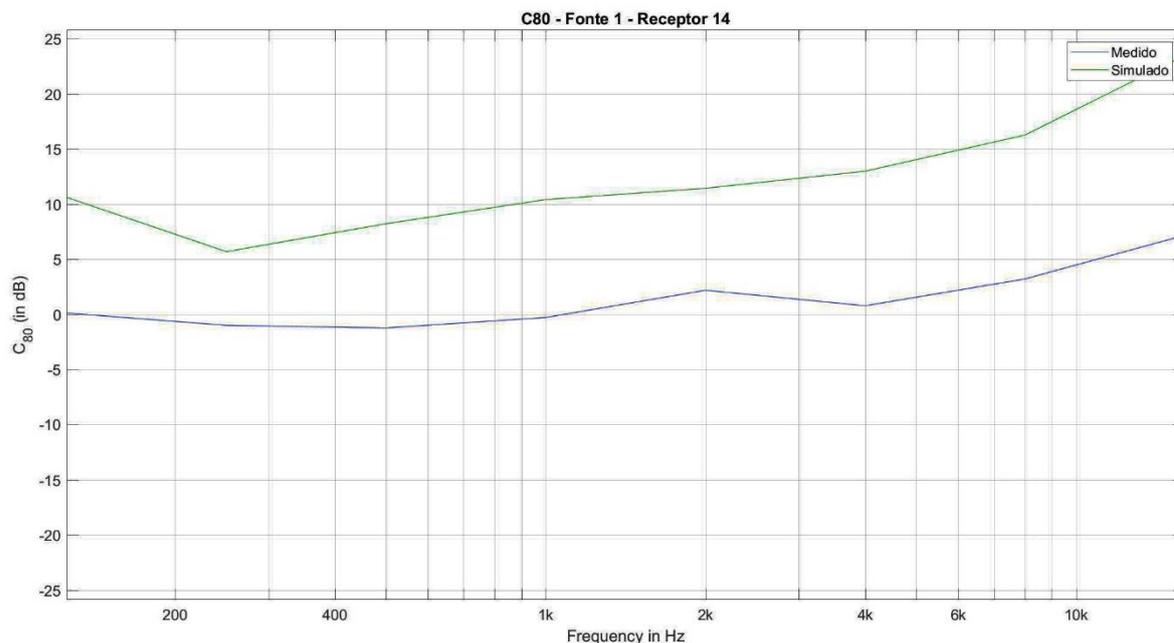
Fonte: O autor (2018).

Figura 58: C80 para P13.



Fonte: O autor (2018).

Figura 59: C80 para P14.



Fonte: O autor (2018).

Analisando os dados obtidos, percebe-se que a maior diferença nos resultados ocorre para o parâmetro de clareza em baixas e médias frequências. Ainda, vale ressaltar que os dados obtidos no parâmetro C80, representam diferenças pequenas em decibéis, pois os valores obtidos do parâmetro são numericamente pequenos, gerando valores de erros muito grandes, da forma como o mesmo foi calculado.

Ainda assim, foi possível verificar, através da identificação do tempo de reverberação na igreja (simulado e medido) a eficiência do *software* BRASS na simulação de salas de espetáculo, bem como, dos procedimentos de simulação abordados nessa pesquisa.

Por fim, pôde-se realizar simulações, a partir do objeto validado, de áudios e seu comportamento sonoro na igreja, possibilitando uma análise e um exercício

sinestésico do projetista com o ambiente sonoro. Com a inserção de áudios anecoicos no BRASS, obtidos em banco de dados como o da Aalto University²⁹, Open Air Lib³⁰ ou disponibilizados gentilmente pela Igreja Batista Itacuruçá, foi possível recriar virtualmente o comportamento sonoro da sala analisada.

Os áudios foram agrupados e podem ser consultados, com auxílio de fones de ouvido, no Apêndice D.

²⁹ Disponível em: < <http://research.cs.aalto.fi/acoustics/virtual-acoustics/research/acoustic-measurement-and-analysis/85-anechoic-recordings.html>> Acesso em nov 2017.

³⁰ Disponível em : < <http://www.openairlib.net>> Acesso em dez 2017.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho descreveu, no decorrer das análises e revisões bibliográficas, a evolução da forma arquitetônica das salas de espetáculo e a associação de soluções projetuais para o desempenho acústico de salas.

Algumas técnicas de simulação sonora e medição de resposta impulsiva foram apresentadas, ressaltando suas vantagens e desvantagens. Também foi mostrado que a qualidade acústica de uma sala de espetáculo pode ser medida através de parâmetros quantitativos, calculados a partir da RI obtida. Os parâmetros analisados por esse trabalho foram o Tempo de Reverberação e a Clareza.

A partir da pesquisa e entendimento do desenvolvimento das salas de espetáculo, dos parâmetros acústicos e das ferramentas computacionais existentes, pode-se comprovar a viabilidade do uso de *softwares* no auxílio ao projetista na tomada de decisões a respeito da qualidade acústica das salas de espetáculo. Comprovada a viabilidade do *software* BRASS, valida-se também os procedimentos adotados.

Percebeu-se que o objeto analisado apresenta tempo de reverberação alto e índices insatisfatórios de clareza em alguns pontos medidos. Pode-se obter valores mais satisfatórios adequando o ambiente com o tratamento de suas superfícies.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a avaliação dos critérios subjetivos através de questionário estruturado aplicado a especialistas da área, expostos aos sons resultados dos procedimentos descritos por esse trabalho e pelas simulações no BRASS. Ainda, é possível o desenvolvimento de projeto de

intervenção para o tratamento acústico da sala analisada, diminuindo o tempo de reverberação em alguns pontos e aumentando a clareza, especialmente em baixas frequências.

Acredita-se, também, que a avaliação dos procedimentos em outras salas de espetáculo, com diferentes usos, pode ser valiosa para a experimentação da ferramenta e validação de novos procedimentos e parâmetros.

Por fim, a partir do decorrer de todo o trabalho, e na breve análise descrita acima, acredito que a utilização dos procedimentos propostos por esse trabalho e a utilização da ferramenta BRASS para análise da qualidade acústica de salas de espetáculo pode auxiliar e aperfeiçoar a concepção de projetos de arquitetura. Especialmente quando aplicados em salas de espetáculo que busquem a qualidade acústica do espaço.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALARCÃO, D., COELHO, J.L., TENEMBAUM, R.A. On modeling of room acoustics by a sound energy transition approach. *Proceedings of EEA Symposium on Architectural Acoustics*. Madri, 2000.
- ALLEN, J., BERKLEY, D. Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 65, p. 943-950, 1979.
- ARRUDA, F., GUEDES, R. A influência da direcionalidade de fontes sonoras na avaliação experimental da qualidade acústica de salas. In: Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, 19. *Anais...* Belo Horizonte, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12179**: Tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro, 1992.
- BARBA, A. Arquitectura teatral, historia y acústica: el sonido de los teatros. *Música oral del Sur*, v. 10, p. 147–167, 2013.
- BARBA, Arturo; GIMÉNEZ, Alicia. Análisis acústico de la tipología teatral a la italiana a través del estudio del Teatro Principal de Valencia. *Revista de Acústica*. Madri: Editorial El Instalador, Vol. 40. 3-4, 2009.
- BARBA, Arturo; GIMÉNEZ, Alicia. *El Teatro Principal de Valencia*. Valencia: Acústica y Arquitectura Escénica, Teatros de la Generalitat y UPV, 2011.
- BARRON, M. **Subjective study of British symphony concert halls**. *Acustica*, vol 66, pp.1- 14, 1988.
- BARRON, M. **The Subjective Effects of the First Reflections in Concert Halls – The Need for Lateral Reflections** J. Sound Vib.Vol.15, 475-494, 1971.
- BARRON, M., MARSHALL, A.H., **Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls**: the derivation of physical measure. J. Sound Vibration, vol.77,p211,1981.
- BELIENY, A.; NIEMEYER, L. **A relação da forma da sala de espetáculos com sua qualidade acústica**. Segundo Colóquio Internacional de Arquitetura, Teatro e Cultura. *Anais...*Rio de Janeiro: 2012
- BERANEK, L. L. Concert halls. *Journal of the Audio Engineering Society*, Cambridge, v. 56, n. 7/8, p. 1036-1056, 2008.
- BERANEK, Leo L.. **The Acoustical Design of Concert Hall**. Building Acoustics, Vol, 1 n, 1. Essex: Multi-Science, 2004.
- BERANEK, Leo. **Acoustics and concert halls**. New York: Acoustical Society of America, vol 57, 1975.
- BERTHOLD, Margot. **História Mundial do Teatro**. Trad. Maria Paula V. Zurawski, J. Guinsburg, Sérgio Coelho e Clóvis Garcia. São Paulo: Perspectiva, 2001.

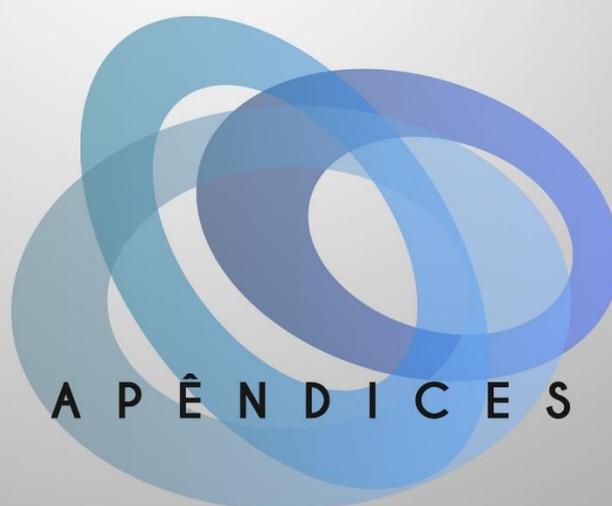
- BORISH, J. Extension of the Image Model to Arbitrary Polyhedra. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 75, p. 1827-1836, 1984.
- BOULLÉE, Étienne-Louis. **Arquitectura. Ensayo sobre el arte**. Barcelona: Gustavo Gili, 1985.
- CARBONI, Márcio Henrique. **Qualidade acústica em salas de ensino de música: parâmetros acústicos preferenciais na opinião de professores de música**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
- CARVALHO, Benjamin de A. **Acústica aplicada à arquitetura**. Rio de Janeiro: Livraria Freitas Bastos S. A., 1967.
- CARVALHO, Benjamin A. **Acústica aplicada à arquitetura**. Rio de Janeiro. 1967.
- CEBULSKI, M. C. **Introdução à História do Teatro no Ocidente: dos gregos aos nossos dias**. 1 ed. ed. Guarapuava: [s.n.], 2012.
- CHOURMOUZIA DOU, P.; KANG, J. Acoustic evolution of ancient Greek and Roman theatres. **Applied Acoustics**, n 69, p 514–529, 2017.
- CHRISTENSEN, C.L. **Odeon room acoustics program, version 3.1, user manual, industrial, auditorium and combined editions**. Lyngby: Department of Acoustic Technology, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark, 1998.
- CHUANG, J. H; CHENG, S. A. Computing caustic effects by backward beam tracing. **The Visual Computer**. Gothenburg, v. 11, n. 3, p. 156–166, 1995.
- COSTA, Ennio Cruz. **Acústica técnica**. São Paulo: Blucher, 2003.
- COUCHOT, E. **A tecnologia na arte: da fotografia à realidade virtual**. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2003. Trad. Sandra Rey.
- DALMONTE, J. **Caracterização Acústica De Salas Através Da Medição Da Resposta Impulsiva**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- DANCE, S.M., SHIELD, B.M. The complete image-source method for the prediction of sound distribution in non-diffuse enclosed spaces. **Journal of Sound and Vibration**, v. 201(4), p. 473–489, 1997.
- DIAS, Marina. El espacio a escena. De la antigüedad al teatro moderno. **Arquitextos**, São Paulo, ano 11, n.127.06, Vitruvius, dez. 2010.
- EGAN, M. D. **Concepts in Architectural Acoustics**. Mc Graw Hill. Book Company. Nova Iorque, p. 73-75, 1984.
- EMBRECHTS, J.J. Randomly traced sound ray techniques. **Acustica**, vol. 51, p. 285–295, 1982.

- FARIA, Regis. **Auralização em ambientes audiovisuais imersivos**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- FIGUEIREDO, Fábio Leão. **Parâmetros Acústicos Subjetivos: Critérios para Avaliação da Qualidade Acústica de Salas de Música**. 2005. 251 f. Dissertação (Mestrado em Musicologia) – Programa de Pós-graduação em Musicologia da Escola de Comunicações e Artes da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- FIORATTI, G. Palco italiano. **Pesquisa FAPESP**, v. 224, p. 88–89, out. 2014.
- for Lateral Reflections J. Sound Vib.Vol.15, 475-494, 1971.
- FORSYTH, Michael. **Buildings for music**. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- IZENOUR, George. C.. **Theater Design**. Estados Unidos da América: McGraw-Hill Book Company, 1977.
- PATTE, Pierre. **Essai sur l'architecture théâtrale**. Paris, 1782.
- GRANADO-JR, M.; BISTAFÁ, S. Simulação Acústica de Teatros com Programa Comercial de Traçado de Raios – Relato de uma experiência. In: Encontro da Sociedade Brasileira de Acustica, 20., 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 2002.
- ISO 3382. **Acoustics-Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to Others Acoustical Parameters**, Intern. Organiz. Stand., 1997.
- KERCKHOVE, D. **A Pele da Cultura**. Lisboa: Relógio D'Água Editores, 1997.
- KRUZINS, E., FRICKE, F.R. The prediction of sound fields in non-diffuse spaces by a random walk approach. **Journal of Sound and Vibration**, v. 81(4), p. 549–564, 1982.
- KULOWSKI, A. Algorithmic representation of the ray tracing technique. **Applied Acoustics**, v.18, p. 449–469, 1984.
- LEÓN, Ángel Luis; SENDRA, Juan José; NAVARRO, Jaime; ZAMARREÑO, Teófilo. **Acústica y rehabilitación en teatros de Andalucía**, Sevilla: Secretariado de publicaciones de la Universidad de Sevilla, 2007.
- MELO, V. S. G.; TENENBAUM R. A.; CAMILO, T. S.; TORRES, J. C. B.; PIMENTEL, I. A. Aperfeiçoamento do software RAIOS para simulação numérica de acústica de salas com inclusão de modelo modal para baixas frequências. **Acústica e Vibrações**, v. 38, 2007.
- PASSERI, L. **Subsídios para o Projeto de Teatros e Auditórios Multifuncionais: recursos de variabilidade acústica**. São Paulo, 2008. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- PORTELA, M. S. **Caracterização de Fontes Sonoras e Aplicação na Auralização de Ambientes**. 121 fl. 2008. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

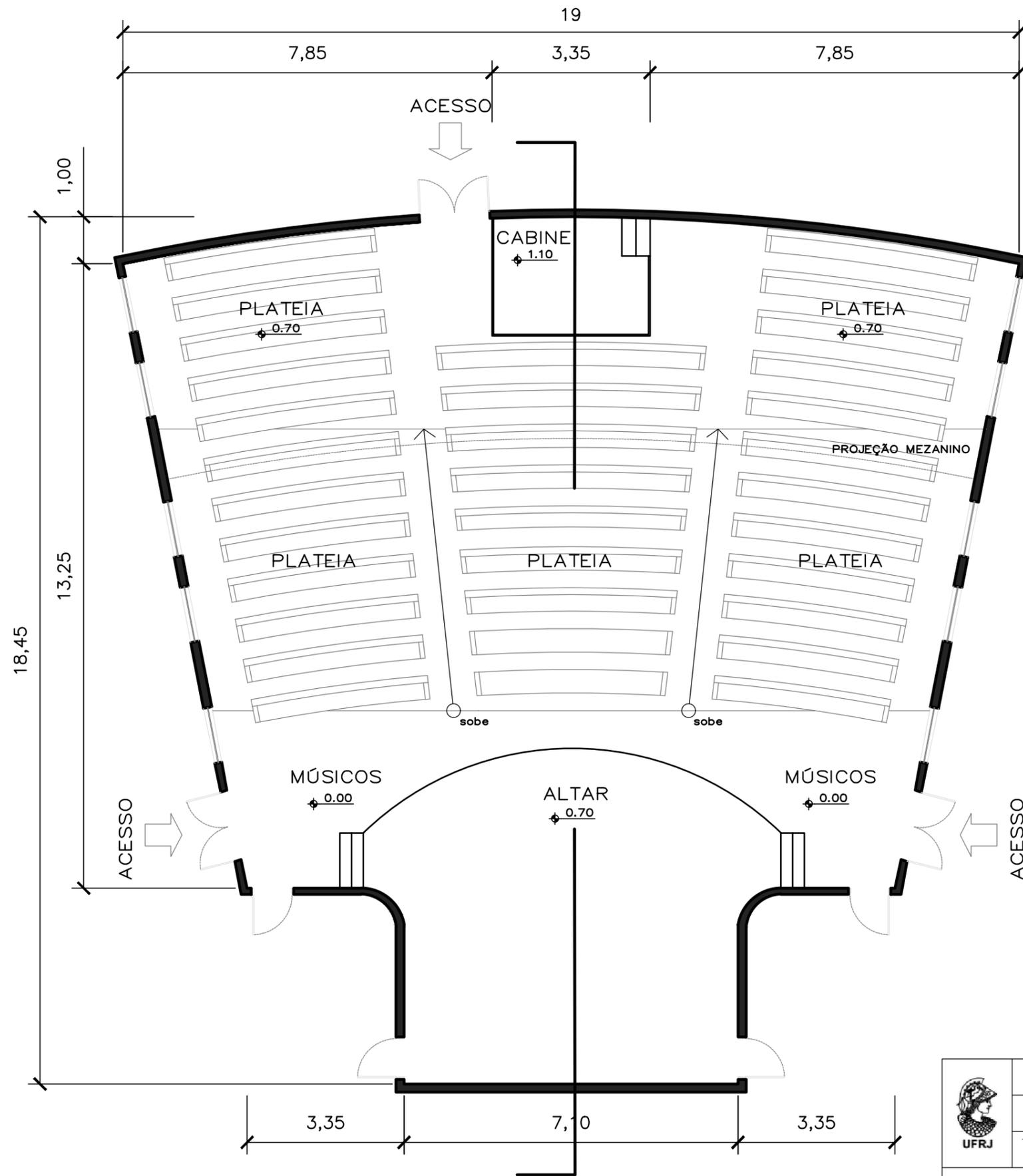
- PEREIRA, R. N. **Caracterização Acústica de Salas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física e Tecnológica) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2010.
- RINDEL, J. H. The use of computer modelling in room acoustics. **Journal of Vibroengineering**, p. 316-323, 2006.
- ROUBO, André-Jacob. **Traité de la construction des théâtres et des machines théâtrales**. Paris, 1777.
- LEWERS, T. A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics. **Applied Acoustics**, vol.38, pp. 161–178, 1993.
- LONG, M. **Architectural Acoustics**. California: Elsevier Academic Press, 2006.
- MATLAB, Statistics Toolbox**, Math Works Inc.
- MAZZUCATO, Tiziana. Idea del espacio escénico y lugares para la representación teatral entre los siglos XV y XVI. **Modelos de teatro a la manera de Italia**. Studia Aurea, v. 3, p. 139-172, dic. 2009. ISSN 1988-1088. Disponível em: <<http://studiaaurea.com/article/view/v3-mazzucato/19>>. Acesso em: 09 jan. 2018.
- MOREIRA, B.C. ; BRANDÃO, D. ; KURYLA, C. ;GONZALES, E. C.; KISCHINHEVSKY, M. An Architecture Using Finite Difference Method to Calculate Realistic Sounds Equalization in Games (to appear). In: **Anais do X Simpósio Brasileiro de Games e Entretenimento Digital**, 2011, Salvador, 2011.
- ODEON, ROOM ACOUSTICS PROGRAM. **User Manual**: Industrial, Auditorium and Combined Editions. Version 10. 2018.
- PRODI, Nicola; POMPOLI, Roberto. The acoustics of three Italian historical theatres: the early days of modern performance spaces. In: TecniAcústica 2000, **Anais do XXXI Congresso Nacional de Acústica Madrid**. Madri. 2000.
- REQUENA, Carlos Augusto. **Habitar Híbrido**: Interatividade e Experiência na Era da Cibercultura. Dissertação (Mestrado). Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- RIO DE JANEIRO. Lei Complementar nº 111 de 1º de fevereiro de 2011, Rio de Janeiro, fev. 2011.
- RODRIGUES, C. Cogitar a arquitetura teatral. **Arquitextos**, v. ano 09, , n. Vitruvius, 2009.
- ROSSING, T. D. **Springer Handbook of Acoustics**, 2007.
- SARRIS, J. C.; CAMBOURAKIS, G. E. Time frequency analysis and parametric approximation of room impulse responses. In: **Acoustics, speech and signal processing**, 2003, v. 6, 2003.
- SAUNDERS, George. **Treatise on theatres**. Londres, 1790.

- SIMÕES, F. M. **Acústica Arquitetônica**. Procel Edifica, Rio de Janeiro, 2011.
- SCHMID, A. L. Adequação acústica dos espaços para a música. Seleção de exemplos históricos de música e arquitetura como apoio à aprendizagem. **Arquitextos**. Jun.2011. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/12.135/4008>>. Acesso em: 10 ago 2017.
- SCHMID, Aloísio Leoni, org. ., **Espaços para aprender e ensinar música: construção e adequação**. Ministério da Cultura e Ministério da Educação, Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior - CAPES, Programa Pró- Cultura, Pacto Ambiental, 2013. 32 f., 53 il.
- SCHMID, Aloísio Leoni. Adequação acústica dos espaços para a música. Seleção de exemplos históricos de música e arquitetura como apoio à aprendizagem. **Arquitextos**, São Paulo, ano 12, n. 135.04, Vitruvius, jul. 2011. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/12.135/4008>> Acesso em mai. 2017.
- SILVA, Vanessa Gomes. **Avaliação da sustentabilidade de edifícios escritórios brasileiros: diretrizes e base metodológica**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- SOUZA, L. C. L.; ALMEIDA, M. G.; BRAGANÇA, L. **Bê-á-bá da acústica arquitetônica: ouvindo a arquitetura**. São Carlos: EdUFSCar, 2012.
- SOUZA, Léa Cristina Lucas de. **Bê-á-bá da Acústica Arquitetônica: Ouvindo a Arquitetura**. São Carlos: Edufscar, 2007.
- SULLIVAN, Louis Henri. The Tall Office Building Artistically Considered. **Lippincott's Magazine**, nº 57, Mar de 1896.p
- TAKAHASHI, V. F. D. M.; BERTOLI, S. R. Relação entre atributos acústicos e características arquitetônicas de salas de concerto aplicando o método da síntese da forma. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 1, p. 193–205, 2012.
- TENENBAUM, R. CAMILO, T. Método híbrido para simulação numérica de acústica de salas: teoria, implantação computacional e validação experimental. In: Seminário Música Ciência Tecnologia: Acústica Musical, 1., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: 2004, p. 26-40.
- TENENBAUM, R.; CAMILO, T.; TORRES, J.; GERGES, S. Hybrid Method for Numerical Simulation of Room Acoustics with Auralization: Part 1 – Theoretical and Numerical Aspects. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. V. 29, p. 211-221, 2007.
- TIDWORTH, Simon. **Theatres: An Illustrated History**. Londres: Pall Mall, 1973.

- TORRES, M. H. **Simulação acústica no ambiente AcMus**. Dissertação (Mestrado). Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- VITRUVIO, Marco Polion. **De Architectura**. Trad. J. Ortiz y Sanz. Madri: Imprenta Real, 1787.
- GRAELLS, Antoni (ed). El lloc del teatre. Ciutat, arquitectura i espai escènic. **Aula d'Arquitectura**. V 13, p. 30, Barcelona: Edicions UPC, 1997.
- VORLÄNDER, M. Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 86(1), p. 172–178, 1989.
- WORD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for Community Noise**. 1999. Disponível em: <<http://www.who.int/peh/noise/guidelines2.html>>. Acesso em jan 2018.
- York, USA. 1984.
- ZAMPAR-FILHO, Luis Eduardo. **Desenvolvimento de uma metodologia para elaboração de modelos de predição dos níveis de ruído do campo acústico de usinas hidrelétricas**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da UNESP, Ilha Solteira, 2014.
- ZILIO, D. T. A evolução da caixa cênica: transformações sociais e tecnológicas no desenvolvimento da dramaturgia e da arquitetura teatral. **Pós**, p. 154–173., jun. 2010.



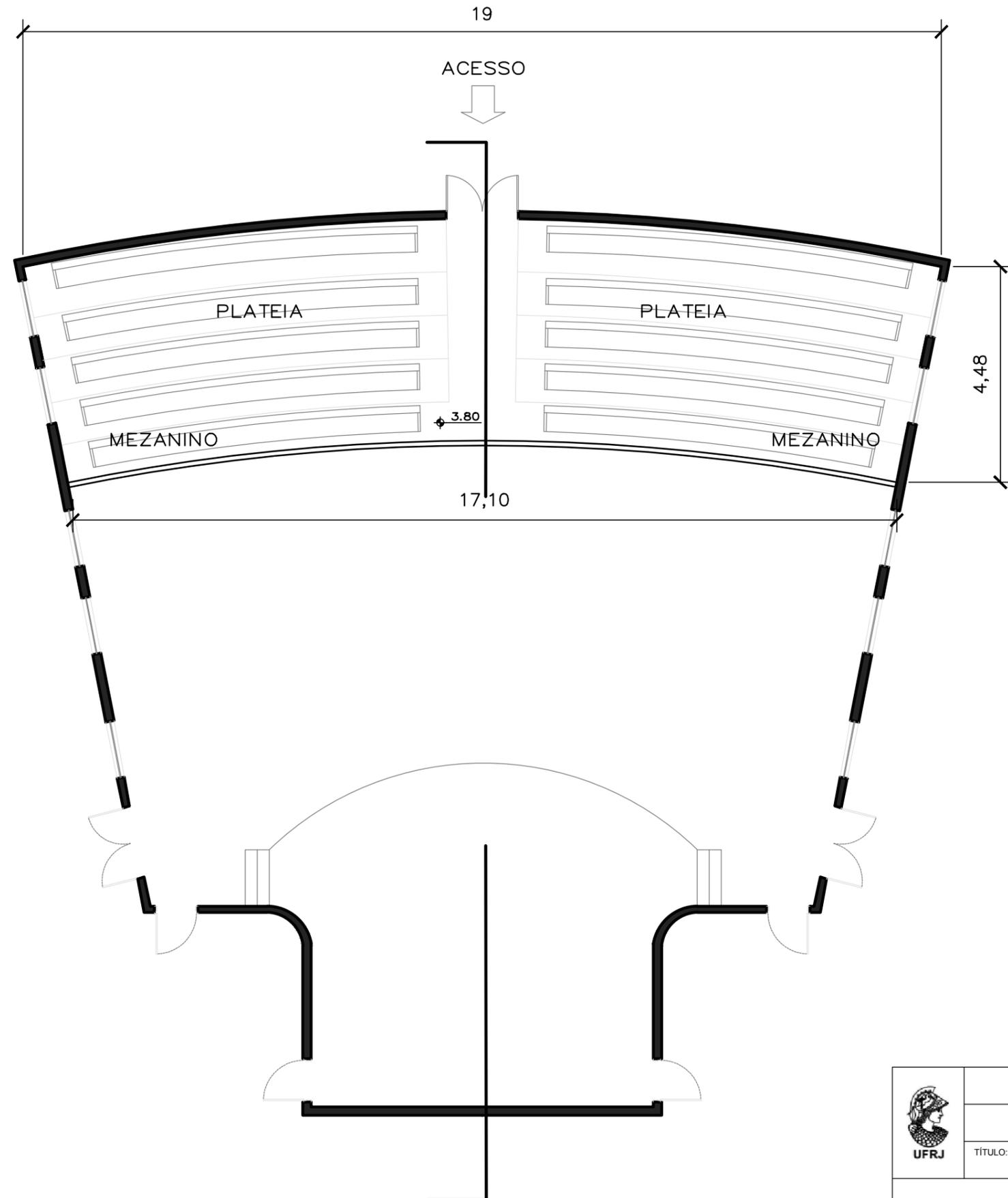
APÊNDICE A - PLANTAS E CORTE DA IGREJA ITACURUÇÁ.



PLANTA BAIXA - TÉRREO
ESCALA 1/100

	UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO		
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA - PROARQ/UFRJ		
	TÍTULO:	ESCALA:	FOLHA:
	Levantamento - Planta Baixa	1:100	02/02
	AUTOR:	DATA:	
	Thalles Costa dos Reis	01/02/18	

APÊNDICE A - PLANTAS E CORTE DA IGREJA ITACURUÇÁ.



→ Acessos



PLANTA BAIXA - MEZANINO

ESCALA 1/100



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA - PROARQ/UFRJ

TÍTULO:
Levantamento - Planta Baixa

ESCALA:
1:100

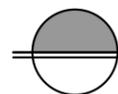
FOLHA:
02/02

AUTOR:
Thalles Costa dos Reis

DATA:
01/02/18

APÊNDICE A - PLANTAS E CORTE DA IGREJA ITACURUÇÁ.



 CORTE LONGITUDINAL
ESCALA 1/100

 UFRJ	UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO		
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA - PROARQ/UFRJ		
	TÍTULO: Levantamento - Planta Baixa	ESCALA: 1:100	FOLHA: 02/02
	AUTOR: Thalles Costa dos Reis	DATA: 01/02/18	

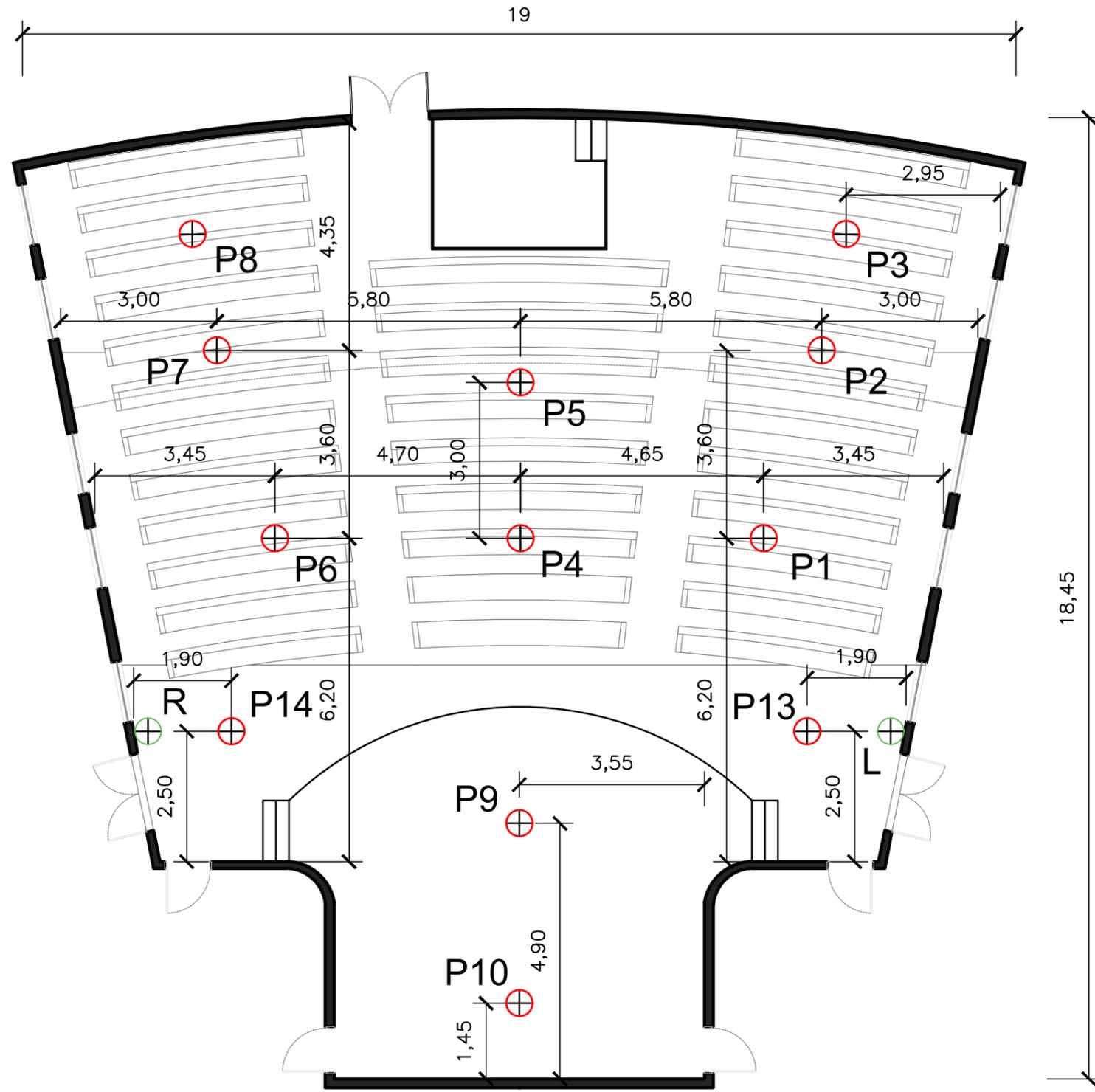
Apêndice B – Ficha Resumo Igreja Itacuruçá

Tabela 3: Ficha resumo do estudo de caso

FICHA LEVANTAMENTO: IGREJA ITACURUÇA										
	Coeficientes de absorção acústica									
	Cód.	Superfície	Layer CAD	Materiais	Frequências (Hz)					
					125	250	500	1000	2000	4000
1	Janelas	Janela	Vidro plano de 3-4mm, com 50 mm de espaço e amortecimento nas bordas	0,23	0,11	0,09	0,01	0,01	0,03	
2	Paredes	Parede	Reboco liso	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06	
INFORMAÇÕES	3	Forro	Teto	Teto pesado suspenso (de gesso)	0,02	0,02	0,03	0,02	0,05	0,05
Tipo: Igreja	4	Luminárias	Luminárias	Vidro	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Área: 300 m²	5	Portas	Porta	Portas de madeira, fechadas	0,14	0,14	0,06	0,06	0,10	0,10
Umidade: 64%	6	Piso taco	Piso	Taco colado	0,04	0,04	0,06	0,12	0,10	0,17
Temperatura: 27°C	7	Piso carpete	Carpete	carpete 5mm de espessura	0,04	0,04	0,15	0,29	0,52	0,59
Número de fontes: 2	8	Plateia vazia	Plateia	Cadeira de assento dobradiço, de madeira vazia	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08	0,05
Número de receptores: 15	9	Cabine	Cabine	Painéis de madeira de 6 mm armação de madeira	0,58	0,22	0,07	0,04	0,03	0,07
	10	Tablado	Tablado	Madeira compensada de 3 mm, a 50 mm da parede, espaço vazio	0,25	0,34	0,18	0,10	0,10	0,06
	11	Mezanino	Balcao	Reboco liso	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06

Fonte: A partir de ABNT (1992).

APÊNDICE C - LOCAÇÃO DOS PONTOS NO ESPAÇO



LEGENDA	
	PONTO RECEPTOR
	FONTE

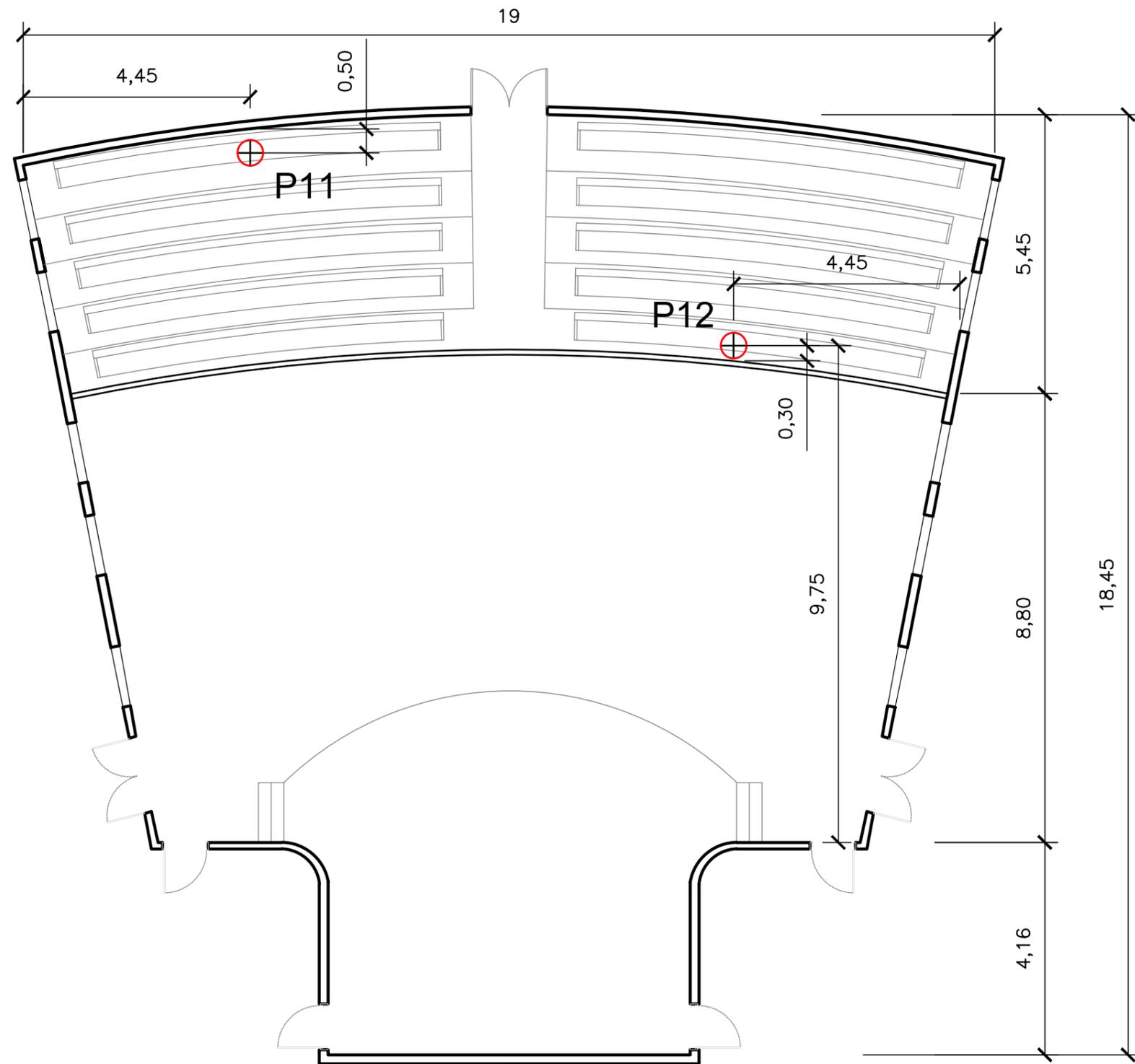
*Todos os pontos receptores foram locados a uma altura de 1,5m. E os pontos emissores a uma altura de 2,75m.

LOCAÇÃO DOS PONTOS	
PONTO	DESCRIÇÃO
P1	PLATEIA DIREITA - FRENTE
P2	PLATEIA DIREITA - MEIO
P3	PLATEIA DIREITA - FUNDOS
P4	PLATEIA CENTRO - FRENTE
P5	PLATEIA CENTRO - MEIO
P6	PLATEIA ESQUERDA - FRENTE
P7	PLATEIA ESQUERDA - MEIO
P8	PLATEIA ESQUERDA - FUNDOS
P9	ALTAR - FRENTE
P10	ALTAR - FUNDO
P11	MEZANINO ESQUERDA FUNDOS
P12	MEZANINO DIREITA FRENTE
P13	MÚSICO DIREITA
P14	MÚSICO ESQUERDA
L	FONTE L
R	FONTE R

PLANTA BAIXA - TÉRREO
ESCALA 1/100

	UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO		
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA - PROARQ/UFRJ		
TÍTULO:	Levantamento - Planta Baixa	ESCALA:	1:100
AUTOR:	Thalles Costa dos Reis	FOLHA:	02/02
		DATA:	01/02/18

APÊNDICE C - LOCAÇÃO DOS PONTOS NO ESPAÇO



LEGENDA	
⊕	PONTO RECEPTOR
⊕	FONTE

*Todos os pontos receptores foram locados a uma altura de 1,5m. E os pontos emissores a uma altura de 2,75m.

LOCAÇÃO DOS PONTOS	
PONTO	DESCRIÇÃO
P1	PLATEIA DIREITA - FRENTE
P2	PLATEIA DIREITA - MEIO
P3	PLATEIA DIREITA - FUNDOS
P4	PLATEIA CENTRO - FRENTE
P5	PLATEIA CENTRO - MEIO
P6	PLATEIA ESQUERDA - FRENTE
P7	PLATEIA ESQUERDA - MEIO
P8	PLATEIA ESQUERDA - FUNDOS
P9	ALTAR - FRENTE
P10	ALTAR - FUNDO
P11	MEZANINO ESQUERDA FUNDOS
P12	MEZANINO DIREITA FRENTE
P13	MÚSICO DIREITA
P14	MÚSICO ESQUERDA

PLANTA BAIXA - MEZANINO
ESCALA 1/100

	UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO		
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA - PROARQ/UFRJ		
TÍTULO:	ESCALA:	FOLHA:	
Levantamento - Planta Baixa	1:100	02/02	
AUTOR:	DATA:		
Thalles Costa dos Reis	01/02/18		

Apêndice D – Áudios exportados

Os áudios foram categorizados e armazenados em CD.

ANEXOS

Anexo A - Coeficientes de absorção levantados

Tabela 4: Coeficientes de absorção a partir de bibliografia.

Coeficientes de absorção acústica (continua)						
Materiais	Frequências (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Ar por m ³	—	—	—	0,003	0,007	0,02
Acoustic - celotex C-2 (5/8")	0,09	0,26	0,69	0,86	0,67	0,62
Acoustic-celotex C-9 (5/9")	0,12	0,45	0,79	0,89	0,61	0,6
Acoustic-celotex M-2 (5/8")	0,07	0,21	0,64	0,86	0,93	0,93
Acoustilite IV – B (1/2")	0,12	0,49	0,8	0,85	0,8	0,83
Água (piscina)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Algodão 50% ondulado	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54
Almofada de assento	0,1	0,14	0,16	0,17	0,15	0,13
Alvenaria rebocada e caiada	0,028	—	0,025	0,025	0,027	0,03
Areia seca (10 cm)	0,15	0,35	0,4	0,5	0,55	0,8
Argamassa de gesso auto-portante 5 cm sobre tela	0,2	0,22	0,22	0,27	0,36	0,42
Arvoplac	0,05	—	0,03	—	0,03	—
Bloco de concreto 20 cm + reboco	0,24	0,35	0,46	0,46	0,47	0,56
Bloco de concreto pintado 15 cm						
Cadeira com assento móvel de madeira compensada, forrada com massa, assento levantado	0,06	0,08	0,1	0,12	0,12	0,12
Cadeira de madeira	0,14	0,15	—	0,17	0,18	0,2
Carpete de juta	0,02	0,02	0,04	0,08	0,16	0,27
Piso em cerâmica	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Chapa metálica (16 mm) sobre sarrafos de 4 cm	0,18	0,12	0,1	0,09	0,08	0,07
Chapas de fibra de madeira, tipo "soft-board"	0,12	0,18	0,32	0,4	0,4	—
Chapas tipo "hard-board"	0,04	0,06	—	0,09	0,115	—
Compensado de madeira (6mm) sobre 10 cm de lã de vidro	0,3	0,11	0,06	0,05	0,02	0,02
Concreto rebocado pintado a cal	0,015	0,018	—	0,022	0,022	0,025
Cortiça	0,1	0,125	—	0,15	0,15	0,15
Cortina de algodão com dobras aos 50% de sua área	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54

Coefficientes de absorção acústica (continua)						
Materiais	Frequências (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Cortina de algodão com dobras aos 75% de sua área	0,04	0,23	0,4	0,57	0,53	0,4
Cortina de algodão esticada 0,5Kg/m²	0,04	0,07 5	—	0,13	0,17 5	0,32
Cortina de veludo com dobras aos 50% de sua área	0,14	0,35	0,55	0,72	0,7	0,65
Eucatéx acústico A-Forrotex 12,70mm	0,19	0,25	0,38	0,53	0,45	0,65
Eucatéx acústico A-19 mm	0,13	0,2	0,6	0,7	0,76	0,77
Eucatéx acústico B-Forrotex 12,7mm	0,28	0,3	0,3	0,55	0,53	0,73
Eucatéx acústico B-19 mm	0,13	0,2	0,6	0,7	0,76	0,77
Eucatéx acústico C-12,7mm (B. E.)	0,19	0,25	0,26	0,32	0,37	—
Eucatéx acústico Cristal Forrotex 12,7mm	0,21	0,23	0,23	0,25	0,26	0,49
Eucatéx acústico Diamante 19mm Forrotex 12,7mm	0,21	0,23	0,21	0,28	0,25	0,37
Eucatéx acústico Esmeralda 19mm Forrotex – 12,7 mm	0,25	0,23	0,19	0,21	0,25	0,49
Eucatéx acústico ranhurado – 19mm	0,1	0,13	0,5	0,57	0,5	0,45
Eucatéx acústico ranhurado Forrotex 12,7mm	0,18	0,21	0,23	0,28	0,28	0,48
Eucatéx acústico Safira 19mm Forrotex – 12,7mm	0,19	0,25	0,21	0,23	0,25	0,48
Eucatéx acústico travertino – 12,7mm	0,3	0,3	0,25	0,25	0,18	0,46
Eucatéx acústico travertino – 19mm	0,17	0,28	0,57	0,57	0,53	0,56
Eucatéx Forrotex branca 12,7mm	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,37
Eucatéx Forrotex Pinpoint 12,7mm	0,23	0,26	0,34	0,38	0,28	0,62
Eucatéx isolante 12mm simples	0,12	0,18	0,32	0,4	0,4	—
Eucatéx isolante Super 2”	0,25	0,3	0,4	0,45	0,57	0,48
Mármore/Granitina/Granito	0,023	—	0,01	0,012	0,01	—
Painéis de gesso 13 mm pintado	0,1	0,08	0,05	0,03	0,03	0,03
Painéis de madeira de 6 mm armação de madeira	0,58	0,22	0,07	0,04	0,03	0,07
Painel de feltro (12 mm)	0,05	0,07	0,29	0,63	0,83	0,87
Painel de lã de bálsamo	0,12	0,25	0,52	0,81	0,67	0,53
Painel de lã de rocha	0,26	0,45	0,61	0,72	0,75	—
Painel de lã de vidro 10 cm	0,29	0,55	0,64	0,75	0,8	0,85
Painel de lã de vidro 6 cm	0,09	0,39	0,61	0,74	0,83	0,87
Papel sobre parede	0,02	—	0,04	—	0,07	—

Coefficientes de absorção acústica (continua)						
Materiais	Frequências (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Pastilha de cerâmica	0,012	—	0,01 5	0,016	—	—
Pavif lex (3 e 5mm)	0,04	—	0,03	—	0,03	—
Piano de cauda	0,2	0,4	—	0,6	0,56	0,52
Piso de borracha tipo Plurigoma	0,04	0,06	0,08	0,09	—	0,1
Poltrona de assento móvel cercada de couro	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03
Poltrona vazia de madeira	0,08	0,1	0,13	0,12	0,08	0,06
Reboco vermiculite não acúst. 3cm	0,12	0,1	0,07	0,09	0,07	0,07
Reboco de vermiculite acústico 3 cm	0,23	0,3	0,37	0,42	0,48	0,46
Superfície d'água	0,008	0,00 8	0,01 3	0,015	0,02	0,02
Tábua de pinho 2,5 cm	—	0,16	0,13	0,1	0,06	0,06
Tapete carpete	0,12	—	0,1	—	0,1	—
Tapete de borracha sobre concreto	0,19	0,33	0,4	0,36	0,18	0,2
Tapete de fibra de coco	0,18	0,2	0,36	0,77	0,16	0,27
Tapete de lã forrado 1,5 cm	0,2	0,25	0,35	0,4	0,5	0,75
Tijolo pintado	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Tijolo sem acabamento	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Vidro (chapa/superfície grande)	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Vidro duplo com câmara de ar	0,28	—	0,01	0,015	0,02	—

Fonte: MARCO (1990); SMITH *et. al* (1985).

Tabela 5: Coeficiente de absorção a partir de NBR 12179.

Coeficientes de absorção acústica (continua)						
Materiais	Frequências (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Materiais de construção usuais, densos, revestimento, pintura						
Reboco áspero, cal	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Reboco liso	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06
Teto pesado suspenso (de gesso)	0,02	-	0,03	-	0,05	-
Estuque	0,03	-	0,04	-	0,07	-
Superfície de concreto	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Revestimento de pedras sintéticas	0,02	-	0,05	-	0,07	-
Chapas de mármore	0,01	0,01	0,01	-	0,02	-
Revestimento aderente de vidro	0,04	-	0,03	-	0,02	-
Revestimento de vidro espaçado a cada 5 cm de parede	0,25	0,20	0,10	0,05	0,02	0,02
Vidraça de janela	-	0,04	0,03	0,02	-	-
Assoalhos						
Tapetes de borracha	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Taco colado	0,04	0,04	0,06	0,12	0,10	0,17
Linóleo	0,02	-	0,03	-	0,04	-
Passadeira fina porosa	0,03	-	0,17	-	0,40	-
Tapete de boucle duro	0,03	0,03	0,04	0,10	0,19	0,35
Tapete de 5 mm de espessura	0,04	0,04	0,15	0,29	0,52	0,59
Tapete boucle macio	0,08	-	0,20	-	0,52	-
Passadeira de coco	0,02	0,03	0,05	0,10	0,27	0,48
Tapete de veludo	0,02	0,06	0,10	0,24	0,42	0,60
Tapete 5mm sobre base de feltro 5mm	0,07	0,21	0,57	0,66	0,81	0,72
Materiais porosos e isolantes						
a) Fibras Naturais						
Chapa leve de lã de madeira, de 25 mm, em parede rígida	0,04	0,13	0,52	0,61	0,72	
Chapa leve de lã de madeira com espaço de 5 cm vazio	0,25	0,33	0,50	0,65	0,65	0,70
Chapa leve de lã de madeira com espaço de 5 cm preenchido com absorvente acústico	0,18	0,33	0,80	0,90	0,80	0,83
Chapa leve de lã de madeira, de 25 mm, com espaço vazio de 2,4 cm	0,06	0,20	0,66	0,49	0,72	0,76
Chapa leve de lã de madeira, de 50 mm, diretamente em parede rígida	0,11	0,33	0,90	0,60	0,79	0,68
Chapa leve de lã de madeira, de 25 mm, com espaço de 2,4 cm, coberta de folha sintética perfurada	0,13	0,66	0,48	0,44	0,72	0,73

Coefficiente de absorção (continua)						
Materiais	Frequências (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Chapa de cavacos de madeira, de 13 mm, com espaço vazio de 5 cm até a parede	0,24	0,20	0,19	0,20	0,26	0,45
Feltro de fibra natural, de 5 mm, diretamente na parede	0,09	0,12	0,18	0,30	0,55	0,59
Chapa de acústica macia, de fibra perfurada ranhurada, com espaço de 5 cm da parede (esp = 12mm)	0,20	0,36	0,31	0,34	0,46	0,62
Chapa de acústica macia, diretamente na parede	0,03	0,14	0,27	0,40	0,52	0,63
Chapa de acústica macia, com perfuração integral espaçada a 5 cm	0,03	0,23	0,69	0,61	0,73	0,71
Chapa tubular de cavacos de madeira entalhada e folheada, de 25 mm, espaçada a 3 cm da parede, entalhes espaçados a 19 mm, espaço sem enchimento	0,19	0,36	0,39	0,63	0,98	1,00
b) Minerais						
Revestimento de amianto pulverizado ±12mm de espessura	-	0,30	0,35	0,50	0,60	-
Parede de pedra-pomes de 100mm, sem revestimento	0,03	0,17	0,26	0,50	0,56	0,68
c) Materiais sintéticos						
Espuma de uréia, 50mm, 15 kg/m³, diretamente em parede densa	0,12	0,20	0,45	0,65	0,70	0,75
Chapa absorvente microporosa em chapa de base, espaçada da parede a 50 mm	0,37	0,70	0,59	0,54	0,59	0,62
Folha absorvente fina, microporosa, a 50mm da parede, espaço vazio	0,04	0,15	0,52	0,95	0,93	0,58
Móveis, tecidos, humano						
Uma pessoa com cadeira	0,33	-	0,44	-	0,40	-
Poltrona estofada, vazia, coberta de tecido	0,28	0,28	0,28	0,28	0,34	0,34
Cadeira estofada, chata, c/ tecido, vazia	0,13	-	0,20	-	0,25	-
Cadeira idem, com couro sintético	0,13	-	0,15	-	0,07	-
Cadeira de assento dobradiço, de madeira vazia	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08	0,05
Tecido de algodão esticado liso	0,04	-	0,13	-	0,32	-
Tecido de algodão esticado liso, 50/150mm, na frente da parede lisa	0,20	-	0,38	-	0,45	-
Cobertura de cretone	0,07	-	0,15	-	0,25	-

Coeficiente de absorção (continua)						
Materiais	Frequências (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Feltro de fibra natural 5 mm de espessura	0,09	0,12	0,18	0,30	0,55	0,59
Tecido de juta, de fio grosso	0,05	-	0,07	-	0,12	-
Tecido de juta, de fio grosso, forrado de feltro estampado de 15 mm	0,18	0,18	0,38	0,72	0,75	0,78
Cortina grossa drapçada	0,25	-	0,40	-	0,60	-
Cortina de porta comum, opaca	0,15	-	0,20	-	0,40	-
Tela cinematográfica	0,10	-	0,20	-	0,50	-
Público em ambientes muito grandes (p/ pessoa)	0,13	0,31	0,45	0,51	0,51	0,43
Cadeira de assento dobradiço, encosto com estofamento espesso, poroso, lado inferior do assento absorvente	0,28	-	0,28	-	0,34	-
Portas, Janelas e Aberturas						
Janela aberta	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Portas de madeira, fechadas	0,14	-	0,06	-	0,10	-
Palco sem cortina	0,30	-	0,25	-	0,40	-
Recessos com cortinas	0,25	-	0,30	-	0,35	-
Abertura embaixo de balcão	0,25	-	-	-	-	0,80
Grade de ventilador cada 50% de seção livre	0,30	-	0,50	-	0,50	-
Co-vibradores (chapas densas, folhas)						
Madeira compensada de 3 mm, a 50 mm da parede, espaço vazio	0,25	0,34	0,18	0,10	0,10	0,06
Madeira compensada de 3 mm, a 50 mm da parede, espaço vazio, amortecimento nas bordas	0,46	0,47	0,23	0,12	0,10	0,06
Madeira compensada de 3 mm, a 50 mm da parede, espaço preenchido com lã mineral	0,61	0,65	0,24	0,12	0,10	0,06
Lã mineral de 50 mm coberta de papelão denso	0,74	0,54	0,36	0,32	0,30	0,17
Vidro plano de 3-4mm, com 50 mm de espaço e amortecimento nas bordas	0,23	0,11	0,09	0,01	0,01	0,03
Chapa de papelão-gesso, de 9,5 mm, sem furos, na frente de espaço de 50 mm preenchido de lã mineral	0,36	0,12	0,08	0,07	0,06	0,10
Madeira compensada de 2,5mm, na frente de feltro mineral de 50mm a cada 40 kg/m²	0,21	0,37	0,24	0,12	0,02	0,03
Sistemas Absorventes Especiais						
Caixões de chapa perfurada, com chapas de feltro de lã de vidro de 30 mm, suspensos a 180mm	0,30	0,43	0,61	0,62	0,85	0,66

Coefficiente de absorção (continua)						
Materiais	Frequências (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Cunhas pontudas de lã de vidro (absorvedores de cunha para câmara não reverberante), 500mm de comprimento na frente de ressonador, de 150mm de espessura	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Chapa perfurada, forrada de lã de vidro ou cassa, na frente, de 40mm a 50mm de espaço vazio	0,01	0,03	0,10	0,16	0,17	0,20
Chapa perfurada de 3mm, proporção de furos cada 16% forrada de lã de fibra mineral de cada 0,5mm, na frente de 45 mm a 50 mm de espaço vazio	0,01	0,10	0,19	0,25	0,46	0,21
Chapa grande compensada, entalhada, sem forro, a 30mm da parede	0,06	0,02	0,10	0,16	0,22	0,18
Chapa de cimento amianto 4mm, furos na proporção de 16% de 5mm de diâmetro, na frente de tecido e feltro de lã mineral de 50mm (cada 50kg/m³)	0,20	0,68	0,91	0,82	0,82	0,76

Fonte: A partir de ABNT (1992).