

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS DE AULA EM
ESCOLAS DE EDUCAÇÃO BÁSICA:
UMA PROPOSTA TIPOLÓGICA PARA PRÁTICA MUSICAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Cristhian Moreira Brum

Santa Maria, RS, Brasil

2012

**SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS DE AULA EM
ESCOLAS DE EDUCAÇÃO BÁSICA:
UMA PROPOSTA TIPOLÓGICA PARA PRÁTICA MUSICAL**

Cristhian Moreira Brum

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil e Ambiental**.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Erasmo Felipe Vergara Miranda

Santa Maria, RS, Brasil

2012

Moreira Brum, Cristhian
Simulação Acústica de Salas de Aula para o Ensino da
Música / Cristhian Moreira Brum.-2012.
150 p.; 30cm

Orientador: Erasmo Felipe Vergara Miranda
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2012

1. Simulação Acústica 2. Salas de Aula 3. Ensino da
Música I. Vergara Miranda, Erasmo Felipe II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por
Biblioteca Central UFSM

© 2012

Todos os direitos autorais reservados a Cristhian Moreira Brum. A reprodução de partes ou do todo
deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte:
Endereço Eletrônico: crmrbr@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS DE AULA EM ESCOLAS DE
EDUCAÇÃO BÁSICA:
UMA PROPOSTA TIPOLÓGICA PARA PRÁTICA MUSICAL**

elaborada por
Cristhian Moreira Brum

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil e Ambiental

COMISSÃO EXAMINADORA:

Erasmo Felipe Vergara Miranda, Dr. Eng.
(Presidente/Orientador)

Dinara Xavier da Paixão, Dra. Eng. (UFSM)

Aloísio Leoni Schmid, Dr. Ing. (UFPR)

Santa Maria, 24 de setembro de 2012

DEDICATÓRIA

Para os meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Felipe Vergara, pela sua orientação, dedicação, sabedoria e seu apoio incondicional durante todo período desse trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGEC) da UFSM.

Ao Laboratório de Acústica da UFSM, pelo uso de suas instalações e equipamentos.

Aos Professores Dr. Aloísio Leoni Schmid, Dr^a. Dinara Xavier da Paixão, Dr. Newton Sure Soeiro e Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo, pelo apoio, ensinamento e colaboração durante a vigência do projeto ABRAMUS – Arquiteturas para um Brasil Musical do qual fui integrante.

A minha amiga Claudia Gaida e família, pelo incansável apoio, dedicação e esforço em conjunto durante o período de mestrado.

A todos os professores, colegas e amigos do PPGEC, em especial, aos colegas Alessandro Alves, Cícero Corrêa e Francisco Moreira, pela ajuda e horas de discussão nos trabalhos e avaliações durante esta jornada.

Aos meus colegas de docência e alunos das primeiras turmas dos Cursos de Arquitetura e Urbanismo, Engenharia Civil e Engenharia Elétrica da URI - Campus de Frederico Westphalen, pelo apoio e carinho dispensados para este professor durante a fase final deste trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro, determinante para o cumprimento deste trabalho.

EPÍGRAFE

“O trabalho de um arquiteto é sempre uma obra educacional, ainda que não seja ele um professor. Entretanto, quando se juntam mestre e arquiteto, então uma obra poderá ser duplamente exaltada.”

DUARTE, Hélio (1956 apud BUFFA; ALMEIDA PINTO, 2002, p.93).

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
Universidade Federal de Santa Maria

SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS DE AULA EM ESCOLAS DE EDUCAÇÃO BÁSICA: UMA PROPOSTA TIPOLÓGICA PARA PRÁTICA MUSICAL

AUTOR: CRISTHIAN MOREIRA BRUM

ORIENTADOR: ERASMO FELIPE VERGARA MIRANDA

Data e local da defesa: Santa Maria - RS, 24 de setembro de 2012.

O estudo da acústica de salas está vinculado à importância do som dentro de um recinto, logo, as características arquitetônicas do espaço interno determinam seu comportamento acústico. Para buscar melhores condições acústicas de um recinto disponibilizam-se métodos computacionais que simulem o comportamento acústico de uma sala, antes de sua execução, proporcionando a previsão de comportamento do ambiente simulado do ponto de vista acústico. Os parâmetros acústicos resultantes das simulações acústicas, como: Tempo de Reverberação, Tempo de Decaimento Inicial, Clareza, Definição e o Índice de Transmissão da Fala são responsáveis pela identificação das condições acústicas do modelo geométrico de uma sala de aula. Este modelo geométrico utilizou como amostra as salas de aula das diferentes tipologias de escolas da rede estadual de educação de Santa Maria - RS, com o objetivo de desenvolver uma tipologia de sala de aula, para o ensino da música, a partir de modelos acústicos virtuais utilizando-se simulação computacional. Foram desenvolvidos modelos geométricos de salas de aula para o ensino da música utilizando-se como dados de entrada, dimensões, formatos e elementos, usualmente utilizados nestes ambientes, e desenvolvidos modelos acústicos virtuais representativos destas salas, aos quais foi feita uma avaliação dos parâmetros acústicos relacionados ao tempo de reverberação, partindo-se da resposta impulso dos modelos acústicos virtuais das salas. Foram analisados resultados experimentais e simulados na situação sem mobília e com mobília, para os parâmetros acústicos, e essas comparações foram relacionadas com os valores de JND (em inglês *Just Noticeable Difference*) padronizadas as margens de tolerância, de acordo com a ISO 3382/2009, com valores normalizados de 500 Hz a 1000 Hz. Também foi desenvolvido um estudo geométrico, a partir de Bolt (1946), que definiu as medidas geométricas adequadas da sala. Com isto, originou-se uma tipologia funcional, observando as exigências acústicas arquitetônicas, cumprindo a proposta inicial de apresentar uma tipologia de sala de aula, para a música, a fim de proporcionar um ambiente com qualidade acústica, atendendo a Lei nº 11.769/2008, que insere o ensino da música nas escolas, de forma obrigatória.

Palavras-chave: simulação acústica; ensino da música; acústica de salas.

ABSTRACT

Masters Degree Dissertation
Graduate Program in Civil Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

ACOUSTIC SIMULATION OF CLASSROOMS IN BASIC EDUCATION SCHOOLS: A TIPOLOGY FOR THE MUSIC PRACTICE

AUTHOR: CRISTHIAN MOREIRA BRUM
ADVISOR: ERASMO FELIPE VERGARA MIRANDA

Date and Location of Defense: Santa Maria – RS, 24 de September de 2012.

Abstract: The study of room acoustics is linked to the importance of sound inside a room, so the architectural characteristics of the internal space determine the acoustic behavior. To get better acoustics of a room there are computational methods that simulate the acoustic behavior of a room before his execution, providing the prediction of the simulated environment behavior from the acoustic point of view. The acoustic parameters of the resulting acoustic simulations as Reverberation Time, Initial Decay Time, Clarity, Sharpness and Speech Transmission Index, are responsible for identifying the acoustic conditions of the geometric model of a classroom.

This geometric model used as sample classrooms of different types of municipal schools in Santa Maria - RS, with the aim of developing a classroom typology for the music teaching from virtual acoustic models using computing simulation. Geometric models of classrooms for teaching music were developed using as input data, dimensions, shapes and elements usually used in these environments and developed representative virtual acoustic models these virtual classrooms, in which were measured acoustic parameters related to the reverberation time from the impulse response of the acoustic models of virtual rooms.

We analyzed the experimental results and simulated with and without furniture for the acoustic parameters, and these comparisons were related to the values of JND (Just Noticeable Difference) near the standard tolerance according to ISO 3382/2009 with normalized values of 500 Hz to 1000 Hz. A geometric study was developed based on Bolt (1946) which defined the appropriate geometric measures of the room. Thus, a functional typology was originated which meets the architectural acoustic requirements and the initial proposal of presenting a music classroom typology providing an environment with acoustic quality, according to Law number 11.769/2008 that inserts education music in schools on a mandatory basis.

Keywords: Acoustic simulation. Music school. Room acoustics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 –	Frequência de Schröder.....	29
Figura 2.2 –	Diagrama de Bolt.....	30
Figura 2.3 –	TR – Sala de prática musical – Universidade do Texas.....	31
Figura 2.4 –	Ilustração esquemática (som direto, primeiras reflexões e som reverberante).....	41
Figura 3.1 –	Interior da Sala de Eventos, mobiliário e descrição de materiais.....	46
Figura 3.2 –	Interior da Sala de Eventos, mobiliário e descrição de materiais.....	46
Figura 3.3 –	Interior da Sala de Vídeo, mobiliário e descrição de materiais.....	47
Figura 3.4 –	Interior da Sala de Aula, mobiliário e descrição de materiais.....	47
Figura 3.5 –	Interior da Sala de Vídeo, mobiliário e descrição de materiais.....	48
Figura 3.6 –	Interior da Sala de Vídeo, mobiliário e descrição de materiais.....	48
Figura 3.7 –	Interior da Sala de Vídeo, mobiliário e descrição de materiais.....	49
Figura 3.8 –	Procedimento Ilustrativo do processo de Simulação Acústica.....	51
Figura 4.1 –	Comparação entre TR medido e simulado para PAI01, sem mobília.....	59
Figura 4.2 –	Comparação entre TR medido e simulado para PAP01, sem mobília.....	60
Figura 4.3 –	Comparação entre TR medido e simulado para PAC01, sem mobília.....	60
Figura 4.4 –	Comparação entre TR medido e simulado para PAC02, sem mobília.....	61
Figura 4.5 –	Comparação entre TR medido e simulado para CPA01, sem mobília.....	62
Figura 4.6 –	Comparação entre TR medido e simulado para CPA02, sem mobília.....	62

Figura 4.7 –	Comparação entre TR medido e simulado para CPB01, sem mobília.....	63
Figura 4.8 –	Comparação entre <i>EDT</i> medido e simulado para PAI01, sem mobília.....	64
Figura 4.9 –	Comparação entre <i>EDT</i> medido e simulado para PAP01, sem mobília.....	65
Figura 4.10 –	Comparação entre <i>EDT</i> medido e simulado para PAC01, sem mobília.....	65
Figura 4.11 –	Comparação entre <i>EDT</i> medido e simulado para PAC02, sem mobília.....	66
Figura 4.12 –	Comparação entre <i>EDT</i> medido e simulado para CPA01, sem mobília.....	66
Figura 4.13 –	Comparação entre <i>EDT</i> medido e simulado para CPA02, sem mobília.....	67
Figura 4.14 –	Comparação entre <i>EDT</i> medido e simulado para CPB01, sem mobília.....	67
Figura 4.15 –	Comparação entre C_{80} medido e simulado para PAI01, sem mobília.....	68
Figura 4.16 –	Comparação entre C_{80} medido e simulado para PAP01, sem mobília.....	69
Figura 4.17 –	Comparação entre C_{80} medido e simulado para PAC01, sem mobília.....	69
Figura 4.18 –	Comparação entre C_{80} medido e simulado para PAC02, sem mobília.....	70
Figura 4.19 –	Comparação entre C_{80} medido e simulado para CPA01, sem mobília.....	70
Figura 4.20 –	Comparação entre C_{80} medido e simulado para CPA02, sem mobília.....	71
Figura 4.21 –	Comparação entre C_{80} medido e simulado para CPB01, sem mobília.....	71
Figura 4.22 –	Comparação entre D_{50} medido e simulado para PAI01, sem mobília.....	72
Figura 4.23 –	Comparação entre D_{50} medido e simulado para PAP01, sem mobília.....	73
Figura 4.24 –	Comparação entre D_{50} medido e simulado para PAC01, sem mobília.....	73

Figura 4.25 –	Comparação entre D_{50} medido e simulado para PAC02, sem mobília.....	74
Figura 4.26 –	Comparação entre D_{50} medido e simulado para CPA01, sem mobília.....	74
Figura 4.27 –	Comparação entre D_{50} medido e simulado para CPA02, sem mobília.....	75
Figura 4.28 –	Comparação entre D_{50} medido e simulado para CPB01, sem mobília.....	75
Figura 4.29 –	Comparação entre TR medido e simulado para PAI01, com mobília.....	76
Figura 4.30 –	Comparação entre TR medido e simulado para PAP01, com mobília.....	77
Figura 4.31 –	Comparação entre TR medido e simulado para PAC01, com mobília.....	77
Figura 4.32 –	Comparação entre TR medido e simulado para PAC02, com mobília.....	78
Figura 4.33 –	Comparação entre TR medido e simulado para CPA01, com mobília.....	78
Figura 4.34 –	Comparação entre TR medido e simulado para CPA02, com mobília.....	79
Figura 4.35 –	Comparação entre TR medido e simulado para CPB01, com mobília.....	79
Figura 4.36 –	Comparação entre EDT medido e simulado para PAI01, com mobília.....	80
Figura 4.37 –	Comparação entre EDT medido e simulado para PAP01, com mobília.....	80
Figura 4.38 –	Comparação entre EDT medido e simulado para PAC01, com mobília.....	81
Figura 4.39 –	Comparação entre EDT medido e simulado para PAC02, com mobília.....	81
Figura 4.40 –	Comparação entre EDT medido e simulado para CPA01, com mobília.....	82
Figura 4.41 –	Comparação entre EDT medido e simulado para CPA02, com mobília.....	82
Figura 4.42 –	Comparação entre EDT medido e simulado para CPB01, com mobília.....	83

Figura 4.43 –	Comparação entre C_{80} medido e simulado para PAI01, com mobília.....	84
Figura 4.44 –	Comparação entre C_{80} medido e simulado para PAP01, com mobília.....	84
Figura 4.45 –	Comparação entre C_{80} medido e simulado para PAC01, com mobília.....	85
Figura 4.46 –	Comparação entre C_{80} medido e simulado para PAC02, com mobília.....	85
Figura 4.47 –	Comparação entre C_{80} medido e simulado para CPA01, com mobília.....	86
Figura 4.48 –	Comparação entre C_{80} medido e simulado para CPA02, com mobília.....	86
Figura 4.49 –	Comparação entre C_{80} medido e simulado para CPB01, com mobília.....	87
Figura 4.50 –	Comparação entre D_{50} medido e simulado para PAI01, com mobília.....	88
Figura 4.51 –	Comparação entre D_{50} medido e simulado para PAP01, com mobília.....	88
Figura 4.52 –	Comparação entre D_{50} medido e simulado para PAC01, com mobília.....	88
Figura 4.53 –	Comparação entre D_{50} medido e simulado para PAC02, com mobília.....	89
Figura 4.54 –	Comparação entre D_{50} medido e simulado para CPA01, com mobília.....	89
Figura 4.55 –	Comparação entre D_{50} medido e simulado para CPA02, com mobília.....	90
Figura 4.56 –	Comparação entre D_{50} medido e simulado para CPB01, com mobília.....	90
Figura 4.57 –	Diagrama de Bolt.....	93
Figura 5.1 –	Sugestões do autor para as proporções da sala proposta, locadas do Diagrama de Bolt (1946).....	100
Figura 5.2 –	Planta baixa que representa a proposta tipológica acústico-arquitetônica para salas de aula, para o ensino da música com os ângulos de inclinação de 20º e 15º.....	101
Figura 5.3 –	Planta baixa que representa a proposta tipológica acústico-arquitetônica para salas de aula, para o ensino da música com a orientação magnética.....	102

Figura 5.4 –	Planta baixa da proposta tipológica acústico-arquitetônica para salas de aula, para o ensino da música com a distribuição do mobiliário.....	103
Figura 5.5 –	Planta baixa da proposta tipológica acústico-arquitetônica para salas de aula, para o ensino da música, com a distribuição do mobiliário e detalhe da área de visibilidade.....	104
Figura 5.6 –	Representação em corte da proposta tipológica acústico-arquitetônica com detalhamento do sistema de iluminação natural e sistema de ventilação por brises horizontais.....	105
Figura 5.7 –	Esquema em corte da proposta tipológica com o detalhamento da arborização e da ventilação natural cruzada.....	106
Figura 5.8 –	Visualização 3D da proposta tipológica acústico-arquitetônica da sala.....	107
Figura 5.9 –	Visualização 3D da proposta tipológica acústico-arquitetônica da sala.....	107
Figura 5.10 –	Representação em corte da sala proposta.....	108
Figura 5.11 –	Representação em corte da sala proposta.....	108
Figura 5.12 –	Cinco pontos de medição usados na simulação da sala.....	110
Figura 5.13 –	TR da tipologia proposta para a sala de música.....	113
Figura 5.14 –	<i>EDT</i> da tipologia proposta para a sala de música.....	114
Figura 5.15 –	<i>C₈₀</i> da tipologia proposta para a sala de música.....	114
Figura 5.16 –	<i>D₅₀</i> da tipologia proposta para a sala de música.....	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 –	Comparativo entre TR médios considerados adequados para salas de prática e ensino musical.....	32
Tabela 2.2 –	Valores de volume <i>per capita</i> conforme a destinação do recinto.....	32
Tabela 2.3 –	Valores de parâmetros acústicos de acordo com a percepção do ouvinte.....	39
Tabela 3.1 –	Descrição das amostras e tipologias arquitetônicas analisadas.....	44
Tabela 3.2 –	Descrição das características geométricas das salas analisadas.....	45
Tabela 4.1 –	Materiais aplicados nos modelos computacionais e seus respectivos coeficientes de absorção sonora.....	54
Tabela 4.2 –	Valores utilizados para análise dos dados experimentais na situação “sem mobília”.....	54
Tabela 4.3 –	Valores utilizados para análise dos dados experimentais na situação “com mobília”.....	55
Tabela 4.4 –	Valores utilizados para análise dos dados simulados na situação “sem mobília”.....	55
Tabela 4.5 –	Valores utilizados para análise dos dados simulados na situação “com mobília”.....	56
Tabela 4.6 –	Diferença entre valores de referência medidos e simulados dos parâmetros acústicos, para comparação com os valores de referência de <i>JND</i> , na situação “sem mobília”. Os valores em cinza são os considerados abaixo ou iguais ao <i>JND</i>	57
Tabela 4.7 –	Diferença entre valores de referência medidos e simulados dos parâmetros acústicos, para comparação com os valores de referência de <i>JND</i> , na situação “com mobília”.....	57
Tabela 4.8 –	Valores de <i>STI</i> medidos e simulados, na situação sem mobília e com mobília.....	91
Tabela 5.1 –	Condicionantes ambientais para salas de aula utilizadas para o	

ensino da música nas escolas de educação básica.....	97
Tabela 5.2 – Superfície, área, tipo de material e coeficiente de absorção sonora da sala proposta.....	109
Tabela 5.3 – Valores médios simulados para os cinco pontos considerados para medições.....	111
Tabela 5.4 – Materiais e mobiliários utilizados no modelo computacional e seus respectivos coeficientes de absorção sonora.....	112
Tabela 5.5 – Valores médios simulados (situação “com mobília”).....	112

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Valores de <i>STI</i> relacionados com a integibilidade predita.....	33
Quadro 2.2 – Resumo dos métodos de cálculos.....	37
Quadro 2.3 – Descrição resumida dos métodos numéricos.....	43
Quadro 3.1 – Descrição da legenda de acordo com a tipologia na respectiva escola.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAMUS	Arquiteturas para um Brasil Musical
ANSI	Instituto Nacional Americano de Padrões (<i>American National Standards Institute</i>)
<i>Br</i>	Brilho (<i>Brilliance</i>)
<i>C₈₀</i>	Clareza (<i>Clarity</i>)
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pesquisadores de Ensino Superior
dB	Decibel
<i>D₅₀</i>	Definição (<i>Definition</i>)
<i>EDT</i>	Tempo de decaimento inicial (<i>Early Decay Time</i>)
Hz	Hertz (frequência em ciclos por segundo)
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional (<i>International Electrotechnical Commission</i>)
ISO	Organização Internacional de Normalização (<i>International Organization for Standardization</i>)
JND	Diferença no limite do observável “JND” (<i>Just Noticeable Difference</i>)
LF	Fração Lateral
MinC	Ministério da Cultura do Brasil
NB	Norma brasileira
NPS	Nível de pressão sonora
ODEON	Software de Simulações Acústicas
<i>IR</i>	Resposta Impulso (<i>Impulse Response</i>)
<i>RB</i>	Razão de Baixos
SEDUC	Secretaria Estadual de Educação do Pará
<i>STI</i>	Índice de transmissão da fala (<i>Speech Transmission Index</i>)
TR	Tempo de Reverberação (<i>Reverberation Time</i>)

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A – Valores médios, mínimos e máximos para os parâmetros acústicos, em função da frequência, obtidos por meio de medidas da resposta impulso das salas de aula analisadas para a situação sem mobília	129
Apêndice B – Valores médios, mínimos e máximos para os parâmetros acústicos, em função da frequência, obtidos por meio de medidas da resposta impulso das salas de aula analisadas para a situação com mobília	137
Apêndice C – Valores médios, mínimos e máximos para os parâmetros acústicos, em função da frequência, obtidos por meio de medidas da resposta impulso das salas de aula analisadas (simulação) sem mobília	145
Apêndice D – Valores médios, mínimos e máximos para os parâmetros acústicos, em função da frequência, obtidos por meio de medidas da resposta impulso das salas de aula analisadas (simulação) com mobília	149
Apêndice E – Valores mínimos e máximos simulados para a nova proposta de sala “com mobília”.....	153

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	21
1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Objetivos	23
1.1.1 OBJETIVO GERAL	23
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.2 Organização do estudo.....	24
 CAPÍTULO II	25
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	25
2.1 Acústica de Salas de Aula	25
2.1.1 CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS E GEOMÉTRICAS DOS AMBIENTES INTERNOS	26
2.1.2 CONFORTO ACÚSTICO EM AMBIENTES INTERNOS.....	27
2.1.3 FREQUÊNCIA DE SCHRÖDER.....	28
2.1.4 DIAGRAMA DE BOLT.....	29
2.2 Parâmetros Acústicos	30
2.2.1 TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	30
2.2.2 INTELIGIBILIDADE DA FALA.....	33
2.2.3 TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL	35
2.2.4 CLAREZA.....	35
2.2.5 DEFINIÇÃO.....	36
2.3 Simulação acústica de salas.....	36
2.3.1 ASPECTOS GERAIS.....	36
2.3.2 MÉTODOS COMPUTACIONAIS.....	37
2.3.3 DIFERENÇA NO LIMITE DO OBSERVÁVEL (JND).....	39
2.3.4 RESPOSTA IMPULSO.....	40
2.3.5 MODELAGEM NUMÉRICA.....	42
 CAPÍTULO III.....	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1 Definição da amostra.....	44
3.2 Descrição das salas.....	46
3.2.1 PAI 01 - SALA DE EVENTOS – E. E. E. M. DR. WALTER JOBIM.....	46
3.2.2 PAP 01 - SALA DE EVENTOS – C. E. PADRE RÔMULO ZANCHI.....	46
3.2.3 PAC 01 – SALA DE VÍDEO – E. E. E. B. P. MARGARIDA LOPES.....	47
3.2.4 PAC 02 – SALA DE AULA – E. E. E. B. P. MARGARIDA LOPES.....	
3.2.5 CPA 01 – SALA DE VÍDEO – C. E. P. EDNA MAY CARDOSO.....	48
3.2.6 CPA 02 – SALA DE AULA – C. E. P. EDNA MAY CARDOSO.....	48

3.2.7	CPB 01 – SALA DE VÍDEO – E. B. E. DR. PAULO LAUDA.....	49
3.3	Medições acústicas das salas.....	49
3.4	Desenvolvimento de modelos acústicos virtuais.....	50
3.5	Simulações Acústicas.....	51
CAPÍTULO IV.....		53
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS.....	53
4.1	Valores utilizados para análise do estudo.....	53
4.2	Comparação dos parâmetros acústicos medidos e simulados na situação de sala sem mobília.....	58
4.2.2	Tempo de Reverberação (TR).....	58
4.2.3	Tempo de decaimento inicial (<i>EDT</i>).....	63
4.2.4	Clareza (<i>C₈₀</i>).....	68
4.2.5	Definição (<i>D₅₀</i>).....	72
4.3	Comparação dos parâmetros acústicos medidos e simulados na situação de sala com mobília.....	76
4.3.1	Tempo de Reverberação (TR).....	76
4.3.2	Tempo de decaimento inicial (<i>EDT</i>).....	80
4.3.3	Clareza (<i>C₈₀</i>).....	83
4.3.4	Definição (<i>D₅₀</i>).....	87
4.4	Comparação do STI medidos e simulados na situação de sala sem mobília e com mobília.....	91
4.5	Elaboração do Diagrama de Bolt a partir dos cálculos das salas analisadas.....	93
CAPÍTULO V.....		95
5	PROPOSTA TIPOLÓGICA ACÚSTICO-ARQUITETÔNICA.....	95
5.1	Os espaços para o ensino.....	95
5.2	Proposta tipológica da sala de aula.....	96
5.3	Fundamentação da proposta acústico-arquitetônica para salas de aula para o ensino da música.....	106
5.4	Simulação acústica da tipologia proposta de sala para música.....	110
5.4.1	Tempo de Reverberação (TR).....	113
5.4.2	Tempo de decaimento inicial (<i>EDT</i>).....	113
5.4.3	Clareza (<i>C₈₀</i>).....	114
5.4.4	Definição (<i>D₅₀</i>).....	115
5.4.5	Índice de Transmissão da Fala (STI).....	116
CAPÍTULO VI.....		117
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	117
6.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	120
REFERÊNCIAS/APÊNDICES.....		122

1 INTRODUÇÃO

O estudo da acústica arquitetônica, por meio da acústica de salas, de maneira geral está vinculado à importância do som dentro de um ambiente. Sendo assim, as características arquitetônicas do espaço interno determinam o comportamento acústico desse ambiente. O estudo da acústica de salas data do início do século XX, quando os modelos matemáticos usados para descrever o fenômeno acústico ainda eram poucos e a construção de grandes salas de teatro ou para apresentação musical ainda era tratada de forma empírica (TÔRRES, 2008).

As condições acústicas inadequadas de um recinto podem afetar significativamente a inteligibilidade da comunicação verbal. Evidenciam-se inúmeros casos de aparecimento de problemas no aparelho fonador de professores, ao longo dos anos, pela necessidade de falar em uma intensidade mais alta, com o objetivo de se fazer entender pelos alunos no ambiente de ensino (HODGSON; WONG, 2009).

A busca das melhores condições acústicas dos recintos, garantindo-lhes um tempo ótimo de reverberação e uma adequada distribuição do som está relacionada ao condicionamento acústico, e este está fundamentado em três teorias distintas para tentar solucionar problemas acústicos em recintos, a Acústica Geométrica, a Acústica Estatística e a Acústica Ondulatória.

Gomes (1998) destaca que na área da acústica de salas são desenvolvidas várias concepções de projeto, sendo a Acústica Geométrica uma dessas formas, onde se supõe que o som, em frequências mais altas, se comporta aproximadamente como raios de luz, com partes refletidas e partes absorvidas no limite entre certo meio de propagação e outro. Nesse sentido, alguns estudos já foram realizados em modelos de salas, com escalas reduzidas, usando a própria luz como representação da fonte sonora, e usando os métodos computacionais para auxiliar o método de traçado de raios.

Tratando-se de métodos computacionais, uma ferramenta de caráter primordial existente é a simulação acústica, utilizada para simular o comportamento

acústico de uma sala e dessa forma obter informações de seu comportamento sonoro.

Entre as vantagens oriundas da simulação acústica, cita-se a diversidade de materiais arquitetônicos que podem ser empregados no ambiente simulado antes de sua execução, proporcionando a previsão de comportamento do ambiente simulado do ponto de vista acústico.

Os resultados obtidos, por meio desta previsão, contribuem para avaliar as maneiras pontuais de intervenção, a fim de melhorar as condições acústicas do recinto, propiciando, assim, um espaço acusticamente viável para atender as necessidades propostas em sua concepção ou uso.

Destacando a previsão do comportamento acústico dos ambientes através de simulações acústicas, Vorländer (2008) evidencia que a expansão da capacidade de processadores nos computadores fez com que os sistemas computacionais se tornassem capazes de fazer as mais diversas e complexas simulações da propagação de ondas sonoras.

Por meio da simulação acústica pode-se obter a resposta impulsiva (RI) do ambiente, sendo que esta pode ser representada por uma sequência de valores de energia em função do tempo ou pressão sonora, ou do tempo, dependendo do algoritmo de simulação adotado. Com as informações da RI pode-se calcular inúmeros parâmetros acústicos existentes.

Os parâmetros acústicos resultantes das simulações acústicas, como o Tempo de Reverberação (TR), o Tempo de Decaimento Inicial (*EDT*), a Clareza (C_{80}), a Definição (D_{50}) e o Índice de Transmissão da Fala (*STI*), são responsáveis pela identificação das condições acústicas do modelo geométrico de uma sala de aula, buscando contribuir para a qualidade acústica em ambientes/espacos.

Nesse contexto, encontra-se o projeto Arquiteturas para um Brasil Musical (ABRAMUS), o qual contribui para a inserção do ensino da música nas escolas de educação básica, de forma eficaz e adequada, atendendo a Lei nº 11.769 de 2008, que torna obrigatória a inclusão da música nos currículos escolares. O projeto ABRAMUS foi financiado no âmbito do Pró-Cultura, lançado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pesquisadores de Ensino Superior (CAPES) e pelo Ministério da Cultura (CAPES/MinC).

Para a elaboração dos modelos geométricos de salas de aula tomaram-se como base as salas de aula de escolas pertencentes à rede estadual de educação

básica situadas na cidade de Santa Maria - RS - Brasil, que apresentam diferentes tipologias construtivas e que fazem parte do projeto ABRAMUS, num universo de cinco escolas nas quais foram selecionados sete ambientes destinados ao ensino da música.

A implantação da Lei nº 11.769 de 2008 traz consigo exigências relacionadas à qualificação profissional dos professores, e também, de ordem material, pois a adequação dos espaços físicos e arquitetônicos deve ser uma condição indispensável para a qualidade da educação musical dos estudantes.

1.1 Objetivos

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma tipologia de sala de aula para o ensino da música a partir de modelos acústicos virtuais utilizando simulação computacional.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Desenvolver modelos geométricos de salas de aula para o ensino da música utilizando-se como dados de entrada: dimensões, formatos e elementos usualmente utilizados nestes ambientes.
- Desenvolver modelos acústicos virtuais representativos destas salas de aula para o ensino da música.
- Avaliar os parâmetros acústicos relacionados ao tempo de reverberação a partir da resposta impulso dos modelos acústicos virtuais das salas.

- Propor uma tipologia funcional de sala de aula para o ensino da música baseado nos resultados obtidos na simulação acústica.

1.2 Organização do estudo

Este estudo está organizado em seis capítulos, onde o primeiro trata de uma introdução à acústica arquitetônica através da acústica de salas. Aborda-se, também, a simulação acústica que é o foco do trabalho. O segundo capítulo contém a fundamentação teórica deste estudo. O terceiro capítulo contém os métodos e procedimentos para obtenção dos dados experimentais dos ambientes destinados à prática musical, detalhando a metodologia necessária para a realização deste estudo. O quarto capítulo traz os resultados obtidos e discussão dos mesmos. O quinto capítulo contém a proposta tipológica acústico-arquitetônica e o sexto capítulo contém as conclusões do estudo realizado e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo destina-se à abordagem de relevantes conceitos da acústica e da revisão dos principais tópicos encontrados e necessários para a elucidação dos fenômenos que ocorrem dentro de uma sala de ensino com as seguintes temáticas: acústica de salas de aula (fala e música) e simulação acústica.

2.1 Acústica de salas de aula

Em se tratando de som, é notório destacar que existem três sistemas conectados (fonte, meio e receptor), sendo que a fonte é o elemento gerador do som, capaz de emitir certa quantidade de energia que é transmitida através de variações de pressão, devido à vibração das moléculas de um meio elástico (ar e água).

As sucessivas colisões de moléculas produzem uma série de compressões e rarefações dando origem a ondas sonoras, que se estiverem na faixa de frequência, entre 20 Hertz (Hz) a 20.000 Hz, serão consideradas audíveis (BISTAFA, 2006; LONG, 2006).

A onda sonora é imperceptível ao ouvido humano, quando é caracterizada como infrassom ou como ultrassom, ocupando frequências respectivamente inferiores a 20 Hz e superiores a 20.000 Hz (CARVALHO, 2010).

Destaca-se, também, que o meio transmite a onda sonora em todas as direções, e são as características deste meio que determinam a velocidade de propagação do som. O receptor é quem detecta, registra ou, em geral, é afetado de alguma forma específica pelo que é transmitido.

2.1.1 CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS E GEOMÉTRICAS DOS AMBIENTES INTERNOS

Os parâmetros arquitetônicos, como volume, dimensões e forma, contribuem para a composição do espaço de salas de aula. As atividades desenvolvidas nas mesmas envolvem muito mais que escutar e escrever. Por isso, a forma geométrica deve ser projetada de maneira a atender um maior número de atividades, sem comprometer a comunicação entre professor e aluno.

Skålevik (2011) descreve que em muitos casos, o consultor da área de acústica recebe a tarefa de fornecer ou melhorar a acústica de um espaço, para fala ou música, quando a geometria do espaço já é definida e os materiais acústicos não podem ser livremente escolhidos.

Portanto, considerando a possibilidade de projetar um ambiente acusticamente adequado, no que se refere à concepção geométrica de uma sala, Losso (2003) ressalta a importância de se evitar a formação de ondas estacionárias, pois estas afetam a distribuição sonora dentro da sala, prejudicando a percepção por parte dos ouvintes.

Dessa maneira, é necessário evitar superfícies rígidas e paralelas, que levam a múltiplas reflexões e formam ondas estacionárias. Deve-se também maximizar as reflexões iniciais e evitar o aumento da energia tardia, projetando-se formas geométricas acusticamente favoráveis.

Assim, para obter condições acústicas adequadas para a palavra falada, o desempenho acústico de salas de aula deverá ser levado em consideração desde o início da concepção do projeto arquitetônico.

A garantia do sucesso da adequação acústica de um ambiente pode ser comprometida por vários fatores, um deles está relacionado ao uso deste ambiente, que em muitos casos, tem seu uso diversificado em instrumento e voz. Rocha (2010) cita que salas de música são projetadas para acomodar mais de um tipo de conjunto musical, como uma sala que deva ser utilizada para coral e grupos de sopro.

2.1.2 O CONFORTO ACÚSTICO EM AMBIENTES INTERNOS

A adequação acústica em ambientes internos é um fator de grande relevância, quando se busca condições favoráveis para o conforto ambiental, dividindo as preocupações com adequações relacionadas ao conforto térmico, à distribuição espacial, a localização, ao entorno e aos materiais que compõem um ambiente.

A adequação acústica em ambientes internos torna-se uma preocupação, ainda maior, quando o local de interesse se tratar de uma sala de aula. Para Kowaltowski et al. (2002) a acústica de salas de aula é o fator mais problemático para se atingir níveis favoráveis de conforto em um ambiente. Ainda os mesmos autores afirmam que o conforto acústico é o fator que contribui mais expressivamente para o aumento ou não do nível de aprendizado.

Com o objetivo de investigar o conforto ambiental de edificações escolares, Kowaltowski et al. (2002) realizaram uma pesquisa junto às escolas estaduais da região de Campinas – SP, através de medições acústicas, observações técnicas e aplicação de questionários aos usuários das escolas, demonstrando que a satisfação dos usuários, relativos aos aspectos de conforto, era bastante neutra, já que a percepção do ambiente físico foi constatada sujeita a influências pelos interesses pessoais, sociais e profissionais.

Ogasawara (2006) avaliou o conforto acústico em oito salas destinadas a apresentações teatrais da cidade de Campinas, SP através de elementos do projeto arquitetônico e de parâmetros acústicos que influenciavam a qualidade destes espaços quanto à palavra falada, constatando que todas as salas avaliadas garantiam uma transmissão sonora eficiente, principalmente nas médias e altas frequências, sendo a principal fonte de ruído e fontes interiores da edificação.

Uma das principais preocupações acústica em salas de aula é a comunicação verbal. Desta maneira, também, é significativo perceber o nível de ruído que uma sala de aula possa conter, para que esse ambiente possa proporcionar uma adequada comunicação entre professores, músicos e alunos.

Observa-se que os efeitos combinados de ruído excessivo no ambiente de ensino e, neles, a reverberação, interferem no reconhecimento da fala e resultam em

péssimas condições de aprendizado, comprometendo significativamente a qualidade do ensino.

Diante dessa situação, o Instituto Americano de Normas (“*America National Standards Institute*” – ANSI) teve aprovados, no ano de 2002, padrões de desempenho e recomendações normativas visando à melhoria dos ambientes acústicos. Dessa forma, cria-se a norma ANSI S12.60: “*acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools*” (2002), que se complementa com a redução do ruído externo e otimização de espaço de ensino-aprendizagem.

2.1.3 FREQUÊNCIA DE SCHRÖDER

A frequência de Schröder ou frequência de corte da sala é o ponto de transição entre uma região onde predominam os modos normais das salas, e uma região, onde há o predomínio da difusão sonora (LONG, 2006), conforme mostra a figura 2.1. Abaixo da frequência de Schröder, deve-se trabalhar com a acústica ondulatória, e acima desta, com a acústica estatística e geométrica.

A equação (2.1) representa esta frequência:

$$f_s = 2000 \sqrt{T/V} \quad (2.1)$$

onde:

V é o volume da sala em m³

T é o tempo de reverberação, em s.

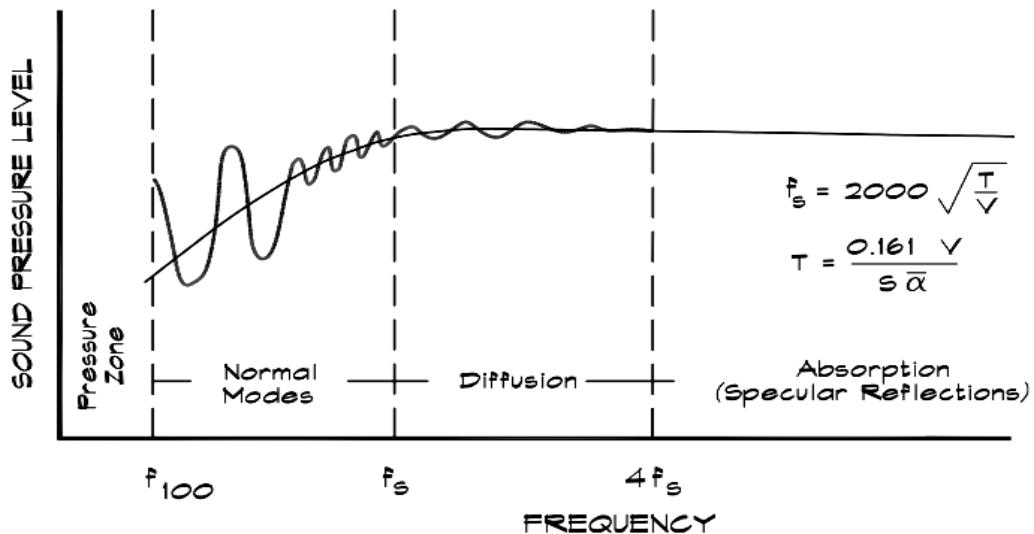


Figura 2.1 – Frequência de Schröder.

Fonte: Long (2006).

2.1.4 DIAGRAMA DE BOLT

Vários autores oferecem sugestões sobre as dimensões preferenciais de salas de audição e estúdios, sendo que estas sugestões têm como base os dados referentes às dimensões das salas. Bolt sugere relações preferenciais entre as dimensões de uma sala retangular através do Diagrama de Bolt (figura 2.2).

Segundo Long (2006), as recomendações mostradas no Diagrama de Bolt são mais úteis na concepção de câmaras de reverberação usadas para testes acústicos.

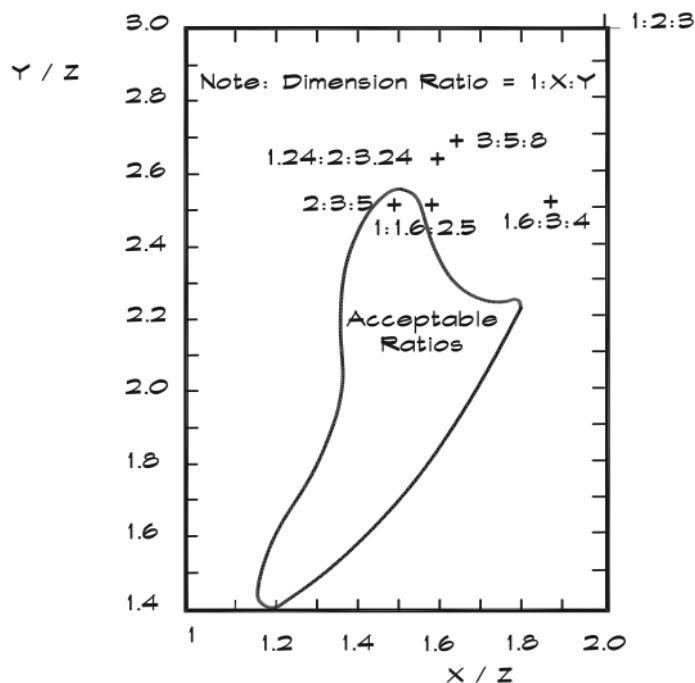


Figura 2.2 – Diagrama de Bolt, considerando a altura do teto normalizada.

Fonte: Long (2006).

2.2 Parâmetros acústicos

Os parâmetros acústicos utilizados neste estudo foram: o tempo de reverberação, a inteligibilidade da fala, tempo de decaimento inicial, clareza e definição.

2.2.1 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O Tempo de Reverberação (TR, do inglês “reverberation time”) é um dos mais conhecidos parâmetros acústicos e considerado um dos mais importantes no estudo de salas de aula. É definido como sendo o intervalo de tempo (em segundos) que o nível de pressão sonora leva para decair 60 dB a partir da interrupção da fonte.

Bistafa e Bradley (2000b) apresentam a definição mais amplamente trabalhada para o cálculo do TR, a equação de Sabine (equação 2.2).

$$\frac{TR = \underline{0,163} V}{A} \quad (2.2)$$

onde:

TR: Tempo de Reverberação [s]

V: Volume do compartimento em estudo [m^3]

A: Área de absorção sonora equivalente [m^2]

Hodgson e Nosal (2001) consideram o TR igual a zero segundos, como sendo o valor ideal para ouvintes que se encontram perto da fonte sonora, e, para aqueles que se encontram longe, deve ser diferente de zero, onde ocorrem as primeiras reflexões.

De acordo com Bradley e Sato (2003), a prática comum de se enfocar somente o tempo de reverberação como parâmetro de projeto acústico primário pode distrair dos detalhes mais importantes da acústica de salas para o discurso, sendo que a obtenção do TR ideal não deve ser pensada como o principal objetivo do projeto, mas como algo que é consequência da necessidade de se maximizar reflexões iniciais.

Objetivando a obtenção de dados sobre o melhor TR para os ambientes, Lane e Mikeska (1955) realizaram um estudo sobre as exigências e/ou requisitos acústicos de salas de ensino e de prática da música. O problema, em si, era a insatisfação com a acústica de salas de prática da música, ambiente onde foi implantado painel extra de fibra de vidro para realizar a pesquisa. Os resultados mostraram a satisfação dos músicos em relação às condições anteriores à colocação do painel.

A figura 2.3 apresenta os tempos de reverberação obtidos nas salas analisadas, de acordo com o julgamento dos músicos.

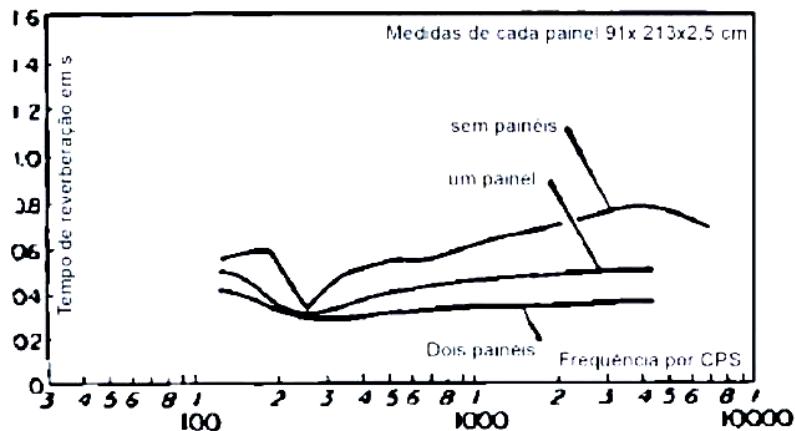


Figura 2.3 – TR – Sala de prática musical – Universidade do Texas.

Fonte: Lane e Mikeska (1955).

Os valores de TR médios adequados para salas de prática e ensino musicais sugeridos por diversos pesquisadores foram organizados por Rocha (2010), conforme apresenta a tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Comparativo entre TR médios considerados adequados para salas de prática e ensino musical.

Pesquisador	Prática / ensaio conjunto	Prática / ensaio individual	Ensino / teoria musical
Lane e Mikeska (1955)	-	0,4 a 0,7 s	0,55 a 0,8 s
Lamberty (1980)	-	0,5 a 0,9 s	-
Cohen (1992)	0,3 a 0,5 s	-	-
BB93 (1993)	0,6 a 1,2 s	< 0,8 s	-
Ryherd (2008)	0,8 a 1,0 s	-	0,4 a 0,5 s
Osaki e Schmid (2009)	0,5 a 1,0 s	0,5 a 1,0 s	0,4 a 0,8 s

Fonte: organizado por Rocha (2010).

Carvalho (2010) destaca que volumes impróprios às destinações dos ambientes dificultam as possíveis adaptações necessárias no mesmo, para melhorar o TR, requerendo o uso substancial de materiais absorventes e/ou refletores, conforme tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Valores de volume *per capita*, conforme a destinação do recinto.

Ambiente	V mínimo (m ³)	V bom (m ³)	V máximo (m ³)
Igrejas católicas	5,1	8,5	12,0
Outras igrejas	5,1	7,2	9,1
Salas de concertos	6,2	7,8	10,8
Casas de ópera	4,5	5,7	7,4
Cinemas	2,8	3,5	5,6
Salas de conferência	2,3	3,1	4,3
Salas de uso múltiplo	2,8	3,5	5,6

Fonte: Carvalho (2010).

Morini et al. (2005) implementaram rotinas para cálculo do TR para salas de ensino de música fechadas, comparando este tempo com dados experimentais, visando corrigir e ajustar o TR das mesmas. De acordo com o estudo, para uma adequada condição acústica, essa salas fechadas deveriam apresentar um TR na ordem de 0,5 segundos e um nível de pressão sonora (NPS), em torno de 45 a 50 dB.

2.2.2 INTELIGIBILIDADE DA FALA

Entende-se como inteligibilidade da fala, (*STI*, do inglês “*speech transmission index*”), a relação entre o número de palavras ou sílabas compreendidas e o número de palavras sentenças ou sílabas faladas (NEPOMUCENO, 1994). Quanto maior o STI, maior será a compreensão do sinal acústico emitido.

A Inteligibilidade da fala (*STI*) pode ser excelente, boa, adequada, fraca ou péssima, segundo a norma IEC 60268-16, conforme quadro 2.1.

Valores de STI	IEC 60268-16
0,75 – 1,00	Excelente
0,60 – 0,75	Bom
0,45 - 0,60	Adequado
0,30 – 0,45	Fraco
0,00 – 0,30	Péssimo

Quadro 2.1 – Valores de STI relacionados com a inteligibilidade predita.

Fonte: IEC 60268-16.

Bistafa e Bradley (2000c) observaram que em acústica de salas, um TR, em torno de 0,4 s, torna a inteligibilidade da fala próxima de 100% e que em salas de aula um ruído de fundo não pode ultrapassar um NPS de 25 dB.

Prodi et al. (2010) procuraram por meio de análise, obter uma comunicação oral eficaz e atingir uma inteligibilidade adequada, minimizando o esforço do ouvinte para reconhecer a fala captada. Nessa abordagem, o problema é solucionado através da introdução do conceito de “eficiência de escuta” que é definida como uma combinação da precisão da inteligibilidade e do esforço despendido na realização do objetivo.

Entende-se que a fala é o grande condutor de informações de aprendizado, pois é, por meio deste canal, que o professor se comunica em sala de aula. Portanto, se a fala se apresentar distorcida ou com sinal degradado por interferências externas poderá prejudicar a compreensão.

Deve-se ressaltar que a reverberação ocorre dentro de um espaço fechado, e tanto a reverberação como o ruído controlam a inteligibilidade da fala em uma sala (DREOSSI; SANTOS, 2005).

Yang e Bradley (2009) apresentam novas medidas de inteligibilidade da fala. Em condições representativas em salas de aula do ensino fundamental, foi gravado um discurso e simulado, e, posteriormente, foi aplicado bi-auralmente aos ouvintes. Para as constantes de sinal-ruído, os escores de inteligibilidade aumentavam com a diminuição do TR variado, para um nível de ruído constante. O efeito variado pode ser usado para ajudar a determinar as condições ideais para a comunicação de voz em salas de aula para jovens.

Bradley e Sato (2008) efetuaram medições acústicas e testes de inteligibilidade em salas de aula do ensino fundamental. Os testes foram realizados em quarenta e uma salas de aula em doze escolas diferentes, com crianças de 8 a 11 anos de idade e os resultados indicaram que 15 dB na relação sinal-ruído não é adequado para as crianças mais novas.

Bistafa e Bradley (2000a) descrevem que a relação entre os valores de energia sonora e a inteligibilidade da fala emprega conceitos derivados dos resultados experimentais no início dos anos 50 realizados por Haas (1972). Estes resultados, usando sons da fala, mostram que as reflexões que chegam ao ouvinte, com atraso, contanto que até 40 ms (milissegundos), após o som direto, não são percebidas como ecos.

2.2.3 TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL

O Tempo de Decaimento Inicial (*EDT*, do inglês “*early decay time*”), é determinado como tempo de decaimento dos primeiros 10 decibéis (dB) do TR, portanto é composto das primeiras reflexões que chegam ao ponto receptor, sendo então sensíveis as superfícies dos ambientes.

Segundo Losso (2003) o *EDT*, é um importante parâmetro acústico de avaliação de um ambiente, pois ele considera a energia sonora contida no início, sendo esta energia importante para a melhor inteligibilidade. De acordo com Hodgson (2001), o *EDT* depende das dimensões da sala, seus tamanhos e formas, e também, de absorção sonora, considerando quantidade e distribuição.

2.2.4 CLAREZA

A Clareza (C_{50} ou C_{80} , em inglês “*clarity*”), é definida como uma razão entre a energia do trecho inicial do som e a energia do som reverberante (razão expressa em dB) (GOMES, 1998). Este fator elucida a inteligibilidade das articulações dos

sons e corresponde a razão entre a energia que se direciona ao ouvinte nos primeiros 50 ms, para C_{50} ou 80 ms, para C_{80} .

A clareza da voz (C_{50}) é usada para as salas dedicadas à palavra e a clareza musical (C_{80}) é usada para salas dedicadas à música, conforme equação 2.3.

$$C_{80} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int [p^2(t)] dt}{\int [p^2(t)] dt} \right\} (\text{dB}) \quad (2.3)$$

sendo $p^2(t)$ a função de decaimento de pressão sonora da sala [N/m^2].

2.2.5 DEFINIÇÃO

Kuttruff (1991) afirma que a Definição (D_{50} , em inglês “*definition*”) é obtida por meio da razão entre o valor de energia do gráfico de decaimento dos primeiros 50 ms do TR. Quanto mais próximo do valor de 100%, julga-se melhor a definição do estímulo sonoro, da palavra falada, conforme equação 2.4.

$$D_{50} = \left\{ \frac{\int_{0}^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{0}^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt} \right\} 100\% \quad (2.4)$$

onde

$p(t)$ é o valor da pressão acústica em um dado instante, em [N/m^2].

Oliveira (2006) destaca que Definição é a razão entre a energia que chega ao receptor nos primeiros 50 milissegundos pela taxa de decaimento sonoro total. Essa energia, que chega ao ouvinte concentrada nos primeiros 50 ms, ajuda a reforçar a voz do orador. Assim, é representada por D_{50} e os valores correspondidos ficam em torno de 0 a 1 ou pode ser representado em porcentagem de 0 a 100 %.

2.3 Simulação acústica de salas

2.3.1 ASPECTOS GERAIS

De acordo com Long (2006), o surgimento de computadores pequenos no início do século XXI tornou possível a criação de modelos matemáticos de espaços acústicos, e, por consequência disto, a reprodução sonora de um ambiente antes da sua construção. As simulações acústicas têm papel fundamental no estudo da acústica arquitetônica, pois avaliam as condições sonoras de um ambiente e apontam formas, para que o mesmo venha a estar em condições aptas para sua finalidade.

Nos programas utilizados para simulações acústicas, a geometria é inserida através da determinação de superfícies geradas por coordenadas cartesianas. Após, são inseridas as descrições dos coeficientes de absorção sonora para cada superfície gerada pela inserção das coordenadas.

2.3.2 MÉTODOS COMPUTACIONAIS

O método da imagem da fonte mostra o espelhamento geométrico produzido, quando uma fonte sonora emite um som que incide sobre uma superfície. Pode-se observar o comportamento do raio sonoro, a partir de composições de imagens, de acordo com as reflexões. Este método é eficiente para a obtenção da resposta impulsiva, porém, não mais, quando aplicado em superfícies curvas. Lehnert (1993) diz que se pode usar uma aproximação das superfícies curvas, mas isto prejudica a técnica, quando usada para a auralização.

O método da transição de energia substitui as superfícies por elementos discretizados por “nós”, isto é, em elementos, que refletem energia e possuem um certo espalhamento, que transfere a energia da direção especular.

Um método eficiente é o método da fonte secundária, disponível e utilizado no programa computacional ODEON. De acordo com Christensen (2009), existem dois métodos de cálculo para o tempo de reverberação no programa ODEON, os métodos de estimativa global de tempos de reverberação e estimativas de tempo de reverberação para uma sala completa, com uma dada posição de origem selecionada, conforme quadro 2.2.

Estimativa Rápida (“<i>quick estimate</i>”)	Estimativa Global (“<i>global estimate</i>”)
Método rápido encontra-se na lista de materiais ODEON, baseado na fórmula de Sabine, Eyring e Arau-Puchades, assume condição de campo difuso.	Método preciso, não elabora suposições sobre o campo difuso, o TR previsto por estimativa global é mais confiável, desde que inseridos os coeficientes de dispersão.

Quadro 2.2 – Resumo dos métodos de cálculos.

Fonte: Christensen (2009).

Zeng et al. (2006) explicam que o *software* ODEON faz uso do método de cálculo híbrido de origem, com um método de cálculo de traçado de raios (em inglês *ray-tracing*).

2.3.3 DIFERENÇA NO LIMITE DO OBSERVÁVEL (*Just Noticeable Difference*)

Marros (2011) descreve que o *Just Noticeable Difference* (*JND*) refere-se ao valor ao qual podem ser comparados dois dados; se, nesse caso, a diferença entre este valor é menor do que o valor do *JND*, para determinado parâmetro acústico, então, é possível considerá-lo subjetivamente imperceptível.

Também foram padronizadas as margens de tolerância chamadas de Diferença do limiar do observável (em inglês *Just Noticeable Difference* – *JND*), constituindo-se, dessa forma, em uma valorosa ferramenta para a qualidade dos

valores calculados. De acordo com a ISO 3382 (2009), os valores são normalizados para a frequência de 500 a 1000 Hz, valores para impressão subjetiva do ouvinte.

Christensen (2009) comenta que o *JND* é primordial no comparativo entre valores medidos experimentalmente e simulados, que servirá também, como base para a determinação da precisão do dado modelo geométrico levantado. Na tabela 2.3 são apresentados valores para parâmetros acústicos, de acordo com a percepção do ouvinte.

Tabela 2.3 – Valores de parâmetros acústicos, de acordo com a percepção do ouvinte.

Aspecto subjetivo	Parâmetro objetivo	Frequências médias (Hz)	<i>JND</i>
Reverberação	TR	500 a 1.000	5%
Percepção de Reverberação	<i>EDT</i>	500 a 1.000	5%
Clareza	<i>C₈₀</i>	500 a 1.000	1 dB
Definição	<i>D₅₀</i>	500 a 1.000	0,05

Fonte: Christensen (2009); ISO 3382 (2009).

Bradley (2011) alerta que é difícil utilizar valores de laboratório atualmente disponíveis de *JND*'s, para os problemas de interpretação de experiências ouvidos em salões em tempo real. Por exemplo, quando nos movemos de um lugar para outro, muitos aspectos diferentes de campos sonoros variam. Nesse caso, sob tais condições reais, em que inúmeras características variam não se pode saber o que são as menores alterações que podemos detectar, para fins práticos, essas diferenças seriam as menores alterações que são realmente significativas.

Vorländer (1995) organizou um comparativo entre inúmeros programas de simulação acústica, baseados em métodos de raios acústicos ou fonte imagem, como dBRay, CATT, EPIDAURE, RAMSETE, RAYNOISE, RAYPID, ODEON, sendo que os usuários foram os próprios autores destes programas. Chegou-se ao resultado que, em auditório, encontraram-se diferenças acentuadas, tanto na estimativa dos parâmetros de entrada quanto nos resultados. Com isso, apenas três

dos quatorze programas participantes geraram resultados coerentes com as medições realizadas em sala real existente.

2.3.4 RESPOSTA IMPULSO

As simulações acústicas da resposta/impulso (RI) em salas podem ser realizadas, por meio de métodos geométricos baseados na acústica geométrica. Desta forma, programas de simulações acústicas utilizam-se dessas ferramentas para simular o comportamento sonoro nos ambientes (FARIA, 2005).

O método desenvolvido para medições usa os impulsos para a excitação dos ambientes, sendo integrado inversamente pelas respostas destes impulsos. Desse modo, surge a equação em que é possível obter tempos de reverberação com mais precisão (SCHROEDER; VORLÄNDER, 2007).

$$\langle s^2(t) \rangle = Nb \cdot \int r^2(t-\tau) d\tau \quad (2.5)$$

onde:

$\langle s^2(t) \rangle$: média de respostas de todas as curvas de decaimento na banda N.

$r^2(t - \tau)$: respostas impulsivas para a banda do sinal de excitação considerando todos os sistemas interligados em série (ambiente).

Nb : bandas de frequência de decaimento.

Para Vorländer e Bietz (1994 apud SANTOS, 2011), a RI é definida como função temporal de pressão sonora de um ambiente acústico, coletado, por meio da excitação do ambiente como função similar ao delta de Dirac.

De acordo com Vorländer (2008), a resposta da excitação da sala, com uma resposta/impulso, serve como base para a interpretação acústica deste recinto. Um exemplo típico de RI é ilustrado na figura 2.4.

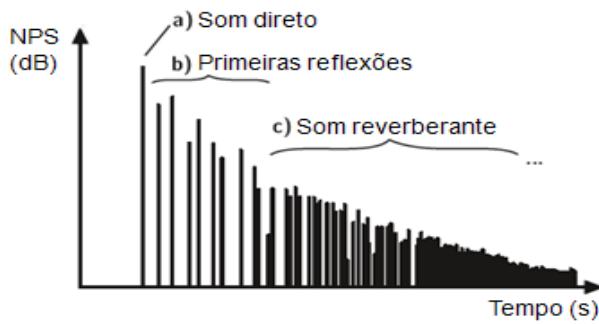


Figura 2.4 – Ilustração esquemática (som direto, primeiras reflexões e som reverberante).

Fonte: Vorländer (2008).

Pereira (2010) cita que a resposta impulsiva fornece uma descrição acerca das características acústicas da sala da qual podem ser derivados todos os parâmetros acústicos considerados de maior relevância na caracterização acústica do ambiente, como *EDT*, *D₅₀* e *loudness*.

Santos (2011) acrescenta que com a medição da RI da sala obtém-se a função/transferência da sala, e, a partir deste momento, os parâmetros correlacionados com a distribuição de energia interna e seus parâmetros subjetivos correlatos, como exemplo de clareza (*C₈₀*), a reverberância (*EDT*), fração lateral (*LF*), razão de baixos (*RB*) e brilho (*Br*).

Kuttruff (1991) destaca que a RI traz consigo informações relevantes de suas propriedades acústicas de salas, por isso a resposta/impulso pode trazer as características de direção e espacialidade entre duas posições de fonte e microfone.

De acordo com Gade (2007), a fonte básica de informações sobre propriedades do campo sonoro é o sinal de RI. Este sinal, no momento em que é gravado com a técnica multicanal preserva informações sobre a direção de incidência e fornece informações relevantes sobre acústica de uma determinada sala em duas posições de fonte específica.

2.3.5 MODELAGEM NUMÉRICA

Santos (2011) descreve que a predição correta dos espaços não pode ser atingida utilizando-se apenas métodos tradicionais como o método de traçado de raios, o das imagens ou das fontes virtuais, o de traçado de cones ou de pirâmides e o de transição de energia, e sim, combinações desses para a criação de novos modelos de simulação, que são descritos como métodos híbridos. No quadro 2.3 é apresentado um resumo dos métodos e suas características.

Método do traçado de raios	Algoritmo que tem como base a geometria espacial que busca traçar um caminho de raios acústicos da fonte até o receptor.
Método da fonte imagem	Método robusto para obtenção da RI, porém deixa de ser robusto em superfícies curvas.
Método do traçado de pirâmides	Possui como ponto principal o traçado de feixes piramidais refletidos pelas superfícies.
Uso da transição de energia	Todas as superfícies podem ser discretizadas em elementos que refletem a energia sonora.
Solução numérica da equação da onda	Discretizam as superfícies e volumes em elementos menores resolvendo a equação para cada elemento.
Métodos estatísticos	Utilizados para obtenção da cauda reverberante da RI.
Métodos Híbridos	Complementação da RI por métodos geométricos e métodos da resolução da equação da onda.

Quadro 2.3 - Descrição resumida dos métodos numéricos.

Fonte: Santos (2011).

CAPÍTULO III

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

3.1 Definição da amostra

Este trabalho analisou salas de aula para o ensino da música referente a salas de ensino da rede pública de educação básica da cidade de Santa Maria – RS – Brasil. Foram avaliadas sete salas de aula distintas em cinco escolas, onde os dados coletados experimentalmente foram comparados com os dados simulados por meio do programa computacional ODEON.

A cidade de Santa Maria – RS possui 39 escolas da rede estadual. Procurou-se selecionar de forma não probabilística nesse universo de escolas, aquelas com características tipológicas distintas, caracterizadas em cinco tipos, segundo levantamento já realizado em estudo anterior: Polivalente, Industrial, Projeto Próprio, Projeto Nova Escola e Centro Integrado de Educação Profissionalizante (PAIXÃO, 1997). A tabela 3.1 apresenta o nome das escolas e suas tipologias arquitetônicas.

Tabela 3.1 – Descrição das amostras e tipologias arquitetônicas analisadas.

Amostra	Tipologia Arquitetônica
Esc. Est. Ens. Médio Dr. Walter Jobim	Polivalente e Industrial
Col. Est. Padre Rômulo Zanchi	Polivalente e Industrial
Esc. Est. Ed. Básica Prof.^a Margarida Lopes	Projeto Próprio
Col. Est. Prof.^a. Edna May Cardoso	Projeto Nova Escola
Esc. Básica Est. Dr. Paulo Devanier Lauda	Projeto CIEP

Fonte: Baseado em Gaida Viero (2012) a partir do estudo de Paixão (1997).

A descrição das legendas adotadas de acordo com as características tipológicas em sua respectiva escola está apresentada no quadro 3.1.

Legenda	Tipologia/Características	Escola
PAI	Pavimentos em Alvenaria (tipologia industrial)	Escola Estadual de Ensino Médio Dr. Walter Jobim
PAP	Pavimentos em Alvenaria (tipologia polivalente)	Colégio Estadual Padre Rômulo Zanchi
PAC	Pavimentos em Alvenaria Convencional	Escola Estadual de Educação Básica Profª Margarida Lopes
CPA	Concreto Pré-Moldado (tipologia A)	Colégio Estadual Profª Edna May Cardoso
CPB	Concreto Pré-Moldado (tipologia B)	Escola Básica Estadual Dr. Paulo Devanier Lauda

Quadro 3.1 - Descrição da legenda de acordo com a tipologia na respectiva escola.

Fonte: Autor.

Considerando a importância das características geométricas das salas de aula analisadas para a investigação quanto aos aspectos do comportamento acústico, a tabela 3.2 mostra uma descrição de cada sala estudada.

Tabela 3.2 – Descrição das características geométricas das salas analisadas.

Sala	Descrição	Dimensões* (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)	Superfície Total (m ²)
PAI – 01	Sala de Eventos	7,40 x 11,15 x 3,60	82,5	297,0	266,8
PAP – 01	Sala de Eventos	8,80 x 10,65 x 2,80	93,7	264,6	293,5
PAC – 01	Sala de Vídeo	7,60 x 9,00 x 2,50	68,4	171,0	220,1
PAC – 02	Sala de Aula	5,50 x 8,00 x 2,50	44,0	110,00	160,3
CPA – 01	Sala de Vídeo	4,45 x 6,65 x 2,75	29,6	81,4	120,5
CPA – 02	Sala de Aula	4,50 x 7,00 x 2,75	31,5	86,6	132,2
CPB – 01	Sala de Vídeo	5,90 x 7,50 x 3,10	44,3	137,8	151,7

* Largura x Comprimento x Altura

Fonte: Autor.

3.2 Descrição das salas

3.2.1 PAI 01 - SALA DE EVENTOS – E. E. E. M. DR. WALTER JOBIM (figura 3.1)

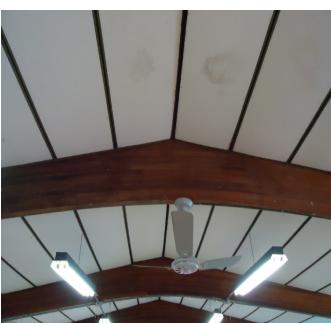


Descrição Materiais	
Parede	Tijolo rebocado
Piso	Madeira parquet
Teto	Laje rebocada
Porta	Madeira compensada
Janela	Vidro simples

Figura 3.1 – Interior da Sala de Eventos, mobiliário e descrição de materiais.

Fonte: Autor.

3.2.2 PAP 01 - SALA DE EVENTOS – C. E. PADRE RÔMULO ZANCHI (figura 3.2)



Descrição Materiais	
Parede	Tijolo rebocado
Piso	Madeira parquet
Teto	Lambri madeira
Porta	Madeira compensada
Janela	Vidro simples

Figura 3.2 – Interior da Sala de Eventos, mobiliário e descrição de materiais.

Fonte: Autor.

3.2.3 PAC 01 – SALA DE VÍDEO – E. E. E. B. P. MARGARIDA LOPES (figura 3.3)



Descrição Materiais	
Parede	Tijolo rebocado
Piso	Madeira parquet
Teto	Laje rebocada
Porta	Madeira compensada
Janela	Vidro simples

Figura 3.3 – Interior da Sala de Vídeo, mobiliário e descrição de materiais.

Fonte: Autor.

3.2.4 PAC 02 – SALA DE AULA – E. E. E. B. P. MARGARIDA LOPES (figura 3.4)



Descrição Materiais	
Parede	Tijolo rebocado
Piso	Madeira parquet
Teto	Laje rebocada
Porta	Madeira compensada
Janela	Vidro simples

Figura 3.4 – Interior da Sala de Aula, mobiliário e descrição de materiais.

Fonte: Autor.

3.2.5 CPA 01 – SALA DE VÍDEO – C. E. P. EDNA MAY CARDOSO (figura 3.5)

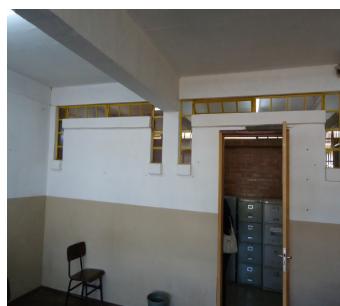


Descrição Materiais	
Parede	Tijolo rebocado
Piso	Madeira parquet
Teto	Laje rebocada
Porta	Madeira compensada
Janela	Vidro simples

Figura 3.5 – Interior da Sala de Vídeo, mobiliário e descrição de materiais.

Fonte: Autor.

3.2.6 CPA 02 – SALA DE AULA – C. E. P. EDNA MAY CARDOSO (figura 3.6)



Descrição Materiais	
Parede	Tijolo rebocado e madeira
Piso	Madeira parquet
Teto	Laje rebocada
Porta	Madeira compensada
Janela	Vidro simples

Figura 3.6 – Interior da Sala de Vídeo, mobiliário e descrição de materiais.

Fonte: Autor.

3.2.7 CPB 01 – SALA DE VÍDEO – E. B. E. DR. PAULO LAUDA (figura 3.7)



Descrição Materiais	
Parede	Tijolo rebocado
Piso	Vinílico
Teto	Laje rebocada
Porta	Madeira compensada
Janela	Vidro simples

Figura 3.7 – Interior da Sala de Vídeo, mobiliário e descrição de materiais.

Fonte: Autor.

3.3 Medições acústicas das salas

As medições acústicas das salas objetivaram medir os parâmetros acústicos dos espaços destinados ao ensino e à aprendizagem de música nas escolas. Essas medições feitas em ambientes fechados e seguiram os procedimentos especificados na norma ISO 3382 de 2009, para as bandas de oitava entre 125 e 4.000 Hz.

O procedimento de medição considerou duas posições de fonte sonora e cinco posições de microfones, distribuídos nas salas respeitando as distâncias mínimas previstas em norma, considerando o tamanho e forma de cada sala em particular. Para cada ponto de medição, foram feitas três medidas. A posição da fonte distou 1,5 m do seu centro até o piso da sala.

Os equipamentos usados nessas medições acústicas foram uma fonte sonora dodecaédrica omnidirecional, tipo 4292; um amplificador de potência, tipo 2716; um medidor de NPS, tipo 2270; um microfone de precisão para incidência aleatória, tipo 4189; um calibrador acústico (94 dB, ref. 20 µPa, para 1.000 Hz), todos da Brüel & Kjaer; uma placa de som Presonus e o programa computacional Dirac para a aquisição e a análise de dados.

Avaliaram-se duas situações distintas para cada sala, sendo a primeira a sala sem mobiliário e, num segundo momento, a sala ocupada com mobiliário. Para

atender a condição de salas sem mobiliário, foram retirados todos os móveis e objetos que existiam no interior das salas.

Para a condição de ocupação, com mobiliário, as salas eram compostas por elementos comuns como lousa branca, objetos em madeira como mesas, armários ou estantes. As cadeiras ou poltronas variaram, conforme a sala, desde as estofadas em tecido com ou sem braço em fórmica ou as estofadas em couro sintético.

3.4 Desenvolvimento de modelos acústicos virtuais

Os modelos geométricos foram construídos, a partir das informações de medidas e formas geométricas das sete salas, anteriormente citadas, e desenvolvidos por meio do *software* livre denominado *Google Sketchup* (*sketch* significa *esboço* em inglês). O programa é livre e possui como característica a facilidade para a modelagem de estudos de formas e volumes em três dimensões.

As informações das características geométricas das sete salas analisadas, como suas dimensões e formas, foram medidas *in situ* e devidamente inseridas no modelo. Os arquivos foram exportados do *software* livre *Google Sketchup*, para a ferramenta computacional *software ODEON* (Departamento de Tecnologia Acústica da Universidade Técnica da Dinamarca), que possui modelagem baseada em algoritmo híbrido, combinando o método de fontes virtuais e o método de traçado de raios.

Com os modelos geométricos concluídos e exportados para o *software* *ODEON* foram aplicados os materiais arquitetônicos, de acordo com a real situação das sete salas, por meio da ferramenta *Material List* (biblioteca de materiais), a qual disponibiliza aos usuários do programa diversos materiais associados ao coeficiente de absorção sonora em função da frequência, entre 63 Hz e 8000 Hz.

Os demais materiais componentes das salas estudadas que não pertenciam à lista da biblioteca de materiais foram retirados dos resultados dos ensaios experimentais, realizados em câmara reverberante, da absorção sonora de materiais comuns nas salas estudadas.

Para uma melhor descrição dos procedimentos que foram adotados nessa etapa, a figura 3.8 apresenta os passos aos quais foram submetidos os modelos geométricos para a efetivação da simulação acústica descrita.

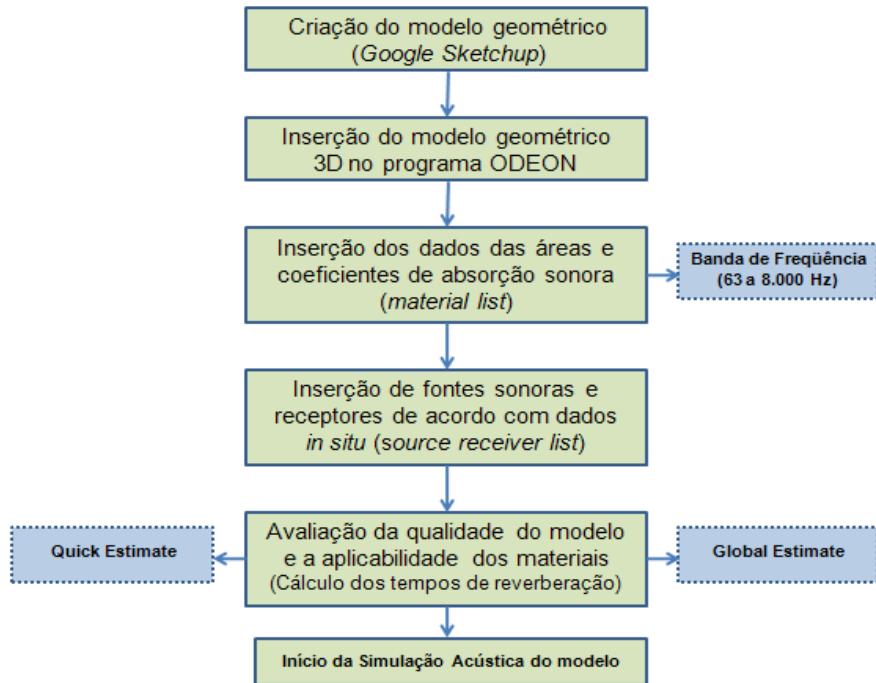


Figura 3.8 – Procedimento Ilustrativo do processo de simulação acústica.

Fonte: Autor.

3.5 Simulação acústica

Para a definição das simulações foi de suma importância a utilização de parâmetros acústicos de cálculo adequados, pois estes são definidos pelo programa ODEON 10.0. Foram escolhidos apenas os parâmetros essenciais (EDT , C_{80} , D_{50} e TR , STI).

A definição do comprimento da RI foi uma das etapas essenciais para o desenvolvimento dos modelos no programa ODEON 10.0 e esse valor de comprimento deve cobrir pelo menos 2/3 da curva de decaimento, portanto, estar próximo do TR estimado. Dessa forma foi especificado o comprimento da RI das

sete salas analisadas, por meio dos valores medidos de TR obtidos experimentalmente.

As simulações foram divididas em duas etapas, sendo que a primeira correspondeu à calibração dos sete modelos analisados, onde os parâmetros simulados foram relacionados ao TR a partir da RI dos sete modelos referentes às salas analisadas.

Na realização das calibrações os posicionamentos de fonte e receptor foram locados, de acordo com o prescrito pela norma ISO 3382-1:2009 e nos mesmos pontos de medições utilizados nas medições realizadas *in situ*.

Na segunda etapa, deu-se a realização da simulação das situações reais das sete salas de ensino.

CAPÍTULO IV

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Este capítulo apresenta e analisa os dados obtidos através de ensaios experimentais dos parâmetros acústicos *in situ* das sete salas localizadas em escolas estaduais de Santa Maria – RS e as simulações destes ambientes na situação sem mobília e com mobília. Também são apresentados e analisados valores de *JND* e do estudo geométrico de Bolt (1946).

A apresentação dos dados das salas estudadas foi feita na forma de tabelas, gráficos e análise técnica. Os demais dados descritivos foram detalhados em apêndices. Isto inclui os valores médios, mínimos e máximos para os parâmetros acústicos, em função da frequência, obtidos por meio de medições e simulações para salas sem mobília e com mobília.

4.1 Valores utilizados para análise do estudo

Os materiais aplicados nos modelos computacionais tiveram seus respectivos coeficientes de absorção sonora retirados do banco de dados do ODEON, da norma NBR12179 (1992) (tratamento acústico em recintos) e dos resultados experimentais em câmara reverberante, apresentados na Tabela 4.1 em banda de oitava.

Portanto, na sequência deste item, estão relacionados todos os valores que foram utilizados e obtidos através de ensaios experimentais realizados nas escolas estudadas ou em normas, para melhor organização dos resultados visando à análise dos mesmos.

Tabela 4.1 – Materiais aplicados nos modelos computacionais e seus respectivos coeficientes de absorção sonora.

Materiais	Frequência [Hz]					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
parede de tijolo rebocada	0,018	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
porta madeira pintada	0,20	0,15	0,10	0,10	0,09	0,11
Janela	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
quadro escolar (*)	0,20	0,28	0,26	0,09	0,12	0,11
cadeira madeira (*)	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
cadeira estofada (*)	0,088	0,109	0,252	0,295	0,332	0,342
piso parquet	0,20	0,15	0,10	0,10	0,05	0,10
classe escolar (*)	0,016	0,018	0,034	0,042	0,055	0,053
Cortina	0,05	0,06	0,39	0,63	0,70	0,73
Banqueta	0,40	0,50	0,58	0,61	0,58	0,50

Fonte: Organizado pelo autor, a partir de valores normalizados na ISO 3382.

(*) Resultados das medições em câmara reverberante.

Os resultados experimentais na situação sem mobília são apresentados nas tabelas 4.2.

Tabela 4.2 - Valores utilizados para análise dos dados experimentais na situação “sem mobília”.

LEGENDA	TR [s]	EDT [s]	C₈₀ [dB]	D₅₀	STI
	Média de 500 e 1000 [Hz]				%
PAI01	2,24	2,24	- 2,67	0,23	41
PAP01	1,83	1,80	- 0,89	0,31	47
PAC01	2,08	2,09	- 1,60	0,28	44
PAC02	2,43	2,22	- 1,84	0,25	43
CPA01	1,34	1,33	1,20	0,40	51
CPA02	2,33	2,22	- 2,08	0,27	42
CPB01	2,31	2,34	- 2,37	0,24	42

Fonte: Autor.

Os resultados experimentais na situação com mobília, na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Valores utilizados para análise dos dados experimentais na situação “com mobília”.

LEGENDA	TR [s]	EDT [s]	C₈₀ [dB]	D₅₀	STI
	Média de 500 e 1000 [Hz]				%
PAI01	1,20	1,20	1,09	0,38	55
PAP01	1,77	1,82	- 0,98	0,31	47
PAC01	1,91	1,86	- 0,99	0,31	46
PAC02	1,95	1,90	- 1,94	0,24	45
CPA01	0,83	0,85	4,72	0,58	62
CPA02	2,09	2,05	- 1,55	0,28	44
CPB01	1,40	1,41	0,54	0,36	50

Fonte: Autor.

Os resultados das simulações na situação sem mobília estão na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Valores utilizados para análise dos dados simulados na situação “sem mobília”.

LEGENDA	TR [s]	EDT [s]	C₈₀ [dB]	D₅₀	STI
	Média de 500 e 1000 [Hz]				%
PAI01	2,16	2,16	- 1,75	0,28	45
PAP01	1,78	1,83	- 0,60	0,34	53
PAC01	1,88	1,96	- 1,00	0,32	50
PAC02	2,10	2,20	- 1,90	0,27	44
CPA01	1,48	1,51	1,10	0,43	54
CPA02	2,12	2,15	- 1,75	0,28	47
CPB01	2,29	2,31	- 2,05	0,27	46

Fonte: Autor.

Os resultados das simulações na situação com mobília estão na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Valores utilizados para análise dos dados simulados na situação “com mobília”.

LEGENDA	TR [s]	EDT [s]	C₈₀ [dB]	D₅₀	STI
	Média de 500 e 1000 [Hz]				%
PAI01	1,44	1,44	0,85	0,40	53
PAP01	1,74	1,81	- 0,60	0,34	53
PAC01	1,62	1,65	0,10	0,37	53
PAC02	1,42	1,46	0,35	0,32	47
CPA01	1,38	1,40	1,10	0,42	53
CPA02	1,84	1,86	- 0,80	0,32	47
CPB01	1,44	1,46	0,85	0,40	54

Fonte: Autor.

No que se refere à comparação entre parâmetros, os dados obtidos durante as experimentações devem estar coerentes com os dados obtidos nas simulações. Para isto, foram utilizadas, como referência, as diferenças entre os dados medidos e os dados simulados, em banda de oitava na faixa de frequência de 500 e 1000 Hz para os parâmetros acústicos considerados nesse estudo, e então comparados com os valores de *JND* sugeridos pela norma ISO 3382 (2009).

O *JND* avalia a precisão de uma simulação acústica; é o valor a partir do qual dois valores podem ser comparados. Quando a diferença entre os valores medidos e simulados de determinado parâmetro for menor ou igual ao seu valor de referência, então, é possível considerar essa diferença subjetivamente imperceptível (CHRISTENSEN, 2009).

A tabela 4.6 mostra as diferenças entre os valores dos parâmetros acústicos medidos nas salas de aula, para o ensino de música nas escolas (ISO 3382/2009), para as bandas de oitava entre 125 e 4.000 Hz, e os simulados e suas comparações com o *JND*, na situação de ocupação da sala sem mobília.

Tabela 4.6 – Diferença entre valores de referência medidos e simulados dos parâmetros acústicos, para comparação com os valores de referência de *JND*, na situação “sem mobília”. Os valores em cinza são os considerados abaixo ou iguais ao *JND*.

LEGENDA	TR [s]	EDT [s]	C₈₀ [dB]	D₅₀
	Média de 500 e 1000 [Hz]			
PAI01	0,08	0,08	0,92	0,05
PAP01	0,05	0,03	0,29	0,03
PAC01	0,20	0,13	0,60	0,04
PAC02	0,33	0,02	0,06	0,02
CPA01	0,14	0,18	0,10	0,03
CPA02	0,21	0,07	0,33	0,01
CPB01	0,02	0,03	0,32	0,03
JND	5%	5%	1 dB	0,05

Fonte: Autor.

Os valores apresentados na tabela 4.6 demonstram que os dados encontrados nos parâmetros estudados para a verificação da qualidade acústica das salas, são todos menores que o valor de referência para os respectivos *JND*, portanto é possível considerar os parâmetros *TR*, *EDT*, *C₈₀* e *D₅₀* subjetivamente imperceptíveis ao ouvinte na situação de sala sem mobília, considerando valores médios.

A tabela 4.7 mostra as diferenças entre os valores medidos e os simulados e suas comparações com o *JND*, na situação de ocupação da sala com mobília. Os valores em cinza são os considerados abaixo ou iguais ao *JND*.

Tabela 4.7 – Diferença entre valores de referência medidos e simulados dos parâmetros acústicos, para comparação com os valores de referência de *JND*, na situação “com mobília”.

LEGENDA	TR [s]	EDT [s]	C₈₀ [dB]	D₅₀
	Média de 500 e 1000 [Hz]			
PAI01	0,24	0,24	0,24	0,02
PAP01	0,03	0,01	0,38	0,03
PAC01	0,29	0,21	0,89	0,06
PAC02	0,53	0,44	1,59	0,08
CPA01	0,55	0,55	3,62	0,16
CPA02	0,25	0,19	0,75	0,04
CPB01	0,04	0,05	0,31	0,04
JND	5%	5%	1 dB	0,05

Fonte: Autor.

Os valores apresentados na tabela 4.7 demonstram que os dados encontrados nos parâmetros estudados para a verificação da qualidade acústica das salas, com exceção do C_{80} nas salas PAC02 e CPA01, são todos menores que o valor de referência para os respectivos JND , portanto é possível considerar os parâmetros TR , EDT , C_{80} e D_{50} subjetivamente imperceptíveis ao ouvinte na situação de sala com mobília.

As salas PAC02 e CPA01 são respectivamente a sala de aula da Escola Margarida Lopes e a sala de vídeo da Escola Edna May Cardoso, que possuem valores acima do valor de referência para o JND . Portanto, para estas salas, a Clareza (C_{80}) é um parâmetro subjetivamente perceptível.

Também se pode fazer a análise dos valores de STI , pois este parâmetro é responsável pela inteligibilidade da palavra, parâmetro de relevância, quando o ambiente diz respeito a salas de música em escolas, como é o caso da pesquisa em questão, pois ele é um parâmetro indispensável para a compreensão de informações transmitidas pela fala.

4.2 Comparação dos parâmetros acústicos medidos e simulados na situação de sala sem mobília.

A partir dos dados experimentais, na situação **sem mobília**, foi possível realizar a comparação entre os valores dos parâmetros acústicos TR , EDT , C_{80} , D_{50} e STI , **medidos e simulados** para cada uma das salas.

4.2.1 Tempo de reverberação (TR)

De acordo com a análise realizada para o parâmetro TR , os valores obtidos nas simulações encontraram-se muito próximos dos valores medidos experimentalmente. Para as sete salas de aula analisadas os valores em geral não apresentam consideráveis alterações, conforme figura 4.1 a 4.7.

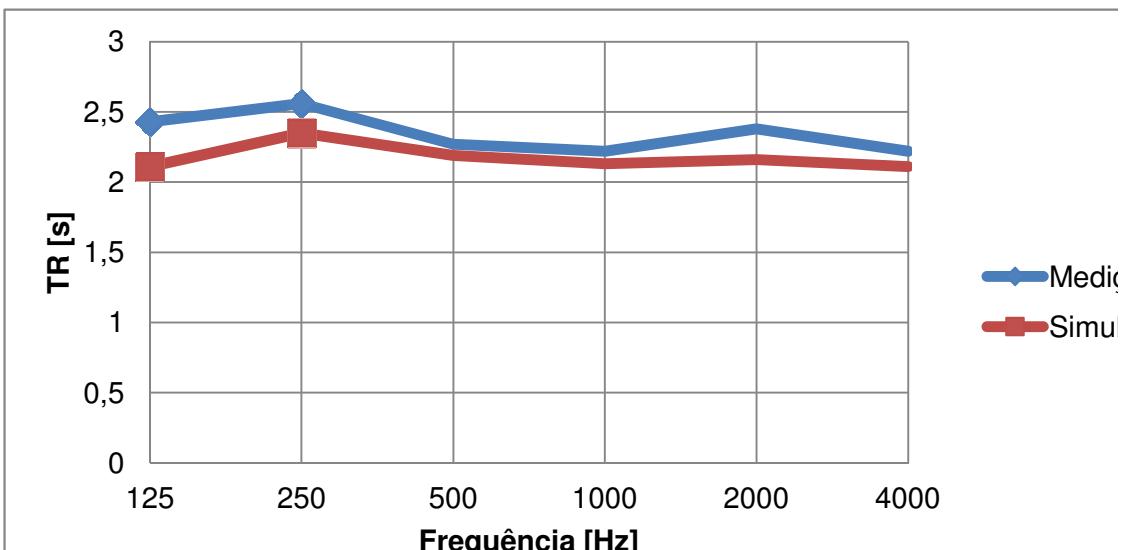


Figura 4.1 – Comparação entre TR medido e simulado para PAI01, sem mobília.

Na figura 4.1, a simulação do modelo da sala PAI01 apresentou em relação à medição, uma diferença média de 0,17 segundos. A discrepância entre resultados medidos e simulados, na maior parte das bandas de frequência, varia entre 0,08 e 0,32 segundos. O cálculo da frequência de Schröder é de 186 Hz. Para chegar a essa simplificação, considerou-se que o comprimento de onda é menor, quando comparado à dimensão da sala, sendo que os valores abaixo desta frequência não devem ser considerados. Considera-se que abaixo da frequência de Schröder o tratamento deve ser através da acústica ondulatória. Neste caso, acima desta frequência, os valores medidos e simulados mostraram que à medida que a frequência aumenta, os valores aproximam-se, até se encontrarem em 4000 Hz.

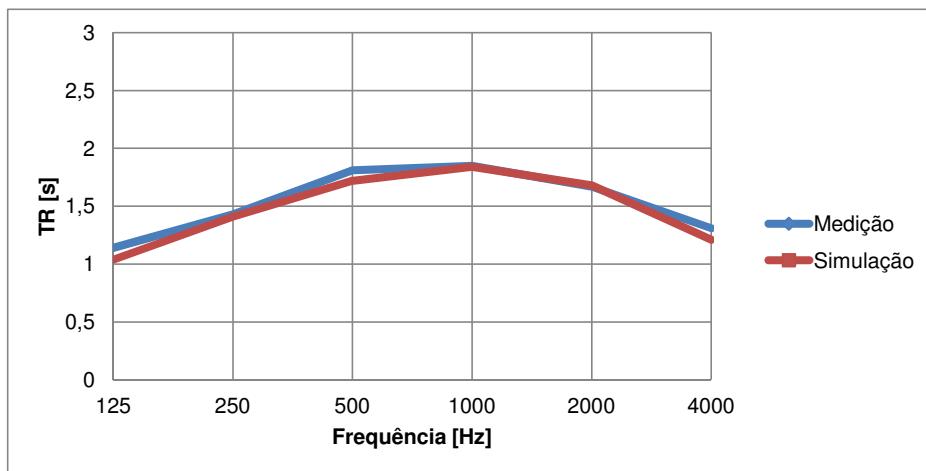


Figura 4.2 – Comparação entre **TR** medido e simulado para **PAP01**, sem mobília.

Na figura 4.2, o resultado da simulação do modelo da sala PAP01 apresentou em relação à medição, uma diferença média de 0,05 segundos para o tempo de reverberação. A diferença entre resultados medidos e simulados, para a maior parte das bandas de frequência, varia entre 0,01 e 0,10 segundos. A frequência de Schröder é de 167 Hz e os valores abaixo desta frequência não devem ser considerados.

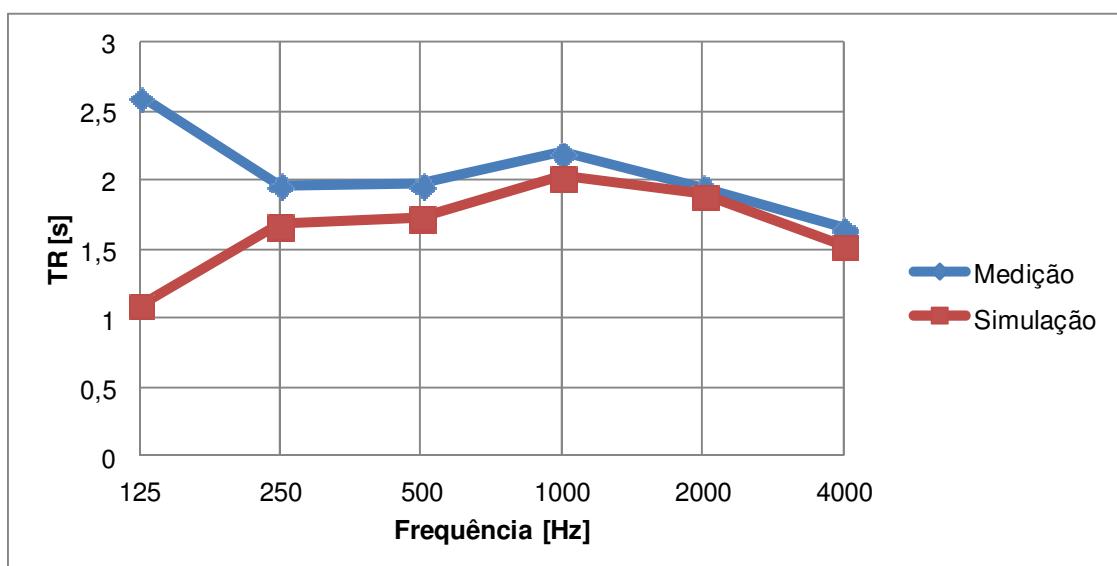


Figura 4.3 – Comparação entre **TR** medido e simulado para **PAC01**, sem mobília.

Na figura 4.3, a simulação do modelo da sala PAC01 apresentou resultados adequados em relação à medição, com uma diferença média de 0,39 segundos entre os valores medidos e os simulados. A discrepância entre estes resultados é apresentada na banda de 125, quando esta passa há 1,52 segundos, porém, a Frequência de Schröder é de 247 Hz, sendo que valores abaixo desta frequência não devem ser considerados para avaliação, pois se trata de acústica ondulatória, o que não é o caso deste estudo.

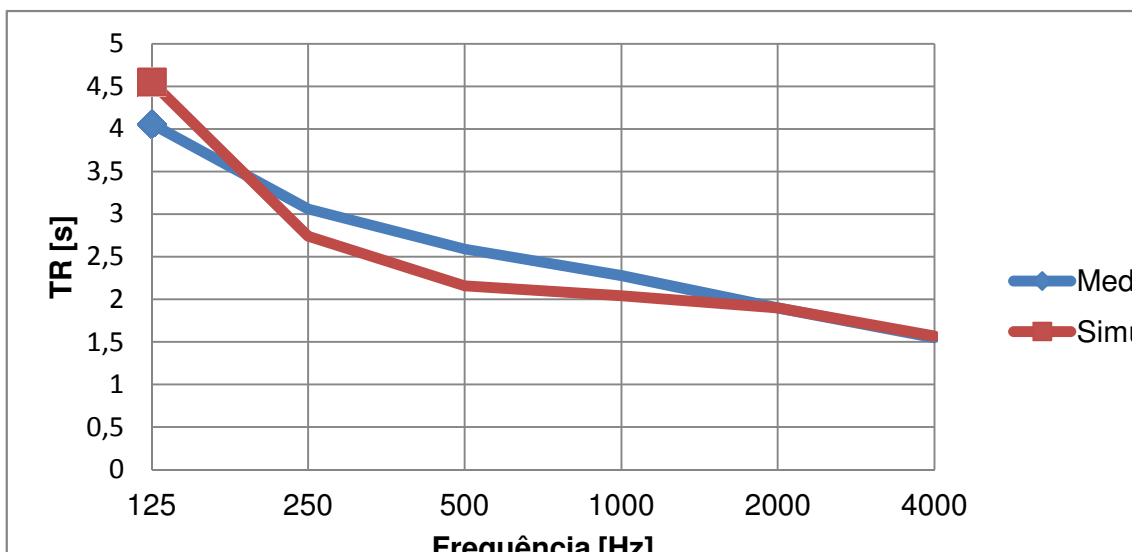


Figura 4.4 – Comparação entre TR medido e simulado para **PAC02**, sem mobília.

Na figura 4.4, a simulação do modelo da sala PAC02 apresentou valores adequados em relação à medição, com uma diferença média de 0,30 segundos. A diferença entre resultados medidos e simulados, para a maior parte das bandas de frequência, varia entre 0,02 e 0,49 segundos. A frequência de Schröder é de 407 Hz, portanto os valores de TR elevados não são analisados, pois os valores abaixo nesta frequência não devem ser considerados.

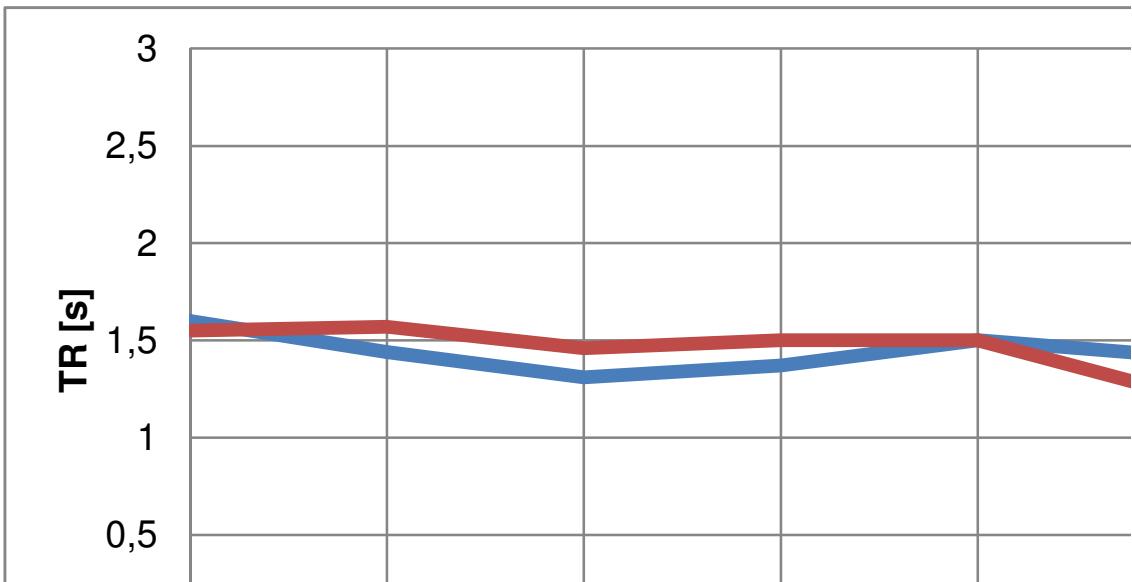


Figura 4.5 – Comparação entre **TR** medido e simulado para **CPA01**, sem mobília.

Na figura 4.5, a simulação do modelo da sala CPA01 apresentou valores adequados em relação à medição, com uma diferença média de 0,13 segundos. A baixa diferença entre resultados medidos e simulados, na maior parte das bandas de frequência, varia entre 0,05 e 0,19 segundos. Observa-se que o valor do tempo de reverberação é quase constante nessa sala. Isso pode ser explicado pela composição de materiais e respectivos coeficientes de absorção usados na simulação, os quais representaram exatamente a situação real.

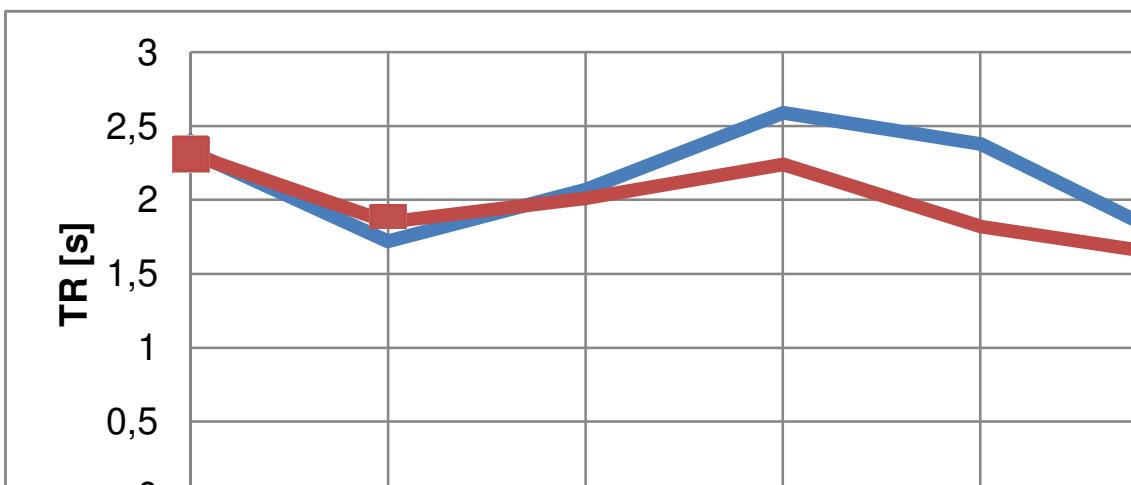


Figura 4.6 – Comparação entre **TR** medido e simulado para **CPA02**, sem mobília.

Na figura 4.6, a simulação do modelo da sala CPA02 apresentou em relação à medição, uma diferença média de 0,20 segundos. A diferença entre resultados medidos e simulados varia entre 0,05 e 0,56 segundos (1000 e 2000 Hz). O cálculo da frequência de Schröder é de 346 Hz, portanto abaixo desta frequência os valores de TR não devem ser considerados.

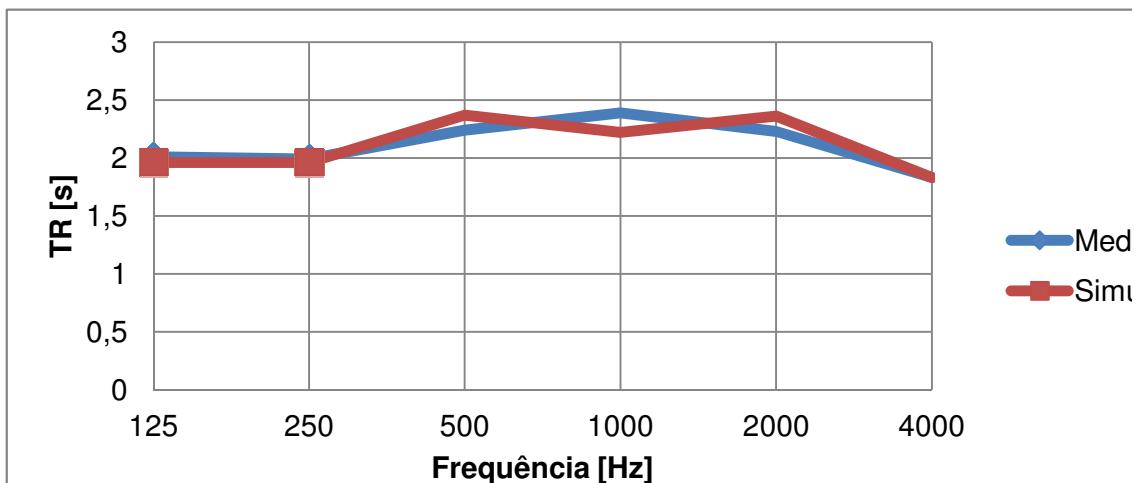


Figura 4.7 – Comparação entre TR medidos e simulados para CPB01, sem mobília.

Na figura 4.7, a simulação do modelo da sala CPB01 apresentou em relação à medição, uma diferença média de 0,10 segundos. A discrepância entre resultados medidos e simulados, para a maior parte das bandas de frequência, varia entre 0,03 e 0,17 segundos. O cálculo da frequência de Schröder é de 263 Hz, portanto os valores abaixo desta frequência não devem ser considerados.

4.2.2 Tempo de decaimento inicial (*EDT*)

As comparações entre os valores de *EDT* medidos e simulados para as sete salas analisadas sem mobília demonstram valores muito próximos dos valores reais obtidos nas medições da resposta impulso, significando que a percepção da reverberação no ambiente é muito próxima do comportamento real do som. Cabe

lembrar que o Tempo de decaimento inicial (*EDT*) representa as primeiras reflexões que chegam ao ouvinte e pode contribuir com a inteligibilidade do som.

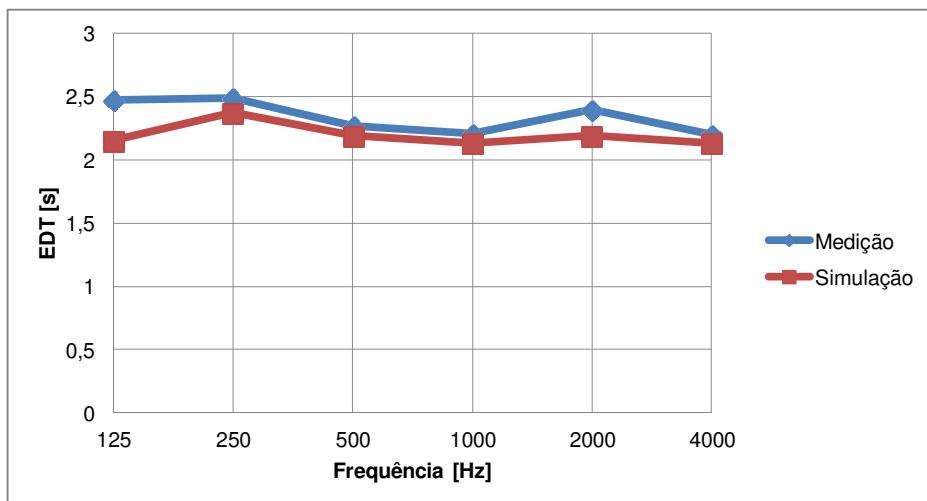


Figura 4.8 – Comparaçāo entre ***EDT*** medidos e simulados para **PAI01**, sem mobília.

A partir da análise dos valores de *EDT* da sala PAI01, nota-se uma diferença em baixa frequência e na faixa de 2000 kHz, o problema apresentado está relacionado com a distribuição dos materiais e coeficientes de absorção sonora ou com dimensões dos contornos.

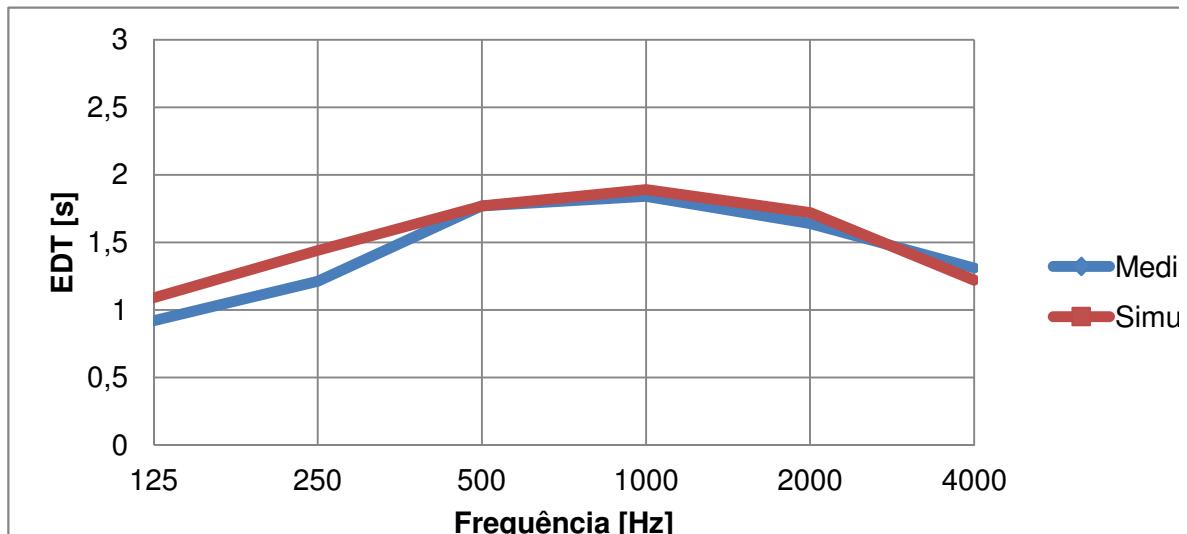


Figura 4.9 – Comparação entre ***EDT*** medido e simulado para **PAP01**, sem mobília.

Na análise dos valores de *EDT* medido e simulado na figura 4.9, a diferença entre os valores medidos e simulados se dá em baixa frequência e é quase imperceptível.

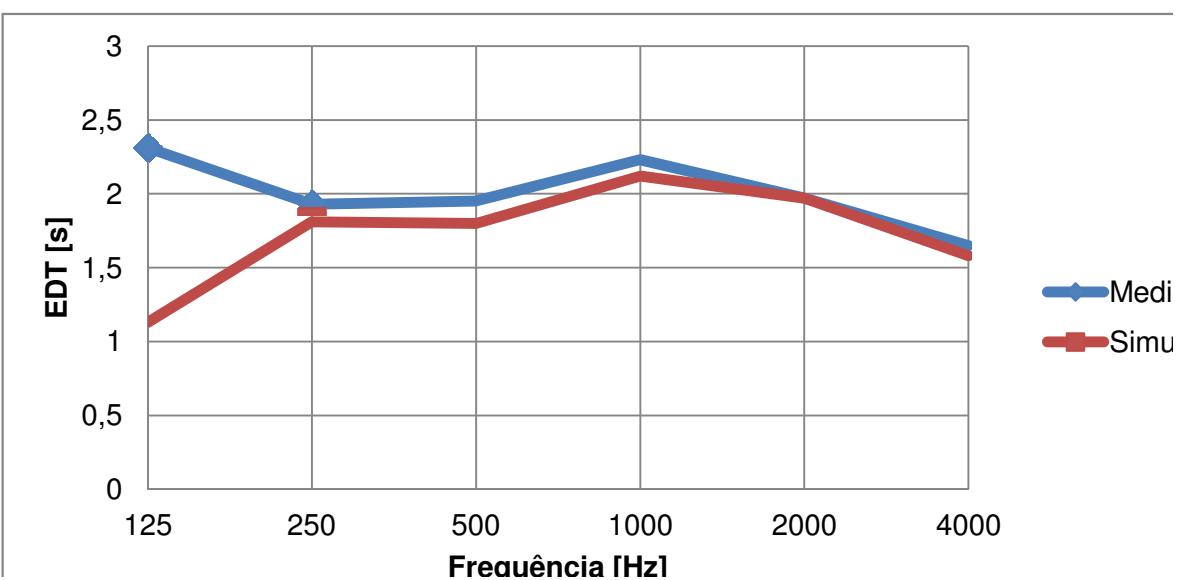


Figura 4.10 – Comparação entre ***EDT*** medido e simulado para **PAC01**, sem mobília.

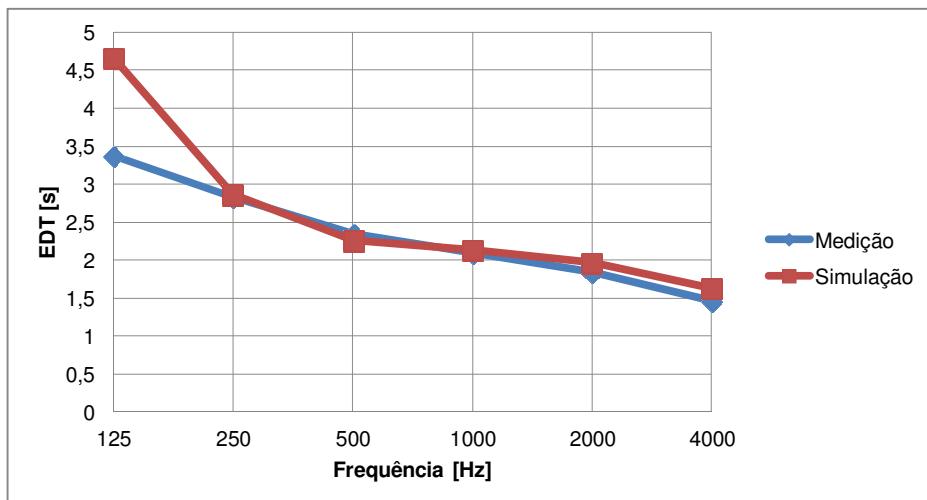


Figura 4.11 – Comparação entre ***EDT*** medido e simulado para **PAC02**, sem mobília.

A análise dos valores de ***EDT*** da figura 4.10 e figura 4.11, da PAC01 e PAC02 respectivamente mostra que a diferença entre os valores medidos e simulados na banda de 125 Hz se dá exatamente nas baixas frequências.

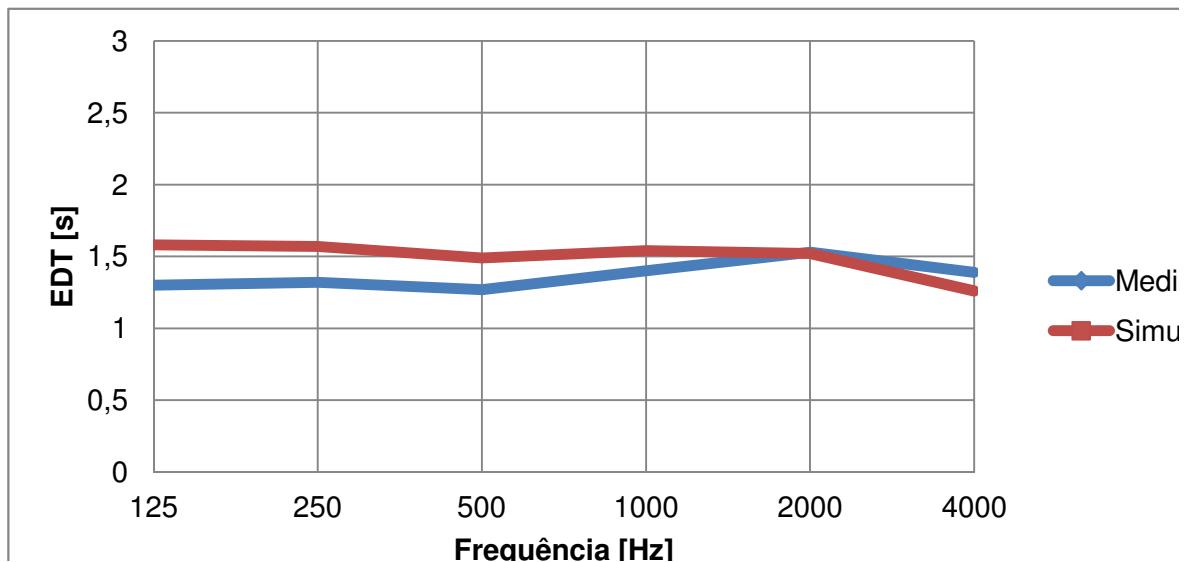


Figura 4.12 – Comparação entre ***EDT*** medido e simulado para **CPA01**, sem mobília.

Na figura 4.12, a simulação do modelo da sala CPA01 apresentou em relação à medição, uma diferença média de 0,17 segundos. A diferença entre resultados, para a maior parte das bandas de frequência, varia entre 0,01 e 0,28 segundos.

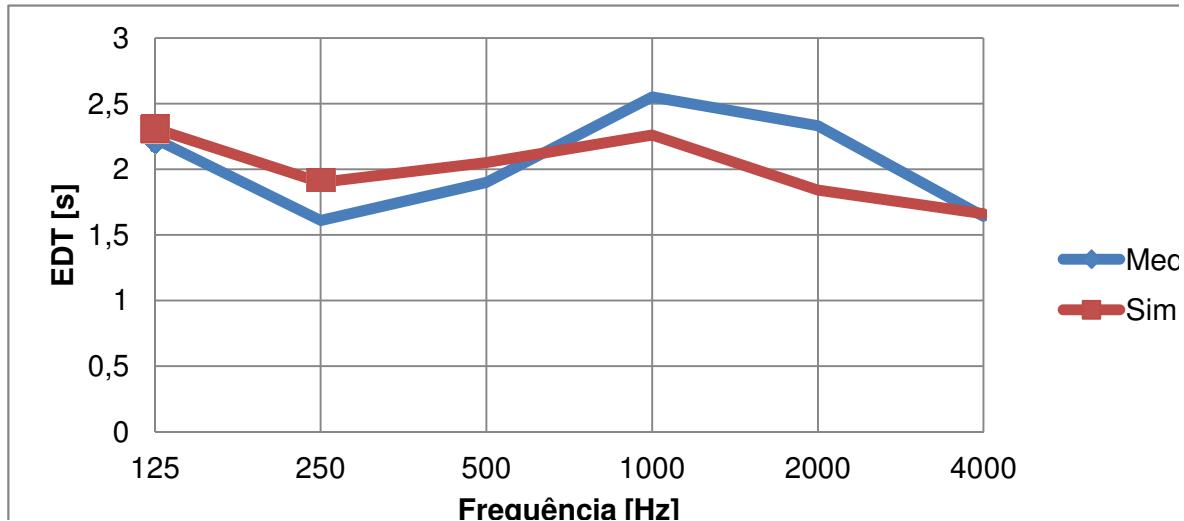


Figura 4.13 – Comparação entre ***EDT*** medido e simulado para **CPA02**, sem mobília.

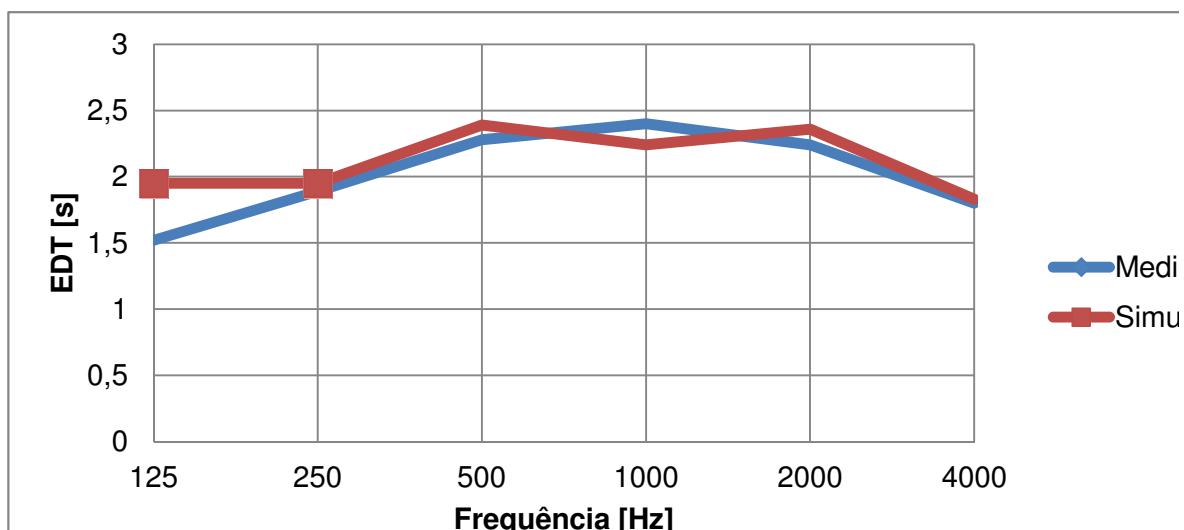


Figura 4.14 – Comparação entre ***EDT*** medido e simulado para **CPB01**, sem mobília.

A análise dos valores de *EDT* medido e simulado da sala CPB01 da figura 4.14 mostra que a diferença entre os valores medidos e simulados se dá exatamente nas baixas freqüências, onde ocorrem as primeiras reflexões. Principalmente nas

baixas frequências seria interessante que o TR se mantivesse constante, pois o aumento deste produz resultados desfavoráveis no grau de inteligibilidade da palavra.

Observando os resultados obtidos para *EDT* na média entre as bandas de 500 e 1.000 Hz nas sete salas analisadas conclui-se que os modelos propostos para a amostra estudada podem ser considerados precisos.

4.2.3 Clareza (C_{80})

A seguir são apresentados os valores obtidos nas simulações realizadas para o parâmetro C_{80} e comparados com os respectivos valores experimentais. O C_{80} elucida a inteligibilidade das articulações dos sons e corresponde à razão entre a energia que se direciona ao ouvinte nos primeiros 50 ms.

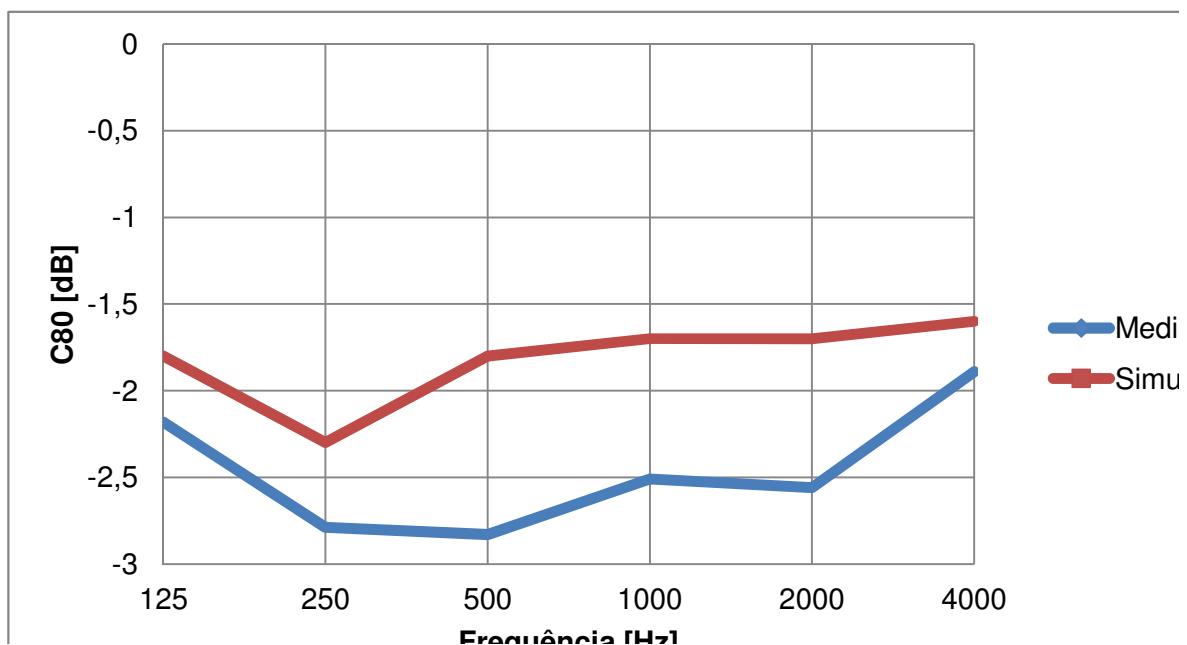


Figura 4.15 – Comparaçāo entre C_{80} medido e simulado para PAI01, sem mobília.

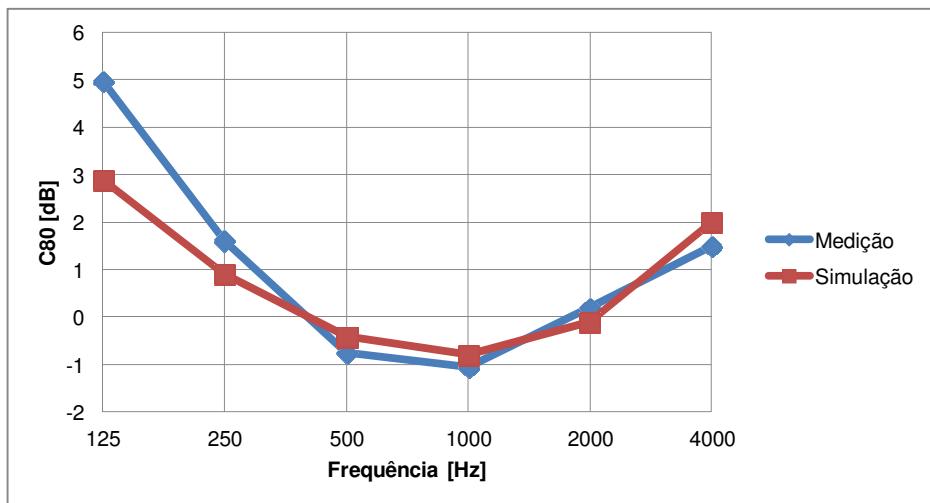


Figura 4.16 – Comparação entre C_{80} medido e simulado para **PAP01**, sem mobília.

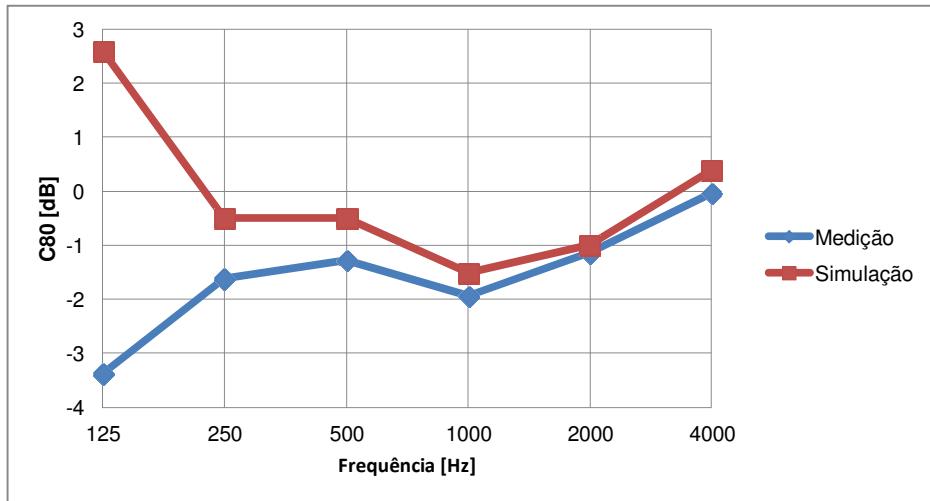


Figura 4.17 – Comparação entre C_{80} medido e simulado para **PAC01**, sem mobília.

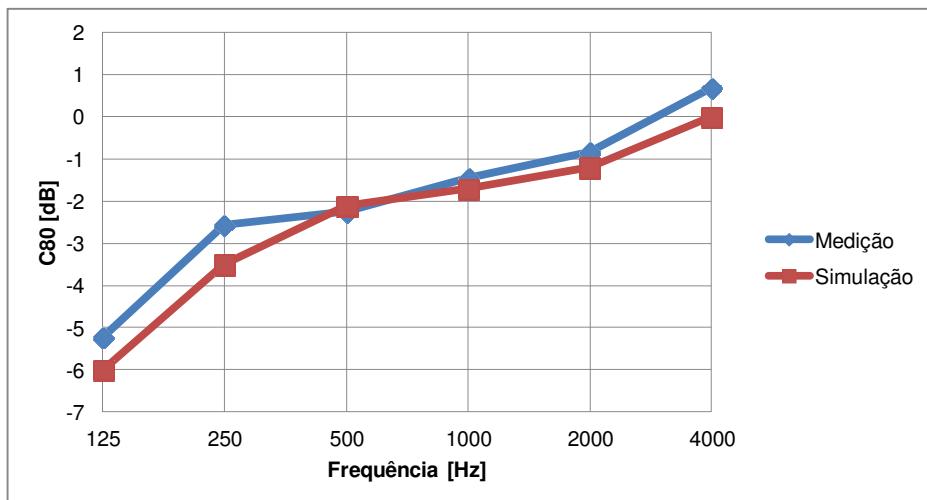


Figura 4.18 – Comparação entre C_{80} medido e simulado para **PAC02**, sem mobília.

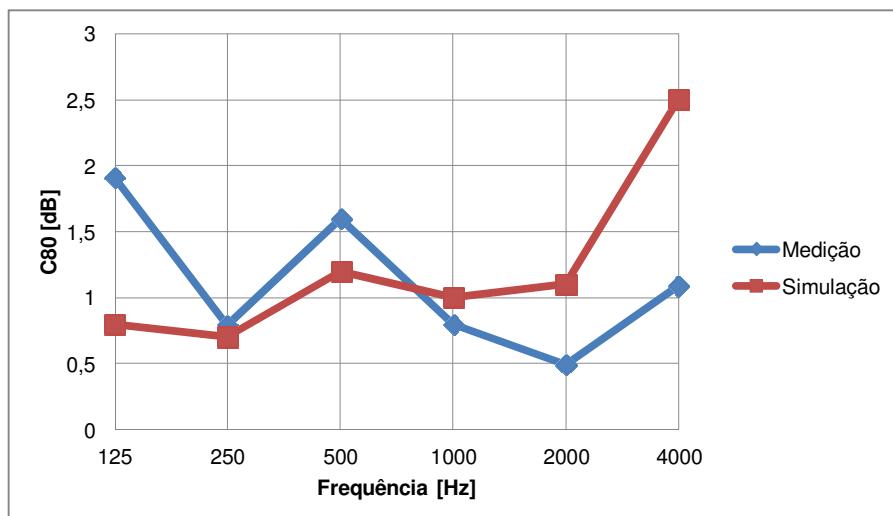


Figura 4.19 – Comparação entre C_{80} medido e simulado para **CPA01**, sem mobília.

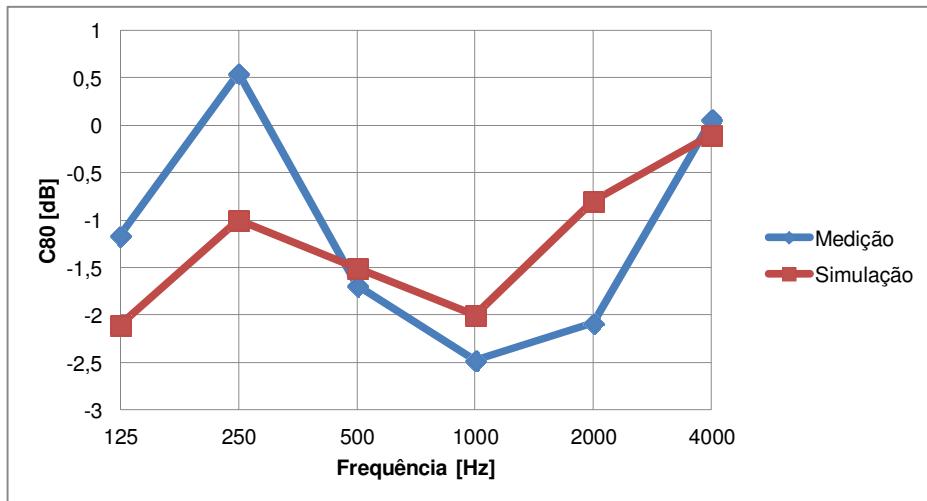


Figura 4.20 – Comparação entre C_{80} medido e simulado para CPA02, sem mobília.

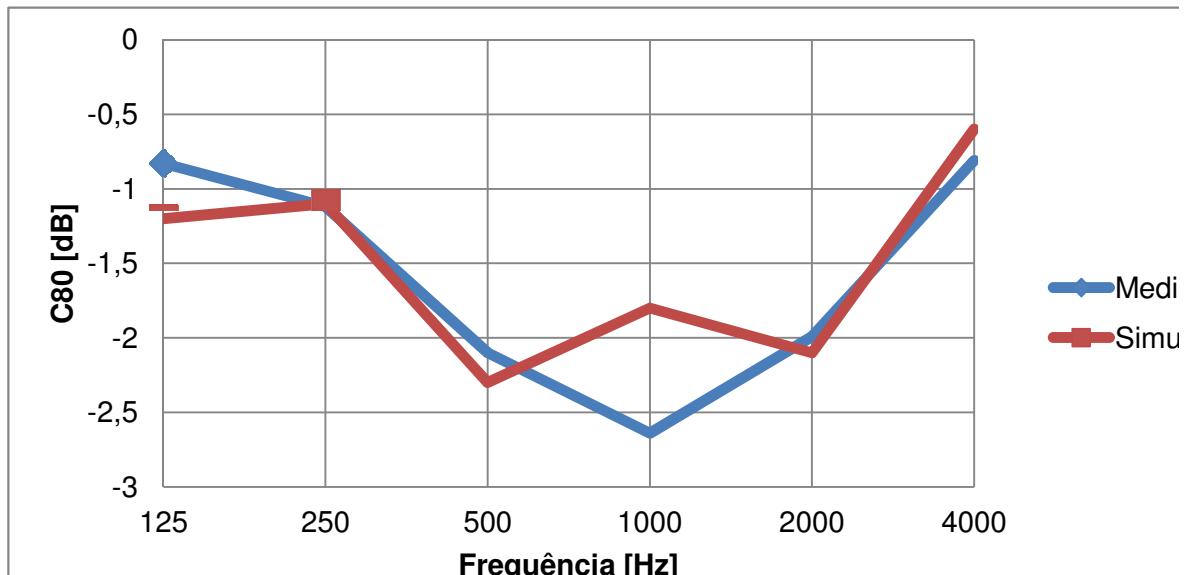


Figura 4.21 – Comparação entre C_{80} medido e simulado para CPB01, sem mobília.

Dos resultados obtidos da diferença entre dados experimentais e simulados pode-se destacar os resultados obtidos para a sala PAP01 (figura 4.16) que registrou o valor de 2,07 e para sala CPA02 (figura 4.20) o valor de -2,00.

Com base no JND de 1 dB, a análise realizada entre a diferença entre dados experimentais e simulados para a média de frequência de 500 e 1.000 Hz, verifica-

se que todas as sete salas apresentam uma boa precisão para o parâmetro analisado.

4.2.4 Definição (D_{50})

A análise do parâmetro D_{50} mostrou que os valores obtidos pelas medições experimentais estão conformes com o estabelecido para salas de aula, demonstrando diferenças pequenas para as sete salas analisadas em relação os valores simulados. Podem-se destacar diferenças entre valores experimentais e simulados variando de 0,01 a 0,29. As salas PAI01, PAP01, PAC01 e CPA01 apresentaram uma diferença média de 0,04. Sendo que, nas salas PAC02, CPA02 e CPB01 a diferença média foi na ordem de 0,15, 0,03 e 0,02 respectivamente. A maior diferença de 0,29 foi registrada na sala PAC01, na banda de frequência de 125 Hz. Os gráficos serão apresentados da figura 4.22 até a figura 4.28.

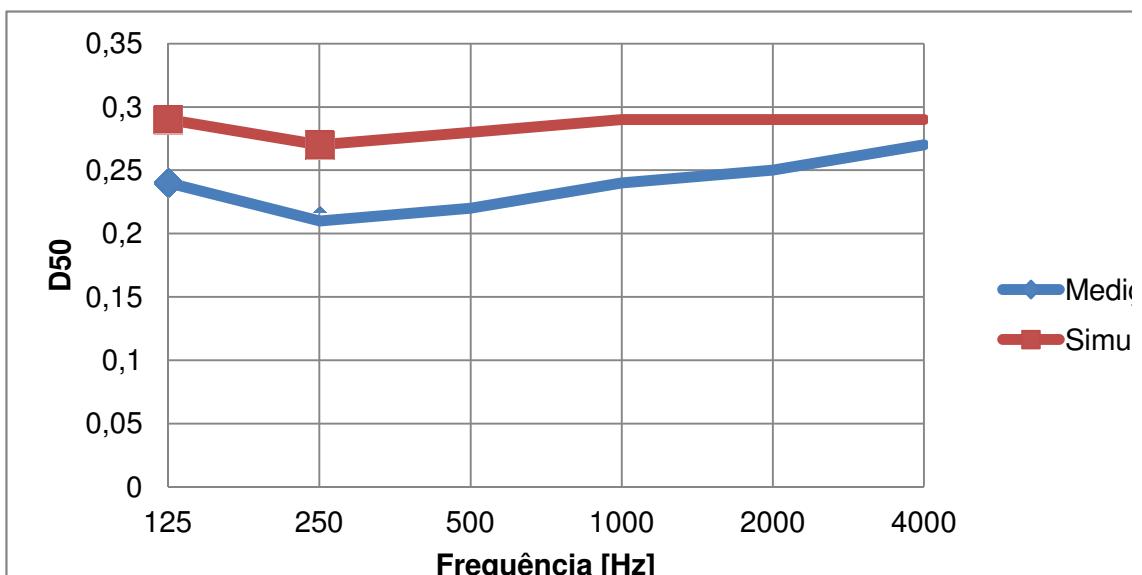


Figura 4.22 – Comparaçāo entre D_{50} medido e simulado para **PAI01**, sem mobília.

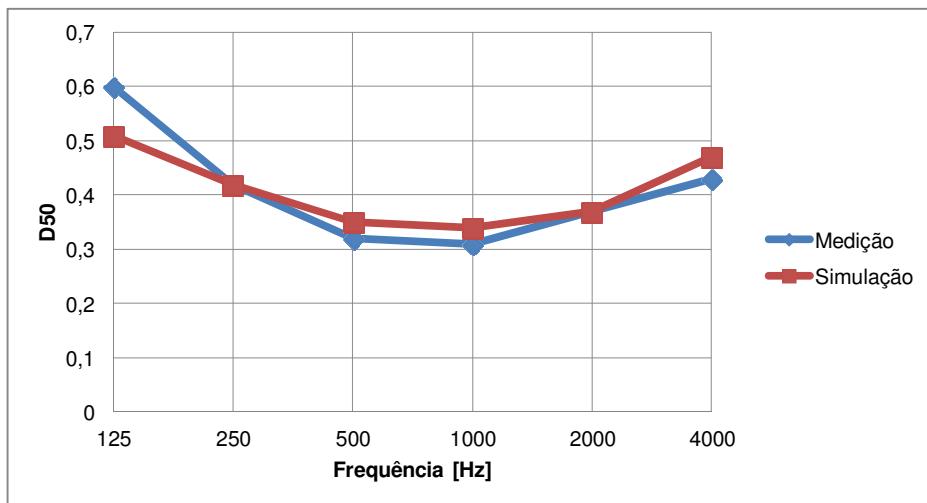


Figura 4.23 – Comparação entre D_{50} medido e simulado para **PAP01**, sem mobília.

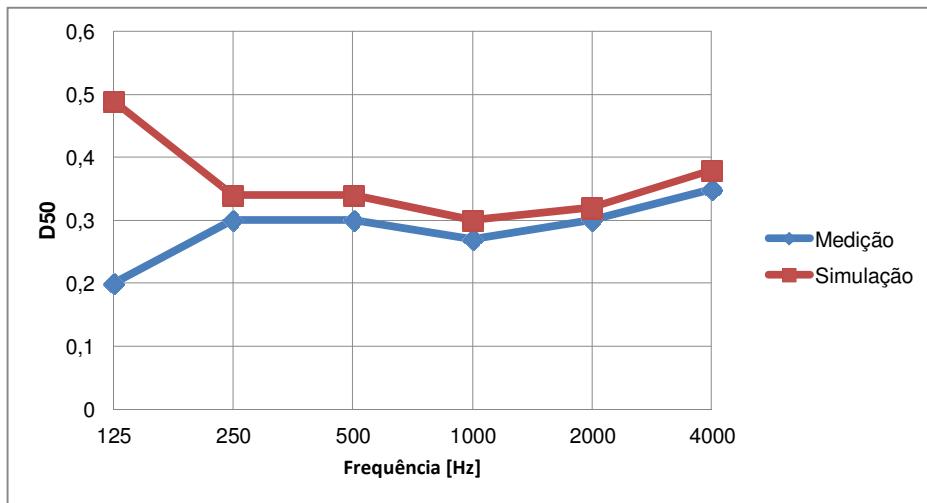


Figura 4.24 – Comparação entre D_{50} medido e simulado para **PAC01**, sem mobília.

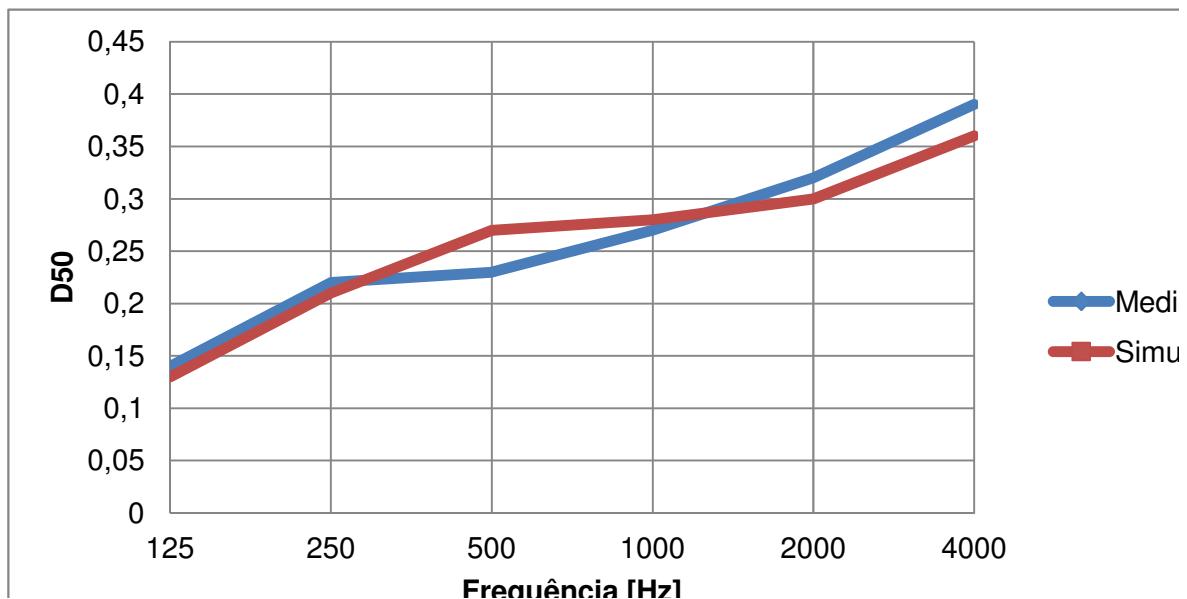


Figura 4.25 – Comparação entre D_{50} medido e simulado para **PAC02**, sem mobília.

Na figura 4.25, sala PAC02 ocorreu a menor diferença do parâmetro D_{50} analisado, obtendo uma diferença média de 0,15, onde nas bandas de frequências de 500 Hz obteve 0,04 e em 1000 Hz obteve o valor de 0,01, concluindo uma considerável adequação nos valores quanto a este parâmetro.

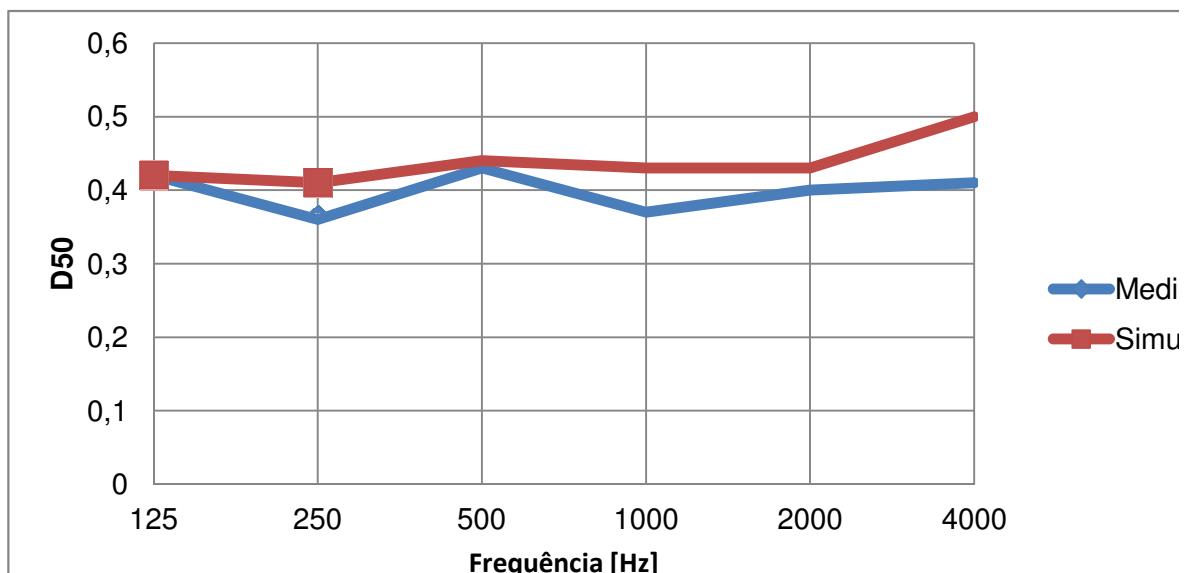


Figura 4.26 – Comparação entre D_{50} medido e simulado para **CPA01**, sem mobília.

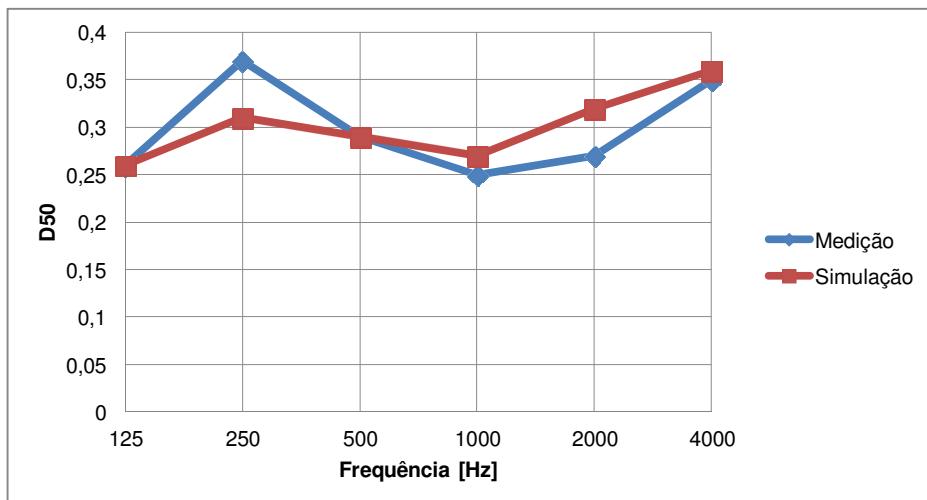


Figura 4.27 – Comparação entre D_{50} medido e simulado para **CPA02**, sem mobília.

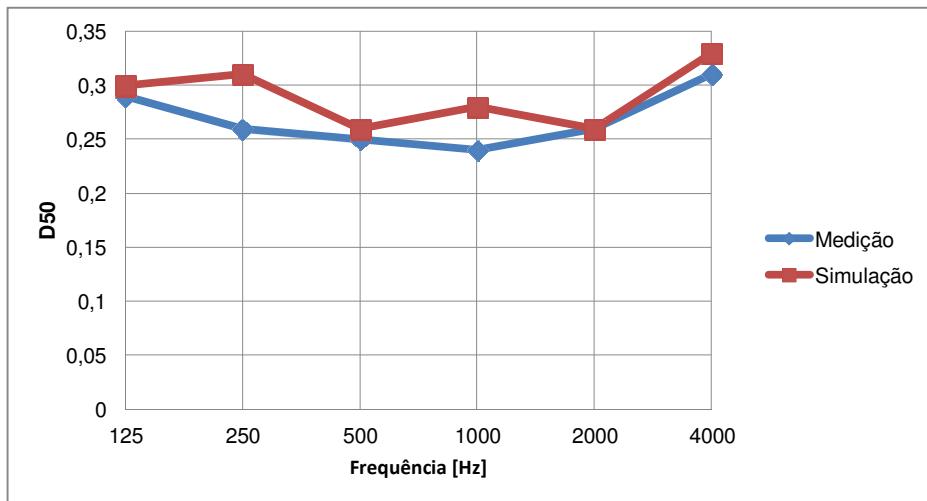


Figura 4.28 – Comparação entre D_{50} medido e simulado para **CPB01**, sem mobília.

De acordo com a tabela 4.6, na situação sem mobília, os valores obtidos pela diferença entre os resultados simulados e medidos encontram-se abaixo do JND recomendado para a média entre as bandas de 500 e 1.000 Hz. Verifica-se, então, que as sete salas analisadas estão com boa precisão.

4.3 Comparação dos parâmetros acústicos medidos e simulados na situação de sala com mobília

Da mesma forma que realizado sem mobília, a partir dos dados experimentais, na situação **com mobília** foi possível realizar a comparação entre os valores dos parâmetros acústicos TR , EDT , C_{80} , D_{50} e STI , medidos e simulados para cada uma das salas. Estas comparações são mostradas, por gráficos, nas figuras 4.29 até a figura 4.56.

4.3.1 Tempo de reverberação (TR)

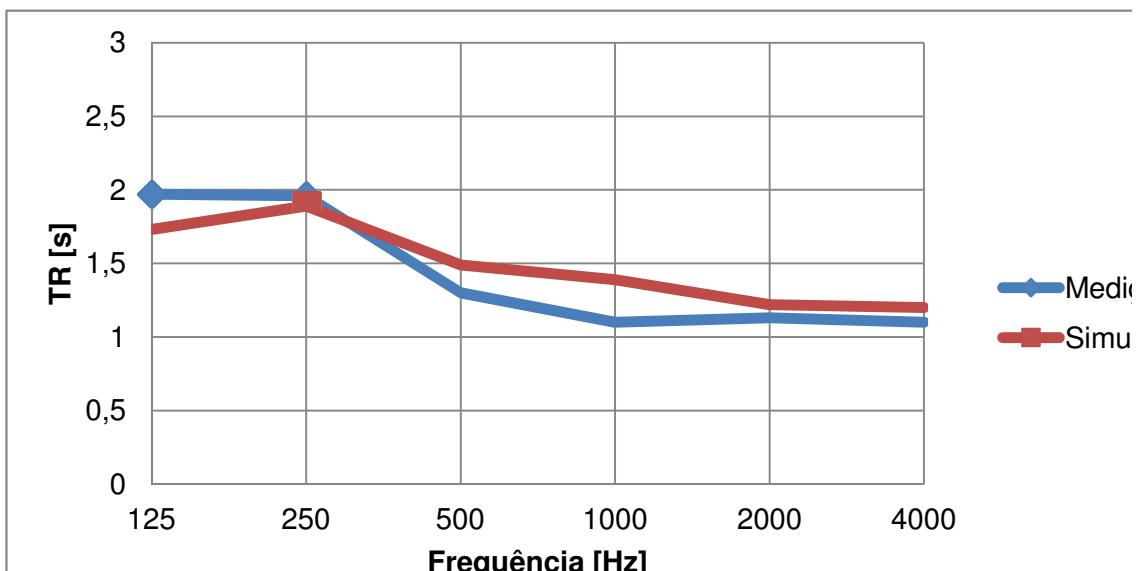


Figura 4.29 – Comparação entre TR medido e simulado para PAI01, com mobília.

Para PAI01, com mobília, o cálculo da frequência de Schröder, para esta sala é de 163 Hz. A partir desta frequência os valores medidos de TR tem seu valor máximo na banda de frequência de 250 Hz. Já os valores simulados têm picos semelhantes nas bandas de frequência de 500 e 2000 Hz, e para a banda de 1000 Hz apresenta um decréscimo.

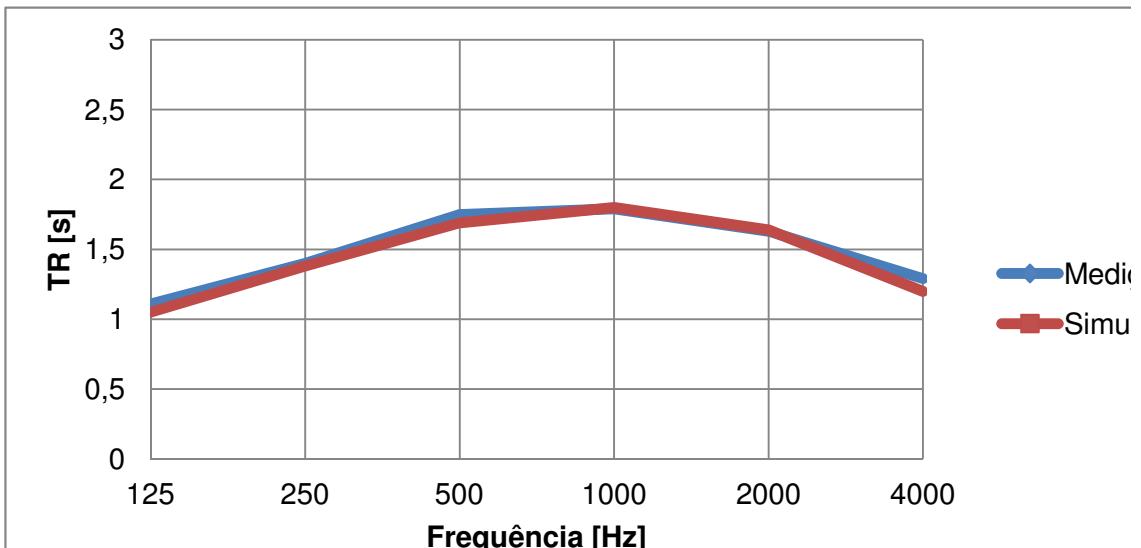


Figura 4.30 – Comparação entre TR medido e simulado para **PAP01**, com mobília.

Para PAP01, com mobília, o cálculo da frequência de Schröder é de 165 Hz. Os valores medidos e os valores simulados do TR são coincidentes ao longo de toda a banda de frequência.

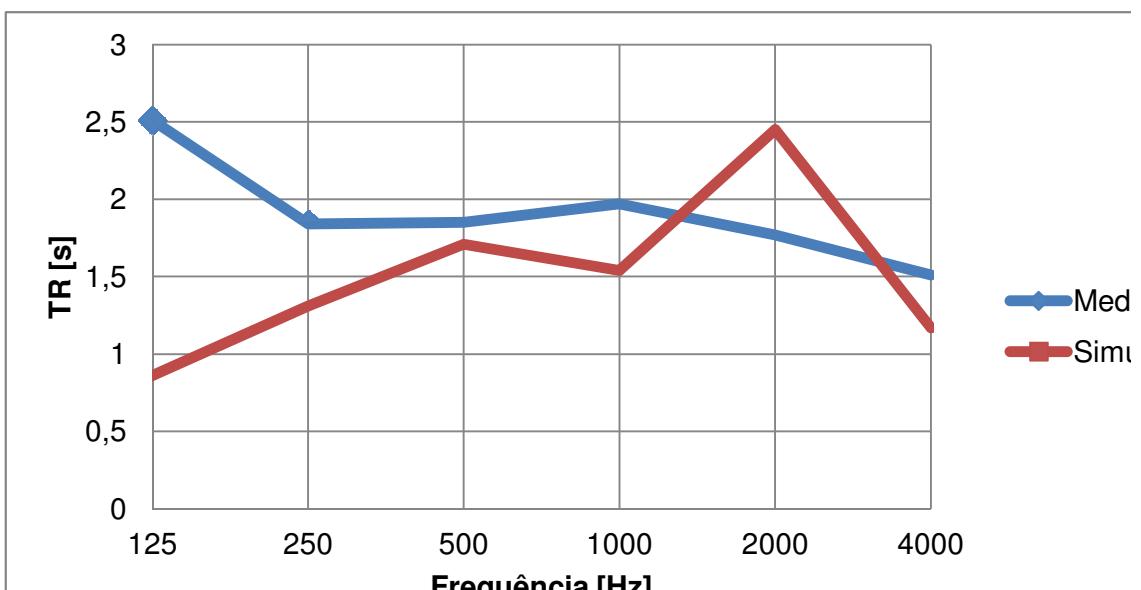


Figura 4.31 – Comparação entre TR medido e simulado para **PAC01**, com mobília.

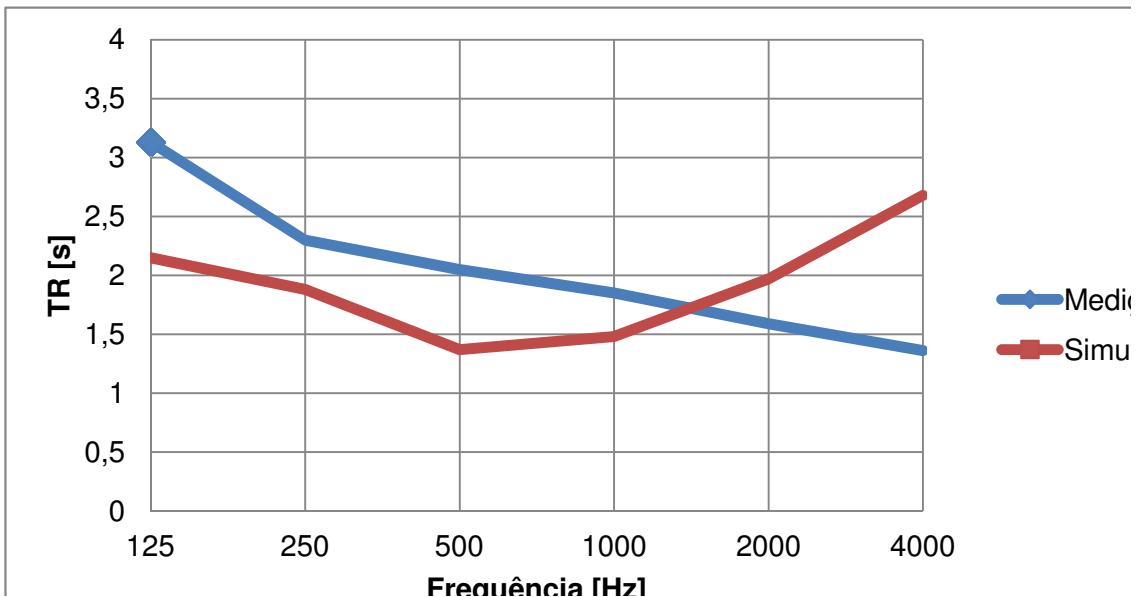


Figura 4.32 – Comparação entre **TR** medido e simulado para **PAC02**, com mobília.

Para PAC02, com mobília, a sala de aula da Escola Estadual Margarida Lopes, o cálculo da frequência de Schröder, para esta sala é de 337 Hz. Nessa sala os valores de TR medidos têm comportamento decrescente em toda a banda de frequência, desde 125 Hz até 4000 Hz. Já os valores simulados decrescem até a banda de 500 Hz e a partir deste valor ela passa a ter um comportamento crescente até os 4000 Hz.

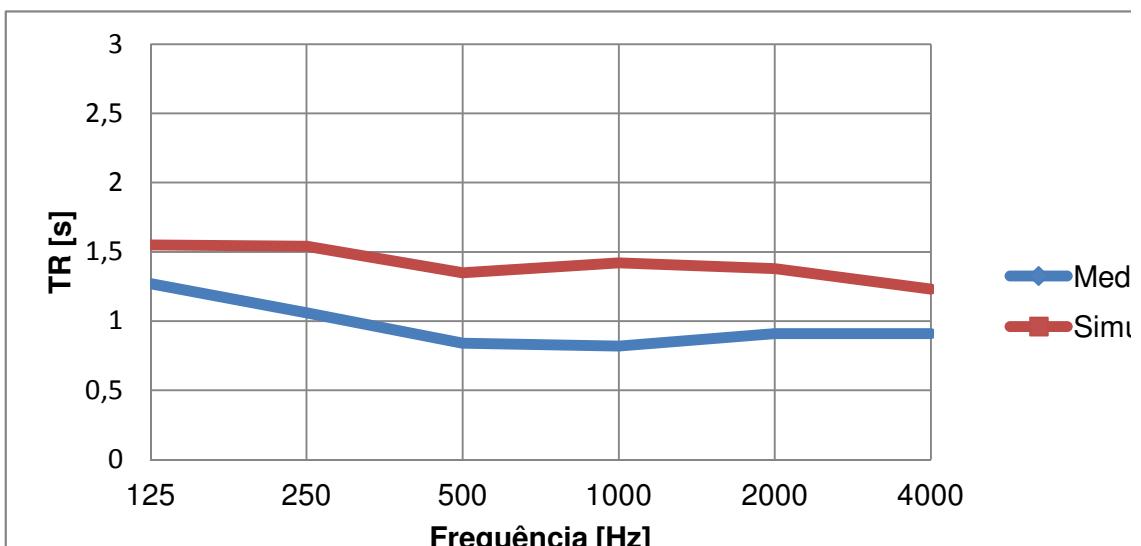


Figura 4.33 – Comparação entre **TR** medido e simulado para **CPA01**, com mobília.

Para CPA01, com mobília, Sala de Vídeo da Escola Estadual Edna May Cardoso, o cálculo da frequência de Schröder, para esta sala é de 276 Hz.

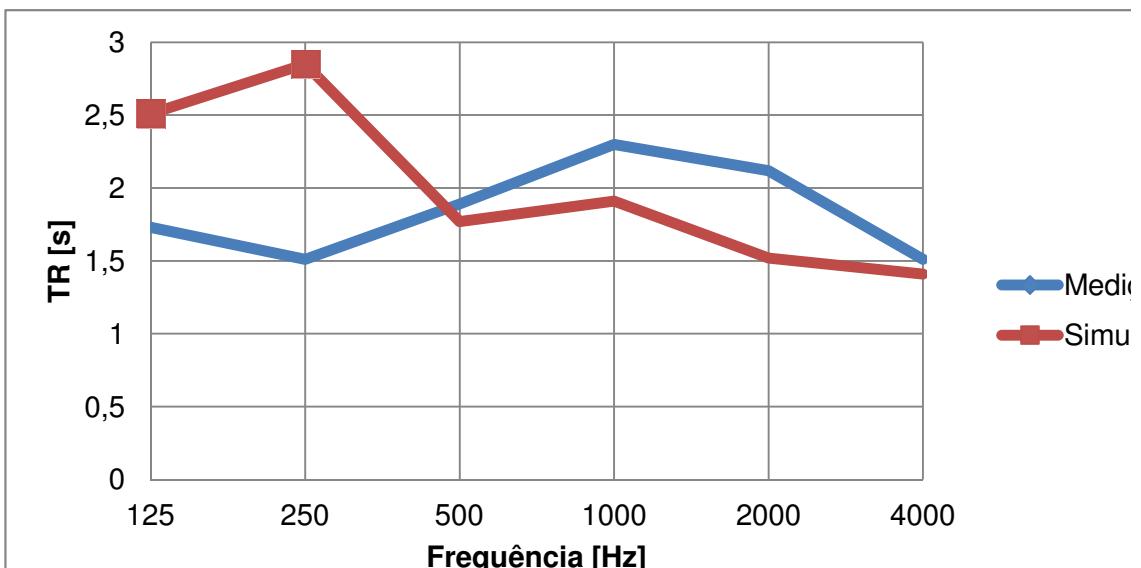


Figura 4.34 – Comparação entre **TR** medido e simulado para **CPA02**, com mobília.

Para CPA01, com mobília, Sala de Aula da Escola Edna May Cardoso, a frequência de Schröder é de 363 Hz. Na frequência de 500 Hz, os valores medidos e simulados de TR se interceptam.

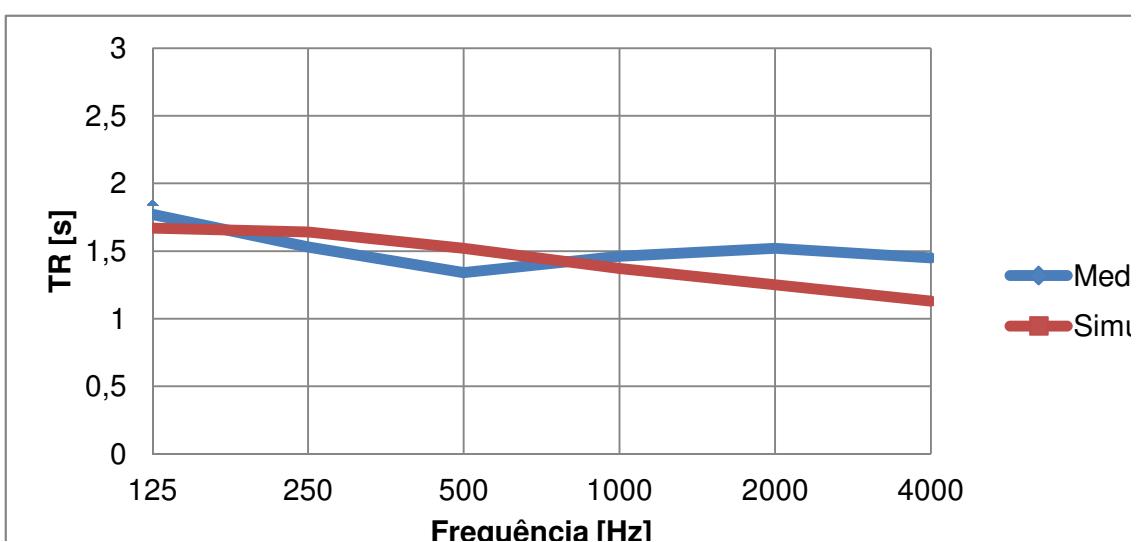


Figura 4.35 – Comparação entre **TR** medido e simulado para **CPB01**, com mobília.

Para CPB01, com mobília, Sala de Vídeo da Escola Paulo Lauda, o cálculo da Frequência de Schröder é de 227 Hz.

4.3.2 Tempo de decaimento inicial (*EDT*)

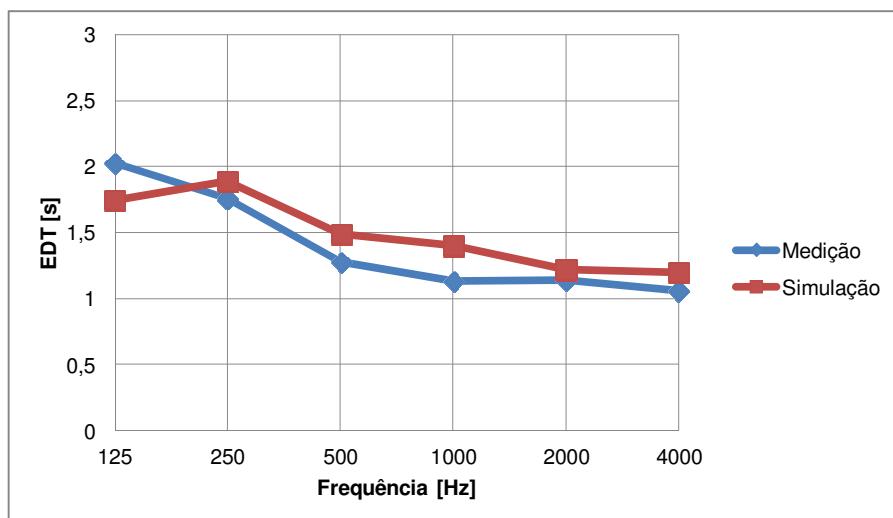


Figura 4.36 – Comparação entre ***EDT*** medido e simulado para **PAI01**, com mobília.

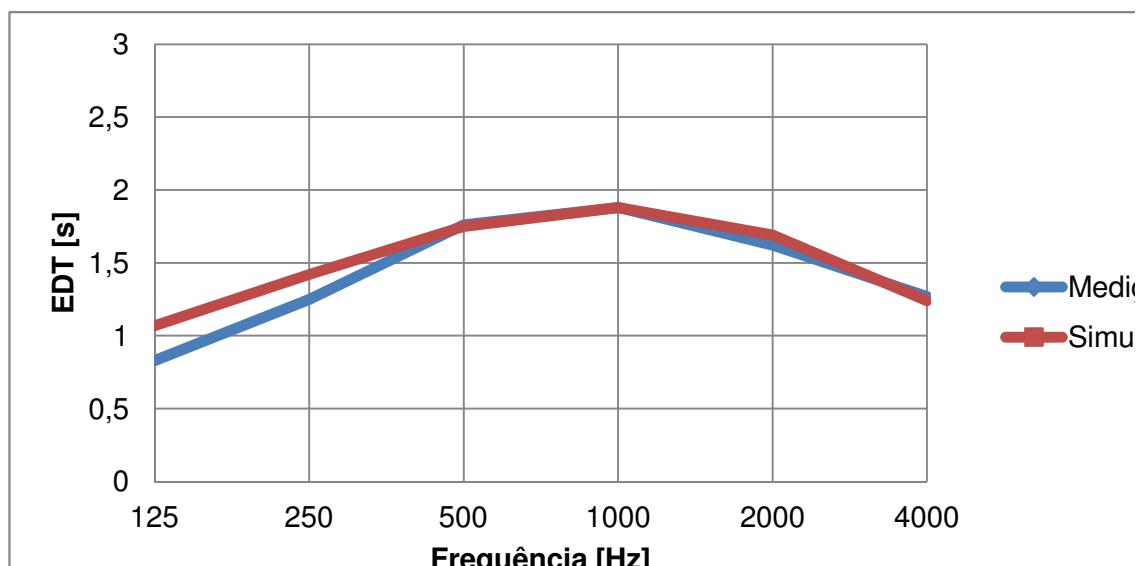


Figura 4.37 – Comparação entre ***EDT*** medido e simulado para **PAP01**, com mobília.

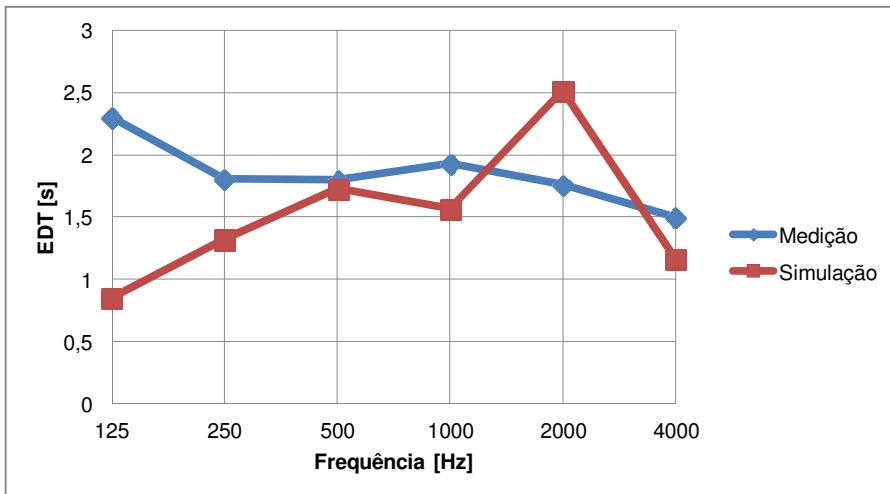


Figura 4.38 – Comparação entre ***EDT*** medido e simulado para **PAC01**, com mobília.

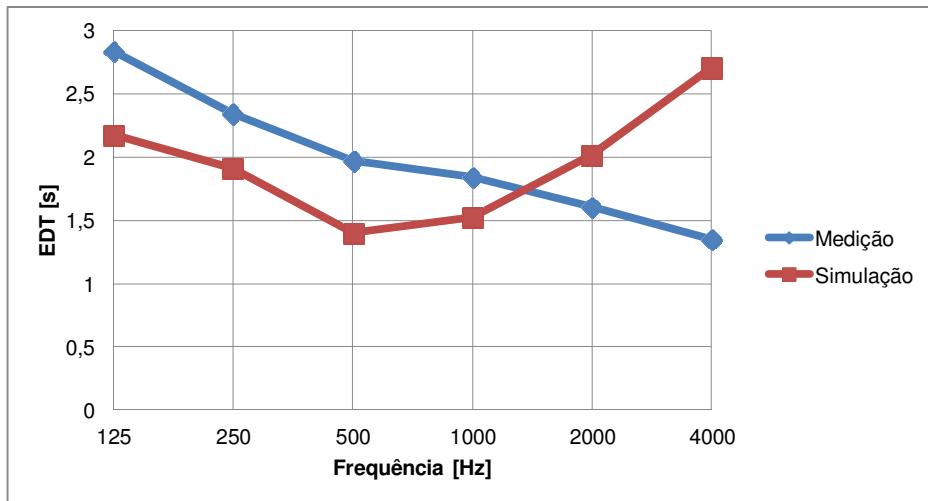


Figura 4.39 – Comparação entre ***EDT*** medido e simulado para **PAC02**, com mobília.

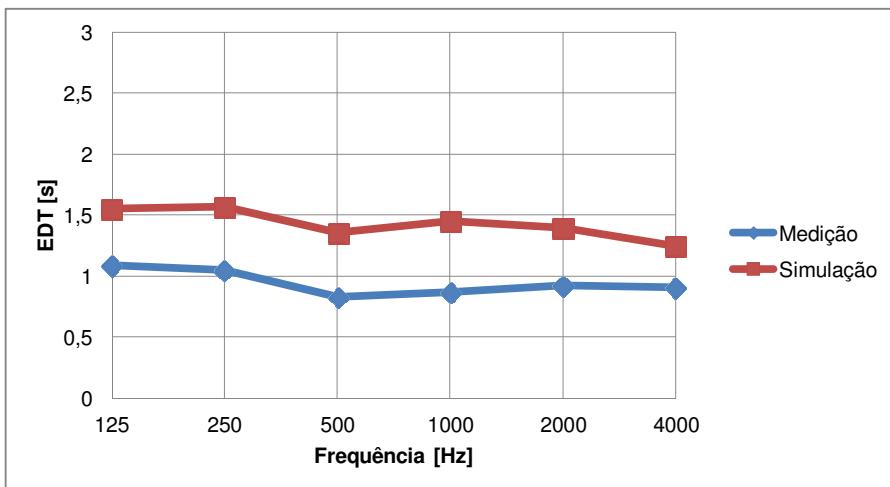


Figura 4.40 – Comparação entre ***EDT*** medido e simulado para **CPA01**, com mobília.

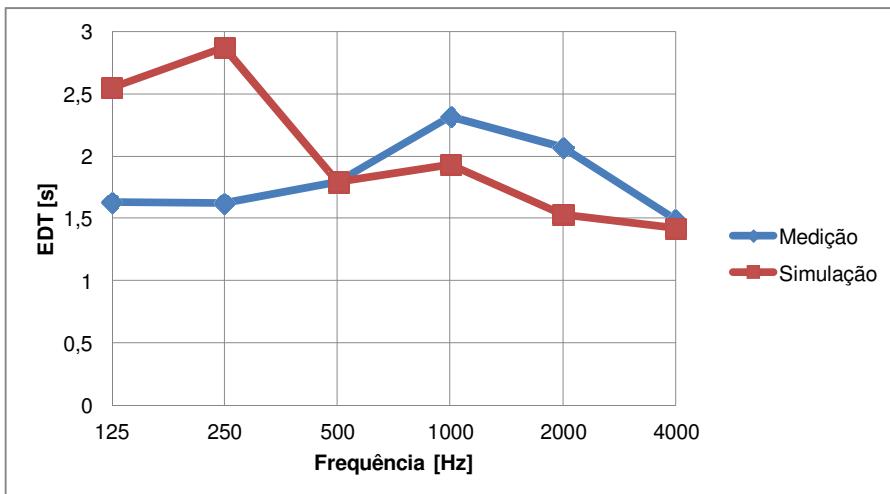


Figura 4.41 – Comparação entre ***EDT*** medido e simulado para **CPA02**, com mobília.

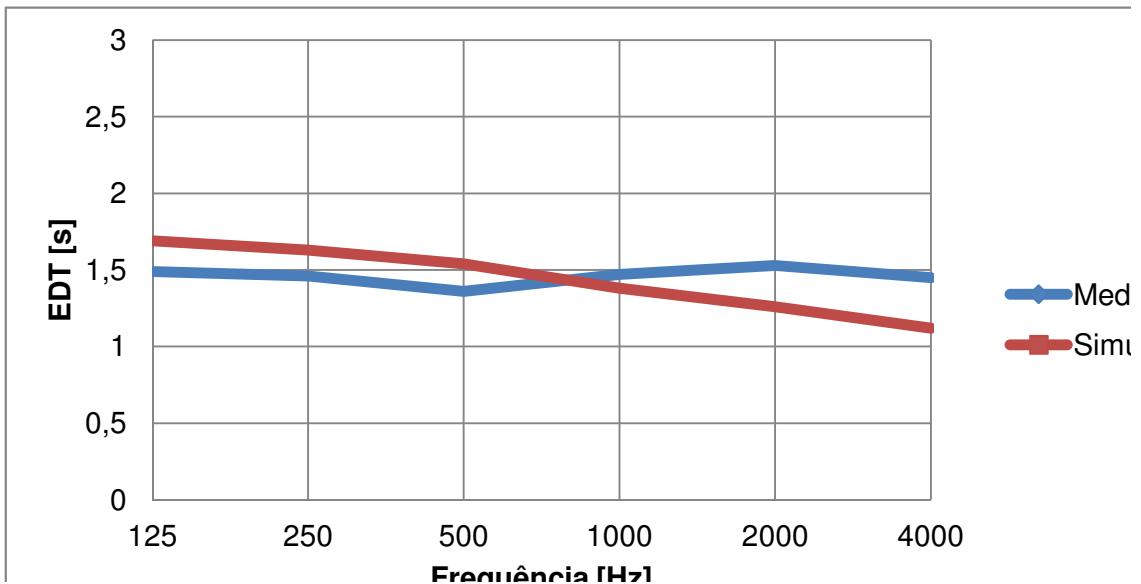


Figura 4.42 – Comparação entre *EDT* medido e simulado para **CPB01**, com mobília.

As comparações entre os valores de *EDT* medidos e simulados para as sete salas analisadas com mobília demonstram valores muito próximos dos valores reais obtidos nas medições da resposta impulso.

4.3.3 Clareza (C_{80})

A seguir, são apresentados os valores obtidos nas simulações realizadas para o parâmetro C_{80} e comparados com os respectivos valores experimentais. O C_{80} elucida a inteligibilidade das articulações dos sons e corresponde a razão entre a energia que se direciona ao ouvinte nos primeiros 50 ms.

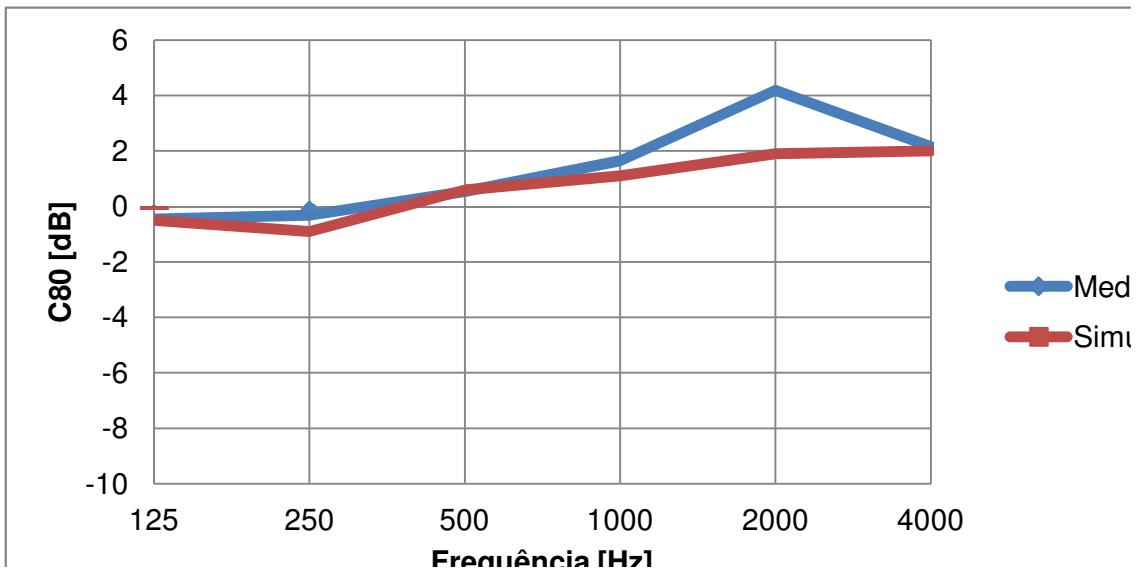


Figura 4.43 – Comparação entre C_{80} medido e simulado para PAI01, com mobília.

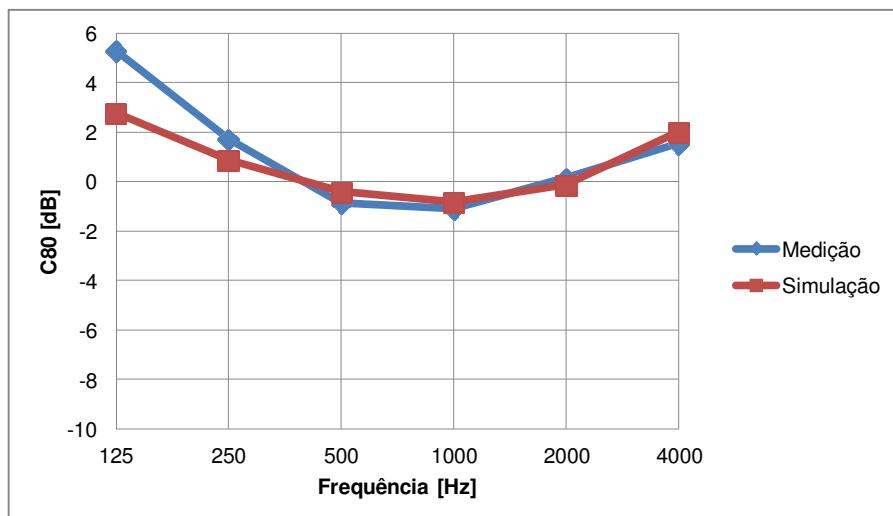


Figura 4.44 – Comparação entre C_{80} medido e simulado para PAP01, com mobília.

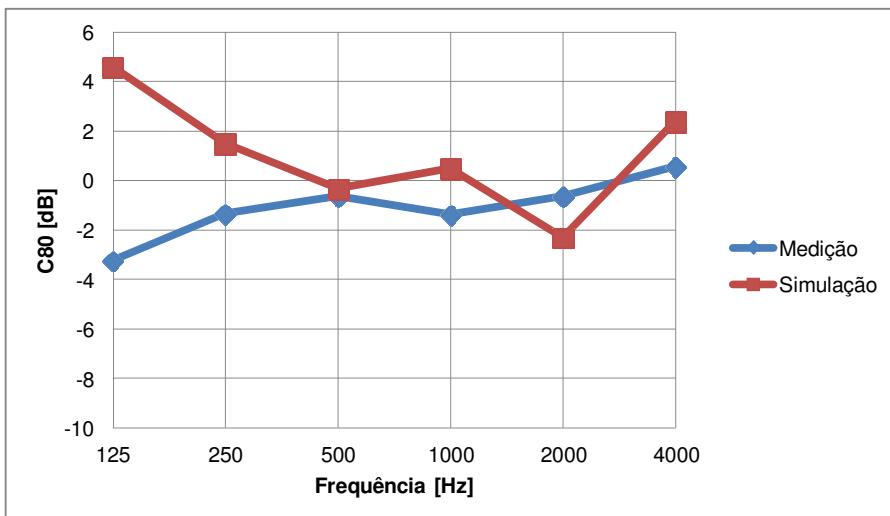


Figura 4.45 – Comparação entre C_{80} medido e simulado para **PAC01**, com mobília.

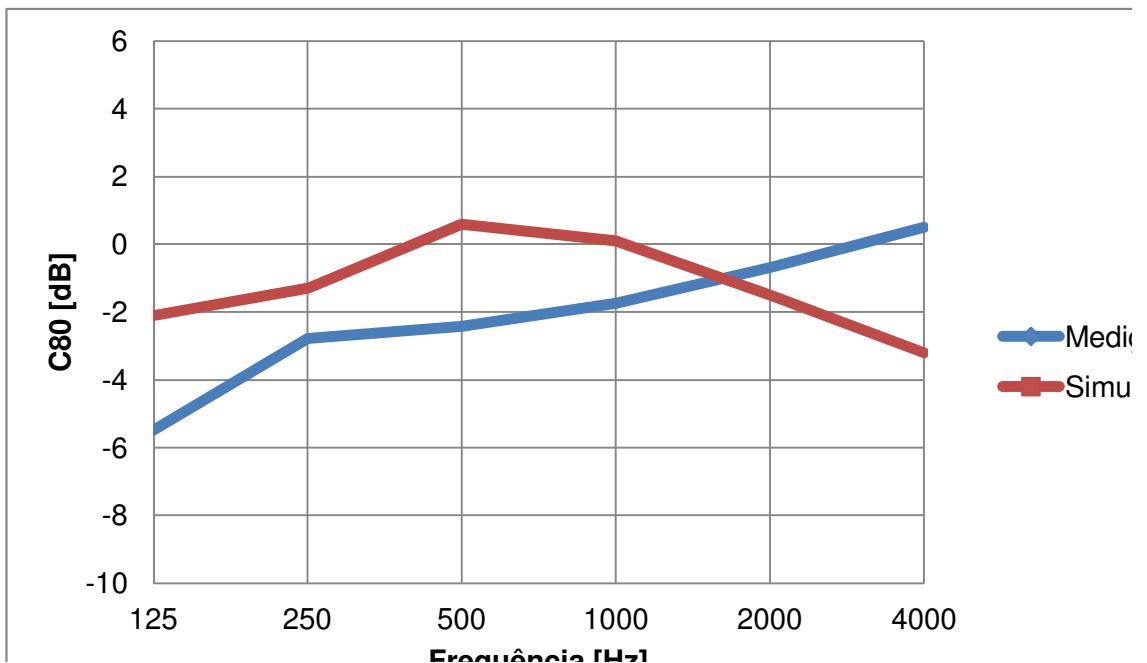


Figura 4.47 – Comparação entre C_{80} medido e simulado para **PAC02**, com mobília.

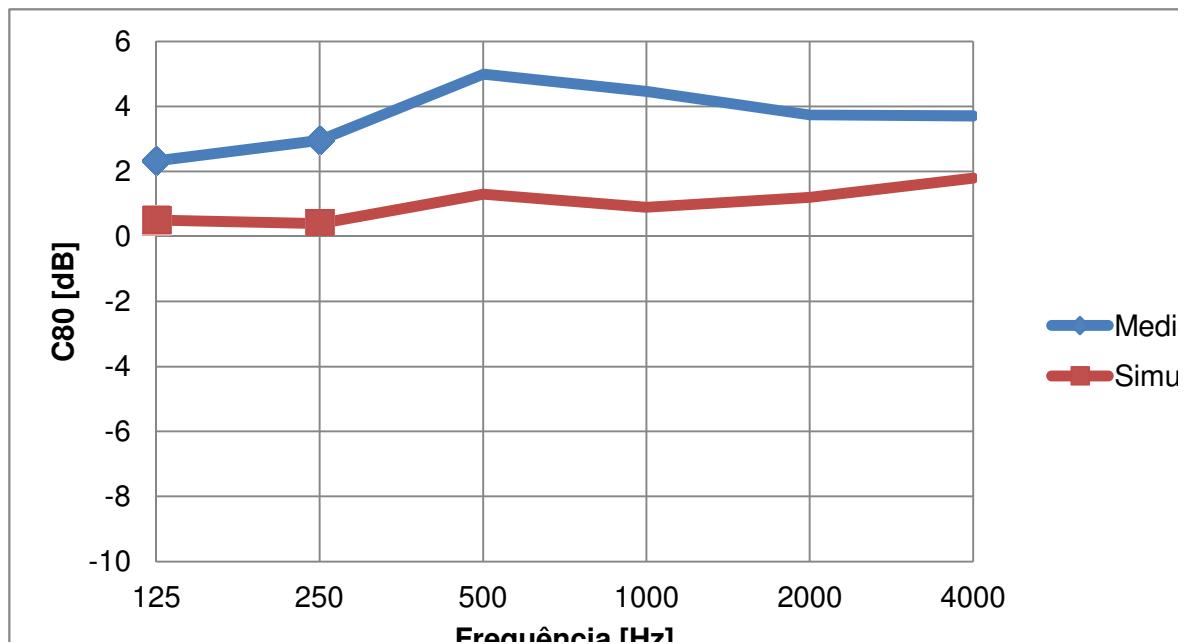


Figura 4.48 – Comparação entre C_{80} medido e simulado para CPA01, com mobília.

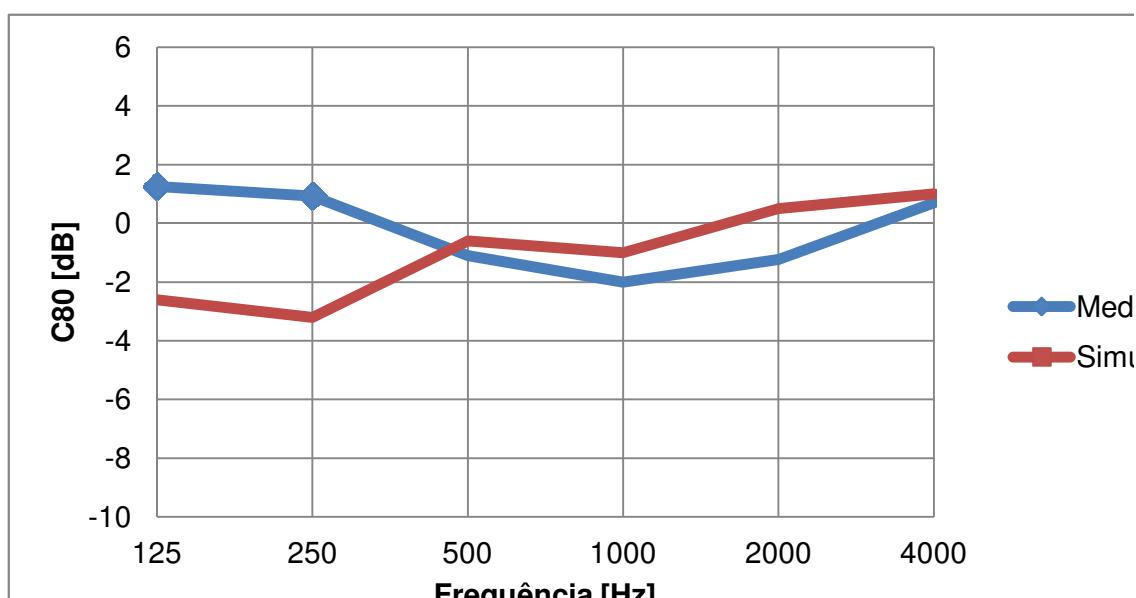


Figura 4.49 – Comparação entre C_{80} medido e simulado para CPA02, com mobília.

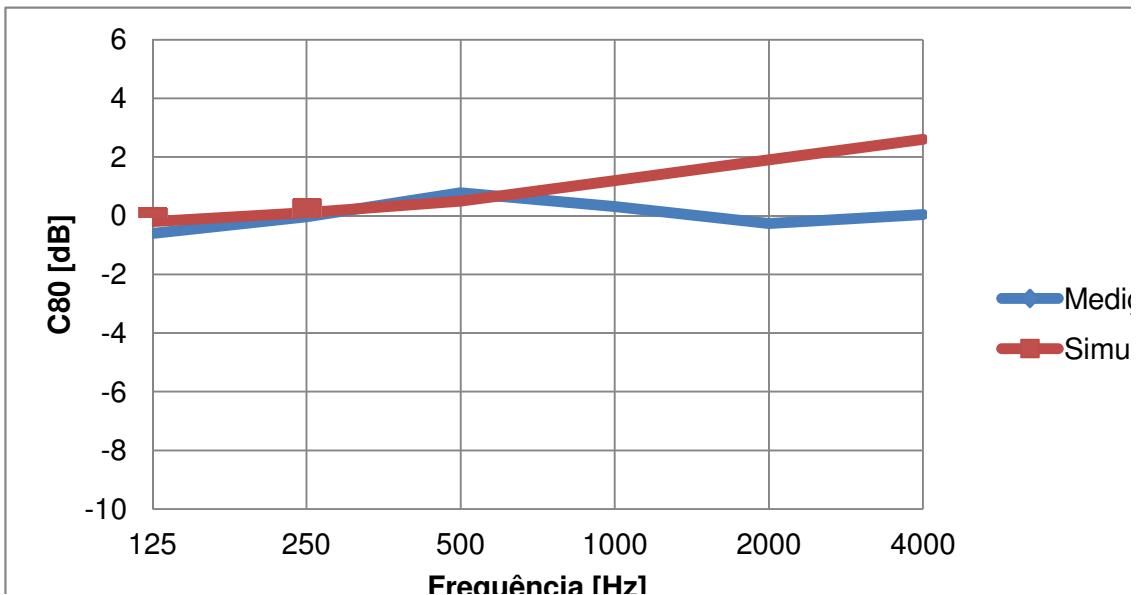


Figura 4.50 – Comparação entre C_{80} medido e simulado para **CPB01**, com mobília.

Dos resultados obtidos da diferença entre dados experimentais e simulados pode-se destacar os resultados obtidos para a sala CPA02 (figura 4.49) que registrou o valor de 3,56.

Com base no JND de 1 dB, verifica-se que cinco salas apresentam uma boa precisão para o parâmetro analisado com a análise realizada entre a diferença entre dados experimentais e simulados, para a média de frequência de 500 e 1.000 Hz, exceto as salas PAC02 as quais apresentaram 1,59 dB e CPA01, que apresentou 3,62 dB, provavelmente, devido às superfícies dos materiais arquitetônicos.

4.3.4 Definição (D_{50})

A análise do parâmetro Definição (D_{50}) mostrou que os valores obtidos pelas medições experimentais estão conformes com o estabelecido para salas de aula, demonstrando pouca diferença para as sete salas analisadas em relação aos valores simulados.

A Definição é o parâmetro que define a inteligibilidade da palavra e quanto mais próximo estiver da unidade, melhor será a inteligibilidade do ambiente (D_{50} : 0 a 1, ISO 3382/97). Vale lembrar que a Definição é inversamente proporcional ao TR.

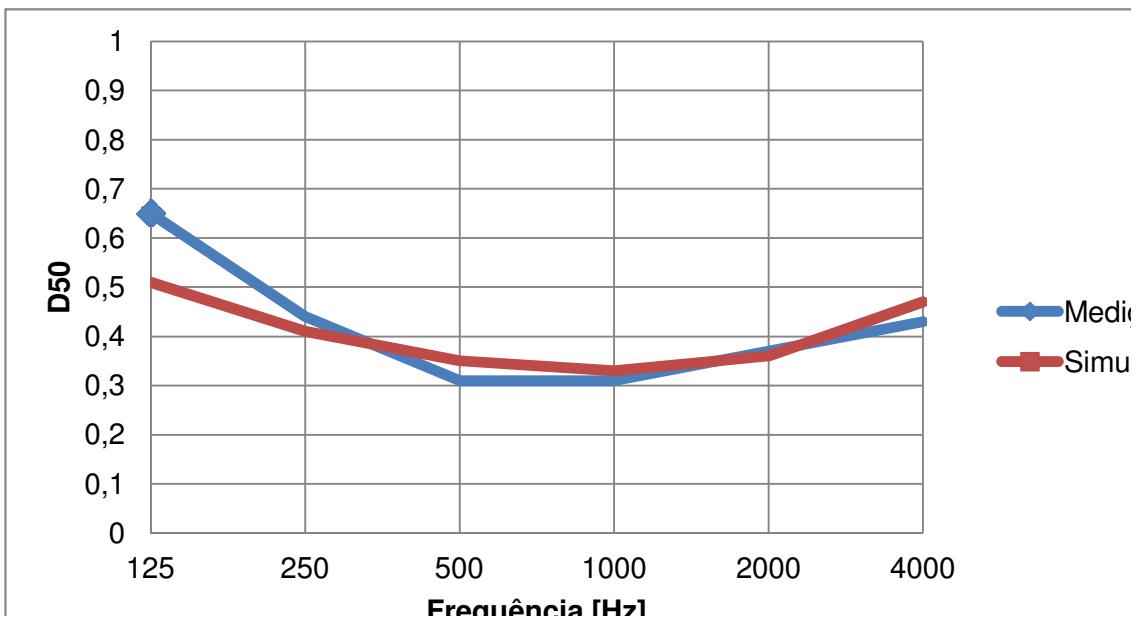


Figura 4.51 – Comparação entre D_{50} medido e simulado para PAP01, com mobília.

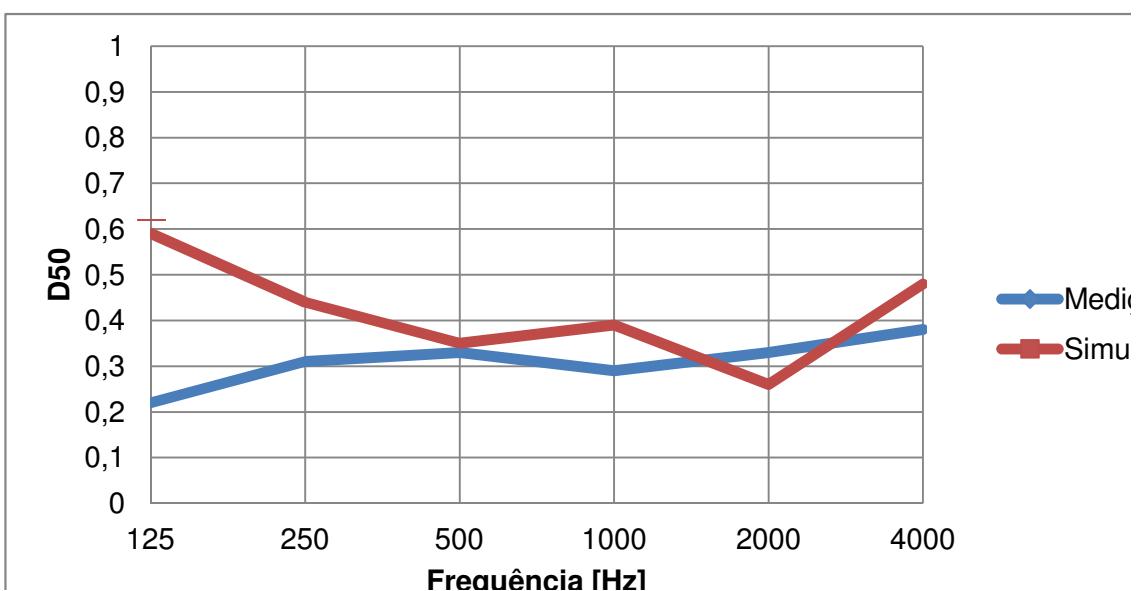


Figura 4.52 – Comparação entre D_{50} medido e simulado para PAC01, com mobília.

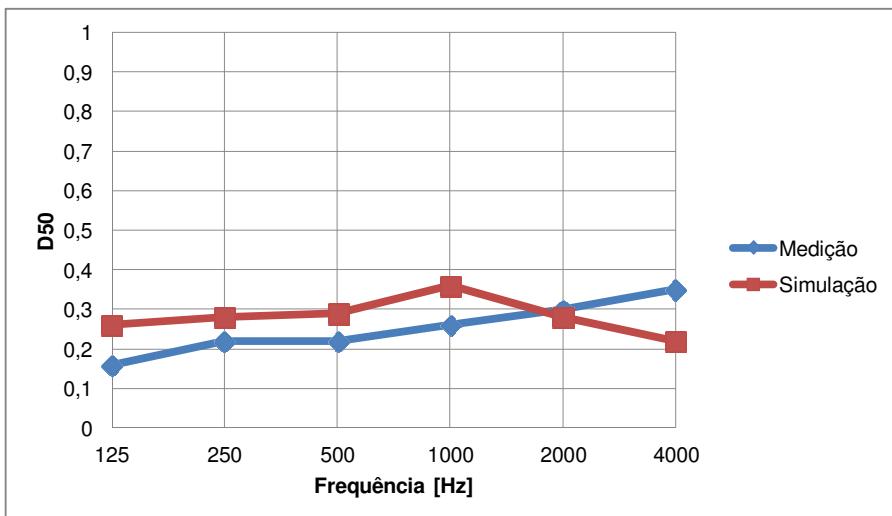


Figura 4.53 – Comparação entre D_{50} medido e simulado para **PAC02**, com mobília.

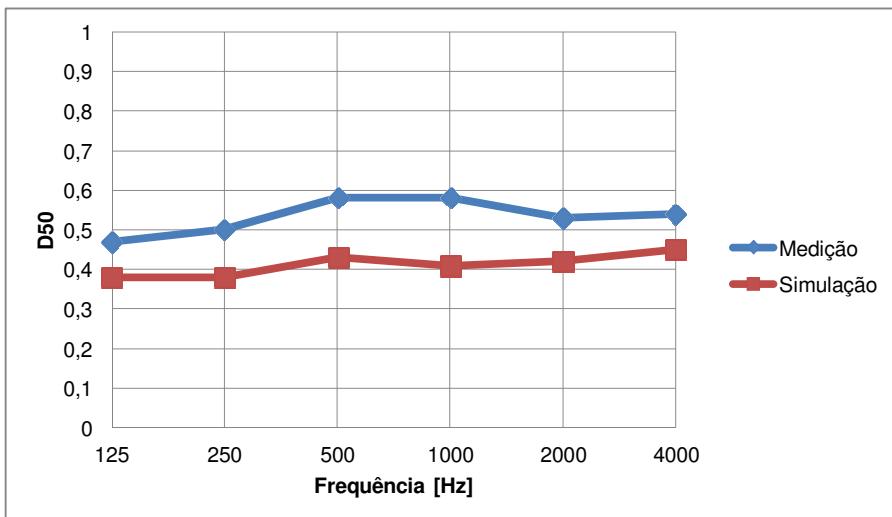


Figura 4.54 – Comparação entre D_{50} medido e simulado para **CPA01**, com mobília.

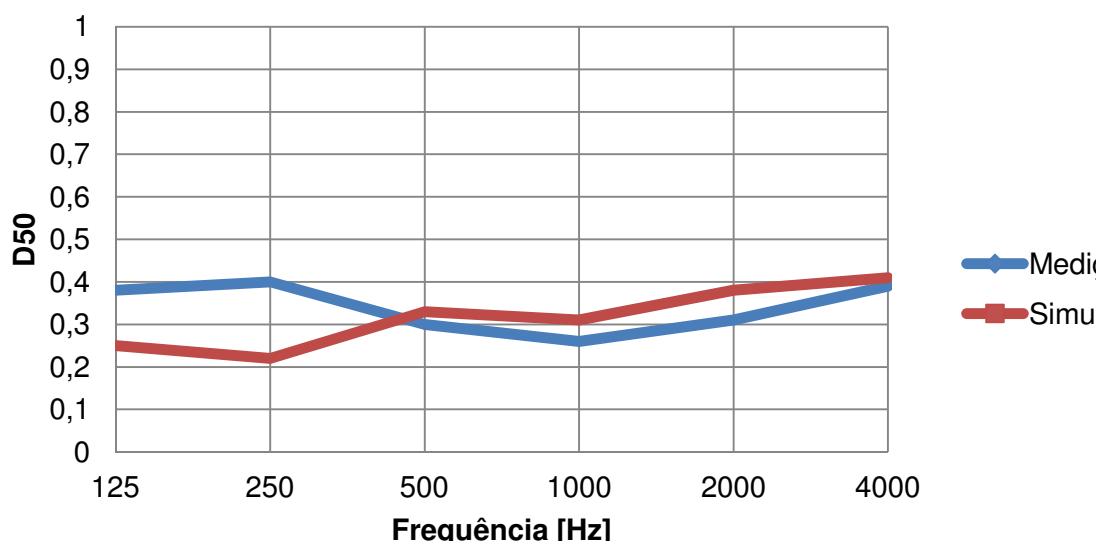


Figura 4.55 – Comparação entre D_{50} medido e simulado para **CPA02**, com mobília.

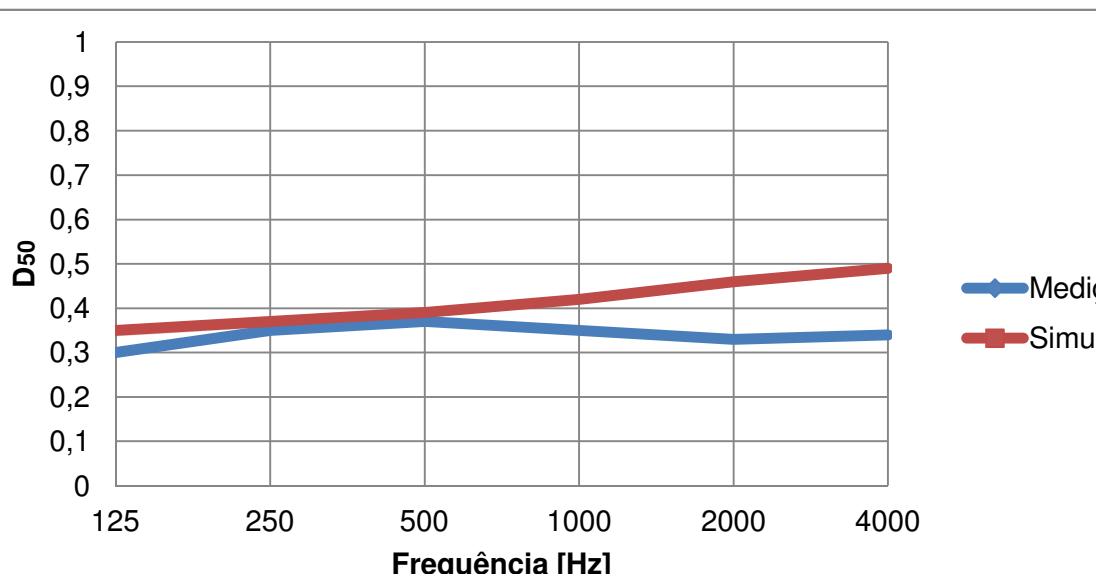


Figura 4.56 – Comparação entre D_{50} medido e simulado para **CPB01**, com mobília.

A Definição, conforme foi observado anteriormente, deve estar próximo da unidade para garantir uma boa inteligibilidade do ambiente. No caso das salas estudadas, os resultados de D_{50} simulados mostram que nenhuma das salas possui valores acima de 0,5. Isto significa que mesmo com as condições adaptadas para desenvolver as simulações, nada garantiu a boa inteligibilidade das salas.

No caso dos ensaios experimentais (medidas), D_{50} chegou a valores um sensivelmente maiores que 1 no caso das salas PAP01 (125 Hz) e CPA01 (acima de 500 Hz).

4.4 Comparação do STI medidos e simulados na situação de sala sem mobília e com mobília

O valor de STI é recomendado pela norma IEC 60268 -16 (quadro 2.1) e varia no intervalo de 0 a 1, sendo respectivamente nominado de ruim a excelente. Os valores de STI são apresentados na tabela 4.8, sempre em duplas, cada escola na situação sem mobília e com mobília.

Tabela 4.8 – Valores de STI medidos e simulados, na situação sem mobília e com mobília.

Sala	<i>STI</i> (sem mobília)		<i>STI</i> (com mobília)	
	Medido	Simulado	Medido	Simulado
PAI01	0,41	0,45	0,55	0,53
PAP01	0,47	0,53	0,47	0,53
PAC01	0,44	0,50	0,46	0,53
PAC02	0,43	0,44	0,45	0,47
CPA01	0,51	0,54	0,62	0,53
CPA02	0,42	0,47	0,44	0,47
CPB01	0,42	0,46	0,50	0,54

Fonte: Autor.

Conforme tabela 4.8, para o modelo da sala PAI01, o STI , quando medido na condição de sala sem mobília é considerado fraco, mas quando realizada a simulação nestas condições de sala, o valor apresentou-se adequado, isso devido às condições simuladas, que tentam reproduzir uma situação ideal. Quando se trata

de medição, nem sempre as condições ambientais são ideais, e fatores como a umidade do ar, por exemplo, não são controlados.

Para a condição de sala mobiliada, os valores se apresentaram adequados, tanto quando medidos como quando simulados. No modelo da sala PAP01 na condição de sala sem mobília ou com mobília, os valores são adequados, tanto quando medidos como quando simulados. O fato de qualificar o ambiente como adequado significa que para o ouvinte, o som recebido é inteligível e que seu significado na comunicação pode ser entendido, mas isso vai depender da distância e dos ruídos que compõem o ambiente.

Observa-se que no modelo da sala PAC01, quando medido na condição sem mobília, o *STI* é considerado fraco, mas quando simulado nestas condições de sala, o valor é adequado. Para a condição mobiliada, os valores se apresentaram adequados, tanto medidos como simulados. Para o modelo da sala PAC02, na condição de sala sem mobília, o valor de *STI* é considerado fraco, para o valor medido e para o valor simulado. Para a condição de sala mobiliada, os valores apresentaram-se adequados, tanto quando medidos como quando simulados.

No modelo da sala CPA01, na condição de sala sem mobília, o valor de *STI* é considerado adequado para o valor medido e simulado. Para a condição de sala mobiliada, o valor simulado também é adequado, porém o valor medido é bom. Para o modelo da sala CPA02, os valores medidos na condição de sala sem mobília e com mobília são considerados fracos, já os valores simulados nas duas condições de ocupação se apresentaram adequados, e, por fim, para o modelo da sala CPB01, os valores medidos na condição de sala sem mobília e com mobília são considerados adequados, com a exceção do valor medido para a sala sem mobília que se apresentou fraco.

Após a análise comparativa dos resultados do estudo experimental e do estudo simulado das salas, foram verificadas diferenças com valores não muito significativos. Essas diferenças de valores, entre experimental e simulado, já eram esperados, visto que a precisão de resultados é difícil de ser alcançada tanto na simulação como nas medições. As simulações, embora se considerando o condicionamento criado para o ambiente têm em seu método determinadas restrições ligadas aos valores atribuídos aos coeficientes de absorção dos materiais e outros valores já inclusos no próprio *software*, tendo também outras limitações computacionais esperadas.

Nas medições a precisão de resultados deve ser também questionada se esta pode ser comprometida pelos próprios fatores ambientais, considerando-se que os dados foram apurados *in loco* e que os parâmetros como a umidade do ar, a absorção do meio e elementos, que compõem o ambiente como portas, fechaduras e outros, podem comprometer a os resultados ensaiados, podendo, sobremaneira, aumentar as diferenças nos resultados comparativos entre valores experimentais e valores simulados.

4.5 Elaboração do Diagrama de Bolt a partir dos cálculos das salas analisadas

Nessa etapa foi utilizado o Diagrama de Bolt (figura 4.57) para a complementação da análise efetuada nas sete salas desse estudo.

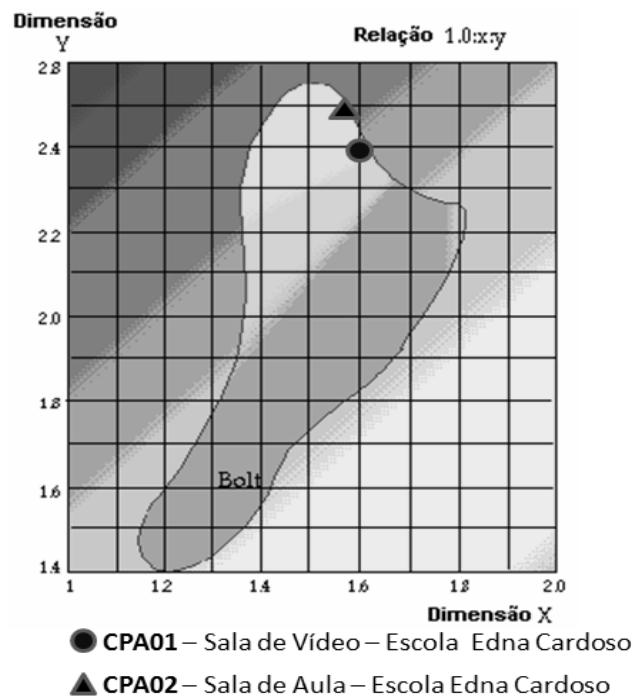


Figura 4.57 – Diagrama de Bolt.

Fonte: Adaptado pelo autor.

Na complementação da análise das salas, com a utilização do Diagrama de Bolt, das sete salas em questão, somente duas delas ficaram na área considerada como apropriadas, ou seja, com suas dimensões aprovadas. As duas salas consideradas apropriadas são a CPA01, sala de vídeo e CPA02, sala de aula, ambas pertencentes à Escola Edna May Cardoso.

No modelo de sala **CPA01**, a sala de vídeo da Escola Estadual Edna May Cardoso, foi considerada com medidas de 6,65 m de comprimento, 4,45 m de largura e 2,75 m de altura, sendo que as dimensões foram normalizadas pela altura (2,75m). Calculados os valores de X e Y, a relação 1 : X : Y, para esse ambiente específico foi de 1 : 1,6 : 2,4. Esses valores indicam que as coordenadas dos dois pontos **estão** contidas na “Área de Bolt”.

Já no modelo de sala **CPA02**, a sala de aula – Escola Estadual Edna May Cardoso, foi considerada com medidas de 7,00 m de comprimento, 4,50 m de largura e 2,75 m de altura, sendo que as dimensões foram normalizadas pela altura (2,75m). Calculados os valores de X e Y, a relação 1 : X : Y para esse ambiente específico será 1 : 1,6 : 2,5. Esses valores indicam que as coordenadas dos dois pontos **estão** contidas na “Área de Bolt”.

CAPÍTULO V

5 PROPOSTA TIPOLÓGICA ACÚSTICO-ARQUITETÔNICA

A busca de melhores condições acústicas das salas de aula para o ensino de música garantindo a este um tempo ótimo de reverberação e uma boa distribuição do som está relacionada ao condicionamento acústico, segundo a NBR 12179 (ABNT, 1992).

Este estudo apresenta uma proposta tipológica acústico-arquitetônica, a partir da análise realizada em sete salas de aula, que serão utilizadas para o ensino da música em cinco escolas estaduais de Santa Maria – RS, pois estas necessitarão de adequações, para que possam proporcionar aos alunos uma educação musical de qualidade.

5.1 Os espaços para o ensino

A rede oficial de ensino constitui-se de prédios públicos e privados que, na maioria dos casos, são adaptados à função de escola.

É necessário que os projetos de escolas pensem edificações que possam ser modificadas, ao longo dos anos, além de considerar o conforto ambiental: as condições térmicas, luminosas e acústicas que resultam em variações climáticas comprometendo o bem-estar e o aproveitamento didático dos alunos que estejam nesses ambientes.

Uma das melhores propostas usadas no planejamento de uma escola é uma criteriosa distribuição dos prédios, uma boa arborização, buscando criar barreiras entre as edificações, como forma de isolamento. Segundo Carvalho (2010), as dependências de uma escola devem receber tratamento acústico, tendo em vista a finalidade da sala. Em especial, as salas dedicadas à música ou auditório para concerto devem ser rigorosamente observados.

As salas de aula, quando forem projetadas, devem priorizar os aspectos de conforto ambiental, de forma que a acústica, o desempenho térmico, a iluminação, e também, a ergonomia contribuam para o melhor aproveitamento didático dos estudantes.

5.2 Proposta tipológica da sala de aula

As adequações acústico-arquitetônicas são traduzidas neste estudo como uma proposta alternativa de sala de aula para o ensino da música, que venha a garantir a qualidade acústica de salas já existentes, mantendo suas características de estrutura, localização, instalações, componentes básicos e outros, já integradas ao ambiente, buscando, assim, cumprir com o objetivo geral deste estudo.

É preciso considerar também que a qualidade do ambiente escolar é composta por uma integração de fatores, como a acústica, a iluminação, desempenho térmico, conforme já mencionado, e outros fatores de extrema relevância como a população integrante da sala de aula. Por isso, qualquer proposta apresentada para a qualidade acústica do ambiente deve considerar no seu contexto, os demais fatores integrantes do ambiente.

Existem várias recomendações estabelecidas para as condições ambientais de uma sala de aula e seu entorno. A tabela 5.1 apresenta os condicionantes ambientais utilizados na proposta tipológica acústico-arquitetônica das salas de aula destinadas ao ensino da música (Prefeitura do Rio de Janeiro, 1996).

Tabela 5.1 – Condicionantes ambientais para salas de aula utilizadas para o ensino da música nas escolas de educação básica.

Condicionantes Ambientais	Construções Novas	Adaptações
Área mínima por usuário	1,50 m ²	1,25 m ²
Largura mínima	5,00 m	3,25 m
Comprimento máximo	8,50 m	8,50 m
Vão livres portas mínimas	0,90 m Com visor	0,80 m Com visor
Pé-direito mínimo	3,00 m	2,60 m
Ventilação mínima	1/8 do piso	1/10 do piso
Iluminação mínima	1/4 do piso	1/6 do piso
Nível de iluminância	300 lux	300 lux
Laje ou forro	Obrigatório	Obrigatório
Ventilação cruzada	Obrigatória	Obrigatória
Paredes	Semi-impermeável e claras	Semi-impermeável e claras
Piso	Lavável e antiderrapante	Lavável e antiderrapante
Carga incidental prevista	300 kgf/m ²	300 kgf/m ²

Fonte: organizado pelo autor, baseado na Secretaria Municipal de Urbanismo – RJ, 1996.

A descrição apresentada para a proposta tipológica de sala de aula pretende demonstrar que este espaço físico pode atender as necessidades básicas para deixar o ambiente confortável, com uma excelente iluminação e ventilação cruzada, dispensando o uso de iluminação e ventilação artificial, propiciando uma ventilação adequada, se possível, na direção do oeste, onde o sol incide com maior intensidade à tarde.

É preciso considerar também a relação entre o volume da sala e os valores do tempo de reverberação na distribuição das frequências desta sala. A norma ANSI 1260 (2002) coloca que em salas onde o TR excede os valores entre 0,4s e 0,6s com volume de 283 m³ há redução da inteligibilidade da fala. Para salas maiores a norma recomenda valor de TR igual ou menor do que 0,7s para as frequências de 500 Hz, 1.000 Hz e 2.000 Hz.

O tempo de reverberação considerado adequado para salas de aula dedicadas a música, não possui nada especificado no Brasil, porém a norma brasileira NBR 12179 que trata do tratamento acústico em recintos fechados (ABNT, 1992), recomenda valores de TR ótimos para salas de conferência em função do volume. Viveiros (2000), a partir de dados publicados pelo Departamento de Educação e Ciência de Londres em 1975, apresenta alguns critérios para assegurar a qualidade acústica em salas, conforme os itens apresentados abaixo:

- a) O nível máximo de ruído de fundo deve ser baixo o suficiente, para que não interfira na inteligibilidade.
- b) O ruído ambiental externo é um dos fatores que mais incomodam e interferem na inteligibilidade da fala na sala de aula. O critério para o controle do ruído ambiental implica no estudo da área a ser implantada na edificação escolar, bem como prevê o desenvolvimento da região em longo prazo. A tipologia da edificação também poderá ser definida levando-se em conta o posicionamento das aberturas das salas de aula, não voltadas para as áreas mais propensas aos níveis sonoros elevados.
- c) As salas devem ser livres de ecos ou outros fenômenos acústicos que possam vir a confundir ou distorcer o som a ser ouvido.
- d) O estudo da geometria da sala é fundamental para se evitar ecos e outros fenômenos acústicos indesejáveis como distorções sonoras.
- e) Propiciar o tempo de reverberação adequado para cada tipo de atividade.
- f) O TR adequado para salas de aula também pode ser obtido através do estudo da forma geométrica da sala, na determinação das dimensões e volume, consequentemente, na ocupação máxima da sala e na adoção de materiais de acabamento.

Losso (2003), em estudo desenvolvido em escolas de Florianópolis, desenvolveu algumas diretrizes para o projeto arquitetônico e acústico de salas de aula:

- a) As salas de aula requerem baixo nível de ruído de fundo (máximo de 40 dB (A). No caso de valores maiores, estes deverão ser reduzidos através de medidas posteriores à construção da escola, através da construção de muros que funcionem como barreira acústica, substituindo grades e portões. Também substituindo-se os vidros simples de janelas por vidros duplos.
- b) As dimensões em planta de 6,00m x 8,00m podem ser mantidas, porém, o pé-direito não deverá ser muito alto, para não correr o risco de elevar o tempo de reverberação.
- c) A padronização de medidas para garantir um TR adequado não é necessária, pois caberá ao projetista a definição das dimensões e dos materiais de revestimento, priorizando a liberdade compositiva.

Fundamentando-se nas referências, acima relacionadas, a proposta tipológica acústico-arquitetônica de salas para o ensino da música possui as seguintes medidas: **7,00** m de comprimento, **5,00** m de largura e **3,00** m de altura, sendo que as dimensões foram normalizadas pela altura 3,00 m.

O Diagrama de Bolt é um procedimento que permite identificar a relação entre a dimensão da sala retangular que propicia a distribuição modal adequada. As salas quadradas são desaconselhadas para comportamentos sonoros de baixa frequência, em torno de 300 Hz (AMORIM, 2007), usando-se as recomendações apresentadas no Diagrama de Bolt, calculados os valores de X e Y, a relação 1:X:Y para a nova tipologia será de **1:1,6:2,3**. Esses valores indicam que as coordenadas dos dois pontos estão contidas na Área de Bolt, conforme figura 5.1.

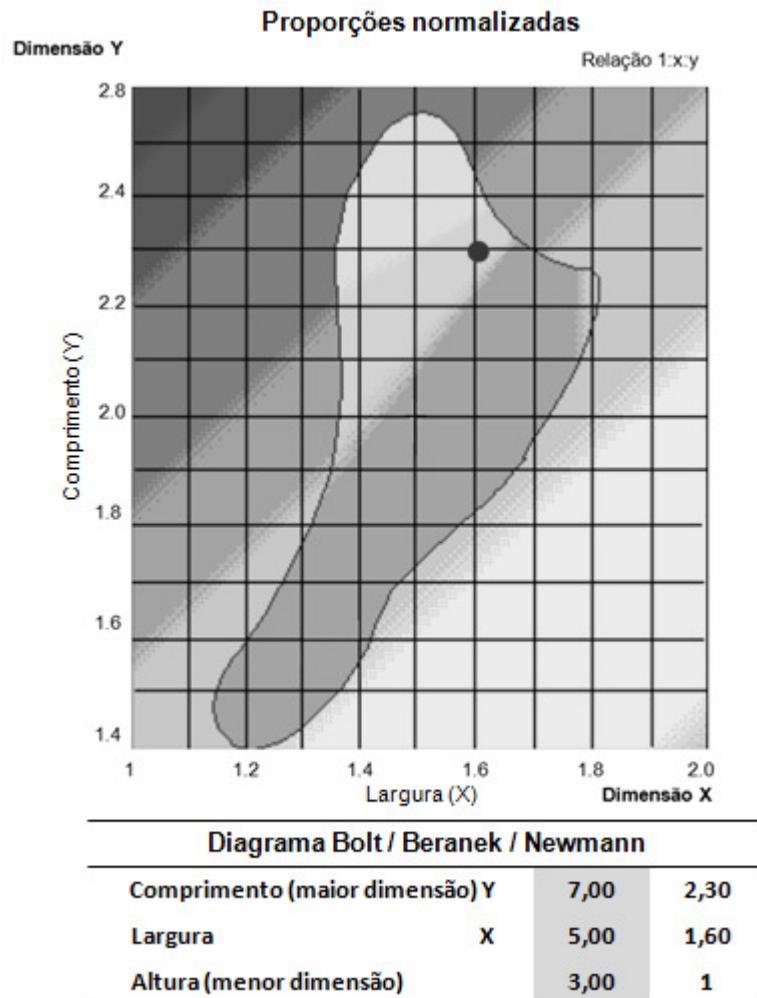


Figura 5.1 – Sugestões do autor para as proporções da sala proposta, locadas do Diagrama de Bolt (1946).

Fonte: Bolt / Beranek / Newmann.

Após a definição das dimensões e proporções da nova tipologia de sala, procurou-se estabelecer uma proposta de inclinação das paredes, sem comprometer a área definida para o ambiente. Essas inclinações tornam as paredes divergentes, direcionando as reflexões acústicas para o fundo da sala.

Toro (2005), em sua proposição de projeto acústico para as escolas públicas da cidade de Belém – PA, tomou como base ângulos de inclinação nas paredes laterais direcionando as reflexões sonoras para o fundo da sala, buscando não descharacterizar a proposição original existente da Secretaria de Educação (SEDUC). Sendo assim, para a caracterização desta nova tipologia de sala proposta foram definidos ângulos de 15° e 20° nas paredes laterais.

Essa proposta tipológica acústico-arquitetônica para a nova sala, objetiva trazer aos usuários as melhores condições de aprendizagem, cumprindo-se com a proposta de inserir a disciplina de música nos currículos escolares de educação básica, porém de maneira que esta inserção aconteça de forma qualificada.

A planta baixa, que representa o projeto padrão para salas de aula para o ensino da música, é apresentada na figura 5.2, com os detalhes dos ângulos de inclinação que desviam as reflexões acústicas para o fundo da sala.

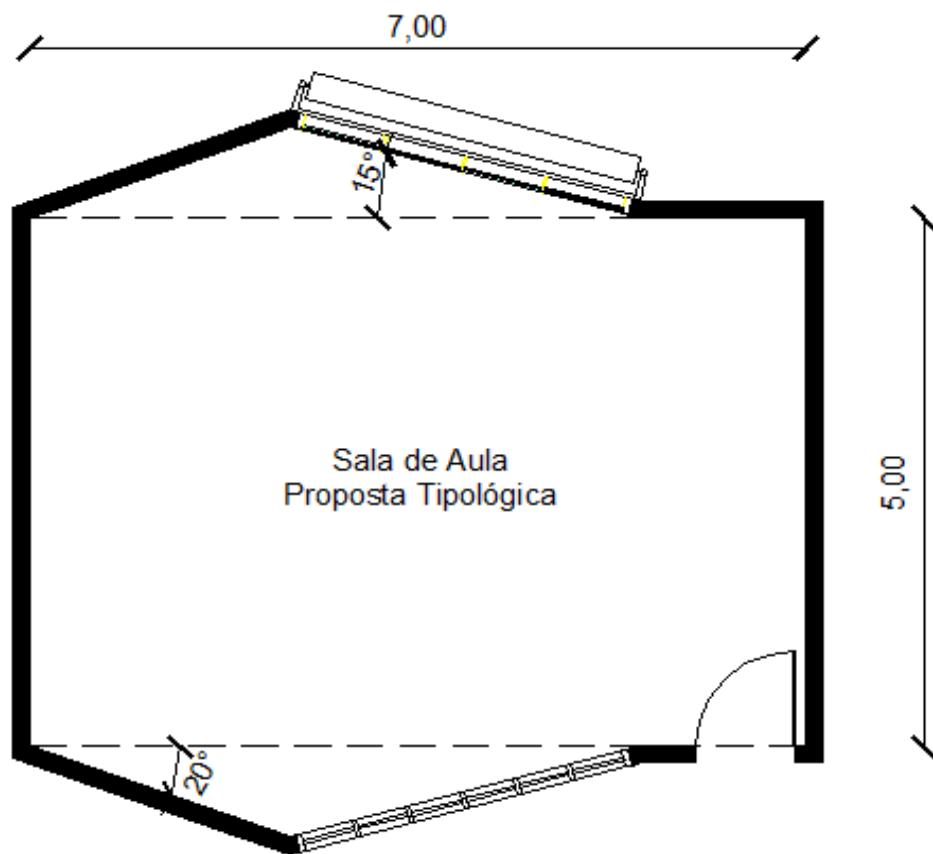


Figura 5.2 - Planta baixa que representa a proposta tipológica acústico-arquitetônica para salas de aula para o ensino da música com os ângulos de inclinação de 20° e 15°.

Fonte: Autor.

Também a planta baixa que representa a proposta tipológica acústico-arquitetônica para salas de aula com a orientação magnética é apresentada na figura 5.3. Para a sala de aula proposta, o ideal seria usar orientação norte e sul,

pois no norte podemos controlar melhor a entrada do sol, o que permite, no inverno, um melhor aquecimento.

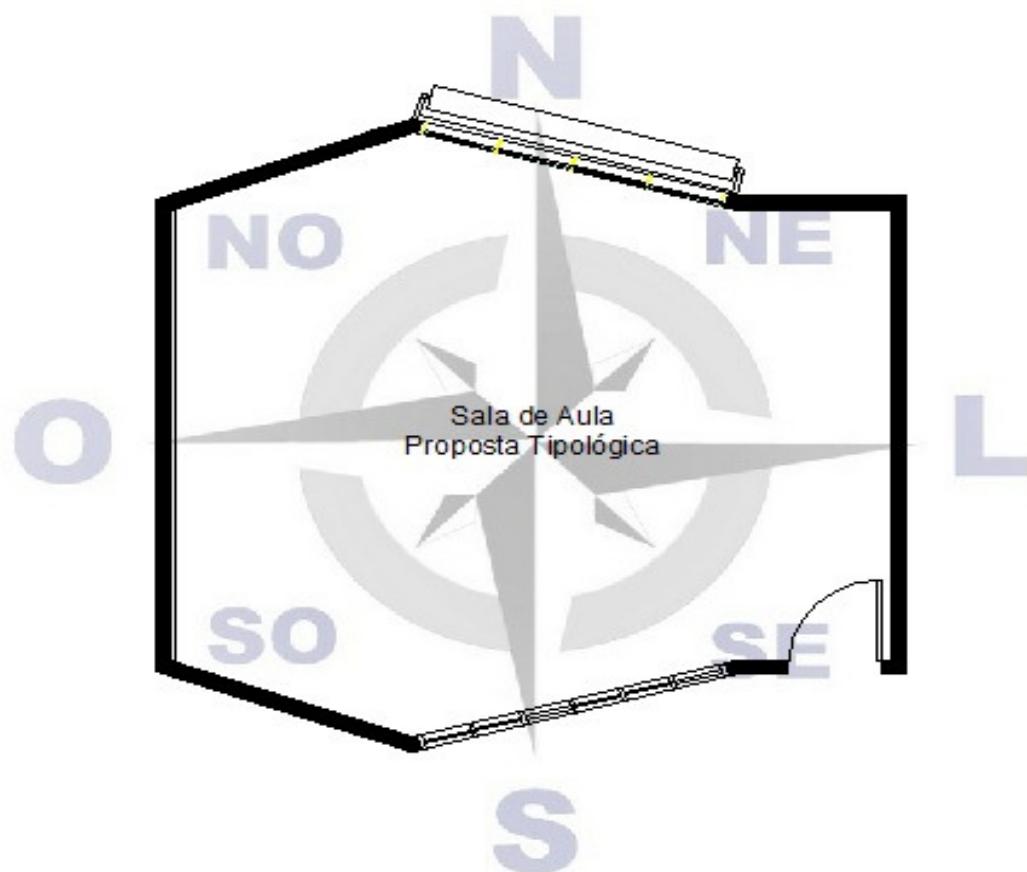


Figura 5.3 – Planta baixa que representa a proposta tipológica acústico-arquitetônica para salas de aula para o ensino da música com a orientação magnética.

Fonte: Autor.

A figura 5.4 mostra o *layout* da proposta tipológica acústico-arquitetônica para salas de aula para o ensino da música com a distribuição do mobiliário.

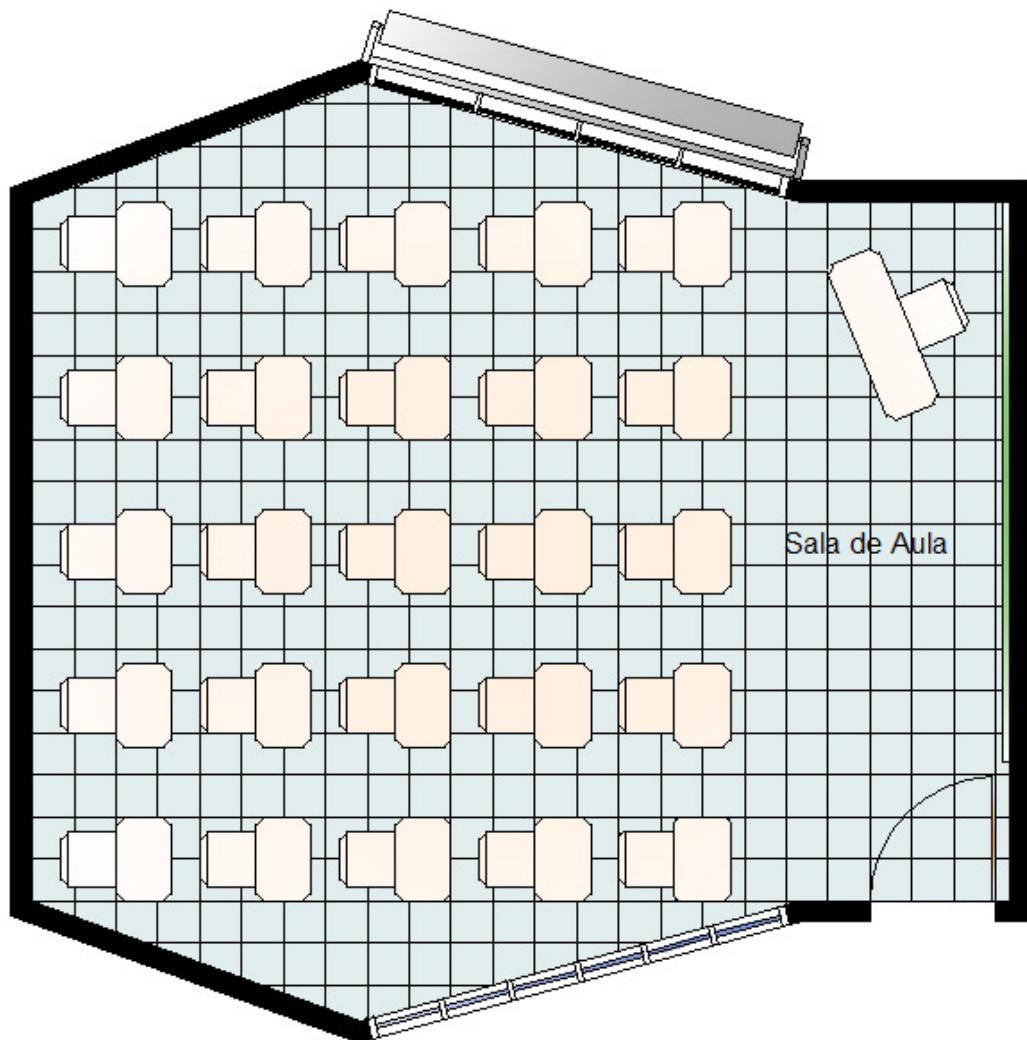


Figura 5.4 – Planta baixa da proposta tipológica acústico-arquitetônica para salas de aula para o ensino da música com a distribuição do mobiliário.

A figura 5.5 mostra o *layout* da proposta tipológica acústico-arquitetônica para salas de aula para o ensino da música, com a distribuição do mobiliário e detalhe da área de visibilidade e circulações mínimas, onde os corredores entre classes são de 0,50 m. Os ângulos formados entre os dois posicionamentos extremos da primeira fileira de classes deverão ser 30º e 60º. A distância entre a parede e a primeira classe deverá ser de 2,00 m.

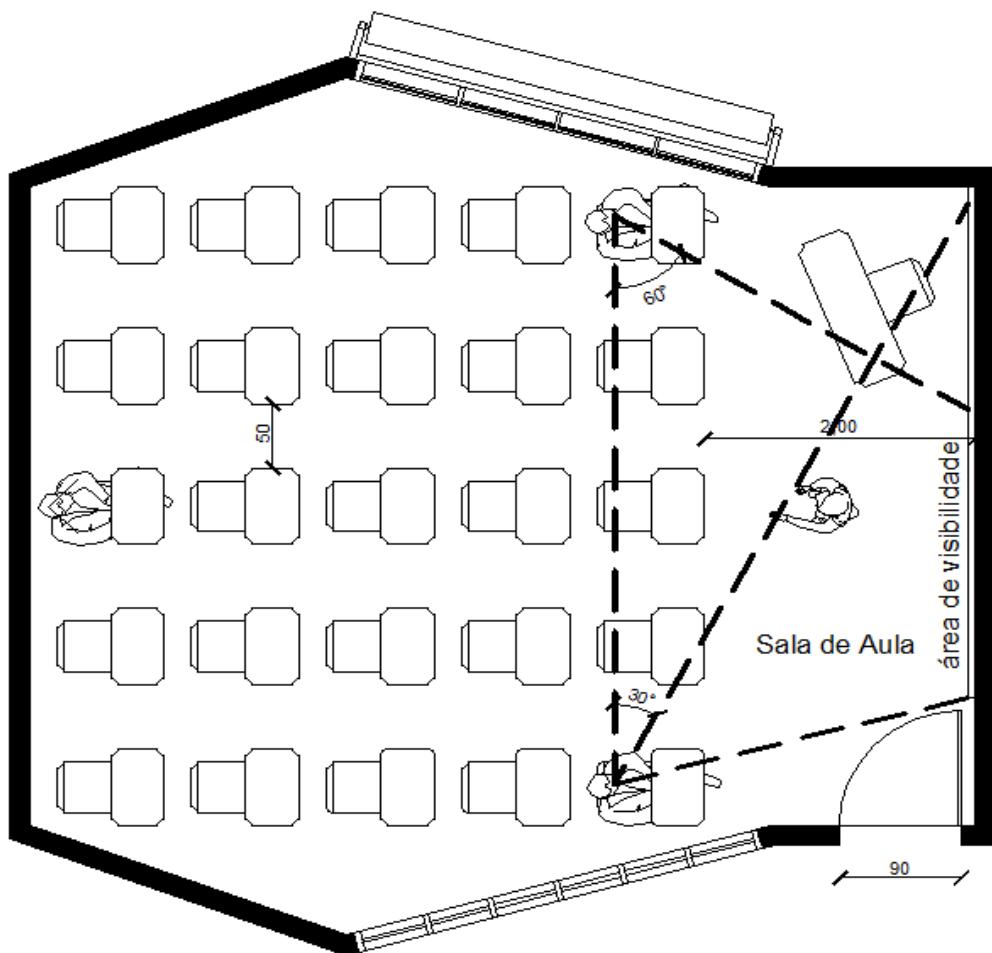


Figura 5.5 – Planta baixa da proposta tipológica acústico-arquitetônica para salas de aula para o ensino da música, com a distribuição do mobiliário e detalhe da área de visibilidade.

5.3 Fundamentação do projeto padrão para salas de aula para o ensino da música

A proposta de dimensionamento fundamentou-se em uma distribuição modal adequada, usando o modelo retangular como ponto de partida. Somente após a verificação da relação entre as dimensões da sala pelo Diagrama de Bolt é que se iniciou uma proposta de inclinação das paredes laterais. A figura 5.8 e a figura 5.9 mostram a perspectiva da sala proposta, com uma visualização tridimensional.



Figura 5.8 – Visualização 3D da proposta tipológica acústico-arquitetônica da sala.



Figura 5.9 – Visualização 3D da proposta tipológica acústico-arquitetônica da sala.

Na acústica da sala proposta, o interesse é que a aprendizagem de música tenha qualidade e o primeiro elemento desta condição é cuidar do ambiente de estudo. Isso pode ser obtido buscando um tempo de reverberação ótimo na sala, uma boa distribuição do som e uma boa inteligibilidade da fala.

Uma das principais recomendações para os fatores acústicos do modelo proposto é o não paralelismo das paredes, evitando-se, assim, os defeitos acústicos como o eco que ocorre nos fechamentos verticais e entre piso e teto.

Também a cobertura das superfícies das superfícies internas da sala deve evitar os materiais altamente reflexivos, pois tempos de reverberação baixos são possíveis com materiais de boa absorção sonora no ambiente.

A figura 5.10 e figura 5.11 apresenta a representação em corte da sala proposta.



Figura 5.10 – Representação em corte da sala proposta.



Figura 5.11 – Representação em corte da sala proposta.

A inclinação nas paredes laterais proposta para o modelo de sala pode ser agregada a um material absorvente no fundo da sala para evitar ecos nos cantos das paredes, diminuindo a reverberação. Portanto, para conseguir essa adequação acústica no ambiente proposto para a sala de música são sugeridos os materiais que compõem as superfícies das salas.

A tabela 5.2 apresenta a descrição das superfícies da sala, a área correspondente e o tipo de material que compõem essa superfície e seu coeficiente de absorção.

Tabela 5.2 – Superfície, área, tipo de material e coeficiente de absorção sonora da sala proposta.

Superfícies	Área (m²)	Materiais e Objetos	Coeficiente Absorção Sonora em 500 Hz (α)
Parede	51,00	Alvenaria tijolo rebocado (1)	0,04
Piso	39,70	Cerâmico (1)	0,01
Forro	39,70	Placa de gesso (2)	0,08
Janelas	7,44	Vidro comum caixilho (1)	0,18
Porta	1,89	Madeira pintada (1)	0,14
Parede de fundo Absorvedora	15,00	Material Poroso (3)	0,69
Carteiras escolares (25)	0,24	Fórmica (1)	0,03
Cadeiras	0,24	Madeira (1)	0,01
Mesa (25)	0,50	Madeira (1)	0,01
Lousa	3,00	(2)	0,01
1 pessoa com cadeira	-	(3)	0,44
Volume da Sala	105 m ³		

Fonte: adaptado pelo Autor (1-BISTAFA, 2006; 2-BRUEL & KJAER, 1978; 3-NBR 12179, 1992).

5.4 Simulação acústica da tipologia proposta de sala para música

A nova tipologia proposta de sala para música tratou de verificar os parâmetros acústicos TR , EDT , C_{80} , D_{50} e STI , para a condição de sala com mobília.

Para efeito de análise, os parâmetros simulados apresentam valores máximos, médios e mínimos. Aqui nesta análise serão utilizados os valores médios de cada um. Para isto, foram definidos 5 pontos de simulação, considerando cada ponto como sendo um ouvinte (aluno), conforme mostra a figura 5.12.

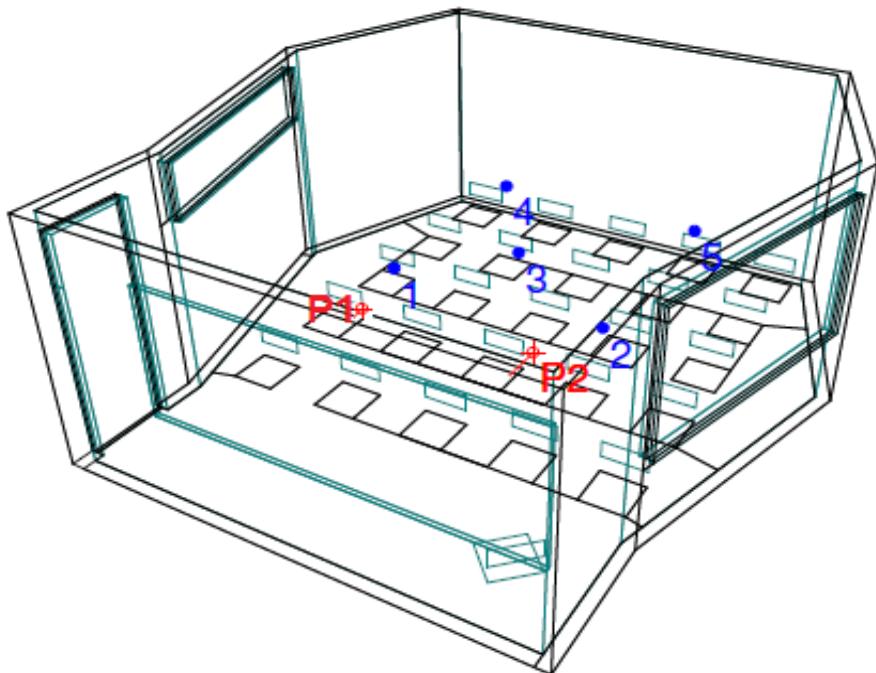


Figura 5.12 – Cinco pontos de medição usados na simulação da sala.

A tabela 5.3 apresenta os valores médios simulados nos cinco pontos considerados para os ouvintes.

Tabela 5.3 – Valores médios simulados para os cinco pontos considerados para medições.

Parâmetros Acústicos	Ponto	Frequência [Hz]				
		125	250	500	1.000	2.000
TR [s]	M1	0,94	0,93	0,69	0,67	0,60
	M2	0,98	0,91	0,75	0,70	0,62
	M3	0,95	0,91	0,78	0,72	0,63
	M4	0,96	0,90	0,72	0,68	0,63
	M5	0,93	0,90	0,72	0,72	0,67
EDT [s]	M1	1,00	0,96	0,72	0,68	0,54
	M2	0,97	0,95	0,72	0,65	0,58
	M3	0,94	0,92	0,69	0,67	0,54
	M4	0,97	0,88	0,69	0,63	0,57
	M5	0,90	0,86	0,68	0,66	0,60
C_{80} [dB]	M1	0,37	0,38	0,62	0,66	0,81
	M2	0,43	0,45	0,69	0,73	0,88
	M3	0,33	0,35	0,58	0,62	0,77
	M4	0,36	0,38	0,61	0,64	0,79
	M5	0,37	0,39	0,62	0,66	0,81
D_{50}	M1	0,54	0,54	0,65	0,67	0,73
	M2	0,58	0,59	0,69	0,71	0,76
	M3	0,51	0,52	0,62	0,64	0,71
	M4	0,55	0,55	0,65	0,67	0,73
	M5	0,54	0,55	0,65	0,67	0,73

Os materiais e mobiliários utilizados na simulação acústica da sala foram os mesmos utilizados nas salas pertencentes à amostra deste estudo e são apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Materiais e mobiliários utilizados no modelo computacional e seus respectivos coeficientes de absorção sonora.

Materiais	Frequência [Hz]					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Parede de Tijolo rebocada	0,018	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
Porta Madeira Pintada	0,20	0,15	0,10	0,10	0,09	0,11
Janela	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Quadro Escolar (*)	0,20	0,28	0,26	0,09	0,12	0,11
Cadeira Estofada (*)	0,088	0,19	0,252	0,295	0,332	0,342
Piso Cerâmico	0,20	0,15	0,10	0,10	0,05	0,10
Classe Escolar (*)	0,016	0,018	0,034	0,042	0,055	0,053
Cortina	0,05	0,06	0,39	0,63	0,70	0,73

Fonte: Organizado pelo autor a partir de valores normalizados na NBR 12179/1992.

(*) resultados das medições em câmara reverberante.

A tabela 5.5 apresenta os valores dos parâmetros acústicos simulados para a nova proposta de sala com mobília.

Tabela 5.5 – Valores médios Simulados (Situação “com mobília”).

Parâmetros Acústicos [média]	Frequência [Hz]					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
TR [s]	0,95	0,91	0,73	0,70	0,63	0,58
EDT [s]	0,96	0,92	0,70	0,66	0,57	0,53
C₈₀ [dB]	0,37	0,39	0,62	0,66	0,81	0,89
D₅₀	0,55	0,55	0,65	0,67	0,73	0,76
STI	0,67					

Fonte: Autor.

5.4.1 Tempo de Reverberação (TR)

O TR da proposta tipológica simulada, apresentado na figura 5.12, mostra os valores deste parâmetro acústico em banda oitava nas frequências entre 125 Hz e 4000 Hz.

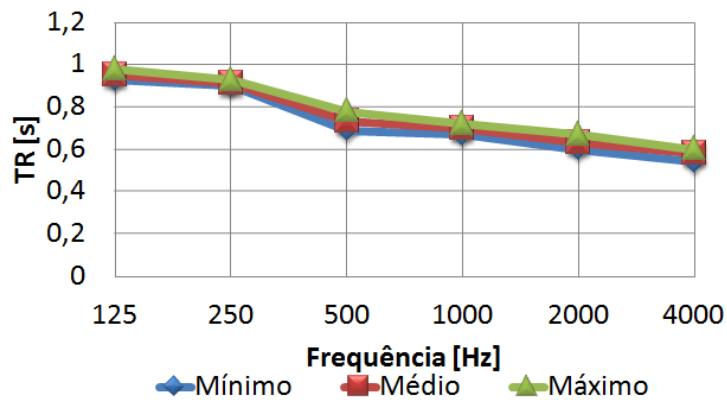


Figura 5.13 – TR da tipologia proposta para a sala de música.

O TR nesta simulação teve valores médios entre 0,95 s para 125 Hz e 0,58 s para 4000 Hz, decaindo, uniformemente, em toda a distribuição da banda de frequência. O resultado deste parâmetro na simulação está dentro dos valores recomendados para salas de música. Quando comparado com os valores sugeridos pela norma brasileira NBR 12179 (ABNT, 1992), mostra na frequência de 500 Hz, um tempo ótimo de reverberação de, aproximadamente, 0,7 para a sala com volume de 105 m³, considerando-se o caso de salas de concerto, pois este é o uso mais aproximado das salas dedicadas ao ensino de música aqui estudado.

5.4.2 Tempo de decaimento inicial (*EDT*)

O *EDT* da proposta tipológica simulada, apresentado na figura 5.13, mostra os valores deste parâmetro acústico em banda oitava nas frequências entre 125 Hz e 4000 Hz.

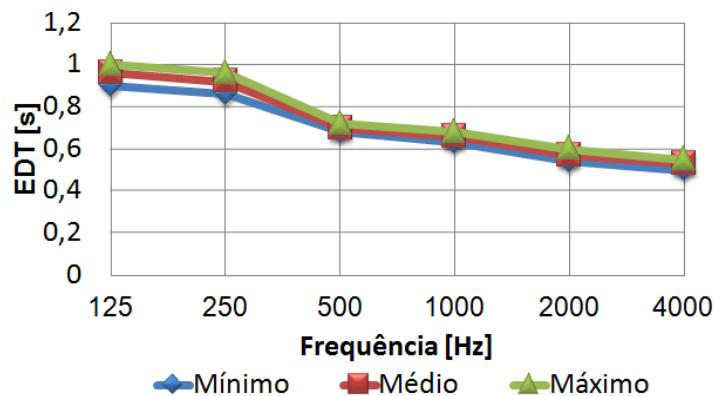


Figura 5.14 – EDT da tipologia proposta para a sala de música.

O parâmetro EDT tem um comportamento muito similar ao do TR para a sala simulada com a presença de mobília, mostrando coerência entre a reverberação e o efeito desta no ouvido do ouvinte. É importante que o TR e o EDT tenham o mesmo comportamento, assim, a sensação sonora e o comportamento real de reverberação da sala são coincidentes.

5.4.3 Clareza (C_{80})

O parâmetro de Clareza da proposta tipológica simulada, apresentado na figura 5.14, mostra os valores deste parâmetro acústico em banda oitava nas frequências entre 125 Hz e 4000 Hz.

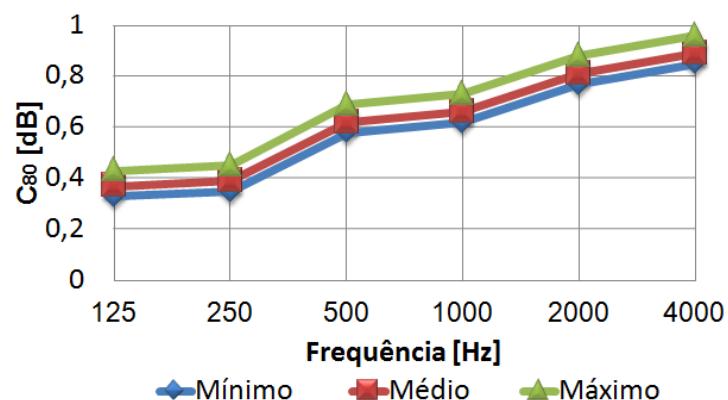


Figura 5.15 – C_{80} da tipologia proposta para a sala de música.

Esse parâmetro define a clareza musical de uma sala dedicada para a música e apresentou nessa situação simulada valores recomendados na literatura. Para as frequências de 125 Hz a 4000 Hz os valores encontrados na simulação ficam entre 0,37 dB e 0,89 dB, o que está dentro dos limites considerados adequados por Beranek (2004), que sugere valores para este parâmetro entre -4 dB e +4 dB.

A percepção de uma sala clara significa que as articulações sonoras da música tocada nela ficam bem definidas. Quando os objetos ocupam a sala, os valores do C_{80} aumentam, pois a execução musical torna-se mais nítida e definida.

5.4.4 Definição (D_{50})

A Definição da proposta tipológica simulada, apresentado na figura 5.15, mostra os valores deste parâmetro acústico em função da frequência para banda oitava nas frequências entre 125 Hz e 4000 Hz.

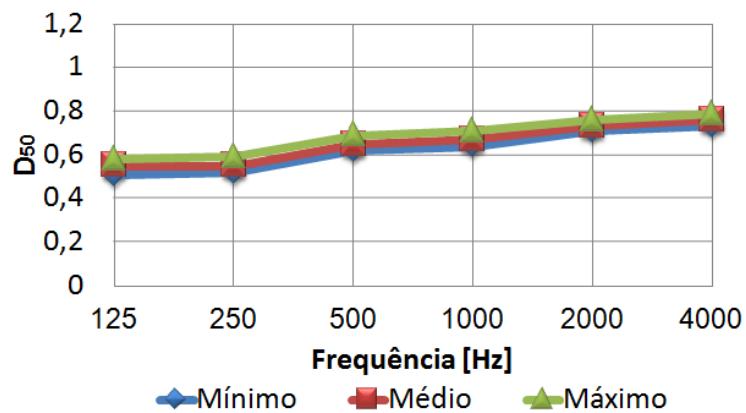


Figura 5.16 – D_{50} da tipologia proposta para a sala de música.

D_{50} aumenta com o aumento da frequência, caracterizando também um aumento na definição da palavra falada, pois quanto mais perto da unidade mais definido o estímulo sonoro.

A simulação da tipologia proposta para sala de música desse estudo apresentou para todos os parâmetros acústicos simulados um resultado com valores adequados, mostrando que a proposta criada para a nova sala é acusticamente adequada.

5.4.5 Índice de Transmissão da Fala (*STI*)

O *STI* da proposta tipológica simulada, apresentado na tabela 5.4, mostra os valores deste parâmetro acústico recomendado pela norma IEC 60268 -16, como bom (0,67), pois para esta norma, *STI* varia de 0 a 1, ou seja, de péssimo a excelente, tornando a tipologia de sala de aula recomendada, no que se refere à inteligibilidade da fala.

CAPÍTULO VI

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo geral desenvolver um projeto básico de sala de aula para o ensino da música, a partir de modelos acústicos virtuais utilizando a simulação computacional, elaborando uma proposta acusticamente adequada visando ao ensino e à prática musical.

A elaboração de uma revisão bibliográfica se fez necessária para elucidar conceitos acústicos necessários e fundamentais para o entendimento do comportamento sonoro em salas de aula, em específico, voltada à prática musical. Dessa forma, selecionaram-se parâmetros acústicos relacionados à acústica de salas, como TR, *EDT*, *C₈₀*, *D₅₀* e *STI*, para as análises dos resultados oriundos das medições, *in situ*, e computacionais.

Com este propósito, este estudo analisou tipos de salas de aula, para o ensino da música, referentes a salas de ensino existentes da rede pública de educação básica da cidade de Santa Maria – RS – Brasil. Foram avaliadas sete salas de aula distintas em cinco escolas, onde os dados coletados, experimentalmente, foram comparados, posteriormente, com os dados simulados por meio do programa computacional voltado à simulação acústica, o ODEON.

Primeiramente, foram analisados os dados obtidos através de ensaios experimentais dos parâmetros acústicos, *in situ*, das sete salas e as simulações destes ambientes na situação sem mobília e com mobília. Também foram apresentados e analisados valores de *JND* e do estudo geométrico de Bolt (1946).

O tempo de reverberação, na análise comparativa dos valores experimentais com os simulados, na situação **sem mobília** mostrou valores muito semelhantes para os dois modos de obtenção deste parâmetro. Para as sete salas de aula analisadas os valores, em geral, não apresentaram consideráveis alterações. Na análise **com mobília**, a sala PAP01 mostrou um comportamento quase sem diferenças entre os valores experimentais e os simulados, porém as outras salas

apresentaram diferenças não muito significantes, mas em toda a distribuição de frequência.

Para o **tempo de decaimento inicial**, na situação **sem mobília**, para as sete salas de aula, os valores, em geral, não apresentam consideráveis alterações. Entretanto, em quase totalidade das salas, com exceção da CPA02, a diferença entre os valores medidos e simulados, mesmo sendo valores pequenos, deu-se exatamente nas baixas frequências, onde ocorreram as primeiras reflexões. Principalmente, nas baixas frequências seria interessante que o *EDT* se mantivesse constante, pois o aumento deste produz resultados desfavoráveis no grau de inteligibilidade da palavra. Já os resultados obtidos na média entre as bandas de 500 e 1.000 Hz nas sete salas analisadas demonstraram que os modelos propostos para a amostra podem ser considerados precisos. **Com mobília**, o *EDT* mostrou diferenças em todas as salas relacionadas à distribuição dos materiais e coeficientes de absorção sonora dos mesmos.

A **clareza**, quando **sem mobília**, destacou-se a diferença entre dados experimentais e simulados para a sala PAP01, com valor de 2,07, e para sala CPA02 com valor de – 2,00. Considerando o *JND* de 1 dB, verificou-se que todas as sete salas apresentaram uma boa precisão para o parâmetro analisado com a análise realizada da diferença entre dados experimentais e simulados para a média de frequência de 500 e 1.000 Hz,. Para a situação **com mobília**, com *JND* de 1 dB, a diferença entre dados experimentais e simulados, para a média de frequência de 500 e 1.000 Hz, mostrou que cinco salas apresentaram uma boa precisão para o parâmetro analisado, exceto as salas PAC02 as quais apresentaram 1,59 dB e CPA01, que apresentou 3,62 dB, provavelmente, devido às superfícies dos materiais arquitetônicos.

Para a **definição**, análise **sem mobília**, verificou-se que os valores obtidos pelas medições experimentais estavam conformes com o estabelecido para salas de aula, com diferenças pequenas em relação aos valores simulados. Essas diferenças se encontraram abaixo do *JND* recomendado para a média entre as bandas de 500 e 1.000 Hz, mostrando que as sete salas analisadas estavam com boa precisão. Na análise **com mobília**, os resultados de D_{50} simulados mostraram que nenhuma das salas possuía valores acima de 0,5, o que significa que mesmo com as condições adaptadas para desenvolver as simulações, nada garantiu a boa inteligibilidade das

salas. Para os ensaios experimentais D_{50} chegou a valores sensivelmente maiores que 1, no caso das salas PAP01 (125 Hz) e CPA01 (acima de 500 Hz).

No desenvolvimento das formas geométricas da amostra de salas no *software Google SketchUp* onde foram usados dados existentes como comprimento, largura e altura, a sala PAI01 apresentou maior dificuldade de desenvolvimento geométrico devido ao seu teto de laje rebocada possuir vigas em formatos triangulares característicos de tipologias arquitetônicas industriais. Consequentemente, esta sala apresentou o maior volume, totalizando 297 m³.

As demais salas foram desenvolvidas dentro da normalidade, sem surgimento de dificuldades, isso se deve ao fato de as sete salas da amostra ter formato similar, ou seja, possuírem formas retangulares facilitando a confecção dos modelos geométricos que serviram de base para os modelos acústicos virtuais.

Verificou-se uma evidente economia construtiva na arquitetura das escolas como, por exemplo, o pé direito baixo, materiais aparentes, espessuras mínimas (em paredes de alvenaria, cascas de concreto). A falta de acabamento (forro, cortina) é uma grande preocupação. O exemplo da Escola Walter Jobim mostrou o contrário no que se relaciona à inclinação do forro, pois, neste caso, aumentou o volume, e é também uma solução que tende a ser mais barata.

Concluídos os modelos geométricos, estes foram exportados para o programa computacional *ODEON*, no qual foram inseridos os dados, definidas as posições de fontes e posições de microfones e coeficientes de absorção sonora dos materiais oriundos das salas existentes, destacando-se que o *software* em questão já possuía um banco de dados com diversos materiais associados ao coeficiente de absorção sonora, em função da frequência, entre 63 Hz e 8000 Hz, sendo necessárias outras fontes para os coeficientes de absorção dos materiais, como a NBR 12179/1992 e dados resultantes de medições realizadas em câmara reverberante do Laboratório de Acústica da UFSM para o projeto Arquiteturas para um Brasil Musical – ABRAMUS.

Foram definidos para os modelos acústicos virtuais da amostra os comprimentos de resposta-impulso de, pelo menos, 2/3 das curvas de decaimento, que ficaram próximos dos TR estimados. As calibrações tiveram posicionamentos de fonte e receptor inseridos, de acordo com o prescrito pela norma ISO 3382-1:2009 e nos mesmos pontos de medições utilizados nas medições realizadas, *in situ*, da amostragem.

Os dados provenientes das simulações acústicas desenvolvidas da amostra foram analisados através dos parâmetros acústicos selecionados para as medições, *in situ*, sendo comparados em duas situações (sem mobília e com mobília). Na maioria dos casos, os dados medidos, experimentalmente, estiveram coerentes com os dados simulados, utilizando-se como referência as diferenças entre dados medidos e simulados, em banda de oitava na faixa de frequência de 500 e 1000 Hz, comparando-os com os valores de *JND* sugeridos pela norma ISO 3382 (2009).

Os valores obtidos nos parâmetros analisados para a verificação da qualidade acústica das salas demonstraram-se menores, na maioria dos casos, que o valor de referência para os respectivos *JND*, portanto concluiu-se possível a consideração que TR, *EDT*, C_{80} e D_{50} foram subjetivamente imperceptíveis ao ouvinte na situação de sala sem mobília e com mobília, considerando-se valores médios. No entanto, na situação com mobília nas salas PAC02 e CPA01, apresentaram valores acima do valor de referência para o *JND*, tornando-os subjetivamente perceptíveis.

Nas análises desenvolvidas levaram-se em conta os cálculos, em função da Frequência de Schröder, considerando-se que o comprimento de onda seja menor, quando comparado à dimensão da sala, sendo que os valores abaixo desta frequência não foram considerados, pois neste caso, o tratamento deveria ser através de acústica ondulatória.

Em casos de diferenças encontradas de valores experimentais e simulados, justifica-se devido à dificuldade de precisão de resultados em simulações e medições *in situ*, pois se verificam restrições ligadas aos valores atribuídos aos coeficientes de absorção dos materiais e outros valores já inclusos no próprio software.

Dessa forma, foram seguidas as recomendações oriundas de referências bibliográficas pelas quais foi possível um embasamento técnico para o desenvolvimento dos condicionantes ambientais para a elaboração da tipologia acústico-arquitetônica, possibilitando dados adequados, cumprindo-se o objetivo proposto neste trabalho.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho não tem pretensão de esgotar o tema abordado, e sim, propiciar uma investigação, no que diz respeito à acústica de salas dedicadas à prática musical, e também, oferecer subsídios a futuros trabalhos referentes à simulação acústica de salas destinadas ao ensino da música. Assim, se sugere que novos estudos possam ser desenvolvidos como:

- Avaliar subjetivamente as salas de aula usando a auralização de modelos computacionais de salas de volumes reduzidos, bem como, por meio de questionários aplicados aos usuários envolvidos (professores, músicos e alunos).

REFERÊNCIAS

AMERICAN NATIONAL STANDARD. **ANSI S12.60**: acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools. Accredited Standards Committee S12, Noise. Standards Secretariat Acoustical Society of America, Melville, NY: American National Standards Institute. 2002.

AMORIM, A. E. B. **Formas Geométricas e Qualidade Acústica de Salas de Aula: Estudo de Caso em Campinas-SP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 12179**: tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro, 1992.9p.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle de ruído**, São Paulo: Blucher, 2006.

BISTAFA, S. R. ; Bradley, J. S. . Predicting speech metrics in a simulated classroom with varied sound absorption. **The Journal of the Acoustical Society of America**, EUA v. 109, n. 4, p. 1474-1482, 2001.

_____. Reverberation time and maximum background-noise levels for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics. **The Journal of the Acoustical Society of America**, EUA, v. 107, n. 2, p. 861-875, 2000a.

_____. Revisiting algorithms for predicting the articulation loss of consonants. **Journal of the Audio Engineering Society**, EUA, v. 48, n. 6, p. 531-544, 2000b.

_____. Optimum acoustical conditions for speech intelligibility in classrooms. **Noise and Vibration Worldwide**, Grã-Bretanha, v. 31, n. 9, p. 12-17, 2000c.

BOLT, R.H. Note on the normal frequency statistics in rectangular rooms. **Journal of the Acoustical Society of America- JASA**, Melville, NY, USA, v. 18, p. 130-133, 1946.

BRADLEY, J. S. **Review of objective room acoustics measures and future needs**. **Applied Acoustics**. v. 72, p. 713-720. 2011.

BRADLEY, J. S.; SATO, H.; PICARD, M. On the importance of early reflections for speech in rooms, **The Journal of the Acoustical Society of America**, EUA, 113, p. 3233–3244. 2003.

BRADLEY, J. S.; SATO, H. The intelligibility of speech in elementary school classrooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**, EUA, v.123, n.4, p. 2078-2086. 2008.

BRASIL, Lei nº. 11.769, de 18 de agosto de 2008. Altera a Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996, Lei de Diretrizes e Bases da Educação, para dispor sobre a obrigatoriedade do ensino da música na educação básica. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 19 ago. 2008.

BRÜEL & KJAER. **Architectural acoustics**. 2ed. USA: Brüel &Kjaer, 1978. 170p.

CARVALHO, R. P. **Acústica Arquitetônica**. 2^a edição – Brasília: Thesaurus, 2010.

CHRISTENSEN, C., **ODEON-Room Acoustics Program Version 10.1 - Industrial, Auditorium and Combined Editions**, Acoustics Technology, Orsted DTU, Orsteds Plads, TU Denmark, 2009.

DIRAC Acoustics Measurement Software, Versão 4.1, Brüel & Kæjer, Acoustics Engineering, Manual, 2008.

DREOSSI, R. C. F.; MOMENSOHN-SANTOS, T. **O Ruído e sua interferência sobre estudantes em uma sala de aula: revisão de literatura**. Pró-Fono Revista de Atualização Científica. Barueri (SP), v.17, n.2, p.251-258, maio-ago. 2005.

FARIA, R. R. A. **Auralização em ambientes audiovisuais imersivos**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

GADE, C. **Acoustics in Halls for Speech and Music**. Springer Handbook of Acoustics, Ed. T. D. Rossing, 2007.

GOMES, M. H. A. **Obtenção de Parâmetros para a Avaliação da Qualidade Acústica de Salas Através da Técnica MLS e Acústica de Raios**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

HAAS, H. Über den einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache". The influence of a single echo on the audibility of speech. **Journal Audio Eng. Society.** v.20, p.146-159, 1972.

HODGSON, M. **Empirical prediction of speech levels and reverberation in classrooms.** **Building Acoustics.** v.8, n.1, p. 1-14. Jan.2001.

HODGSON, M.; NOSAL, E. M. **Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms.** **The Journal of the Acoustical Society of America,** EUA, v.111, n.2, p. 931-940. 2001.

HODGSON, M.; WONG, G. **Ray-tracing prediction of optimal conditions for speech in realistic classrooms.** **Applied Acoustics.** v. 70, p. 915-920. 2009.

INTERNACIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60268-16:** Sound system equipment – Part 16: Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 3382 - 1: 2009 - Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 1: Performance spaces, 2009.

KOWALTOWSKI, D. et al. **O conforto no ambiente escolar: elementos para intervenções de melhoria.** In: ENTAC – 2002. Foz do Iguaçu. 2002.

KUTTRUFF, H.; **Room Acoustics.** Elsevier Science Publishers LTD, London, 3^a edition, 1991.

LANE, R. N.; MIKESKA, E. E. Study of acoustical requirements for teaching studios and practice rooms in music school buildings. **J. Acoust. Soc. Am.,** v.27, n.6, p.1087, Jul. 1955.

LEHNERT, H. Systematic errors of the ray-tracing algorithm. **Applied Acoustics,** (38):207-221, 1993.

LONG, M. **Architectural acoustics.** Londres: Elsevier Academic Press, 2006.

LOSSO, M. A. F. **Qualidade acústica de edificações escolares em Santa Catarina: Avaliação e elaboração de diretrizes para projeto e implantação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2003.

MARROS, F. **Caracterização acústica experimental e computacional de salas de aula para o ensino da música.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.

MORINI, R. G.; PUSSOLI, B. F.; PEREIRA, J. A. Conforto acústico de salas de aula. **XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica**, Ilha Solteira, São Paulo, ago. 2005.

NEPOMUCENO, Luiza de A. **Elementos de acústica e psicoacústica.** São Paulo: Edgar Blüncher, 1994. 106p.

OGASAWARA, A. P. **Avaliação acústica de oito salas destinadas a apresentações teatrais da cidade de Campinas, SP, através da técnica impulsiva.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2006.

OLIVEIRA, N. F. **Avaliação acústica de salas de aula de dimensões reduzidas através da técnica impulsiva.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2006.

PAIXÃO, D.X. da. **Análise das condições acústicas em sala de aula.** 1996. 208 f. Dissertação (Mestrado em Educação)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1997.

PEREIRA, R. N. **Caracterização Acústica de Salas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Física e Tecnológica) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2010.

PREFEITURA MUNICIPAL DO RIO DE JANEIRO – RJ. **Manual para Elaboração de Edifícios Escolares.** Secretaria Municipal de Urbanismo – Superintendência de Projetos. FAUUSP. Rio de Janeiro, RJ, 1996.

PRESSONUS Electronics, Version 1.0, FIREBOX, Manual del usuario, 2005.

PRODI, N.; VISENTIN, C.; FARNETANI, A. **Intelligibility, listening difficulty and listening efficiency in auralized classrooms.** *The Journal of the Acoustical Society of America*, EUA, v.128, n.1, p. 172-181. 2010.

ROCHA, L. S. **Acústica e Educação em Música: Estudo Qualitativo para Sala de Ensaio e Prática de Instrumento e Canto.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2010.

SANTOS, C. **Influência do coeficiente de espalhamento obtido experimentalmente sobre parâmetros subjetivos utilizados na qualificação de salas.** Tese (Doutorado na área de concentração de Arquitetura e Construção) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2011.

SCHRÖDER, D.; VORLÄNDER, M. **Hybrid method for room acoustic simulation in real-time.** 19th International Congress on Acoustics. Madrid, Espanha. 2007.

SKÅLEVIK, M. **Small room acoustics – the hard case.** Forum Acústica 2011, ;Aalborg, Dinamarca, 2011.

TORO, M. G. U. **Avaliação Acústica de Salas de Aula em Escolas Públicas na Cidade de Belém-PA: Uma Proposição de Projeto Acústico.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Pará. Belém, PA, 2005.

TÔRRES, M. H. C. **Simulação acústica no ambiente AcMus.** Dissertação (Mestrado em Ciência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2008.

VORLÄNDER, M. **International round robin on room acoustical computer simulations,** Proc. 15th ICA, 689. 1995.

VORLÄNDER, M. **Auralization, Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality.** Berlin: Springer, 2008.

VIVEIROS, Elvira B. Excelência Acústica: O objetivo de projeto de uma edificação escolar. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC, 19, 2000, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. **Anais.** Belo Horizonte: UFMG, 2000.

YANG, W.; BRADLEY, J. S. **Effects of room acoustics on the intelligibility of speech in classrooms for young children.** *The Journal of the Acoustical Society of America*, EUA, v.125, n.2, .pp. 922-933. 2009.

ZENG, X.; CHRISTENSEN, C. L. RINDEL, J. H. Practical methods to define scattering coefficients in a room acoustics computer model. *Appl Acoustics*. v.67, p. 771-786, jan. 2006.

APÊNDICES

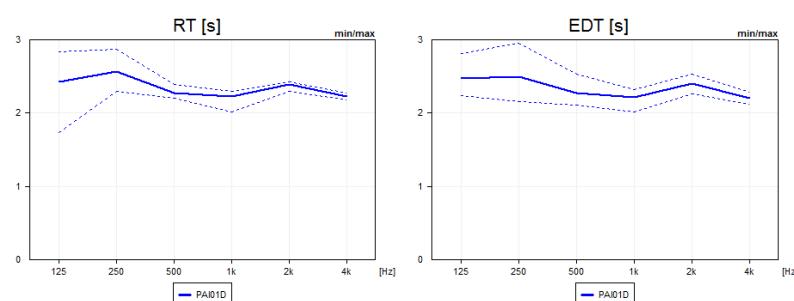
Apêndice A - Valores médios, mínimos e máximos para os parâmetros acústicos, em função da frequência, obtidos por meio de **medidas da resposta impulso das salas de aula analisadas para a situação **sem mobília**.**

São apresentados na sequência pelas Tabelas 6.1 a 6.7, e também por seus respectivos gráficos através das figuras 6.1 a 6.7.

Tabela 6.1 – **PAI01** – Sala de Eventos – Escola Estadual Dr. Walter Jobim – Dados Experimentais (Situação “sem mobília”):

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						-
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	
TR [s]	1,74	2,30	2,20	2,02	2,29	2,18	Mínimo
	2,84	2,86	2,38	2,30	2,43	2,27	Máximo
	2,43	2,56	, 2,27	2,22	2,38	2,22	Médio
EDT [s]	2,23	2,15	2,10	2,01	2,26	2,12	Mínimo
	2,80	2,95	2,53	2,31	2,52	2,28	Máximo
	2,47	2,49	2,27	2,21	2,40	2,20	Médio
C₈₀ [dB]	- 7,43	- 6,43	- 5,64	- 4,99	- 4,67	- 4,23	Mínimo
	1,44	- 0,91	- 1,49	- 0,52	- 1,00	0,03	Máximo
	- 2,18	- 2,79	- 2,83	- 2,51	- 2,56	- 1,89	Médio
D₅₀	0,07	0,08	0,08	0,12	0,15	0,14	Mínimo
	0,51	0,32	0,32	0,36	0,35	0,40	Máximo
	0,24	0,21	0,22	0,24	0,25	0,27	Médio
STI			0,40				Mínimo
			0,42				Máximo
			0,41				Médio

Fonte: Autor.



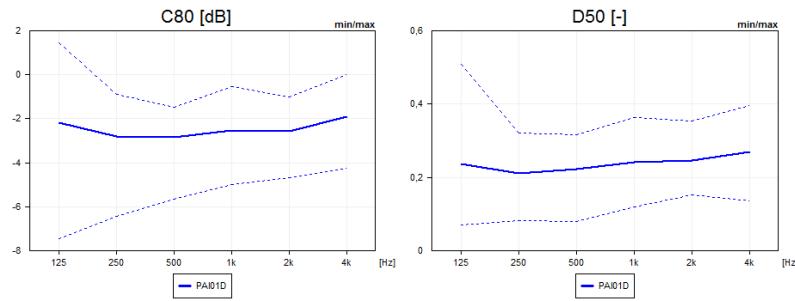


Figura 6.1 – PAI01 – Sala de Eventos – Escola Estadual Dr. Walter Jobim – Dados Experimentais (Situação “sem mobília”):

Tabela 6.2 – PAP01 – Sala de Eventos – Escola Estadual Rômulo Zanchi – Dados Experimentais (Situação “sem mobília”):

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	0,85	1,36	1,68	1,72	1,60	1,24	Mínimo
	1,28	1,53	1,95	1,91	1,70	1,35	Máximo
EDT [s]	1,14	1,43	1,81	1,85	1,67	1,31	Médio
	0,57	0,72	1,39	1,69	1,54	1,22	Mínimo
C₈₀ [dB]	1,18	1,75	1,89	2,04	1,75	1,40	Máximo
	0,92	1,21	1,77	1,84	1,64	1,31	Médio
D₅₀	2,20	- 0,80	- 2,74	- 2,94	- 0,65	0,34	Mínimo
	7,13	3,55	0,52	- 0,09	1,83	3,43	Máximo
STI	4,97	1,61	- 0,74	- 1,05	0,21	1,50	Médio
	0,41	0,29	0,24	0,23	0,30	0,36	Mínimo
	0,79	0,57	0,43	0,39	0,50	0,59	Máximo
	0,60	0,42	0,32	0,31	0,37	0,43	Médio
			0,43				Mínimo
			0,50				Máximo
			0,47				Médio

Fonte: Autor.

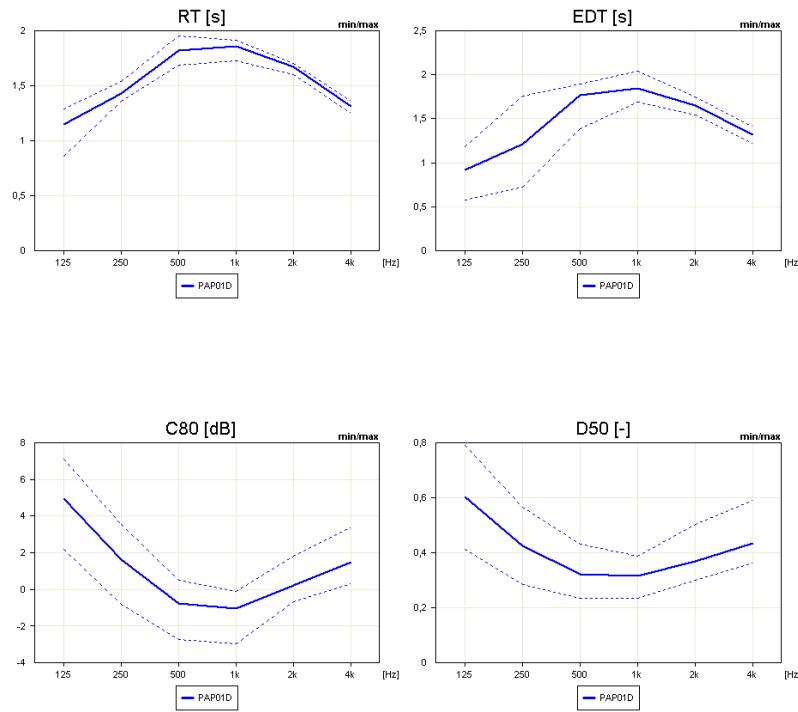


Figura 6.2 – PAP01 – Sala de Eventos – Escola Estadual Rômulo Zanchi – Dados Experimentais (Situação “sem mobília”).

Tabela 6.3 – PAC01 – Sala de Vídeo – Escola Estadual Margarida Lopes – Dados Experimentais (Situação “sem mobília”):

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	2,17	1,59	1,86	2,09	1,85	1,57	Mínimo
	2,92	2,22	2,07	2,36	2,03	1,70	Máximo
	2,61	1,96	1,97	2,20	1,95	1,65	Médio
EDT [s]	1,81	1,57	1,76	1,98	1,86	1,54	Mínimo
	2,75	2,16	2,23	2,38	2,13	1,77	Máximo
	2,31	1,93	1,95	2,23	1,97	1,65	Médio
C₈₀ [dB]	- 5,39	- 3,76	- 2,69	- 2,84	- 1,87	- 1,35	Mínimo
	0,60	- 0,06	0,35	- 1,17	- 0,03	0,83	Máximo
	- 3,37	- 1,61	- 1,28	- 1,93	- 1,13	- 0,03	Médio
D₅₀	0,12	0,20	0,23	0,22	0,25	0,29	Mínimo
	0,29	0,38	0,39	0,31	0,37	0,42	Máximo
	0,20	0,30	0,30	0,27	0,30	0,35	Médio
STI				0,41			Mínimo
				0,47			Máximo
				0,44			Médio

Fonte: Autor.

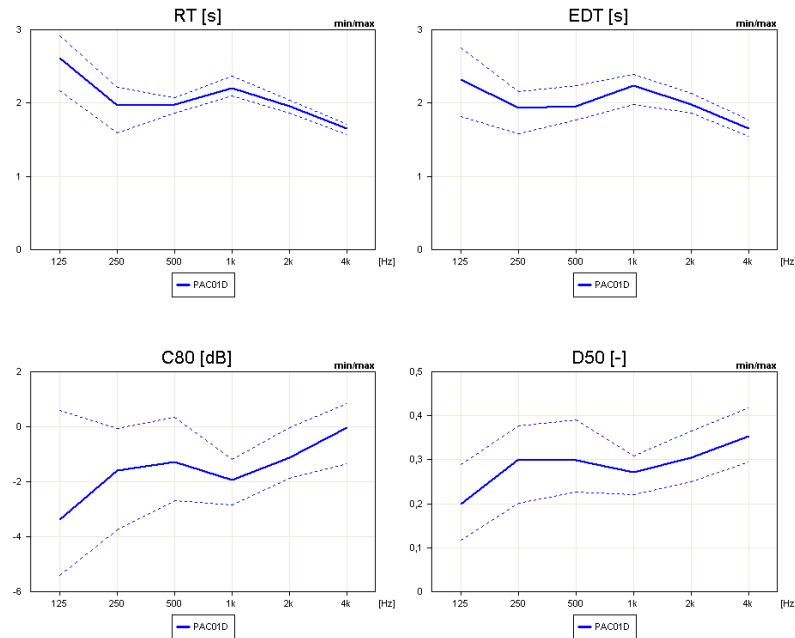


Figura 6.3 – PAC01 – Sala de Vídeo – Escola Estadual Margarida Lopes – Dados Experimentais (Situação “sem mobília”):

Tabela 6.4 – **PAC02** – Sala de Aula – Escola Estadual Margarida Lopes – Dados Experimentais (Situação “sem mobília”):

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	2,93	2,57	2,37	2,17	1,85	1,51	Mínimo
	4,76	3,74	2,71	2,42	1,99	1,60	Máximo
	4,06	3,06	2,59	2,28	1,90	1,55	Médio
EDT [s]	2,88	2,47	2,06	1,83	1,76	1,37	Mínimo
	4,01	3,49	2,77	2,32	1,92	1,52	Máximo
	3,38	2,83	2,35	2,10	1,84	1,47	Médio
C₈₀ [dB]	- 7,53	- 5,13	- 4,30	- 2,70	- 1,61	- 0,36	Mínimo
	- 3,08	- 0,23	- 0,55	0,25	0,07	1,83	Máximo
	- 5,22	- 2,57	- 2,24	- 1,45	- 0,84	0,70	Médio
D₅₀	0,04	0,16	0,18	0,19	0,26	0,34	Mínimo
	0,23	0,35	0,38	0,39	0,37	0,46	Máximo
	0,14	0,22	0,23	0,27	0,32	0,39	Médio
STI			0,40				Mínimo
				0,46			Máximo
					0,43		Médio

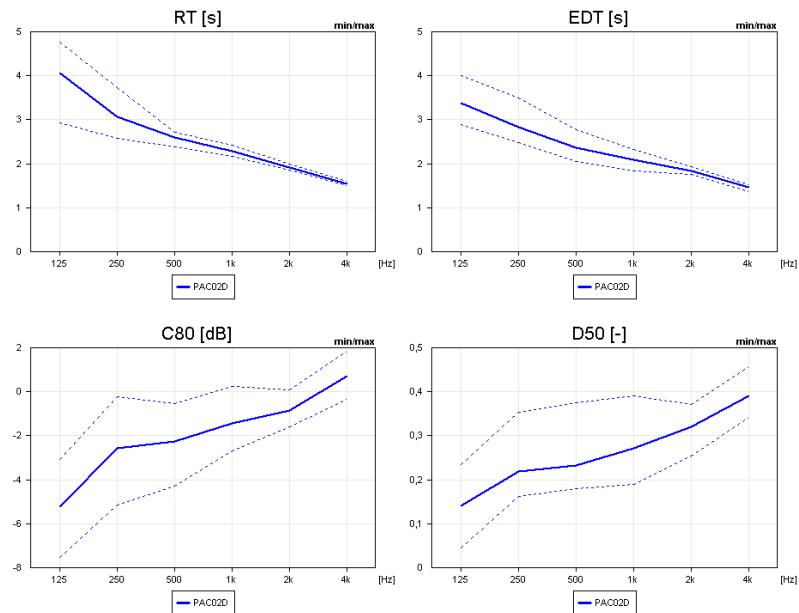


Figura 6.4 – PAC02 – Sala de Aula – Escola Estadual Margarida Lopes – Dados Experimentais (Situação “sem mobília”).

Tabela 6.5 – CPA01 – Sala de Vídeo – Escola Estadual Edna May Cardoso – Dados Experimentais (Situação “sem mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	1,48	1,22	1,18	1,33	1,47	1,39	Mínimo
	1,72	1,62	1,43	1,43	1,54	1,46	Máximo
	1,60	1,44	1,31	1,37	1,50	1,42	Médio
EDT [s]	0,79	1,17	1,09	1,22	1,46	1,34	Mínimo
	1,88	1,55	1,50	1,56	1,60	1,44	Máximo
	1,30	1,32	1,27	1,40	1,53	1,39	Médio
C_{80} [dB]	- 2,34	- 0,99	- 0,33	- 0,05	- 0,57	0,56	Mínimo
	6,12	3,01	3,02	1,63	1,18	1,74	Máximo
	1,91	0,79	1,60	0,80	0,49	1,09	Médio
D_{50}	0,26	0,24	0,32	0,30	0,34	0,32	Mínimo
	0,54	0,48	0,53	0,43	0,44	0,45	Máximo
	0,42	0,36	0,43	0,37	0,40	0,41	Médio
STI				0,47			Mínimo
				0,53			Máximo
				0,51			Médio

Fonte: Autor.

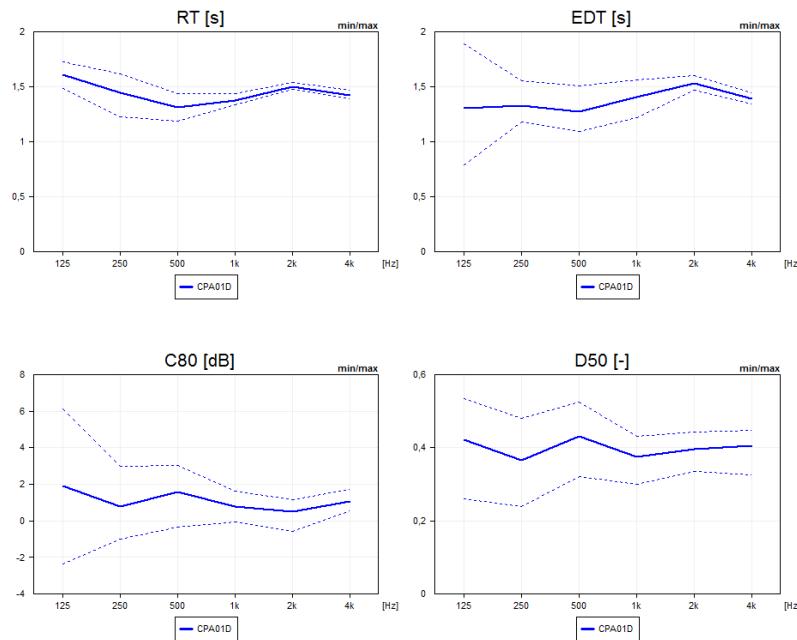


Figura 6.5 – CPA01 – Sala de Vídeo – Escola Estadual Edna May Cardoso – Dados Experimentais (Situação “sem mobília”).

Tabela 6.6 – CPA02 – Sala de Aula – Escola Estadual Edna May Cardoso – Dados Experimentais (Situação “sem mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						-
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	
TR [s]	1,64	1,45	1,95	2,45	2,30	1,64	Mínimo
	2,63	1,81	2,16	2,76	2,49	1,78	Máximo
	2,33	1,72	2,07	2,59	2,38	1,72	Médio
EDT [s]	1,78	1,39	1,76	2,41	2,23	1,56	Mínimo
	2,64	1,79	2,10	2,76	2,42	1,75	Máximo
	2,23	1,61	1,90	2,55	2,33	1,64	Médio
<i>C₈₀</i> [dB]	- 3,63	- 1,08	- 3,16	- 4,05	- 2,71	- 0,65	Mínimo
	3,71	3,01	- 0,08	- 1,60	- 1,44	0,85	Máximo
	- 1,16	0,55	- 1,69	- 2,48	- 2,08	0,06	Médio
D ₅₀	0,15	0,26	0,22	0,18	0,23	0,28	Mínimo
	0,49	0,49	0,40	0,30	0,30	0,43	Máximo
	0,26	0,37	0,29	0,25	0,27	0,35	Médio
STI			0,40				Mínimo
			0,44				Máximo
			0,42				Médio

Fonte: Autor.

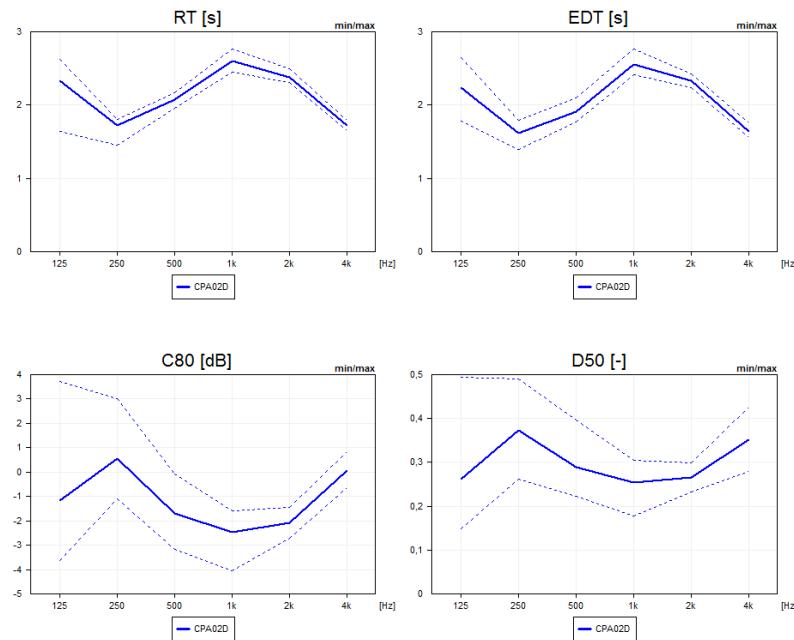


Figura 6.6 – CPA02 – Sala de Aula – Escola Estadual Edna May Cardoso – Dados Experimentais (Situação “sem mobília”):

Tabela 6.7 – CPB01 – Sala de Vídeo – Escola Estadual Paulo Lauda – Dados Experimentais (Situação “sem mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	1,72	1,59	2,01	2,29	2,17	1,80	Mínimo
	2,39	2,28	2,44	2,50	2,32	1,84	Máximo
	2,01	1,99	2,24	2,39	2,23	1,83	Médio
EDT [s]	1,17	1,60	2,01	2,24	2,09	1,72	Mínimo
	1,88	2,23	2,72	2,62	2,36	1,88	Máximo
	1,52	1,89	2,28	2,40	2,24	1,80	Médio
C ₈₀ [dB]	- 5,13	- 4,76	- 6,72	- 4,42	- 3,22	- 1,84	Mínimo
	2,95	1,69	0,16	0,13	- 0,82	0,43	Máximo
	- 0,83	- 1,12	- 2,10	- 2,64	- 1,99	- 0,81	Médio
D ₅₀	0,14	0,13	0,07	0,14	0,17	0,25	Mínimo
	0,51	0,48	0,38	0,34	0,36	0,40	Máximo
	0,29	0,26	0,25	0,24	0,26	0,31	Médio
STI			0,39				Mínimo
			0,45				Máximo
			0,42				Médio

Fonte: Autor.

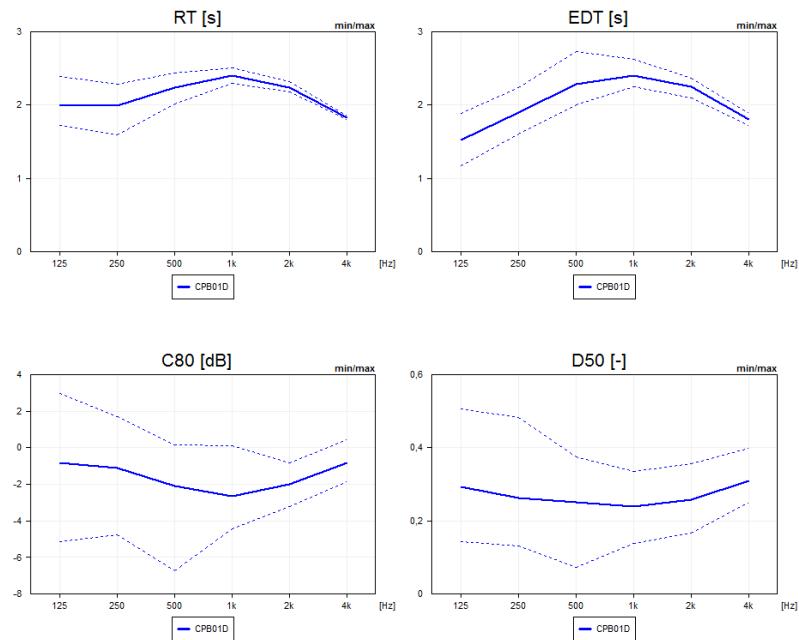


Figura 6.7 – CPB01 – Sala de Vídeo – Escola Estadual Paulo Lauda – Dados Experimentais (Situação “sem mobília”).

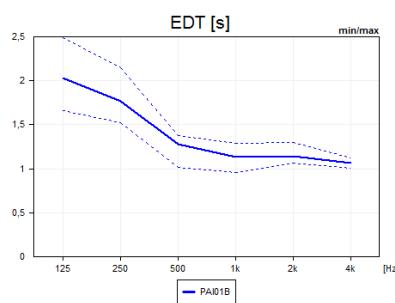
Apêndice B - Valores médios, mínimos e máximos para os parâmetros acústicos, em função da frequência, obtidos por meio de **medidas** da resposta impulso das salas de aula analisadas para a situação **com mobília**.

São apresentados na sequência pelas Tabelas 6.8 a 6.14, e também por seus respectivos gráficos através das figuras 6.8 a 6.14.

Tabela 6.8 – **PAI01** – Sala de Eventos – Escola Estadual Dr. Walter Jobim – Dados Experimentais (Situação “com mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	1,75	1,39	1,22	1,04	1,08	1,07	Mínimo
	2,54	1,65	1,37	1,18	1,21	1,11	Máximo
	1,97	1,96	1,30	1,10	1,13	1,10	Médio
EDT [s]	1,65	1,52	1,02	0,96	1,06	1,00	Mínimo
	2,49	2,14	1,37	1,29	1,30	1,12	Máximo
	2,03	1,76	1,28	1,13	1,14	1,06	Médio
C₈₀ [dB]	- 5,65	- 3,99	- 3,19	- 0,64	0,34	0,04	Mínimo
	2,50	2,37	2,65	4,02	2,05	4,21	Máximo
	- 0,45	- 0,32	0,54	1,65	4,18	2,15	Médio
D₅₀	0,08	0,12	0,15	0,25	0,31	0,29	Mínimo
	0,42	0,49	0,51	0,58	0,59	0,60	Máximo
	0,30	0,30	0,34	0,42	0,44	0,44	Médio
STI			0,52				Mínimo
			0,57				Máximo
			0,55				Médio

Fonte: Autor.



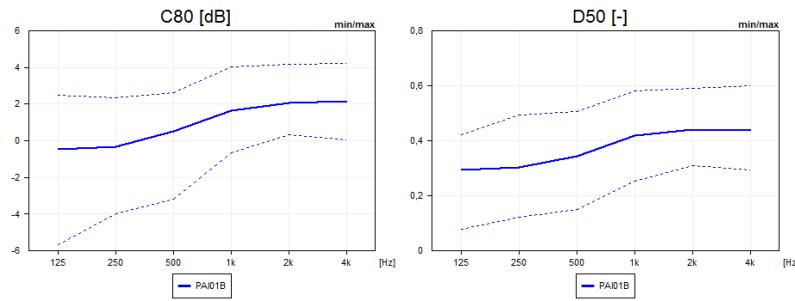


Figura 6.8 – **PAI01** – Sala de Eventos – Escola Estadual Dr. Walter Jobim – Dados Experimentais (Situação “com mobília”).

Tabela 6.9 – **PAP01** – Sala de Eventos – Escola Estadual Rômulo Zanchi – Dados Experimentais (Situação “com mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	0,86	1,29	1,65	1,67	1,58	1,20	Mínimo
	1,31	1,53	1,86	1,86	1,72	1,32	Máximo
	1,11	1,40	1,75	1,79	1,63	1,29	Médio
EDT [s]	0,40	0,94	1,41	1,74	1,55	1,20	Mínimo
	1,13	1,72	2,02	2,02	1,69	1,38	Máximo
	0,83	1,25	1,76	1,88	1,62	1,27	Médio
C₈₀ [dB]	2,67	- 0,23	- 2,57	- 2,31	- 1,04	- 0,05	Mínimo
	9,79	3,80	0,81	0,54	1,66	2,94	Máximo
	5,30	1,76	- 0,87	- 1,10	0,15	1,56	Médio
D₅₀	0,52	0,31	0,21	0,20	0,30	0,34	Mínimo
	0,80	0,56	0,39	0,41	0,45	0,54	Máximo
	0,65	0,44	0,31	0,31	0,37	0,43	Médio
STI			0,42				Mínimo
			0,50				Máximo
			0,47				Médio

Fonte: Autor.

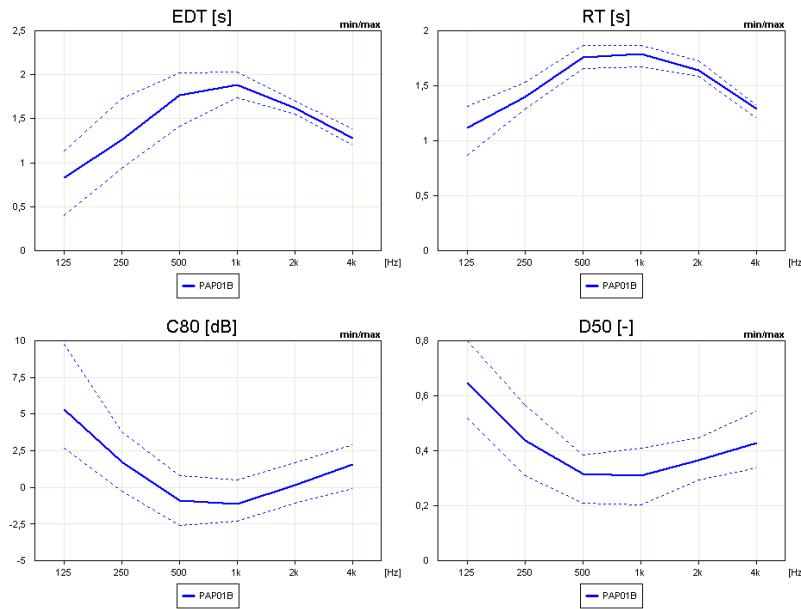


Figura 6.9 – PAP01 – Sala de Eventos – Escola Estadual Rômulo Zanchi – Dados Experimentais (Situação “com mobília”).

Tabela 6.10 – PAC01 – Sala de Vídeo – Escola Estadual Margarida Lopes – Dados Experimentais (Situação “com mobília”):

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						-
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	
TR [s]	2,20	1,22	1,68	1,87	1,68	1,41	Mínimo
	2,87	2,09	1,94	2,04	1,84	1,54	Máximo
	2,51	1,84	1,85	1,97	1,77	1,51	Médio
EDT [s]	1,84	1,49	1,55	1,72	1,58	1,40	Mínimo
	2,73	2,15	1,98	2,10	1,89	1,60	Máximo
	2,30	1,81	1,80	1,93	1,76	1,50	Médio
C ₈₀ [dB]	- 5,25	- 4,63	- 2,10	- 2,24	- 1,17	- 0,18	Mínimo
	0,06	1,87	0,74	- 0,03	0,38	1,88	Máximo
	- 3,21	- 1,32	- 0,62	- 1,37	- 0,64	0,58	Médio
D ₅₀	0,14	0,20	0,27	0,24	0,28	0,33	Mínimo
	0,30	0,40	0,42	0,36	0,40	0,49	Máximo
	0,22	0,31	0,33	0,29	0,33	0,38	Médio
STI			0,44				Mínimo
			0,49				Máximo
			0,46				Médio

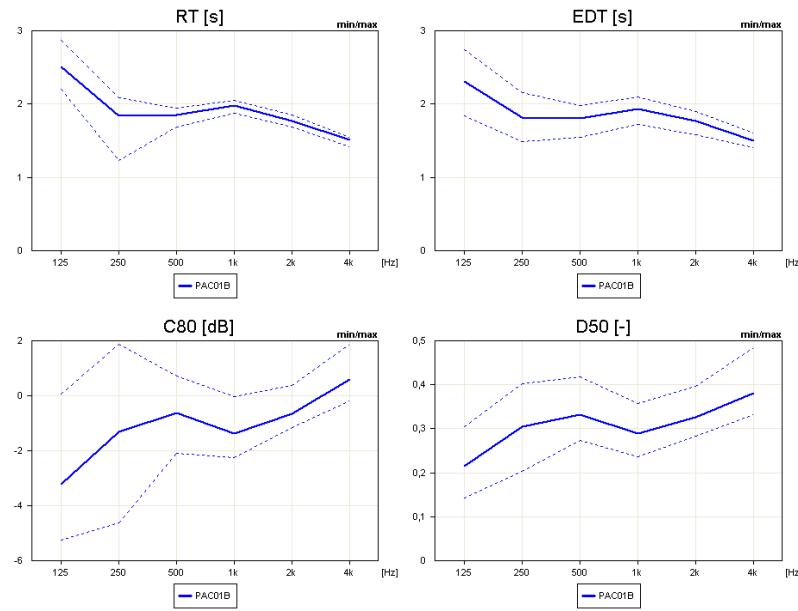


Figura 6.10 – PAC01 – Sala de Vídeo – Escola Estadual Margarida Lopes – Dados Experimentais (Situação “com mobília”).

Tabela 6.11 – PAC02 – Sala de Aula – Escola Estadual Margarida Lopes – Dados Experimentais (Situação “com mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	2,63	2,06	1,73	1,75	1,55	1,32	Mínimo
	3,66	2,58	2,21	2,04	1,63	1,41	Máximo
	3,13	2,30	2,05	1,85	1,59	1,36	Médio
EDT [s]	2,21	1,93	1,77	1,72	1,55	1,28	Mínimo
	3,31	2,78	2,15	1,92	1,69	1,46	Máximo
	2,84	2,34	1,97	1,84	1,61	1,35	Médio
C ₈₀ [dB]	- 8,79	- 6,33	- 4,49	- 3,55	- 1,77	- 1,12	Mínimo
	- 4,05	0,32	- 0,73	- 0,04	0,31	1,55	Máximo
	- 5,49	- 2,78	- 2,42	- 1,74	- 0,68	0,50	Médio
D ₅₀	0,06	0,07	0,14	0,14	0,20	0,23	Mínimo
	0,25	0,40	0,31	0,38	0,39	0,42	Máximo
	0,16	0,22	0,22	0,26	0,30	0,35	Médio
STI			0,42				Mínimo
				0,47			Máximo
					0,45		Médio

Fonte: Autor.

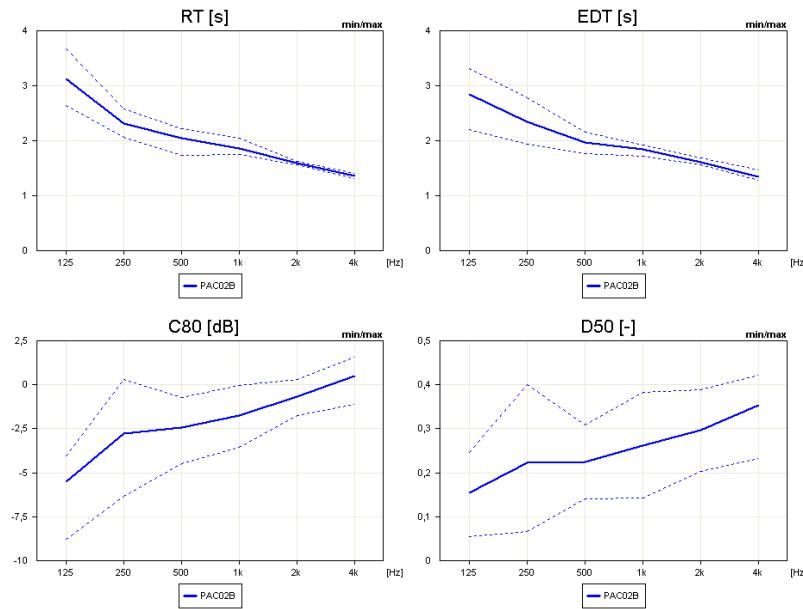


Figura 6.11 – PAC02 – Sala de Aula – Escola Estadual Margarida Lopes – Dados Experimentais (Situação “com mobília”).

Tabela 6.12 – CPA01 – Sala de Vídeo – Escola Estadual Edna May Cardoso – Dados Experimentais (Situação “com mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						-
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	
TR [s]	1,08	0,85	0,80	0,76	0,89	0,87	Mínimo
	1,46	1,16	0,88	0,87	0,93	0,92	Máximo
	1,27	1,06	0,84	0,82	0,91	0,91	Médio
EDT [s]	0,87	0,88	0,66	0,75	0,87	0,86	Mínimo
	1,28	1,18	0,94	0,93	0,98	0,96	Máximo
	1,09	1,05	0,83	0,87	0,92	0,91	Médio
C_{80} [dB]	- 1,72	1,60	3,88	3,94	2,68	2,73	Mínimo
	5,03	4,71	6,17	5,06	4,32	4,35	Máximo
	2,33	2,96	4,99	4,46	3,74	3,71	Médio
D_{50}	0,33	0,38	0,48	0,53	0,44	0,49	Mínimo
	0,58	0,60	0,68	0,62	0,59	0,58	Máximo
	0,47	0,50	0,58	0,58	0,53	0,54	Médio
STI				0,60			Mínimo
				0,64			Máximo
				0,62			Médio

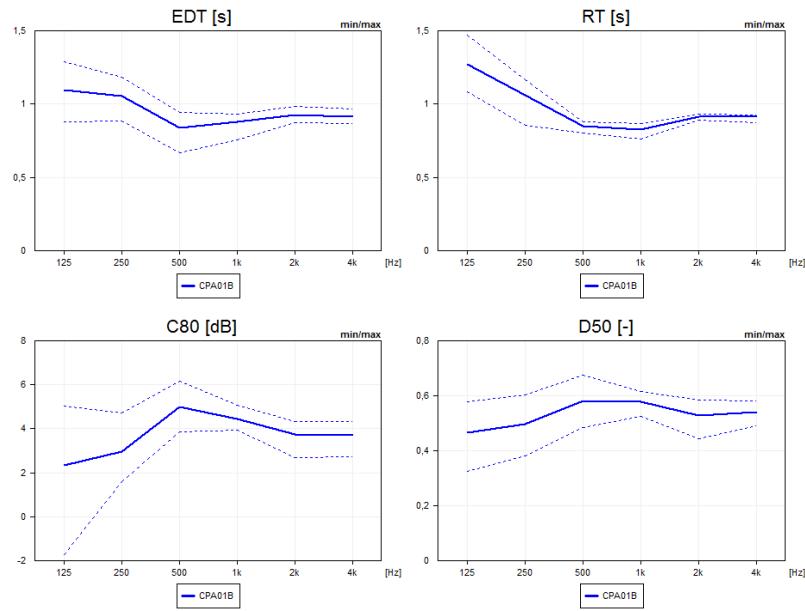


Figura 6.12 – CPA01 – Sala de Vídeo – Escola Estadual Edna May Cardoso – Dados Experimentais (Situação “com mobília”).

Tabela 6.13 – **CPA02** – Sala de Aula – Escola Estadual Edna May Cardoso – Dados Experimentais (Situação “com mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	1,52	1,23	1,81	2,19	2,06	1,42	Mínimo
	1,99	1,67	1,95	2,39	2,19	1,57	Máximo
	1,73	1,51	1,89	2,30	2,12	1,51	Médio
EDT [s]	1,29	1,51	1,61	2,12	1,94	1,41	Mínimo
	1,92	1,73	1,90	2,45	2,13	1,56	Máximo
	1,63	1,62	1,79	2,32	2,07	1,49	Médio
C ₈₀ [dB]	- 1,49	- 0,46	- 3,25	- 3,17	- 1,58	- 0,01	Mínimo
	4,62	2,61	0,65	- 1,37	- 0,90	1,59	Máximo
	1,25	0,93	- 1,10	- 2,01	- 1,23	0,70	Médio
D ₅₀	0,20	0,27	0,20	0,21	0,26	0,33	Mínimo
	0,57	0,52	0,40	0,30	0,34	0,44	Máximo
	0,38	0,40	0,30	0,26	0,31	0,39	Médio
STI			0,42				Mínimo
			0,47				Máximo
			0,44				Médio

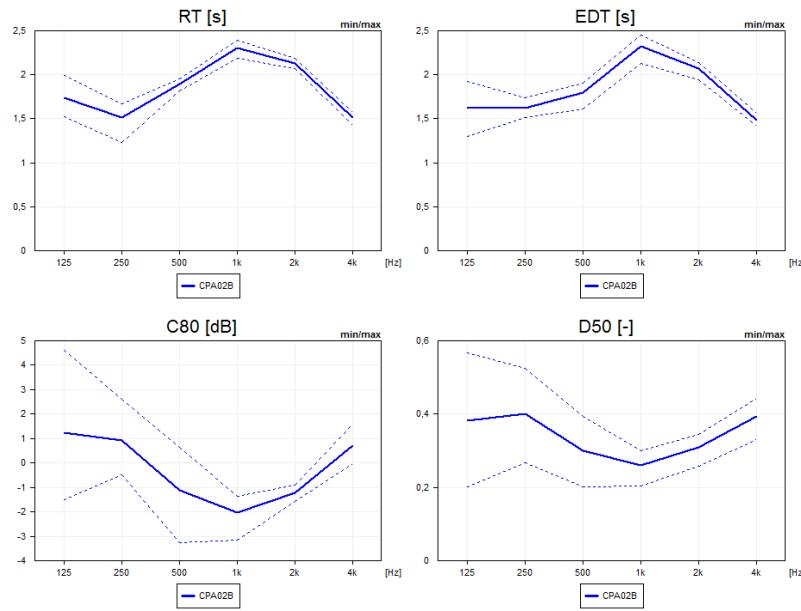


Figura 6.13 – CPA02 – Sala de Aula – Escola Estadual Edna May Cardoso – Dados Experimentais (Situação “com mobília”).

Tabela 6.14 – CPB01 – Sala de Vídeo – Escola Estadual Paulo Lauda – Dados Experimentais (Situação “com mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	1,37	1,36	1,21	1,36	1,46	1,42	Mínimo
	2,19	1,80	1,44	1,53	1,56	1,49	Máximo
	1,77	1,53	1,34	1,46	1,52	1,45	Médio
EDT [s]	0,96	1,22	1,07	1,27	1,44	1,36	Mínimo
	1,78	1,66	1,56	1,64	1,63	1,52	Máximo
	1,49	1,46	1,36	1,47	1,53	1,45	Médio
C_{80} [dB]	- 4,90	- 4,45	- 2,32	- 2,15	- 1,51	- 1,59	Mínimo
	3,16	2,28	3,71	2,20	1,24	1,64	Máximo
	- 0,61	- 0,04	0,78	0,31	- 0,27	0,04	Médio
D_{50}	0,09	0,16	0,15	0,17	0,24	0,21	Mínimo
	0,49	0,53	0,54	0,44	0,45	0,47	Máximo
	0,30	0,35	0,37	0,35	0,33	0,34	Médio
STI			0,47				Mínimo
			0,54				Máximo
			0,50				Médio

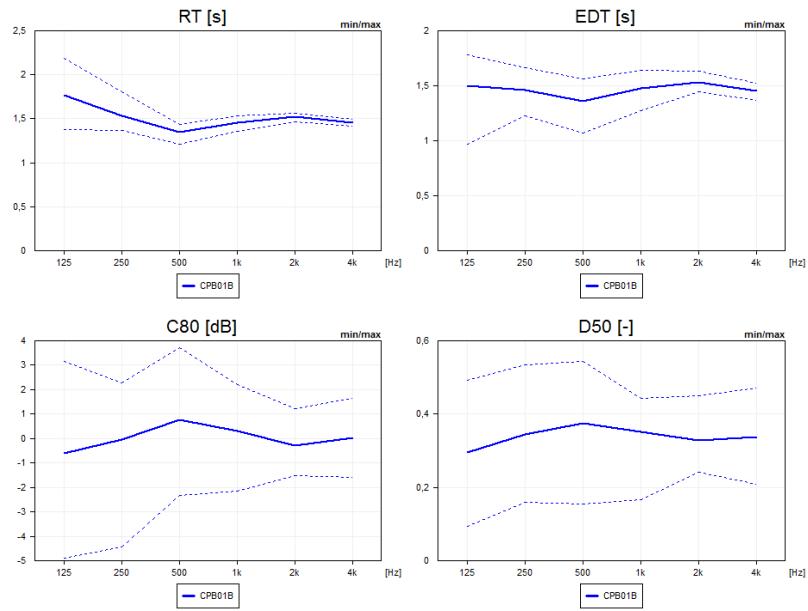


Figura 6.14 – CPB01 – Sala de Vídeo – Escola Estadual Paulo Lauda – Dados Experimentais (Situação “com mobília”).

Apêndice C - Valores médios, mínimos e máximos para os parâmetros acústicos, em função da frequência, obtidos por meio de medições da resposta impulso das salas de aula analisadas (simulação) sem mobília.

São apresentados na Tabela 6.15 até a Tabela 6.21.

Tabela 6.15 – PAI01 – Sala de Eventos – Escola Estadual Dr. Walter Jobim – Dados Simulados (Situação “sem mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						-
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	
TR [s]	2,06	2,29	2,17	2,10	2,14	2,10	Mínimo
	2,13	2,41	2,23	2,17	2,17	2,14	Máximo
	2,11	2,35	2,19	2,13	2,16	2,11	Médio
EDT [s]	2,11	2,31	2,14	2,11	2,14	2,11	Mínimo
	2,18	2,43	2,24	2,14	2,23	2,15	Máximo
	2,15	2,37	2,19	2,13	2,19	2,13	Médio
C ₈₀ [dB]	- 2,10	- 2,60	- 2,20	- 2,00	- 2,00	- 1,90	Mínimo
	- 1,40	- 1,80	- 1,40	- 1,30	- 1,20	- 1,20	Máximo
	- 1,80	- 2,30	- 1,80	- 1,70	- 1,70	- 1,60	Médio
D ₅₀	0,26	0,24	0,26	0,27	0,27	0,27	Mínimo
	0,31	0,29	0,31	0,31	0,31	0,31	Máximo
	0,29	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	Médio
STI				0,44			Mínimo
				0,46			Máximo
				0,45			Médio

Tabela 6.16 – **PAP01** – Sala de Eventos – Escola Estadual Rômulo Zanchi – Dados Simulados (Situação “sem mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	1,03	1,38	1,70	1,81	1,66	1,20	Mínimo
	1,08	1,42	1,73	1,86	1,71	1,22	Máximo
	1,04	1,41	1,72	1,84	1,68	1,21	Médio
EDT [s]	1,04	1,40	1,71	1,84	1,64	1,16	Mínimo
	1,16	1,47	1,81	1,92	1,76	1,27	Máximo
	1,09	1,44	1,77	1,89	1,72	1,22	Médio
C_{80} [dB]	1,90	0,00	- 1,30	- 1,60	- 1,00	1,00	Mínimo
	4,00	1,90	0,50	0,10	0,80	3,00	Máximo
	2,90	0,90	- 0,40	- 0,80	- 0,10	2,00	Médio
D_{50}	0,45	0,36	0,30	0,28	0,31	0,41	Mínimo
	0,60	0,49	0,42	0,40	0,43	0,55	Máximo
	0,51	0,42	0,35	0,34	0,37	0,47	Médio
STI				0,51			Mínimo
				0,55			Máximo
				0,53			Médio

Tabela 6.17 – **PAC01** – Sala de Vídeo – Escola Estadual Margarida Lopes – Dados Simulados (Situação “sem mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	1,06	1,67	1,71	2,01	1,88	1,52	Mínimo
	1,11	1,70	1,75	2,05	1,92	1,55	Máximo
	1,09	1,68	1,73	2,03	1,90	1,53	Médio
EDT [s]	1,10	1,78	1,77	2,08	1,94	1,53	Mínimo
	1,16	1,83	1,84	2,16	2,01	1,63	Máximo
	1,13	1,81	1,80	2,12	1,97	1,58	Médio
C_{80} [dB]	2,20	- 0,80	- 0,80	- 1,80	- 1,30	0,00	Mínimo
	3,40	0,30	0,20	- 0,80	- 0,20	1,20	Máximo
	2,60	- 0,50	- 0,50	- 1,50	- 1,00	0,40	Médio
D_{50}	0,47	0,32	0,32	0,28	0,30	0,36	Mínimo
	0,56	0,40	0,40	0,35	0,38	0,45	Máximo
	0,49	0,34	0,34	0,30	0,32	0,38	Médio
STI				0,49			Mínimo
				0,52			Máximo
				0,50			Médio

Tabela 6.18 – **PAC02** – Sala de Aula – Escola Estadual Margarida Lopes – Dados Simulados (Situação “sem mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	4,52	2,73	2,14	2,01	1,88	1,55	Mínimo
	4,57	2,76	2,17	2,06	1,94	1,59	Máximo
	4,55	2,74	2,16	2,04	1,90	1,57	Médio
EDT [s]	4,63	2,84	2,22	2,12	1,94	1,59	Mínimo
	4,68	2,92	2,29	2,16	2,00	1,64	Máximo
	4,66	2,87	2,26	2,14	1,97	1,63	Médio
C₈₀ [dB]	- 6,20	- 3,70	- 2,30	- 1,90	- 1,40	- 0,20	Mínimo
	- 6,00	- 3,40	- 2,00	- 1,60	- 1,10	0,20	Máximo
	- 6,00	- 3,50	- 2,10	- 1,70	- 1,20	0,00	Médio
D₅₀	0,13	0,20	0,25	0,27	0,29	0,35	Mínimo
	0,14	0,22	0,28	0,29	0,32	0,38	Máximo
	0,13	0,21	0,27	0,28	0,30	0,36	Médio
STI			0,44				Mínimo
			0,44				Máximo
			0,44				Médio

Tabela 6.19 – **CPA01** – Sala de Vídeo – Escola Estadual Edna May Cardoso – Dados Simulados (Situação “sem mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	1,53	1,56	1,45	1,49	1,49	1,22	Mínimo
	1,57	1,57	1,47	1,52	1,52	1,24	Máximo
	1,55	1,57	1,46	1,50	1,50	1,23	Médio
EDT [s]	1,56	1,57	1,45	1,53	1,47	1,22	Mínimo
	1,60	1,58	1,52	1,57	1,56	1,31	Máximo
	1,58	1,57	1,49	1,54	1,52	1,26	Médio
C₈₀ [dB]	0,00	- 0,10	0,30	0,10	0,20	1,50	Mínimo
	2,30	2,30	2,80	2,60	2,70	4,20	Máximo
	0,80	0,70	1,20	1,00	1,10	2,50	Médio
D₅₀	0,36	0,35	0,37	0,36	0,37	0,43	Mínimo
	0,52	0,52	0,54	0,54	0,55	0,62	Máximo
	0,42	0,41	0,44	0,43	0,43	0,50	Médio
STI			0,52				Mínimo
			0,59				Máximo
			0,54				Médio

Tabela 6.20 – **CPA02** – Sala de Aula – Escola Estadual Edna May Cardoso – Dados Simulados (Situação “sem mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	2,29	1,84	1,99	2,23	1,80	1,62	Mínimo
	2,33	1,86	2,03	2,26	1,84	1,63	Máximo
	2,31	1,85	2,01	2,24	1,82	1,62	Médio
EDT [s]	2,30	1,86	2,01	2,25	1,82	1,63	Mínimo
	2,33	1,93	2,07	2,28	1,87	1,68	Máximo
	2,31	1,90	2,05	2,26	1,84	1,66	Médio
C₈₀ [dB]	- 2,30	- 1,20	- 1,60	- 2,20	- 1,00	- 0,2	Mínimo
	- 2,10	- 0,90	- 1,40	- 1,90	- 0,70	0,10	Máximo
	- 2,10	- 1,00	- 1,50	- 2,00	- 0,80	- 0,10	Médio
D₅₀	0,26	0,30	0,28	0,26	0,31	0,35	Mínimo
	0,27	0,32	0,30	0,28	0,33	0,37	Máximo
	0,26	0,31	0,29	0,27	0,32	0,36	Médio
STI				0,46			Mínimo
				0,47			Máximo
				0,47			Médio

Tabela 6.21 – **CPB01** – Sala de Vídeo – Escola Estadual Paulo Lauda – Dados Experimentais (Situação “sem mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	1,94	1,95	2,34	2,19	2,35	1,80	Mínimo
	1,98	1,98	2,39	2,24	2,38	1,86	Máximo
	1,96	1,96	2,37	2,22	2,36	1,83	Médio
EDT [s]	1,92	1,92	2,35	2,23	2,34	1,80	Mínimo
	1,99	1,98	2,41	2,27	2,39	1,85	Máximo
	1,95	1,95	2,39	2,24	2,36	1,83	Médio
C₈₀ [dB]	- 1,20	- 1,20	- 2,30	- 1,90	- 2,20	- 0,80	Mínimo
	- 1,20	- 1,10	- 2,20	- 1,80	- 2,00	- 0,60	Máximo
	- 1,20	- 1,10	- 2,30	- 1,80	- 2,10	- 0,60	Médio
D₅₀	0,30	0,30	0,25	0,27	0,25	0,32	Mínimo
	0,31	0,31	0,26	0,28	0,27	0,34	Máximo
	0,30	0,31	0,26	0,28	0,26	0,33	Médio
STI				0,45			Mínimo
				0,47			Máximo
				0,46			Médio

Apêndice D - Valores médios, mínimos e máximos para os parâmetros acústicos, em função da frequência, obtidos por meio de medições da resposta impulso das salas de aula analisadas (simulação**) com mobília.**

São apresentados na Tabela 6.22 até a Tabela 6.28.

Tabela 6.22 – **PAI01** – Sala de Eventos – Escola Estadual Dr. Walter Jobim – Dados Simulados (Situação “com mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	1,70	1,87	1,47	1,35	1,21	1,19	Mínimo
	1,75	1,91	1,51	1,43	1,24	1,21	Máximo
	1,73	1,89	1,49	1,39	1,22	1,20	Médio
EDT [s]	1,69	1,84	1,49	1,38	1,20	1,17	Mínimo
	1,80	1,94	1,50	1,44	1,26	1,23	Máximo
	1,74	1,89	1,49	1,40	1,22	1,20	Médio
C₈₀ [dB]	- 1,30	- 1,60	- 0,10	0,30	1,10	1,10	Mínimo
	0,60	0,10	1,60	2,10	2,90	3,10	Máximo
	- 0,50	- 0,90	0,60	1,10	1,90	2,00	Médio
D₅₀	0,28	0,27	0,34	0,36	0,40	0,40	Mínimo
	0,42	0,39	0,47	0,50	0,54	0,55	Máximo
	0,34	0,32	0,39	0,42	0,46	0,46	Médio
STI				0,51			Mínimo
				0,55			Máximo
				0,53			Médio

Fonte: Autor.

Tabela 6.23 – **PAP01** – Sala de Eventos – Escola Estadual Rômulo Zanchi – Dados Simulados (Situação “com mobília”):

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						-
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	
TR [s]	1,03	1,35	1,67	1,78	1,63	1,17	Mínimo
	1,08	1,41	1,70	1,83	1,65	1,22	Máximo
	1,05	1,38	1,69	1,80	1,64	1,20	Médio
EDT [s]	1,02	1,38	1,71	1,85	1,62	1,20	Mínimo
	1,11	1,44	1,80	1,91	1,72	1,28	Máximo
	1,07	1,42	1,75	1,88	1,69	1,24	Médio
C₈₀ [dB]	2,40	0,50	- 0,70	- 1,10	- 0,50	1,60	Mínimo
	3,20	1,20	1,10	- 0,50	0,20	2,30	Máximo
	2,80	0,90	- 0,40	- 0,80	- 0,10	2,00	Médio
D₅₀	0,48	0,38	0,32	0,30	0,33	0,44	Mínimo
	0,54	0,44	0,38	0,36	0,39	0,50	Máximo
	0,51	0,41	0,35	0,33	0,36	0,47	Médio
STI				0,52			Mínimo
				0,54			Máximo
				0,53			Médio

Fonte: Autor.

Tabela 6.24 – **PAC01** – Sala de Vídeo – Escola Estadual Margarida Lopes – Dados Simulados (Situação “com mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						-
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	
TR [s]	0,84	1,27	1,69	1,52	2,42	1,15	Mínimo
	0,87	1,33	1,74	1,55	2,47	1,19	Máximo
	0,86	1,31	1,71	1,54	2,45	1,17	Médio
EDT [s]	0,82	1,27	1,70	1,55	2,51	1,14	Mínimo
	0,87	1,36	1,76	1,60	2,54	1,21	Máximo
	0,85	1,32	1,73	1,57	2,52	1,17	Médio
C₈₀ [dB]	4,30	1,30	- 0,40	0,30	- 2,50	2,20	Mínimo
	5,10	1,90	0,00	0,80	- 2,00	2,80	Máximo
	4,60	1,50	- 0,30	0,50	- 2,30	2,40	Médio
D₅₀	0,57	0,42	0,34	0,37	0,25	0,46	Mínimo
	0,62	0,47	0,37	0,41	0,28	0,52	Máximo
	0,59	0,44	0,35	0,39	0,26	0,48	Médio
STI				0,53			Mínimo
				0,54			Máximo
				0,53			Médio

Fonte: Autor.

Tabela 6.25 – **PAC02** – Sala de Aula – Escola Estadual Margarida Lopes – Dados Simulados (Situação “com mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	2,13	1,84	1,35	1,46	1,95	2,67	Mínimo
	2,17	1,90	1,39	1,51	2,00	2,69	Máximo
	2,15	1,88	1,37	1,48	1,97	2,68	Médio
EDT [s]	2,16	1,87	1,37	1,49	1,98	2,66	Mínimo
	2,20	1,95	1,43	1,56	2,05	2,73	Máximo
	2,18	1,91	1,40	1,52	2,02	2,71	Médio
C_{80} [dB]	- 2,40	- 1,50	0,30	- 0,10	- 1,80	- 3,50	Mínimo
	- 1,80	- 0,90	1,00	0,50	- 1,20	- 2,80	Máximo
	- 2,10	- 1,30	0,60	0,10	- 1,50	- 3,20	Médio
D_{50}	0,24	0,28	0,36	0,34	0,27	0,20	Mínimo
	0,28	0,32	0,41	0,38	0,31	0,24	Máximo
	0,26	0,29	0,29	0,36	0,28	0,22	Médio
STI				0,46			Mínimo
				0,47			Máximo
				0,47			Médio

Fonte: Autor.

Tabela 6.26 – **CPA01** – Sala de Vídeo – Escola Estadual Edna May Cardoso – Dados Simulados (Situação “com mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	1,55	1,54	1,34	1,39	1,37	1,23	Mínimo
	1,55	1,55	1,35	1,43	1,39	1,24	Máximo
	1,55	1,54	1,35	1,42	1,38	1,23	Médio
EDT [s]	1,53	1,54	1,34	1,43	1,39	1,25	Mínimo
	1,59	1,61	1,37	1,48	1,41	1,27	Máximo
	1,55	1,57	1,36	1,45	1,40	1,25	Médio
C_{80} [dB]	0,30	0,20	1,10	0,70	0,90	1,50	Mínimo
	0,60	0,50	1,50	1,10	1,40	2,00	Máximo
	0,50	0,40	1,30	0,90	1,20	1,80	Médio
D_{50}	0,37	0,37	0,41	0,39	0,40	0,43	Mínimo
	0,40	0,40	0,44	0,43	0,44	0,47	Máximo
	0,38	0,38	0,43	0,41	0,42	0,45	Médio
STI				0,53			Mínimo
				0,53			Máximo
				0,53			Médio

Fonte: Autor.

Tabela 6.27 – CPA02 – Sala de Aula – Escola Estadual Edna May Cardoso – Dados Simulados (Situação “com mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	2,48	2,84	1,76	1,90	1,49	1,40	Mínimo
	2,53	2,86	1,79	1,94	1,55	1,43	Máximo
	2,51	2,85	1,77	1,91	1,52	1,41	Médio
EDT [s]	2,53	2,84	1,79	1,90	1,50	1,39	Mínimo
	2,56	2,90	1,80	1,96	1,56	1,43	Máximo
	2,55	2,87	1,79	1,93	1,53	1,42	Médio
C_{80} [dB]	- 2,90	- 3,50	- 1,00	- 1,30	0,10	0,60	Mínimo
	- 2,10	- 2,80	- 0,20	- 0,50	1,00	1,60	Máximo
	- 2,60	- 3,20	- 0,60	- 1,00	0,50	1,00	Médio
D_{50}	0,23	0,20	0,31	0,29	0,35	0,38	Mínimo
	0,27	0,25	0,36	0,35	0,43	0,46	Máximo
	0,25	0,22	0,33	0,31	0,38	0,41	Médio
STI				0,47			Mínimo
				0,48			Máximo
				0,47			Médio

Fonte: Autor.

Tabela 6.28 – CPB01 – Sala de Vídeo – Escola Estadual Paulo Lauda – Dados Simulados (Situação “com mobília”).

Parâmetros Acústicos	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	-
TR [s]	1,65	1,60	1,51	1,36	1,24	1,11	Mínimo
	1,70	1,66	1,54	1,38	1,27	1,16	Máximo
	1,67	1,64	1,52	1,37	1,25	1,13	Médio
EDT [s]	1,65	1,61	1,51	1,35	1,23	1,09	Mínimo
	1,73	1,66	1,59	1,43	1,29	1,15	Máximo
	1,69	1,63	1,54	1,38	1,26	1,12	Médio
C_{80} [dB]	- 0,90	- 0,60	- 0,10	0,60	1,30	2,00	Mínimo
	0,70	1,00	1,40	2,00	2,70	3,50	Máximo
	- 0,20	0,10	0,50	1,20	1,90	2,60	Médio
D_{50}	0,31	0,32	0,34	0,37	0,41	0,44	Mínimo
	0,42	0,43	0,45	0,48	0,52	0,56	Máximo
	0,35	0,37	0,39	0,42	0,46	0,49	Médio
STI				0,52			Mínimo
				0,56			Máximo
				0,54			Médio

Fonte: Autor.

Apêndice E – Valores mínimos e máximos simulados para a nova proposta de sala “com mobília”.

São apresentados na Tabela 6.29.