



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus de Ilha Solteira

Vinícius Paggioli de Carvalho

Estudo e avaliação da acústica de *home studios*

Ilha Solteira

2019



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus de Ilha Solteira

Vinícius Paggioli de Carvalho

Estudo e avaliação da acústica de *home studios*

Trabalho apresentado à Faculdade de Engenharia - UNESP - Campus de Ilha Solteira, para cumprimento de requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (Mecânica dos Sólidos).

Prof. Dr. João Antônio Pereira
Orientador

Ilha Solteira

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C331e Carvalho, Vinícius Paggioli de.
Estudo e avaliação da acústica de *home studios* / Vinícius Paggioli de Carvalho. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
138 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2019

Orientador: João Antonio Pereira
Inclui bibliografia

1. Acústica. 2. *Home studios*. 3. Acústica de salas.


Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

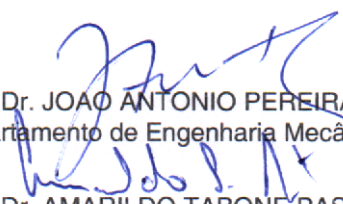
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

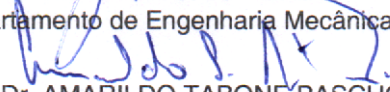
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Estudo e avaliação da qualidade acústica de home studios

AUTOR: VINÍCIUS PAGGIOLI DE CARVALHO

ORIENTADOR: JOAO ANTONIO PEREIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: Mecânica dos Sólidos pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOAO ANTONIO PEREIRA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. AMARILDO TABONE PASCHOALINI
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


DR LEANDRO RODRIGUES BARBOSA
Wave Consultoria

Ilha Solteira, 23 de agosto de 2019

Dedicado a

Neiva Aparecida Paggioli de Carvalho (in memoriam).

Agradecimentos

A Deus, pela oportunidade desta vida.

À minha mãe Neiva (*in memoriam*) e meu pai Sérgio, que, sem seus sacrifícios, apoio e amor incondicionais, nada disto seria possível. Aos meus irmãos, Larissa e Denisar por todo o amor e companheirismo durante todos esses anos.

Aos meus amigos Adalberto, Diego, Fabrício, Lucas, Sara e Vitor Hugo, a família que escolhi pra vida. À minha namorada Karla, por todo o apoio incondicional, paciência e amor a mim concedidos.

Ao Orlando Baltazar Junior e ao Vitor Yukimito que gentilmente cederam seus espaços para a realização deste trabalho. Ao Professor Ms. Antônio Eduardo Turra, sempre prestativo, espirituoso e pronto para me ajudar com seus ensinamentos. Ao meu orientador, pela confiança depositada em mim, e pelo empenho e dedicação a este trabalho.

À Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus Ilha Solteira, onde tive a oportunidade de crescer profissionalmente, e onde fiz tantos amigos.

RESUMO

A indústria fonográfica com o advento dos equipamentos digitais de gravação sofreu grandes transformações nos últimos anos. A mudança mais marcante é a migração dos músicos que antes trabalhavam com grandes gravadoras e hoje trabalham de forma independente, com estúdios construídos ou adaptados em suas residências, os chamados *home studios*. Seja em um grande estúdio profissional de gravação, ou em um *home studio*, o estudo da acústica do local é imprescindível para se obter boa qualidade nas gravações. Uma das áreas aplicadas da acústica é a avaliação e desenvolvimento de ambientes utilizados para gravações de áudio. Essa área contempla diversas avaliações de grande valia, quando se trata da garantia da qualidade acústica das salas em um *home studio*. Reverberações, isolamento sonoro, entre outras variáveis de projeto definem parâmetros acústicos do ambiente. A obtenção destes parâmetros e adaptações do local para diferentes usos, entre outras características utilizadas para avaliação da qualidade sonora dos ambientes, podem ser dadas através do estudo e avaliação do modelo acústico do estúdio, visto que esses parâmetros estão diretamente relacionados com os materiais construtivos, dimensões e arquitetura do ambiente. Este trabalho teve como objetivo o estudo do efeito desses parâmetros na acústica dos ambientes e a criação de modelos numéricos representativos de predição acústica, a partir da análise e avaliação em dois estúdios diferentes. Assim, provendo embasamento teórico-experimental para que haja um melhor entendimento sobre a influência dos elementos constituintes no tratamento e isolamento acústico das salas de gravação e mixagem. Além das medições *in situ*, foram feitas simulações numéricas através do *software CadnaR*, utilizando a geometria dos estúdios como referência, para o ajuste e geração de modelos de predição, com o objetivo de prever comportamentos de Tempo de Reverberação e Isolamento Sonoro nas salas sob diferentes condições de tratamento acústico. Com estas ferramentas em mãos, foi possível prever quais alterações são mais adequadas para que a sala tenha um melhor desempenho para um dado tipo de uso, atender determinadas especificações na gravação (voz ou instrumento musical), de acordo com a resposta em frequência e reverberação. Da mesma forma, também se tornou viável simular o comportamento acústico de uma sala que ainda será construída ou adaptada para a prática do *home studio*.

Palavras-Chaves: Acústica, *Home studio*, Acústica de salas

ABSTRACT

The phonographic industry, with the advent of digital recording equipments, suffered great transformations in the last few years. The most remarkable change is the migration of musicians that used to work with great record labels before and nowadays work in an independent way, with studios constructed in their residences, the so called home studios. Whether in a large professional recording studio, or at an home studio, the study of local acoustics is imprescindible for obtaining good recording quality. One of the applied areas of acoustics is the valuation and development of environments used for audio recordings. This front of study includes many evaluations of great worth when it comes to guaranteeing the acoustic quality in a home studio. Reverberations, sound insulation, between other variables define the acoustic quality of the environment. The obtention of these parameters and adaptations of the room for different kind of usage, along with other characteristics utilized for the valuation of acoustic quality of environments, may be given through study and valuation of an acoustic model of the studio, since these parameters are directly related to the building materials, dimensions and architecture of the environment. The objective of this work was to study the effect of these parameters on the acoustics of the environments and the creation of representative numerical models of acoustic prediction, from the analysis and evaluation in two different studios, so that it is possible to compare the data with each other, providing theoretical-experimental background to better understand the influence of the constituent elements on the treatment and acoustic isolation of recording and mixing rooms. In addition to the practical measurements, numerical simulations were performed using CadnaR software, using the physical structures of the studios as reference, for the calibration and generation of prediction models, in order to predict Reverberation Time and Sound Isolation behaviors in rooms under different acoustic treatment conditions. With these tools, it was possible to predict which changes are best suited for the room to perform better for a given type of use, attend to certain specifications in recordings (voice or musical instrument), according to frequency response and reverberation. Similarly, it has also become feasible to simulate the acoustic behavior of a room that will still be built or adapted for a home studio practice, saving time and capital while reducing the incidence of post construction or adaptation of the site.

Keywords: Acoustics, Home studio, Room acoustics

Lista de Figuras

1	Esquema de propagação do som ao redor de um diapasão.	24
2	Representação das regiões de compressão e rarefação.	26
3	Relação entre comprimento de onda e frequência, calculadas com base na velocidade do som (344 m/s ou 1130 ft/s).	27
4	Formas de onda. (a) Tom puro, (b) ruído.	28
5	Esquema de propagação de uma onda sonora em meio elástico.	30
6	Tom puro: (a) forma de onda na frequência f ; (b) espectro sonoro.	34
7	(a) Superposição de tons puros nas frequências f , $2f$, $3f$; (b) espectro sonoro.	34
8	Ruído: (a) forma de onda na frequência f ; (b) espectro sonoro.	35
9	Espectro sonoro de um mesmo som em bandas estreitas e largas. (Adaptada de Kinsler et al.)	36
10	Diferentes larguras de banda para uma mesma frequência central, com mesmo nível de pressão sonora de 60 dB.	37
11	Raio sonoro incidente em material acústico em uma parede de concreto.	39
12	Decaimento sonoro para cálculo do RT60.	41
13	Limiar diferencial para detecção de reflexão como eco em função do tempo de chegada da reflexão após o som direto (Haas).	44
14	Mecanismos de transmissão sonora: a) por via aérea e b) por via estrutural.	45
15	Modelo ideal de painel, sólido e homogêneo.	46
16	Curva típica de perda na transmissão em função da frequência do som incidente em painéis sólidos e homogêneos.	47
17	Visualização dos modos axiais, tangenciais e oblíquos de uma sala através do conceito de raio.	49
18	Configuração típica de ondas estacionárias entre duas superfícies paralelas.	51

19	Ferramenta <i>amroc</i>	51
20	Representação esquemática do Traçado de Raios.	54
21	Trajetória do raio sonoro.	54
22	Método determinístico de obtenção das direções dos vetores uniformemente distribuídos ao redor da fonte.	55
23	Método estatístico de obtenção das direções dos vetores uniformemente distribuídos ao redor da fonte.	56
24	Esquema do método de imagem.	57
25	Sala de gravação do estúdio Truphonic, localizado em Charleston, Carolina do Sul, EUA.	60
26	Tempos de reverberação (s) sugeridos para estúdios de gravação de acordo com o volume da sala em pés cúbicos (<i>cu ft</i>). A área sombreada é uma região de compromisso para estúdios onde fala e música são gravados. . .	60
27	Sala de mixagem do estúdio Liquid 5th, localizado em Durham, Carolina do Norte, EUA.	61
28	Painel Difusor Acústico Tipo SkyLine DG-17 da empresa Green Acoustics.	63
29	Painel absorvente acústico de espuma, vendido no site DHgate.com.	64
30	Disposições mais comuns de perfuração: (a) reta e (b) alternada.	66
31	Bass Trap de espuma acústica vendido pela Charisma Audio.	68
32	Resposta em frequência de uma sala pequena após tratamento acústico. O gráfico superior se refere à posição de mixagem, e o gráfico inferior mostra a resposta em frequência nos cantos da sala.	69
33	Esquema de montagem dos painéis de <i>drywall</i>	70
34	Distribuição dos modos de ressonância em salas pequenas, médias e grandes.	71
35	Fluxograma da metodologia utilizada.	75
36	Sonômetro <i>Solo Black Edition</i> , da empresa <i>01dB</i>	76
37	Claquete utilizada no experimento.	78
38	Sala de Mixagem do Estúdio 1.	80
39	Sala de Gravação A do Estúdio 1.	80

40	Sala de Gravação B do Estúdio 1.	81
41	Planta baixa do Estúdio 1. As áreas hachuradas representam objetos no interior do estúdio (tapetes, espumas, móveis, etc).	82
42	Configuração da fonte sonora e pontos de medição para a medição da Perda na Transmissão das paredes.	84
43	Fontes sonoras utilizadas no experimento.	85
44	Sala de mixagem do Estúdio 2.	86
45	Sala de Gravação do Estúdio 2.	86
46	Planta baixa do Estúdio 2. As áreas hachuradas representam objetos no interior do estúdio (tapetes, espumas, móveis, etc).	87
47	Configuração da fonte sonora e pontos de medição para a medição da Perda na Transmissão das paredes.	88
48	Fonte sonora <i>JBL Charge 3</i> , utilizada nas medições no Estúdio 2.	89
49	Vista do Estúdio 1.	93
50	Vista do Estúdio 2.	94
51	Aba de configuração para o procedimento de cálculo e geração do mapas acústicos no <i>software CadnaR</i>	95
52	Aba de propriedades da malha (<i>grid</i>) de cálculo para os receptores do <i>software CadnaR</i>	95
53	Mapa sonoro do Estúdio 1.	97
54	Mapa sonoro do Estúdio 2.	99
55	Comparação entre resultados simulados e experimentais de RT60 para as salas avaliadas.	106
56	Comparação entre resultados simulados e experimentais de RT60 para as salas avaliadas.	108
57	Comparação entre resultados simulados e experimentais de pressão sonora para as salas avaliadas no Estúdio 1.	110
58	Comparação entre resultados simulados e experimentais de pressão sonora para as salas avaliadas no Estúdio 2.	112

59	Comparação entre resultados simulados e experimentais de Perda de Transmissão nas paredes das salas avaliadas.	114
60	Ponto de intersecção entre RT60 e volume da Sala A.	116
61	Simulações de diferentes configurações de tratamento acústico para a Sala de Mixagem.	119
62	Simulações de diferentes configurações de tratamento acústico para a Sala A.	119
63	Simulações de diferentes configurações de tratamento acústico para a Sala B.	120
64	Modelo computacional da a) Sala Atual e b) Sala Modificada	120
65	Comparação entre sala atual e simulação de alterações na Sala de Mixagem.	121
66	Comparação entre sala atual e simulação de alterações na Sala A.	122
67	Comparação entre sala atual e simulação de alterações na Sala B.	123
A1	Configuração de cálculo de RT60 para a Sala de Mixagem (Estúdio 1), em seu estado atual.	130
A2	Configuração de cálculo de RT60 para a Sala de Mixagem (Estúdio 1), com retirada das espumas laterais.	131
A3	Configuração de cálculo de RT60 para a Sala de Mixagem (Estúdio 1), com retirada das espumas laterais e superiores.	131
A4	Configuração de cálculo de RT60 para a Sala de Mixagem (Estúdio 1), com retirada de espumas e cortina.	132
A5	Configuração de cálculo de RT60 para a Sala de Mixagem (Estúdio 1), com retirada de espumas, cortina e mobília.	132
A6	Configuração de cálculo de RT60 para predição de melhorias na Sala de Mixagem (Estúdio 1).	133
A7	Configuração de cálculo de RT60 para a Sala A (Estúdio 1), em seu estado atual.	133
A8	Configuração de cálculo de RT60 para a Sala A (Estúdio 1), com retirada das espumas laterais.	134
A9	Configuração de cálculo de RT60 para a Sala A (Estúdio 1), com retirada das espumas laterais e superiores.	134

A10	Configuração de cálculo de RT60 para a Sala A (Estúdio 1), com retirada de espumas e tapete.	135
A11	Configuração de cálculo de RT60 para a Sala A (Estúdio 1), com retirada de espumas, cortina e tapete.	135
A12	Configuração de cálculo de RT60 para predição de melhorias na Sala A (Estúdio 1).	136
A13	Configuração de cálculo de RT60 para a Sala B (Estúdio 1), em seu estado atual.	136
A14	Configuração de cálculo de RT60 para a Sala B (Estúdio 1), com retirada das espumas laterais.	137
A15	Configuração de cálculo de RT60 para a Sala B (Estúdio 1), com retirada das espumas laterais e superiores.	137
A16	Configuração de cálculo de RT60 para predição de melhorias na Sala B (Estúdio 1).	138
A17	Configuração de cálculo de RT60 para a Sala de Mixagem (Estúdio 2), em seu estado atual.	138
A18	Configuração de cálculo de RT60 para a Sala de Gravação (Estúdio 2), em seu estado atual.	139

Lista de Tabelas

1	Ressonância em Estúdios.	72
2	Valores de RT60 para as salas do Estúdio 1, simulados através do <i>software CadnaR</i>	91
3	Valores de RT60 para as salas do Estúdio 2, simulados através do <i>software CadnaR</i>	92
4	Valores de nível de pressão sonora (em dB) para a simulação de cálculo do isolamento das salas do Estúdio 1.	100
5	Valores de nível de pressão sonora (em dB), para a simulação de cálculo do isolamento das salas do Estúdio 2.	100
6	Simulação de valores de perda na transmissão (dB) para a Parede 1 e Parede 2 do Estúdio 1 através do <i>software CadnaR</i>	101
7	Simulação de valores de perda na transmissão (dB) para a Parede 1 do Estúdio 2 através do <i>software CadnaR</i>	101
8	Valores de RT60 para a Sala A, com excitação feita pela claquete.	102
9	Valor de RT60 para a Sala A feita com o estouro de um balão de festa comparado à média dos valores obtidos com o uso da claquete.	102
10	Valores de RT60 para a sala de mixagem, com excitação feita pela claquete.	102
11	Valores de RT60 para a Sala B, com excitação feita pela claquete.	103
12	Valores de RT60 para a Sala de Gravação, com excitação feita pela claquete.	103
13	Valores de RT60 para a Sala de Mixagem, com excitação feita pela claquete.	103
14	Valores de nível de pressão sonora (em dB) para a medição do isolamento das salas.	104
15	Valores de nível de pressão sonora (em dB) para a medição do isolamento das salas do Estúdio 2.	104

16	Valores perda de transmissão para a parede 1 e parede 2.	105
17	Valores perda de transmissão para a Parede 1 do Estúdio 2.	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Amplitude
Ab	Absorção
α	Coefficiente de absorção sonora
c	Velocidade de propagação do som no ar (m/s)
dB	Decibel
EL	Espuma lateral
ET	Espuma do teto
f	Frequência (Hz)
f_0	Frequência de ressonância (Hz)
ft	Pé (medida)
λ	Comprimento de onda
I	Intensidade sonora (Watt/m ²)
I_r	Intensidade sonora com orientação radial (Watt/m ²)
ISO	International Organization for Standardization
ms	Milissegundos
ω	Frequência angular
P	Potência do sistema (Watt)
P_o	Potência arbitrária de referência (Watt)
PT	Perda na Transmissão
p_{medio}	Valor médio de pressão sonora
$p_{ medio }$	Valor absoluto de pressão sonora
p_{eficaz}	Valor eficaz de pressão sonora
r	Distância da fonte
$RT60$	Tempo de Reverberação (60 dB de decaimento sonoro)
RTM	Método do Traçado de Raios
S	Área de superfície (ft ² ou m ²)
T	Período
τ	Coefficiente de Transmissão Sonora
V	Volume (m ³)
W	Potência sonora

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	19
1.2	ESTUDOS RELACIONADOS	20
1.3	JUSTIFICATIVA	22
2	CONCEITOS E FUNDAMENTOS	23
2.1	SOM E RUÍDO	23
2.2	FUNDAMENTOS DO SOM	24
2.2.1	Comprimento de onda	25
2.2.2	Forma da onda	27
2.2.3	Intensidade sonora e potência sonora	30
2.2.4	Representação matemática da sensação provocada pelo som e os decibéis	31
2.2.5	Espectro sonoro	33
2.3	PROPAGAÇÃO DO SOM EM AMBIENTES FECHADOS	37
2.4	ABSORÇÃO SONORA	38
2.4.1	Coefficiente de absorção sonora	39
2.4.2	Tempo de reverberação e eco	41
2.4.3	<i>Flutter echoes</i>	44
2.5	ISOLAÇÃO SONORA	45
2.6	MODOS DE RESSONÂNCIA (ONDAS ESTACIONÁRIAS)	48
2.7	MÉTODOS NUMÉRICOS DE SIMULAÇÃO ACÚSTICA	52

2.7.1	Métodos acústicos geométricos	53
2.7.2	Método do traçado de raios	53
2.7.3	Método de imagem (método das fontes virtuais)	57
2.7.4	Métodos numéricos no CadnaR	58
3	ESTÚDIOS DE GRAVAÇÃO	59
3.1	ACÚSTICA DE ESTÚDIO DE GRAVAÇÃO	59
3.1.1	Salas de gravação	59
3.1.2	Salas de mixagem	61
3.2	TRATAMENTO ACÚSTICO	62
3.2.1	Difusores sonoros	62
3.2.2	Absorvedores sonoros	63
3.2.3	Isolantes sonoros	69
3.3	PROJETO DE SALAS DE ESTÚDIO	71
3.3.1	Adaptação de ambientes para a implementação de um <i>home studio</i>	72
4	MATERIAIS E MÉTODOS	74
4.1	EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS UTILIZADAS NA MODELAGEM TEÓRICO - EXPERIMENTAL	76
4.1.1	Sonômetro	76
4.1.2	Claquete	77
4.1.3	<i>Software CadnaR</i>	78
4.2	NORMAS TÉCNICAS	78
4.2.1	Recomendações técnicas	79
4.3	DESCRIÇÃO DOS AMBIENTES E DEFINIÇÃO DE PONTOS DE ME- DIÇÕES	79
4.3.1	Estúdio 1	79
4.3.2	Estúdio 2	85

5	MODELAGEM NUMÉRICA E EXPERIMENTAL	90
5.1	MODELO NUMÉRICO	90
5.1.1	Tempo de reverberação - RT60	91
5.1.2	Modelagem, geração do mapa acústico e perda na transmissão . .	92
5.2	MODELO EXPERIMENTAL	101
5.2.1	Tempo de reverberação - RT60	101
5.2.2	Perda na transmissão	104
5.3	COMPARAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS	105
5.3.1	Tempo de reverberação - RT60	105
5.3.2	Isolamento entre salas	109
5.4	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS SALAS COM BASE EM RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS	115
5.4.1	Estúdio 1	116
5.4.2	Estúdio 2	117
6	UTILIZAÇÃO DOS MODELOS DE PREDIÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE TRATAMENTO ACÚSTICO NOS AMBIENTES	118
6.1	ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS ACÚSTICOS NO RT60	118
6.2	ESTUDO DE PREDIÇÃO DE TRATAMENTOS ACÚSTICOS NO RT60 .	120
7	CONCLUSÃO	124
	REFERÊNCIAS	126
	APÊNDICE A	130

1 INTRODUÇÃO

O som, em suas diversas formas de propagação, se faz presente nas mais variadas áreas e aplicações de engenharia e do nosso cotidiano. Se não for devidamente tratado, pode ser extremamente desagradável e até prejudicial à saúde humana. Entretanto, pode ser prazeroso quando percebido na melodia de uma música, ou quando se trabalha em um local de trabalho silencioso. É de suma importância o estudo da acústica para cada área de aplicação.

Uma das áreas de atuação da acústica é a avaliação e o desenvolvimento de estúdios para gravações de áudio. Essa frente de estudo contempla diversas formas de avaliações que são de suma importância para que se garanta uma qualidade acústica de alto nível em salas de captação, assim como em salas de controle e mixagem.

Nos últimos anos, tem-se observado uma crescente tendência no surgimento de novos estúdios de gravação, sejam estes comerciais ou caseiros, geralmente criados sob instalações mais simples, conhecidos como *home studios*. Tal fato pode ser creditado principalmente à diminuição dos custos dos equipamentos para se captar, mixar e produzir áudio (ALMEIDA, 2004). Com o surgimento de programas como o *Pro Tools* (plataforma de áudio digital que integra *hardware* e *software*, da *Avid Audio*), a produção musical se tornou mais acessível, pois basta apenas que se tenha este software instalado em um computador, ligado a uma placa de áudio, e o usuário pode realizar as gravações por meio de microfones ou cabeamento direto do instrumento musical com a placa, tudo isso em boa qualidade, com taxas de amostragem adequadas, principalmente levando-se em consideração o custo destes equipamentos digitais em relação aos equipamentos analógicos, os quais eram utilizados no passado. Com este tipo de *software*, é possível ainda utilizar *plug-ins* (extensões que simulam diferentes configurações sonoras, como compressores, reverberadores, etc) que facilitam o trabalho e expandem em muito o leque de opções do produtor musical em termos de timbres e equalização (ALMEIDA, 2004).

Com o lançamento destes equipamentos digitais no mercado, os custos de gravação

caíram vertiginosamente, assim como o custo hora/estúdio, fazendo com que as grandes gravadoras tivessem que se adaptar à nova realidade comercial, sendo que pequenas gravadoras, construídas com relativamente baixo capital inicial, conseguiam resultados surpreendentes, com qualidade similar àquelas dos grandes estúdios de gravação consagrados no ramo (ALMEIDA, 2004).

Ao mesmo tempo em que os estúdios de gravação se popularizam, não basta apenas ter em posse os equipamentos necessários para a gravação e produção musical. É necessária a caracterização acústica do ambiente, de modo a se entender como aquele espaço responde ao que se deseja em termos de parâmetros acústicos e, principalmente, da proposta de uso do estúdio. Considerando-se um local já existente, o mesmo pode ser melhorado e modificado para as atividades que se deseja. Ou ainda, uma sala pode ser projetada e construída para que se tenha o ideal desempenho acústico de acordo a proposta desejada.

Este projeto tem como foco a avaliação de parâmetros essenciais para a qualidade acústica de um estúdio de gravação. Serão avaliadas as salas de captação e mixagem de dois estúdios localizados na cidade de Ilha Solteira - SP. Parâmetros como tempo de reverberação e isolamento, assim como os espectros característicos serão estudados e comparados entre os estúdios, utilizando as normas internacionais ISO. Possíveis adaptações do local para diferentes usos serão discutidas.

Também foram feitas, a fins de comparação, simulações utilizando o software *CadnaR*, da *Datakustik*, utilizado para projetar salas e simular fenômenos acústicos em ambientes internos. Com base nos resultados obtidos, é possível analisar a influência da arquitetura das salas, dos materiais de construção do local, do tratamento acústico utilizado, assim como o isolamento nas paredes externas do estúdio, e como essas configurações podem propiciar um aproveitamento ótimo para a gravação de determinados tipos de instrumentos.

1.1 OBJETIVOS

Propor com base na análise acústica teórico-experimental de dois diferentes *homestudios*, melhorias dos ambientes objetos do presente estudo.

Objetivos específicos

Realizar medições e caracterizações sonoras em dois diferentes estúdios de gravação musical, buscando identificar a aplicação mais adequada do estúdio em termos de tempo

de reverberação, criar e simular os modelos numéricos dos respectivos estúdios, utilizando a equação de Eyring, e compará-los com os modelos experimentais, simular diferentes tratamentos acústicos nestes ambientes em busca de melhorarias na qualidade acústica do ambiente.

1.2 ESTUDOS RELACIONADOS

Alguns trabalhos têm sido desenvolvidos neste sentido abrangendo acústica de salas convencionais, salas de estúdios de gravação, salas de pequenos estúdios e simulação acústica. Alguns deles são brevemente discutidos a seguir.

Martins (2010) estudou a adequação de salas retangulares para a prática de atividades e serviços relacionados ao ramo musical. Após análise teórica, introduziu métodos de medição, tendo em vista um projeto de otimização acústica real. Comparou os tempos de reverberação RT60 antes e depois do tratamento acústico na sala em questão. Martins afirma ainda que o tratamento acústico de ambientes é na maioria das vezes baseado nas experiências anteriores, fato este que pode levar ao surgimento de enganos e falsos conceitos, criados por pessoas que são leigas no assunto, e que uma análise teórica pode ajudar a derrubar estes "mitos" e comprovar a necessidade de um estudo do ambiente antes da aplicação prática.

Rodrigues (2010) teve como objetivo aprofundar a temática da qualidade acústica de pequenos estúdios de gravação musical. Analisou a qualidade acústica de um estúdio de gravações localizado em uma edificação comercial e propôs soluções relativas à acústica dos ambientes e ao isolamento do local, destacando os principais aspectos que favorecem a qualidade acústica assim como as dificuldades associadas à instalação de um estúdio em um espaço comercial. Realizou avaliação de parâmetros objetivos como o tempo de reverberação, ruído de fundo e o desempenho do isolamento acústico interno das paredes do estúdio. Analisou também alguns parâmetros subjetivos através da aplicação de questionário entregue aos músicos usuários do estúdio.

Rodrigues afirma que no Brasil não existem muitos profissionais qualificados para a execução de projetos acústicos específicos para estúdios, o que acaba se tornando um desafio para quem deseja construir um estúdio ou um *home studio*, e mesmo quando são elaborados os projetos acústicos, não existe nenhum guia que oriente arquitetos e engenheiros de como fazer os projetos de estúdios, em face de pouca literatura em língua portuguesa e do enfoque pouco prático das publicações estrangeiras, que geralmente focam

a projetos de grandes estúdios e alto custo.

Fazenda e Davies (2004) entrevistaram usuários da sala de controle para descobrir quais eram seus pontos de vista a respeito dos fatores que fazem com que uma sala de controle seja considerada "boa". O trabalho teve como objetivo informar e auxiliar no desenvolvimento de diretrizes para a realização de projetos bem sucedidos de melhores salas de controle. Preferências como reverberação, posicionamento das caixas acústicas e foco foram identificadas. Foi mostrado que a resposta em frequência, especialmente nas frequências mais baixas ainda são problemas difíceis para os usuários da sala de controle.

Storyk e Cipriano (2006) publicaram sobre o comportamento das baixas frequências em salas pequenas e o problema causado por estas, devido ao fato dos ambientes fechados se comportarem de forma modal. Comentaram sobre proporções de sala, e que o que prejudica a qualidade sonora não são as ressonâncias, mas sim as frequências modais que não foram distribuídas ou tratadas adequadamente, e que as salas retangulares não são "ruins", pois é possível prever a resposta modal destas. Como problema adicional desta configuração, foi citada a ocorrência das reflexões 100% especulares, os chamados *flutter echoes*, porém de fácil tratamento com a adição de elementos de absorção e difusão sonora. Foram propostas soluções com o uso de painéis absorventes, difusores e *bass traps*, variando das mais simples às mais sofisticadas.

Mattos (2015) avaliou acusticamente duas salas de controle em estúdios de gravação projetados para monitoração de multicanais. Seu trabalho teve como objetivo principal a caracterização do comportamento acústico destas salas, medindo, para que tal análise fosse feita, parâmetros como o Tempo de Reverberação, a Curva da Resposta Operacional da Sala, Curva de Energia no Tempo e o Ruído de Fundo. Também foram analisadas as características de construção das salas em questão assim como seus respectivos modos acústicos.

Bürgin (2004) buscou aproximar as pessoas que trabalham dentro da indústria de produção fonográfica comercial à comunidade acadêmica do país, em seu artigo "Acústica em *Homestudios*". Utilizando como base as teorias de acústica e as concepções de produção, teve como objetivo mostrar as estratégias que possibilitam gravar e produzir com alta qualidade em *homestudios*. Concluiu que obteve resultados excelentes com a utilização e experimentação de diferentes espaços da casa, tendo em vista que a gravação de instrumentos acústicos é um dos maiores desafios encontrados.

1.3 JUSTIFICATIVA

No Brasil, apesar do rápido crescimento no número de estúdios, devido em grande parte aos avanços tecnológicos nos anos 90, a literatura em relação à acústica de estúdios de gravação ainda é escassa (PASSERI; BISTAFA, 2002), e em sua maior parte é formada por artigos técnicos, que não abordam detalhadamente o aspecto científico da acústica no processo de gravação de áudio. Neste contexto, este trabalho se justifica pela necessidade de um maior embasamento teórico-experimental dos parâmetros de acústica de salas, objetos de estudo na especificação/definição de estúdios, que muitas vezes não são tratados com o nível de detalhamento necessário nos artigos técnicos, ao se analisar as diferentes variáveis físicas e acústicas em um estúdio (geometria espacial, tratamento e isolamento acústicos).

2 CONCEITOS E FUNDAMENTOS

Neste capítulo são apresentados conceitos básicos relativos à propagação de ondas sonoras, assim como conceitos mais específicos em relação à fenômenos recorrentes na área de estúdios de gravação.

2.1 SOM E RUÍDO

Segundo Bistafa (2011), "O som é a sensação produzida no sistema auditivo; e ruído é um som indesejável, em geral de conotação negativa". Tal definição ilustra de forma geral a relação do homem com os fenômenos acústicos do ambiente em que se encontra; estabelece que o som, quando desejado, pode ser agradável aos ouvidos, como por exemplo, uma melodia tocada harmoniosamente em um piano, ao mesmo tempo em que pode-se tornar "ruído" quando não é desejado. Por exemplo, no caso de uma máquina operando em um ambiente fabril, onde os trabalhadores devem utilizar equipamentos de proteção individual pela insalubridade do local ou ainda, se utilizando do exemplo musical, o som de um piano se torna extremamente desagradável quando tem todas as suas teclas pressionadas de uma só vez, sem qualquer harmonia.

O ruído de forma geral é indesejado. Porém, pode ser útil, como por exemplo, para o engenheiro ou técnico de manutenção, quando uma máquina opera com um ruído diferente do que aquele de costume, em funcionamento normal.

Para que um determinado som seja agradável e harmonioso aos ouvidos, as frequências que o constituem devem ser criteriosamente tratadas, de forma que apenas aquelas que contribuem harmonicamente para a composição do som sejam ressaltadas, enquanto que as outras frequências que não são de interesse são suprimidas e minimizadas. Isso pode ser feito de maneira intuitiva, ao se cantar as linhas melódicas de uma canção, ou ao se dedilhar alguns acordes em um violão. No entanto, quando se deseja registrar e tratar estes sons, deve-se buscar a melhor resposta acústica possível, dentro da proposta de trabalho. Deve-se minimizar qualquer tipo de interferências externas à sala através de isolamento

acústico, e é primordial que seja feito uma análise acústica para melhor clareza, definição e ressaltos das frequências de interesse do produtor musical.

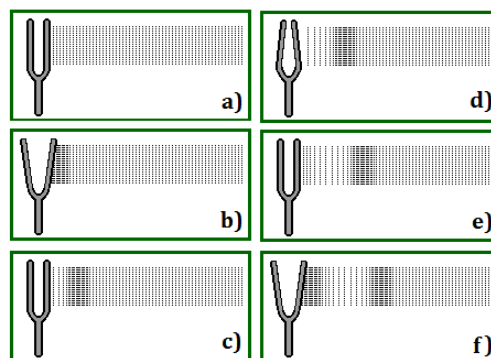
2.2 FUNDAMENTOS DO SOM

No presente trabalho, e, para os interessados em áudio e música no geral, existem duas abordagens de interesse quando se trata de som: a primeira, quando concebido como um movimento de onda em um meio elástico (como o ar, por exemplo), o som é um estímulo. A segunda, quando o som é entendido como uma excitação no aparelho auditivo, resultando na percepção do som. Dependendo do assunto de interesse, uma ou outra abordagem deve ser utilizada, como por exemplo: Se deseja conhecer fenômenos físicos relacionados à propagação do som proveniente de um alto falante, tem-se um problema de física, ao mesmo tempo que, se é de interesse saber como esta onda proveniente do alto falante soa aos ouvidos de uma pessoa, deve-se utilizar métodos psicoacústicos, de natureza subjetiva (EVEREST; POHLMANN, 2009).

O som é uma onda mecânica proveniente da vibração das partículas do meio, que se movem para frente e para trás, no sentido de propagação da onda, sendo caracterizado como uma onda longitudinal, que se propaga em todas as direções. A sensação de audição percebida pelo ouvido humano acontece devido ao movimento oscilatório que é transmitido de molécula a molécula no meio, desde a fonte sonora até o ouvinte (FERNANDES, 2002).

Um exemplo básico de demonstração de como o som é formado provém de um dispositivo chamado diapasão, utilizado para afinar instrumentos musicais, como mostra a Figura 1:

Figura 1 – Esquema de propagação do som ao redor de um diapasão.



O som não pode se propagar sem um meio físico. Este meio pode ser um gás, um líquido ou sólido, como o ar, a água, aço, concreto, ou em qualquer outro meio elástico (EVEREST; POHLMANN, 2009). Conforme as hastes do diapasão vibram para frente e para trás, as partículas de ar vizinhas são empurradas para trás e para frente, fazendo com que, quando a haste é movimentada para trás, seja criada uma área de baixa pressão, resultando no movimento das partículas de ar para trás novamente. Este movimento repetido cria zonas onde a concentração das partículas é menor em detrimento de outras zonas em que a concentração é maior, de forma intercalada. Estas regiões são chamadas de zonas de compressão e rarefação. As zonas de compressão possuem alta pressão de ar, enquanto as zonas de rarefação são áreas de baixa pressão de ar (EVEREST; POHLMANN, 2009).

Cada molécula de ar, quando excitada, transmite para a molécula vizinha seu movimento oscilatório, se comportando como uma nova fonte sonora. Esse método de análise é descrito pelo *Princípio de Huygens-Fresnel*.

A caracterização de um determinado tipo de som é bastante ampla, e existem diversas formas de se caracterizar determinado tipo de som, sejam elas objetivas ou subjetivas. A frequência, por exemplo, pode ser medida de forma objetiva quando se utiliza um osciloscópio e analisa o comprimento da onda em questão. Por outro lado, a altura (percepção dos tons graves e agudos) é subjetiva, e é ainda variável quando se escuta o som em diferentes volumes. Embora não exista forma de equacionar frequência e altura dos tons, elas são análogas. Uma relação similar se faz presente também entre intensidade e o volume sonoro. Estas não se relacionam de forma linear. Assim como a relação entre o espectro de frequência e a percepção de timbre não é trivial em função do sistema auditivo, além de uma série de outros fatores (EVEREST; POHLMANN, 2009).

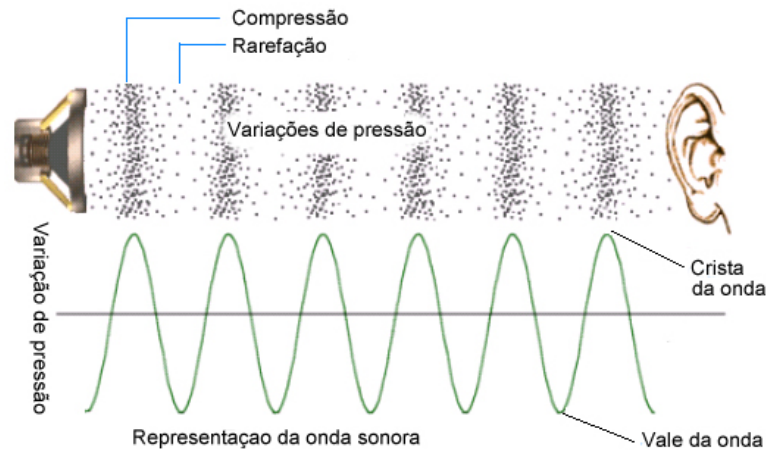
Bistafa (2003) define o som como: "uma variação da pressão ambiente detectável pelo sistema auditivo". A menor variação de pressão ambiente que pode ser detectada pelo aparelho auditivo humano é da ordem de 2×10^{-5} Pa, ou simplesmente limiar da audição. Se o som é demasiadamente intenso, ele pode causar dor e o indivíduo ter a sua audição prejudicada. Estes níveis sonoros demasiadamente intensos são chamados de limiar da dor, e seus valores variam de 20 até 200 Pa.

2.2.1 Comprimento de onda

O comprimento de onda é a distância que uma onda se propaga no tempo leva para completar um ciclo. Pode também ser expressada, em uma onda periódica, como a

distância de um ponto qualquer até o ponto correspondente no próximo ciclo da onda (EVEREST; POHLMANN, 2009). Uma onda senoidal é mostrada na Figura 2.

Figura 2 – Representação das regiões de compressão e rarefação.



Fonte: <physics.tutorvista.com> (adaptado). Acesso em 15 out 2017.

A onda sonora, representada de forma senoidal é apenas uma ilustração da natureza das variações de pressão em função do tempo e espaço (regiões de máximo, na compressão e regiões de mínimo, na rarefação), e não deve ser confundida com uma onda transversal. O comprimento de onda é frequentemente representado pela letra grega λ (lambda). Pode ser calculado pela Equação (1):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

onde:

c é a velocidade do som no ar (344 m/s)

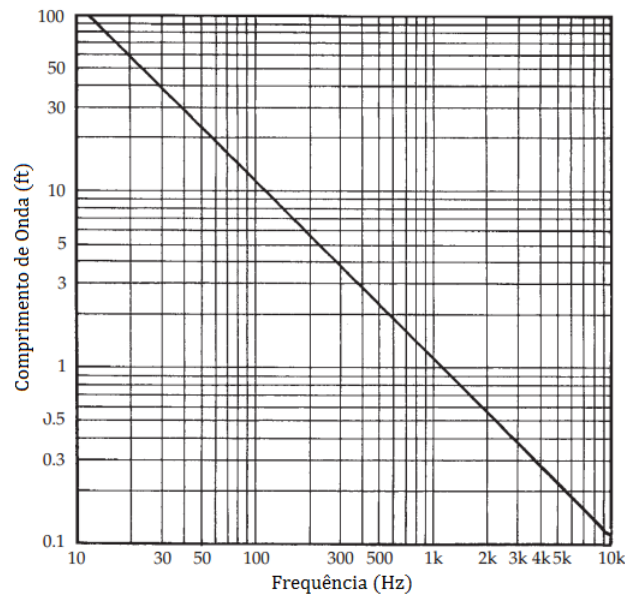
f é a frequência (Hz)

Logo:

$$\lambda(m) = \frac{344}{f(Hz)} \quad (2)$$

Esta é uma das relações mais importantes em acústica. O comprimento e a frequência de uma onda são inversamente proporcionais, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Relação entre comprimento de onda e frequência, calculadas com base na velocidade do som (344 m/s ou 1130 ft/s).



Fonte: Everest e Pohlmann (2009) (adaptado).

Como mostra o gráfico, é possível admitir um valor de comprimento de onda e se obter a frequência desta onda, e vice-versa.

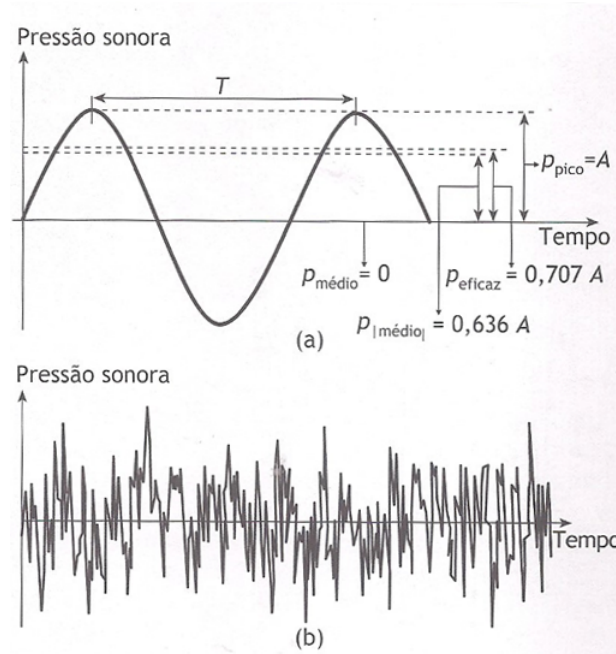
2.2.2 Forma da onda

Quando captada temporalmente, a pressão sonora pode prover informações que podem ser visualizadas por meio de um registrador gráfico, acoplado a um microfone. Este registro é conhecido pelo nome de *forma de onda*, e se dá por meio da captação da pressão em um determinado ponto no espaço durante um certo tempo de medição (BISTAFA, 2011).

Na Figura 4 é mostrado, de forma genérica o comportamento de um tom puro (a) e de um sinal de ruído (b). Observando a figura, é possível notar alguns parâmetros importantes em relação a esses sinais relativos ao som. Existe um interesse em caracterizar, por meio de um único número representativo a forma da onda. A escolha de um numero para caracterizar a onda poderia ser o *valor de pico* (p_{pico}). Este valor é facilmente observado quando visualizada a figura do tom puro, devido ao fato de que o valor de pico do tom puro é a própria amplitude da onda, A . Já no caso do ruído, devido à complexidade e aleatoriedade dos valores em questão, este número único não é obtido de forma direta, mas sim de forma estatística, ou, quando o sinal é digital, é obtido de acordo com a taxa

de aquisição, com uma quantidade de amostras suficientemente grande para que se tenha valores representativos (BISTAFA, 2011).

Figura 4 – Formas de onda. (a) Tom puro, (b) ruído.



Fonte: Bistafa (2011).

Existem outras formas de se tentar caracterizar as ondas sonoras por um "único numero", como por exemplo, conhecer o valor da pressão média ou eficaz, dentre outros.

Os principais valores utilizados para caracterizar a pressão sonora podem ser obtidos através de fórmulas equações simples. São eles: *valor médio da pressão sonora* (p_{medio}), *valor absoluto médio da pressão sonora*, ($p_{|medio|}$) e *valor eficaz da pressão sonora* (p_{eficaz}).

Para uma obtenção discreta dos pontos, com um número de amostras N , tem-se os seguintes resultados:

Valor médio da pressão sonora:

$$p_{\text{medio}} = \frac{\sum_{i=1}^N p_i}{N} \quad (3)$$

Valor absoluto médio da pressão sonora:

$$p_{|medio|} = \frac{\sum_{i=1}^N |p_i|}{N} = 0,636A; \quad (4)$$

Valor eficaz da pressão sonora:

$$p_{eficaz} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N p_i^2}{N}} = 0,707A; \quad (5)$$

Como o valor médio da pressão é relativo à soma dos valores positivos e negativos, é de se esperar que seja igual a zero. O mesmo se verifica para o ruído, verificando-se logo que este não é um bom número único a ser utilizado em termos de caracterização da onda.

Já o valor absoluto médio e o valor eficaz podem ser utilizados adequadamente, por possuírem valor que obrigatoriamente depende de A. O número mais utilizado é o valor eficaz, pela relação direta com a equação da energia transportada pela onda sonora. É também conhecido como *root mean square value*, na língua inglesa, equivalente à tradução "raiz quadrada do valor médio quadrada" (BISTAFA, 2011).

O valor absoluto médio e o valor eficaz podem ser obtidos (inclusive para ruídos), aplicando estas fórmulas para cada caso, e a precisão destes números únicos será maior conforme se aumenta o número de amostras N, extraídas da forma de onda. É possível, também, que se calcule o valor pontual da pressão eficaz quando se conhece a expressão que caracteriza a variação da pressão em função do tempo, conforme mostra a equação 6

$$p_{eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (6)$$

onde, para um tom puro, de amplitude A, e frequência angular $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ tem-se que $p(t) = A \cos(\omega t)$, resultando na equação

$$p_{eficaz} = \frac{A}{\sqrt{2}} = 0,707A \quad (7)$$

A integração equivale à somatória das amostras extraídas da forma de onda. Porém, não é possível utilizar esta mesma equação para o cálculo do valor eficaz, pois a expressão analítica que representa esta forma de onda não é conhecida. Para tal caso, deve-se então extrair um número satisfatório, suficientemente grande para que a quantidade de amostras seja significativa, para maior precisão dos resultados (BISTAFA, 2011)

2.2.3 Intensidade sonora e potência sonora

A intensidade sonora (I) pode ser entendida como a quantidade média de energia, na unidade de tempo, que atravessa uma área unitária perpendicular à direção de propagação da onda. Sua unidade é dada por W/m^2 , pois relaciona energia (watt) sobre uma certa superfície de área (m^2). A equação 8 mostra esta relação:

$$I = \frac{W}{S} \quad (8)$$

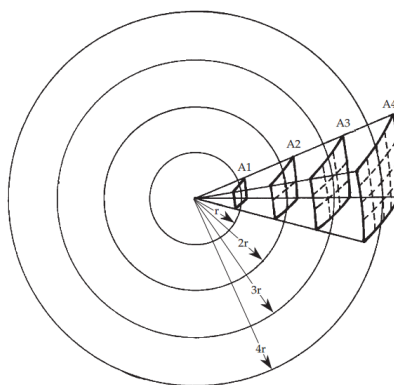
onde:

W é a potência sonora (W)

S é a área da superfície (m^2)

A Figura 5 mostra como o som se propaga no meio, em todas as direções, onde a fonte pode ser considerada como sendo pontual se as suas dimensões forem pequenas comparadas às distâncias onde as ondas sonoras são medidas, assim como seus comprimentos de onda (EVEREST; POHLMANN, 2009).

Figura 5 – Esquema de propagação de uma onda sonora em meio elástico.



Fonte: Everest e Pohlmann (2009).

A onda sonora possui a mesma intensidade em todas as direções, e atravessa as áreas A1, A2, A3 e A4, com seus raios r , $2r$, $3r$ e $4r$, respectivamente. A mesma potência sonora passa pelas áreas A1, A2, A3 e A4, porém, como a área aumenta conforme a esfera pulsante "cresce" na propagação do som, a intensidade sonora diminui com a distância

em relação ao raio.

A intensidade sonora, a rigor, é uma grandeza vetorial (além de sua magnitude, também possui direção e sentido), porém, quando não explicitada a direção e o sentido, subentende-se que estão no sentido de propagação da direção da onda (BISTAFA, 2011).

Para se obter a potência sonora de uma dada fonte a uma dada distância, basta que se multiplique a intensidade I pela distância r da esfera pulsante, pela área da superfície esférica. Ou seja:

$$W = I_r 4\pi r^2 \quad (9)$$

onde:

I_r = intensidade sonora (com orientação vetorial radial) (W/m^2)

$4\pi r^2$ = área da esfera pulsante (m^2)

Reajustando, obtém-se a equação 10:

$$I_r = W/4\pi r^2 \quad (10)$$

A equação 10 mostra uma relação muito importante: a intensidade sonora é inversamente proporcional ao quadrado da distância, relação esta conhecida por *lei do inverso do quadrado da distância*. Desta forma, dobrando-se a distância da fonte sonora, a mesma potência está contida em uma superfície esférica quatro vezes maior, logo, a intensidade sonora será quatro vezes menor que a original (BISTAFA, 2011).

2.2.4 Representação matemática da sensação provocada pelo som e os decibéis

Ernst Heinrich Weber, anatomista e fisiologista alemão que viveu entre 1795 e 1878, realizou importantes experimentos à cerca da resposta humana a estímulos físicos, como peso, temperatura e pressão em termos quantitativos. Descobriu que havia um limiar de sensação que deveria ser ultrapassado para que as pessoas detectassem um aumento na intensidade de qualquer estímulo. Observou que havia uma diferença de valores para que a sensação fosse detectada, e esta diferença era a proporção da intensidade total da sensação,

ao invés de ser simplesmente um número absoluto; ou seja, se um homem segura uma carga de 50 kg, seria necessário um acréscimo de peso maior do que aquele no caso em que estivesse segurando apenas 5 kg, para se notar a diferença de estímulo. Os descobrimentos de Weber foram elaborados no trabalho *Der Tastsinn und das Gemeingefühl* ("A sensação do toque e a sensibilidade comum" em tradução livre), de 1851. As observações empíricas de Weber foram expressadas matematicamente por Gustav Theodor Fechner, resultando na *lei de Fechner-Weber*, ou apenas *lei de Weber* (ENCICLOPAEDIA BRITANNICA).

Matematicamente, o comportamento observado por Weber pode ser descrito como:

$$dS = k \frac{dE}{E} \quad (11)$$

onde:

dS é o limiar da sensação;

dE é o diferencial do estímulo físico;

E é o estímulo físico em dado momento durante o aumento do estímulo;

K é uma constante de determinação experimental;

Ao se integrar a equação 11, obtém-se a equação 12:

$$S = k \log E + C \quad (12)$$

Considerando $S = 0$, no caso de ausência de sensação, tem-se que $C = -k \log E_0$, sendo E_0 o valor mínimo do estímulo, o qual abaixo deste não há sensação. Logo:

$$S = k \log \frac{E}{E_0} \quad (13)$$

Observando-se a equação 13, nota-se que a relação entre o estímulo e a sensação é logarítmica. Ou seja, para que uma sensação seja provocada em progressão aritmética, o estímulo deve variar em progressão geométrica (BISTAFA, 2011)

De modo a quantificar a perda de potência em cabos de telefonia da empresa, em 1923, os engenheiros da *Bell Telephone Laboratories (Bell Labs)*, dos Estados Unidos, criaram uma unidade própria que substituiu a MSC (*mile of standard cable*). Essa unidade passou a se chamar TU (*transmission unit*), e media a potência relativa à um determinado valor

de referência. Em homenagem à Alexander Graham Bell, em 1924 a TU foi renomeada para *bel*. (BISTAFA, 2011)

$$bel = \log\left(\frac{P}{P_o}\right) \quad (14)$$

onde:

P = potência do sistema

Po = potência arbitrária de referência

Como o valor Po é um valor arbitrário de referência, o bel pode assumir valores negativos, caso a potência do sistema seja menor que o valor de referência.

Levando em consideração que 1 B equivale a $P = 10 P_o$, foi necessário adotar uma medida que representasse melhor variações menores de potência. Foi então adotado o decibel (dB), sendo que $1 \text{ dB} = 0,1 \text{ B}$. 1 dB também é o valor da mínima variação da potência sonora detectável pelo ouvido humano, segundo pesquisa de Harvey Fletcher (1884-1981), da própria *Bell Labs*.

2.2.5 Espectro sonoro

É costumeiro se dizer, para um determinado som agudo, que este tom é "alto", ao mesmo tempo em que um som de natureza grave é considerado "baixo". Esta é uma qualidade que nos permite distinguir de forma intuitiva as diferentes faixas de frequência, e é chamada de *altura*. É comum a divisão das faixas de frequência da seguinte forma:

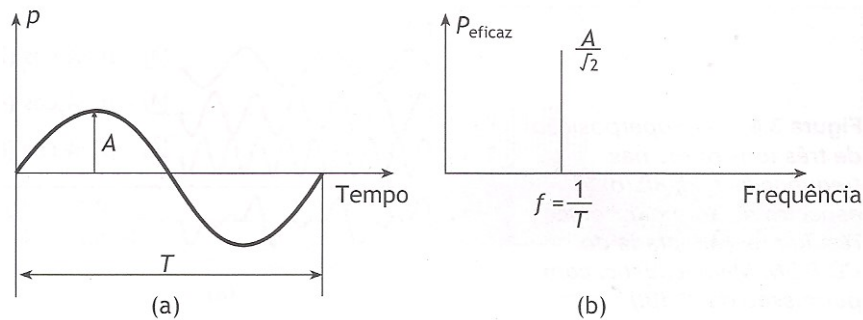
- Frequências Baixas: entre 20 e 200 Hz;
- Frequências Médias: entre 200 e 2000 Hz;
- Frequências Altas: entre 2000 e 20000 Hz;

Embora não seja uma divisão rigorosa, tem como vantagem o fato de ela se basear em números simples (BISTAFA, 2011).

Os sons que ouvimos geralmente são constituídos de uma combinação de frequências, de forma harmônica ou não. Quando a frequência é única, no caso do tom puro, é possível conhecer a amplitude A (assim como o seu valor de pressão eficaz, $p_{eficaz} = 0,707A$)

e o período pelo gráfico *pressão x tempo*. Como a frequência é o inverso do período, encontramos f pela relação $f = \frac{1}{T}$. Esta correspondência é disposta na Figura 6

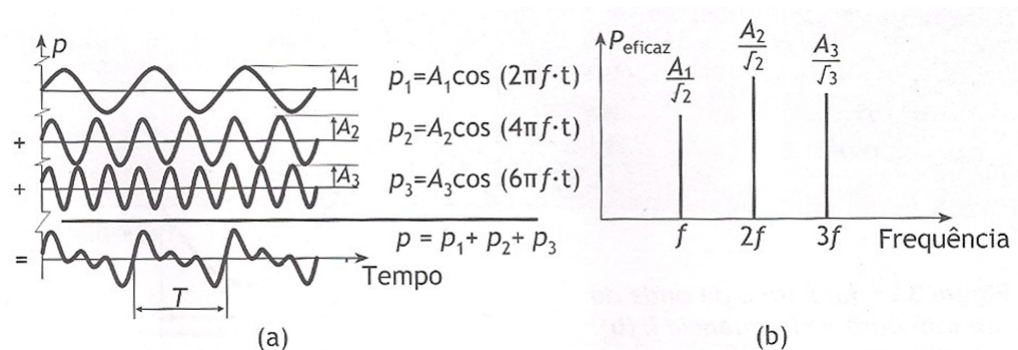
Figura 6 – Tom puro: (a) forma de onda na frequência f ; (b) espectro sonoro.



Fonte: Bistafa, 2003.

No caso de uma combinação de tons puros, como quando registra um instrumento musical de cordas, ou sopro, por exemplo, os gráficos no domínio do tempo e da frequência ficam como mostrados na Figura 7.

Figura 7 – (a) Superposição de tons puros nas frequências f , $2f$, $3f$; (b) espectro sonoro.



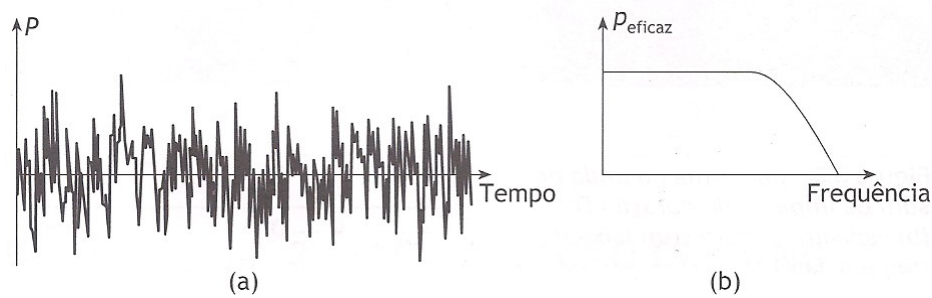
Fonte: Bistafa, 2003.

Isto acontece pois as notas musicais tocadas pelo músico não são executadas de forma aleatória, e obedecem a certos padrões, de maneira quase sempre *harmônicos*. O que confere essa sensação de harmonia é justamente a relação que estas frequências executadas tem umas com as outras. A frequência mais baixa f (mais grave) é um divisor comum das demais frequências $2f$ e $3f$ (mais altas, ou agudas). A frequência mais baixa é chamada de *frequência fundamental*, enquanto que as demais são conhecidas como *harmônicos da fundamental*, *harmônicos* ou *sobretons*. Existem também os instrumentos musicais que

não produzem sons harmônicos, que, de forma geral, é o caso dos instrumentos percussivos (BISTAFA, 2011).

Entretanto, como na grande maioria das situações o registro sonoro avaliado não é constituído por uma só frequência, e sim uma união complexa delas, sem padrão nem ciclo algum (ruído), o tipo de registro mais comum é mostrado na Figura 8, assim como sua visualização correspondente no domínio da frequência.

Figura 8 – Ruído: (a) forma de onda na frequência f ; (b) espectro sonoro.



Fonte: Bistafa, 2003.

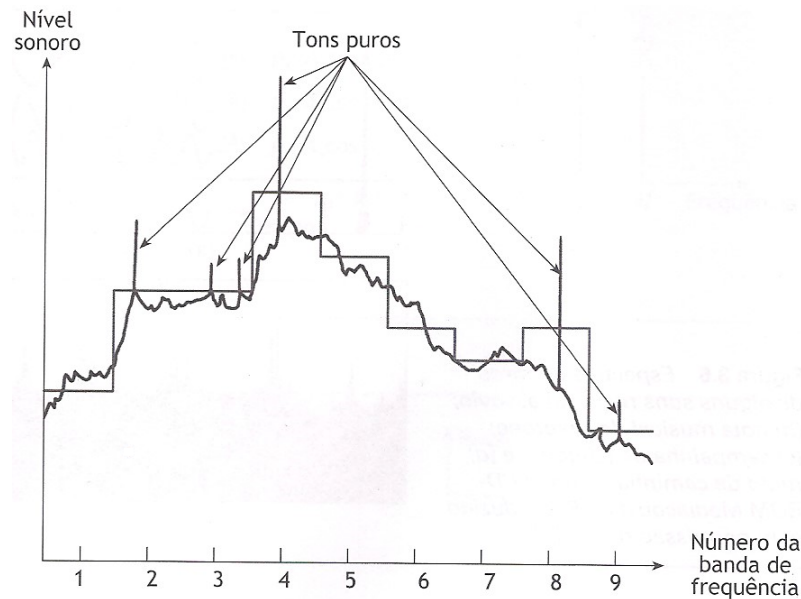
Nota-se que o espectro das frequências não é formado por apenas um único valor como no caso do tom puro, e sim como um conjunto sem definição clara destas frequências, que não pode ser mais encontrada pela relação $f = \frac{1}{T}$. É necessário então que seja aplicada a *transformada direta de Fourier*, ou *transformada de Fourier de tempo discreto (DTFT)*. O caminho inverso, no caso em que se deseja obter o gráfico no domínio do tempo a partir do domínio da frequência, é necessária a aplicação da *transformada inversa de Fourier*.

Bandas de frequência e volume sonoro

Os instrumentos de medição acústica, assim como os materiais de tratamento acústico apresentam um espectro sonoro em bandas ou faixas de frequências, para melhor avaliação dos níveis sonoros, como ilustra a Figura 9. O espectro sonoro pode ser representado através de bandas largas, de largura constante ou variável. Cada banda larga é representada por um valor central, que estão dispostos na figura de forma genérica. O espectro de frequências também pode ser visualizado em banda estreita, que exhibe mais detalhes a respeito do sinal, e também identifica picos onde ocorrem tons puros, que estão sobrepostos ao espectro original (BISTAFA, 2011).

As frequências são comumente divididas em *bandas de oitava*, em que a largura de cada banda é aproximadamente 70% da frequência central. Uma oitava é o intervalo entre

Figura 9 – Espectro sonoro de um mesmo som em bandas estreitas e largas.
(Adaptada de Kinsler et al.)



Fonte: Bistafa, 2011.

duas frequências, sendo que a última é o dobro da primeira. Por exemplo, estão separadas por uma oitava: as frequências de 125 Hz e 250 Hz, assim como as frequências de 250 Hz e 500 Hz (NATIONAL INSTRUMENTS).

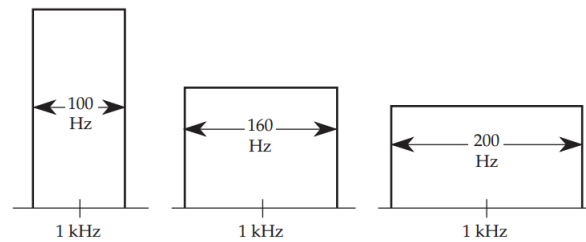
As bandas são geralmente separadas nos seguintes valores de frequência: 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz e 8000 Hz.

Os tons, sozinhos, não dão toda a informação que precisamos para tentar relacionar as medições numéricas às sensações psicoacústicas. Como exemplo, pode-se citar o som do decolar de um avião à jato, que nos parece ter um volume muito maior do que um tom puro em um mesmo nível de pressão. A largura de banda do ruído afeta a percepção de volume do som (EVEREST; POHLMANN, 2009).

Isto se deve ao fato de o ouvido humano "captar" estas informações em um nível diferente para cada faixa de frequências, agindo como um analisador composto de uma série de filtros passa-banda ao longo do espectro audível.

Na Figura 10 é possível observar três sinais sonoros que, para um mesmo nível de pressão sonora de 60 dB, é representado com três larguras de bandas diferentes (100 Hz, 160 Hz e 200 Hz). Suas alturas representam *intensidade sonora por hertz*, e suas áreas são iguais.

Figura 10 – Diferentes larguras de banda para uma mesma frequência central, com mesmo nível de pressão sonora de 60 dB.



Fonte: Everest e Pohlmann (2009).

Pela Figura 10 é possível notar que os sinais possuem intensidade igual (não confundir com nível de pressão sonora), porém estes sons não possuem a mesma sensação de volume sonoro.

2.3 PROPAGAÇÃO DO SOM EM AMBIENTES FECHADOS

Em ambientes abertos, o som se propaga livremente, sem obstáculos físicos e sem a interferência de outras ondas. Porém, quando se propaga em uma sala, a onda direta da fonte se choca com aquelas que foram emitidas e foram refletidas nas paredes internas (piso, paredes e teto). As ondas que incidem em uma superfície tem uma parte de sua energia sonora absorvida, uma parte que é transmitida, e uma outra parte refletida de volta ao ambiente, em um ângulo que pode variar de acordo com o tipo de onda. Dependendo da densidade e superfície da parede, a absorção da energia pode ser maior ou menor (BISTAFA, 2011).

As reflexões provenientes das superfícies de uma sala, ou qualquer ambiente fechado afetam primordialmente a maneira que o som chega ao ouvido humano, que pode perceber o som de forma mais clara ou mais confusa, dependendo da energia e da quantidade de ondas refletidas que chegam junto ao som direto da fonte na posição do receptor. Elas podem ser classificadas com base no seu tempo de chegada após o som direto: quando estas reflexões atingem o observador após 50-80 ms em relação ao som direto, recebem o nome de reflexões precoces. Para tempos maiores que 80 ms, são denominadas reflexões tardias. Estas reflexões desempenham um papel importante na nossa percepção espacial, quando se reproduz um som gravado em uma sala de mixagem, se aprecia um concerto de música ao vivo em um auditório, ou se exerça qualquer atividade em qualquer ambiente

acústico (EVEREST; POHLMANN, 2009).

A localização da fonte é baseada nas diferenças interaurais de tempo (diferença de tempo de chegada de um som entre os dois ouvidos), assim como nas diferenças interaurais de espectro e intensidade. As reflexões precoces que chegam da mesma direção do som direto reforçam o senso de localização da fonte, enquanto que reflexões precoces laterais tendem a prejudicar a localização da fonte. Há também variações na localização da fonte em relação à frequência do som que chega aos ouvidos, pois por exemplo, é muito difícil localizar um tom senoidal constante de baixa frequência em um quarto, mas não totalmente impossível. A localização se torna mais fácil quando se escuta tons mais altos, possivelmente devido ao processo de localização monaural (HARTMANN, 1983).

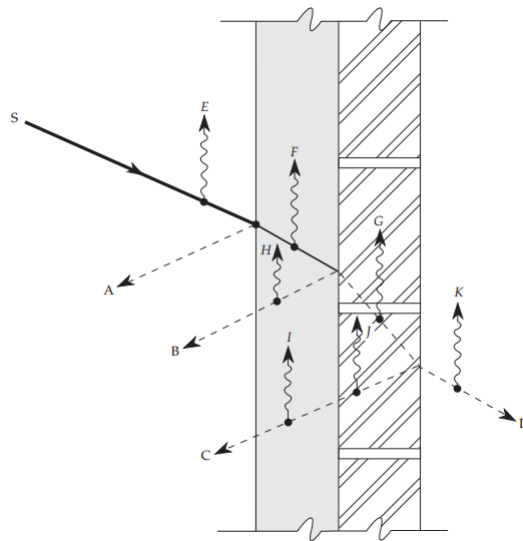
2.4 ABSORÇÃO SONORA

Segundo a lei da conservação da energia, a energia não pode ser criada nem destruída, mas pode ser transformada de uma forma para outra. Se em determinada sala existe energia sonora em demasia, apesar de não haver como se eliminar essa energia, ela pode ser transformada em uma forma inócua, ou seja, que não prejudique a sonoridade do ambiente. Os materiais absorvedores tem como função a transformação da energia sonora. Embora existam diversos tipos de absorvedores, de diferentes materiais e geometria, que absorvem variadas faixas de frequências, todos funcionam segundo o mesmo princípio: dissipação da energia por atrito, transformando energia sonora em calor (EVEREST; POHLMANN, 2009).

A principal função da absorção sonora é controlar o tempo de reverberação de um ambiente fechado. Ela acontece devido ao movimento das partículas de ar nos poros do material, quando é atravessado por uma onda sonora. Materiais de boa absorção são aqueles que permitem que as partículas do ar penetrem e se movimentem em seu interior, até que boa parte da energia sonora seja dissipada. Devem possuir certa porosidade, e não devem ser demasiadamente finos ou esparsos. A propriedade fundamental dos materiais absorventes é a resistência ao fluxo de ar, e a construção dos painéis absorventes, que variam em material e forma, é voltada para uma determinada banda de frequência que se deseja atenuar, a fim de que a energia sonora seja dissipada de forma mais eficaz (BISTAFA, 2011).

Na Figura 11, é ilustrado o efeito da dissipação de energia em uma parede. O raio sonoro S incide na superfície de uma parede composta de material acústico e uma parede

Figura 11 – Raio sonoro incidente em material acústico em uma parede de concreto.



Fonte: Everest e Pohlmann (2009).

de concreto, refletindo parte de sua energia A, B e C, respectivamente. Uma outra parte é perdida na forma de calor por atrito com o ar (E), com o material (F) e com o concreto (G). Neste processo, sofre múltiplas refrações e reflexões enquanto atravessa as superfícies dos diferentes meios de propagação, sendo, por fim, transmitida para o meio adjacente (D).

2.4.1 Coeficiente de absorção sonora

Os coeficientes de absorção são utilizados para classificar a eficácia do material em absorver sons. Existem diversos tipos de coeficientes de absorção, sendo cada um destes medidos sob diferentes condições, como por exemplo, diferentes ângulos de incidência da onda sonora na superfície. Como em um sala, ou qualquer outro ambiente fechado o som se propaga refletindo nas superfícies, e portanto, em todas as direções, o coeficiente de absorção mais frequentemente utilizado é o α . Comumente chamado de coeficiente de absorção de incidência aleatória, o índice α é medido com as ondas incidindo em todas as direções, provenientes das reflexões de um recinto fechado. O coeficiente de absorção avalia o quão bem este material absorve a energia sonora, em uma determinada banda de frequência, e varia de 0 a 1. Por exemplo, um material que absorve 60% da energia sonora incidente tem um coeficiente de absorção de 0,6; ao passo que um material perfeitamente absorvente tem seu coeficiente $\alpha = 1$ (ou seja, absorve 100% da energia sonora), e um

material perfeitamente reflexivo tem seu coeficiente $\alpha = 0$ (toda energia é refletida de volta ao ambiente).

Para se obter a absorção de um dada área de superfície de um material, multiplica-se a área em questão pelo coeficiente de absorção, como mostra a Equação 15

$$Ab = S\alpha \quad (15)$$

Onde S é a área da superfície, em ft^2 ou m^2 e α é o coeficiente de absorção sonora.

Sabine

A unidade *sabine* é usada em homenagem a Wallace Sabin. Considerando-se uma janela aberta como um absorvedor perfeito (100% do som passa por ela), tendo um coeficiente de absorção igual a 1, por definição, 1 sabin é igual a energia sonora absorvida em uma janela de 1 ft^2 (pés quadrados). Portanto, uma janela de 5 ft^2 absorve 5 sabins da energia sonora incidente. Ou ainda, se considerar a absorção sonora de um tapete como sendo de 0,50; 20 ft^2 de tapete ofereceria 10 *sabines* de absorção. A unidade *sabines métricos* também pode ser utilizada, sendo que a referência é a de uma janela de 1 m^2 . Como uma janela de 1 m^2 é igual a 10,76 ft^2 , 1 *sabine métrico* equivale a 10,76 *sabines* medidos em pés, ou ainda, 1 sabine = 0,093 (EVEREST; POHLMANN, 2009).

Para se calcular a absorção total da sala, deve-se somar a absorção de todas as superfícies, levando-se em consideração suas respectivas áreas, como mostra a Equação 16:

$$\sum Ab = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + \dots \quad (16)$$

onde:

$S_1, S_2, S_3 \dots$ são as áreas das superfícies, em ft^2 ou m^2

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots$ são os coeficientes de absorção relativos às superfícies

Ainda, ao se dividir a absorção total pela área total das superfícies, obtém-se o coeficiente de absorção médio:

$$\alpha_{med} = \frac{\sum Ab}{\sum S} \quad (17)$$

A absorção em recintos fechados é calculada com base em três elementos: as superfícies do recinto (piso, teto e parede), objetos diversos e ar, como mostra a Equação 18:

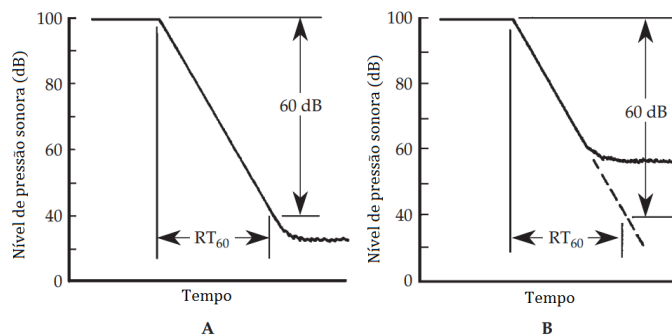
$$Ab_{recinto} = Ab_{sup.recinto} + Ab_{diversos} + Ab_{ar} \quad (18)$$

A absorção do ar é normalmente desprezada, sendo contabilizada apenas quando se trata de recintos de grandes volumes, como igrejas, auditórios, etc. A absorção sonora de pessoas e mobília do recinto pode ser dada por tabelas de coeficiente de absorção sonora na literatura, porém a grande variação das áreas de superfície destes elementos pode variar significativamente, tornando-se difícil uma definição precisa de área equivalente. A absorção de pessoas e mobiliário também pode ser encontrada na literatura em unidades de absorção (*sabines*). Esta forma é a mais frequentemente utilizada ao se incluir a contribuição destes elementos na absorção total do recinto. A absorção das pessoas só é contabilizada quando a área equivalente destas forem proporcionalmente relevantes ao ambiente, como por exemplo em um auditório, uma sala de aula ou uma igreja. Da mesma forma, a mobília também é desprezada quando é composta por móveis de construção simples e de pouca quantidade (BISTAFA, 2011).

2.4.2 Tempo de reverberação e eco

Por definição, o tempo de reverberação é o tempo necessário para que haja um decaimento de 60 dB no ambiente interno após a interrupção da fonte sonora (Figura 12). Por essa razão, é frequentemente referido como RT60 (do inglês *reverberation time*).

Figura 12 – Decaimento sonoro para cálculo do RT60.



Fonte: Everest e Pohlmann (2009) (adaptado).

A Figura 12 mostra o decaimento sonoro após o cessamento da fonte, nos casos em

que o decaimento é natural e quando é extrapolado até o fim da medição para que seja feito o cálculo.

A duração do decaimento depende da intensidade da fonte, e do nível de ruído local. São raras as situações em que acontece o decaimento de 60 dB, sendo na maioria dos casos o decaimento extrapolado para a determinação do tempo de reverberação.

O tempo de reverberação, em recintos de pouca absorção sonora será longo, enquanto que em recintos com muita absorção sonora será pequeno. Isso se dá devido à quantidade e intensidade das ondas refletidas em um ambiente fechado. Devido à natureza das ondas, o tempo de reverberação é diferente para cada faixa de frequência sonora.

O RT60 deve ser compatível com a proposta de uso do local: em um ambiente destinado à palavra falada, o tempo de reverberação não deverá ser longo, pois a perpetuação dessas ondas sonoras no ambiente prejudicará a inteligibilidade da fala. Em contrapartida, uma sala de concertos e apresentações musicais deverá ter um certo nível de reverberação, a fim de manter a qualidade sonora. O tempo de verberação não deve ser excessivamente curto, para não tornar o som "morto" ou "seco", com o corte das frequências mais agudas e ao mesmo tempo não deve ser excessivamente longo, a fim de não prejudicar a inteligibilidade musical.

Fórmula de Sabine

As equações de tempo de reverberação tem sido amplamente utilizadas como ferramentas de predição na engenharia acústica, devido ao fato de que são simples de usar e costumam prover resultados razoáveis. A primeira, e talvez a mais utilizada é a *Fórmula de Sabine* (CARVALHO, 1995), dada pela Equação 19:

$$RT60 = 0,16(V/Ab) \quad (19)$$

onde:

V é o volume do recinto (m^3)

Ab é a absorção total da sala (sabines métricos)

É importante notar que essa equação não possui homogeneidade dimensional, e o resultado oferecido é o *tempo de reverberação médio*.

Fórmula de Eyring

Foi descoberto por Eyring que a clássica fórmula de Sabine não atende quando a absorção da sala é considerável. Eyring aponta que a fórmula de Sabine é mais precisa quando se trata de uma sala "viva". Após revisões teóricas, derivou uma forma da equação do tempo de reverberação, que é mais abrangente do que a equação de Sabine (NEUBAUER KOSTEK, 2001).

A Equação 20 é conhecida como *Fórmula de Eyring*.

$$RT60 = 0,16 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_{med})} \quad (20)$$

Onde S é a área da superfície da sala (m^2) e α_{med} é o coeficiente de absorção médio, dado pela Equação 21:

$$\alpha_{med} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \alpha_i \quad (21)$$

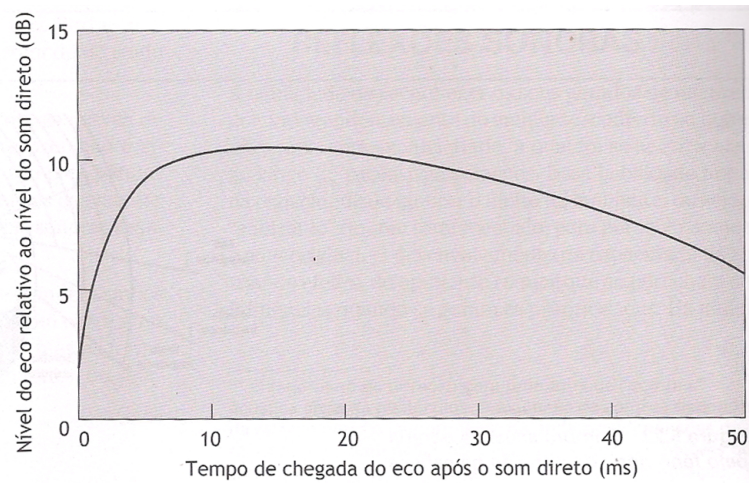
Ecos

As reflexões precoces não são percebidas pelo sistema auditivo como eventos distintos em relação ao som proveniente da fonte direta, pois a diferença do tempo de chegada entre os dois sons é pequena. Se o tempo de chegada destas reflexões aumenta, e dependendo de seus níveis sonoros, o observador as perceberá como sendo ecos isolados. O gráfico da Figura 13 mostra o limiar diferencial para a detecção de ecos, em função de chegada da reflexão após o som direto.

Na região acima do limiar, o sistema auditivo compreende essas reflexões como sendo ecos, enquanto que, abaixo desta região, as reflexões, com seus respectivos níveis sonoros são imperceptíveis como eco, e reforçam o som direto, gerando a sensação no observador de que se está escutando apenas o som direto, mas na verdade é uma composição deste com suas respectivas reflexões. Esta composição de sons aumenta não somente o nível sonoro da fonte, mas também a percepção das dimensões físicas, dando a impressão da fonte sonora ser maior do que é na verdade. (BISTAFÁ, 2011).

Segundo Bistafa, "Ecos são prejudiciais à comunicação, quer seja através da palavra

Figura 13 – Limiar diferencial para detecção de reflexão como eco em função do tempo de chegada da reflexão após o som direto (Haas).



Fonte: BISTAFA (2011)

falada (numa sala, no telefone), como também na música; muito embora se tolerem, e até se incentivem reflexões sonoras mais atrasadas em salas destinadas à música, pois estas "enriquecem" os sons musicais". Salienta ainda que, em geral, para a palavra falada, consideram-se reflexões tardias aquelas com diferença de 50 ms em relação ao som direto, enquanto que para a música, o valor é de 80 ms. As reflexões após 50-80 ms não são benéficas à comunicação, e são chamadas *reflexões detrimenais*.

2.4.3 *Flutter echoes*

Os ecos rápidos repetitivos (também conhecidos como *flutter echoes*) são reflexões que acontecem em uma sala entre superfícies paralelas, e tendem a sustentar um som por um período de tempo que é geralmente indesejado. Mudam a percepção sonora do ambiente, ao ressaltar frequências cujo comprimento de onda correspondem à distância entre as superfícies da sala. Isto faz com que determinados tons se sustentem no ambiente mesmo após o som original ter cessado, como por exemplo, ao se bater palmas em uma sala sem tratamento acústico, onde o efeito de eco repetitivo costuma ser bem pronunciado.

Estas reflexões repetitivas são igualmente distribuídas no tempo, e podem incomodar o ouvinte, além de afetar a inteligibilidade e a qualidade da música. Quando o tempo entre os ecos é curto, podem produzir alterações no tom e no timbre da música. Se esse tempo é maior que a faixa entre 30 a 50 ms, a periodicidade é audível como uma vibração distinta. A arquitetura moderna, geralmente de pouca ornamentação, torna o som pouco

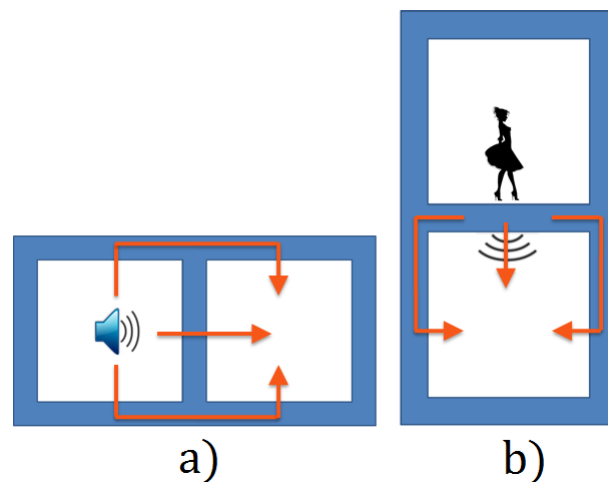
difuso, favorecendo o surgimento dessas vibrações.

Sabendo - se que o paralelismo entre duas superfícies altamente reflexivas deve ser evitado, uma solução para reduzir estes ecos é angular as paredes do ambiente, entre 5° e 10° . Como na maioria dos casos isso é impraticável, os *flutter echoes* podem ser reduzidos com a aplicação de material absorvente. O lado negativo de se aplicar material absorvente nas paredes é que a qualidade acústica é prejudicada, fazendo com que os painéis difusores sejam preferíveis ao invés dos painéis absorventes (EVEREST; POHLMANN, 2009).

2.5 ISOLAÇÃO SONORA

O objetivo principal de se isolar um recinto fechado é minimizar a propagação da onda sonora de um ambiente para o outro, seja por transmissão aérea, ou por transmissão estrutural (Figura 14).

Figura 14 – Mecanismos de transmissão sonora: a) por via aérea e b) por via estrutural.



Fonte: do próprio autor.

De forma análoga à absorção sonora, existe um coeficiente que caracteriza o desempenho de uma parede na transmissão do som. Esse parâmetro é o coeficiente de transmissão sonora (τ), e quanto maior o seu valor, maior é a intensidade sonora transmitida (menos isolante é a parede).

Para a absorção sonora são utilizados materiais pouco densos e porosos. Já na isolamento sonora, deve-se utilizar materiais e estruturas densas e reflexivas, de modo que haja a maior perda na transmissão (PT) possível durante a passagem da onda nas barreiras que

separam os ambientes (parede, piso e teto)

Basicamente, o desempenho acústico de um material é determinado basicamente pela sua capacidade em absorver e isolar o ruído. A instalação de painéis absorvedores em um recinto pode até contribuir na redução de ruído, porém esta absorção é pequena, sendo da ordem de apenas alguns decibéis.

Sempre que uma onda sonora colide com uma barreira, seja ela uma parede ou apenas uma mudança de meio, ocorre um maior gasto de energia para que se perpetue a propagação dessa onda. Isso faz com que a onda perca intensidade sonora quando atravessa a parede de um quarto, por exemplo, mudando o meio de propagação do ar para a parede, e da parede para o ar no recinto adjacente (BISTAFA, 2011).

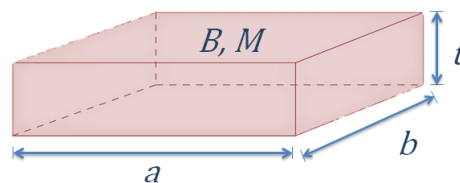
O índice que caracteriza a capacidade de uma barreira isolar o som é a *perda na transmissão sonora* (PT), e é dada pela equação 22:

$$PT = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (22)$$

É importante notar como τ e PT são inversamente proporcionais: quanto maior o coeficiente de transmissão sonora, menor é a perda na transmissão do som.

Para fins de cálculos teóricos, é utilizado como modelo um painel idealizado (Figura 15), de forma paralelepipedal, de dimensões a , b e t , resistência à flexão B e densidade superficial M .

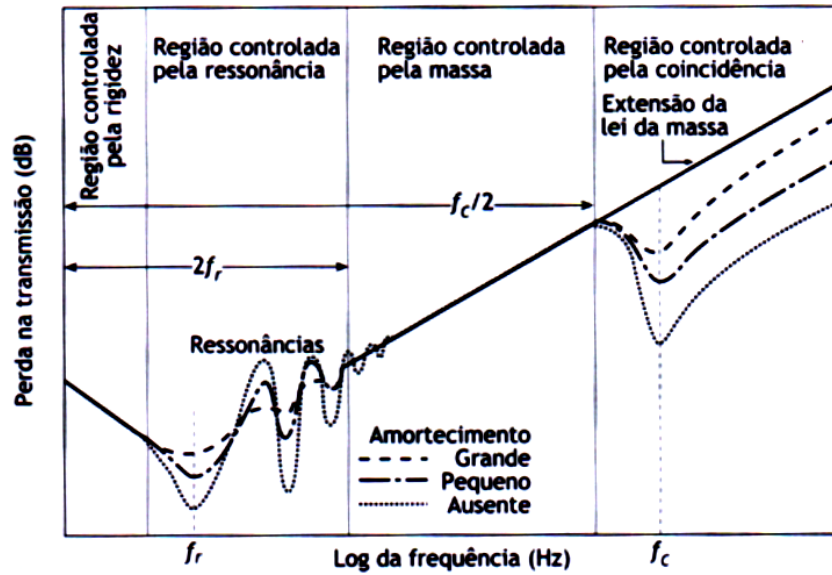
Figura 15 – Modelo ideal de painel, sólido e homogêneo.



Fonte: BISTAFA (2011).

O fenômeno da perda de transmissão pode ser caracterizado em função da frequência do som incidente na parede. A Figura 16 mostra a curva típica de perda de transmissão em painéis sólidos homogêneos. A curva em relação à frequência é dividida em quatro regiões

Figura 16 – Curva típica de perda na transmissão em função da frequência do som incidente em painéis sólidos e homogêneos.



Fonte: BISTAFÁ (2011).

- onde a perda é controlada pela rigidez, pela ressonância, pela massa e pela coincidência.

- Região controlada pela rigidez: abaixo da frequência de ressonância, a perda de transmissão é inversamente proporcional em relação à frequência até esse valor.
- Região controlada pela ressonância: é controlada pelas ressonâncias mecânicas que ocorrem no painel, flexionando-o de acordo com seus modos de vibrar. Essas frequências de ressonância podem ser calculadas pela equação 23:

$$f_{ij} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B}{M}} \left(\frac{i}{a^2} + \frac{j}{b^2} \right) \text{ Hz} \quad [i, j, = 1, 2, 3, \dots] \quad (23)$$

Onde i e j são índices dos modos de vibrar. O movimento vibratório do painel, causado pela ressonância faz com que uma parte da energia sonora seja absorvida.

- Região controlada pela coincidência: ocorre quando, conforme as frequências se elevam e os comprimentos de onda se reduzem, estes começam a se aproximar dos comprimentos das ondas do movimento de flexão do painel. A menor frequência coincidente é a *frequência crítica*, dada pela equação 24:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{M}{B}} \quad (24)$$

Quando ocorre essa coincidência, o movimento de flexão do painel se intensifica e o som é transmitido pela parede com maior eficiência, causando assim, uma redução na perda de transmissão.

Observa-se que quanto maior é a resistência à flexão do painel (B), menor é a frequência crítica, e vice-versa.

- Região controlada pela massa: nessa região a perda de transmissão é regida pela equação 25, também conhecida como *lei da massa*:

$$PT = 20\log(fM) - 47dB \quad (25)$$

Onde f é a frequência da onda sonora incidente (Hz) e M a densidade superficial da parede (kg/m^2). Essa equação é válida apenas para o intervalo de frequências de $2f_r$ até $f_c/2$. Para um mesmo material (mesma densidade superficial), a cada oitava da frequência correspondente, acontece uma perda de 6 dB (BISTAFA, 2011).

Como um dos maiores desafios no isolamento se encontra na dissipação da energia sonora nas baixas frequências, é essencial que se conheça o tipo de construção das paredes, para que seja adotada a estratégia correta para a perda na transmissão sonora em todas as frequências.

2.6 MODOS DE RESSONÂNCIA (ONDAS ESTACIONÁRIAS)

Os modos de ressonância de uma sala estão diretamente ligados com a formação de ondas estacionárias em um recinto.

As ondas estacionárias se formam devido à reflexão de ondas sonoras em paredes paralelas. Uma dada onda gerada por uma fonte sonora, localizada entre duas paredes paralelas, se propaga no ambiente fechado até que se choque com uma parede. Ela então é refletida de volta em direção à fonte até encontrar a parede oposta, e interage com a onda que se propaga diretamente a partir da fonte, formando ondas estacionárias. A frequência do som radiado determina esta condição de ressonância, que é devida ao comprimento da onda sonora e a distância entre as duas superfícies paralelas (EVEREST; POHLMANN, 2009).

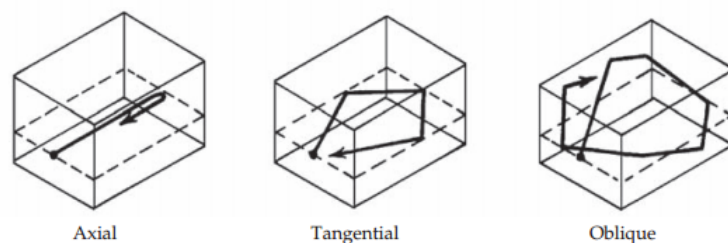
Quando se joga uma pedra em um lago, uma série de ondas são criadas e se dissipam

até que cheguem à margem e sejam refletidas de volta. Do contrário, quando se emite uma onda em um ambiente muito pequeno, como por exemplo, um dispositivo ultrassom, que emite uma série de ondas refletidas em um espaço muito pequeno, cria-se uma frente de pressão que faz com que as ondas estejam literalmente paradas - as ondas estacionárias. Na sala de controle e mixagem acontece o mesmo, quando os auto falantes reproduzem um tom grave prolongado. Estes nódulos estáticos se desenvolvem em lugares diferentes na sala dependendo da posição dos falantes, da dimensão da sala e a frequência do som, causando.

Cada dimensão da sala (comprimento, largura e altura) propicia o surgimento de um modo de ressonância, assim como o aparecimento de suas respectivas frequências múltiplas. Idealmente, os modos devem ter o maior espaçamento entre si na banda de frequências, para que haja um maior equilíbrio na resposta do ambiente, provendo melhor qualidade acústica às gravações e maior confiabilidade no processo de mixagem para o produtor. Desta forma, é compreensível que, para melhores resultados, deve-se ter uma sala com dimensões diferentes umas das outras, e que não sejam múltiplas entre si, de forma que os modos não coincidam nas mesmas frequências de ressonâncias naturais da sala.

Na Figura 17 é possível observar os três tipos de modos existentes em uma dada sala retangular: axiais, tangenciais e oblíquos. Os modos axiais em duas paredes opostas e paralelas, já os tangenciais refletem em quatro paredes e por fim, os modos oblíquos refletem em todas as seis paredes do ambiente (EVEREST; POHLMANN, 2009).

Figura 17 – Visualização dos modos axiais, tangenciais e oblíquos de uma sala através do conceito de raio.



Fonte: Everest e Pohlmann (2009) (adaptado).

Os modos de uma sala retangular podem ser calculados através da Equação 26:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{W^2} + \frac{r^2}{H^2}} \quad (26)$$

onde:

c é a velocidade do som (344 m/s)

p, q, r são valores inteiros 0,1,2,3,...

L, W, H são as respectivas dimensões de comprimento, largura e altura da sala (m)

Com esta equação, é possível calcular qualquer modo axial, tangencial e oblíquo da sala. Como as dimensões L, W e H são fixas em uma dada sala retangular, as únicas variáveis são os inteiros p, q e r . Estes números inteiros servem para identificar o modo como sendo axial, tangencial ou oblíquo, além de calcular a frequência de um dado modo. Os modos axiais possuem dois termos iguais a zero, pois atuam em apenas um eixo. Por exemplo, (0,0,1) ou (0,2,0). Os modos tangenciais possuem um termo igual a zero, e possui valores como (1,1,0), ou (0,3,3). Os modos oblíquos não possuem nenhum termo igual a zero, tendo valores iguais a (1,1,1) ou (3,3,3).

O número do modo indica o múltiplo da frequência. Por exemplo, o modo (0,0,2) é múltiplo do modo (0,0,1), tendo duas vezes o seu valor em frequência.

Para a ressonância entre duas paredes paralelas, da Equação 23, tem-se que:

$$f_1 = \frac{c}{2L} \quad (27)$$

onde:

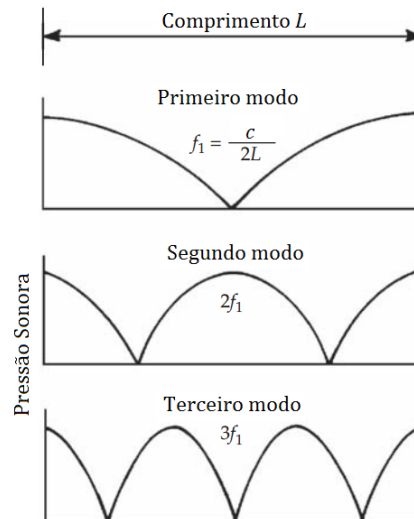
c é a velocidade do som no ar (344 m/s)

L é a distância entre as duas paredes (m)

O espaço entre as duas paredes paralelas pode ser considerado como um sistema ressonante. As paredes atuam como nódulos estáticos, onde a velocidade é nula e a pressão sonora é máxima. Isso faz com que a resposta no ambiente fique desbalanceada na sala, principalmente nos cantos da sala, onde a pressão sonora costuma ser máxima nas baixas frequências. Um esquema de como os modos axiais são formados na sala se

encontra na Figura 18.

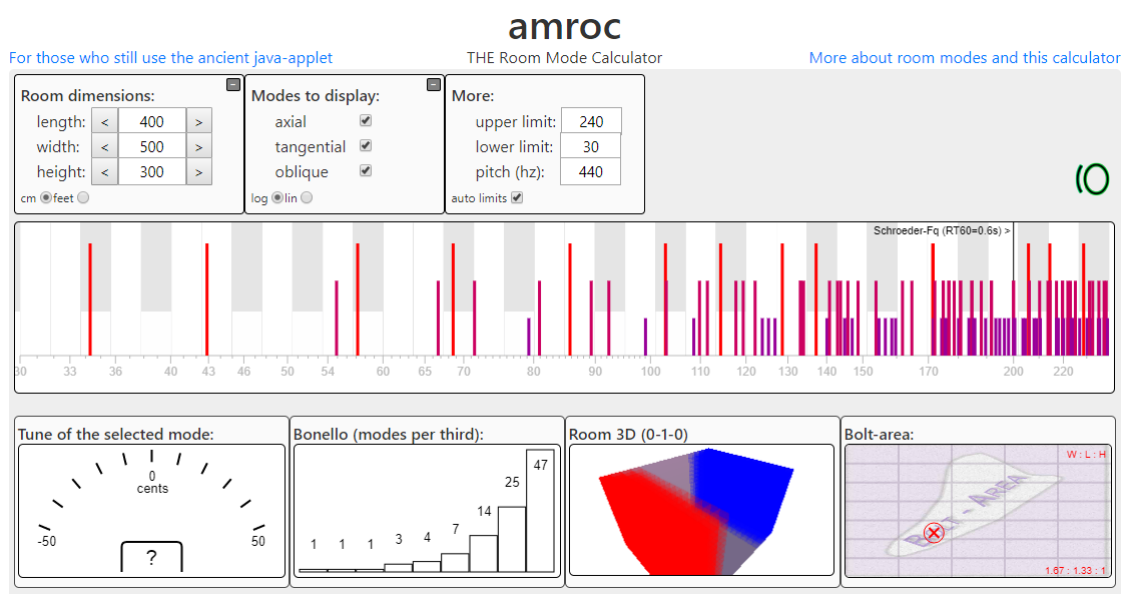
Figura 18 – Configuração típica de ondas estacionárias entre duas superfícies paralelas.



Fonte: Everest e Pohlmann (2009) (adaptado).

Na internet, existem calculadoras de frequências naturais da sala, podendo ser visualizadas de acordo com as dimensões de entrada. Uma delas é a *amroc - THE Room Mode Calculator* (Figura 19).

Figura 19 – Ferramenta *amroc*.



Fonte: <<https://amcoustics.com/tools/amroc>>. Acesso em 20 out 2017

Com esta ferramenta, basta entrar com as dimensões da sala para que uma série de informações sejam exibidas. Ao arrastar o cursor sobre uma determinada frequência da banda, são exibidos dados como: o tom do modo, além da posição de sua ocorrência vista tridimensionalmente na sala. O programa também mostra se as dimensões atendem ao critério de Bonello, e se estão dentro da "área de Bolt".

O critério de Bonello analisa o espaçamento entre os modos a fim de que sejam evitados efeitos coincidentes (degenerativos). Nesta análise, alguma separação é preferida, e são considerados os três tipos de modos (axiais, tangenciais e oblíquos). Ele afirma que é desejável que se tenha todas as frequências modais em uma distância crítica de pelo menos 5% na banda de frequências. Por exemplo: uma frequência de 20 Hz e outra de 21 Hz são aceitáveis pois 1 Hz de diferença está dentro dos 5% permitidos. Já para uma frequência de 40 Hz e outra de 41 Hz o critério não é atendido, pois 5% de 40 Hz é igual a 2 Hz (EVEREST; POHLMANN, 2009). Na ferramenta é possível ver a quantidade de modos por terço de oitava, que, ainda de acordo com o critério, devem seguir uma ordem crescente das frequências mais baixas até as mais altas para uma boa dispersão dos modos (BONELLO, 1981).

A área de Bolt concentra boas proporções de dimensões de sala. Se a marca vermelha se encontra nesta área, é mais provável que se tenha uma disposição mais bem distribuída dos modos da sala (BOLT, 1946).

2.7 MÉTODOS NUMÉRICOS DE SIMULAÇÃO ACÚSTICA

No passado, profissionais da acústica utilizavam uma grande variedade de técnicas para o melhoramento da acústica do ambiente. Porém, o resultado final não poderia ser previsto, e nem as opções de projeto poderiam ser testadas antes da construção desta sala. A única forma de análise prévia existente na época era a construção de modelos em escala (EVEREST; POHLMANN, 2009). Felizmente, hoje existem inúmeros métodos de predição acústica, e com a ajuda da computação, é possível simular os mais variados tipos de espaços, caracterizá-los e propor soluções dos eventuais problemas de acústica. Em termos gerais, para se caracterizar uma sala é necessário que se conheça o caminho das reflexões que incidem de maneira complexa no ambiente, em relação ao tempo.

A modelagem analítica da propagação do som em ambientes fechados é difícil pois são numerosos e bastante complexos os fenômenos físicos envolvidos. Devido à existência de

muitos parâmetros que devem ser levados em conta ao se tentar reproduzir o espaço físico real, aproximações devem ser feitas, buscando aproximar o modelo físico ao mais próximo do real. Ainda que algumas sejam melhores que outras, nenhuma se mostrou eficaz a ponto de resolver os problemas nas altas e baixas frequências ao mesmo tempo (ELORZA, 2005). Basicamente existem três tipos de abordagem computacional para a simulação e avaliação da propagação do som em ambientes fechados: os métodos empíricos, os métodos baseado em ondas e os métodos geométricos, que são os de maior interesse deste trabalho.

2.7.1 Métodos acústicos geométricos

Os métodos acústicos geométricos são aqueles que utilizam aproximações das altas frequências baseadas nos caminhos de propagação no espaço geométrico. As ondas são consideradas como raios que viajam em linha reta, sendo desprezado, assim, o comportamento ondular do som. Existem vários tipos, em que podem ser rastreados raios, partículas, cones e pirâmides. Também são modelados os fenômenos de difusão e difração. Estes métodos são baseados em energia, pois é o único parâmetro que é considerado na emissão de cada raio. Estes métodos costumam ter um bom nível de aceitabilidade na precisão da predição de diferentes parâmetros acústicos, e conseguem representar a distribuição das reflexões no espaço e tempo (ELORZA, 2005).

Algumas limitações deste método são fundadas no fato de que as ondas sonoras são modeladas como raios, fazendo com que, nas frequências mais baixas, ocorra imprecisões devido à natureza destas ondas. Estas aproximações são válidas quando o comprimento de onda do som é pequeno quando comparado à área das superfícies da sala, e grandes comparado às suas rugosidades. Os fenômenos de difração e interferência são ignorados, devido à aproximação da onda a raios que percorrem trajetos em linha reta, assim como as fases das ondas não são consideradas, e suas energias ou intensidades são simplesmente somadas quando estes raios são sobrepostos num ponto (VORLÄNDER, 2013).

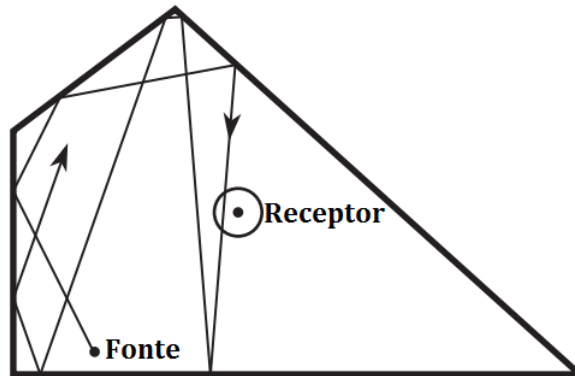
2.7.2 Método do traçado de raios

O método do Traçado de Raios utiliza como analogia a óptica geométrica, associando a fonte luminosa à fonte sonora e os raios de luz às ondas sonoras. O caminho do nível sonoro em relação ao tempo, medido em um ponto específico é chamado de ecograma (EVEREST; POHLMANN, 2009).

A Figura 20 mostra o raio sonoro atravessando a zona de percepção do receptor após

três reflexões, seguindo sua trajetória até um determinado número de reflexões.

Figura 20 – Representação esquemática do Traçado de Raios.

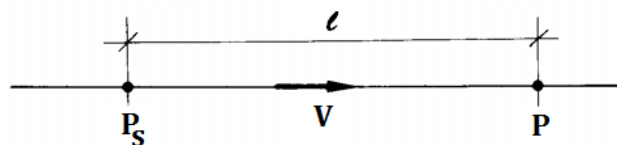


Fonte: Everest e Pohlmann (2009) (adaptado)

Kulowski (1984) afirma que o método do Traçado de Raios (*Ray Tracing Technique - RTT*, ou *Ray Tracing Method - RTM*) é um dos mais eficazes para a modelagem numérica de um campo acústico em um espaço fechado, e um dos mais utilizados em simulações computacionais. Este método representa geometricamente a propagação de ondas esféricas em um espaço confinado, analisando a trajetória tridimensional de várias ondas refletidas repetidamente. A energia de cada onda esférica é dividida em elementos, considerados como objetos discretos. Estes objetos são considerados como raios que se movem com a velocidade do som, e obedecem às leis da acústica geométrica. Cada raio é traçado até que sua energia se reduza a um valor desprezível, devido à absorção das paredes e do ar (KULOWSKI, 1984).

A Figura 21 mostra o comportamento do raio sonoro emitido a partir da fonte, pelo Método do Traçado de Raios:

Figura 21 – Trajetória do raio sonoro.



Fonte: KULLOWSKI, 1984 (adaptado)

Esta relação pode ser representada pela equação 28, que descreve a trajetória da onda

sonora expressa na forma vetorial:

$$P = P_s + Vl \quad (28)$$

onde:

P é a coordenada atual na trajetória na linha

P_s é a coordenada da fonte sonora

V é o vetor paralelo à linha

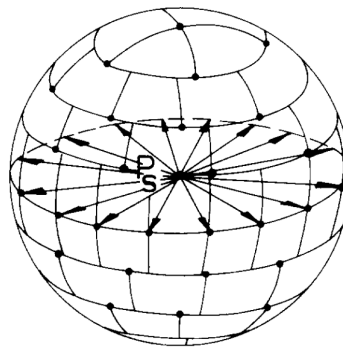
l é o valor atual do parâmetro que é igual à distância entre os pontos P e P_s .

Existem duas formas de se obter a distribuição uniforme das direções $\mathbf{V}$ em torno da fonte: a forma determinística e a estatística.

Método determinístico

No método determinístico, a fórmula algébrica é utilizada, resultando na obtenção de uma rede de pontos distribuídos de forma regular, que são os vértices dos vetores que circundam a fonte, como mostra a Figura 22, onde P_s é o centro da esfera.

Figura 22 – Método determinístico de obtenção das direções dos vetores uniformemente distribuídos ao redor da fonte.



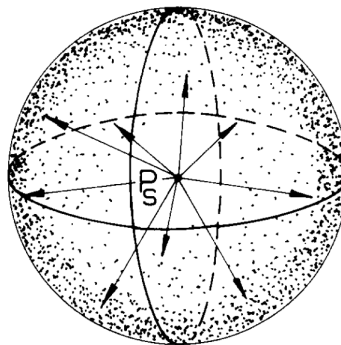
Fonte: KULLOWSKI, 1984 (adaptado)

Utilizando este método, deve-se assegurar que toda a rede de pontos foi coberta. Se o número dos raios traçantes for muito pequeno para que sejam obtidos resultados confiáveis, uma nova rede contendo um número maior de pontos deve ser criada e os cálculos devem ser repetidos desde o começo. Porém, não é possível utilizar os resultados antigos, pois em geral, os nós das redes nova e antiga não são distribuídos de forma uniforme na esfera, quando os resultados são unidos.

Método estatístico

Já no método estatístico, os vértices dos vetores são distribuídos aleatoriamente na superfície da esfera. Para o cálculo das coordenadas dos pontos, são gerados números aleatórios no intervalo $[0, \pi]$ para o ângulo de elevação e $[0, 2\pi]$ para o ângulo azimutal, através de uma subrotina de geradores de números aleatórios (KULLOWSKI, 1984). A Figura 23 ilustra a esfera de centro P_S e a distribuição dos vetores ao seu redor.

Figura 23 – Método estatístico de obtenção das direções dos vetores uniformemente distribuídos ao redor da fonte.



Fonte: KULLOWSKI, 1984 (adaptado)

Neste método a distribuição é uniforme independentemente do número de pontos, e, se é desejado aumentar o número de raios para que os resultados se tornem mais confiáveis, os cálculos já feitos mantêm sua validade. Os dois métodos são equivalentes no que diz respeito à uniformidade da distribuição dos pontos (KULLOWSKI, 1984).

Os raios são emitidos por uma fonte em um número finito, considerados como portadores de energia (ou intensidade) e viajam com a velocidade do som. São refletidos após cada colisão nas superfícies da sala. Enquanto isso ocorre, suas energias são diminuídas devido às absorções do som pelo ar e pelas paredes durante o caminho de propagação dos raios. Existem entidades pré-definidas, os chamados "receptores", que são os pontos onde são feitos os cálculos de energia, e é onde esses dados são armazenados. Por fim, a resposta ao impulso em cada receptor é obtida com todos os parâmetros acústicos desejados (ELORZA, 2005).

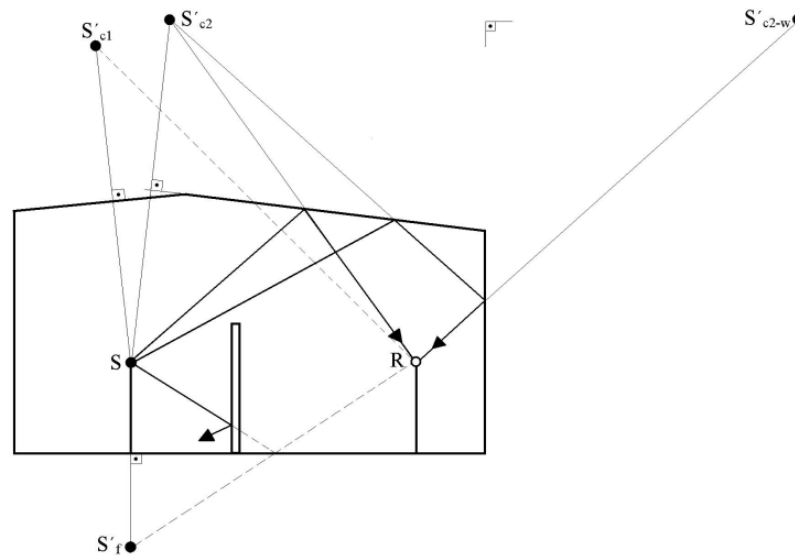
Apesar da natureza omnidirecional da propagação do som, a emissão da fonte pode ser direcionada. Como os raios são vetores que mudam de direção a cada reflexão, após a colisão, um novo caminho deve ser calculado para o novo vetor, que segue o caminho de propagação da reflexão, até colidir novamente com a próxima superfície, e assim por

diante. O processo se repete até que a energia dos raios seja reduzida a um valor pré-determinado. O processo é repetido para cada banda de frequência. A dissipação da energia original do raio ocorre nas colisões, por valores pré estabelecidos de absorção das superfícies em bandas de oitava, além da dissipação pelo ar (ELORZA, 2005).

2.7.3 Método de imagem (método das fontes virtuais)

A modelagem de uma resposta ao impulso ideal requer que sejam conhecidos todos os possíveis caminhos de propagação do som. O método de imagem garante que isso aconteça, porém não sem um alto custo computacional. Ele é capaz de calcular com um alto grau de precisão os níveis, tempos de chegada e direção, além das primeiras reflexões, muito importantes para a sensação subjetiva dos ouvintes. Este alto grau de precisão faz com que os tempos de cálculo sejam excessivamente longos para uma quantidade mais elevada de reflexões, o que é agravado se a sala não for retangular. Aumentando-se as reflexões, as fontes de imagens são aumentadas exponencialmente, fazendo com que o tempo de cálculo também seja aumentado exponencialmente, tornando este método ineficaz (ELORZA, 2005). O processo se encontra ilustrado na Figura 24.

Figura 24 – Esquema do método de imagem.



Fonte: ELORZA, 2005

O método funciona da seguinte forma: os trajetos refletidos que vem da fonte original são substituídos por caminhos diretos de uma fonte de imagem espelhada em relação à fonte. A fonte sonora S , que é omnidirecional, é espelhada em relação à todas as superfícies, criando assim as fontes virtuais (S'), nas paredes e também no chão e no teto.

Os subscritos c , f e w são relativos ao teto (*ceiling*), ao chão (*floor*) e paredes (*wall*), respectivamente. A trajetória que é refletida é substituída por uma trajetória virtual que emana da fonte virtual (de primeira ordem) até a posição do receptor, criando assim as reflexões de primeira ordem. As reflexões posteriores criam novas fontes virtuais de ordem superiores, repetindo o processo anterior, que acontece até uma ordem pré-estabelecido de fontes virtuais (PORTELA, 2008).

É então necessário que se verifique se essa trajetória realmente existe, o que é feito pelo teste de visibilidade, que se divide em duas partes: a primeira verifica se o ponto de colisão do trajeto virtual com a superfície está dentro da superfície ou não, de forma similar ao Método do Traçado de Raios. Na Figura 24, nota-se que a fonte virtual S'_{c1} não consegue "ver" diretamente o receptor, enquanto que a fonte virtual S'_{c2} "vê" de forma direta esse receptor. A segunda parte verifica se há de fato algum obstáculo que pode obstruir o caminho, reconstruindo o caminho de forma inversa, através das paredes que contribuíram nas reflexões, sendo que no exemplo utilizado, pode-se verificar que fonte virtual da superfície do chão S'_f não contribui para a resposta impulsiva (ELORZA, 2005).

2.7.4 Métodos numéricos no CadnaR

Os métodos numéricos para mapeamento acústico, presentes no software *CadnaR*, no qual foram feitas as simulações deste trabalho, são três:

- Método da Fonte Imagem Virtual
- Método de Partículas (Similar ao Traçado de Raios)
- Método Híbrido

Os dois primeiros métodos funcionam como descritos previamente no capítulo, sendo o Método Híbrido uma combinação destes dois. Ele utiliza o Método das Fontes Virtuais apenas para calcular a o início da Resposta Impulsiva, devido ao maior grau de precisão na determinação das primeiras reflexões, sendo as demais reflexões calculadas pelo Método de Partículas devido a sua maior velocidade de processamento. O funcionamento do Método de Partículas é similar ao do Método de Traçado de Raios, porém ao invés de raios serem emitidos pelas fontes, são emitidas partículas.

3 ESTÚDIOS DE GRAVAÇÃO

Neste capítulo, são apresentados e detalhados conceitos relativos à acústica de estúdios de gravação, visando o projeto de "montagem" de *home studio*. Serão abordados os aspectos envolvidos nos tratamentos acústicos de um estúdio de gravação, analisando sala de gravação e mixagem, assim como aspectos de projeto de construção e/ou adaptação de salas existentes para a designação do *home studio*, bem como analisar a qualidade acústica do ambiente, comparando se seus parâmetros acústicos se enquadram nas recomendações propostas na literatura.

3.1 ACÚSTICA DE ESTÚDIO DE GRAVAÇÃO

Um estúdio de gravação é constituído basicamente por dois ambientes: uma sala de gravação e uma sala de mixagem. Como na maior parte dos casos os *homestudios* são adaptados a partir de cômodos já construídos, é comum que uma sala funcione como sala de gravação e também como sala de mixagem, no mesmo ambiente.

3.1.1 Salas de gravação

As salas de gravação em um estúdio podem ter variadas características de acordo com o que se deseja gravar: seja para a captação de voz ou algum instrumento musical. A Figura 25 mostra uma sala de gravação típica de um estúdio profissional.

A forma a qual a sala é tratada define as características acústicas daquele local, como o tempo de reverberação.

Se o tempo de reverberação é muito longo, as sílabas da fala e as frases musicais terão suas inteligibilidades prejudicadas, comprometendo a qualidade final da música. Entretanto, se o tempo de reverberação for muito curto, tanto a fala como a música perdem suas características originais, resultando em uma gravação de baixa qualidade.

Figura 25 – Sala de gravação do estúdio Truphonic, localizado em Charleston, Carolina do Sul, EUA.

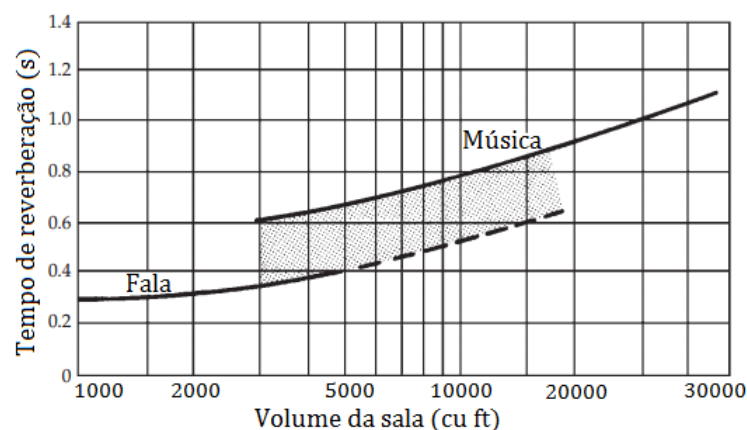


Fonte: <<https://vladomastering.com/truphonic-studios/>> Acesso em 25 out 2017.

Em geral, não existe um valor ótimo de tempo de reverberação devido a muitas variáveis: se a voz é masculina ou feminina, se a fala é rápida ou lenta, e até mesmo a língua que se fala tem influência na quantidade de reverberação escolhida. Varia também com a escolha do instrumento, e o gênero a ser gravado (EVEREST; POHLMANN, 2009).

Na Figura 26 é apresentada uma relação do tempo de reverberação com o volume da sala, para estúdios de gravação.

Figura 26 – Tempos de reverberação (s) sugeridos para estúdios de gravação de acordo com o volume da sala em pés cúbicos (*cu ft*). A área sombreada é uma região de compromisso para estúdios onde fala e música são gravados.



Fonte: Master Handbook of Acoustics.

Existe uma curva para valores de tempos de reverberação considerados "bons" para a gravação de voz falada e outra para a gravação de música. Uma área de compromisso é

localizada entre essas duas curvas, para onde se gravam ambos os tipos de áudio. Como qualquer outra sala em um estúdio, a sala de captação deve ser acusticamente mais isolada possível, principalmente em relação à sala de controle, onde o técnico deve escutar apenas o som que é reproduzido nos monitores, bem como deve possuir a ambiência necessária para uma melhor qualidade acústica do som, através de tratamentos acústicos que visam balancear a resposta em frequência da sala.

3.1.2 Salas de mixagem

Através de elementos de tratamento acústico, como difusores, absorvedores e *basstraps*, posicionados em pontos estratégicos da sala de mixagem (Figura 27), é possível que se alcance resultados muito superiores na qualidade acústica do som que é reproduzido nos monitores de áudio, em relação à uma sala não tratada ou com tratamento acústico desbalanceado.

Figura 27 – Sala de mixagem do estúdio Liquid 5th, localizado em Durham, Carolina do Norte, EUA.



Fonte: <<http://liquidfifth.com/index.php/control-room>> Acesso em 25 out 2017.

Em uma sala de mixagem, o som deve chegar aos ouvidos do operador da mesa da forma mais fiel possível. Na posição de mixagem, deve - se tentar manter um espectro de frequências o mais uniforme possível, de forma que não haja ressaltos de certas frequências e atenuações de outras. Caso a resposta do ambiente seja desigual, o engenheiro de som, tendo uma percepção que destoa da realidade, não conseguirá fazer uma mixagem adequada, podendo ressaltar frequências que já são demasiadamente evidentes ou atenuar outras que já estão em um baixo volume.

Em termos de projeto, uma importante consideração deve ser feita a respeito da isolamento sonora da sala de audição e mixagem. A maneira com que a sala é construída

afeta diretamente em como o som se propagará do ambiente interno ao externo, e vice-versa. Na audição crítica, qualquer perturbação provinda de fontes externas ou internas devem ser evitadas (PERRY, 2008).

Como já discutido no Capítulo 2, a atenuação sonora, causada pela perda na transmissão nas paredes depende de uma série de fatores, sendo os mais importantes a espessura e a densidade do material utilizado. As paredes construídas de forma convencional transmitem muita energia sonora, pois o som ressoa de um lado a outro da parede através de sua estrutura. Para melhorar o desempenho do isolamento, são utilizadas paredes duplas, espaçadas entre si. Para uma atenuação mais eficiente, principalmente nas frequências mais graves, utiliza-se materiais isolantes acústicos no interior da folga entre as paredes.

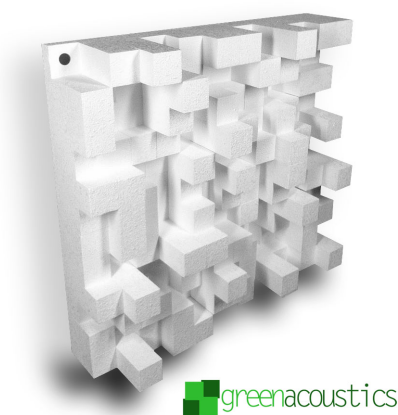
3.2 TRATAMENTO ACÚSTICO

O tratamento acústico de um ambiente visa sempre adequar o campo acústico do ambiente de trabalho, independente de seu tipo de uso; seja em um escritório, um estúdio de rádio ou um estúdio de gravação, tendo cada ambiente de trabalho um objetivo a ser alcançado em relação à propagação do som em seu respectivo local. A difusão, a absorção e o isolamento do som são fatores que influem diretamente na qualidade esperada da propagação do som dos ambientes, de acordo com a sua aplicação. Existem variadas soluções disponíveis no mercado, de acordo com a necessidade em questão. Dada a grande importância destes componentes, a seguir são comentados alguns destes elementos utilizados no tratamento acústicos de ambientes.

3.2.1 Difusores sonoros

O objetivo principal, na maior parte dos projetos de salas é que a energia sonora seja mais uniformemente possível distribuída no ambiente, dentro do espectro audível de frequências. Embora essa seja uma condição ideal e inalcançável, a difusão pode ser de grande ajuda na busca de melhores resultados. A difusão é bem vinda, pois ajuda a situar o ouvinte dentro do campo sonoro. Por outro lado, muita difusão pode tornar difícil a localização da fonte sonora (EVEREST; POHLMANN, 2009). No mercado existem muitos tipos de difusores, com variações de formais e materiais. Um típico painel difusor de forma retangular é mostrado na Figura 28:

Figura 28 – Painel Difusor Acústico Tipo SkyLine DG-17 da empresa Green Acoustics.



Fonte:

<<https://www.lojasuperacustica.com.br/difusor-acustico-tipo-skyline-dg-17-51-25-6-difusores-difusor-acustico-d-g17>>.

Acesso em 28 ago 2017

Os painéis difusores são caracterizados pela aleatoriedade da forma e profundidade dos seus elementos, providenciando assim, uma difusão mais eficiente do que uma parede regular para uma determinada gama de frequências. O espalhamento das ondas sonoras acontece quando estas se chocam com os elementos geométricos dos difusores, que devem ter pelo menos um sétimo do comprimento de onda incidente para que o seu efeito seja sentido. Experimentos indicam que a qualidade acústica subjetiva é superior nos estúdios e salas de concerto onde ornamentações retangulares são usadas extensivamente (EVEREST; POHLMANN, 2009).

3.2.2 Absorvedores sonoros

Os materiais absorvedores tem por finalidade transformar a energia sonora em energia térmica, por atrito, como explanado no Capítulo 2. Comumente, estes materiais são utilizados quando se deseja diminuir a energia sonora no ambiente, ou seja, eliminar a massa sonora sobressalente da sala.

Existem diversos tipos de absorventes sonoros no mercado, e cada um é projetado para atuar sobre uma determinada banda de frequência. Por exemplo, para reduzir o tempo de reverberação e eliminar as reflexões do ambiente, utiliza-se painéis absorventes na posição onde ocorrem estas reflexões. A Figura 29 mostra um típico painel absorvente encontrado no mercado.

Figura 29 – Painel absorvente acústico de espuma, vendido no site DHgate.com.



Fonte: <<https://www.dhgate.com/store/product/12-pack-charcoal-acoustic-foam-sound-absorption/403734669.html>>

Acesso em 25 out 2017.

Estes painéis possuem maior absorção na região das frequências médias e altas. Quanto maior a espessura do material, maior é a absorção das baixas frequências. A densidade também desempenha um papel importante: quanto mais denso, maior é a absorção do som. Porém, não deve ser demasiadamente denso a ponto de a superfície mais refletir do que absorver as ondas sonoras. Podem possuir formato irregular, como apresentados nos difusores, a fim de melhorar a dispersão das ondas no ambiente.

Os materiais porosos ou fibrosos possuem baixa absorção nas baixas frequências. Para estes casos, é necessário que sejam utilizados dispositivos que são projetados especialmente para essa finalidade. A seguir, são comentados alguns dos principais tipos de mecanismos especializados para absorção sonora.

Carpete

Os carpetes são utilizados amplamente em espaços internos dos mais variados tipos, onde são escolhidos principalmente pela estética e conforto em detrimento de suas capacidades acústicas. Podem oferecer absorção sonora significativa no ambiente nas frequências médias e agudas. Isso costuma ser um problema, pois antes mesmo de se considerar outros tipos de absorvedores, o tapete é utilizado na sala para por exemplo, reduzir o tempo de reverberação. O problema é que esse tapete absorverá muito nas frequências mais altas e pouco nas frequências mais baixas, utilizando-se de exemplo um tapete pesado, que possui um coeficiente de absorção de 0,6 em 4 kHz, enquanto que o mesmo coeficiente

é de apenas 0,05 em 125 kHz, criando um desbalanço muito grande na absorção sonora da sala. Para agravar o problema, os carpetes não possuem informações de absorção sonora oferecidas pelo fabricante, e como cada tipo de combinação carpete-forro oferece uma gama diferente de absorção, se tornam necessários a experimentação e o uso do senso crítico. Por sorte, essa forma desbalanceada de absorção oferecida pelo carpete pode ser compensada utilizando outros tipos de absorvedores, como os ressonadores, que absorvem as frequências mais baixas (EVEREST; POHLMANN, 2009).

Painel perfurado sobre material poroso ou fibroso

Para que seja feita a proteção mecânica do material poroso ou fibroso em um ambiente, é comum que esse material seja recoberto por painéis perfurados de madeira, plástico ou metal. Os furos podem estar dispostos de maneira alternada ou de forma reta. A absorção desse conjunto será dado inteiramente pelo material interno desde que a área perfurada da placa seja pelo menos de 20% (BISTAFA, 2011). Caso contrário, a absorção do conjunto na frequência de pico é dada pela expressão 29:

$$f_{pico} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P/100}{L[t + 0,85d(1 - 0,22d/q)]}} \quad (29)$$

onde:

c é a velocidade do som no ar

P é a porcentagem de área aberta do painel

L é a profundidade da cavidade formada pelo painel, com a espessura do material absorvente inclusa

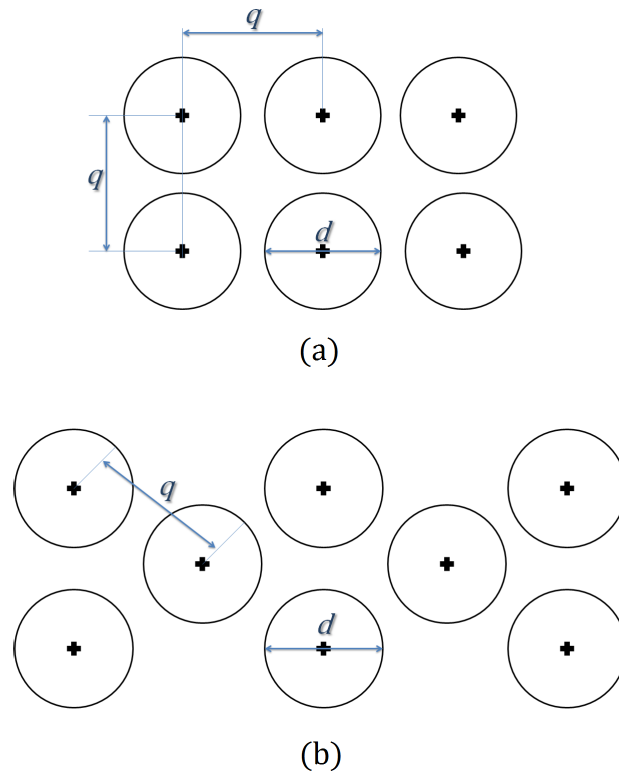
t é a espessura do painel

d é o diâmetro dos furos

q é a distância entre furos

Para que a equação 29 apresente resultados com erros menores de 15%, a relação fL/c deve possuir valor inferior à 0,1 (BISTAFA, 2011). A Figura 30 ilustra os esquemas de disposição dos furos mais típicos.

Figura 30 – Disposições mais comuns de perfuração: (a) reta e (b) alternada.



Fonte: BISTAFA, 2011 (adaptado).

Para a disposição reta, tem-se que $P = 78,5(\frac{d}{q})^2$, enquanto que na disposição alternada $P = 90(\frac{d}{q})^2$.

Membrana flexível sobre material poroso ou fibroso

Uma alternativa às placas perfuradas para o revestimento de materiais absorventes porosos ou fibrosos é a utilização de membrana flexível de polietileno (o mesmo material do saco plástico de lixo), de espessuras que variam de 6 a 35 μm . A absorção sonora nas altas frequências é prejudicada quando o material absorvente é ensacado com a membrana. Deve-se ressaltar que a membrana não deve permanecer esticada, para que o movimento das partículas de ar do lado de fora possa movimentar as partículas do lado de dentro através da membrana, mantendo assim sua eficácia acústica na dissipação do som (BISTAFA, 2011).

Caso deseje-se ensacar o material absorvente, e ainda recobri-lo com painéis perfurados, é recomendável que se separe a membrana do painel com um espaçador de tela de arame dentro do saco, de modo que fique entre o material absorvente e o plástico.

Essa disposição evita que o conjunto se compacte, perdendo assim sua eficácia acústica (BISTAFA, 2011).

Painel ressonante

Um outro método de se dissipar a energia acústica de uma sala é através de painéis ressonantes. São dispositivos simples, que consistem de chapas finas de madeira ou de metal, fixadas nas paredes ou no teto, montadas sobre espaçadores, de modo que fique um espaço de ar entre a parede e o painel. Através da densidade do material da chapa é possível calcular a densidade superficial do painel, que é o produto da espessura da chapa (em m) pela densidade do material da chapa (em kg/m³). O painel será eficaz apenas se excitado pelo campo acústico, de forma que entre em ressonância e dissipe a energia sonora enquanto realiza o movimento de flexão. Para maximizar a absorção, pode-se utilizar material absorvente na cavidade entre os painéis e as paredes. O dispositivo terá eficácia máxima na absorção da primeira frequência de ressonância do sistema (BISTAFA, 2011).

Ressonadores de helmholtz ou de cavidade

Estes absorvedores possuem forma semelhante a uma garrafa ou um vaso, sendo um sistema composto de um volume de ar confinado e um gargalo, como mostra a Figura ??.

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{L'V'}} \quad (30)$$

onde

L é o comprimento da seção transversão do pescoço

S é a área da seção transversão do pescoço

V é o volume

L' é o comprimento efetivo do pescoço, dado por:

$L' = L + 1,7a$ (boca flangeada)

$L' = L + 1,4a$ (boca não flangeada)

em que a é o raio da seção transversal do pescoço.

Estes ressonadores são classificados por um fator de qualidade, que, quanto mais alto é, mais estreito e eficaz é o espectro de absorção, enquanto que para fatores de

qualidade menores, esse mesmo espectro é mais abrangente, porém absorve menos em termos absolutos em cada frequência (BISTAFA, 2011).

Bass traps

Para a absorção do som em frequências mais baixas, são utilizadas as *bass traps* (ou, na tradução livre, "armadilhas de grave"). Geralmente são instaladas nos cantos da sala, a fim de absorver parte da energia sonora das ondas estacionárias que ali se formam, devido às reflexões no chão, teto e nas paredes. Dependendo das dimensões da sala, e as frequências (ou o comprimento de onda) dos tons, a pressão das ondas refletidas podem somar ou subtrair em relação às ondas provenientes dos auto-falantes. Se as ondas combinam em fase, reforçando uma à outra, podem gerar aumentos de até 6 dB. Porém, quando combinadas de forma destrutiva, podem ocasionar quedas de 25 dB ou até mais, em salas sem tratamento (WINER, 2003). Um modelo de *bass trap* vendido no mercado é mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Bass Trap de espuma acústica vendido pela Charisma Audio.



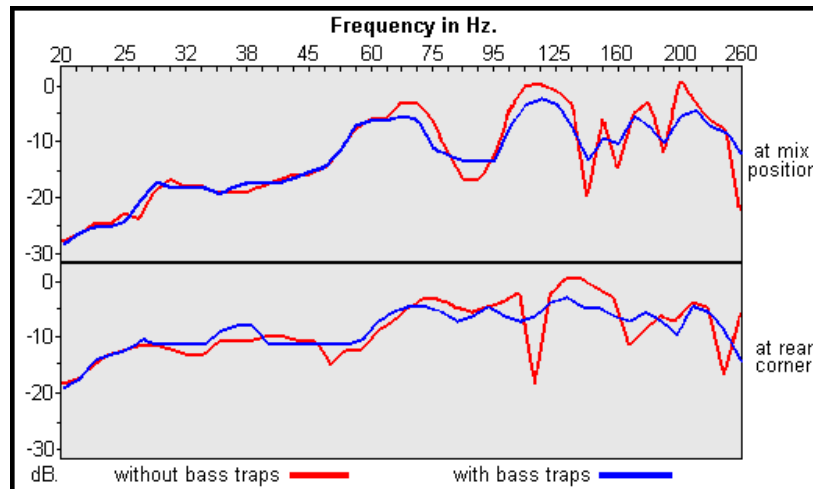
Fonte: <<http://www.charismaaudio.com/wp-content/uploads/2013/01/megafusorbasstrap.jpg>> Acesso em 25 out 2017.

Não existe uma reposta ou solução simples para esse tipo de problema, pois cada ambiente fechado se comporta de forma modal, e algumas frequências baixas irão se pronunciar mais do que outras, justamente devido à adição e cancelamento de fases, provenientes das reflexões nas superfícies (STORYK & CIPRIANO, 2006).

Dependendo da localização e da frequência, podem ocorrer cancelamentos quase totais

(WINER, 2003). A Figura 32 mostra um exemplo real de uma sala de mixagem de 3 x 5 m, comparando a resposta em frequência da sala sem tratamento de graves (linhas vermelhas) e a mesma sala após a instalação de *bass traps* (linhas azuis).

Figura 32 – Resposta em frequência de uma sala pequena após tratamento acústico. O gráfico superior se refere à posição de mixagem, e o gráfico inferior mostra a resposta em frequência nos cantos da sala.



Fonte: <<http://ethanwiner.com/acoustics.html>bass traps> Acesso em 28 out 2017.

Uma maneira de se livrar destes picos e vales é evitar, ou ao menos reduzir as reflexões sonoras, ao aplicar tratamento para baixas frequências nos cantos, paredes, e outras superfícies para que estas não reflitam as ondas de volta à sala (WINER, 2003).

3.2.3 Isolantes sonoros

Pierrard, engenheiro de acústica e consultor da ProAcústica (Associação Brasileira para a Qualidade Acústica), divide as paredes em três tipologias: massivas, leves ou mistas.

As paredes massivas são feitas de alvenaria de bloco de concreto ou cerâmica, as paredes leves são compostas por sistemas de *drywall* ou *steelframe* e as paredes mistas são feitas pela combinação das duas, com um elemento base massivo e um revestimento de *drywall* por uma ou ambas as faces (BONAFÉ).

Os materiais envolvidos no isolamento sonoro de um ambiente podem ser diversos, e, além da importância da escolha do material, é igualmente importante a forma em que estes são dispostos.

O uso de paredes de gesso acartonado *drywall* é cada vez mais frequente na construção,

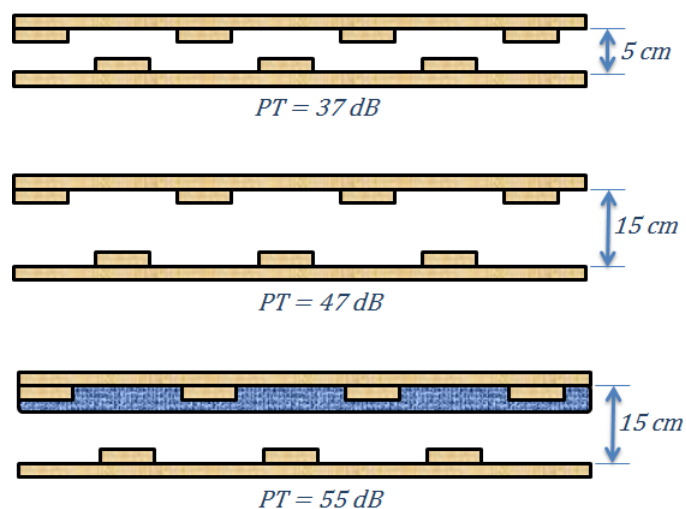
por sua simplicidade, facilidade de instalação, versatilidade e limpeza. Enquanto a alvenaria tradicional depende de sua massa para desempenhar seu papel acústico, o *drywall* funciona como um sistema massa-mola-massa, alternando os materiais de forma a reduzir a transmissão de energia sonora e térmica.

Para melhorar o desempenho, pode-se aumentar o número de chapas, aumentar o espaço da cavidade, e até mesmo utilizar material absorvente entre as chapas, como a lã mineral ou lã de PET, reduzindo assim as ressonâncias acústicas internas (GABRIEL BONAFÉ).

As paredes duplas feitas com *drywall* são o arranjo mais comumente utilizado quando se deseja ampliar a perda de transmissão, com peso e custos mais baixos que as soluções convencionais, de alvenaria, por exemplo. São formadas por duas chapas paralelas com um certo espaçamento entre elas, junto à uma estrutura de metálica, de madeira ou caibros de fixação entre estas.

Bistafa reforça que, ao se usar os painéis de gesso, deve-se tomar cuidado para que os caibros de fixação não formem uma ponte mecânica entre os painéis. Quanto maior o espaçamento entre os painéis, maior é a perda de transmissão. Essa perda na transmissão sonora pode ser ainda mais elevada quando adicionado um material absorvente fixado entre essas chapas, como ilustra a Figura 33, com painéis e material absorvente de 13 mm 30 mm de espessura, respectivamente.

Figura 33 – Esquema de montagem dos painéis de *drywall*.



Fonte: Adaptado de Bistafa, 2003.

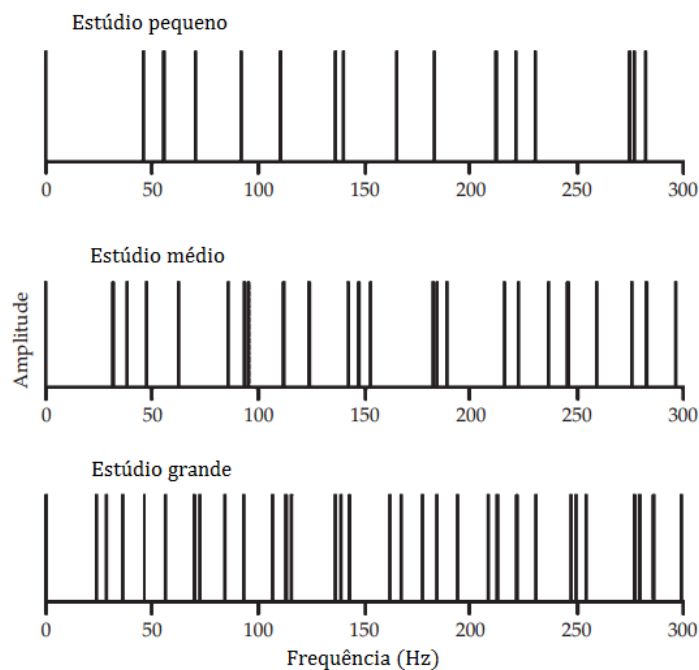
3.3 PROJETO DE SALAS DE ESTÚDIO

Os *home studios* são responsáveis por uma parcela cada vez maior no rol de gravações da indústria fonográfica, devido aos grandes avanços tecnológicos na área nos anos 90. O entendimento e o estudo dos fenômenos acústicos nesse tipo de espaço se torna cada vez mais necessário.

Salas pequenas apresentam alguns problemas inerentes à sua geometria e suas dimensões. *Home studios* geralmente são estruturados a partir de salas pré - existentes, que não foram construídas para esse fim.

Um dos problemas das salas pequenas, se não o de maior importância, é em relação aos modos de ressonância, relacionado ao comprimento de onda (Figura 34).

Figura 34 – Distribuição dos modos de ressonância em salas pequenas, médias e grandes.



Fonte: Everest e Pohlmann (2009).

As ondas situadas na região das baixas frequências possuem maior comprimento, e, se esse comprimento de onda for igual ou maior que alguma dimensão da sala, essa onda não será refletida nas paredes internas, e por consequência, não se observa os modos de ressonância das frequências mais baixas e suas respectivas harmônicas fundamentais ao longo do espectro de frequências. Isso resulta numa distribuição menos regular dos modos na sala. Já em estúdios maiores, as ondas de baixas frequências possuem espaço para que

possam propagar, fazendo com estas frequências se evidenciem no ambiente, juntamente às suas frequências harmônicas adjacentes. Tornando o espaço entre os modos da sala mais próximos uns aos outros, a resposta em frequência é mais regular ao longo da banda.

A Tabela 1 exhibe, para os três tamanhos de estúdios, a quantidade de modos abaixo de 300 Hz, o valor do modo axial mais baixo, e o espaçamento médio entre esses modos.

Tabela 1 – Ressonância em Estúdios.

Estúdio	Pequeno	Médio	Grande
Nº de modos axiais abaixo de 300 Hz	18	26	33
Modo axial mais baixo (Hz)	45.9	30.6	22.9
Espaçamento médio entre modos (Hz)	14.1	10.4	8.4

Fonte: Master Handbook of Acoustics.

Como nos estúdios grandes os primeiros modos acontecem em frequências mais graves do que nos estúdios pequenos, a região das frequências mais baixas terá resposta mais uniforme. Além disso, é possível observar que nos estúdios grandes, por possuírem relativo menor espaçamento entre as frequências em que os modos acontecem, apresentam Resposta Impulsiva mais equilibrada.

Caso a sala do *home studio* possa ser construída, a mesma deve ser projetada com as especificações e dimensões ideais para a minimização desses modos e uma diferença significativa poderá ser obtida na qualidade acústica do ambiente. Caso contrário, é necessário caracterizar a sala, conhecer suas características acústicas para propor adaptações e definir qual seria o tratamento acústico mais adequado ao ambiente, para prover uma sala existente com a melhor qualidade acústica possível.

Existem certas discussões à respeito da forma que a sala deve ser construída. A fim de se evitar os *flutter echoes*, é recomendado o uso de paredes e tetos angulados, de forma não paralela ao chão, e mudando a disposição das paredes na sala, evitando o paralelismo entre elas (EVEREST; POHLMANN, 2009).

3.3.1 Adaptação de ambientes para a implementação de um *home studio*

A maioria dos problemas já citados se fazem presentes nas salas de um *homestudio* em uma sala adaptada, pois comumente são implementados em cômodos pequenos, que não possuem dimensões e proporções adequadas para que se haja um maior espalhamento dos modos de ressonância. Desta forma, a ambiência, bem como o equilíbrio esperado da resposta em frequência da sala são prejudicados em função das limitações físicas impostas

pelo ambiente em questão.

Apesar destes problemas serem evidentes em salas como estas, eles podem ser atenuados através da implementação de tratamento acústico em pontos estratégicos destas salas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

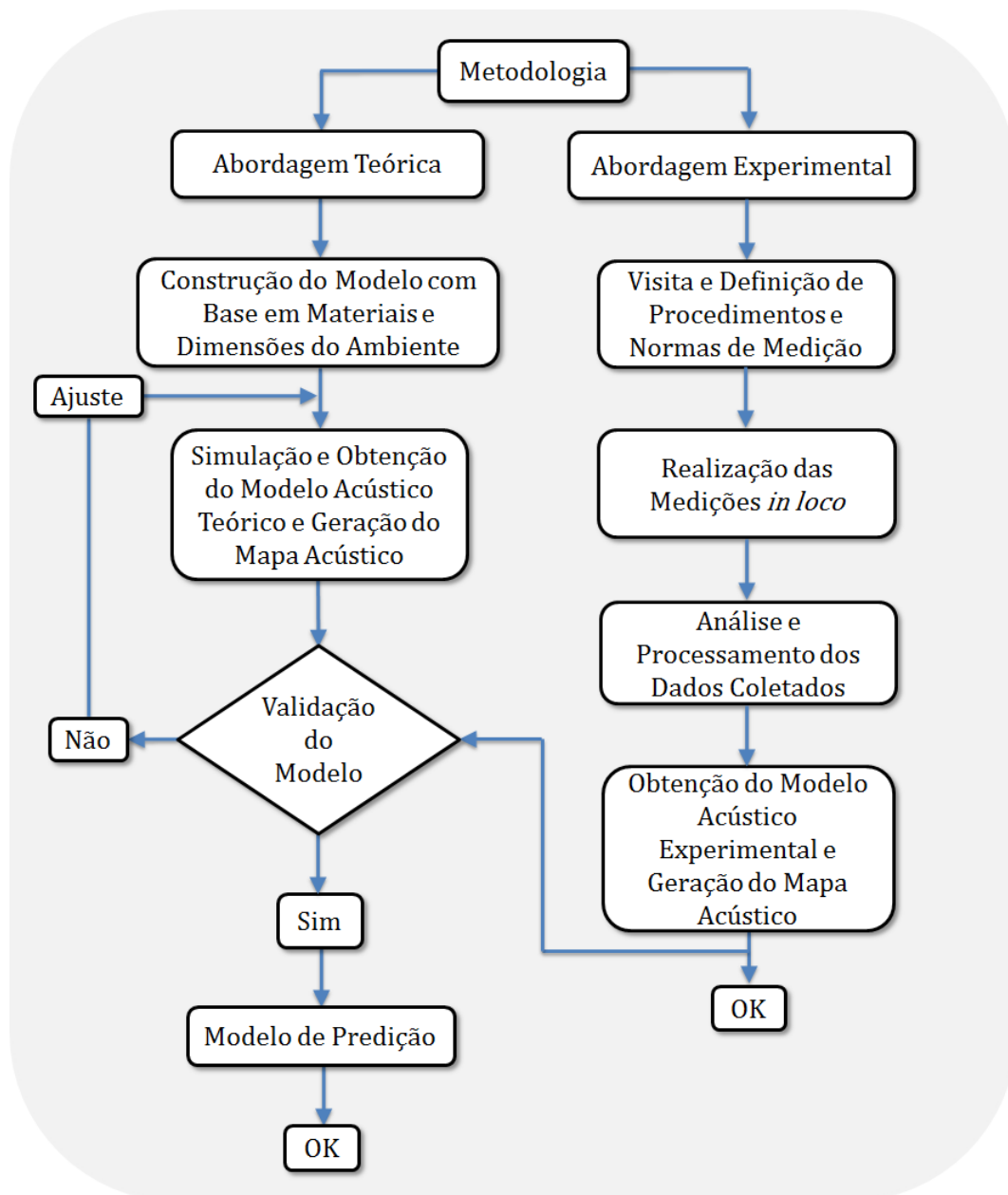
Com o propósito da caracterização sonora dos estúdios através de medições práticas e simulações em software, foram definidos os procedimentos necessários para o desenvolvimento da proposta do trabalho.

A proposta de desenvolvimento do trabalho é sustentada em uma abordagem teórico-experimental. Uma abordagem teórica, por meio de simulações e uma abordagem prática, por meio de medições no interior dos estúdios visitados.

Na abordagem teórica, foram criados modelos preliminares de propagação sonora em ambientes fechados no software *CadnaR*. Após visita ao Estúdio 1, com as dimensões e informações sobre os materiais do local, foi projetado um modelo no mesmo *software*. Foram então padronizadas as fontes sonoras e os pontos de medição para a medição do RT60 e do isolamento entre as paredes. Dados de entrada como a potência sonora da fonte, área dos materiais de tratamento acústico e a absorção destes foram aplicados ao modelo numérico.

A Figura 35 mostra um fluxograma da metodologia aplicada no presente trabalho.

Figura 35 – Fluxograma da metodologia utilizada.



Fonte: do próprio autor.

Os dados providos pela simulação numérica foram então comparados com aqueles obtidos experimentalmente. Em busca da validação do modelo, foram comparados os dados teóricos com os dados experimentais, em diferentes salas do estúdio. O ajuste do modelo se faz por meio da comparação dos dados coletados no local com os dados obtidos por meio da simulação.

Seguindo a representação do fluxograma, o desenvolvimento do trabalho segue o mesmo padrão para ambos os estúdios analisados (Estúdio 1 e Estúdio 2).

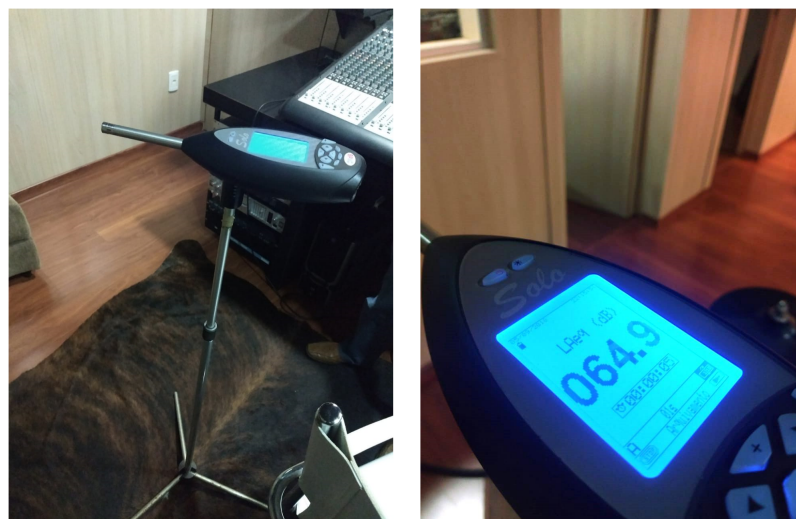
4.1 EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS UTILIZADAS NA MODELAGEM TEÓRICO - EXPERIMENTAL

A seguir são apresentados os principais equipamentos e ferramentas utilizados no cálculo teórico do modelo numérico e da aquisição e tratamento de dados do modelo experimental do *home studio*.

4.1.1 Sonômetro

O sonômetro utilizado foi o medidor *Solo Black Edition* do fabricante *01Db* (Figura 36).

Figura 36 – Sonômetro *Solo Black Edition*, da empresa *01dB*.



Fonte: do próprio autor.

Este medidor é do tipo 1, atendendo às especificações das seguintes normas inter-

nacionais: IEC 61672-1 (2002)/NF EN 60651 (2000)/NF EN 60804 (2000)/IEC 1260 (1995)/NF EN 61260/A1 (2002)/ANSI 1.4/EMC IEC 61000-6-1 e 2/EMC IEC 61000-6-3 e 4/*ISO 1996 Part 1 and 2 - Description and Measurement of Environmental Noise*.

Esse é um equipamento versátil que possui várias funções relativas à medição sonora, como por exemplo:

- Medir os níveis de pressão sonora global de um ambiente
- Medir os níveis de pressão sonora por bandas de oitava e de 1/3 de oitava
- Medir o tempo de reverberação e decaimento do som de um ambiente (RT60)
- Medir o isolamento entre paredes, entre outras funções

Com o *Solo*, é possível caracterizar a medição ao se identificar uma fonte em particular e calcular os níveis sonoros por banda de frequência através de indicadores mostrados em tempo real. Através deste módulo, a função *trigger* pode registrar o sinal e começar a medição se um determinado nível sonoro pré estabelecido é ultrapassado.

Para a medição do RT60 nos estúdios, foi utilizado um "gatilho" (*trigger*) de 90 dB, com tempo de aquisição de 10 segundos.

O *Solo* possui a função "Edifício", projetada para aplicações específicas estruturais em prédios. Assim, é possível obter o isolamento sonoro de paredes, entre outras funções, de forma manual ou programada.

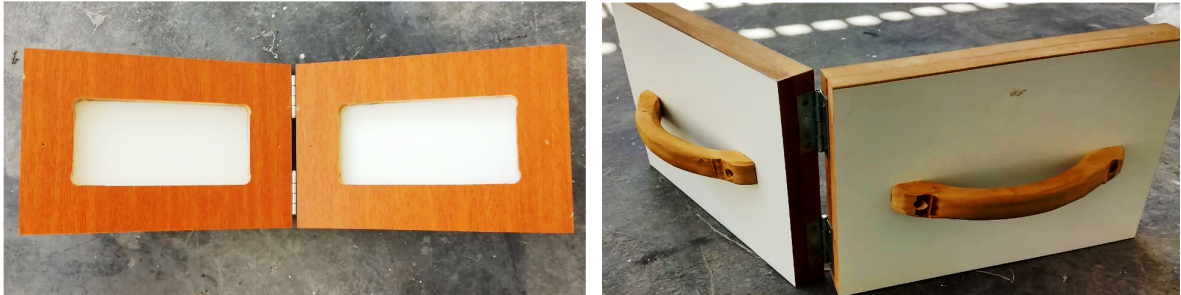
Para as medições da Perda na Transmissão, foi estabelecido tempo de aquisição de 1 minuto para avaliação do nível de intensidade sonora nos pontos de interesse.

4.1.2 Claquete

Para a avaliação do RT60, foi utilizada uma claquete, dispositivo manual para a criação de um ruído de impacto, mostrado na Figura 37.

Como existe certa dificuldade em se reproduzir um som intenso e de curta duração, o uso da claquete se mostra interessante nessas situações. A cavidade no interior da claquete funciona como uma caixa de ressonância, permitindo a reprodução de sons mais graves, com uma maior gama de frequências do que aquelas geradas pelo impacto de superfícies simples como uma batida de mão, por exemplo. Para a análise de reverberação em frequências ainda mais baixas, foi utilizado um balão de festas, devido ao som grave característico quando este é estourado.

Figura 37 – Claquete utilizada no experimento.



Fonte: do próprio autor.

Cada aba da claquete possui as dimensões 30 x 15 x 3 cm, com uma cavidade de forma retangular e centralizada de dimensões 20 x 7,5 cm, com 2 cm de profundidade.

4.1.3 *Software CadnaR*

A criação e definição dos modelos virtuais para avaliação e simulação dos estúdios foi realizada com o auxílio de um software de modelagem acústica, o *CadnaR*.

O *CadnaR*, software proprietário da empresa alemã *Datakustik*, é uma ferramenta relacionada à acústica de ambientes como escritórios e indústrias, utilizada por vários tipos de profissionais, como arquitetos, construtores, designers, engenheiros, especialistas em acústica, etc. Com ele é possível simular diferentes configurações e prever determinados comportamentos e fenômenos acústicos, adicionando praticidade ao trabalho, economia de tempo e dinheiro, em um alto nível de detalhamento. Nele é possível detalhar os materiais que constituem o ambiente, modelar estruturas de geometria complexas, visualizar a distribuição do som no ambiente tridimensional, entre outras funcionalidades (DATA-KUSTIK). O modelo criado foi adaptado para acústica de salas, tendo em vista que o *software CadnaR* tem como foco a acústica em instalações industriais e escritórios.

4.2 NORMAS TÉCNICAS

Os parâmetros acústicos de interesse serão analisados com base nas seguintes normas ISO:

- **ISO 3382:2012, Acoustics - Measurement of room acoustic parameters**
Part 1 - Performance spaces

Part 2 - Reverberation time in ordinary rooms

Part 3 - Open plan offices

- **ISO 717:2013, Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of buildings elements**

Part 1 - Airborne sound insulation

Part 2 - Impact sound insulation

- **ISO 16283:2018, Acoustics - Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements -**

Part 1: Airborne sound insulation

4.2.1 Recomendações técnicas

- **EBU Tech. 3276 - 2nd edition** - Listening conditions for the assessment of sound programme material: monophonic and two-channel stereophonic
- **Master Handbook of Acoustics** - EVEREST, F. A. POHLMANN, K. New York: McGraw Hill, 2009.

4.3 DESCRIÇÃO DOS AMBIENTES E DEFINIÇÃO DE PONTOS DE MEDIÇÕES

Nesta seção são apresentados os dois estúdios objetos do presente trabalho, o posicionamento e a especificação das fontes sonoras utilizadas em seus respectivos ambientes, bem como os pontos de medições definidos para a modelagem teórico-experimental.

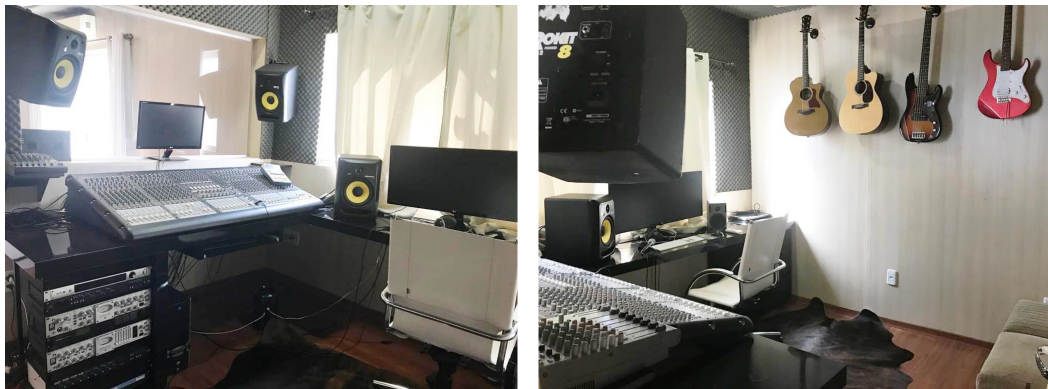
4.3.1 Estúdio 1

O Estúdio 1 é localizado no interior de uma residência na cidade de Ilha Solteira - SP, sendo que o espaço utilizado para a instalação do estúdio não foi concebido inicialmente

para esta finalidade. O estúdio foi estruturado no interior de uma sala pré-existente a partir de adaptações e tratamento do ambiente. O mesmo é utilizado majoritariamente para gravações como hobby pessoal, além de também realizar gravações profissionais ocasionalmente. O ambiente é formado por duas salas de gravação (Sala A e Sala B) e uma sala de mixagem/controlê.

- Sala de Mixagem/Controlê: é a sala a qual se encontra o computador, monitores, pré-amplificadores, mesa de som e toda a aparelhagem necessária para a gravação de um estúdio.

Figura 38 – Sala de Mixagem do Estúdio 1.



Fonte: do próprio autor.

- Sala de Gravação A: é onde são gravados a maior parte dos instrumentos, inclusive a bateria. Comporta vários músicos tocando ao mesmo tempo, como bandas, grupos de instrumentos de cordas, etc.

Figura 39 – Sala de Gravação A do Estúdio 1.



Fonte: do próprio autor.

- Sala de Gravação B: é a menor sala do estúdio, e possui uma característica mais seca devido ao seu tamanho reduzido e sua maior área de absorção relativa às superfícies reflexivas.

Figura 40 – Sala de Gravação B do Estúdio 1.

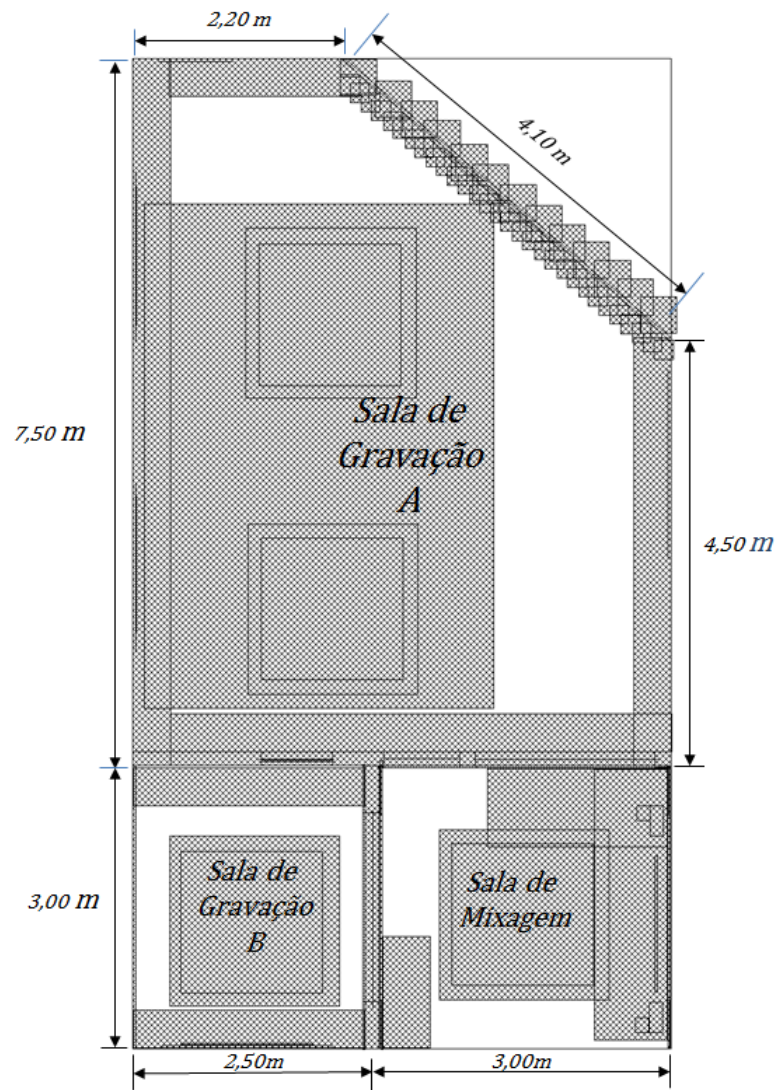


Fonte: do próprio autor.

O estúdio apresenta alguns elementos de tratamento e isolamento acústico, porém as soluções adotadas foram implementadas sem um estudo prévio de engenharia de acústica.

Na Figura 41 é mostrada a planta baixa e a disposição dos ambientes, onde é possível observar a disposição das salas de gravação e mixagem.

Figura 41 – Planta baixa do Estúdio 1. As áreas hachuradas representam objetos no interior do estúdio (tapetes, espumas, móveis, etc).



Fonte: do próprio autor.

O tratamento acústico presente no ambiente, previamente escolhido pelo proprietário do espaço, para o isolamento acústico foi a instalação de placas de isopor nas paredes e portas das salas, recobrimo-as com painéis de MDF. No chão, foi instalado uma camada de piso laminado, com tapetes na sala principal e de mixagem. No teto, também foram instaladas placas de MDF, porém sem a camada de isopor. Na Sala de Mixagem, placas de espumas absoventes foram instaladas parede frontal, lateral esquerda e traseira, além de cortina na parede frontal e painel absorvente suspenso pelo teto. Na Sala A, foram instalados painéis absorventes contornando o perímetro da sala, tapetes no chão, dois painéis absorventes na lateral e dois painéis absorventes suspensos pelo teto. Já na Sala

B, foram instaladas espumas absorventes nas paredes frontal e traseira, no teto próximo às paredes laterais e dois painéis absorventes: um no teto e outro na parede lateral direita.

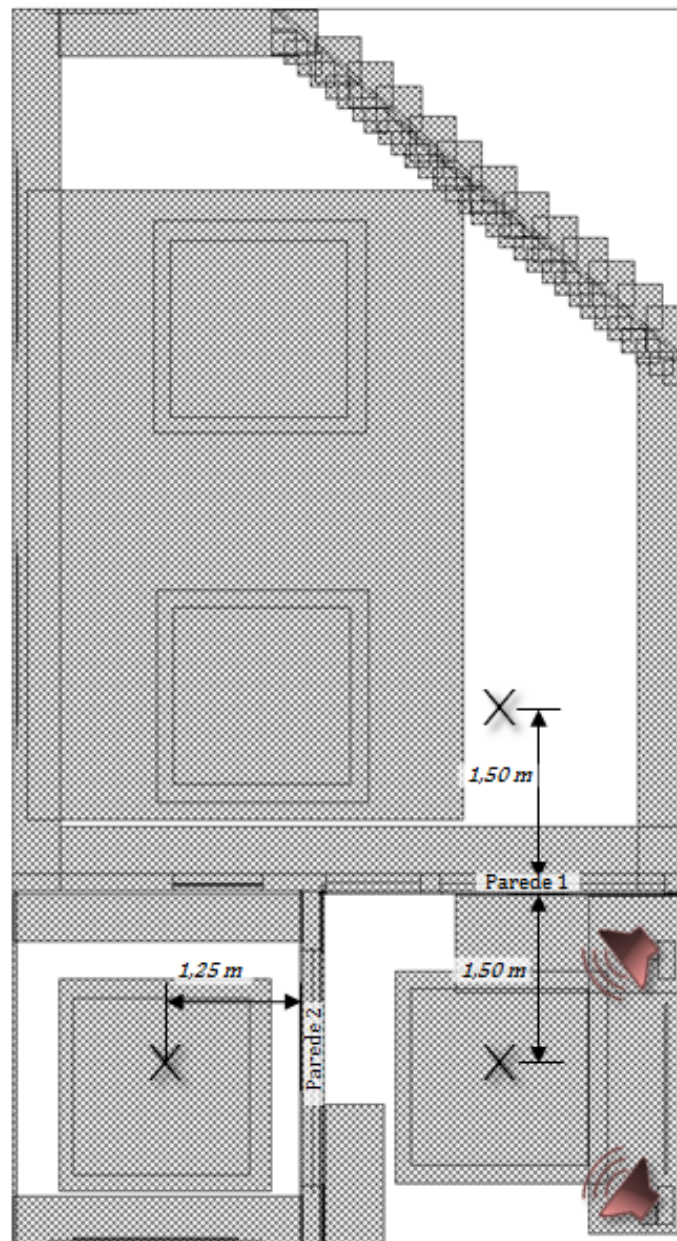
Definição dos Pontos de Medições

Buscando-se a escolha de pontos de interesse para as medições do tempo de reverberação e isolamento sonoro das salas, foram definidos alguns pontos de medições. No caso, para o RT60 foram escolhidos pontos espalhados pelas salas a fim da obtenção de um padrão de comportamento sonoro mais uniforme e geral.

As medições de RT60 foram realizadas em diversas posições nos ambientes, variando a posição da fonte, do sonômetro e também a distância entre eles. Tal abordagem visou a medição do RT60 sob diferentes condições, de forma que, nos casos em que o metro se encontrava mais próximo da fonte (claquete) fossem captadas ondas sonoras diretas, ao passo em que nos casos em que a fonte foi acionada mais distante do sonômetro, fossem captadas as primeiras reflexões do ambiente. Foram utilizadas como fonte sonora a claquete e um balão, com níveis sonoros registrados acima de 90 dB, que foi o gatilho (*trigger*) utilizado no sonômetro para a iniciação da medição deste parâmetro.

Em acordo com as normas internacionais de medição de Perda na Transmissão, foram definidos alguns pontos de interesse para a realização do experimento. Foram escolhidos três pontos, sendo um deles em frente aos monitores de áudio na Sala de Mixagem, e os outros dois nas salas adjacentes, com o sonômetro orientado de frente com a Sala de Mixagem. Na Sala A o nível de intensidade sonora foi medido a uma distância de 1,5 m da parede, enquanto que na Sala B foram feitas medidas a 1,25 m da parede que compartilha com a Sala de Mixagem, devido às suas reduzidas dimensões, como mostra a Figura 42.

Figura 42 – Configuração da fonte sonora e pontos de medição para a medição da Perda na Transmissão das paredes.



Fonte: do próprio autor.

Para identificação, as paredes que fazem divisão da sala de mixagem com a Sala A e a Sala B foram rotuladas como Parede 1 e Parede 2 respectivamente, como mostrado no esquema da mesma figura.

Fontes Sonoras

O sinal arbitrado para a excitação sonora foi o ruído branco, um sinal sonoro que contém todas as frequências de interesse na mesma potência. No entanto, é necessário que sejam utilizados equipamentos que reproduzam adequadamente esse tipo de sinal. Neste caso, os monitores de áudio profissionais de estúdios de gravação se tornam uma boa opção para esse tipo de reprodução sonora. As fontes utilizadas para a realização deste experimento foram os monitores da Sala de Mixagem (Figura 43).

Figura 43 – Fontes sonoras utilizadas no experimento.



Fonte: do próprio autor.

Foram utilizadas uma unidade *Rokit 8*, da *KRK Systems* e uma unidade *1029A* da *Genelec*, ambos monitores de áudio de alta qualidade, e reproduzem todas as frequências dentro de seus respectivos alcances com boa fidelidade, de forma "*flat*", sem distorções ou alterações no espectro de frequência, com *ranges* de 36 Hz a 40 KHz e 36 Hz a 40 KHz, respectivamente.

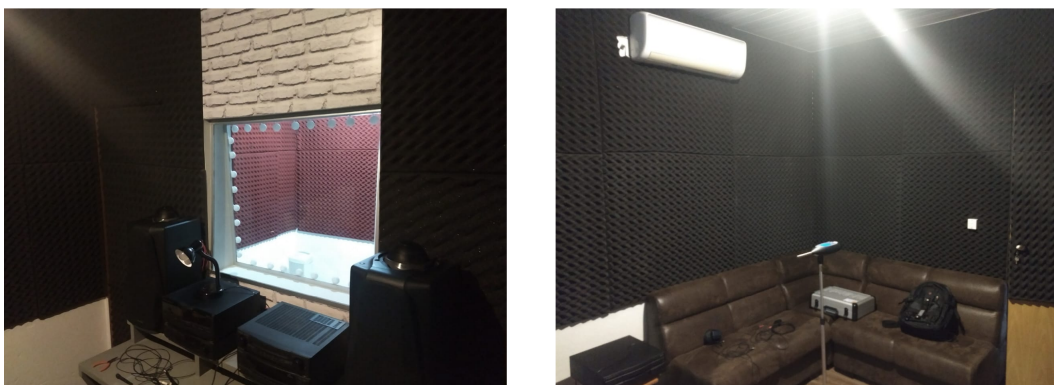
4.3.2 Estúdio 2

O Estúdio 2 está localizado nos fundos da casa de seu proprietário, em uma construção à parte do resto da casa. Foi construído para fins comerciais, onde o proprietário trabalha com gravações musicais. Tal estúdio é formado por uma sala de gravação e outra de mixagem/controle.

- Sala de Mixagem/Controle: sala na qual se encontram os equipamentos necessários

ao processo de gravação e produção musical como computador, monitores, pré-amplificadores, mesa de som, etc.

Figura 44 – Sala de mixagem do Estúdio 2.



Fonte: do próprio autor.

- Sala de Gravação: onde são gravados instrumentos acústicos e voz. O espaço comporta a presença de pequenos grupos musicais.

Figura 45 – Sala de Gravação do Estúdio 2.

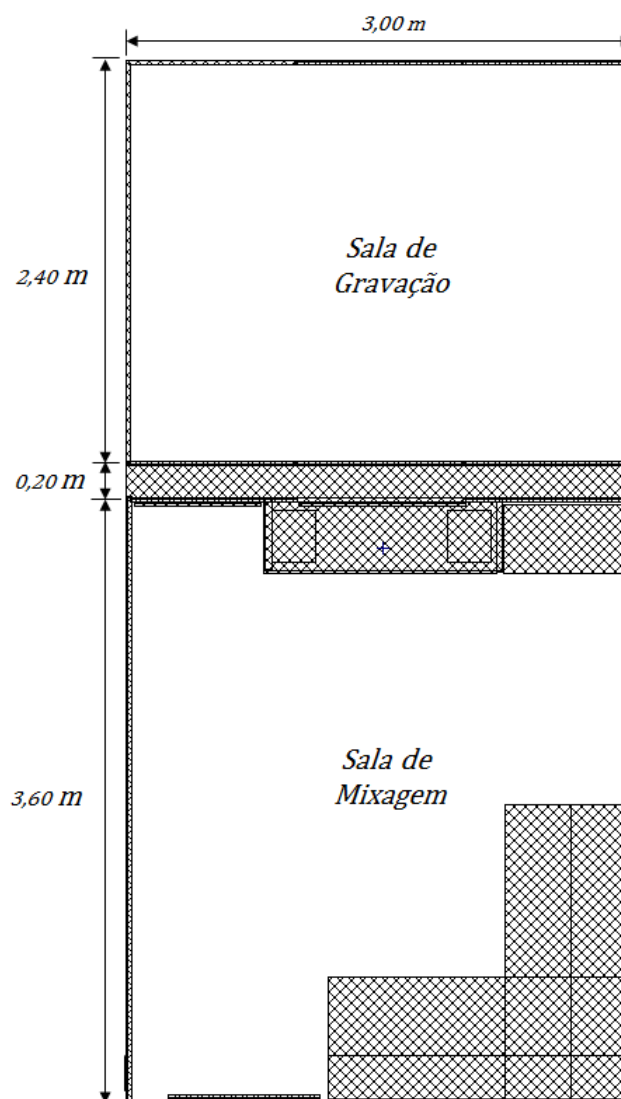


Fonte: do próprio autor.

Na construção do Estúdio 2, foi utilizada a técnica de parede dupla para um isolamento mais eficaz do som, tanto na parede que divide as salas como as paredes que delimitam a construção. No espaço formado pelas paredes duplas foram adicionadas lã de rocha, de modo a aumentar a perda na transmissão. No interior do estúdio, foram adicionadas placas absorventes em quase todos os espaços das paredes, a partir de uma altura a 0,75 m do solo. O piso é de azulejos e o forro é de PVC.

Na Figura 46 é mostrada a planta baixa e a disposição das salas, sendo possível observar a disposição das salas de gravação e mixagem.

Figura 46 – Planta baixa do Estúdio 2. As áreas hachuradas representam objetos no interior do estúdio (tapetes, espumas, móveis, etc).



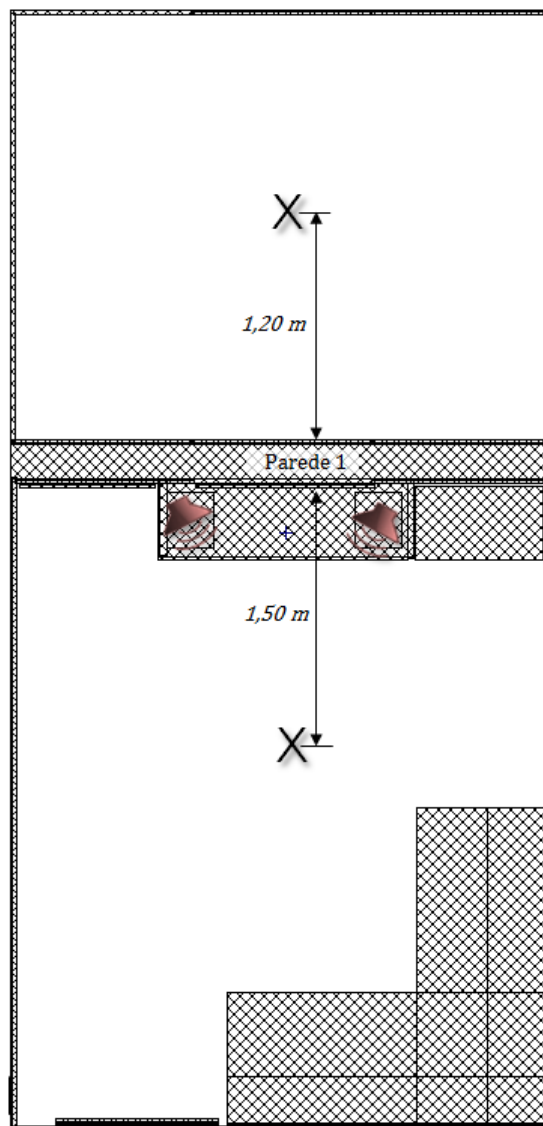
Fonte: do próprio autor.

Definição dos Pontos de Medições

De forma análoga ao procedimento no Estúdio 1, foram definidos pontos de interesse para as medições do tempo de reverberação e isolamento sonoro das salas. Para o RT60, foram escolhidos três pontos espalhados de forma aleatória em cada sala com o objetivo de buscar maior representatividade das medidas.

O sonômetro foi posicionado em dois pontos: um deles em frente aos monitores de áudio na Sala de Mixagem, e o outro na Sala de Gravação, com o sonômetro orientado de frente com a Sala de Mixagem. Na Sala de Mixagem o nível de intensidade sonora foi medido a uma distância de 1,5 m da parede, enquanto que na Sala B foram feitas medidas a 1,20 m da parede, buscando o centro da sala, como mostrado na Figura 47.

Figura 47 – Configuração da fonte sonora e pontos de medição para a medição da Perda na Transmissão das paredes.



Fonte: do próprio autor.

A fonte sonora utilizada é apresentada a seguir.

Fontes Sonoras

Durante as medições do presente trabalho foram realizadas, devido a um processo de reforma e melhorias no estúdio, os monitores de áudio do estúdio não puderam ser utilizados no experimento, sendo então, utilizada para a medição da Perda na Transmissão a caixa de som portátil *JBL Charge 3*.

Figura 48 – Fonte sonora *JBL Charge 3*, utilizada nas medições no Estúdio 2.



Fonte: do próprio pelo autor.

Com apenas 21 cm de comprimento, menos de 1 kg e falantes de 3,5" do modelo 3.5W508, oferece resposta em frequência com baixa variação de amplitude ao longo de seu espectro de frequências (65 Hz a 20 kHz). Foi posicionada no lugar dos monitores de áudio do estúdio para a realização do experimento, simulando a posição dos monitores originais para execução do sinal de ruído branco para avaliação dos níveis sonoros nas salas.

5 MODELAGEM NUMÉRICA E EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os modelos de simulação numérica e os resultados dos testes experimentais. São apresentadas ainda comparações entre os resultados dos modelos numérico e experimental, tendo como alvo a obtenção de um modelo numérico computacional representativo.

5.1 MODELO NUMÉRICO

Nesta seção são apresentados os modelos baseados nos estúdios objetos deste estudo.

A abordagem teórica é composta por dois modelos: um para a simulação do mapa acústico, utilizando o Método de Partículas, e outro para a simulação do RT60, através do Método Difuso (Estatístico).

Para o modelo de cálculo do RT60, as salas do estúdio foram recriadas de acordo com suas dimensões, e então foram adaptadas as áreas equivalentes dos respectivos elementos de tratamento acústico, com suas devidas propriedades de absorção sonora. O método de cálculo utilizado é o Método Difuso (Estatístico), que tem como base a equação de Eyring.

O modelo de obtenção do mapa acústico, que visa representar graficamente os níveis sonoros no estúdio, envolve todas as salas de cada estúdio, mostrando a dispersão do som que é emitido na fonte em ambas as salas de mixagem e é propagado em seus respectivos ambientes como um todo. O procedimento de cálculo utilizado é um método híbrido composto na junção do Método de Imagem e o Método de Partículas (análogo ao Método de Traçado de Raios).

5.1.1 Tempo de reverberação - RT60

O funcionamento do modelo de cálculo do RT60 se dá através da relação de área e volume da sala em questão, assim como as superfícies da sala, que possuem coeficiente de absorção distintas. Com este modelo, é possível especificar os coeficientes de absorção e as áreas dos materiais do ambiente, para a predição de melhorias nestas salas. Os detalhes relativos à modelagem para o cálculo do tempo do RT60 se encontram no Apêndice A.

Para a simulação do cálculo do tempo de reverberação de cada ambiente utilizando o *software CadnaR*, foram criadas novas salas individuais. Essas salas possuem geometria retangular, com as respectivas dimensões dos ambientes do Estúdio 1 e Estúdio 2.

Estúdio 1

Para a modelagem da Sala A uma aproximação foi feita em relação à sua geometria, sendo considerada como retangular, porém de mesma área de superfície da sala original. As dimensões das salas utilizadas no modelo são:

- **Sala de Mixagem:** 3,00 m x 3,00 m x 2,70 m
- **Sala A:** 4,87 m x 7,50 m x 2,70 m
- **Sala B:** 2,50 m x 3,00 m x 2,70 m

A absorção sonora de cada material utilizado foi a mesma para o cálculo das três salas, onde foram modificadas e adequadas as áreas de superfície dos elementos presentes. Os valores de RT60 simulados para as três salas se encontram na Tabela 2:

Tabela 2 – Valores de RT60 para as salas do Estúdio 1, simulados através do *software CadnaR*.

Medida	125 Hz (s)	250 Hz (s)	500 Hz (s)	1k Hz (s)	2k Hz (s)	4k Hz (s)
Sala Mix	0,50	0,32	0,21	0,19	0,17	0,14
Sala A	0,78	0,58	0,37	0,38	0,34	0,33
Sala B	0,53	0,35	0,22	0,18	0,16	0,15

Fonte: do próprio autor.

Estúdio 2

De forma análoga ao procedimento utilizado no Estúdio 1, foram reproduzidas no *software CadnaR* as duas salas do Estúdio 2, com as respectivas dimensões:

- **Sala de Mixagem:** 3,00 m x 3,60 m x 2,80 m
- **Sala de Gravação:** 3,00 m x 2,40 m x 2,80 m

Os coeficientes de absorção dos elementos são baseados nos materiais de construção, tratamento acústico e modificações feitas a estes elementos. Os valores de RT60 simulados para as salas do Estúdio 2 são apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 – Valores de RT60 para as salas do Estúdio 2, simulados através do *software CadnaR*.

Medida	125 Hz (s)	250 Hz (s)	500 Hz (s)	1k Hz (s)	2k Hz (s)	4k Hz (s)
Sala Mix	0,21	0,23	0,19	0,21	0,19	0,20
Sala Grav	0,28	0,25	0,22	0,22	0,26	0,27

Fonte: do próprio autor.

Em sequência na abordagem teórica, é discutido o processo de criação e geração dos mapa acústicos do Estúdio 1 e Estúdio 2.

5.1.2 Modelagem, geração do mapa acústico e perda na transmissão

Nesta subseção são apresentados os detalhes de construção do modelo teórico no *software CadnaR*, o processo de geração do mapa acústico da sala e os resultados obtidos na simulação.

Modelagem

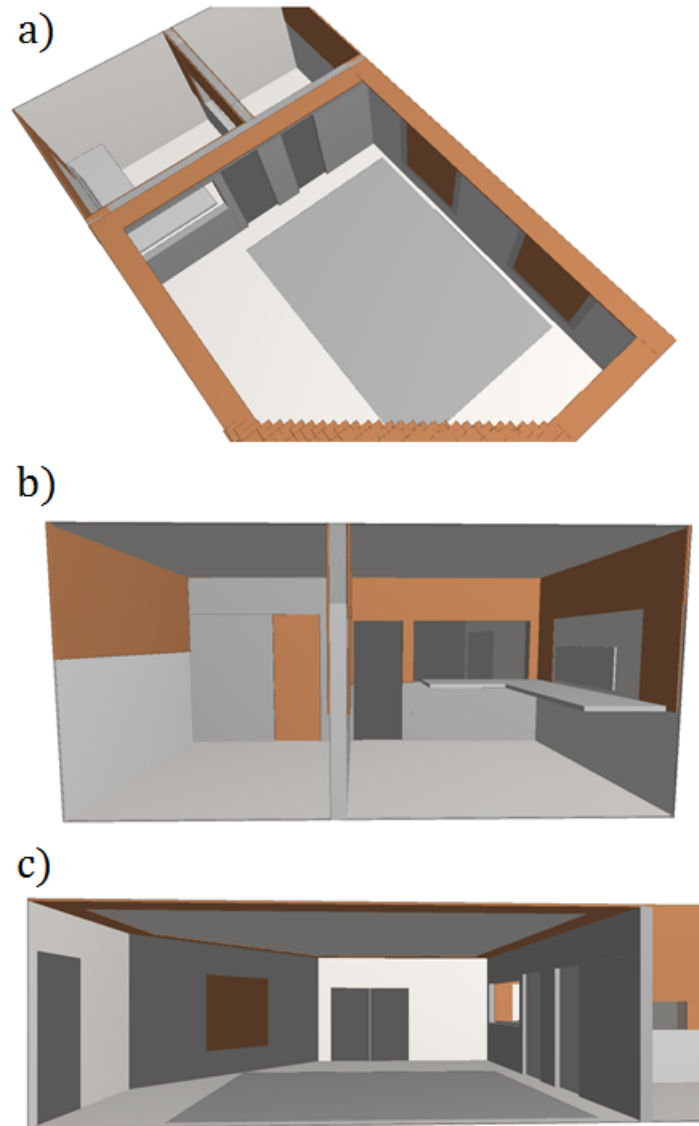
Na Figura 49, é apresentada uma vista geral do Estúdio 1, com vistas pelo alto e laterais. As cores representadas no modelo variam de acordo com a absorção dos materiais - no geral, variam do cinza claro ao cinza escuro. Quanto mais clara a cor cinza, mais reflexiva é a superfície, e quanto mais escura, mais absorvente ela é.

Nos casos em que as cores são diversas, as superfícies possuem coeficientes de absorção mais específicos para determinadas faixas de frequência, como é o caso das espumas absorventes, na qual a absorção para as baixas frequências não é eficaz como nas médias e agudas.

No modelo, a cor laranja representa as espumas absorventes, tanto no teto, nas paredes como nos painéis suspensos e laterais, espalhados pelas três salas do estúdio.

Na Figura 49.a) é possível ver a disposição geral do estúdio, com enfoque para a Sala A. Em 49.b), são exibidas as vistas laterais da Sala B e da Sala de Mixagem. Em 49.c), é mostrada a vista lateral da Sala A.

Figura 49 – Vista do Estúdio 1.



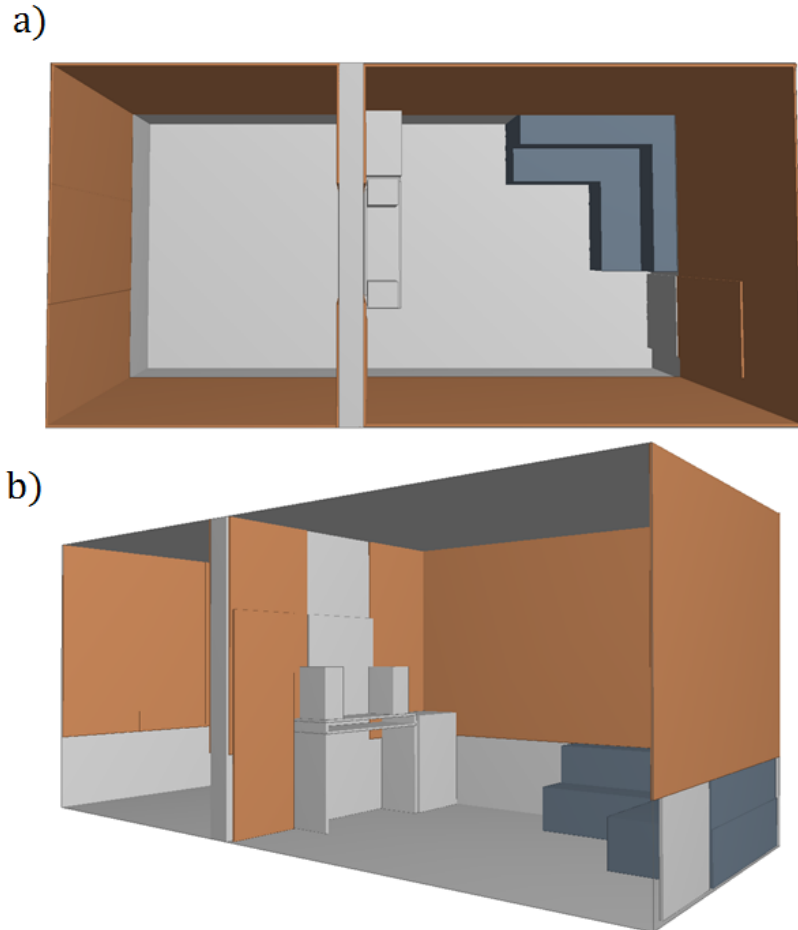
Fonte: do próprio autor.

O *software CadnaR* permite apenas a criação de salas retangulares, e como o estúdio possui uma geometria não convencional, foi necessário que se colocasse uma barreira em uma intersecção de paredes para simular a geometria do local. O volume formado pela barreira e as paredes foi desprezado e não possui função no modelo.

De forma análoga, foi construído o modelo do Estúdio 2, mostrado na Figura 50. Como o estúdio possui geometria retangular, não foram necessários ajustes adicionais

para a modelagem geométrica do mesmo.

Figura 50 – Vista do Estúdio 2.



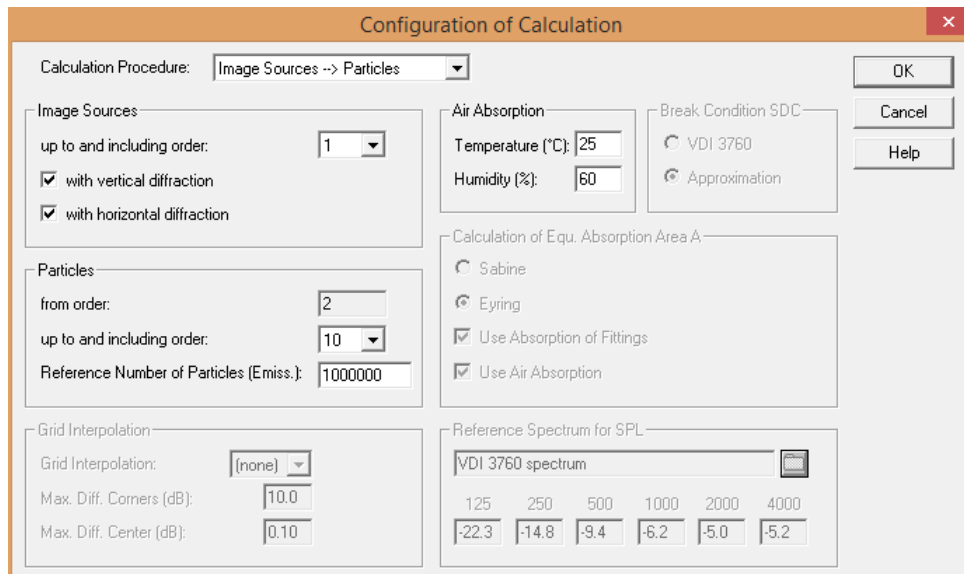
Fonte: do próprio autor.

As cores em laranja representam os painéis absorventes, cinza-chumbo representa o sofá e as demais superfícies são pouco absorvas. A Figura 50.a) mostra uma vista superior geral do estúdio, enquanto que a Figura 50.b) exibe uma vista lateral em perspectiva (os painéis da lateral mostrada foram retirados para melhor visualização).

Mapa acústico

Para a geração do mapa acústico, é necessária a definição de alguns parâmetros relacionados ao procedimento de cálculo utilizado na simulação, como a configuração de cálculo e a densidade da malha de pontos a serem calculados pelo procedimento escolhido. Na Figura 51 é possível observar as configurações adotadas para o cálculo e geração do mapas acústicos.

Figura 51 – Aba de configuração para o procedimento de cálculo e geração do mapas acústicos no *software CadnaR*.

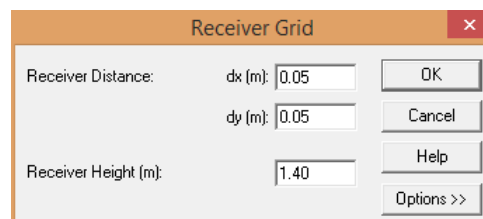


Fonte: do próprio autor.

Dentre as configurações estão as opções para cada etapa do procedimento híbrido, como, na parte do Método de Imagem, a escolha da ordem das fontes virtuais, assim como a opção de incluir difração vertical e horizontal no procedimento. Já na etapa do Método de Partículas, pode-se escolher a ordem de reflexão das partículas, assim como o número de referência de partículas emitidas. É possível, também, definir a temperatura e a umidade do ambiente em questão, para fins de cálculo da absorção do ar.

A Figura 52 mostra as opções escolhidas de espaçamento entre os pontos nos eixos X e Y e a altura adotada, similar à de uma pessoa sentada, além de ser uma posição em relação ao solo aproximada das medições com o sonômetro.

Figura 52 – Aba de propriedades da malha (*grid*) de cálculo para os receptores do *software CadnaR*.



Fonte: do próprio autor.

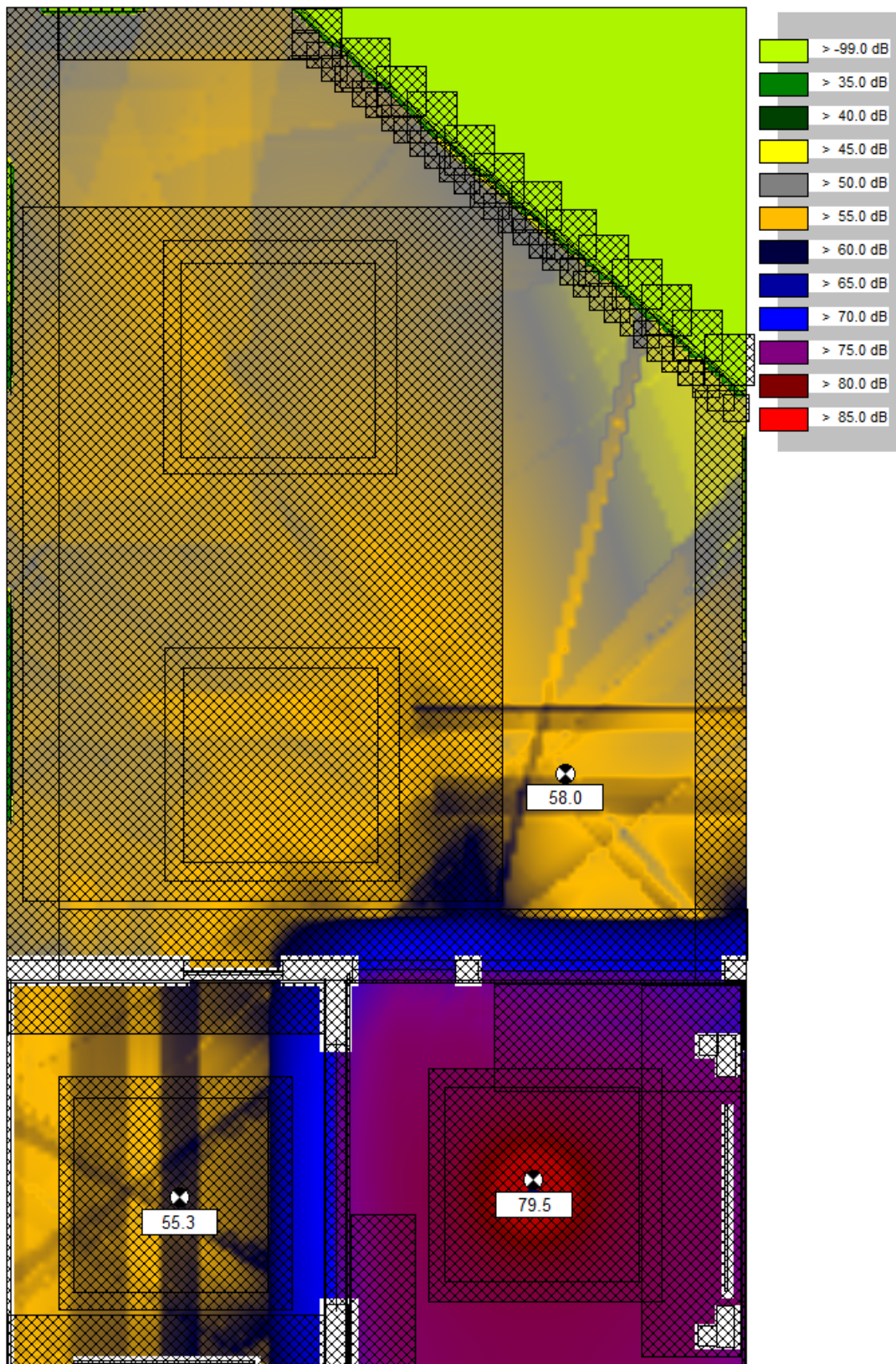
É necessário que sejam escolhidas malhas que sejam condizentes com o tamanho do

ambiente em questão para maior precisão dos resultados, pois de acordo com a densidade da malha, os valores podem variar em alguns decibéis. A escolha da malha deve ser feita levando-se em consideração a variação dos níveis de intensidade sonora num mesmo ponto quando calculados sob uma malha menor, e o tempo de processamento necessário gasto para tal operação. O custo computacional deve ser sempre relacionado à variação dos novos resultados obtidos por uma malha menor. Por fins práticos, caso a variação dos novos resultados seja irrelevante no contexto, é conveniente que se mantenha a malha de pontos anterior (menor custo computacional para as simulações). O teste de convergência mostrou que um espaçamento de 0,05 m é adequado para o objetivo do trabalho. Graficamente, os pontos são interpolados pelo *software* para melhor apresentação visual.

Para a geração do mapa acústico do Estúdio 1, foram posicionados três receptores para a aquisição de valores de intensidade sonora, posicionados nos mesmos pontos de aquisição definidos para a abordagem experimental: o Receptor 1, posicionado próximo à fonte sonora pontual na Sala de Mixagem, de modo a simular os níveis de intensidade sonora ali registrado experimentalmente, e os Receptores 2 e 3 nas Salas A e B, respectivamente.

Com as configurações de cálculo definidas e pontos de medição posicionados, foi gerado o mapeamento sonoro do ambiente, pelo método híbrido do Método de Imagens com o Método de Partículas, mostrado na Figura 53.

Figura 53 – Mapa sonoro do Estúdio 1.

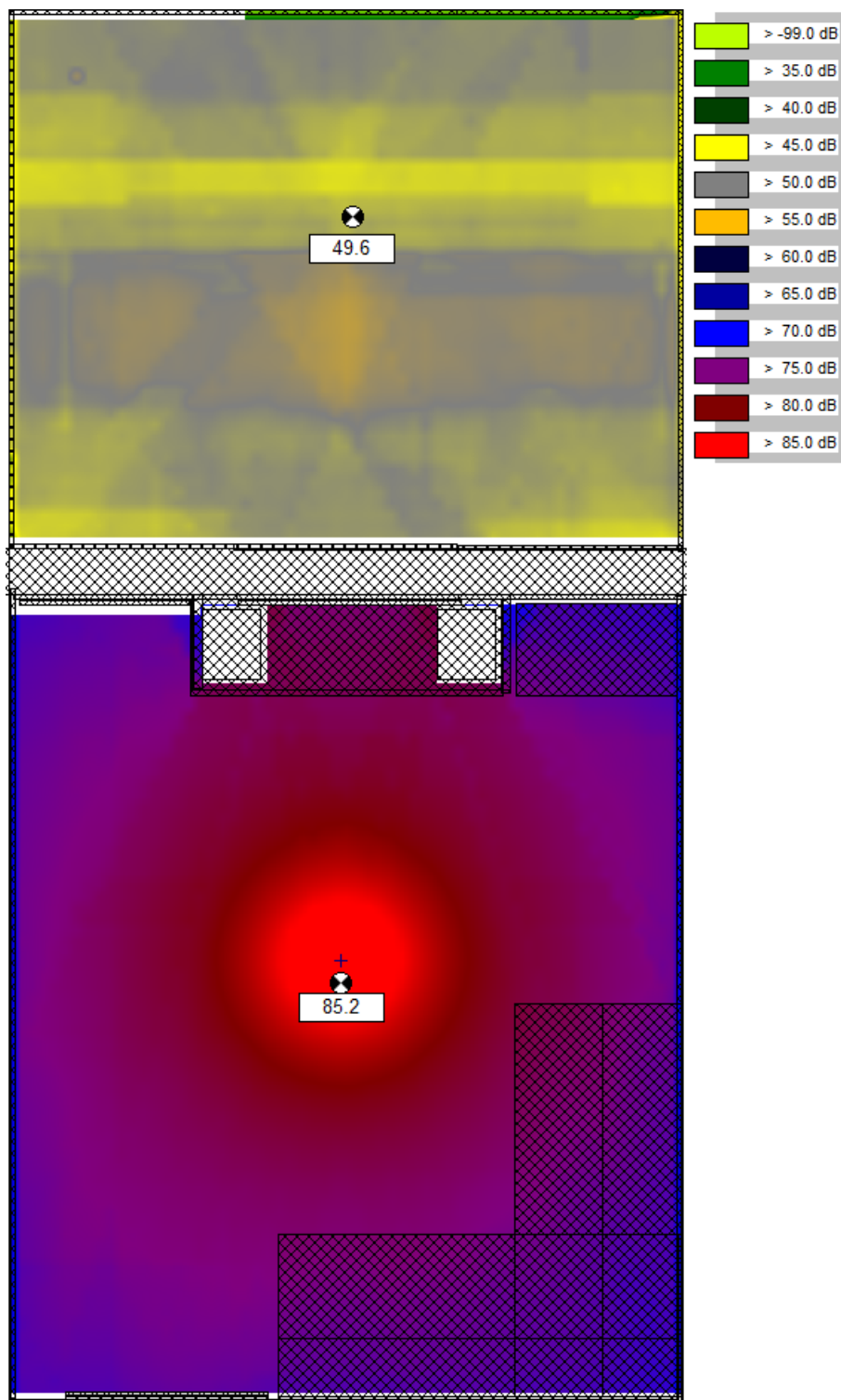


Fonte: do próprio autor.

A intensidade sonora é relacionada a uma paleta de cores pré-estabelecidas, como se observa no mapa acústico. Desta forma, pode-se interpretar de forma simples e intuitiva o nível de intensidade sonora em cada ponto de interesse no ambiente, com o auxílio da legenda no canto superior direito da figura. A área em tom de verde mais claro diz respeito à porção desprezada na construção do modelo da sala.

De forma análoga ao procedimento realizado no Estúdio 1, os receptores foram posicionados nos mesmos pontos de medições da abordagem experimental. Com o Receptor 1 posicionado próximo à fonte na Sala de Mixagem, visando a simulação do nível sonoro medido experimentalmente no mesmo ponto, e o Receptor 2 posicionado no centro da Sala de Gravação, foi gerado o mapa acústico do Estúdio 2, mostrado na Figura 54.

Figura 54 – Mapa sonoro do Estúdio 2.



Fonte: do próprio autor.

Na Figura 54 é possível notar a difusão do som nas salas do Estúdio 2, e como é a energia sonora é atenuada pela barreira (parede) entre as salas, com redução de cerca de 35 dB de uma sala para outra.

Perda na transmissão

Para o cálculo da Perda na Transmissão, é medida a diferença dos níveis de pressão sonora entre uma sala onde existe uma fonte sonora (emissora) e uma sala adjacente (receptora). Para cada banda de frequência, o nível de intensidade sonora da sala onde o som é recebido deve ser subtraído daquele da sala onde o som é emitido.

Com a geração do mapa acústico no *software CadnaR*, foram registrados níveis de intensidade sonora pelos receptores posicionados nos respectivos pontos de medições das salas avaliadas. As medidas para o Estúdio 1 se encontram na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de nível de pressão sonora (em dB) para a simulação de cálculo do isolamento das salas do Estúdio 1.

Sala	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	LAeq
Mix (Emissão)	81	88	77	74	68	65	81
A (Recepção)	57	62	49	44	35	29	57
B (Recepção)	58	62	50	44	44	35	56

Fonte: do próprio autor.

Os resultados são calculados puramente através do método híbrido, baseado nas reflexões da fonte sonora e na absorção e dimensão das superfícies dos ambientes, sem informação sobre perda na transmissão dos materiais das paredes.

Com a simulação do mapa acústico do Estúdio 2, foram adquiridos valores nos pontos de medições posicionados na Sala de Mixagem e Sala de Gravação. Os resultados se encontram na Tabela 5

Tabela 5 – Valores de nível de pressão sonora (em dB), para a simulação de cálculo do isolamento das salas do Estúdio 2.

Sala	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	LAeq
Mix (Emissão)	72	71	76	78	78	80	85
Gravação (Recepção)	48	44	45	42	38	35	49

Fonte: do próprio autor.

Com os dados dos níveis sonoros obtidos através da simulação, foi calculada a perda na transmissão na Parede 1 e Parede 2 do Estúdio 1. Estes valores são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Simulação de valores de perda na transmissão (dB) para a Parede 1 e Parede 2 do Estúdio 1 através do *software CadnaR*.

Parede	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	LAeq
1	24	26	28	30	33	36	24
2	23	26	27	30	24	30	25

Fonte: do próprio autor.

De forma análoga, foi calculada a perda na transmissão da Parede 1 do Estúdio 2. O resultado é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Simulação de valores de perda na transmissão (dB) para a Parede 1 do Estúdio 2 através do *software CadnaR*.

Parede	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	LAeq
1	24	27	31	36	40	45	36

Fonte: do próprio autor.

5.2 MODELO EXPERIMENTAL

Os testes experimentais consistiram na medição e avaliação do Tempo de Reverberação nos ambientes e da Perda na Transmissão nas paredes das salas dos estúdios analisados. Os resultados são discutidos nas subseções seguintes, para a análise de ambos os estúdios.

5.2.1 Tempo de reverberação - RT60

Seguindo os procedimentos de medição previamente estabelecidos, foram realizadas medições de Tempo de Reverberação nos ambientes.

Estúdio 1

Salas geralmente possuem heterogeneidades geométricas como a forma, tamanho, disposição de objetos em seus interiores e a absorção sonora das superfícies nas quais o som se choca nas primeiras reflexões. Essa falta de uniformidade no local é suficiente para alterar a resposta do Tempo de Reverberação no ambiente, dependendo onde o som é gerado e registrado.

Na Sala A foram feitas mais medidas em relação às demais salas, devido ao seu maior tamanho e heterogeneidade, variando a distância, a posição da fonte sonora (claquete) e a posição do sonômetro. As medidas de tempo de reverberação para a Sala A se encontram na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores de RT60 para a Sala A, com excitação feita pela claquete.

Medida	125 Hz (s)	250 Hz (s)	500 Hz (s)	1k Hz (s)	2k Hz (s)	4k Hz (s)
1	0,25	0,62	0,39	0,32	0,34	0,33
2	0,89	0,52	0,31	0,36	0,36	0,33
3	1,01	0,76	0,34	0,40	0,34	0,33
4	1,00	0,73	0,33	0,34	0,33	0,34
5	0,95	0,64	0,35	0,31	0,34	0,36
6	0,57	0,40	0,44	0,34	0,34	0,33
Méd	0,77	0,60	0,35	0,34	0,33	0,33

Fonte: do próprio autor.

É possível notar relativa dispersão dos resultados de RT60 para a Sala A devido às suas dimensões e heterogeneidade, como esperado.

Para avaliar se a claquete excita sons de baixa frequência, foi registrado o estouro de um balão de festas, que produz sons mais graves. O resultado foi comparado com o valor médio calculado com as medidas obtidas com a claquete na Tabela 9.

Tabela 9 – Valor de RT60 para a Sala A feita com o estouro de um balão de festa comparado à média dos valores obtidos com o uso da claquete.

Medida	125 Hz (s)	250 Hz (s)	500 Hz (s)	1k Hz (s)	2k Hz (s)	4k Hz (s)
Balão	0,78	0,53	0,33	0,34	0,31	0,31
Méd Claq	0,77	0,60	0,35	0,38	0,33	0,33

Fonte: do próprio autor.

Assim é possível observar que os valores se diferem pouco entre si, com produção satisfatória de sons de baixa frequência gerados com a claquete.

Para as medições de RT60 na Sala de Mixagem, o sonômetro foi posicionado no ponto central da sala, como previamente estabelecido, variando apenas a posição da claquete pela sala. Os valores adquiridos se encontram na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores de RT60 para a sala de mixagem, com excitação feita pela claquete.

Medida	125 Hz (s)	250 Hz (s)	500 Hz (s)	1k Hz (s)	2k Hz (s)	4k Hz (s)
1	0,51	0,28	0,18	0,21	0,18	0,18
2	0,48	0,28	0,17	0,17	0,19	0,17
3	0,38	0,31	0,20	0,23	0,18	0,17
Méd	0,46	0,29	0,18	0,20	0,18	0,17

Fonte: do próprio autor.

Analisando os dados da Tabela 10, nota-se uma pequena variação nas medidas, porém menor que da Sala A, devido ao menor tamanho e maior uniformidade da Sala de Mixagem.

Por fim, foram feitas medidas de RT60 para a Sala B, sob as mesmas configurações de aquisição. Os valores medidos estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores de RT60 para a Sala B, com excitação feita pela claquete.

Medida	125 Hz (s)	250 Hz (s)	500 Hz (s)	1k Hz (s)	2k Hz (s)	4k Hz (s)
1	0,56	0,37	0,24	0,17	0,14	0,13
2	0,61	0,35	0,23	0,15	0,14	0,14
3	0,51	0,39	0,19	0,16	0,14	0,14
Méd	0,56	0,37	0,22	0,16	0,14	0,14

Fonte: do próprio autor.

Na Tabela 11 é possível observar uma variação ainda menor nos valores medidos na Sala B, devido às suas reduzidas dimensões e maior amortecimento da sala.

Estúdio 2

De forma análoga aos procedimentos de medição utilizados no Estúdio 1, foram realizadas as medições de RT60 para a Sala de Mixagem e a Sala de Gravação do Estúdio 2. Em cada sala, foram registradas medidas em três diferentes pontos de cada sala, com o disparo da claquete. Os resultados para a Sala de Mixagem se encontra Tabela 12:

Tabela 12 – Valores de RT60 para a Sala de Gravação, com excitação feita pela claquete.

Medida	125 Hz (s)	250 Hz (s)	500 Hz (s)	1k Hz (s)	2k Hz (s)	4k Hz (s)
1	0,26	0,24	0,24	0,25	0,29	0,29
2	0,32	0,25	0,23	0,26	0,28	0,29
3	0,28	0,22	0,21	0,22	0,25	0,23
Méd	0,28	0,23	0,22	0,24	0,27	0,27

Fonte: do próprio autor.

É possível notar baixa dispersão entre os valores, natural devido à variação da posição da claquete no ambiente. As medidas para a Sala de Mixagem se encontram na Tabela 13:

Tabela 13 – Valores de RT60 para a Sala de Mixagem, com excitação feita pela claquete.

Medida	125 Hz (s)	250 Hz (s)	500 Hz (s)	1k Hz (s)	2k Hz (s)	4k Hz (s)
1	0,19	0,28	0,22	0,25	0,24	0,19
2	0,19	0,26	0,22	0,24	0,18	0,19
3	0,22	0,26	0,25	0,25	0,26	0,23
Méd	0,20	0,26	0,23	0,24	0,22	0,20

Fonte: do próprio autor.

Nota-se que na Sala de Mixagem o RT60 é ainda menor do que a da Sala de Gravação, devido ao maior amortecimento sonoro da mesma.

5.2.2 Perda na transmissão

Buscando a medição da Perda na Transmissão das paredes que separam as sala do estúdio, foi reproduzido durante 1 minuto um som de ruído branco nos falantes da sala de mixagem, para cada medida. Primeiro a medição ocorreu dentro da Sala de Mixagem, em seguida na Sala A, e por fim, na sala B.

Seguindo os procedimentos previamente estabelecidos, essas medições foram feitas nos pontos pré-definidos, entre as paredes que dividem a sala de mixagem da Sala A e da Sala B (Tabela 14).

Tabela 14 – Valores de nível de pressão sonora (em dB) para a medição do isolamento das salas.

Sala	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	LAeq
Mix (Emissão)	81	87	77	74	68	65	81
A (Recepção)	61	55	47	40	38	34	55
B (Recepção)	56	54	55	46	44	33	51

Fonte: do próprio autor.

De forma análoga, foram obtidos os níveis de intensidade sonora para o Estúdio 2, dispostos na Tabela 15.

Tabela 15 – Valores de nível de pressão sonora (em dB) para a medição do isolamento das salas do Estúdio 2.

Medida	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	LAeq
Mix (Emissão)	72	71	76	78	78	80	85
Gravação (Recepção)	53	51	47	43	40	38	48

Fonte: do próprio autor.

Observando os dados da Tabela 14 e Tabela 15, é possível notar significativa diferença de valores de nível de intensidade sonora entre as salas onde o som foi reproduzido e as salas onde o som foi recebido.

Com estes valores de intensidade sonora, é possível calcular a Perda na Transmissão ao se subtrair os valores medidos nas salas adjacentes à sala de mixagem, que é onde se encontra a fonte sonora. Os valores de Perda na Transmissão para a Parede 1 foram obtidos pela diferença entre o nível de intensidade sonora da Sala de Mixagem e a Sala A, enquanto que os valores de PT para a Parede 2 foram calculados pela diferença de nível de

intensidade sonora da Sala de Mixagem e a Sala B. Os valores de Perda na Transmissão para a Parede 1 e Parede 2 do Estúdio 1 se encontram na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores perda de transmissão para a parede 1 e parede 2.

Parede	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	LAeq
1	20	32	30	34	30	31	30
2	25	33	22	28	24	32	36

Fonte: do próprio autor.

Nota-se valores de Perda na Transmissão maiores para as frequências mais altas, enquanto nas frequências mais baixas esses valores são menores. De forma análoga, foi calculada a Perda na Transmissão da Parede 1 do Estúdio 2, mostrado na Tabela 17.

Tabela 17 – Valores perda de transmissão para a Parede 1 do Estúdio 2.

Parede	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	LAeq
1	19	20	29	35	38	42	37

Fonte: do próprio autor.

Como nas paredes do Estúdio 1, a atenuação da intensidade sonora é maior nas frequências mais altas, e menos eficaz nas mais graves.

5.3 COMPARAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS

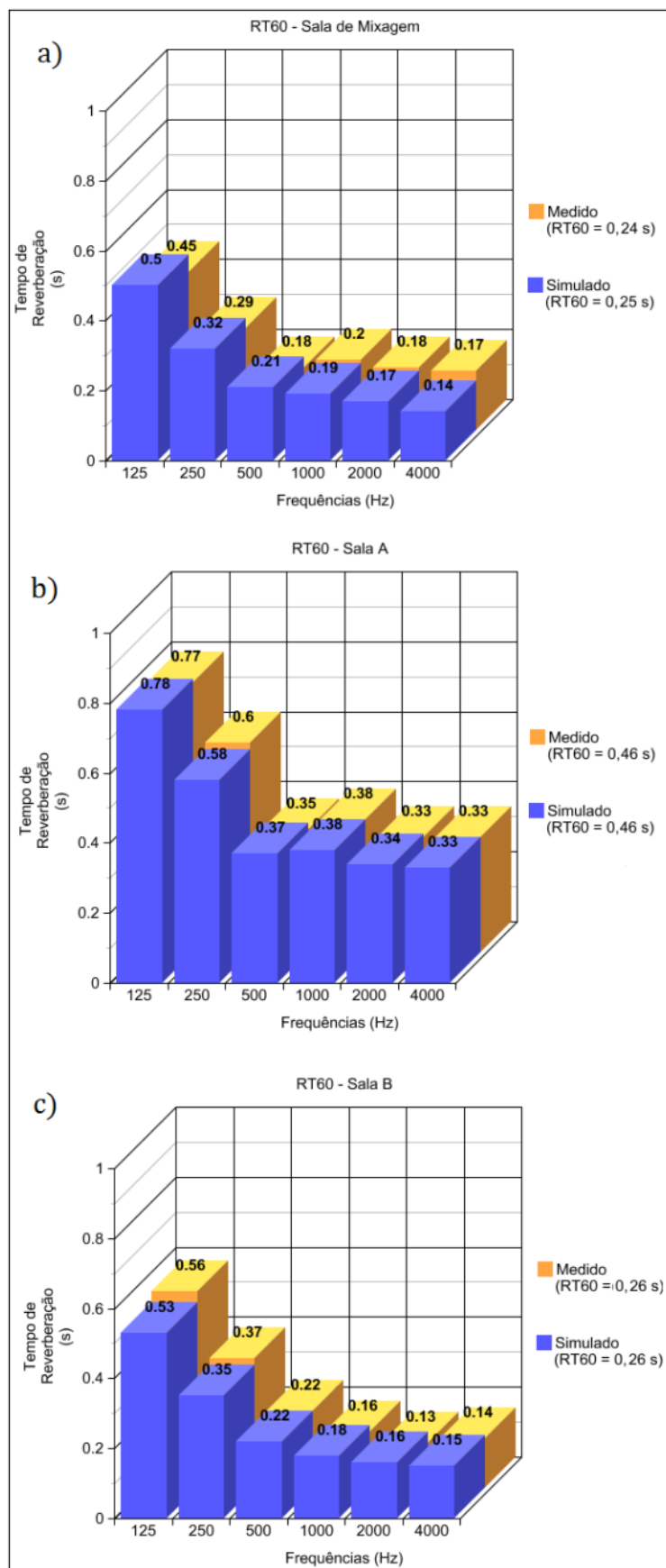
Nesta seção, são comparados os modelos teóricos e experimentais para o cálculo do Tempo de Reverberação e da Perda na Transmissão das salas e paredes do ambiente, respectivamente, com o objetivo de analisar a representatividade dos modelos do presente trabalho.

5.3.1 Tempo de reverberação - RT60

Estúdio 1

Foram calculados os tempos de reverberação para os três ambientes, e então estes valores foram comparados com aqueles medidos no local. Os resultados para as três salas se encontram na Figura 55.

Figura 55 – Comparação entre resultados simulados e experimentais de RT60 para as salas avaliadas.



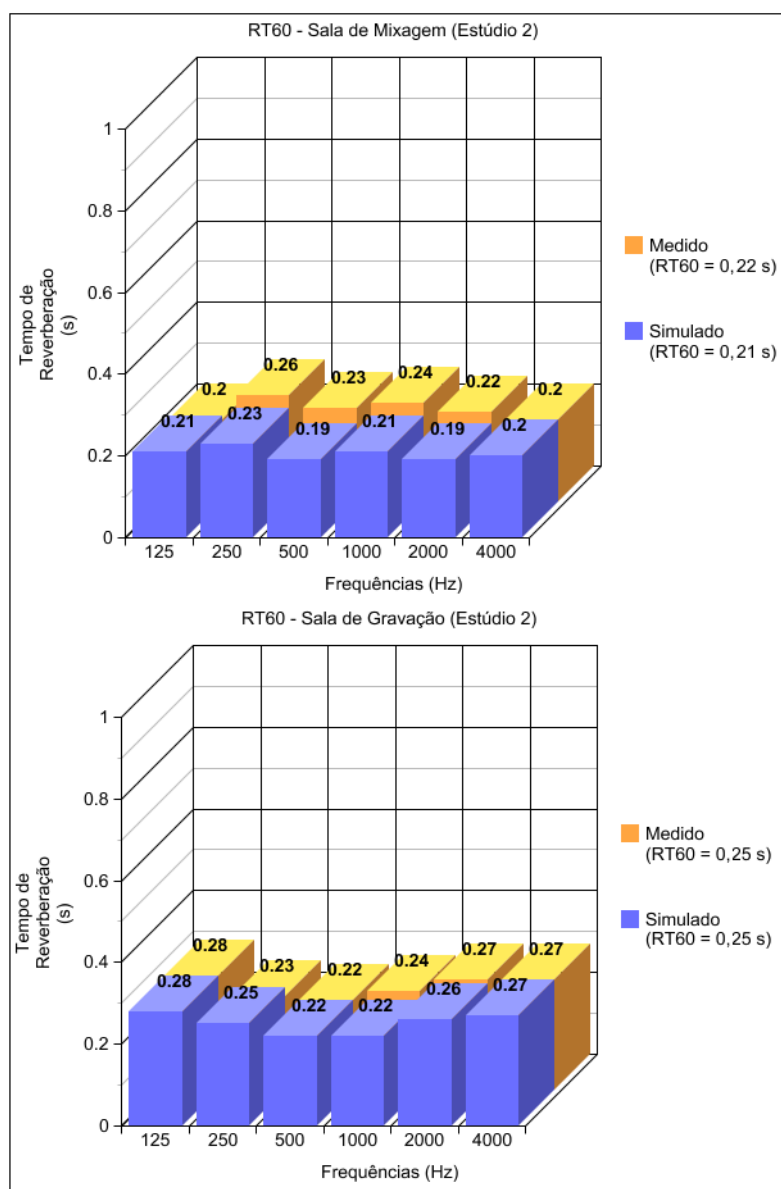
Fonte: do próprio autor.

Pode-se notar a semelhança entre os valores medidos e os valores simulados por banda de frequência, e conseqüentemente a semelhança nos valores globais de RT60.

Estúdio 2

De forma análoga à comparação feita no Estúdio 1, foram criados gráficos com os valores medidos e simulados de Tempo de Reverberação para os dois ambientes do Estúdio 2, como mostra a Figura 56.

Figura 56 – Comparação entre resultados simulados e experimentais de RT60 para as salas avaliadas.



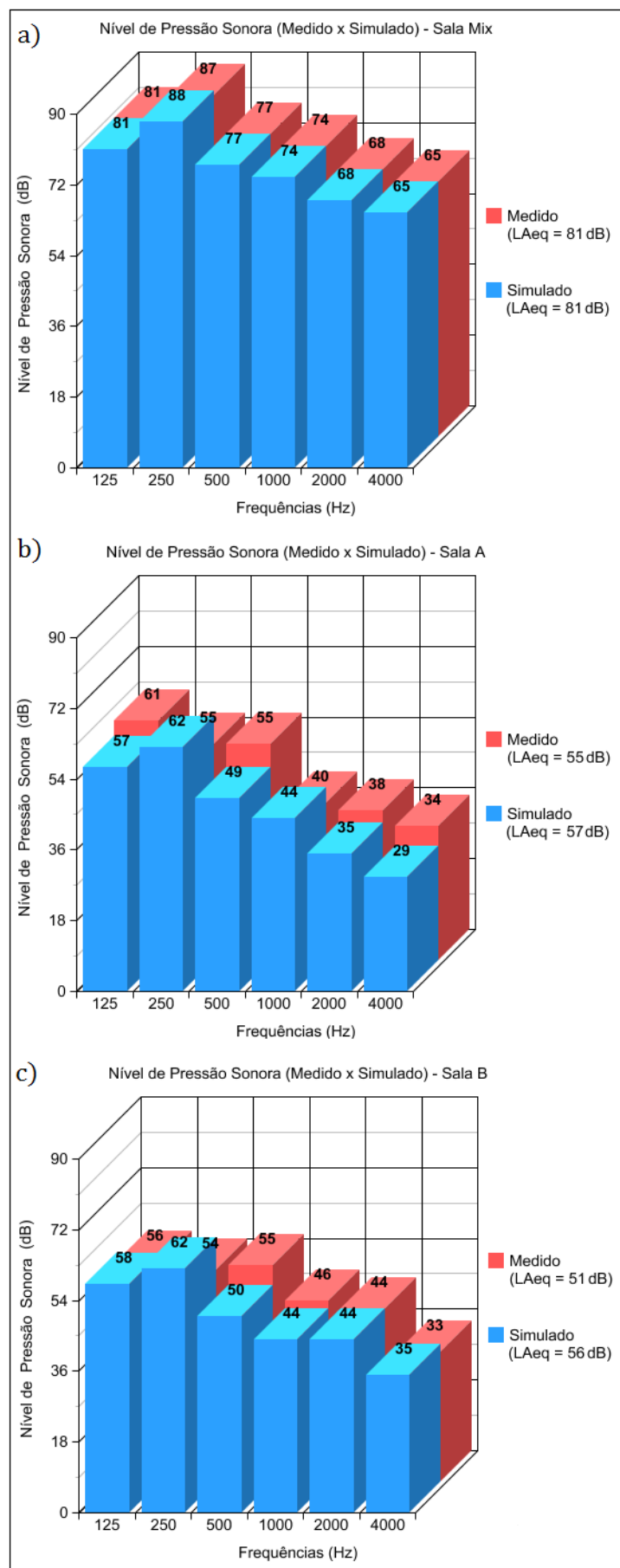
Fonte: do próprio autor.

5.3.2 Isolamento entre salas

Estúdio 1

Para fins de comparação dos níveis de pressão sonora teóricos e experimentais nas salas do Estúdio 1, foi gerada a Figura 57. A fonte sonora virtual simula a fonte sonora experimental, tendo, por essa razão, valores muito próximos àqueles medidos experimentalmente na Sala de Mixagem.

Figura 57 – Comparação entre resultados simulados e experimentais de pressão sonora para as salas avaliadas no Estúdio 1.



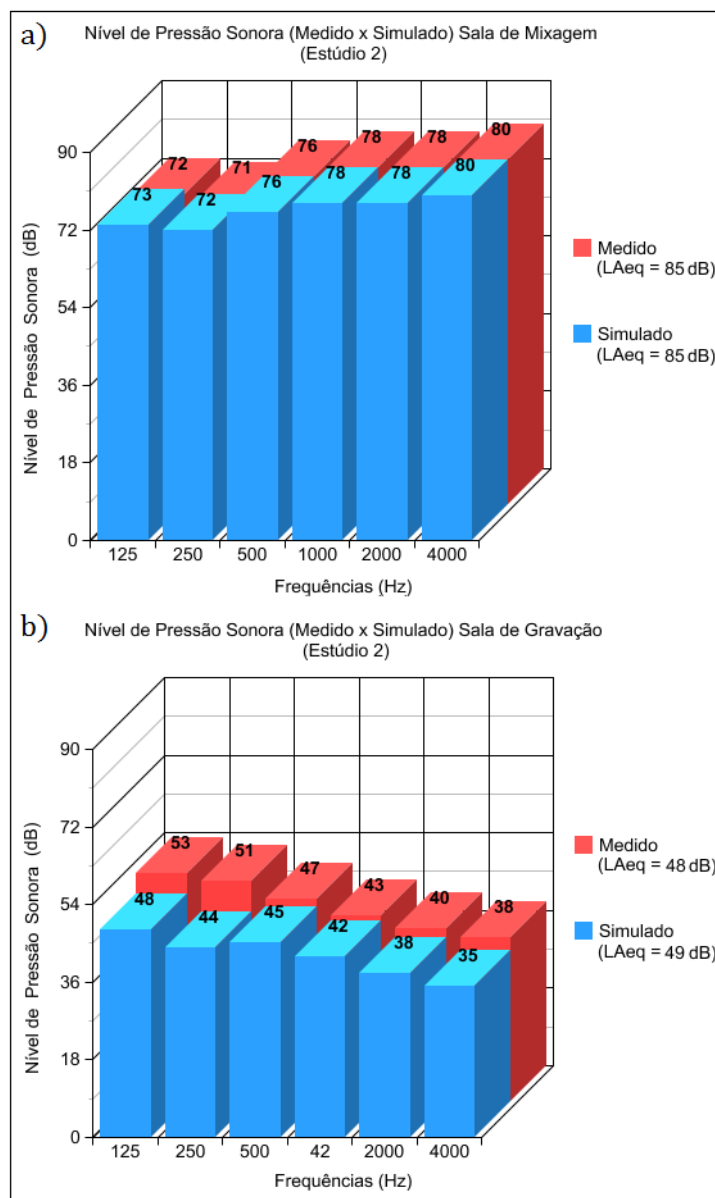
Fonte: do próprio autor.

Nota-se que, com exceção da Sala de Mixagem, os valores possuem certo desvio, apesar de apresentarem comportamento geral semelhante.

Estúdio 2

Da mesma forma como foi realizado no Estúdio 1, foram comparados os níveis de pressão sonora e teóricos nos ambientes do Estúdio 2. A Figura 58 mostra esses resultados.

Figura 58 – Comparação entre resultados simulados e experimentais de pressão sonora para as salas avaliadas no Estúdio 2.



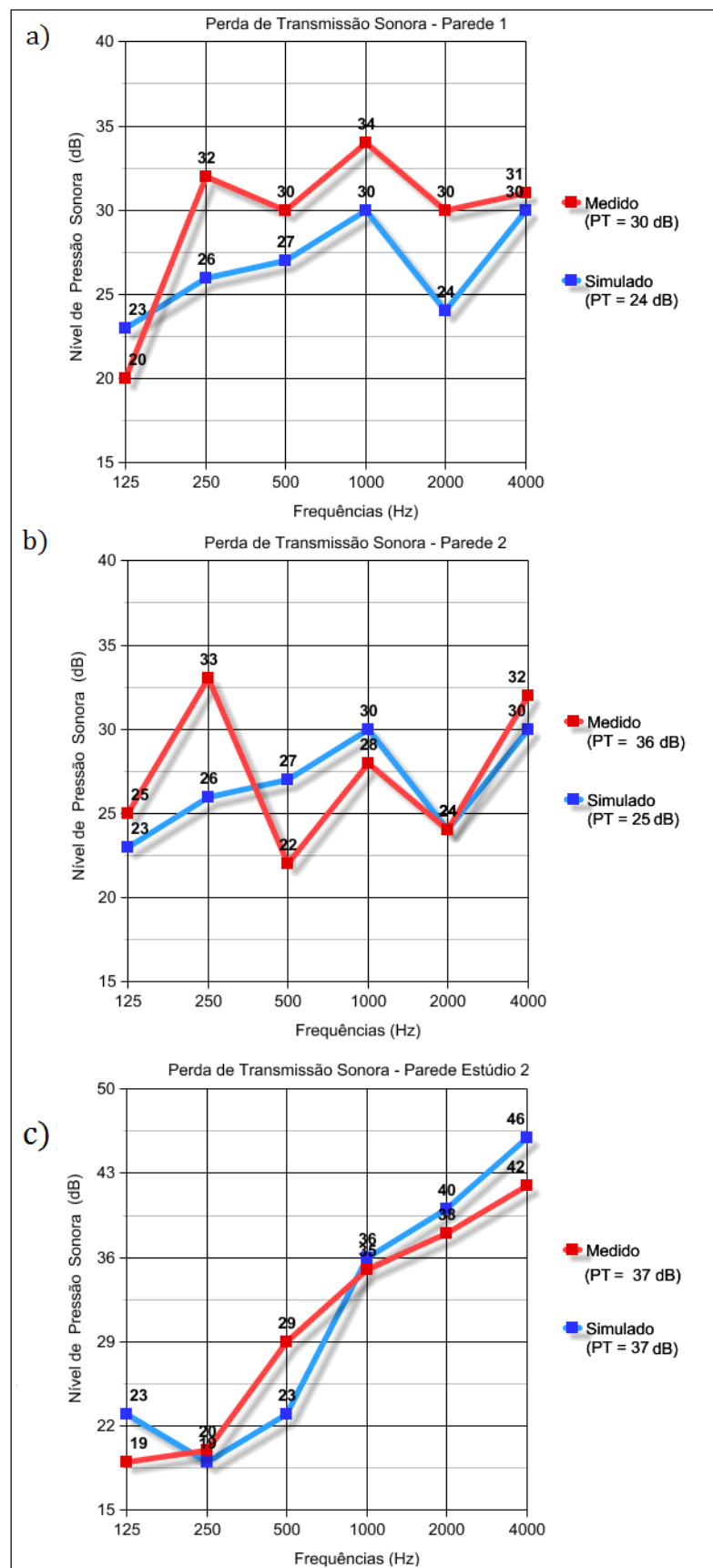
Fonte: próprio autor.

Como no Estúdio 1, a Sala de Mixagem, onde se encontra a fonte sonora é onde os valores teóricos e experimentais são mais próximos, devido ao procedimento adotado de simulação da fonte sonora experimental no modelo teórico.

Perda na transmissão

A partir da comparação dos dados de nível de pressão sonora nos ambientes virtuais e reais, foi calculada a Perda na Transmissão das paredes que separam os recintos, mostradas na Figura 59.

Figura 59 – Comparação entre resultados simulados e experimentais de Perda de Transmissão nas paredes das salas avaliadas.



Fonte: do próprio autor.

Embora apresentando certo desvio, é possível notar um comportamento geral semelhante nas bandas de frequência de 500 Hz a 4000 Hz. Nas frequências mais baixas (125 Hz e 250 Hz), este comportamento não é repetido, comprometendo a representatividade do modelo nestas bandas de frequência.

A propagação do som representada no mapa acústico dos estúdios apresentou comportamento esperado, porém com alguma pequena margem de erros, que podem ter decorrido de fenômenos acústicos que não fazem parte do modelo, como por exemplo a ressonância modal, que, devido à reduzida geometria das salas (Sala de Mixagem e Sala B) e suas dimensões muito próximas umas das outras, pode causar zonas de coincidência dos modos, ocasionando em um ganho de nível de pressão sonora em determinadas faixas de frequência.

O Método de Partículas (análogo ao Método do Traçado de Raios), funciona bem para as frequências médias e altas devido a aproximação do comprimento de ondas sonoras como sendo partículas. Porém, conforme o comprimento de onda aumenta, a aproximação se torna cada vez menos precisa, fazendo com que os resultados para as frequências mais baixas apresentem valores com maiores desvios em relação às demais frequências.

Os modelos de cálculo de RT60 do Estúdio 1 e Estúdio 2 se mostraram bastante representativos, com os valores simulados muito próximos ao que se esperava, no cenário atual das salas. A criação de cinco salas distintas usando basicamente os mesmos parâmetros de absorção sonora dos materiais, em suas respectivas condições, corrobora para a confiabilidade, representatividade e repetibilidade do modelo, podendo ser aplicado em outros ambientes de acordo com as características destes, com alguns pequenos ajustes relativos às características locais. Com relação aos modelos de perda na transmissão, estes possuem valor qualitativo porém não quantitativo, pois não apresentou a precisão esperada devido às dificuldades já comentadas.

5.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS SALAS COM BASE EM RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS

Alguns parâmetros de avaliação acústica foram analisados com o objetivo de verificação de conformidade com recomendações técnicas da literatura.

5.4.1 Estúdio 1

Sala de mixagem

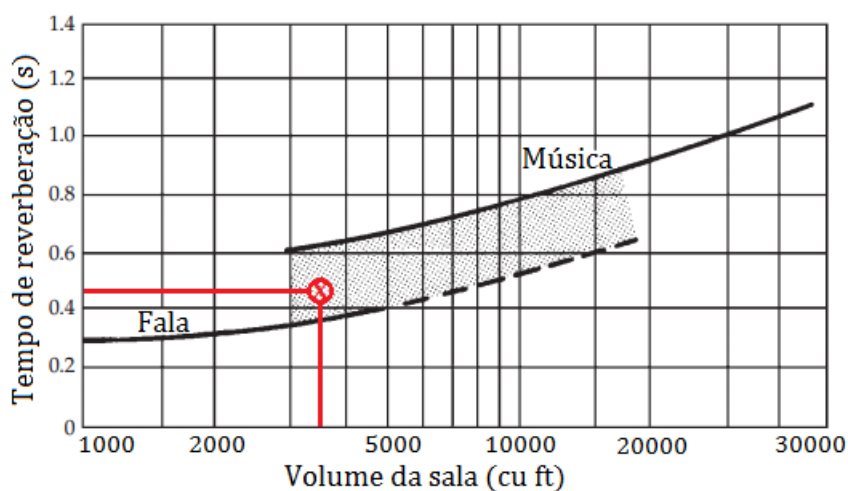
A recomendação da EBU Tech. 3276 para salas de controle, audição crítica e mixagem é de que o tempo de reverberação médio esteja entre 0,20 s e 0,40 s. Analisando o tempo de reverberação médio da sala de mixagem (0,24 s), nota-se que este está dentro dos parâmetros recomendados.

No entanto, existe uma recomendação sobre a variação do RT60 ao longo do espectro de frequências, onde mudanças bruscas de acordo com a frequência devem ser evitadas. Entre 200 Hz e 4000 Hz o RT60 por frequência não deve variar em 0,05 s em relação ao RT60 médio, sendo este critério não atendido pela sala em questão.

Sala A

Segundo Everest & Pohlmann (2009), não existe um tempo ótimo de reverberação, devido à muitas variáveis, como o tipo de instrumento gravado, o tipo de voz gravada, se é voz feminina ou masculina, e até mesmo a língua tem variações devido à relação de consoantes e vocais. No entanto, existe uma zona de compromisso que se deve alcançar para que se tenha gravações de qualidade, seja para gravação de voz ou para música, mostrada na Figura 60.

Figura 60 – Ponto de intersecção entre RT60 e volume da Sala A.



Fonte: Everest e Pohlmann (2009)(adaptado).

O ponto vermelho diz respeito à intersecção dos valores de tempo de reverberação da

Sala A (0,46 s) e o volume da mesma ($98,65\text{m}^3$, que corresponde a aproximadamente 3500 cu ft). Portanto, em termos de tempo de reverberação médio, a sala atende às condições tanto para gravação de voz como para gravação de música.

Sala B

Segundo as recomendações de Everest & Pohlmann (2009), as anomalias na resposta em frequência dos estúdios que possuem volumes menores que 1500 cu ft ($42,43\text{ m}^3$) são muitas vezes fortes o bastante para que estas salas se tornem impraticáveis para gravações. Portanto, a Sala B, de volume $20,25\text{ m}^3$ (aproximadamente 715 cu ft) não atende às dimensões mínimas para gravação de voz e música.

5.4.2 Estúdio 2

Como no Estúdio 1, as mesmas avaliações foram feitas para as salas do Estúdio 2 com base em recomendações técnicas. O desempenho das salas é comentado a seguir.

Sala de mixagem

A Sala de Mixagem do Estúdio 2, com RT60 de 0,22 s, se encontra dentro dos padrões recomendados pela EBU Tech. 3276, que estipula um valor entre 0,20 s e 0,40 s. A variação do Tempo de Reverberação por banda de frequência também é satisfeita, variando menos de 0,05 s ao longo do espectro.

Sala de gravação

A Sala de Gravação do Estúdio 2, com um volume de 712 cu ft ($20,16\text{ m}^3$), possui dimensões abaixo dos padrões recomendados por Everest & Pohlmann (2009), embora com resposta mais equilibrada (desvio de até 0,02 s em relação ao RT60 médio) do que a verificada na Sala B do Estúdio 1 (desvio de até 0,30 s em relação ao RT60 médio), de dimensões similares.

6 UTILIZAÇÃO DOS MODELOS DE PREDIÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE TRATAMENTO ACÚSTICO NOS AMBIENTES

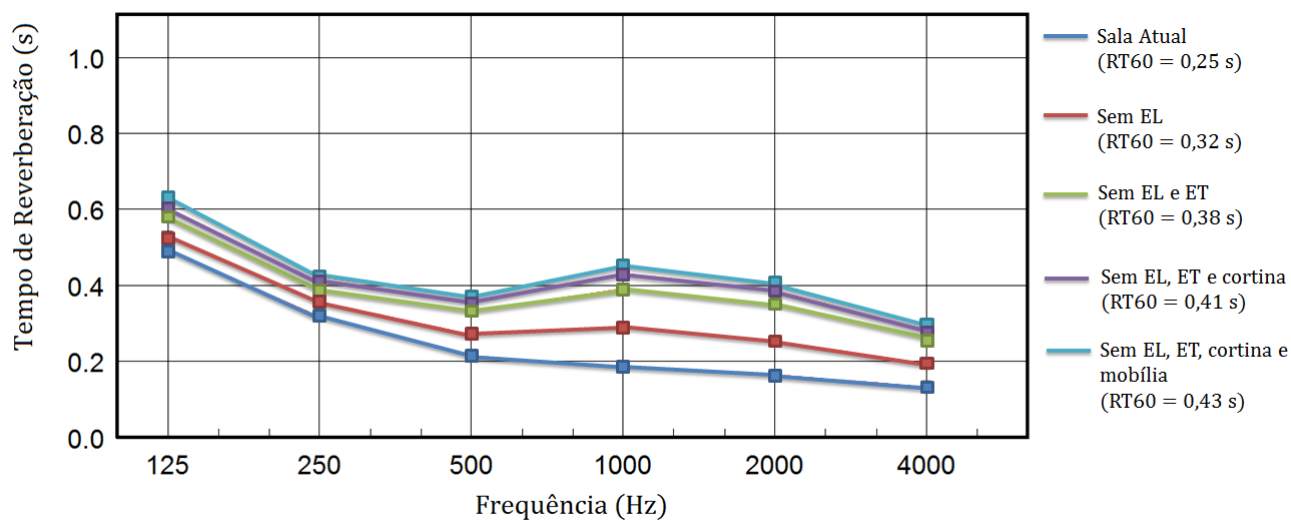
Com a criação e a validação dos modelos numéricos de simulação para o cálculo do RT60, se tornou possível a elaboração de novas situações e configurações de tratamento acústico nas salas do estúdio, sendo possível, assim, reproduzir condições acústicas dos ambientes, bem como prever o comportamento sonoro nas futuras modificações das salas, a fim de se melhorar a resposta nos ambientes. Devido ao seu maior desequilíbrio na resposta em frequência de suas salas, o Estúdio 1 foi escolhido como objeto de estudo sobre a ação dos elementos de tratamento acústico, bem como objeto de propostas de melhoria acústica de seus ambientes.

6.1 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS ACÚSTICOS NO RT60

Para a predição do RT60, foram elaboradas diferentes situações de tratamento acústico. Em um primeiro momento, foram simulados os efeitos da retirada dos painéis de espumas das paredes (Espumas Laterais - EL), logo em sequência sendo retiradas toda a espuma do teto (Espumas Teto - ET). Em seguida, foram simuladas a retirada de tapetes e cortinas, quando estes presentes nas salas.

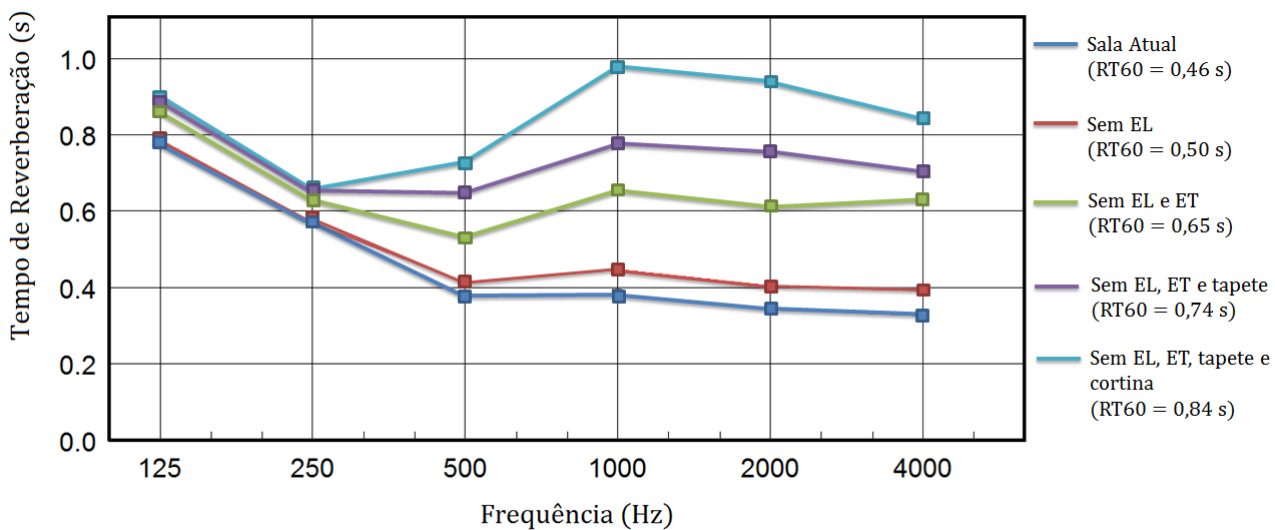
É possível observar a contribuição que cada elemento de tratamento acústico traz ao estado atual das salas, e qual seria o Tempo de Reverberação em cada um dos cenários caso esses elementos não estivessem instalados. As Figuras 61, 62 e 63 mostram valores de Tempo de Reverberação para a simulação da retirada gradual dos elementos de tratamento acústico das salas do Estúdio 1.

Figura 61 – Simulações de diferentes configurações de tratamento acústico para a Sala de Mixagem.



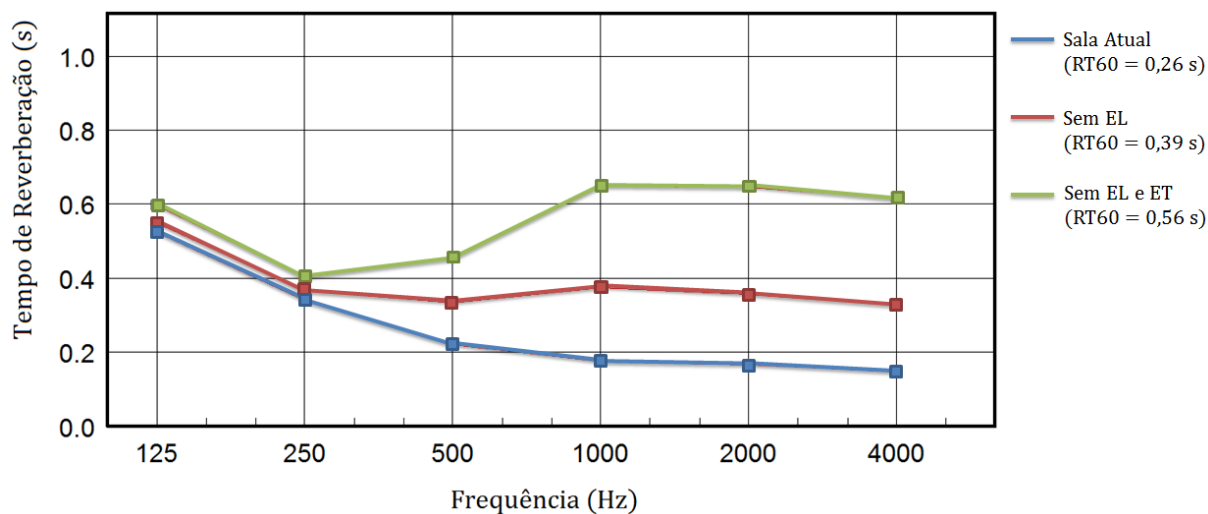
Fonte: do próprio autor.

Figura 62 – Simulações de diferentes configurações de tratamento acústico para a Sala A.



Fonte: do próprio autor.

Figura 63 – Simulações de diferentes configurações de tratamento acústico para a Sala B.



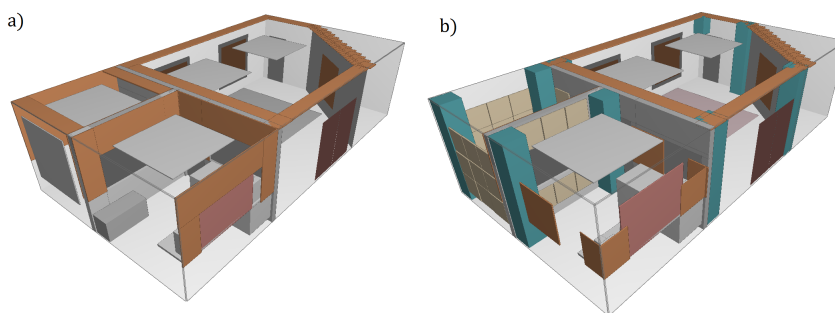
Fonte: do próprio autor.

Com informações da influência da contribuição de cada elemento de tratamento acústico no melhoramento dos ambientes, foi possível prever algumas situações em que as salas teriam respostas em frequência mais equilibradas.

6.2 ESTUDO DE PREDIÇÃO DE TRATAMENTOS ACÚSTICOS NO RT60

Pensando em melhorar a qualidade acústica dos ambientes já existentes, algumas predições foram feitas com base na literatura técnica e acadêmica. A Figura 64 mostra o modelo após as alterações sugeridas.

Figura 64 – Modelo computacional da a) Sala Atual e b) Sala Modificada

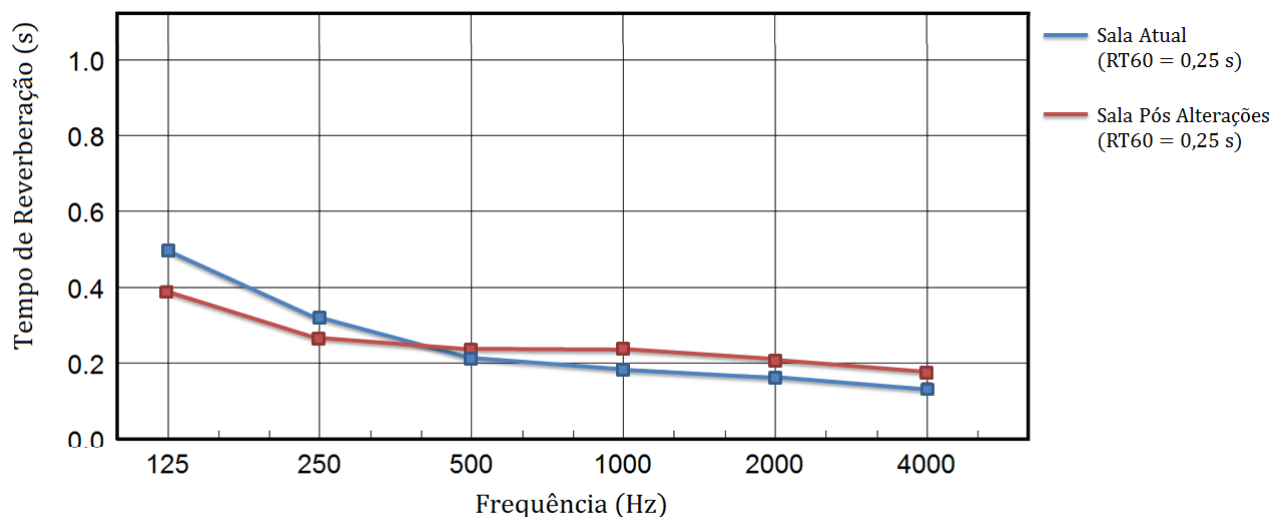


Fonte: do próprio autor.

Foram simuladas a instalação ou remoções de painéis absorventes de espuma, de painéis difusores e *bass traps* nos ambientes virtuais. Estas modificações tiveram como objetivo obter uma resposta mais equilibrada no espectro de frequências. As seguintes alterações foram feitas:

Sala de Mixagem (Figura 65): remoção de espumas das paredes, restando apenas atrás dos monitores do estúdio, nas posições laterais onde ocorrem as primeiras reflexões e no painel no teto. Aplicação de dois painéis absorventes em cada parede lateral, difusores na parede traseira e *bass traps* nos cantos traseiros da sala. Os painéis absorventes nas paredes e no teto ajudam a eliminar as reflexões tardias, que chegam após o som direto ao ouvido do operador, prejudicando na imagem estéreo no processo de mixagem. Os painéis difusores ajudam a "espalhar" as ondas, difundir de forma que a acústica da sala possua boa ambiência sem "secar" demais o som, efeito que é causado por painéis absorventes pois eliminam boa parte das reflexões das frequências médias e agudas. Os *bass traps* ajudam a absorver as ondas sonoras de frequências mais graves, principalmente nos cantos das salas onde há a formação de ondas estacionárias, extremamente prejudiciais à gravação de áudio.

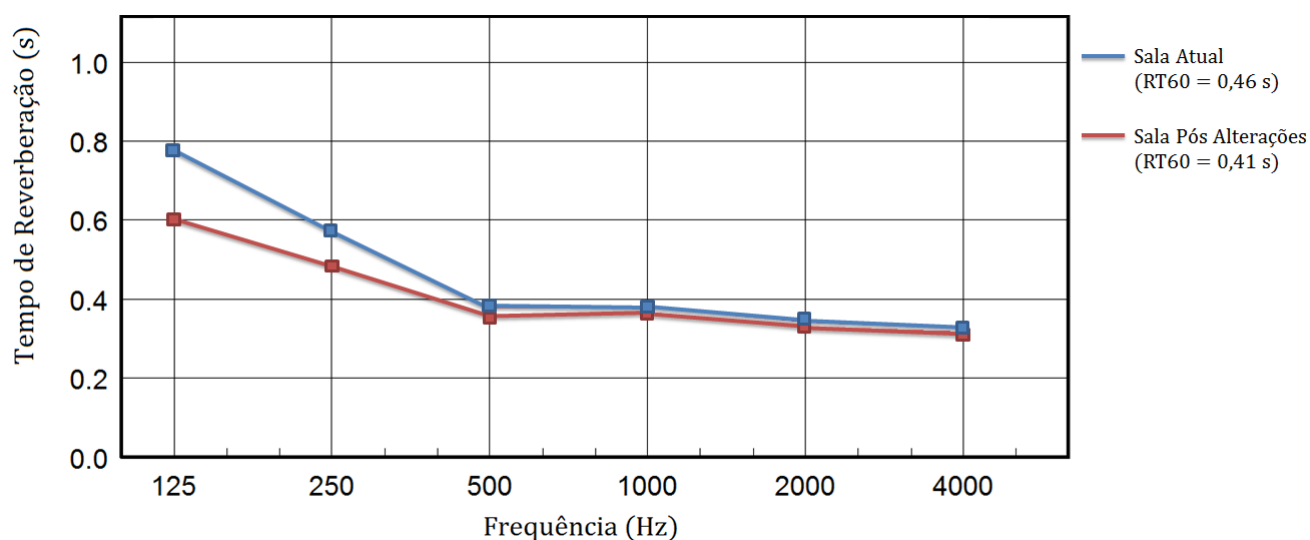
Figura 65 – Comparação entre sala atual e simulação de alterações na Sala de Mixagem.



Fonte: do próprio autor.

Sala A (Figura 66): adição de *bass traps* nos cinco cantos da sala, de modo a preservar ambiência da sala e diminuir a reverberação excessiva dos graves.

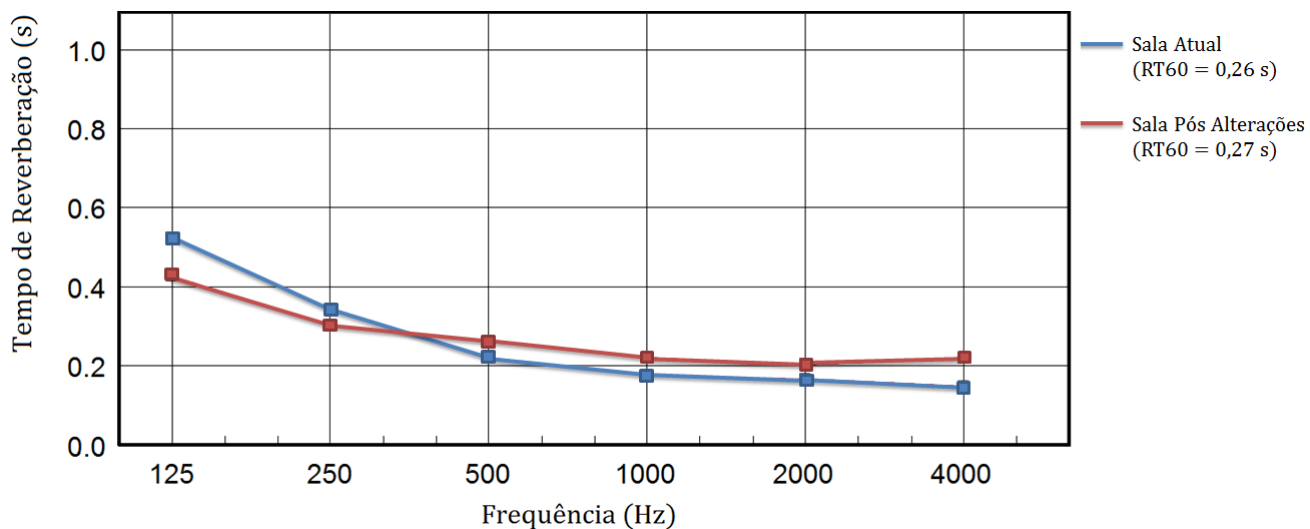
Figura 66 – Comparação entre sala atual e simulação de alterações na Sala A.



Fonte: do próprio autor.

Sala B (Figura 67): foram removidas as espumas do teto e de duas paredes, sendo preservadas ainda a espuma instalada na porta e na parede que separa a Sala B da Sala de Mixagem. Foram instalados 9 painéis difusores em duas paredes e mais 3 painéis ao lado da porta, além de *bass traps* em dois cantos da sala. Essa alteração visou diminuir a resposta dos graves e realçar os médios e agudos, e, com os difusores, o efeito de eco repetitivo se minimiza e o que se obtém é um som mais uniforme, menos "seco" e com maior ambiência.

Figura 67 – Comparação entre sala atual e simulação de alterações na Sala B.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As modificações propostas tiveram como objetivo a predição de melhoramento da resposta em frequência das salas baseadas em recomendações técnicas, demonstrando, assim, mais uma aplicação do *software CadnaR*.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta a criação e desenvolvimento de uma metodologia que objetiva a avaliação acústica de dois *home studios*, com análise do tempo de reverberação e do mapa acústico dos mesmos, bem como simulações de possíveis alterações em seus ambientes, com o auxílio de ferramentas computacionais.

O modelo teórico, criado para fim do cálculo do Tempo de Reverberação apresentou boa representatividade em relação ao modelo experimental, e possibilitou que diferentes configurações tivessem resultados similares àqueles obtidos experimentalmente. As cinco salas virtuais tiveram uma resposta próxima ao que se esperava, trabalhando apenas com o tamanho das salas e as superfícies absorventes de cada material, bem como suas respectivas áreas, através do cálculo do RT60 pelo *software CadnaR*, utilizando a equação de Eyring. Tendo em vista que os materiais utilizados nas três salas do Estúdio 1 e nas duas salas do Estúdio 2 são basicamente os mesmos, variando apenas em dimensões da sala e superfícies absorventes de cada material, o modelo apresentou resultados muito próximos aos valores experimentais.

Os mapas acústicos apresentaram dispersão sonora dentro do esperado, porém com uma pequena margem de erros, decorridos de fenômenos acústicos reais e imperfeições do Método de Traçado de Raios que acontecem principalmente nas frequências mais graves. O Método de Partículas (análogo ao Traçado de Raios), utilizado como parte do Método Híbrido no *software CadnaR* não atende tão bem quando se trata de baixas frequências, pois estas, especialmente em salas pequenas, devem ser tratadas como ondas ressonantes ao invés de raios devido aos seus maiores comprimentos de ondas, pois a aproximação da onda sonora se propagando como um raio já não é precisa.

Mesmo sem a possibilidade de inserir dados de Perda na Transmissão nas propriedades das barreiras e obstáculos na versão do *CadnaR* utilizada no presente trabalho, os resultados foram satisfatórios sob uma ótica qualitativa, mostrando o decaimento da energia sonora das ondas transmitidas de um ambiente pro outro, apresentando uma noção geral sobre a Perda na Transmissão esperada.

No Estúdio 1, foram sugeridas alterações no tratamento acústico de suas salas, pois foram constatadas resposta em frequência com considerável desequilíbrio dentro do espectro. Essas alterações foram sugeridas com base em materiais encontrados no mercado e suas respectivas propriedades de absorção sonora.

O Estúdio 2, com uma resposta em frequência mais equilibrada e com a Sala de Mixagem com RT60 dentro dos padrões, não demandou uma análise mais profunda em termos de propostas de melhoria dos ambientes. Todavia, na Sala e Gravação, uma pequena mudança é sugerida com objetivo de aumentar a ambiência da sala e ao mesmo tempo evitar que os ecos repetitivos (*flutter echoes*) se destaquem no ambiente, devido ao paralelismo das superfícies. Para tal, é proposta a diminuição da área de absorção e aumento da difusão sonora, com a remoção de alguns painéis absorventes e inclusão de painéis difusores nas superfícies "lisas" da sala, diminuindo o paralelismo das superfícies na sala.

Como sugestão em trabalhos futuros, para análises complementares e mais precisas, são propostas:

- a análise dos modos acústicos das salas;
- a análise de espectros em bandas de 1/3 de oitavas;
- a simulação de isolamento dos ambientes utilizando valores previamente estabelecidos de perda de transmissão nas mesmas;
- medições nos ambientes após mudanças nas estruturas físicas dos mesmos para fins de comparação com os modelos teóricos;
- utilização de excitação por varredura (*swept* exponencial)
- utilização de fonte sonora ideal (dodecaedro)

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. P.A **tendência do mercado de estúdios de gravação e das gravadoras**. [S.l.: s.n., 200-]. Disponível em <http://www.territoriomusica.com/artigos/?c=299>. Acesso em: 18 maio 2017.

AMACOUSTICS. **THE Room mode calculator**. Disponível em <https://amcoustics.com/tools/amroc>. Acesso em: 20 out 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12179: tratamento acústico em recintos fechados**. Rio de Janeiro, 1992.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle de ruído** - 2ª ed. São Paulo, Blucher, 2011.

BOLT, R.H. Note on the normal frequency statistics in rectangular rooms. **Journal of the Acoustical Society of America**, Nova York, v. 18, n. 1, p. 130-133, 1946.

BONAFÉ, G. Isolamento acústico em paredes: saiba especificar. **Revista digital AECweb**. [S.l.: s.n., 200-] Disponível em: https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/isolamento-acustico-em-paredes-saiba-especificar_11659_10_0. Acesso em 15 nov 2017.

BONELLO, O. J. A new criterion for the distribution of normal room modes. **AES-Journal**, USA, v. 29, n. 9, 597-606, 1981.

BÜRGIN, O. Acústica em homestudios In: SEMINÁRIO MÚSICA CIÊNCIA TECNOLOGIA: ACÚSTICA MUSICAL, 1., 2004. **Seminário música ciência tecnologia: acústica musical**. [S. l.]: IME-USP, 2004. p. 5.

CARVALHO, A. P. O. The use of sabine and eyring reverberation time equations to churches. In: MEETING OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, 129., 1995, Washington. 1995. **Meeting of the acoustical society of america**. Washington: [s.n.], 1995.

DATAKUSTIK. **Cadnar at a glance**. Disponível em: <http://www.datakustik.com>. Acesso em 05 jun 2017.

DATAKUSTIK. **Calculation**. [S.l.: s.n., 200-]. Disponível em: <http://www.datakustik.com/en/products/cadnar/modelling-and-calculation/calculation-methods>. Acesso em: 5 nov

2017.

EBU Tech. 3276 - 2nd edition - **Listening conditions for the assessment of sound programme material**: monophonic and two-channel stereophonic, maio, 1998.

ELORZA, D.O. **Room acoustics modeling using the raytracing method**: implementation and evaluation, 2005. Thesis (Doctor)- College, University of Turku, Turku, 2005.

ENCICLOPAEDIA BRITANNICA. **Ernst Heinrich Weber**. [S.l.: s.n., 200-]. Disponível em <https://www.britannica.com/biography/Ernst-Heinrich-Weber>. Acesso em 10 mar 2018.

EVEREST, F. A. POHLMANN, K. **Master handbook of acoustics**. New York: McGraw Hill, 2009.

FAZENDA, B. M.; DAVIES, W. J. **The views of recording studio control room users**. Salford: University of Salford, 2002. 8 p.

FAZENDA, B. M. **Perception of room modes in critical listening spaces**. Manchester: University of Salford, 2004. Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements of the Degree of Doctor of Philosophy.

FERNANDES, J. C. **Acústica e ruídos**. Bauru: Unesp, 2002. Apostila desenvolvida para as disciplinas Acústica e Ruídos.

HARTMANN, W. M. Localization of sound in rooms. **Journal of the Acoustical Society of America**., Melville, 74, n. 5, p. 1-12, 1983. 1380?1391.10.1121/1.390163.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 16283-1**: acoustics field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - part 1: airborne sound insulation, Geneva, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3382**: acoustics - measurement of room acoustic parameters, Geneva, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION- **ISO 717**: acoustics - rating of sound insulation in buildings and of building elements, Geneva, 2018.

KULOWSKI, A. Algorithmic representation of the ray tracing technique. **Applied acoustics**. [S.l.]: Gdansk, v.18, p. 449-469, 1984.

MATTOS, T. F. **Avaliação acústica de salas de controle em estúdios projetados**

para monitoração de multicanais. 2015 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2015

MARTINS, T.A. **Análise e Tratamento Acústico Para Estúdios Musicais.** 2010. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Bandwidth and filter banks (sound and vibration measurement suite).** [S.l.: s.n., 200-]. Disponível em: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372416A-01/svtconcepts/bwid_filter_banks/. Acesso em 19 mar 2018.

NEUBAUER, R.KOSTEK, B. **Prediction of the reverberation time in rectangular rooms with non-uniformly distributed sound absorption.** Archives of Acoustics, Warsaw, v. 26, n. 3, p. 183201, 2001.

PASSERI JUNIOR, L.; BISTAFA, R. S. **Análise e diagnóstico das características acústicas de estúdios e salas de gravação profissionais.** [S.l.]: Sociedade Brasileira de Acústica, 2002.

PERRY, T. I. **Control room conceptual design:** optimizing acoustics for stereo reproduction. Victoria: University of Victoria, 2008

PHYSICS CLASSROOM. **Sound waves and music:** lesson 1 - the nature of a sound wave. [S.l.: s.n., 200-]. Disponível em: <http://www.physicsclassroom.com/class/sound/u1l1lc.cfm>. Acesso em: 2 out 2017

PORTELLA, M. S. **Caracterização de fontes sonoras e aplicação na auralização de ambientes.** 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2008.

RODRIGUES, C. M. C. **Avaliação acústica de um estúdio de gravação implantado numa edificação comercial.** 2010. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2010, Rio de Janeiro, 2010.

STORYK, J.; CIPRIANO, R. Frequências baixas em salas pequenas: condições e soluções de controle. **Áudio Música e Tecnologia**, Brasília, n. 182. 16 p. nov, 2006

VORLÄNDER, M. Computer simulations in room acoustics: concepts and uncertainties. **Journal of the Acoustical Society of America**, Germany. v. 133, n. 1203 p. 11, 2013

WINER, E. **Acoustic treatment and design for recording studios and listening rooms**. [S.l.]: New Milford, 2003 Disponível em <http://ethanwiner.com/acoustics.html>. Acesso em: 10 maio 2017.

APÊNDICE A

Todos os coeficientes de absorção sonora utilizados neste trabalho foram retirados (ou) adaptados das seguintes fontes:

- <https://pt.scribd.com/doc/136655211/Tabelas-de-Coefficientes-de-Absorcao-Sonora-Normas-Brasileiras>
- http://www.acoustic.ua/st/web_absorption_data_eng.pdf
- <https://www.customaudiodesigns.co.uk/jocavi-basscorner.htm>

Coeficientes de Absorção Sonora para Cálculo do RT60 (Utilizados no Estudo da Influência dos Elementos de Tratamento Acústico dos Ambientes)

Figura A1 – Configuração de cálculo de RT60 para a Sala de Mixagem (Estúdio 1), em seu estado atual.

Partial Areas																			
OK	Cancel	Selection...	Copy	Font...	Adjust Column	Help													
Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1	Parede 1	5.00	0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10	
wall 1	EL1	3.10	0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94	
wall 2	Parede 2	5.60	0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10	
wall 2	EL2	2.50	0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94	
wall 3	Parede 3	5.00	0.14			0.22			0.48			0.51			0.61			0.94	
wall 3	EL3	3.10	0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94	
wall 4	Parede 4	8.10	0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10	
wall 4	EL4		0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94	
ceiling	Teto	4.75	0.05			0.05			0.05			0.05			0.05			0.05	
ceiling	ET	4.25	0.18			0.22			0.53			0.74			0.86			0.99	
floor	chão	9.00	0.10			0.10			0.10			0.10			0.10			0.10	
fittings	pessoas	6.00	0.15			0.38			0.42			0.43			0.45			0.45	
fittings	Sofá	1.45	0.28			0.26			0.28			0.26			0.34			0.34	
fittings	Cortina	2.00	0.14			0.35			0.55			0.72			0.70			0.65	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura A2 – Configuração de cálculo de RT60 para a Sala de Mixagem (Estúdio 1), com retirada das espumas laterais.

Partial Areas																			
OK	Cancel	Selection...	Copy	Font...	Adjust Column	Help													
Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1	Parede 1	8.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 1	EL1			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 2	Parede 2	8.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 2	EL2			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 3	Parede 3	8.10		0.14			0.22			0.48			0.51			0.61			0.94
wall 3	EL3			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Parede 4	8.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 4	EL4			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
ceiling	Teto	4.75		0.05			0.05			0.05			0.05			0.05			0.05
ceiling	ET	4.25		0.18			0.22			0.53			0.74			0.86			0.99
floor	chão	9.00		0.10			0.10			0.10			0.10			0.10			0.10
fittings	pessoas			0.15			0.38			0.42			0.43			0.45			0.45
fittings	Sofá	1.45		0.28			0.26			0.28			0.26			0.34			0.34
fittings	Cortina	2.00		0.14			0.35			0.55			0.72			0.70			0.65

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura A3 – Configuração de cálculo de RT60 para a Sala de Mixagem (Estúdio 1), com retirada das espumas laterais e superiores.

Partial Areas																			
OK		Cancel	Selection...	Copy	Font...		Adjust Column		Help										
Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1	Parede 1	8.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 1	EL1			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 2	Parede 2	8.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 2	EL2			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 3	Parede 3	8.10		0.14			0.22			0.48			0.51			0.61			0.94
wall 3	EL3			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Parede 4	8.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 4	EL4			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
ceiling	Teto	9.00		0.05			0.05			0.05			0.05			0.05			0.05
ceiling	ET			0.18			0.22			0.53			0.74			0.86			0.99
floor	chão	9.00		0.10			0.10			0.10			0.10			0.10			0.10
fittings	pessoas			0.15			0.38			0.42			0.43			0.45			0.45
fittings	Sofá	1.45		0.28			0.26			0.28			0.26			0.34			0.34
fittings	Cortina	2.00		0.14			0.35			0.55			0.72			0.70			0.65

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura A4 – Configuração de cálculo de RT60 para a Sala de Mixagem (Estúdio 1), com retirada de espumas e cortina.

Partial Areas																			
OK	Cancel	Selection...	Copy	Font...	Adjust Column	Help													
Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1	Parede 1	8.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 1	EL1			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 2	Parede 2	8.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 2	EL2			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 3	Parede 3	8.10		0.14			0.22			0.48			0.51			0.61			0.94
wall 3	EL3			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Parede 4	8.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 4	EL4			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
ceiling	Teto	9.00		0.05			0.05			0.05			0.05			0.05			0.05
ceiling	ET			0.18			0.22			0.53			0.74			0.86			0.99
floor	chão	9.00		0.10			0.10			0.10			0.10			0.10			0.10
fittings	pessoas			0.15			0.38			0.42			0.43			0.45			0.45
fittings	Sofá	1.45		0.28			0.26			0.28			0.26			0.34			0.34
fittings	Cortina			0.14			0.35			0.55			0.72			0.70			0.65

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura A5 – Configuração de cálculo de RT60 para a Sala de Mixagem (Estúdio 1), com retirada de espumas, cortina e mobília.

Partial Areas																			
OK	Cancel	Selection...	Copy	Font...	Adjust Column	Help													
Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1	Parede 1	8.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 1	EL1			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 2	Parede 2	8.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 2	EL2			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 3	Parede 3	8.10		0.14			0.22			0.48			0.51			0.61			0.94
wall 3	EL3			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Parede 4	8.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 4	EL4			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
ceiling	Teto	9.00		0.05			0.05			0.05			0.05			0.05			0.05
ceiling	ET			0.18			0.22			0.53			0.74			0.86			0.99
floor	chão	9.00		0.10			0.10			0.10			0.10			0.10			0.10
fittings	pessoas			0.15			0.38			0.42			0.43			0.45			0.45
fittings	Sofá	1.45		0.28			0.26			0.28			0.26			0.34			0.34
fittings	Cortina			0.14			0.35			0.55			0.72			0.70			0.65

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura A6 – Configuração de cálculo de RT60 para predição de melhorias na Sala de Mixagem (Estúdio 1).

Partial Areas																			
OK		Cancel	Selection...	Copy	Font...	Adjust Column	Help												
Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1	Parede 1	6.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 1	EL1	2.00		0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 2	Parede 2	7.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 2	EL2	1.00		0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 3	Parede 3	8.10		0.14			0.22			0.48			0.51			0.61			0.94
wall 3	EL3			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Parede 4	7.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 4	EL4	1.00		0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
ceiling	Teto	4.75		0.05			0.05			0.05			0.05			0.05			0.05
ceiling	ET	4.25		0.18			0.22			0.53			0.74			0.86			0.99
floor	chão	9.00		0.10			0.10			0.10			0.10			0.10			0.10
fittings	peçoas	6.00		0.15			0.38			0.42			0.43			0.45			0.45
fittings	Sofá	1.45		0.28			0.26			0.28			0.26			0.34			0.34
fittings	Cortina	2.00		0.14			0.35			0.55			0.72			0.70			0.65
fittings	Bass traps	3.78		1.00			0.90			0.50			0.40			0.40			0.40

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura A7 – Configuração de cálculo de RT60 para a Sala A (Estúdio 1), em seu estado atual.

Partial Areas																			
OK		Cancel	Selection...	Copy	Font...		Adjust Column		Help										
Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1	Parede 1	10.90		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 1	EL1	2.25		0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 2	Parede 2	15.75		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 2	EL2	4.50		0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 3	Parede 3	13.15		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 3	EL3			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Parede 4	14.50		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 4	Cortina	5.76		0.16			0.24			0.55			0.72			0.70			0.65
wall 4	EL4			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
ceiling	Teto	23.36		0.05			0.05			0.05			0.05			0.05			0.05
ceiling	ET	13.13		0.16			0.22			0.53			0.74			0.86			0.99
floor	chão	16.70		0.10			0.10			0.10			0.10			0.10			0.10
floor	Tapete	19.80		0.12			0.15			0.30			0.25			0.30			0.20
fittings	peçoas/fittings	8.00		0.15			0.00			0.62			0.43			0.45			0.45

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura A8 – Configuração de cálculo de RT60 para a Sala A (Estúdio 1), com retirada das espumas laterais.

Partial Areas

OK	Cancel	Selection...	Copy	Font...	Adjust Column	Help													
Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1	Parede 1	13.15		0.14			0.22			0.18			0.10	1250		0.10			0.10
wall 1	EL1			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 2	Parede 2	20.25		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 2	EL2			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 3	Parede 3	13.15		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 3	EL3			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Parede 4	14.50		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 4	EL4			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Cortina	5.76		0.16			0.24			0.55			0.72			0.70			0.65
ceiling	Teto	23.36		0.05			0.05			0.05			0.05			0.05			0.05
ceiling	ET	13.13		0.16			0.22			0.53			0.74			0.86			0.99
floor	chão	16.70		0.10			0.10			0.10			0.10			0.10			0.10
floor	Tapete	19.80		0.12			0.15			0.30			0.25			0.30			0.20
fittings	pessoas/fittings	6.00		0.15			0.00			0.62			0.43			0.45			0.45

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura A9 – Configuração de cálculo de RT60 para a Sala A (Estúdio 1), com retirada das espumas laterais e superiores.

Partial Areas																			
OK		Cancel	Selection...	Copy	Font...		Adjust Column		Help										
Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1	Parede 1	13.15		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 1	EL1			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 2	Parede 2	20.25		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 2	EL2			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 3	Parede 3	13.15		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 3	EL3			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Parede 4	14.50		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 4	EL4			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Cortina	5.76		0.16			0.24			0.55			0.72			0.70			0.65
ceiling	Teto	36.25		0.05			0.05			0.05			0.05			0.05			0.05
ceiling	ET			0.16			0.22			0.53			0.74			0.86			0.99
floor	chão	16.70		0.10			0.10			0.10			0.10			0.10			0.10
floor	Tapete	19.80		0.12			0.15			0.30			0.25			0.30			0.20
fittings	pessoas/fittings	4.00		0.15			0.00			0.62			0.43			0.45			0.45

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura A10 – Configuração de cálculo de RT60 para a Sala A (Estúdio 1), com retirada de espumas e tapete.

Partial Areas																			
OK	Cancel	Selection...	Copy	Font...	Adjust Column	Help													
Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1	Parede 1	13.15		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 1	EL1			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 2	Parede 2	20.25		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 2	EL2			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 3	Parede 3	13.15		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 3	EL3			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Parede 4	14.50		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 4	EL4			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Cortina	5.76		0.16			0.24			0.55			0.72			0.70			0.65
ceiling	Teto	36.25		0.05			0.05			0.05			0.05			0.05			0.05
ceiling	ET			0.16			0.22			0.53			0.74			0.86			0.99
floor	chão	36.52		0.10			0.10			0.10			0.10			0.10			0.10
floor	Tapete			0.12			0.15			0.30			0.25			0.30			0.20
fittings	pessoas/fittings	2.00		0.15			0.00			0.62			0.43			0.45			0.45

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura A11 – Configuração de cálculo de RT60 para a Sala A (Estúdio 1), com retirada de espumas, cortina e tapete.

Partial Areas

OKCancelSelection...CopyFont...Adjust ColumnHelp

Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1	Parede 1	13.15		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 1	EL1			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 2	Parede 2	20.25		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 2	EL2			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 3	Parede 3	13.15		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 3	EL3			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Parede 4	14.50		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 4	EL4			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Cortina			0.16			0.24			0.55			0.72			0.70			0.65
ceiling	Teto	36.25		0.05			0.05			0.05			0.05			0.05			0.05
ceiling	ET			0.16			0.22			0.53			0.74			0.86			0.99
floor	chão	36.52		0.10			0.10			0.10			0.10			0.10			0.10
floor	Tapete			0.12			0.15			0.30			0.25			0.30			0.20
fittings	pessoas/fittings	2.00		0.15			0.00			0.62			0.43			0.45			0.45

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura A12 – Configuração de cálculo de RT60 para predição de melhorias na Sala A (Estúdio 1).

Partial Areas																			
OK	Cancel	Selection...	Copy	Font...	Adjust Column	Help													
Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1	Parede 1	10.90		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 1	EL1	2.25		0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 2	Parede 2	15.75		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 2	EL2	4.50		0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 3	Parede 3	13.15		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 3	EL3			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Parede 4	14.50		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 4	Cortina	5.76		0.16			0.24			0.55			0.72			0.70			0.65
wall 4	EL4			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
ceiling	Teto	23.36		0.05			0.05			0.05			0.05			0.05			0.05
ceiling	ET	13.13		0.16			0.22			0.53			0.74			0.86			0.99
floor	chão	16.70		0.10			0.10			0.10			0.10			0.10			0.10
floor	Tapete	19.80		0.12			0.15			0.30			0.25			0.30			0.20
fittings	peçoas/fittings	8.00		0.15			0.00			0.62			0.43			0.45			0.45
fittings	Bass traps	9.42		1.00			0.90			0.50			0.40			0.40			0.40

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura A13 – Configuração de cálculo de RT60 para a Sala B (Estúdio 1), em seu estado atual.

Partial Areas																			
OK		Cancel	Selection...	Copy	Font...	Adjust Column		Help											
Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1		3.65	0.14				0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 1	EL1	3.10	0.16				0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 2		4.50	0.14				0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 2	EL2	2.25	0.16				0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 3		5.10	0.14				0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 3	EL3	3.00	0.16				0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Parede 4	6.42	0.14				0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 4	EL4	1.68	0.16				0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
ceiling	Teto	3.25	0.05				0.05			0.05			0.05			0.05			0.05
ceiling	ET	4.25	0.16				0.22			0.53			0.74			0.86			0.99
floor	chão	7.50	0.10				0.10			0.10			0.10			0.10			0.10
fittings	peçoas	4.00	0.10				0.38			0.42			0.43			0.45			0.45
fittings	Ajuste fino	6.00	0.00				0.00			0.30			0.50			0.40			0.30

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura A14 – Configuração de cálculo de RT60 para a Sala B (Estúdio 1), com retirada das espumas laterais.

Partial Areas

OK	Cancel	Selection...	Copy	Font...	Adjust Column	Help													
Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1	Parede 1	6.75		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 1	EL1			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 2	Parede 2	8.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 2	EL2			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 3	Parede 3	6.75		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 3	EL3			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Parede 4	8.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 4	EL4			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
ceiling	Teto	3.25		0.05			0.05			0.05			0.05			0.05			0.05
ceiling	ET	4.25		0.16			0.22			0.53			0.74			0.86			0.99
floor	chão	7.50		0.10			0.10			0.10			0.10			0.10			0.10
fittings	pessoas			0.10			0.38			0.42			0.43			0.45			0.45
fittings	Ajuste fino	4.00		0.00			0.00			0.30			0.50			0.40			0.30

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura A15 – Configuração de cálculo de RT60 para a Sala B (Estúdio 1), com retirada das espumas laterais e superiores.

Partial Areas

OK	Cancel	Selection...	Copy	Font...	Adjust Column	Help													
Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1	Parede 1	6.75		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 1	EL1			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 2	Parede 2	8.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 2	EL2			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 3	Parede 3	6.75		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 3	EL3			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Parede 4	8.10		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 4	EL4			0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
ceiling	Teto	7.50		0.05			0.05			0.05			0.05			0.05			0.05
ceiling	ET			0.16			0.22			0.53			0.74			0.86			0.99
floor	chão	7.50		0.10			0.10			0.10			0.10			0.10			0.10
fittings	pessoas			0.10			0.38			0.42			0.43			0.45			0.45
fittings	Ajuste fino	4.00		0.00			0.00			0.30			0.50			0.40			0.30

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura A16 – Configuração de cálculo de RT60 para predição de melhorias na Sala B (Estúdio 1).

Partial Areas																			
OK	Cancel	Selection...	Copy	Font...	Adjust Column	Help													
Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1	Parede 1	3.65		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 1	EL1	3.10		0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 2	Parede 2	3.60		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 2	Difusor (9 placas de 60²	3.15		0.05			0.12			0.16			0.26			0.48			0.32
wall 3	Parede 3	4.95		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 3	Difusor 3	3.15		0.05			0.12			0.16			0.26			0.48			0.32
wall 4	Parede 4	5.37		0.14			0.22			0.18			0.10			0.10			0.10
wall 4	EL4	1.68		0.16			0.22			0.48			0.74			0.81			0.94
wall 4	Difusores	1.05		0.05			0.12			0.16			0.26			0.48			0.32
fittings	Basstraps	3.77		1.00			0.90			0.50			0.40			0.40			0.40
ceiling	Teto	8.10		0.05			0.05			0.05			0.05			0.05			0.05
ceiling	ET			0.16			0.22			0.53			0.74			0.86			0.99
floor	chão	7.50		0.10			0.10			0.10			0.10			0.10			0.10
fittings	pessoas	4.00		0.10			0.38			0.42			0.43			0.45			0.45

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura A17 – Configuração de cálculo de RT60 para a Sala de Mixagem (Estúdio 2), em seu estado atual.

Partial Areas

OK	Cancel	Selection...	Copy	Font...	Adjust Column	Help													
Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1	Parede 1	4.40		0.28			0.30			0.25			0.10			0.10			0.10
wall 1	Espuma 1	4.00		0.28			0.30			0.48			0.51			0.56			0.54
wall 2	Parede 2	2.70		0.28			0.30			0.25			0.10			0.10			0.10
wall 2	Espuma 2	10.08		0.28			0.30			0.48			0.51			0.56			0.54
wall 3	Parede 3	2.25		0.28			0.30			0.25			0.10			0.10			0.10
wall 3	Espuma 3	6.00		0.28			0.30			0.48			0.51			0.56			0.54
wall 4	Parede 4	2.70		0.28			0.30			0.25			0.10			0.10			0.10
wall 4	Espuma 4	10.08		0.28			0.30			0.48			0.51			0.56			0.54
ceiling	Teto	10.80		0.28			0.30			0.14			0.08			0.13			0.10
floor	Piso	10.80		0.24			0.19			0.14			0.08			0.13			0.10
fittings	objetos/pessoas	6.00		0.40			0.00			0.00			0.40			0.00			0.00

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura A18 – Configuração de cálculo de RT60 para a Sala de Gravação (Estúdio 2), em seu estado atual.

Partial Areas																			
OK	Cancel	Selection...	Copy	Font...	Adjust Column	Help													
Pos.	Name	Area	Absorption coefficient																
		(m²)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
wall 1	Parede 1	4.40		0.28			0.30			0.25			0.10			0.10			0.10
wall 1	Espuma 1	4.00		0.28			0.30			0.48			0.51			0.56			0.54
wall 2	Parede 2	2.70		0.28			0.30			0.25			0.10			0.10			0.10
wall 2	Espuma 2	10.08		0.28			0.30			0.48			0.51			0.56			0.54
wall 3	Parede 3	2.25		0.28			0.30			0.25			0.10			0.10			0.10
wall 3	Espuma 3	6.00		0.28			0.30			0.48			0.51			0.56			0.54
wall 4	Parede 4	2.70		0.28			0.30			0.25			0.10			0.10			0.10
wall 4	Espuma 4	10.08		0.28			0.30			0.48			0.51			0.56			0.54
ceiling	Teto	10.80		0.28			0.30			0.14			0.08			0.13			0.10
floor	Piso	10.80		0.24			0.19			0.14			0.08			0.13			0.10
fittings	objetos/pessoas	6.00		0.40			0.00			0.00			0.40			0.00			0.00

Fonte: Elaboração do próprio autor.