

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

**CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS PARA PRÁTICA  
E ENSINO MUSICAL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Fernanda Marros**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2011**

# **CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS PARA PRÁTICA E ENSINO MUSICAL**

**Fernanda Marros**

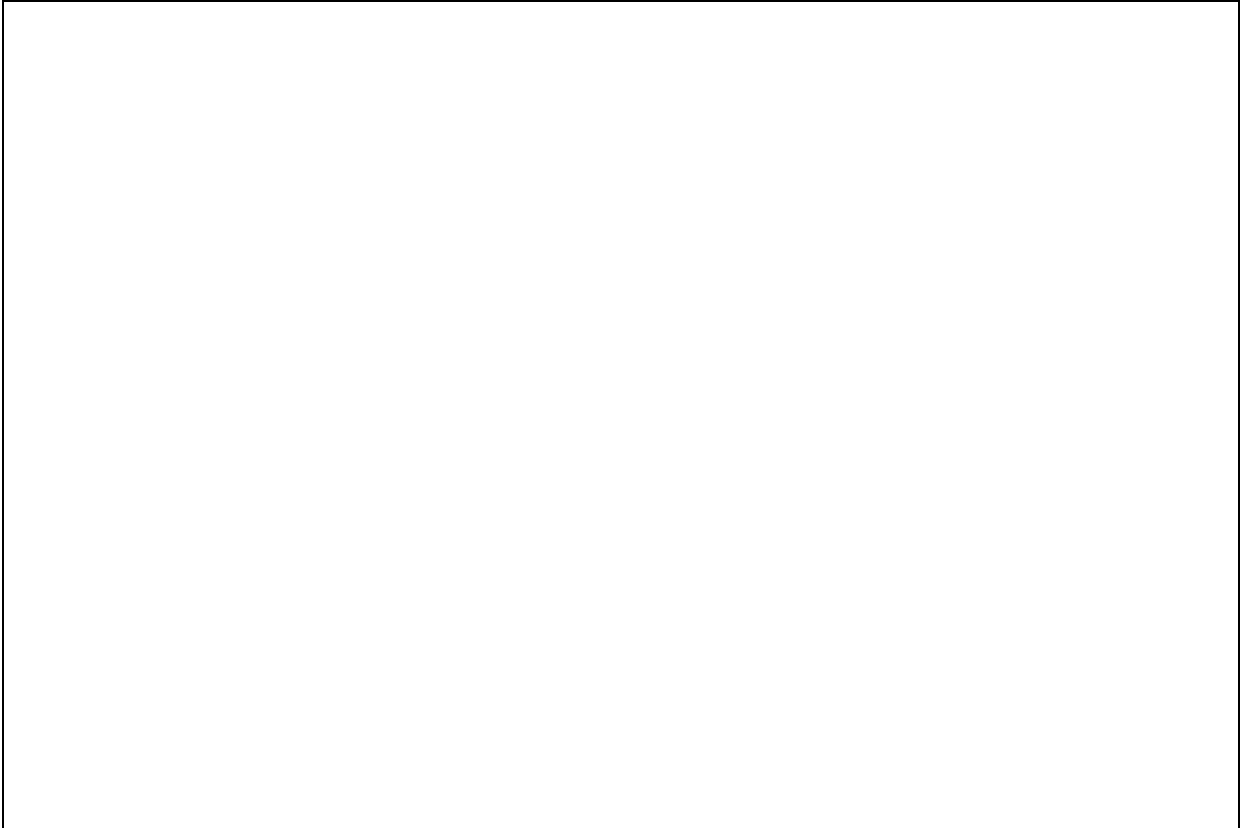
Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Conforto Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil.**

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

**Co-orientador: Prof. Dr. Stephan Paul**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2011**



---

© 2010

Todos os direitos autorais reservados a Fernanda Marros. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Sete de Setembro, 1326, Taquari, RS, 95860-000

Fone (0xx) 51 3653 3240; End. Eletr: [fmarros@hotmail.com.br](mailto:fmarros@hotmail.com.br)

---

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

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

**CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS PARA PRÁTICA E ENSINO  
MUSICAL**

elaborada por  
**Fernanda Marros**

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

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Erasmu Felipe Vergara Miranda, Dr. Eng. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Dinara Xavier da Paixão, Dr. Eng. (UFSM)**

---

**Gustavo da Silva Vieira de Melo, Dr. Eng.(UFPA)**

Santa Maria/RS, 25 de agosto de 2011.

## AGRADECIMENTOS

---

Ao meu orientador, Prof. Dr. Erasmo Felipe Vergara, pela oportunidade concedida e por acreditar na minha capacidade de desenvolver este trabalho, pelo conhecimento compartilhado e paciência em seu desenvolvimento.

Ao co-orientador Prof. Dr. Stephan Paul, pelas importantes contribuições teóricas e práticas.

Aos bolsistas da graduação Luiz Fernando Dornelles Filho e Dyhonatan Russi pela dedicação e auxílio, sem as quais este trabalho não poderia ter sido concluído.

À secretaria do PPGEC pelas oportunidades e disponibilidade em resolver quaisquer dúvidas.

À Capes, pelo auxílio financeiro que me permitiu dedicação exclusiva à pesquisa.

Aos professores, alunos e funcionários do Centro de Artes e Letras da Universidade Federal de Santa Maria que participaram e auxiliaram na execução das entrevistas que formam parte imprescindível deste estudo.

À arquiteta, Gianine Mello, por me permitir auxiliar e participar dos projetos para os novos edifícios do Curso de Música da Universidade Federal de Santa Maria, os quais foram objetos inspiradores para esta pesquisa.

Ao Prof. Arcanjo Lenzi, da UFSC por ter gentilmente cedido parte do equipamento utilizado nas medições experimentais.

Aos professores Gustavo Melo e Newton Sure Soeiro do Grupo de Acústica e Vibrações da UFPA, pela obtenção dos dados do material absorvedor sonoro utilizado nas simulações acústicas.

Aos demais colegas, que de uma forma ou de outra me auxiliaram nesta jornada.

Aos meus amigos pela compreensão e companheirismo.

À minha família pelo incentivo e apoio na busca de conhecimento, me fornecendo a sustentação que me permite conquistar meus objetivos.

*“Sem a música, a vida seria um erro.”*

(Friedrich Nietzsche)

## RESUMO

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

### **CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS PARA PRÁTICA E ENSINO MUSICAL**

AUTORA: FERNANDA MARROS

ORIENTADOR: ERASMO FELIPE VERGARA MIRANDA

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 25 de agosto de 2011.

O músico necessita perceber adequadamente o som nos recintos onde atua, seja em ambientes destinados à performance, seja em ambientes destinados ao estudo e prática musical. Para que isto seja possível é necessário que estes locais estejam acusticamente adequados, permitindo o desenvolvimento e aprimoramento da percepção sonora musical. No presente trabalho seis salas de aula do curso de graduação em Música da UFSM foram caracterizadas através de medições acústicas da resposta impulso e de simulação computacional, além de considerar a opinião dos usuários mediante questionários. Os questionários aplicados permitiram compreender as preferências dos estudantes e professores de música no que se refere à qualidade acústica de um total de vinte salas para prática e ensino musical. Três salas de estudo e três salas de aula coletiva foram as mais citadas dentre as disponíveis para o curso, as quais foram avaliadas acusticamente através da resposta impulso, resultando na obtenção dos principais parâmetros objetivos especificados para a avaliação da qualidade acústica de salas pela norma ISO 3382: 2009. As informações fornecidas pelos músicos se mostraram coerentes com os dados das medições, de forma que as salas consideradas secas apresentaram tempos de reverberação (TR) em torno de 0,4 s, e as salas consideradas reverberantes apresentaram tempos de reverberação em torno de 1,5 s. As seis salas se caracterizaram como salas claras e definidas, com valores para Clareza variando entre 1,0 e 2,0 dB para as salas vivas e em torno de 22 dB para as salas secas. A Definição se manteve acima de 43% para todas as salas, com Tempo Central abaixo de 50 ms para salas mais claras e menos reverberantes e acima de 90 ms para as salas mais vivas. Em geral, a maioria das salas apresenta deficiências em relação ao condicionamento acústico, sendo que somente duas das vinte salas foram consideradas adequadas pela maioria dos músicos, sem receber críticas negativas consideráveis, sendo uma sala de estudo com volume de 79,9 m<sup>3</sup> e TR igual a 0,4 s, e uma sala de aula coletiva com volume de 327,85 m<sup>3</sup> e TR igual a 1,6 s. A simulação computacional se mostrou eficiente para predição do comportamento acústico das salas em questão e os dados obtidos nas simulações foram comparados em relação à diferença no limite do observável (JND) para os parâmetros acústicos investigados (T30, EDT, C80, D50 e Ts). Uma boa correlação foi observada entre dados medidos e simulados, principalmente para os parâmetros relacionados à energia sonora na faixa de frequência de 63 a 8.000 Hz.

**Palavras-chave:** acústica de salas, acústica musical, qualidade acústica, resposta impulso.

## ABSTRACT

Master Course Dissertation  
Post Graduation Program in Civil Engineering  
Federal university of Santa Maria

## ACOUSTIC CHARACTERIZATION OF ROOMS FOR MUSIC PRACTICE AND TEACHING

AUTHOR: FERNANDA MARROS

ADVISER: ERASMO FELIPE VERGARA MIRANDA

Defense Place and Date: Santa Maria, August 25<sup>nd</sup>, 2011.

The musician needs to properly perceive the sound in rooms where it operates, either in an environment designed to be performed or to studying and practice music. For this, it is necessary that these sites are acoustically appropriate, enabling the development and enhancement of musical sound perception. In this study six classrooms of the music school of UFSM were characterized by acoustic impulse response measurements and computer simulation, and considered the user's feedback through questionnaires. The questionnaires enabled to understand the preferences of students and music teachers regarding the acoustic quality of a total of twenty rooms for music practice and teaching. Three study rooms and three collective classrooms were the most cited out of those available for the course, which were evaluated by acoustic impulse response, resulting in achieving specified objectives of the main parameters to assess the acoustic quality of rooms by ISO 3382: 2009. The information provided by the musicians proved to be coherent with the measurement data, as the rooms considered dry had presented reverberation times around 0.4 s, and the rooms considered reverberant had reverberation times (RT) around 1.5 s. The six rooms were characterized as clear and well defined rooms, with values for Clarity ranging between 1.0 and 2.0 dB for live rooms and around 22 dB for dry rooms. The definition has remained above 43% for all rooms with Central Time below 50 ms for rooms of greater clarity and less reverberant, and above 90 ms for the live rooms. In general, most rooms were considered weak in relation to acoustic conditioning, and only two out of twenty rooms were considered adequate by most musicians, without receiving considerable negative criticism, being one a study room with a volume of 79.9 m<sup>3</sup> and TR equal to 0.4 seconds, and the other a collective classroom with a volume of 327.85 m<sup>3</sup> and TR equal to 1.6 s. The computer simulation was efficient for the prediction of the acoustic behavior of the rooms in study and the data obtained in the simulations were compared to the just noticeable difference (JND) for acoustic parameters investigated ( $T_{30}$ , EDT,  $C_{80}$ ,  $D_{50}$  and  $T_s$ ). A good correlation was observed between measured and simulated data, particularly for parameters related to noise energy in the frequency range from 63 to 8.000 Hz.

**Key words:** room acoustics, musical acoustics, acoustical quality, impulse response.



## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1- Faixa de frequência de vários instrumentos .....	26
Figura 2.2 - Esquema representativo da interação do som com as superfícies.....	28
Figura 2.3 - Esquema explicativo do fenômeno da reflexão.....	29
Figura 2.4 - Som direto, primeiras reflexões e som reverberante. ....	30
Figura 2.5 - Espectro audível dividido em quatro regiões.....	31
Figura 2.6 - Variação da densidade de energia com o tempo. ....	33
Figura 3.1 - Vista externa do edifício do CAL da UFSM.....	51
Figura 3.2 – Salas de aula do curso de graduação em música da UFSM: (a) sala de estudo, (b) sala de aula coletiva. ....	52
Figura 3.3 – (a) Aplicação do material absorvedor sonoro perfurado, (b) chapas de MDF na parte inferior da parede, e (c) carpete sobre as paredes de alvenaria.....	54
Figura 3.4 - Sala de estudo individual (a) e sala de estudo coletiva (b). ....	54
Figura 3.5 - Equipamentos e esquema de montagem do sistema de medição.....	58
Figura 3.6 – Interface das ferramentas <i>Quick Estimate</i> (a) e <i>Global Estimate</i> (b).....	62
Figura 3.7 – Ajustes do modelo simulado, através do parâmetro T30, em comparação com os valores medidos para a sala SE02.....	63
Figura 4.1 - Número de citações dos estudantes e professores referentes à preferência acústica das salas para ensino e prática musical.....	67
Figura 4.2 - Instrumentos musicais estudados pelos músicos participantes no questionário.....	68
Figura 4.3 - Tempos de reverberação (T30), por banda de frequência, das salas de estudo e de aula. ....	72
Figura 4.4 - Tempos de decaimento inicial (EDT), por banda de frequência, das salas de estudo e de aula.....	74
Figura 4.5 – Clareza ( $C_{80}$ ), por banda de frequência, das salas de estudo e de aula.....	76
Figura 4.6 - Valores do parâmetro $D_{50}$ , por frequência, das salas de estudo e de aula.....	77
Figura 4.7 - Valores do parâmetro $T_s$ , por frequência, das salas de estudo e de aula. ....	78
Figura 4.8 - Valores do parâmetro G, por frequência, das salas de estudo e de aula.....	79
Figura 4.9- Valores do parâmetro $ST_{early}$ , por frequência, das salas de estudo e de aula...80	

Figura 4.10 – Valores simulados do parâmetro $T_{30}$ , por frequência, das salas simuladas. .....	86
Figura 4.11 - Valores simulados do parâmetro EDT, por frequência, das salas simuladas. .....	87
Figura 4.12 - Valores simulados do parâmetro $C_{80}$ , por frequência, das salas simuladas.	87
Figura 4.13 - Valores simulados do parâmetro $D_{50}$ , por frequência, das salas simuladas. .....	87
Figura 4.14 - Valores simulados do parâmetro $T_s$ , por frequência, das salas simuladas. .	88

## **LISTA DE QUADROS**

---

Quadro 4.1 - Descrição e justificativa dos músicos pela preferência das salas: salas preferidas.....	70
Quadro 4.2 - Descrição e justificativa dos músicos pela preferência das salas: salas ruins. ....	70

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 2.1 - Comparativo entre tempos de reverberação médios considerados adequados para salas de prática e ensino musical.....	38
Tabela 2.2 - Valores de STI de acordo com a norma IEC 60268-16.....	45
Tabela 2.3 - Valores para parâmetros acústicos de acordo com a percepção do ouvinte.	47
Tabela 3.1 - Descrição das características geométricas das salas da Música da UFSM. ....	53
Tabela 3.2 - Distribuição das áreas e materiais das salas de aula do curso de Música. ....	55
Tabela 4.1 - Distribuição das opiniões a respeito das salas selecionadas.....	69
Tabela 4.2 - Calor (BR), Vivacidade e Brilho (Br), das salas de estudo e de aula.....	75
Tabela 4.3 - Valores do índice de transmissão da fala (STI) das salas de estudo e de aula. .....	81
Tabela 4.4 - Síntese das características mais relevantes das salas em estudo, com valores médios para a faixa de frequência de 500 a 1.000 Hz.....	82
Tabela 4.5 - Diferença entre valores medidos e simulados, as áreas sombreadas correspondem aos valores iguais ou abaixo do JND indicado para o parâmetro.....	85
Tabela 6.1 - Comparação entre os valores de STI medidos e simulados para as seis salas. .....	148

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

BR	Calor ou Razão de Graves ( <i>Bass Ratio</i> )
Br	Brilho ( <i>Brilliance</i> )
CAL	Centro de Artes e Letras
C <sub>80</sub>	Clareza ( <i>Clarity</i> )
D <sub>50</sub>	Definição ( <i>Definition</i> )
EDT	Tempo de Decaimento Inicial ( <i>early decay time</i> )
G	Fator de Força ( <i>strength</i> )
GVA	Grupo de Vibrações e Acústica
INR	Razão Impulso - Ruído
JND	Diferença no limite do observável ( <i>Just Noticeable Difference</i> )
LDB	Lei de Diretrizes e Bases da Educação
RT	Tempo de Reverberação ( <i>Reverberation Time</i> )
SAC	Sala de aula coletiva
SE	Sala de estudo
SNR	Relação Sinal- Ruído
ST <sub>early</sub>	Apoio inicial ( <i>Early Support</i> )
ST <sub>late</sub>	Apoio tardio ( <i>Late Support</i> )
STI	Índice de Transmissão da Fala ( <i>Speech Transmission Index</i> )
TR	Tempo de reverberação na faixa de frequências de 500 a 1.000Hz, Vivacidade ( <i>Liveness</i> )
T <sub>s</sub>	Tempo Central ( <i>Centre Time</i> )
UFPA	Universidade Federal do Pará
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria

## **LISTA DE ANEXOS**

---

Anexo A - Plantas baixas do edifício 40, referente ao CAL, com salas do curso da Música, em destaque.....	99
---	----

## LISTA DE APÊNDICES

---

Apêndice A - Questionário aplicado aos estudantes e professores do curso de Música da UFSM.....	99
Apêndice B - Planta baixa e descrição de materiais das salas de estudo e de aula coletiva.....	101
Apêndice C - Opinião dos estudantes e professores de música a respeito das seis salas selecionadas: de estudo e de aula coletiva.....	107
Apêndice D - Valores médios, mínimos e máximos para os parâmetros acústicos, em função da frequência, obtidos a partir das medições da resposta impulsiva acústica das salas de ensaio e de aula coletiva.....	113
Apêndice E - Materiais aplicados nos modelos computacionais e seus respectivos coeficientes de absorção sonora, em banda de oitava. ....	125
Apêndice F - Simulações e concordância com os resultados medidos.....	126

<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>19</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>1.1 Objetivos .....</b>	<b>20</b>
1.1.1 Objetivo Geral .....	20
1.1.2 Objetivos Específicos .....	21
<b>1.2 Limitações.....</b>	<b>21</b>
<b>1.3 Estrutura da Dissertação.....</b>	<b>22</b>
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>24</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1 Acústica arquitetônica .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2 Acústica de salas .....</b>	<b>25</b>
2.2.1 Breve histórico da acústica de salas .....	26
2.2.1 Som direto, primeiras reflexões e som reverberante .....	30
<b>2.2 Métodos para estudo do condicionamento acústico .....</b>	<b>30</b>
2.2.1 Acústica ondulatória .....	32
2.2.2 Acústica estatística .....	32
2.2.3 Acústica geométrica .....	34
<b>2.3 Critérios, objetivos e subjetivos, para avaliação da acústica de uma sala .....</b>	<b>34</b>
2.3.1 Critérios de qualidade .....	35
2.3.1.1 Tempo de reverberação ( <i>reverberation time</i> ) .....	35
2.3.1.2 Tempo de decaimento inicial (EDT) .....	38
2.3.1.3 Vivacidade (TR) .....	38
2.3.1.4 Calor e Razão de Graves (BR) .....	39
2.3.1.5 Brilho (Br) .....	40
2.3.2 Critérios de energia .....	40
2.3.2.1 Definição ( $D_{50}$ ) e Clareza ( $C_{80}$ ) .....	40
2.3.2.3 Fator de Força ( <i>Strength</i> ) .....	42
2.3.3 Critérios de palco .....	43
2.3.3.1 <i>Early support</i> ( $ST_{early}$ ) e <i>Late support</i> ( $ST_{late}$ ) .....	43
2.3.4 Critério de inteligibilidade da fala .....	44
2.3.4.1 Índice de transmissão da fala (STI) .....	44
<b>2.4 Medição da resposta impulsiva.....</b>	<b>45</b>
2.4.1 Parâmetros importantes na medição da resposta impulsiva .....	46
2.4.1.1 Razão Impulso-Ruído (INR) .....	46
2.4.1.2 Relação Sinal- Ruído (SNR) .....	46



2.4.2	Diferença no limite do observável ( <i>Just Noticeable Difference</i> )	47
2.5	Simulação computacional da acústica de salas	48
<b>CAPÍTULO III</b>		<b>25</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>		<b>25</b>
3.1	Descrição do edifício do curso de Música da UFSM	25
3.1.1	Salas para prática e ensino musical	51
3.2	Avaliação subjetiva das características acústicas das salas	56
3.3	Ensaios experimentais	57
3.3.1	Equipamentos e sistema de medição	57
3.3.2	Posicionamento dos equipamentos e processo de medição	59
3.4	Simulação computacional	59
3.4.1	Confecção do modelo geométrico das salas	60
3.4.2	Definição e aplicação de materiais no modelo geométrico das salas	60
3.4.2.1	Ajuste do modelo em função dos materiais e do nível de detalhamento	62
3.4.3	Simulação acústica	64
<b>CAPÍTULO IV</b>		<b>66</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS</b>		<b>66</b>
4.1	Avaliação subjetiva	66
4.2	Ensaios experimentais	71
4.2.1	Considerações a respeito das salas estudadas	82
4.3	Simulações e concordância com os resultados medidos	85
4.3.1	Considerações a respeito das simulações	85
<b>CAPÍTULO VI</b>		<b>89</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>		<b>89</b>
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	91
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		<b>93</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		<b>93</b>
<b>ANEXOS</b>		<b>99</b>
<b>APÊNDICES</b>		<b>101</b>

### 1 INTRODUÇÃO

A relação do ser humano com os ambientes, e os outros seres, acontece através de estímulos e mensagens sensoriais que este recebe a todo o momento de diversas fontes. Para que esta interação aconteça, são necessários alguns requisitos, não só da fonte do estímulo, como do meio onde será transmitido, e do receptor. Em relação às mensagens sonoras não é diferente. Para que estas possam atingir o seu objetivo, se faz necessário considerar a acústica dos ambientes, contemplando as exigências requeridas pelos usuários.

Quando as necessidades acústicas de um espaço são atendidas, satisfazendo seus usuários, diz-se que o ambiente possui condições para fornecer conforto acústico. Este é um conceito subjetivo relacionado a uma série de fatores externos e internos, tanto no que diz respeito aos ambientes quanto aos usuários, e que depende diretamente da utilização a qual o espaço se destina. Diferentes usos exigem níveis de isolamento e condicionamento acústicos também diferentes, os quais variam de acordo com as necessidades requeridas pelas atividades desenvolvidas em determinado espaço.

Um dos ramos da acústica arquitetônica, a acústica de salas, se dedica ao estudo do comportamento do som dentro de recintos fechados. Foi instituída pelo físico Wallace C. Sabine, por volta dos anos 1900 e, a partir de então, estudos vêm sendo realizados no sentido de definir e aprimorar os conceitos e parâmetros que determinam a qualidade acústica deste tipo de ambiente.

Observando o que foi produzido de conhecimento a partir das descobertas de Sabine, passando por Beranek<sup>1</sup> (LAMBERTY, 1980; BARRON, 2010; LONG, 2006; VORLÄNDER, 2008; entre outros) até os dias atuais, notam-se dois fatos importantes: primeiro, os estudos estão voltados principalmente para salas de concerto, auditórios e teatros com volumes superiores a 500 m<sup>3</sup>; segundo, os parâmetros existentes para a

---

<sup>1</sup> Engenheiro que promoveu grandes avanços a área da acústica arquitetônica, será abordado com mais atenção no próximo capítulo.

qualificação acústica, principalmente no que se referem à execução de música em ambientes fechados, carecem de esclarecimentos.

Os dados numéricos relacionados a diversos parâmetros são obtidos com facilidade graças à tecnologia disponível atualmente, porém não se conhece ou se está seguro do que representam e da forma como devem ser analisados. Bradley (2011) salienta que muitos parâmetros são utilizados de forma exploratória e que são necessárias pesquisas, a fim de validar sua importância e suas correlações com aspectos subjetivos.

Acrescenta-se a isso a falta de atenção dos agentes envolvidos na construção civil e demais interessados no que se refere à qualidade acústica dos espaços, sendo esta muitas vezes ignorada, o que resulta em edificações projetadas sem qualquer consideração de como serão utilizadas futuramente.

Uma das questões que mais preocupam nessa área, é a condição acústica dos edifícios escolares, assunto que vem sendo muito discutido em diversas pesquisas e eventos. Sabe-se que a educação formal está baseada na comunicação verbal e, por isso, faz-se necessária a elaboração e execução adequada de projetos acústicos que atendam certas prioridades, porém, no processo projetual isto não é levado em consideração, concentrando as atenções em fatores estéticos e orçamentários.

A deficiência acústica se verifica não só nos edifícios escolares tradicionais, onde o perfeito entendimento da palavra falada é primordial, como também em edifícios de formação superior dedicados à educação musical, onde além do discurso, a música também deve ser ouvida com clareza e boa inteligibilidade. A falta de atenção no que se refere à acústica observada nas edificações brasileiras destinadas ao ensino de música, pode obviamente, vir a prejudicar a formação dos músicos.

Assim como um arquiteto precisa aprender a observar o comportamento das formas sob a luz, um músico deve ser capaz de compreender o comportamento do som nos ambientes. Para que isto seja possível, são necessários locais adequados ao desenvolvimento e aprimoramento desta capacidade. Pensando desta forma, é inconcebível que salas para o aprendizado da música não tenham a preocupação com a acústica, intrínseca ao seu planejamento.

A formação dos músicos e futuros professores de música adquire novo significado e maior importância a partir da substituição da Lei de Diretrizes e Bases da Educação (LDB) nº 9.394/1996 pela Lei nº 11.769/2008, referente à obrigatoriedade do

ensino da música nos currículos escolares. Diversas discussões e novas preocupações entre todos os envolvidos no processo educativo surgiram, voltando as atenções não somente para as metodologias de ensino a serem utilizadas, mas principalmente para a estrutura física disponível nas instituições de ensino.

Neste contexto da congregação do aprendizado com a música, estão inseridas as salas de aula para o ensino da música do curso de graduação em Música da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, salas estas utilizadas para atividades didáticas e artísticas. Partiu-se do pressuposto de que algumas delas não atendem precisamente às necessidades acústicas dos estudantes. Assim, a partir da análise de duas tipologias de salas existentes – sala de aula e sala de ensaios, estes recintos foram caracterizados acusticamente através da avaliação subjetiva, ensaios experimentais e simulações acústicas.

Busca-se através desta pesquisa agregar informações a respeito de como projetar, com maior facilidade, ambientes escolares que recebem diferentes usos. Reunindo e produzindo informações que auxiliem no desenvolvimento de projetos acústicos para salas de aula destinadas ao ensino da música, espaços estes que devem proporcionar aos usuários a qualidade acústica necessária para o aprendizado, aprimoramento e produção musical.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Caracterizar duas tipologias de salas de ensino de música da UFSM: sala de aula e sala de ensaio, determinando os parâmetros acústicos intervenientes por meio de avaliação subjetiva, ensaios experimentais e simulação computacional através da resposta impulso.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Distinguir através de avaliação subjetiva quais salas, dentre as disponíveis no curso de música da UFSM para prática e ensino musical, são preferidas ou não pelos estudantes e professores do curso.
- Avaliar experimentalmente o comportamento do som dentro dos ambientes em estudo a partir do levantamento de parâmetros acústicos associados ao tempo de reverberação, obtidos da resposta impulso, considerando critérios de qualidade, energia e inteligibilidade.
- Determinar parâmetros acústicos a partir da resposta impulsiva dos ambientes em estudo, considerando critérios de qualidade, energia e inteligibilidade utilizando simulação computacional, correlacionando dados experimentais e simulados para validação do modelo computacional.

## 1.2 Limitações

Para a manutenção do foco do trabalho, foram impostas duas limitações principais, sendo uma as considerações a respeito do ruído de fundo e outra a questão dos modos acústicos das salas.

Sabe-se que o nível de pressão sonora do ruído de fundo tem fundamental importância no que diz respeito à qualidade acústica dos recintos fechados. Porém, como o tema central deste estudo é o condicionamento acústico, a questão referente ao controle e redução de ruído proveniente de fontes fora das salas em questão, recebe uma abordagem superficial. Partiu-se da idéia de que o isolamento acústico deve ser inerente ao projeto arquitetônico, enquanto o condicionamento pode ser em alguns casos, sobreposto a este, antes ou após a execução.

Da mesma forma, não coube a esta pesquisa investigar a fundo a questão dos modos acústicos de salas, e as relações de proporção das geometrias. Considerações muito aprofundadas neste sentido demandariam mais tempo de pesquisa, bem como

análises mais complexas das dimensões e geometrias das salas, envolvendo o método da acústica ondulatória.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, os quais estão resumidamente descritos a seguir.

No capítulo 1 é apresentada uma breve reflexão a respeito da situação da acústica de salas no contexto atual, mais especificamente de salas para educação e prática musical, a importância deste estudo e seus objetivos.

O capítulo 2 descreve a revisão de bibliografia que serviu de embasamento para o desenvolvimento desta pesquisa. São descritos os sistemas envolvidos, os métodos utilizados para o estudo da acústica de salas e seus conceitos e definições; uma reflexão a respeito da influência da forma na qualidade acústica é apresentada, bem como alguns materiais utilizados no condicionamento acústico de ambientes fechados.

Os métodos utilizados para realização da pesquisa são expostos no capítulo 3, divididos em três etapas de acordo com a ordem em que foram realizados: avaliação subjetiva dos usuários através da aplicação de questionários com os mesmos, obtenção dos parâmetros de avaliação da qualidade acústica de salas, por meio de medições experimentais através da resposta impulsiva acústica e, simulações computacionais acústicas efetuadas com auxílio do *software* de simulação e predição acústica Odeon.

No capítulo 4 são apresentados os resultados para cada etapa do trabalho de pesquisa realizado, sendo eles: questionários, medições acústicas através da resposta impulso e simulações acústicas. São analisados os dados medidos para cada parâmetro de avaliação da qualidade acústica de salas, correlacionados à avaliação subjetiva, a fim de caracterizar cada uma das salas em estudo. Os resultados obtidos com a simulação acústica também são apresentados e comparados aos dados medidos *in situ*.

As considerações a respeito dos resultados obtidos com o estudo são expostas no capítulo 5, onde estão destacadas as principais contribuições do trabalho bem como sugestões de possíveis trabalhos que permitiriam dar sequência a esta pesquisa no salas de ensino de música. assunto de acústica de

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica que serviu de embasamento para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa. Procurou-se aqui abordar os conceitos da acústica de salas, relacionados principalmente à música e ao ensino.

### 2.1 Acústica arquitetônica

A acústica arquitetônica envolve três grandes temas: acústica urbanística, condicionamento acústico e isolamento acústico. Llinares *et al.* (1996) salienta que, no caso de suas aplicações práticas, estes devem ser considerados simultaneamente, porém é imprescindível que se tenha conhecimento de seus diferentes princípios e funções, os quais são freqüentemente confundidos, principalmente no que diz respeito ao condicionamento e isolamento acústico.

A acústica urbanística estuda o conjunto de intervenções direcionadas a assegurar conforto acústico em ambientes urbanos externos, de acordo com o seu uso. O isolamento acústico tem como objetivo o controle e redução de ruído e vibrações que devem ser evitadas em qualquer espaço habitável, de acordo com as necessidades e limitações exigidas pelos que o utilizam. Finalmente, o condicionamento acústico busca adequar acusticamente um recinto fechado, proporcionando qualidade acústica, de acordo com uso ao qual está designado, considerando que este ambiente já esteja isolado da interferência do ruído exterior. Este é o âmbito em que esta pesquisa se enquadra.

## 2.2 Acústica de salas

A acústica de salas se destina ao estudo do comportamento do som dentro de recintos fechados e, portanto, do condicionamento acústico. A qualidade acústica, assunto ao qual esta área se dedica, pode ser quantificada por diferentes parâmetros (tempo de reverberação, clareza, definição, índice de transmissão da fala, etc.) de acordo com o tipo de mensagem sonora que se deseja transmitir. Em particular, este estudo está essencialmente focado na qualidade da transmissão e percepção dos sons musicais e da palavra falada.

Música e fala, de acordo com Barron (2004), consistem em breves eventos sonoros separados por silêncio. A percepção do discurso, como explica Llinares *et al.* (1996), é mais objetiva e, conseqüentemente mais simples para medir e controlar do que a percepção da música, pois é regida por fatores físicos, lingüísticos e psíquicos.

Beranek (1996) considera que a música é uma combinação de sons que, além de variar contínua ou descontinuamente no tempo, geralmente com ritmo, sofre alterações em freqüência (tom), amplitude e timbre. Acrescenta ainda, que a experiência musical não pode ser considerada à parte da acústica do espaço onde a música é executada, pois dependendo de como o recinto afeta o som que está sendo transmitido, o músico atua, consciente e inconscientemente, adaptando sua performance à acústica.

A faixa de freqüência dos instrumentos ou vozes que atuam em um ambiente é de fundamental importância para o estudo da acústica de salas destinadas à prática musical, visto que os parâmetros de qualidade que caracterizam um recinto também são, em sua maioria, obtidos e analisados em função da freqüência. A figura 2.1 apresenta a faixa de freqüência em que atuam diversos instrumentos. Como pode ser observado, os instrumentos componentes de uma orquestra, mais comuns, atuam numa faixa de 63 a 4.000 Hz, com exceção do contrabaixo, acordeon, harpa, baixo-tuba, sarrusofone-contrabaixo e saxofone-baixo que atuam a partir de 32 até 4.000 Hz.



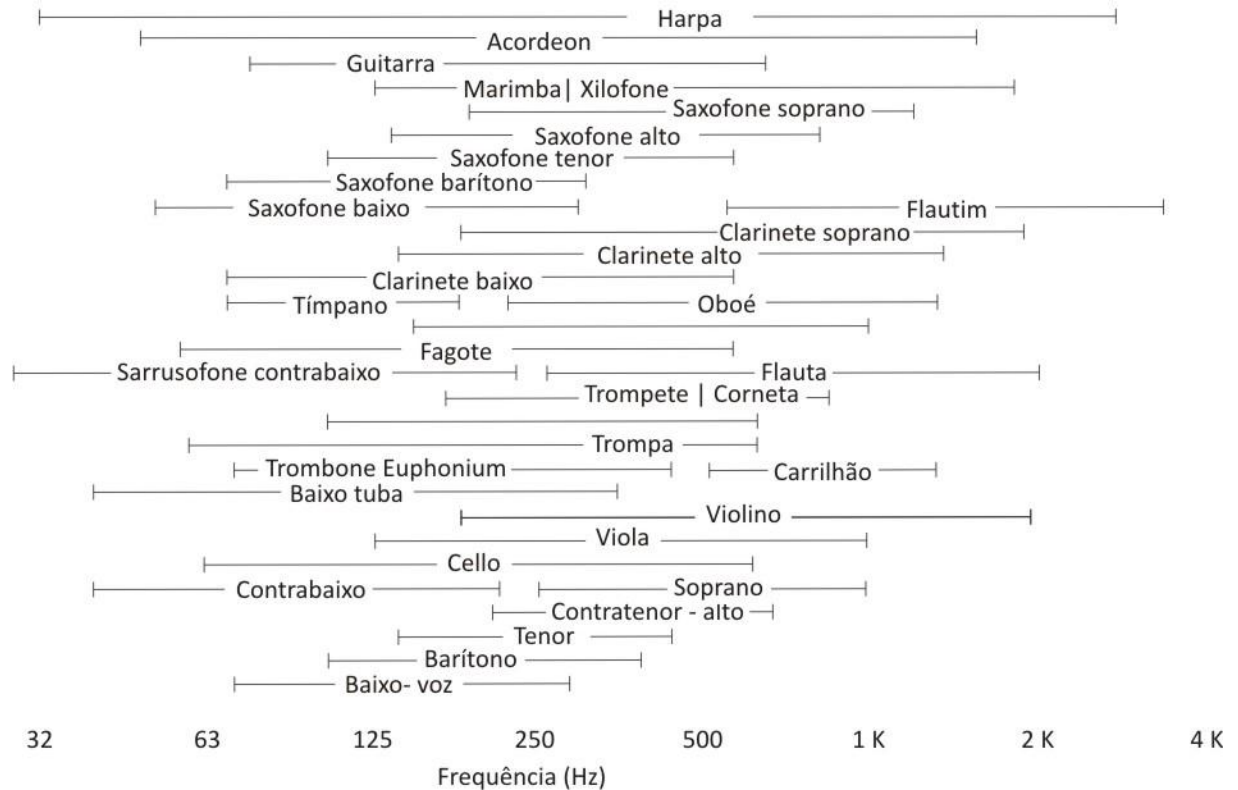


Figura 2.1- Faixa de frequência de vários instrumentos

Fonte: Long, 2006.

### 2.1.1 Breve histórico da acústica de salas

No final do século XIX e início do século XX, o físico Wallace C. Sabine (1868-1919) inicia os estudos na área da acústica de salas. Ao ser chamado para resolver o problema do *Fogg Art Museum Auditorium*, Sabine inicia uma série de experimentos em três auditórios da universidade de *Harvard* a fim de descobrir as razões por trás da dificuldade de compreensão da fala. O resultado de seu trabalho foi o desenvolvimento da teoria da absorção sonora dos materiais, sua relação com o decaimento da energia sonora nas salas, e a equação para o cálculo do tempo de reverberação.

De acordo com Neubauer (2001), desde a publicação dos resultados de Sabine, várias outras equações foram desenvolvidas para caracterizar a reverberação em recintos fechados, levando em consideração a distribuição não uniforme da absorção sonora. Neste sentido, merecem destaque as pesquisas de Eyring (1930), Arau (1988),

Millington (1932), entre outros. Além disso, diversos parâmetros vêm sendo estudados na tentativa de qualificar acusticamente ambientes fechados.

Bradley (2011) destaca que na década de 1850, Haas e Joseph Henry já reconheciam a importância das primeiras reflexões na percepção das características acústicas de uma sala. Posteriormente, Thiele e Reichardt propuseram métodos para mensurar a Clareza (C80) ou Definição (D50), tanto para música, quanto para fala. Além disso, Kürer propôs, em 1972, o *Centre time* (Ts), como um método alternativo para quantificar a clareza. Neste mesmo período, Atal (1965) propõe o tempo de decaimento inicial (EDT) como indicador da percepção da reverberação.

Ainda no fim da década de 1960, Villiers Keet mostrou a importância da correlação cruzada entre o sinal que chega às duas orelhas de um ouvinte na percepção do tamanho da fonte sonora, e, mais tarde, nas décadas de 1970 e 1980, Barron e Long demonstraram a importância das primeiras reflexões vindas das direções laterais. Estes estudos revelaram a importância da impressão espacial.

Barron, já no final da década de 1980, avalia a influência de vários aspectos sonoros em uma sala de concerto através de questionários com músicos experientes em salas de concerto britânicas. Recentemente, Beranek (2004) e Hidaka (2000) têm produzido uma série de publicações a respeito de suas medições num grande número de salas de concerto famosas, bem como entrevistas com experientes maestros e apreciadores de música. Estas publicações são muito relevantes e consistem na base bibliográfica da maioria dos estudos realizados em acústica de salas atualmente, contendo um conjunto de parâmetros que podem ser utilizados para avaliação da qualidade acústica de salas destinadas à música, os quais serão conceituados no decorrer deste capítulo.

## 2.1 Propagação sonora dentro de recintos fechados

Para uma fonte sonora em campo livre<sup>2</sup>, o nível de pressão sonora decai 6 dB a cada vez que a distância à fonte sonora é dobrada. Quando o som viaja a longas

---

<sup>2</sup> Ambiente onde não existem superfícies refletoras ou estas se encontram distantes o suficiente da fonte sonora de forma que exerçam efeito desprezível sobre a mesma.

distâncias em campo livre, este é influenciado pelo vento, temperatura e umidade. Entretanto, mesmo considerando a escala dos teatros gregos clássicos com distâncias típicas em torno de 50 m, não existe nenhuma evidência de que efeitos ambientais afetem significativamente a acústica (exceto quando o vento influencia na propagação do ruído de fundo, por exemplo), afirma Barron (2010).

Ainda que, eliminando os fatores ambientais, dentro de um recinto fechado a propagação sonora é afetada por outros fenômenos acústicos provocados pelas superfícies de contorno e pelos objetos que se encontram dentro de uma sala. Ao se chocar com um obstáculo parte da energia sonora é refletida e parte é absorvida, dependendo das características das superfícies que se encontram no recinto. Na figura 2.2 é apresentado um esquema explicativo da interação do som com as superfícies.

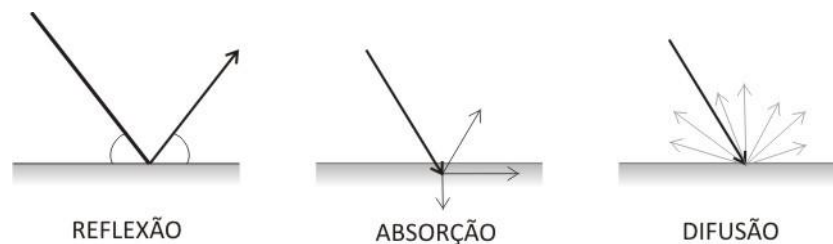


Figura 2.2 - Esquema representativo da interação do som com as superfícies.

Quando a superfície sobre a qual a onda sonora incide é rígida, lisa e com dimensões maiores que o comprimento da onda, ocorre principalmente a reflexão. Neste caso, parte da energia sonora volta ao ambiente. O ângulo de reflexão dependerá das dimensões da superfície e da onda sonora, da frequência, bem como do ângulo de incidência. Quando esta superfície é convexa, tende a dispersar os raios sonoros pelo ambiente, enquanto uma superfície côncava tende a focalizar os raios sonoros, como pode ser observado na figura 2.3. Entretanto, se o comprimento de onda do som é grande em relação ao tamanho do obstáculo, ocorrerá o fenômeno da difração, ou seja, as frentes de onda contornarão o obstáculo recombinando-se como se o mesmo não existisse.

A absorção acústica remove energia acústica do ambiente, por meio da dissipação em forma de calor. A quantidade de energia absorvida depende do tipo de material, sua

forma, espessura e método de montagem, como também do ângulo de incidência e da frequência da onda acústica incidente. A eficiência de absorção sonora da superfície envolvida é dada pelo coeficiente de absorção designado pela letra grega alfa,  $\alpha$ .

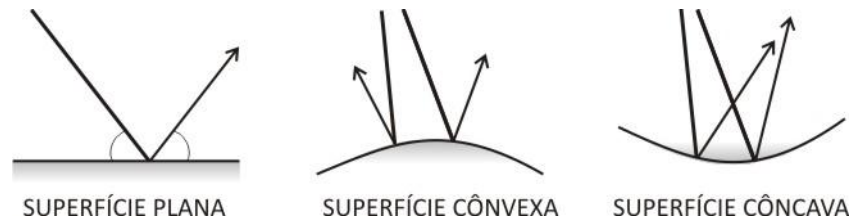


Figura 2.3 - Esquema explicativo do fenômeno da reflexão.

De acordo com Llinares *et al.* (1996), Barron (2010) e Cox e D'Antônio (2004), existem basicamente dois tipos de mecanismos de absorção, a saber, o resistivo (porosos e fibrosos) e o reativo (painéis e ressonadores). Os materiais porosos e fibrosos amortecem as ondas sonoras, por meio do atrito entre as moléculas de ar e os poros ou canais dos materiais. Nas membranas a transformação da energia acontece através da vibração da membrana. Qualquer painel fino absorverá alguma energia em baixas frequências, salienta Barron (2010). Os ressonadores são constituídos de recipientes fechados com determinado volume, tendo apenas uma pequena abertura como comunicação com o exterior. Quando existe uma pressão sonora na entrada do ressonador, a massa contida dentro deste sofre uma série sucessiva de contrações e dilatações, dissipando a energia acústica. Llinares *et al.* (1996) acrescenta que quanto mais próxima da frequência de ressonância do ressonador, ou membrana, estiver a frequência da onda incidente, melhor será a absorção do som pelo ressonador.

A terceira forma de interação dos som com as superfícies é a difusão, ou espalhamento. Ocorre quando a superfície na qual a onda sonora incide apresenta irregularidades. Qualquer superfície texturizada promove alguma difusão, porém quanto maior o grau de texturização mais eficiente será o espalhamento. O princípio geral, de acordo com Barron (2010), é que quanto mais profundas as irregularidades do material de tratamento, mais baixas serão as frequências das ondas sonoras que

sofrerão difusão. Para cobrir a maior parte da faixa de frequência audível são necessárias projeções com profundidades entre 0,30 e 0,60 m.

### 2.1.1 Som direto, primeiras reflexões e som reverberante

Barron (2004) afirma que o som dentro de uma sala pode ser dividido, no âmbito da acústica de salas em: som direto, primeiras reflexões e som reverberante, como pode ser observado na figura 2.4, que representa um esquema da resposta impulsiva acústica de uma sala. O primeiro som que o ouvinte percebe é o som direto, que viaja em linha reta a partir da fonte. Este é seguido por uma série de reflexões provenientes das superfícies da sala (paredes, piso, teto). Para Beranek (1996) são consideradas, primeiras reflexões, em relação aos sons musicais, aquelas que chegam ao ouvinte até os primeiros 80 ms após a chegada do som direto. O som reverberante é composto pelas reflexões que ocorrem subseqüentemente.

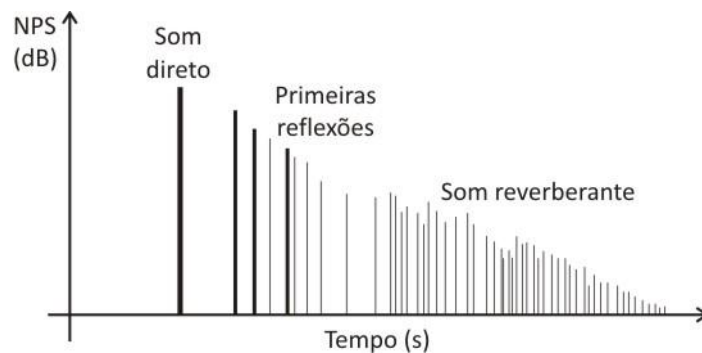


Figura 2.4 - Som direto, primeiras reflexões e som reverberante.

Fonte: Barron (2010)

## 2.2 Métodos para estudo do condicionamento acústico

A frequência do som e sua relação com as dimensões da sala que se pretende analisar são de fundamental importância para o estudo do condicionamento acústico.

Ballou (1988) apresenta a divisão do espectro sonoro audível em quatro partes, ilustradas na figura 2.5. Para cada região apresentada é possível associar uma ou mais teorias, das três existentes em acústicas de salas, a saber: acústica ondulatória (teoria de ondas), acústica estatística (teoria estatística) e acústica geométrica (teoria de raios).

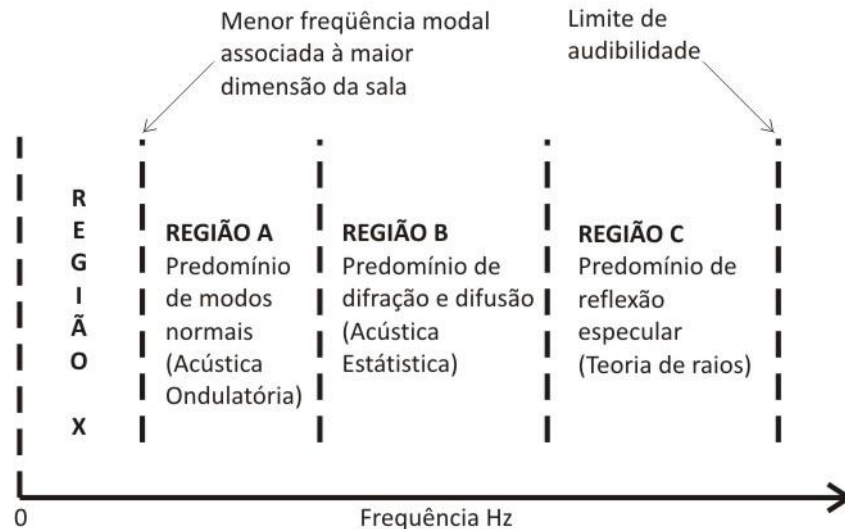


Figura 2.5 - Espectro audível dividido em quatro regiões.

Fonte: Traduzido de Ballou (1988, pg. 43)

De acordo com Long (2006), o ponto de transição entre a região A, onde predominam os modos normais das salas, e a região B, onde há o predomínio da difusão, é chamado Frequência de Schröder, ou frequência de corte da sala, e pode ser definida através da equação:

$$f_s = 2000 \sqrt{T/V} \quad (1)$$

onde  $V$  é o volume da sala em  $m^3$ , e  $T$  é o tempo de reverberação, em s. Abaixo da frequência de Schröder deve-se trabalhar com a acústica ondulatória, e acima desta com a acústica estatística e geométrica.

### 2.2.1 Acústica ondulatória

Da teoria de vibrações se sabe que todo elemento é suscetível à vibração. Ao retirá-lo de seu estado de equilíbrio e deixá-lo livre, este vibra sempre em determinadas formas que correspondem ao que se denominam modos naturais de vibração. Ao se tocar uma corda de violão, por exemplo, separando-a de seu estado de equilíbrio, esta passará a vibrar sempre de acordo com seus modos próprios, determinados pela sua geometria e suas condições de fixação.

O mesmo ocorre com as salas ou recintos que atuam como canal de transmissão do campo acústico. Os modos próprios de vibração de um recinto estão associados às frequências próprias de vibração deste, as quais dependem da geometria, dimensões e das características das suas superfícies de contorno, além da velocidade do som no ambiente.

Llinares *et al.* (1996) acrescenta ainda que a acústica ondulatória se baseia na resolução da equação diferencial da onda acústica em cada sala, que leva em consideração as dimensões dos recintos. A resolução desta equação demonstra que cada região de uma sala representa um sistema capaz de vibrar nas suas três dimensões.

A resolução da equação da onda pode se tornar bastante complexa, de acordo com as condições geométricas de cada sala. Por isto este método é utilizado como base teórica para a resolução de problemas concretos, em situações onde os fenômenos são explicados somente através da consideração do caráter ondulatório do som.

### 2.2.2 Acústica estatística

Quando uma fonte começa a irradiar energia sonora dentro de um espaço fechado, as ondas acústicas propagam-se livremente até encontrar as superfícies de contorno do recinto. Quando isto acontece, as ondas são refletidas pelas superfícies repetidas vezes e a energia sonora, dentro do recinto, aumentaria indefinidamente, não fosse a capacidade de absorção sonora do meio, das superfícies e de objetos dentro do ambiente.

No momento em que o recinto, como um todo, absorve a mesma quantidade de energia por unidade de tempo que a fonte emite, a energia sonora dentro da sala permanece estacionária e a densidade de energia média dentro da mesma permanece constante.

Quando a emissão da fonte sonora é interrompida, a energia acumulada dentro da sala não desaparece imediatamente, mas é absorvida pela sala durante certo intervalo de tempo, tornando-se, em certo momento, inaudível. Este fenômeno, que consiste na permanência do som dentro de um recinto após a interrupção da fonte, se chama reverberação.

A figura 2.6 apresenta a variação da densidade de energia sonora ( $\rho_E$ ) em função do tempo, em um ambiente fechado. É possível observar que num primeiro momento a densidade de energia sonora cresce contínua e gradualmente até que as energias emitidas e absorvidas se equivalem, e a densidade de energia sonora se mantém constante. Ao ser interrompida a emissão da fonte a densidade de energia decai novamente de forma gradual e contínua.

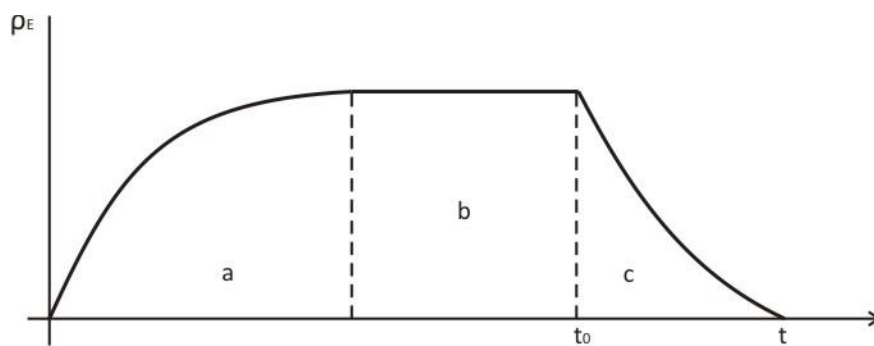


Figura 2.6 - Variação da densidade de energia com o tempo.

Fonte: Llinares et. al. (1996, pág. 191)

Para estudar o fenômeno da reverberação não é suficiente analisar o caminho individual de cada raio acústico ou o comportamento de cada uma das infinitas ondas sonoras presentes dentro de determinada sala. É conveniente então, avaliar estatisticamente o comportamento da energia acústica em seu conjunto.



Os princípios da teoria estatística em acústica se assemelham aos da teoria cinética dos gases, a qual estabelece que todas as partículas são idênticas em tamanho e energia. Assim, considera-se que a distribuição das velocidades se dá de forma que a probabilidade das partículas sonoras, no caso da acústica, terem qualquer direção é a mesma, conferindo total incoerência ao seu conjunto, sendo possível somar estas energias sem levar em consideração diferenças de fase, de acordo com Llinares *et al.* (1996).

### 2.2.3 Acústica geométrica

O método geométrico para acústica é fundamentado no conceito de raio sonoro, o qual é análogo ao conceito de raio luminoso utilizado pela óptica geométrica. Assim, como explica Llinares *et al.* (1996), a acústica geométrica considera o raio sonoro como uma porção de energia acústica propagando-se em uma linha reta. Se considerada uma fonte sonora omnidirecional, por exemplo, todos os raios partem em todas as direções contendo a mesma quantidade de energia.

Este método se restringe ao estudo da propagação retilínea e da reflexão especular, portanto, sua aplicação está restrita aos seguintes casos:

- a) o comprimento da onda sonora deve ser inferior às dimensões da sala e dos objetos existentes nesta, bem como maior do que as dimensões do relevo das superfícies, caso contrário podem ocorrer fenômenos de difração e difusão, respectivamente, alterando a trajetória do raio; e,
- b) a diferença de impedância do ar e dos fechamentos deve ser grande para que predomine o fenômeno de reflexão.

## 2.3 Critérios, objetivos e subjetivos, para avaliação da acústica de uma sala

Desde seu trabalho na área de acústica de salas em 1962, Beranek vem investigando um conjunto de critérios com o objetivo de qualificar acusticamente salas destinadas à música. Em seu livro *Concert and Opera Halls, how they sound* de 1996, ele

esclarece sobre as dificuldades de comunicação entre os envolvidos no universo da audição musical, explicando que música e acústica cresceram independentes uma da outra e, por isso, desenvolveram vocabulários diferentes para descrever vários conceitos.

A função básica de um crítico, seja ele músico ou apreciador, é descrever suas impressões a respeito da composição ou performance musical. Tal descrição é realizada por meio de uma linguagem subjetiva. Beranek, através de entrevistas com experientes instrumentistas, maestros e arquitetos, procurou associar os termos ligados à impressão subjetiva a conceitos acústicos passíveis de quantificação acústica de salas. Desta forma, estabeleceu uma extensa família de parâmetros, descritos nos itens seguintes, que apesar de continuarem sofrendo modificações e ponderações, são fundamentais para avaliação da qualidade acústica de salas até os dias atuais.

### 2.3.1 Critérios de qualidade

#### 2.3.1.1 Tempo de reverberação (*reverberation time*)

A partir dos estudos de Sabine, o tempo de reverberação (RT) é definido como o tempo, em segundos, para que o nível de pressão sonora em um ambiente decaia 60 dB, após a interrupção da fonte. O RT varia em função do volume do recinto e do grau de absorção das superfícies em seu interior expostas ao som. Sabine desenvolveu uma equação considerando estes fatores, dada por:

$$T = 0,161 \frac{V}{A + 4\mu V} \text{ s} \quad (2)$$

sendo

$$A = \sum \alpha_i S_i$$

onde,

$V$ : volume do recinto,  $m^3$ ;  
 $\alpha_i$ : coeficiente de absorção do  $i$ -ésimo material, dado para cada banda de oitava;  
 $S_i$ : área, em  $m^2$ , da superfície coberta por cada material;  
 $\mu$ : coeficiente de absorção do ar (em função da umidade relativa e da frequência do som absorvido),  $1/m$ .

A equação de Sabine é amplamente utilizada até os dias atuais, e funciona muito bem para ambientes reverberantes com formas regulares, porém resulta em valores mais elevados de tempo de reverberação do que as demais equações desenvolvidas para este fim. Neste sentido, a equação de Eyring (equação 2.3) apresenta resultados mais precisos para recintos menos reverberantes, com altos coeficientes de absorção ( $\alpha$ ), considerando qualquer tipo de sala com distribuição regular e uniforme de materiais:

$$RT = 0,161 \frac{V}{4\mu V - S_{total} \ln(1 - \bar{\alpha})} \text{ s} \quad (3)$$

sendo:

$$S_{total} = \sum_{i=1}^n S_i$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i S_i}{S_{total}}$$

onde:

$V$ : volume do recinto,  $m^3$ ;  
 $\alpha_i$ : coeficiente de absorção sonora de cada material dado para cada banda de oitava;  
 $\bar{\alpha}$ : coeficiente de absorção sonora médio dos materiais;  
 $S_{total}$ : área total das superfícies revestidas de todos os materiais, em  $m^2$ ;  
 $S_i$ : área da superfície coberta por cada material, em  $m^2$ ;  
 $\mu$ : coeficiente de absorção do ar (em função da umidade relativa e da frequência do som absorvido).

Experimentalmente, o tempo de reverberação, assim como os demais parâmetros para avaliação da qualidade acústica de salas, pode ser obtido através da resposta impulsiva da sala. Iazzetta et al. (2004) explicam que, a partir da resposta impulsiva, Schröder desenvolveu um método (integração do quadrado da resposta impulsiva) capaz de otimizar o processo de obtenção dos tempos de reverberação de recintos através da curva de decaimento da energia em função do tempo, conhecida como curva de Schröder. Este método consta na norma ISO 3382, a qual é utilizada para determinar os procedimentos de medição envolvendo a qualidade acústica de recintos fechados. Para efeitos da norma, o RT (ou  $T_{60}$ ) é calculado por regressão quadrática linear da curva de decaimento medida a partir dos 5 dB até 35 dB abaixo do nível de pressão sonora inicial.

É possível considerar então, segundo as determinações da ISO 3382:2009, o tempo de reverberação através da extrapolação da curva de decaimento dos 30 dB (5 a 35 dB) ou 20 dB (5 a 25 dB, excepcionalmente) abaixo do nível de pressão sonora inicial, porém estes parâmetros devem ser devidamente nomeados como  $T_{30}$  e  $T_{20}$ , respectivamente.

O TR pode ser apresentado por banda de oitava, mas é mais freqüente na bibliografia encontrar valores somente para a banda de 500 Hz ou para o resultado da média aritmética dos tempos de reverberação nas freqüências de 500 e 1.000 Hz.

Como síntese de seus estudos em diversas salas de concerto pelo mundo, Beranek (1996) define o tempo de reverberação ideal para música variando de 1,4 a 2,0 s, para a faixa de freqüência de 500 a 1.000 Hz. Porém, cabe ressaltar que os experimentos de Beranek foram realizados em salas de concerto com volumes muito maiores do que o que comumente se encontra para salas de prática e ensino musical. Além disso, as salas de concerto são destinadas à apresentação e audição, e não ao estudo.

Quanto aos tempos de reverberação considerados adequados para salas pequenas dedicadas à prática e ensino musical, algumas pesquisas (Lamberty, 1980; Lane, 1955; BB93, 1993; entre outros) podem ser destacadas. Rocha (2010) sintetizou os valores de RT indicados por diversos pesquisadores que são apresentados na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Comparativo entre tempos de reverberação médios considerados adequados para salas de prática e ensino musical.

<b>Pesquisador</b>	<b>Prática/ensaio conjunto</b>	<b>Prática/ensaio individual</b>	<b>Ensino (teoria musical)</b>
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: Rocha (2010)

### 2.3.1.2 Tempo de decaimento inicial (EDT)

O tempo de decaimento inicial (EDT) é o tempo, em segundos, para que a energia sonora decaia 10 dB. Segundo Beranek (1996), é medido da mesma forma que o RT, porém para que o EDT possa ser comparado com o RT é necessário a multiplicação deste valor por um fator de 6. Deve-se tomar cuidado para não confundir o *early decay time* (EDT) com o *early sound* (primeiras reflexões).

A norma ISO 3382 (1997, pg. 14) assinala que o EDT é subjetivamente mais importante que o RT, pois está relacionado com a percepção da reverberação, enquanto o RT está relacionado às propriedades físicas da sala. Bradley (2011) afirma que este parâmetro é apropriado para analisar as diferenças de percepção entre diversas posições dentro de um recinto, porém deve-se tomar cuidado com posições muito próximas à fonte, pois perto desta, a energia sonora inicial decai abruptamente antes de iniciar um decaimento mais gradual.

### 2.3.1.3 Vivacidade (TR)

A vivacidade (*liveness*), segundo Beranek (1996), está relacionada ao tempo de reverberação em médias e altas frequências, acima de 350 Hz. Uma sala reverberante é

chamada “viva” enquanto uma sala com pouca reverberação é chamada “morta” ou “seca”.

Em seus estudos mais recentes, Beranek (2004 apud MANNIS, 2008, pg. 122) atribui a vivacidade aos tempos de reverberação na faixa de frequência de 350 e 1.400 Hz, tidas como bandas de frequências médias, mas mantém a referência de TR com a média aritmética dos tempos de reverberação nas bandas de 500 e 1000 Hz. Acrescenta ainda que uma sala é considerada seca ou morta quando o tempo de reverberação é inferior a 1,6 segundos. Acima deste valor, as salas passam a ser consideradas vivas.

#### 2.3.1.4 Calor e Razão de Graves (BR)

O calor (*warmth*) é um parâmetro subjetivo relacionado à percepção do tempo de reverberação das baixas frequências. Pode ser definido ainda como vivacidade dos graves ou reforço de graves. Segundo Beranek (1996), um TR nas baixas frequências muito longo ou muito curto comparado com um TR nas médias frequências pode afetar consideravelmente a percepção dos músicos.

Beranek (1996) acrescenta ainda que o parâmetro subjetivo calor pode ser avaliado através do parâmetro objetivo razão de graves (BR), dado pela equação 2.4:

$$BR = \frac{RT_{125} + RT_{250}}{RT_{500} + RT_{1000}} \quad (4)$$

O autor ainda considera valores ótimos de BR para salas reverberantes (com RT superiores a 1,8 s) em torno de 1,1 e 1,25; e 1,1 a 1,45 para salas com RT iguais ou inferiores a 1,8 s.

### 2.3.1.5 Brilho (Br)

Segundo Beranek (2004), um som claro, vibrante e rico em harmônicos, é chamado brilhante. O som brilhante de uma sala deriva da proeminência dos harmônicos superiores e do baixo decaimento para estas frequências. É afetado pelo intervalo entre a chegada do som direto e as primeiras reflexões, e também está relacionado com a rapidez da chegada da porção significativa da energia nas primeiras frações de segundo (clareza).

O Brilho (Br) pode ser quantificado através da razão entre tempos de reverberação nas médias (500 e 1.000 Hz) e nas altas frequências (2.000 e 4.000 Hz), dada pela equação 2.5. Beranek (1996) afirma que, para preservar o brilho em uma sala, o Br não pode estar abaixo de 0,70.

$$Br = \frac{RT_{2000} + RT_{4000}}{RT_{500} + RT_{1000}} \quad (5)$$

## 2.3.2 Critérios de energia

### 2.3.2.1 Definição (D<sub>50</sub>) e Clareza (C<sub>80</sub>)

Segundo Beranek (1996), quando um músico fala em Definição (*Definition*) ou Clareza (*Clarity*), está falando a respeito do grau de distinção entre um som e outro em uma performance musical. Figueiredo (2005) esclarece que quando uma sala apresenta um bom grau de clareza, a música tocada nela soa bem definida, com articulações sonoras límpidas e precisas, independentemente do andamento. Caso contrário, o som se apresenta confuso e indefinido, principalmente em passagens mais rápidas.

A Clareza (C<sub>80</sub>) é definida pela razão logarítmica, entre a energia inicial (0 a 80 ms) e a energia final (reverberante) do som (80 a 3.000 ms), enquanto o fator de

Definição ( $D_{50}$ ), habitualmente aplicado para avaliar salas dedicadas à palavra falada, é a razão linear entre a energia que chega nos primeiros 50 ms e a energia total:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{3.000} p^2(t) dt} \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{3.000} p^2(t) dt} \quad 100\% \quad (7)$$

Em uma sala seca o  $C_{80}$  e o  $D_{50}$  serão maiores do que numa sala reverberante, pois nesta, o decaimento da energia sonora é mais lento e, portanto, mais energia estará concentrada na parte final de cada som, diminuindo a razão entre energia inicial e final.

Em seus estudos, Beranek (1996) utiliza um valor médio de  $C_{80}$  para as bandas de frequências de 500 Hz, 1.000 Hz e 2.000 Hz para comparar os resultados de forma mais sensível, denominado  $C_{80}(3)$ . Ele comenta que diferentes valores podem ser preferidos para diferentes situações. Um maestro durante um ensaio, por exemplo, prefere salas com  $C_{80}(3)$  entre +1 e +5 dB, entretanto em uma situação de apresentação, com audiência, o mesmo maestro geralmente prefere uma sala mais reverberante, com  $C_{80}(3)$  entre -1 e -4 dB.

### 2.3.2.2 Tempo Central ( $T_s$ )

O Tempo Central (*Centre Time*), dado em milisegundos, é definido segundo Barron (2010) como o centro de gravidade ao longo do eixo do tempo do quadrado da resposta impulsiva. É uma grandeza alternativa para quantificar a clareza de uma sala. Pisani (2001, apud MANNIS, 2008, pg. 132) indica valores de referência para  $T_s$  entre 0 e 50 ms para fala e entre 50 e 250 ms para a música.



$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad [\text{ms}] \quad (8)$$

### 2.3.2.3 Fator de Força (*Strength*)

Um importante fator na avaliação da qualidade acústica de salas é a influência da sala no *loudness*<sup>3</sup> percebido. O parâmetro G está relacionado a esta sensação. Ele pode ser mensurado a partir da diferença em dB entre o nível de pressão sonora de uma fonte calibrada medida em uma sala e o nível de pressão sonora que esta mesma fonte gera a uma distancia de 10 m em um ambiente anecóico<sup>4</sup>.

De acordo com a teoria de campo difuso, o valor de G torna-se uma função do tempo de reverberação e do volume da sala, de acordo com a equação 2.9.

$$G = 10 \log \left( \frac{T}{V} \right) + 45 \text{ dB} \quad [\text{dB}] \quad (9)$$

Beranek (1996) e Everest e Pohlmann (2009) afirmam que em salas com uma boa qualidade acústica os valores de G (nas frequências médias de 500 e 1.000 Hz) variam entre 4,0 e 5,5 dB, entretanto, em salas com diferentes usos, esta faixa pode ter uma variação maior. Gade (2007) indica valores de 3 e 10 dB para salas dedicadas à música de câmara e concertos, respectivamente.

---

<sup>3</sup> Sensação de volume sonoro provocada por um evento sonoro (PAUL, 2009)

<sup>4</sup> Ambiente onde não há reflexões, campo livre ou câmara anecóica.

### 2.3.3 Critérios de palco

#### 2.3.3.1 *Early support* ( $ST_{\text{early}}$ ) e *Late support* ( $ST_{\text{late}}$ )

Gade (2007) salienta que, em uma sala utilizada para performance musical, é de fundamental importância considerar a situação acústica proporcionada aos músicos. Pois quanto melhores forem suas condições de trabalho, melhor também será o fruto deste.

O parâmetro objetivo melhor relacionado às questões de percepção de conjunto e palco é o *Early support* ( $ST_{\text{early}}$ ). O  $ST_{\text{early}}$  é calculado a partir da razão entre as primeiras reflexões e o som direto da resposta impulsiva registrada no palco com uma distância de um metro entre fonte e receptor (equação 2.10). Este parâmetro se refere à energia emitida pelo músico e à energia que ele recebe como retorno.

Subjetivamente o  $ST_{\text{early}}$  está associado a como o músico é capaz de ouvir a si mesmo e a seus colegas e tocar junto com eles, mantendo precisão rítmica e tonal, bem como o equilíbrio entre os vários instrumentos. Gade (2007) acrescenta ainda que o *Support* relaciona-se ao grau em que uma sala suporta os esforços do músico para gerar o tom de seu instrumento, isto é, se ele tem facilidade para tocar ou se tem que forçar o instrumento para preencher acusticamente o ambiente. Esta dificuldade em tocar o instrumento pode fatigar o músico rapidamente e acarretar uma perda na qualidade sonora.

$$ST_{\text{early}} = 10 \log \frac{\int_{20 \text{ ms}}^{100 \text{ ms}} p_{1m}^2(t) dt}{\int_{0 \text{ ms}}^{t_{\text{dir}}} p_{1m}^2(t) dt} \quad [\text{dB}] \quad (10)$$

O cálculo do  $ST_{\text{early}}$  considera somente as primeiras reflexões, porém para muitos tipos de instrumentos (principalmente de cordas), as primeiras reflexões são mascaradas pelo som direto vindo do próprio instrumento. Assim, é relevante

considerar a resposta tardia da sala, após 100 ms, como pode ser observado na equação 2.11 (GADE, 2007).

O  $ST_{early}$  e o  $ST_{late}$  são normalmente medidos para a média das quatro bandas de oitava: 250, 500 1.000 e 2.000 Hz. Gade (2007) indica valores para o  $ST_{early}$  em torno de -10 a -14 dB, enquanto Beranek (2004) indica valores ideais entre -12 e -14,4 dB.

$$ST_{late} = 10 \log \frac{\int_{100 \text{ ms}}^{1000 \text{ ms}} p_{1m}^2(t) dt}{\int_{0 \text{ ms}}^{t_{dir}} p_{1m}^2(t) dt} \quad [\text{dB}] \quad (11)$$

Apesar desta pesquisa estar focada em salas de estudo e prática musical, é importante destacar o parâmetro  $ST_{early}$ , pois as condições acústicas do palco de uma sala de concertos podem ser muito semelhantes às de uma sala de estudo. A situação músico-instrumento à qual este parâmetro está relacionado pode ser bastante importante como meio de análise da qualidade acústica de salas pequenas para prática musical, onde fonte e receptor estão muito próximos.

### 2.3.4 Critério de inteligibilidade da fala

#### 2.3.4.1 Índice de transmissão da fala (STI)

O STI (*Speech Transmission Index*) é amplamente utilizado como parâmetro de avaliação acústica de salas onde é indispensável a compreensão de informações transmitidas de forma oral (escolas, universidades, auditórios, etc.). Este parâmetro leva em consideração o tempo de reverberação, os ecos e o ruído de fundo das salas, os quais são os principais fatores que afetam a inteligibilidade. Consiste em um simples índice onde 0 indica uma péssima inteligibilidade e 1 uma inteligibilidade excelente.

Müller (2005) ressalta que o STI é muito prático e um bom primeiro indicador dos problemas que comprometem o entendimento, porém não pode ser considerado

como uma solução para todos os problemas de inteligibilidade da fala. A tabela 2.2 apresenta a avaliação do STI para cada faixa de valores, segundo a norma IEC 60268 -16.

Tabela 2.2 - Valores de STI de acordo com a norma IEC 60268-16.

Valor do STI	Avaliação segundo a IEC 60268-16
0,75 – 1,00	Excelente
0,60 – 0,75	Bom
0,45 – 0,60	Adequado
0,30 – 0,45	Fraco
0 – 0,30	Péssimo

Fonte: Müller, 2005.

## 2.4 Medição da resposta impulsiva

Kuttruff (2000) afirma que, de acordo com a teoria de sistemas, todas as propriedades de um sistema linear de transmissão estão contidas na sua resposta impulsiva ou, alternativamente, em sua função de transferência, que é a transformada de Fourier da resposta impulsiva. Uma vez que uma sala é considerada um sistema de transmissão acústica, a resposta impulsiva proporciona uma descrição completa das mudanças sofridas por um sinal quando ele viaja de um ponto a outro de uma sala.

Todos os parâmetros definidos pela norma ISO 3382 para avaliação da qualidade acústica de salas são derivados diretamente da resposta impulsiva acústica. Vörländer (1994 apud MASIERO et al., 2004) explica que esta é uma função temporal da pressão sonora de um espaço acústico, que resulta da excitação desse espaço por uma função que se aproxima da função delta de Dirac.

Segundo Masiero et al. (2004), o impulso de excitação da sala pode ser gerado de forma analógica (disparo de arma de fogo, por exemplo) ou digital, entretanto, o primeiro caso apresenta baixa repetibilidade e reduzida relação sinal-ruído (SNR). Masiero et al. (2004) acrescentam que atualmente, com o desenvolvimento da tecnologia e maior velocidade de processamento dos computadores, existe uma tendência a se utilizar varreduras logarítmicas (*sweep*) como sinal de excitação. Os

*sweep* apresentam boa distribuição de energia em seu espectro para aplicações acústicas e são bastante resistentes a não-linearidades. Assim é possível diminuir a influência do ruído de fundo com a simples emissão periódica do sinal, desde que se tome o cuidado para que o comprimento do *sweep*, bem como o intervalo de tempo entre um e outro, sejam maiores do que o tempo de reverberação estimado da sala.

#### 2.4.1 Parâmetros importantes na medição da resposta impulsiva

A qualidade da medição pode ser avaliada segundo dois parâmetros que relacionam o nível de pressão sonora do ruído de fundo e o nível de pressão sonora da resposta impulsiva, os quais estão descritos nos itens a seguir.

##### 2.4.1.1 Razão Impulso-Ruído (INR)

De acordo com o manual do software Dirac (DIRAC, 2008), o INR é definido como a razão logarítmica do nível de pressão sonora máximo da resposta impulso e o nível de pressão sonora do ruído de fundo, e reflete na curva de decaimento. É utilizado geralmente como um parâmetro de avaliação da qualidade da medição. De acordo com a ISO 3382<sup>5</sup>, o INR deve estar entre 35 dB e 45 dB para uma determinação precisa do T20 ou T30, respectivamente. Para medições consideradas boas, normalmente estes valores ficam numa faixa de 35 a 60 dB.

##### 2.4.1.2 Relação Sinal- Ruído (SNR)

A relação sinal-ruído, SNR, é definida como a razão logarítmica do nível de pressão sonora do sinal e o nível de pressão sonora do ruído de fundo. O software *Dirac*

---

<sup>5</sup> O INR não está nomeado desta forma na norma ISO 3382, a norma somente comenta os valores da diferença entre os níveis de pressão sonora do sinal de excitação e do ruído de fundo que devem ser mantidos para que os resultados obtidos sejam válidos.

usa a SNR para determinar a inteligibilidade da fala em salas acusticamente inadequadas para este uso ou com alto ruído de fundo. Os valores adequados para a SNR estão na faixa de 10 a 40 dB.

#### 2.4.2 Diferença no limite do observável (*Just Noticeable Difference*)

Vários testes têm mostrado até que ponto a audição humana pode distinguir situações acústicas diferentes, segundo informa Vorländer (2008). Como em outras áreas da psicoacústica, o JND (*just noticeable difference*) fornece informações importantes a respeito da impressão subjetiva dos parâmetros para avaliação da qualidade acústica.

O JND é, basicamente, o valor a partir do qual dois dados podem ser comparados; se a diferença entre estes valores é menor do que o valor do JND para determinado parâmetro, então é possível considerá-lo subjetivamente imperceptível. A norma ISO 3382 fornece uma tabela com os valores de JND para alguns parâmetros subjetivos.

Este dado é bastante útil na comparação entre valores medidos experimentalmente e simulados, podendo servir como base para determinar a precisão de determinado modelo geométrico (CHRISTENSEN, 2009).

Tabela 2.3 - Valores para parâmetros acústicos de acordo com a percepção do ouvinte.

Aspecto subjetivo	Parâmetro objetivo	Frequências médias (Hz)	JND*
Reverberação	$T_{30}$	500 a 1.000	5%
Percepção da reverberação	$EDT$	500 a 1.000	5%
Clareza	$C_{80}$	500 a 1.000	1 dB
Definição	$D_{50}$	500 a 1.000	0,05
Tempo Central	$T_s$	500 a 1.000	10 ms
Percepção do loudness	$G$	500 a 1.000	1 dB
Support	$ST_{early}$	250 a 2.000	1 dB

## 2.5 Simulação computacional da acústica de salas

A simulação computacional acústica permite prever e auralizar<sup>6</sup> o comportamento do som dentro de um determinado recinto através da inserção de dados referentes às características geométricas e de materiais deste, bem como do posicionamento de fontes e receptores dentro do modelo. Vários parâmetros podem ser obtidos e modificações nas superfícies podem ser realizadas sem grande esforço e razoavelmente rápido. Os programas de simulação computacional de acústica são baseados normalmente na acústica geométrica, utilizando os chamados métodos híbridos, que são uma combinação das potencialidades de um ou mais métodos distintos (traçado de raios e imagem das fontes virtuais, por exemplo).

A simulação acústica é uma ferramenta fascinante e abre inúmeras possibilidades para o estudo da acústica de salas, e apesar dos *softwares* disponíveis apresentarem interfaces relativamente simples, é importante ressaltar que a complexidade desta técnica se encontra na correta inserção dos dados numéricos que permitem a simulação, tanto em relação às geometrias e materiais quanto no que diz respeito aos algoritmos de cálculo.

A modelagem acústica foi proposta durante a década de 1960 por Schroeder et al. (1962) e colocada em prática por Krokstad et al. (1968) e Schroeder (1973), conforme afirma Vorländer (2008). Os modelos em escala são muito pouco utilizados atualmente, visto que a simulação computacional acústica vem ganhando mercado, pois os softwares comerciais, cada vez mais, possuem interfaces amigáveis e maior precisão nos resultados. Além disso, apesar de inicialmente o custo de um *software* ser mais elevado do que um modelo em escala, a possibilidade de se realizar em inúmeras modelagens em um *software* torna-o mais viável e com melhor relação custo-benefício.

Nos últimos anos, muitas pesquisas vêm sendo realizadas (VÖRLÄNDER, 1998; RINDEL, 2000; BRADLEY, 2007; MELO, 2007; WANG, 2008; etc.), a fim de verificar a confiabilidade dos programas de simulação acústica e aprimorar os métodos híbridos para o cálculo de parâmetros utilizados na avaliação da qualidade acústica de salas. Os resultados têm mostrado que esta ferramenta é bastante confiável para diversos modelos e dimensões de salas.

---

<sup>6</sup> Auralização é o termo utilizado para designar as técnicas que possibilitam tornar a representação numérica de um campo acústico audível através de operações de processamento de sinais.

Em 1995, Vörlander (1995) organizou um *round robin*<sup>7</sup> onde 14 diferentes programas computacionais de simulação acústica foram testados para um mesmo auditório. Entre os três programas que obtiveram melhores resultados, estava o *Odeon*, *software* utilizado para realização desta pesquisa. Recentemente, o grupo da acústica de salas e edificações da Sociedade Dinamarquesa da Acústica (CHRISTENSEN, 2008) tem realizado *round robins* entre os usuários do *software Odeon*. Os resultados têm demonstrado a tendência de se cometerem erros, em modelos geométricos bastante detalhados, devido à aplicação de materiais com coeficientes de absorção sonora inadequados, salientada também nos trabalhos de Astolfi et. al. (2008) e Bradley (2007).

---

<sup>7</sup> Teste de comparação onde um participante enfrenta todos os outros participantes o mesmo número de vezes.





### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. Para caracterizar o comportamento acústico das salas de aula destinadas ao ensino e prática musical do curso de música da UFSM, foram executadas três etapas de trabalho de pesquisa. Em um primeiro momento foi realizado um levantamento das características geométricas e arquitetônicas das salas de aula, e em conjunto, uma aplicação de questionários aos alunos e professores do curso de Música que permitiram conhecer suas preferências acústicas das salas. Uma segunda etapa do trabalho consistiu em avaliar experimentalmente o comportamento acústico das salas de aula. Para tal, são apresentados os procedimentos adotados conforme as disposições da norma ISO 3382:2009. Finalmente, na terceira etapa são descritas as ferramentas da simulação computacional usadas para modelar as salas e para prever resultados virtuais do comportamento acústico no interior destes ambientes.

#### 3.1 Descrição do edifício do curso de Música da UFSM

O curso de Música da UFSM faz parte do Centro de Artes e Letras – CAL e está localizado na cidade universitária, no prédio 40. O edifício está voltado para a Av. Roraima, via que dá acesso à universidade, e próximo à Reitoria (ver figura 3.1, a e b).

O edifício do CAL tem planta baixa em configuração linear no sentido norte-sul com as salas distribuídas ao longo de um corredor central, dispostas no sentido leste-oeste. A estrutura é em concreto armado com vedação de paredes simples de tijolos furados. As aberturas, em fita, são de vidro simples com esquadrias metálicas. As vinte salas do curso de Música estão distribuídas principalmente no primeiro e no terceiro andar, tendo no segundo, somente salas administrativas e de professores.



Figura 3.1 - Vista externa do edifício do CAL da UFSM.

### 3.1.1 Salas para prática e ensino musical

As salas para prática e ensino musical, disponibilizadas pelo curso de Música, são caracterizadas por duas tipologias básicas, a saber:

- a) Salas de estudo (figura 3.3, a): utilizadas para prática/estudo individual ou em pequenos grupos de dois a três alunos e para aulas de instrumento ministradas por um professor mais um aluno. São salas consideradas pequenas, com volume entre 60 e 80 m<sup>3</sup>. No total existem quinze salas desta tipologia no edifício do CAL;
- b) Salas de aula coletiva (figura 3.3, b): são salas com volume variando de 160 a 330 m<sup>3</sup>, tem como característica a multifuncionalidade, sendo utilizadas tanto para aulas coletivas quanto para prática individual ou de pequenos grupos, além de receber audições e apresentações para público externo. Existem cinco salas deste tipo disponíveis para o curso de Música no CAL.

As salas têm formato retangular, em formato de caixa, com todas as superfícies paralelas. A largura das peças (aqui determinada como a dimensão correspondente ao sentido corredor-fachada) é sempre fixa em 6,2 metros, assim como o pé-direito (piso até a laje) de 3,75 metros também é fixo, exceto nos casos em que existe forro com material absorvedor. Na tabela 3.1 podem-se observar mais detalhadamente as

características geométricas de algumas salas. Na tabela 3.1 são descritas as dimensões, área total das superfícies e volume de ar das vinte salas do curso de Música.



a)



b)

Figura 3.2 – Salas de aula do curso de graduação em música da UFSM: (a) sala de estudo, (b) sala de aula coletiva.

Em relação à configuração das superfícies e mobiliário observam-se muitos elementos comuns entre as salas. Existem objetos que estão habitualmente presentes, variando em quantidade, tipologia ou acabamento, como: piano de cauda ou de parede, cadeiras de madeira, plásticas ou estofadas, armários de madeira ou metálicos, quadro negro ou branco, cortinas *blackout* ou persianas verticais, entre outros.

Tabela 3.1 - Descrição das características geométricas das salas da Música da UFSM.

<b>Sala</b>	<b>Dimensões*(m)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>
SE01	6,20 x 4,40 x 2,90	27,30	79,10
SE02	6,20 x 3,40 x 3,75	21,00	79,10
SE03	6,20 x 3,40 x 2,90	21,20	63,30
SE04	11,65 x 10,65 x 3,00	124,00	372,20
SE05	4,70 x 3,35 x 3,00	15,75	47,20
SE06	4,70 x 2,25 x 3,75	10,60	39,70
SE07	6,20 x 5,85 x 3,00	36,30	108,80
SE08	6,20 x 5,70 x 3,75	35,30	102,40
SE09	6,20 x 3,35 x 2,90	20,80	60,20
SE10	6,20 x 3,45 x 2,90	21,40	62,00
SE11	6,20 x 3,45 x 2,90	21,40	62,00
SE12	6,20 x 2,30 x 2,90	14,30	41,35
SE13	6,20 x 3,35 x 3,00	20,80	62,30
SE14	6,20 x 3,35 x 3,00	20,80	62,30
SE15	6,20 x 3,35 x 3,00	20,80	62,30
SAC01	6,20 x 13,40 x 3,00	83,00	249,00
SAC02	6,20 x 7,00 x 3,75	43,40	162,75
SAC03	6,20 x 14,10 x 3,75	87,40	327,85
SAC04	6,20 x 7,00 x 3,75	43,40	162,75
SAC05	6,20 x 7,00 x 3,75	43,40	162,75

\* Largura x Comprimento x Altura

Quanto à distribuição de materiais, verifica-se em grande parte dos recintos a existência de material absorvedor cobrindo as paredes e o teto. O material consiste em placas de 30 x 30 cm de papelão compensado, estruturadas com perfis de madeira, resultando num distanciamento da parede até o mesmo de 5 cm (figura 3.4, a e b). No teto estas placas ficam suspensas a uma distância que varia de 75 a 85 cm, o que acarreta uma redução do pé direito e, conseqüentemente, do volume do ambiente.

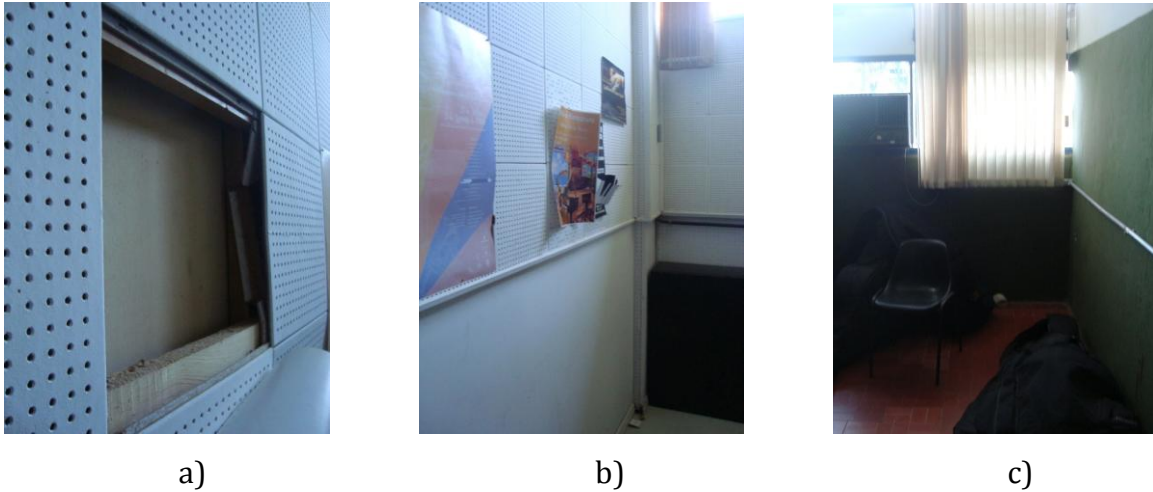


Figura 3.3 – (a) Aplicação do material absorvedor sonoro perfurado, (b) chapas de MDF na parte inferior da parede, e (c) carpete sobre as paredes de alvenaria.

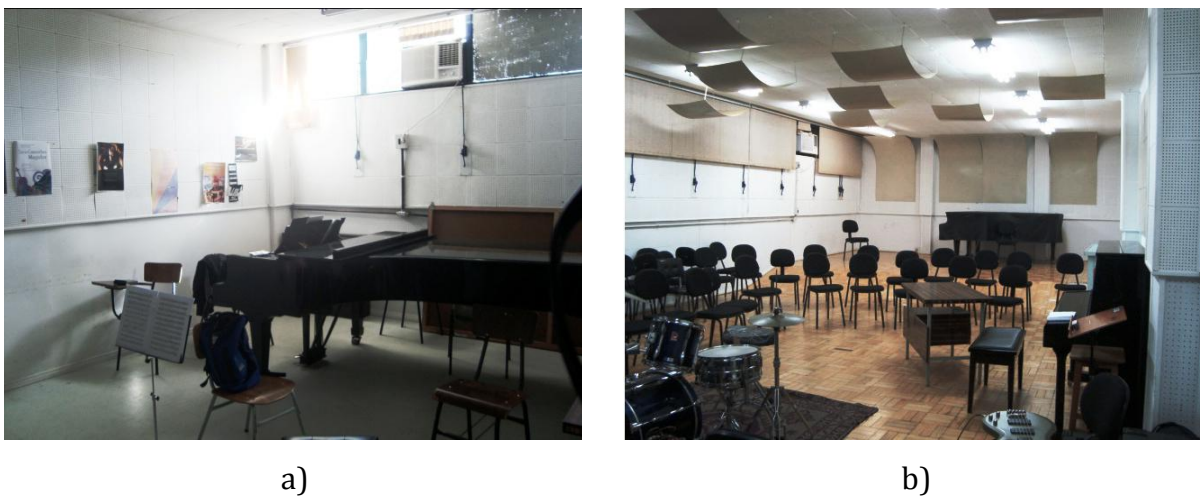


Figura 3.4 - Sala de estudo individual (a) e sala de estudo coletiva (b).

Em algumas salas há recobrimento da parede com placas de gesso acartonado ou de madeira de 5 mm de espessura (figura 3.4, b). Estes elementos são estruturados da mesma maneira que o material absorvedor sonoro, mantendo a distancia de 5 cm da parede. Existem também casos em que a parede é recoberta com carpete de espessura fina ou ainda são suspensas placas metálicas sobre o absorvedor sonoro e no teto, como pode ser observado na figura 3.5 (b). As áreas dos principais materiais, das vinte salas, são apresentadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Distribuição das áreas e materiais das salas de aula do curso de Música.

<b>Sala</b>	<b>Piso/Teto (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Parede de alvenaria* (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Parede com absorvedor (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Janela (vidro) (m<sup>2</sup>)</b>
SE01	27,30	-	31,80	3,00
SE02	21,00	65,34	-	4,76
SE03	21,20	-	55,20	2,40
SE04	124,00	31,95	101,85	7,50
SE05	15,75	-	48,30**	2,35
SE06	10,60	25,10	23,40	1,60
SE07	36,30	-	68,20	4,10
SE08	35,30	81,25	-	8,00
SE09	20,80	-	53,00	2,35
SE10	21,40	-	53,60	2,40
SE11	21,40	-	53,60	2,40
SE12	14,30	-	47,70	1,60
SE13	20,80	-	55,00	2,35
SE14	20,80	-	55,00	2,35
SE15	20,80	-	55,00	2,35
SAC01	83,00	-	87,70	9,40
SAC02	43,40	87,30	-	9,80
SAC03	87,40	112,00	-	19,70
SAC04	20,80	87,30	-	9,80
SAC05	43,40	87,30	-	9,80

\* Parede simples de alvenaria de tijolos furados, rebocada e pintada.

\*\* O absorvedor nesta sala consiste em carpete de baixa espessura aplicado diretamente na parede.

### **3.2 Avaliação subjetiva das características acústicas das salas**

Um projeto acústico-arquitetônico deve sempre atender às necessidades de seus usuários. Neste sentido, torna-se evidente a necessidade de conhecer a opinião dos usuários em relação à qualidade acústica das salas de prática e de ensino musical do curso de Música da UFSM, visto que estes estão diretamente envolvidos com o objeto de estudo e com o tema desta pesquisa.

A opinião dos alunos e professores, usuários das salas de prática e ensino musical, foi obtida através da aplicação de um questionário simples e informal que permitiu selecionar as salas mais utilizadas, obtendo assim a informação de quais seriam as salas mais e menos preferidas em relação ao condicionamento acústico. Além de possibilitar o conhecimento das preferências dos estudantes de música para prática dos instrumentos, pode-se, através destes questionários, alcançar maior contato com a linguagem utilizada pelos mesmos para descrever suas sensações em relação ao comportamento do som dentro dos ambientes utilizados para estudo.

Um questionário simplificado composto de dez itens divididos em três partes foi confeccionado (ver Apêndice B para mais detalhes). Nas primeiras duas partes do questionário, que trata da identificação e da experiência musical, foram solicitadas informações a respeito do músico que poderiam influenciar suas opiniões em relação à qualidade acústica das salas, tais como: identificação do instrumento estudado, tempo de estudo com o mesmo, semestre, curso (se bacharelado ou licenciatura) e experiência com grupos de apresentação.

Na terceira parte foi requerida a nomeação das três salas que consideravam melhores e das três piores do ponto de vista do condicionamento acústico, sempre solicitando que desconsiderassem as questões de isolamento acústico. A última questão, sobre a sala considerada ideal tinha por objetivo identificar mais claramente as necessidades e a linguagem dos músicos para compará-las com as respostas anteriores, identificando seus anseios com mais facilidade.

Para determinação do tamanho da amostra foi adotado o cálculo de amostragem probabilística aleatória simples. O tamanho da população foi obtido através da listagem de alunos e professores requerida junto à coordenação do



curso. Este é dividido em bacharelado e licenciatura, com 60 e 52 alunos respectivamente, e conta com 22 professores, somando um total de 134 usuários. O valor da amostra resultou num total de 100 elementos.

Os questionários foram aplicados num período de aproximadamente dois meses, sendo que os usuários foram abordados no próprio edifício do curso em dias e horários aleatórios. Juntamente com a entrega dos questionários, uma explicação oral a respeito de como deveria ser respondido e dos objetivos do trabalho eram apresentadas. Os indivíduos levavam de 5 a 10 minutos para completar todo o questionário.

Foi alcançado um total de 83 questionários completos, porção considerável, visto que muitos alunos, principalmente estudantes do curso de licenciatura, não utilizam as salas disponíveis para ensaio existentes no CAL, o que impossibilitou atingir a meta inicial da amostra.

### **3.3 Ensaio experimentais**

A resposta impulso das salas de aula foi obtida através de medições acústicas realizadas de acordo com as determinações da norma ISO 3382 – 1: 2009 *Measurement of room acoustic parameters - performance spaces*, que fornece os métodos para obtenção dos parâmetros acústicos utilizados para determinar a qualidade acústica de salas, em termos de tempo de reverberação ( $T_{30}$ , EDT), energia ( $C_{80}$ ,  $D_{50}$ ,  $T_s$ , G), parâmetros de palco ( $ST_{early}$ ,  $ST_{late}$ ), entre outros.

#### **3.3.1 Equipamentos e sistema de medição**

A estrutura do sistema de medição da resposta impulso se deu em dois módulos. O primeiro, responsável pela geração do sinal, consistiu na obtenção da resposta impulso e no cálculo dos parâmetros acústicos. Tal módulo foi implementado através do *software DIRAC*, instalado em um computador portátil. O

segundo, responsável pela reprodução e aquisição dos sinais sonoros, foi implementado através de uma placa de áudio e um conjunto de transdutores.

Foram empregados os seguintes equipamentos, conectados segundo o esquema da figura 3.5:

- Computador portátil com *software* DIRAC instalado (1);
- Placa de Áudio Creative EMU (2)<sup>8</sup>;
- Medidor de Nível de Pressão Sonora B&K 2270 (3);
- Amplificador B&K 2716 (4);
- Fonte Omnidirecional B&K 4292 (5).

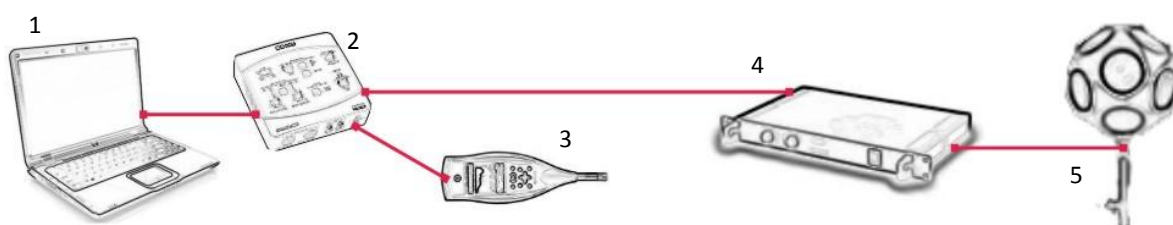


Figura 3.5 - Equipamentos e esquema de montagem do sistema de medição.

O programa computacional *DIRAC* está configurado de acordo com as normas técnicas ISO 3382 e IEC 60268<sup>9</sup>, para realizar os cálculos dos parâmetros acústicos por elas indicados para a avaliação da qualidade acústica de salas. A calibração deste sistema (apresentado na figura 3.6) é efetivada através do próprio *software*, o qual disponibiliza uma ferramenta onde são informados os dispositivos de saída e entrada do sinal, neste caso a placa de áudio Creative EMU.

Como sinal de excitação da sala, foi utilizada uma varredura logarítmica (*sweep*) disponibilizada no próprio *software*. Os parâmetros referentes à qualidade acústica das salas foram registrados em bandas de oitava na faixa de frequências entre 63 Hz e 8.000 Hz.

<sup>8</sup> Gentilmente cedida pelo Prof. Arcanjo Lenzi da UFSC para realização deste trabalho.

<sup>9</sup> IEC 60268 – 16: *Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.*

### 3.3.2 Posicionamento dos equipamentos e processo de medição

Para todas as salas utilizaram-se no mínimo duas posições de fonte e quatro de microfones, aumentando este número de acordo com as dimensões das salas. As alturas de microfones e fontes empregadas foram 1,2 e 1,5 m, respectivamente, distância mínima entre fonte e microfone de 1,5 m e entre posições de microfones de 1m. As medições foram repetidas cinco vezes em cada ponto. As recomendações referentes a estas configurações estão de acordo com a norma técnica ISO 3382.

Com o objetivo de obter uma resposta da sala o mais próximo possível da situação vivenciada pelos usuários diariamente, os materiais e objetos encontrados dentro das salas não foram retirados para a realização das medições, e as cortinas, quando haviam, foram fechadas.

Além destes cuidados, todas as salas foram medidas em fins de semana, pois o tráfego de veículos e circulação de pessoas, dentro do campus da universidade e dentro do CAL, é menor e, conseqüentemente, o nível de pressão sonora associado ao ruído de fundo não interfere nas medições acústicas no interior das salas. Assim, foi possível otimizar o tempo de medição permitindo mais qualidade aos resultados, visto que a razão entre sinal de excitação e ruído de fundo (SNR) tornou-se mais favorável, mantendo-se sempre acima de 15 dB. Da mesma forma o INR manteve-se acima de 35 dB para todas as salas medidas.

### 3.4 Simulação computacional

As simulações mediante o uso de programas computacionais começaram paralelamente às medições acústicas, sendo empregados os programas computacionais *Google Sketchup* e *Odeon Combined*. O primeiro é uma ferramenta para criação de modelos em três dimensões muito utilizada por profissionais da área da construção civil, é um *software* livre, desenvolvido pela Google Inc. e está disponível para *download* na internet ([www.sketchup.google.com](http://www.sketchup.google.com)). O segundo é um *software* desenvolvido pelo Departamento de Tecnologia Acústica da Universidade Técnica da Dinamarca para realizar simulações acústicas.

As simulações foram realizadas em três fases: confecção do modelo geométrico, aplicação de materiais, definição das posições de fontes e receptores e, o desenvolvimento da simulação acústica. Tais fases estão descritas a seguir.

#### 3.4.1 Confecção do modelo geométrico das salas

Para estudar uma sala no programa computacional de predição acústica *Odeon* é necessário criar um arquivo contendo as informações das características geométricas do ambiente que se pretende simular acusticamente. Isto pode ser feito através da digitação dos dados em um arquivo de texto no módulo *Odeon editor*, usando o módulo *Odeon extrusion modeler* ou ainda importar arquivos com extensão “\*.dxf” criados por programas CAD como *AutoCAD*, *Sketchup*, *3DStudioMax* entre outros (CHRISTENSEN, 2009).

Para decidir qual meio seria mais viável para o desenho do modelo, uma sala dentre as disponíveis para o estudo foi escolhida aleatoriamente e seu modelo simplificado foi construído em três dos programas computacionais já citados: *Odeon Extrusion modeler*, *AutoCAD 3D* e *Sketchup*. Os modelos foram então, simulados acusticamente e as três formas de elaboração de geometrias foram validadas, sendo que o programa escolhido para ser usada neste trabalho foi a modelagem em *Sketchup* por ser menos complexa e, conseqüentemente, mais rápida (MARROS et al., 2010).

Uma vez que o modelo geométrico da sala foi construído, ele foi exportado na extensão “\*.par” (extensão de arquivos aceita pelo *software Odeon*) através de um *plugin* instalado no *Google Sketchup*, fornecido pelos próprios desenvolvedores do programa de simulação acústica, em seu site oficial ([www.odeon.dk](http://www.odeon.dk)).

#### 3.4.2 Definição e aplicação de materiais no modelo geométrico das salas

Com o modelo geométrico 3D inserido no programa *Odeon*, foram aplicados os materiais com suas respectivas áreas e coeficientes de absorção sonora, por

banda de frequência cobrindo a faixa de 63 a 8.000 Hz, nas superfícies componentes do modelo de acordo com a distribuição existente em cada sala. A ferramenta utilizada para esta tarefa encontra-se nas opções do *software* de simulação, chama-se *material list*, e é composta por uma biblioteca de materiais de construção com seus respectivos coeficientes de absorção sonora, permitindo inclusive a inserção de novos materiais com suas próprias características.

Para avaliar a qualidade do modelo e verificar se os materiais estão aplicados corretamente utilizam-se ferramentas do programa Odeon como o *Quick Estimate* e o *Global Estimate*, as quais calculam os tempos de reverberação (TR) de acordo com as equações de Sabine, Eyring, Arau-Puchades e Schröder. Através destas ferramentas foi possível computar os tempos de reverberação em cada banda de oitava e verificar se estavam próximos dos valores medidos. Este procedimento é uma verificação rápida que permite alterações na aplicação dos materiais antes de passar para a fase da simulação mais detalhada. Nas figuras 3.9, “a” e “b”, estão apresentadas as interfaces das duas ferramentas citadas.

A utilização destas ferramentas depende da inserção de pelo menos uma fonte sonora no modelo com suas características. Para isso é utilizada a ferramenta *Source Receiver List*, a qual permite também a inserção dos receptores. Nesta pesquisa, as orientações das fontes e receptores foram introduzidas de acordo com o posicionamento do equipamento utilizado nas medições *in situ*. Além disso, o *software* apresenta a opção de adicionar a fonte omnidirecional virtual com as mesmas características de direcionalidade e potência da fonte que foi utilizada para os ensaios de campo.

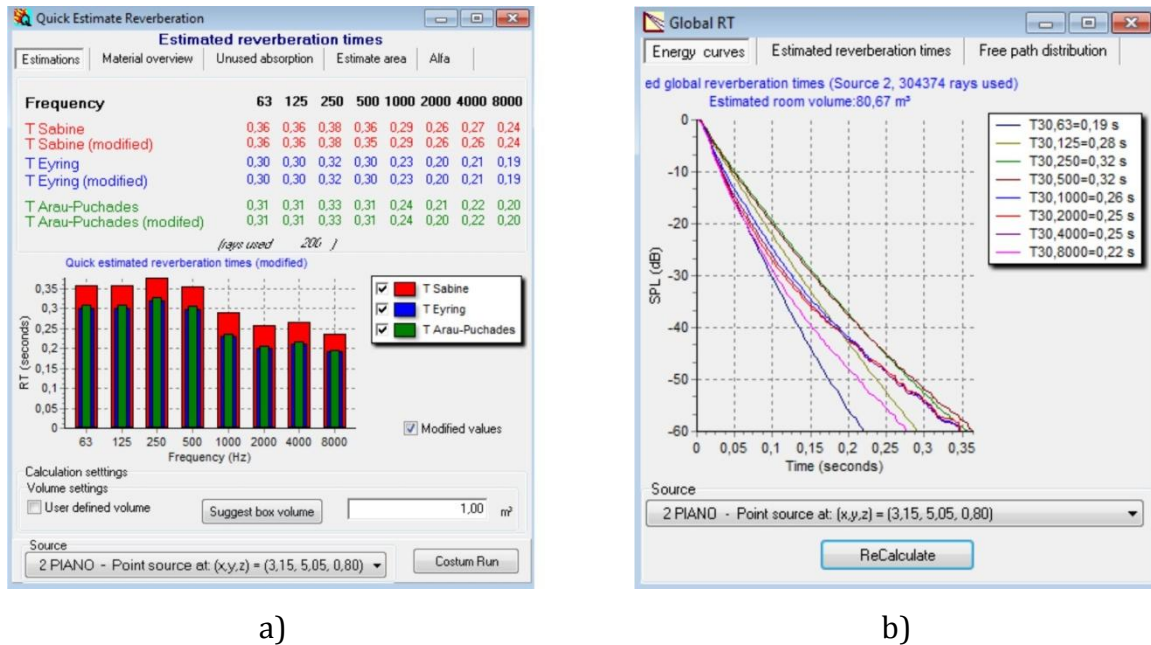


Figura 3.6 – Interface das ferramentas *Quick Estimate* (a) e *Global Estimate* (b).

### 3.4.2.1 Ajuste do modelo em função dos materiais e do nível de detalhamento

Para alcançar uma boa precisão nos resultados, buscando a mínima diferença entre dados medidos e simulados, todos os modelos passaram por diversos ajustes e verificações. Como todas as salas apresentam superfícies e objetos comuns, os coeficientes aplicados também deveriam ser comuns. Assim, os modelos foram testados com diferentes composições de superfícies e objetos, até que se chegasse a um consenso a respeito dos materiais que seriam adequados a todas as salas. Na figura 3.10, é possível observar quatro tempos de reverberação para quatro configurações do modelo da sala SE02 em comparação com os valores medidos.

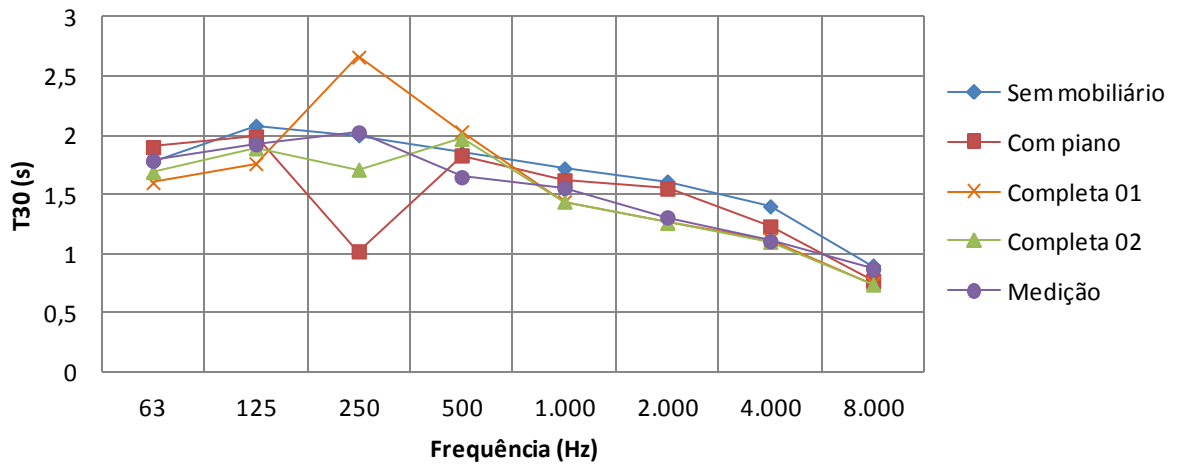


Figura 3.7 – Ajustes do modelo simulado, através do parâmetro T30, em comparação com os valores medidos para a sala SE02.

Inicialmente a sala foi simulada sem o mobiliário, somente com as superfícies de contorno, janelas e porta, e os dados obtidos foram bastante coerentes em relação aos valores medidos. Contudo, a medição experimental foi realizada com a sala mobiliada, assim o modelo também deveria seguir esta regra. Foi então acrescentado o piano e a sala foi simulada novamente. Como pode ser observado na figura 3.10 o T<sub>30</sub> na frequência de 250 Hz é menor em relação ao valor medido. Desta forma, o material do piano foi alterado e adicionado ao modelo os demais itens do mobiliário: cortina e cadeiras. Ainda assim, os valores são mais altos do que os medidos em 250 e 500 Hz.

No último teste, que pode ser observado na figura 3.10 nomeado na legenda como “completa 02”, o material aplicado ao piano foi alterado pela terceira vez e, apesar de apresentar diferença em 250 e 500 Hz, esta foi menor do que para os outros materiais. Simultaneamente, estes testes foram realizados nos modelos das demais salas. Os materiais que apresentaram melhores resultados foram definidos e aplicados nos modelos para a simulação final. A descrição dos materiais e seus respectivos coeficientes de absorção sonora podem ser vistos no apêndice G.

### 3.4.3 Simulação acústica

A obtenção dos parâmetros para avaliação da qualidade acústica derivados da resposta impulsiva foi realizada uma vez que a modelagem geométrica da sala, a aplicação de materiais e o posicionamento de fontes e receptores foram efetivados. As configurações básicas do *software* para simulação foram mantidas, para a opção de simulação *precision*. Somente o comprimento da resposta impulsiva foi alterado de acordo com as dimensões das salas: 3.000 ms para as salas de estudo e 5.000 ms para as salas de aula coletiva.

Nesta fase, as fontes e receptores foram posicionados e vinculados de acordo com a distribuição espacial deles durante a medição em campo através da ferramenta *Job list*. Após o cálculo dos parâmetros acústicos é possível importar do *software Dirac*, utilizado para a medição em campo, os arquivos referentes à resposta impulso da sala para cada receptor equivalente no modelo geométrico. Por isso a importância de manter as posições de fonte e microfone corretamente relacionados de acordo com a medição. Desta forma é possível comparar dados medidos e simulados com mais facilidade, porém é importante destacar que o programa permite somente a comparação de dados relativos a uma medição, e não às médias das cinco medições realizadas em cada ponto.





## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

A seguir são apresentados e analisados os dados obtidos nas três etapas componentes da pesquisa. Na primeira parte estão os dados reunidos através da avaliação subjetiva, que permitiram a escolha das seis salas de ensino de música para serem avaliadas por meio da resposta impulsiva acústica, a qual produziu dados referentes aos parâmetros de avaliação da qualidade acústica de salas. Segue, na segunda parte, a caracterização acústica para cada sala selecionada, realizada mediante a correlação entre os resultados mensurados experimentalmente e a avaliação subjetiva. Finalmente, são comparados e comentados os resultados das simulações computacionais e medições.

### 4.1 Avaliação subjetiva

As vinte salas disponíveis para prática e ensino musical não são usadas regularmente, por motivos de preferência ou disponibilidade das mesmas. A aplicação dos questionários possibilitou a distinção entre as salas mais utilizadas pelos estudantes e professores. Foram selecionadas seis salas dentre as mais citadas, três do tipo sala de estudo e três do tipo sala de aula coletiva.

Cada um dos 83 entrevistados poderia referir-se a seis salas, resultando num total de 498 citações, dentre estas, 345 foram distribuídas entre as 20 salas do curso de Música, as 153 lacunas restantes não foram preenchidas. Todas as salas mencionadas pelos professores e alunos, bem como a quantidade de vezes em que isto ocorreu são apresentadas na figura 4.1. Como pode ser observado nesta figura, as salas SE02, SE03, SAC01 e SAC02 foram mais mencionadas como salas ruins, enquanto as salas SE01 e SE03 foram consideradas preferidas pelos músicos para prática e ensino musical. Dentre estas, as salas SE01, SE02 e SE03 são salas de estudo e receberam 20, 35 e 41 citações

entre preferidas e ruins, respectivamente. As salas SAC01, SAC02 e SAC03 são salas de aula coletiva, e foram citadas 75, 42 e 36 vezes, respectivamente.

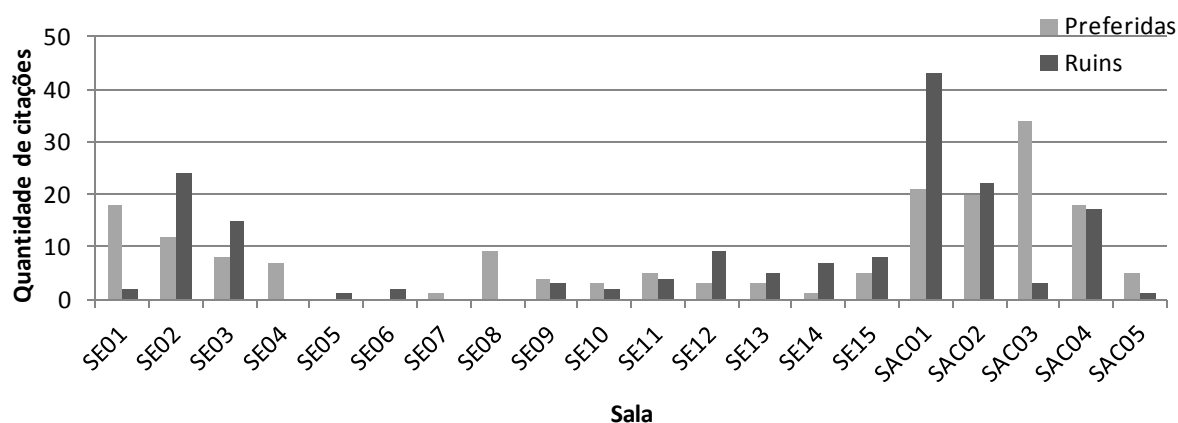


Figura 4.1 - Número de citações dos estudantes e professores referentes à preferência acústica das salas para ensino e prática musical.

No início do questionário os entrevistados foram solicitados a responder qual era o instrumento que estudavam e, a partir disso, deviam citar as salas preferidas e ruins em relação a este. A figura 4.2 mostra a relação dos instrumentos musicais mencionados no questionário. Todos os instrumentos estudados no curso de bacharelado tiveram pelo menos um representante, além dos instrumentos estudados no curso de licenciatura, como guitarra elétrica, acordeon e gaita de boca.

Os instrumentos que mais vezes foram mencionados nos questionários foram o piano e o violão, com 15 e 16 representantes respectivamente, e a percussão e voz (canto) com 09 representantes cada. A tabela 4.1 apresenta a listagem dos instrumentos participantes do questionário, bem como a distribuição das opiniões para cada uma das salas selecionadas.

As salas mais citadas como preferidas, SE01 e SAC03, foram assim consideradas para a maioria dos instrumentistas participantes do questionário, com exceção dos trompetistas e acordeonistas que não manifestaram preferência por nenhuma das duas. Além disso, o número de menções negativas para estas salas, soma menos de 1% do total de menções que as mesmas receberam. As principais descrições se referem a elas como tendo boa reverberação ou reverberação equilibrada. Tais descrições podem ser visualizadas no quadro 4.1.

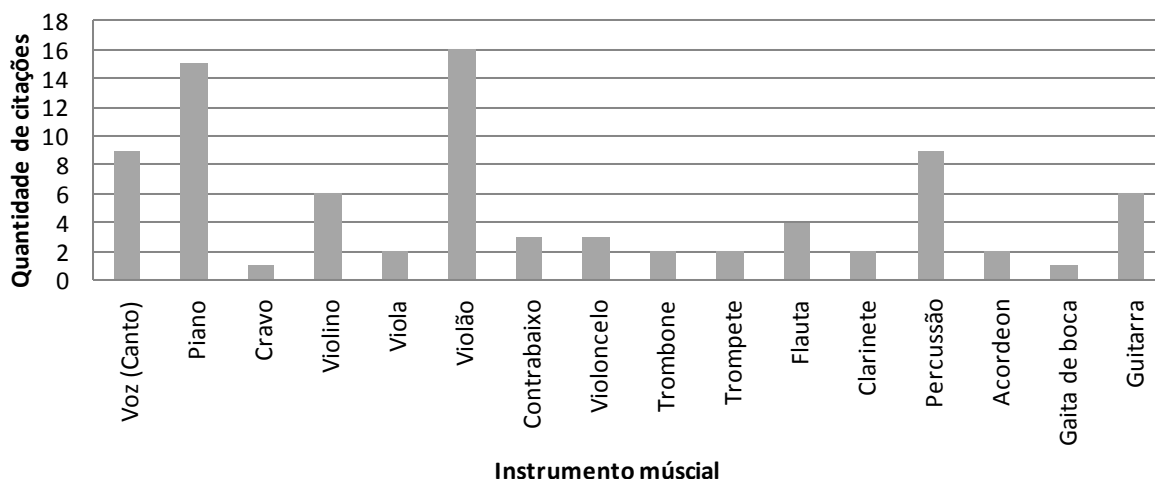


Figura 4.2 - Instrumentos musicais estudados pelos músicos participantes no questionário.

A sala SE02 recebeu 24 menções negativas e 12 positivas. Esta sala foi considerada ruim principalmente para o piano e violão, sendo que o número de citações relacionadas ao violão é o mesmo para as menções positivas. As descrições caracterizam esta sala essencialmente como muito reverberante, como pode ser observado no quadro 4.1. Uma das salas de estudo mais citadas, a SE03, teve 15 menções negativas, as quais procedem principalmente das pessoas que tocam ou ensinam violão e canto (voz).

Assim como a SE03, a sala de aula coletiva SAC01 foi mais citada como ruim, com 42 menções. Contudo, a maioria dos instrumentistas participantes do questionário mencionou ao menos uma vez esta sala como ruim, com exceção dos estudantes e professores de trombone e cravo. As principais justificativas referem-se a estas salas como muito secas ou sem reverberação, como pode ser visto no quadro 4.2.

A sala de aula coletiva SAC02, foi mais votada como ruim, com 22 referências, porém teve também 20 menções positivas, o que quase ocasionou um empate de opiniões. Com exceção dos estudantes ou professores de cravo, viola e gaita de boca, que não a mencionaram nenhuma vez, todos os instrumentistas citaram ao menos uma vez esta sala como boa ou ruim. Os estudantes de canto foram os únicos que fizeram somente menções positivas para esta sala. Nas descrições destacadas no quadro 4.2 é possível observar que a reverberação foi o principal ponto considerado, sendo ora avaliada como boa, ora avaliada como excessiva.

Tabela 4.1 - Distribuição das opiniões a respeito das salas selecionadas.

Instrumento musical	SE01		SE02		SE03		SAC01		SAC02		SAC03		Total
	Boa	Ruim	Boa	Ruim	Boa	Ruim	Boa	Ruim	Boa	Ruim	Boa	Ruim	
Voz (Canto)	-	-	1	2	-	6	-	9	6	-	7	1	32
Piano	6	1	-	6	-	1	5	7	4	5	5	2	35
Cravo	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	2
Violino	-	-	2	1	-	2	-	4	1	1	5	-	16
Viola	1	-	1	1	1	-	-	2	-	-	1	-	6
Violão	3	-	5	5	-	3	6	6	5	3	4	-	37
Contrabaixo	2	-	-	2	-	-	2	1	-	1	1	-	7
Violoncelo	1	-	-	1	1	-	-	2	-	3	1	-	8
Trombone	1	-	-	2	2	-	-	-	-	2	-	-	6
Trompete	-	-	-	1	1	1	1	1	-	1	-	-	6
Flauta	2	-	-	2	-	-	1	3	1	1	3	-	11
Clarinete	1	-	1	-	1	-	-	1	-	1	-	-	4
Percussão	-	-	-	-	1	1	-	3	-	1	2	-	8
Acordeon	-	-	1	-	-	-	1	1	2	1	-	-	6
Gaita de boca	1	-	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	2
Guitarra	-	1	-	1	1	1	4	1	1	2	3	-	14
<b>Total</b>	<b>18</b>	<b>2</b>	<b>12</b>	<b>24</b>	<b>8</b>	<b>15</b>	<b>21</b>	<b>42</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>33</b>	<b>3</b>	

Os questionários aplicados aos professores e alunos sobre os aspectos acústicos das salas de aula permitiram conhecer as descrições mais usuais encontradas nas respostas. No apêndice D estão apresentadas estas opiniões para as seis salas mais citadas como acusticamente preferidas e ruins.

<b>SE01</b>	<b>SAC03</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tem acústica mais seca;</li> <li>▪ Boa reverberação;</li> <li>▪ Boa projeção sonora;</li> <li>▪ Tem menor reverberação mas o som viaja mais;</li> <li>▪ Ajuda a transmitir o som do instrumento;</li> <li>▪ Proporciona um som cheio sem fazer eco;</li> <li>▪ Ressoa bem.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tem reverberação;</li> <li>▪ Boa reverberação;</li> <li>▪ Acústica boa;</li> <li>▪ Boa projeção sonora;</li> <li>▪ Melhor sala para estudo ou recital;</li> <li>▪ Maior ambiência;</li> <li>▪ Reverberação equilibrada;</li> <li>▪ Bom tamanho.</li> </ul>

Quadro 4.1 - Descrição e justificativa dos músicos pela preferência das salas: salas preferidas

<b>SE02</b>	<b>SE03</b>	<b>SAC01</b>	<b>SAC02</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Muita reverberação;</li> <li>▪ Eco;</li> <li>▪ Não possui projeção sonora;</li> <li>▪ Ressoa demais;</li> <li>▪ O som embola demais;</li> <li>▪ O som fica mais forte, prejudica o aluno e engana;</li> <li>▪ Instrumentos com maior sonoridade são prejudicados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Não tem reverberação;</li> <li>▪ Muito seca;</li> <li>▪ Acústica ruim.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pouca/nenhuma projeção sonora;</li> <li>▪ Não tem reverberação;</li> <li>▪ Acústica seca;</li> <li>▪ Acústica ruim;</li> <li>▪ Sem harmônicos;</li> <li>▪ Som do instrumento parece menor;</li> <li>▪ Sem ambiência, o instrumento perde potência e qualidade sonora (timbre).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Muita reverberação;</li> <li>▪ Muito eco, difícil perceber a afinação;</li> <li>▪ Não se entende o que está sendo tocado;</li> <li>▪ Pouca reverberação;</li> <li>▪ Som se propaga demais.</li> </ul>

Quadro 4.2 - Descrição e justificativa dos músicos pela preferência das salas: salas ruins.

É possível verificar, através das descrições, que professores e alunos utilizam termos e expressões semelhantes para descrever as salas e justificar as suas preferências. As opiniões dos entrevistados estão relacionadas, principalmente, com a reverberação e a projeção sonora. Acredita-se que quando os comentários se referem à projeção sonora da sala, o músico está querendo expressar sua opinião a respeito da propagação sonora dentro do recinto, fenômeno que está relacionado com as dimensões da sala (volume de ar) e com as propriedades acústicas dos materiais distribuídos nas superfícies de cada sala. Por outra parte, as opiniões dos entrevistados referem-se à capacidade de projeção sonora da fonte (instrumento musical ou voz) dentro de determinado espaço, a qual está relacionada com a potência sonora e diretividade da fonte. Cabe salientar que a percepção da projeção sonora de um instrumento musical ou da voz tem relação com o fenômeno de reverberação e com o ganho acústico que a sala proporciona.

Observa-se certa confusão a respeito das distinções entre os termos técnicos condicionamento acústico e isolamento acústico. Muitos entrevistados se referiram aos materiais existentes na sala como isolantes sonoros ao invés de absorvedores sonoros. Contudo, filtrando as informações a respeito de isolamento e questões ergonômicas, quanto ao condicionamento acústico das salas, pode-se extrair, como principal informação, que as salas preferidas, isto é, as salas consideradas boas para estudo e prática musical têm reverberação boa ou equilibrada. Enquanto as salas consideradas ruins são descritas como sem reverberação (secas) ou com excesso de reverberação.

## **4.2 Ensaaios experimentais**

A seguir, são apresentados os resultados, por banda de oitava, na faixa de 63 a 8.000 Hz, para os parâmetros  $T_{30}$ , EDT, BR, TR, Br,  $C_{80}$ ,  $D_{50}$ ,  $T_s$ , G,  $ST_{early}$  e STI, utilizados para avaliação da qualidade acústica de salas, e obtidos através das medições da resposta impulsiva acústica. No apêndice E é possível observar mais detalhadamente os gráficos e valores médios, máximos e mínimos obtidos para cada parâmetro em cada uma das seis salas selecionadas.

Na figura 4.3 estão apresentados os resultados obtidos para o tempo de reverberação ( $T_{30}$ ). O  $T_{30}$  é o principal parâmetro acústico a ser analisado para qualificar recintos fechados. Observando a figura 4.3, é possível notar, de antemão, a existência de dois conjuntos de salas, reunidos por proximidade de valores, os quais são similares para os demais parâmetros, como pode ser visto das figuras 4.4 a 4.8, e, inclusive nas tabelas 4.2 e 4.3.

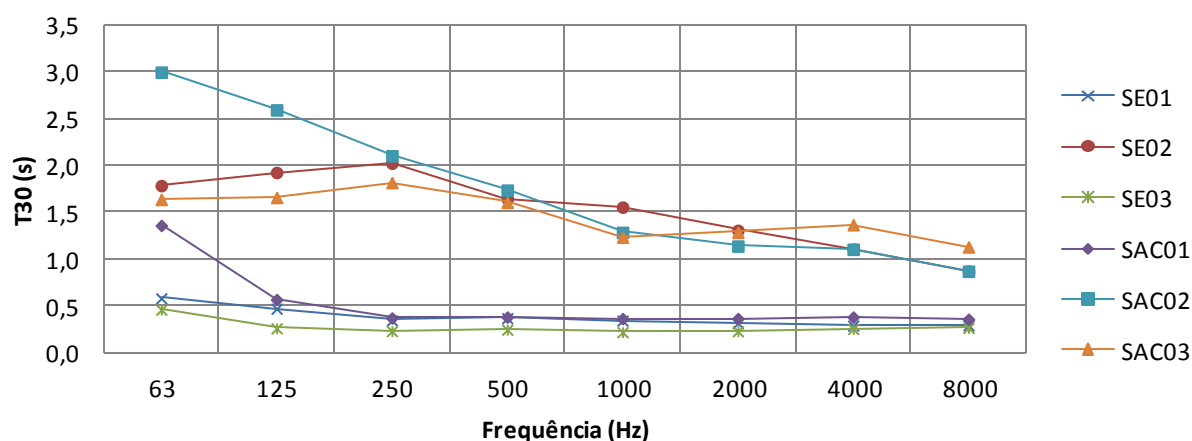


Figura 4.3 - Tempos de reverberação ( $T_{30}$ ), por banda de frequência, das salas de estudo e de aula.

O primeiro grupo, composto pelas salas SE01, SE03 e SAC01 mantém valores de  $T_{30}$  entre 0,22 e 0,57 s, nas faixas de frequências de 125 a 8.000 Hz. Observa-se que na banda de frequência de 125 Hz, as salas SE01 e SAC01 têm um pequeno aumento do  $T_{30}$ , enquanto a sala SE03 se mantém constante. Em 63 Hz ocorre um aumento considerável do  $T_{30}$  na sala SAC01, chegando a 1,36 s.

A constituição das superfícies destas salas, como pode ser visto no apêndice C mais detalhadamente, é basicamente a mesma. Todas as paredes e teto receberam tratamento acústico com material absorvedor sonoro perfurado, com exceção das paredes da sala SE01 que tem algumas superfícies cobertas com placas de gesso ou MDF. Em relação às dimensões, as salas SE01 e SE03 têm volumes próximos com 79,20 e 63,30 m<sup>3</sup>, respectivamente, enquanto a sala SAC01 possui um volume de 249 m<sup>3</sup>, em torno de três vezes maior do que o das primeiras. De acordo com a avaliação subjetiva,



as três salas são secas, no entanto, as salas SE03 e SAC01 são consideradas ruins pelos músicos, enquanto a sala SE01 foi mencionada como preferida por grande parte dos entrevistados, sendo considerada com reverberação boa ou equilibrada.

O segundo grupo, constituído pelas salas SE02, SAC02 e SAC03 apresenta valores de  $T_{30}$  acima de 1,10 s para todas as bandas de oitava de 63 a 8.000 Hz. Com exceção das salas SE02 e SAC02 que apresentam valores para o  $T_{30}$  em torno de 0,8 s para a banda de 8.000 Hz. Contudo, ao contrário do grupo anterior, o  $T_{30}$  destas salas não se mantém constante em função da frequência. Nestas salas, os valores de  $T_{30}$  são mais altos nas bandas de 63 a 250 Hz, diminuindo à medida que a frequência aumenta.

É possível observar que a partir da banda de frequência de 250 Hz as três salas apresentam valores próximos em função da frequência, variando em torno de 0,87 a 2,10 s. Nas baixas frequências, em 63 e 125 Hz, as salas SE02 e SAC03 têm um aumento do  $T_{30}$  até a banda de 250 Hz, quando novamente começa a diminuir, tendo uma variação de 0,8 a 2,02 s. Na sala SAC02 o  $T_{30}$  diminui consideravelmente de 3,0 s em 63 Hz para 1,3 s em 1.000 Hz, e para 0,8 s em 8.000 Hz.

Estas salas são bastante distintas em relação aos seus volumes. As salas SE02, SAC02 e SAC03 têm, respectivamente, 79,9, 162,75 e 327,80 m<sup>3</sup>. Entretanto, a configuração das superfícies dentro delas é a mesma, não apresentando nenhum tipo de tratamento acústico com absorvedores sonoros, a não ser a sala SAC03 que apresenta uma parede coberta com chapas de MDF. Estas salas também receberam a mesma descrição dos músicos, que as consideram salas reverberantes, porém a reverberação na sala SAC03 é considerada boa e equilibrada, enquanto nas salas SE02 e SAC02 é considerada excessiva.

O EDT, apresentado na figura 4.4 está relacionado à percepção da reverberação. É possível notar, através da observação das figuras 4.3 e 4.4 que os valores do EDT seguem a mesma tendência que os valores de  $T_{30}$  para todas as seis salas. Manifestando diferenças mais significativas principalmente nas baixas frequências.

Comparando os dados obtidos para estes dois parâmetros percebe-se que os valores para o  $T_{30}$  e os valores para o EDT das salas SE01, SE03 e SAC01 são semelhantes, em torno de 0,01 e 0,2 s; e para as salas SE02, SAC02 e SAC03 em torno de 0,01 e 0,5 s. Entretanto, apesar de semelhantes, se comparados em relação ao JND (que é de 5% para este parâmetro) estes valores indicam sensação auditiva do tempo de reverberação das salas é diferente para determinadas bandas de frequência. Como os

dados obtidos para o EDT têm, em geral, valores mais baixos do que para o  $T_{30}$ , infere-se que estas salas são subjetivamente mais secas em algumas bandas. Nas salas SAC02 e SAC03 esta diferença é significativa somente em 63 e 125 Hz. Já na sala SAC01 ocorre divergência maior do que 5% para todas as bandas de oitava, e na sala SE03 para toda a faixa de 63 a 500 Hz. Nas salas SE01 e SE02 o EDT é expressivamente menor do que o  $T_{30}$  para 63, 150 e 4.000 Hz na primeira e 125 e 8.000 Hz na segunda.

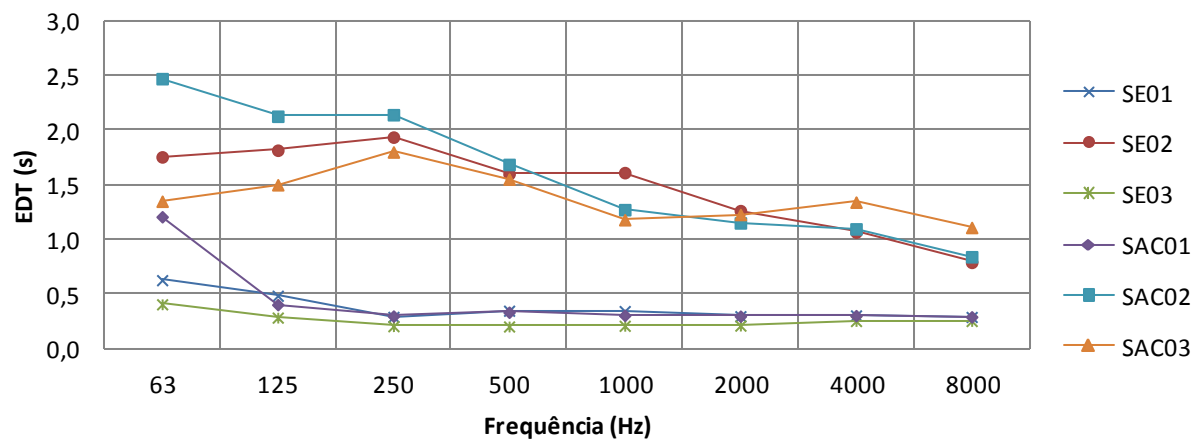


Figura 4.4 - Tempos de decaimento inicial (EDT), por banda de frequência, das salas de estudo e de aula.

A tabela 4.2 apresenta os resultados dos parâmetros BR, TR e Br, relacionados ao tempo de reverberação nas baixas, médias e altas frequências, respectivamente, conforme definido nos itens 2.4.1.3, 2.4.1.4 e 2.4.1.5 do capítulo II.

Beranek (1996) indica, para salas com tempo de reverberação abaixo de 1,8 s, valores ideais de BR variando entre 1,1 e 1,5. Observando a tabela, percebe-se que os valores obtidos para o parâmetro BR variam dentro desta mesma faixa (1,1 a 1,50 para todas as salas, exceto a sala SE03 onde o valor de BR é 1,0.

Considerando ainda a referência de Beranek (1996) para a vivacidade, observa-se que somente as salas SE02 e SAC02 podem ser consideradas vivas, com TR igual a 1,6 s. As demais salas, SE01, SE02, SAC01 e SAC03 são consideradas secas ou mortas, apesar de esta última apresentar valor de TR muito próximo do limite estipulado pelo autor, com 1,5 s.

Recomenda-se, de acordo com Everest (2001), que os valores ótimos para o parâmetro Br sejam os mais altos possíveis, e estejam acima de 0,8. Tomando como base esta referência, observa-se que somente a sala SAC02 encontra-se fora da faixa de valores considerada adequado para Br, com 0,7, enquanto para as demais os valores variam de 0,8 a 1,0.

Observando a tabela 4.2 e levando em consideração as opiniões dos músicos, percebe-se que o parâmetro melhor relacionado à opinião dos músicos é o TR, sendo que as salas consideradas secas têm TR abaixo de 0,40 s e as salas consideradas reverberantes apresentam valores de TR entre 1,5 e 1,6 s. Os valores obtidos para o BR e Br se apresentaram muito similares para todas as salas, e acabaram não reforçando ou acrescentando informações à análise.

Tabela 4.2 - Calor (BR), Vivacidade e Brilho (Br), das salas de estudo e de aula.

<b>Sala</b>	<b>Calor (BR)</b>	<b>Vivacidade (TR)</b>	<b>Brilho (Br)</b>
SE01	1,1	0,4	0,9
SE02	1,2	1,6	0,8
SE03	1,0	0,2	1,0
SAC01	1,2	0,4	1,0
SAC02	1,5	1,6	0,7
SAC03	1,2	1,5	0,9

Os resultados apresentados nas figuras 4.6 a 4.9 referem-se aos parâmetros acústicos relacionados à energia sonora recebida pelo receptor dentro das salas em questão. O  $C_{80}$  e  $T_s$  são utilizados para avaliar a clareza, principalmente das salas destinadas à música e o  $D_{50}$  comumente utilizado para salas dedicadas à palavra falada.

Os valores de  $C_{80}$  são bastante altos para as salas SE01, SE03 e SAC01, indicando que estas soam muito claras, com valores de  $C_{80}$  variando entre 2,82 a 23,37 dB, aumentando de 63 a 250 Hz, e mantendo-se, a partir de 250 Hz, constante em função da frequência. Para a sala SE01 este incremento foi de 2 dB de 63 para 125 Hz e de 6 dB ao dobrar novamente a frequência, enquanto nas salas SE03 e SAC01 este incremento inicial foi de 8 dB e, posteriormente de 3 dB.

Para as salas SE02, SAC02 e SAC03 os valores de  $C_{80}$  se mantiveram bastante baixos, variando entre - 3,03 a 5,21 dB. As salas SE02 e SAC02 apresentam um aumento do  $C_{80}$ , a partir de 63 até 8.000 Hz, sendo que para a sala SE01 o valor de  $C_{80}$  em 63 Hz é aproximadamente 1 dB maior. Para a sala SAC03 este aumento acontece da mesma forma, porém na banda de 63 Hz o valor de  $C_{80}$  sofre um aumento em relação à banda de 125 Hz, nas frequências de 2.000 e 4.000 Hz apresenta uma leve redução.

Os valores de  $C_{80}$  mostram-se inversos aos valores de tempo de reverberação para as seis salas, ou seja, para salas com tempos de reverberação maiores o  $C_{80}$  tem valores bastante baixos e vice-versa. De acordo com Beranek (1996), os valores ideais para o  $C_{80}(3)$  variam de -4 a +5 dB. Neste caso, as salas SE02, SAC02 e SAC03 estão dentro dos limites recomendados como adequados pela referência, com  $C_{80}$  variando em torno de 2 dB. Contudo, de acordo com a opinião dos músicos as salas SE02 e SAC02 são consideradas muito reverberantes, sendo que alguns descrevem como “embolado” o som dentro da sala SE02, o que classificaria estas salas com clareza inadequada. Desta forma, sugere-se que a faixa indicada pelas referências não seja adequada para a tipologia de salas estudadas nesta pesquisa.

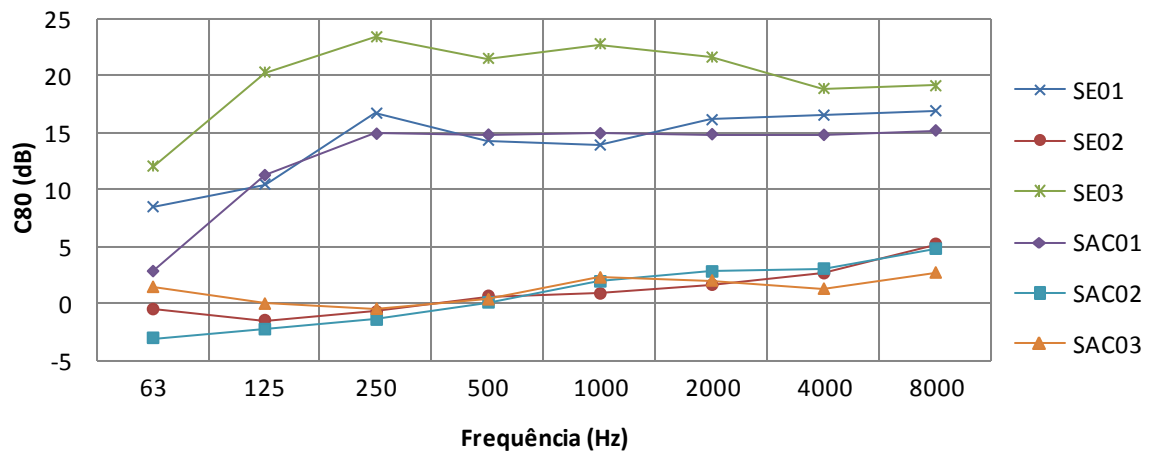


Figura 4.5 – Clareza ( $C_{80}$ ), por banda de frequência, das salas de estudo e de aula.

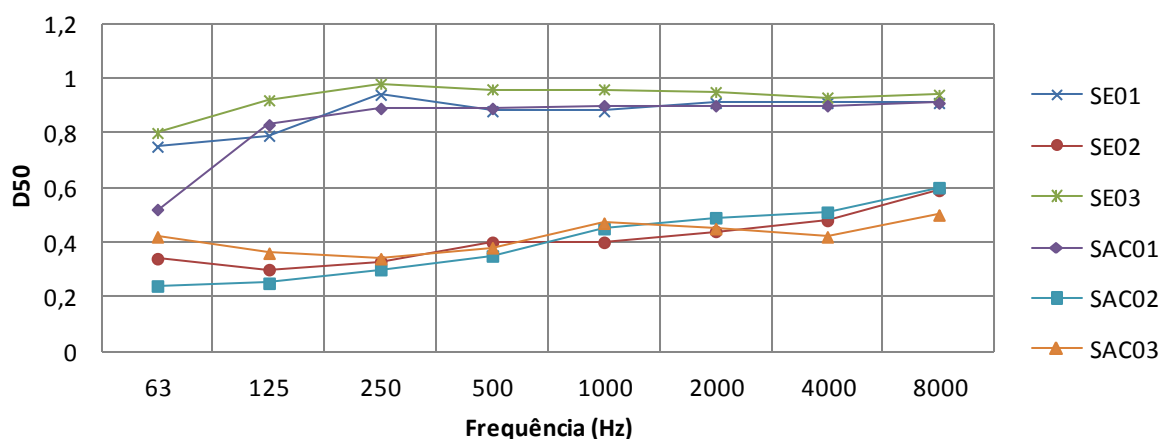


Figura 4.6 - Valores do parâmetro  $D_{50}$ , por frequência, das salas de estudo e de aula.

Os valores obtidos para o parâmetro  $D_{50}$  demonstraram a mesma tendência apresentada pelos valores de  $C_{80}$ , separando as seis salas em dois grupos distintos, um com valores mais elevados e outro com valores mais baixos.

Para as salas SE01, SE03 e SAC01, as curvas do  $D_{50}$  se mantêm muito próximas, para as bandas de frequência acima de 250 Hz, com valores entre 0,8 (80%) e 1,0 (100%), constantes em frequência. Nas baixas frequências (63 a 250 Hz), os valores de  $D_{50}$  aumentam em função do aumento da frequência, variando de 0,5 (50%) a 0,9 (90%). As salas SE02, SAC02 e SAC03 apresentam valores de  $D_{50}$  crescendo com o aumento da frequência, numa variação de 0,2 (20%) e 0,3 (30%) em baixas e médias frequências, e 0,3 (30%) e 0,6 (60%) em médias e altas frequências.

De acordo com Custódio (2004), para salas destinadas à palavra falada, valores de  $D_{50}$ , acima de 0,65 (65%) na região das frequências centrais (500 e 1.000 Hz), refletem boa qualidade acústica. Já para música, os valores ideais estariam em torno de 0,50 e 0,65 nestas mesmas bandas. Tendo estes valores como referência e observando a figura 4.6, nota-se que as salas SE02, SAC02 e SAC03 podem ser consideradas adequadas para música e fala, visto que, apresentam valores de  $D_{50}$  em torno de 80% e 90% para as frequências de 500 e 1.000 Hz, enquanto as salas SE01, SE03 e SAC01 poderiam ser consideradas adequadas somente para palavra falada, pois apresentam valores abaixo de 50%, em torno de 35% e 47%.

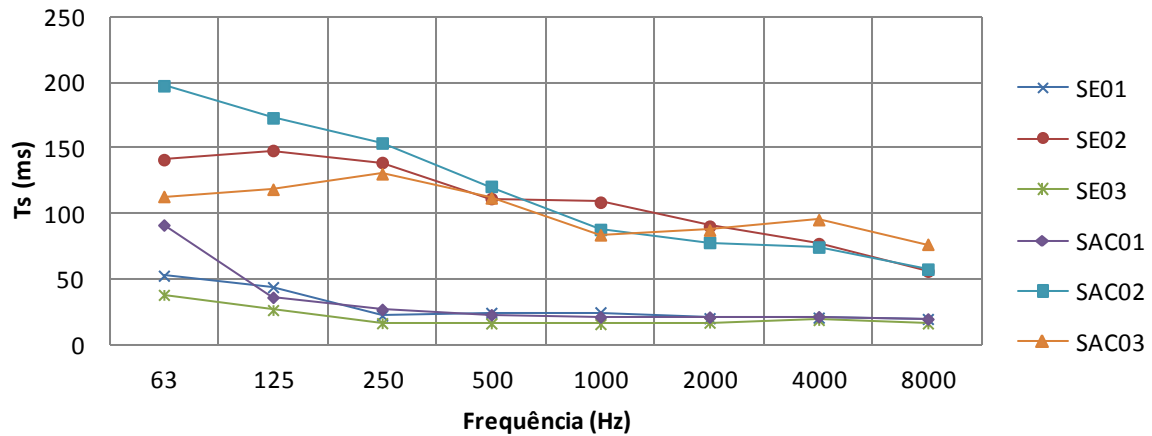


Figura 4.7 - Valores do parâmetro  $T_s$ , por frequência, das salas de estudo e de aula.

Na figura 4.7 estão expostos os valores obtidos para o  $T_s$  para as seis salas, os quais se apresentam decrescentes, de 63 a 250 Hz, nas salas SE01, SE03 e SAC01 mantendo-se, a partir de 250 Hz, constantes e independentes da frequência até 8.000Hz. Os valores, quando constantes, são bastante próximos em torno de 20 ms para médias e altas frequências, e para as baixas frequências variando entre 26 e 91 ms.

Nas salas SE02 e SAC03 os valores de  $T_s$  apresentam-se constantes para as baixas frequências, com valores médios em torno de 144 e 115 ms, respectivamente, decrescendo a partir da frequência de 250 Hz até 8.000 Hz, de 139 para 56 ms na sala SE02, e de 130 para 73 ms para a sala SAC03.

As salas SE02 e SAC02 apresentam um decréscimo dos valores de  $T_s$  à medida que aumenta a frequência, variando em torno de 90 ms para a sala SE02, de 125Hz a 8.000 Hz e de 140 ms para a SAC02, de 63Hz até 8.000 Hz. O traçado da curva do  $T_s$  da sala SAC03 é mais irregular, com valores menores e maiores variando em função da frequência; esta variação é de aproximadamente 50 ms, do valor mais alto (130 ms) em 250 Hz ao valor mais baixo (76 ms) em 8.000Hz.

Para a música, segundo Pisani (2001, apud MANNIS, 2008, pg. 132), os valores adequados de  $T_s$  se encontram numa faixa compreendida entre 50 a 250 ms. Até 50 ms, a sala pode ser considerada adequada para a fala. Desta forma, as salas SE01, SE03 e SAC01 têm valores de  $T_s$  adequados para a fala, e as demais salas têm valores considerados adequados para a música.

A figura 4.8 mostra os valores para o Fator de Força (G), obtidos através da equação apresentada no item 2.4.2.3, em função do tempo de reverberação e do volume das salas. Como pode ser observado nesta figura, as salas podem ser, novamente, agrupadas em dois conjuntos, porém a combinação das salas não é a mesma que para os demais parâmetros. Neste caso (do parâmetro G), um grupo é formado pelas salas SE03, SE01 e SAC03, as quais têm valores de G, para todas as bandas de oitava, dentro da faixa de 20 a 25 ms. E o outro grupo, formado pelas salas SE02, SAC01 e SAC02, que apresentam valores abaixo ou acima desta faixa (20 a 25 ms).

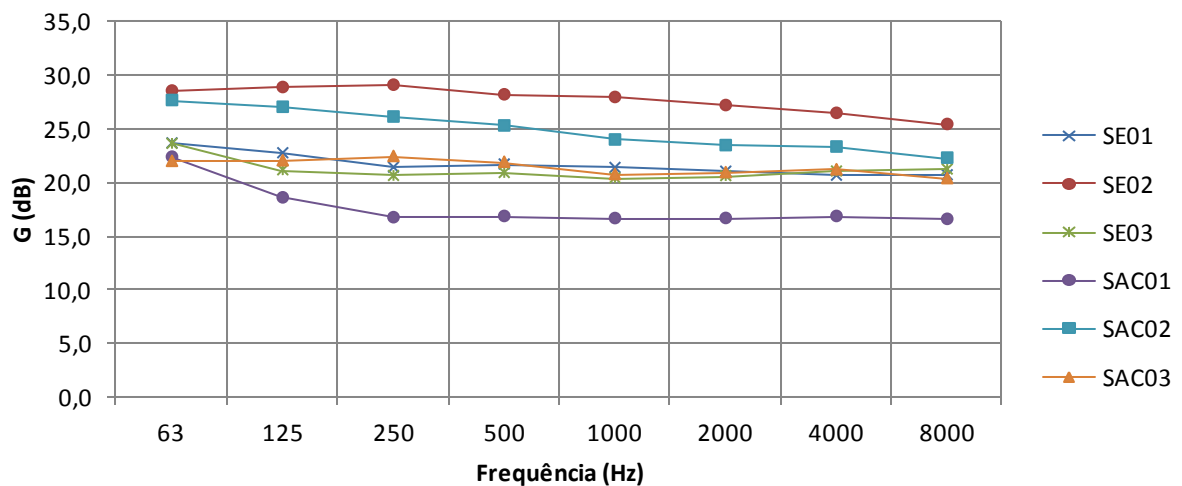


Figura 4.8 - Valores do parâmetro G, por frequência, das salas de estudo e de aula.

As salas SE01, SE03 e SAC01 apresentaram valores médios para G, para todas as bandas de oitava, variando entre 21 e 22 dB. Entre elas, as salas SE01 e SAC03 são consideradas preferidas pelos músicos, com boa reverberação e projeção sonora. Contudo, a sala SE03 é uma das salas mais citadas como ruim, sendo considerada muito seca. A sala SAC01, a qual apresenta valor médio de G em torno de 18 dB, também é considerada ruim pela maioria dos músicos por ser muito seca e sem projeção sonora.

A sala SE02, também descrita como ruim e sem projeção sonora nos questionários, apresentou valores para G mais altos dentre as seis salas, se mantendo constante na faixa de 25 a 29 dB. Entretanto, esta sala é considerada muito reverberante. A sala SAC02, assim como a SAC01 exibe uma diminuição dos valores de G em função do aumento da frequência. Porém, na sala SAC01 esta diminuição é de 5 dB, de 63 a 250 Hz,

mantendo-se com valor de 17 dB, constante até 8.000 Hz, enquanto na sala SAC02 o traçado da curva de G é mais irregular diminuindo 3 dB, de 63 a 250 Hz, e 4 dB de 250 a 8.000 Hz. Esta sala é considerada ruim pela maioria dos músicos, porém tem quase o mesmo número de citações como preferida. Ora sua reverberação e projeção sonora são consideradas adequadas, ora são consideradas sem excesso.

Os valores adequados encontrados nas referências para este parâmetro, os quais variam de 3 a 10 dB, estão muito abaixo dos valores encontrados nestas salas. Contudo, é importante destacar que a equação da qual resultam estes valores leva em consideração o volume do recinto, e os valores apresentados nas referências são para salas de concerto com dimensões muito maiores do que as das salas aqui estudadas. Infere-se, a partir da observação dos dados obtidos para este parâmetro e sua relação com os resultados dos questionários, que os valores de G adequados estejam dentro de uma faixa de 20 a 25 dB, para a tipologia das salas aqui estudadas, cujos volumes variam de 60 a 330 m<sup>3</sup>.

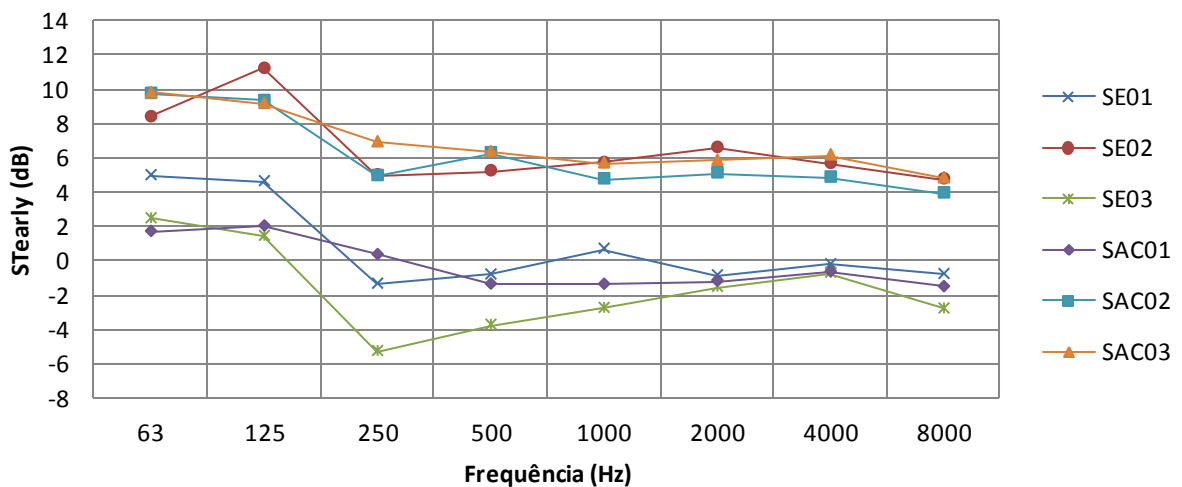


Figura 4.9- Valores do parâmetro  $ST_{early}$ , por frequência, das salas de estudo e de aula.

Os valores obtidos para o suporte inicial (*early support*) são exibidos na figura 4.9. É possível observar que todas as seis salas apresentam o traçado da curva do  $ST_{early}$  bastante irregular. As salas SE01, SE03 e SAC01 têm valores variando em função da frequência numa faixa entre -5 e +5 dB. Nas salas SE02, SAC02 e SAC03 esta variação dos valores está compreendida entre 4 e 11 dB.



A partir da observação dos valores dados como adequados para salas de concerto por Gade (2007) e Beranek (1996), que compreendem uma faixa de -12 a -14 dB, e os dados obtidos para as salas de estudo aqui pesquisadas, percebe-se claramente que os valores para salas de estudo estão muito mais altos do que os considerados ideais. Assim, considerando a avaliação subjetiva, e os dados obtidos para os demais parâmetros, pode-se inferir que as salas com volume em torno de 80 m<sup>3</sup>, onde o TR adequado é de 0,4 s, um  $ST_{\text{early}}$  com valores próximos a zero pode ser considerado adequado. Contudo, um  $ST_{\text{early}}$  chegando a -3 dB pode indicar um esforço muito grande do músico para uma sala com esta dimensão. Já para salas com volume em torno de 330 m<sup>3</sup>, com TR de 1,5 s, os valores de  $ST_{\text{early}}$  podem ser mais altos chegando a 6,0 dB.

Visto que esta pesquisa é destinada à caracterização de salas para prática e ensino de música, não se pode deixar de avaliar parâmetros utilizados para palavra falada como o índice de transmissão da fala (STI), pois as salas de aula coletiva, principalmente, como o nome já diz, recebem aulas teóricas, e necessitam estar dentro dos padrões considerados adequados para boa compreensão da fala. A tabela 4.3 apresenta os valores de STI obtidos para as seis salas estudadas confrontados com os valores da norma IEC 60268-16.

É possível observar, que as salas encontram-se dentro dos padrões exigidos pela norma, pois as SE01, SE03 e SAC03 apresentam valores de STI que estão compreendidos dentro da faixa considerada excelente para fala, e para as salas SE02, SAC02 e SAC03 os valores estão dentro da faixa considerada adequada, ou seja, não há grandes problemas em relação à transmissão da fala nas seis salas.

Tabela 4.3 - Valores do índice de transmissão da fala (STI) das salas de estudo e de aula.

<b>Sala</b>	<b>STI</b>	<b>Referência IEC 60268-16</b>
SE01	0,82 ± 0,01	Excelente (0,75 – 1,00)
SE02	0,54 ± 0,00	Adequado (0,45 – 0,60)
SE03	0,87 ± 0,01	Excelente (0,75 – 1,00)
SAC01	0,83 ± 0,02	Excelente (0,75 – 1,00)
SAC02	0,55 ± 0,01	Adequado (0,45 – 0,60)
SAC03	0,53 ± 0,03	Adequado (0,45 – 0,60)

#### 4.2.1 Considerações a respeito das salas estudadas

Como já foi dito anteriormente, as seis salas podem ser reunidas em dois grupos para todos os parâmetros estudados, com exceção do parâmetro G. A tabela 4.4 apresenta uma síntese das principais características das salas, dos dados obtidos para os parâmetros utilizados para avaliação da qualidade acústica, bem como os valores de JND para cada parâmetro. O STI não foi incluído na tabela, visto que os resultados para todas as seis salas se encontram dentro das faixas que as classificam como adequadas e excelentes para fala.

Tabela 4.4 – Síntese das características mais relevantes das salas em estudo, com valores médios para a faixa de frequência de 500 a 1.000 Hz.

Sala	Vol. (m <sup>3</sup> )	Tratamento Acústico	Aval. subjetiva	TR (s)	EDT (s)	C <sub>80</sub> (dB)	D <sub>50</sub> (%)	T <sub>s</sub> (ms)	G (dB)	ST <sub>early</sub> (dB)
SE01	79,10	Sim	Boa	0,4	0,3	15	89%	24	22	-0,1
SE03	63,30	Sim	Ruim	0,2	0,2	22	96%	16	21	-3,3
SAC01	249,00	Sim	Ruim	0,4	0,3	15	90%	22	17	-1,4
SE02	79,10	Não	Ruim	1,6	1,6	1,0	41%	110	28	5,5
SAC02	162,75	Não	Boa/Ruim	1,6	1,5	2,0	43%	104	25	5,5
SAC03	327,85	Não	Boa	1,5	1,4	2,0	43%	98	21	6,0
JND	-	-	-	5%	5%	1	5	10	1	1

O grupo A é formado pelas salas SE01, SE03 e SAC01, as quais apresentam, além dos valores similares para os diversos parâmetros, tratamento acústico aplicado em todas as superfícies (ver apêndice C para mais detalhes). Os TRs destes recintos variam em torno de 0,2 a 0,4 s, sendo o EDT 0,1 s menor que o TR para as salas SE01 e SAC01, para médias frequências. Segundo a literatura um EDT menor que o TR indica que a impressão subjetiva do tempo de reverberação da sala é menor, ou seja, o músico tem a impressão de uma sala mais seca. O C<sub>80</sub> apresenta valores bastante elevados, variando de 15 a 22 dB, e a definição tem valores acima de 89%. Desta forma, infere-se que a música e a fala nesta sala soam muito claras e definidas. Os valores de T<sub>s</sub> estão abaixo de 50 ms, o que de acordo com Pisani (2001, apud MANNIS, 2008, pg. 132) está adequado somente para salas destinadas à fala, tal fato pode explicar as manifestações negativas a

respeito das salas SE03 e SAC01. Os valores para o G, variam de 17 a 22 dB, e o  $ST_{early}$  tem valores negativos variando de -0,1 a -3,3.

Dentre estas salas, somente a SE01 é considerada preferida pelos usuários. A principal descrição a respeito dela é de que tem boa reverberação e boa projeção sonora. As salas SE03 e SAC01 são consideradas muito secas, sendo que a sala SAC01 é descrita também como sem projeção sonora.

Apesar de os valores obtidos para os parâmetros TR, EDT,  $C_{80}$ ,  $D_{50}$  e  $T_s$  serem muito similares para as três salas, se comparados considerando o JND, esta similaridade ocorre somente entre as salas SE01 e SAC01, onde a diferença entre os valores para cada parâmetro entre as duas salas é menor que o valor de JND, ou seja, a sensação auditiva em cada uma das dimensões descritas pelos parâmetros é a mesma. O que diferencia uma sala da outra é o parâmetro G, que apresenta valores médios de 22 para a sala SE01 e 17 dB para a sala SAC01, respectivamente. Tal parâmetro pode estar relacionado à avaliação dos músicos para estas salas, que têm a primeira como preferida e a segunda como ruim. A sala SE03, apesar de apresentar o mesmo fator de força G que a sala SE01, tem um TR de 0,2 s, e soa muito clara e definida. Além disso, o *support* tem um valor negativo maior para esta sala, isto é, o músico faz mais esforço para executar seu instrumento nela do que nas duas outras salas deste grupo.

As salas SE02, SAC02 e SAC03, componentes do grupo B, têm como característica básica a ausência de tratamento acústico. São consideradas reverberantes, tanto se comparadas aos valores para o TR indicados na literatura, quanto se comparadas à opinião dos músicos. Contudo, somente a sala SAC03 é considerada preferida, com reverberação descrita como boa e equilibrada, pela grande maioria dos músicos. Para a sala SAC02 as opiniões ficam divididas entre reverberação boa e excessiva, enquanto a sala SE02 é considerada muito reverberante. Este grupo de salas apresenta TR variando de 1,5 a 2,0 s, sendo o EDT 0,1 s menor que o TR para as salas SAC02 e SAC03. O  $C_{80}$  tem valores mais baixos em relação às salas do grupo A, em torno de 2,0 dB. O  $D_{50}$  é de 45 % para as salas SAC02 e SAC03 e de 90% para a sala SE02. O  $T_s$  varia de 98 a 110 ms, e o G de 21 a 28 dB. O  $ST_{early}$  é mais alto para as salas deste grupo do que para o grupo A, variando em torno de 6 dB.

Quando comparados considerando o JND, nota-se que a sensação auditiva do tempo de reverberação caracterizada pelo EDT é diferente para todas as salas do grupo B, assim como a percepção da intensidade sonora (G). O  $C_{80}$ , e o  $ST_{early}$  têm valores

similares para as três salas, enquanto o  $D_{50}$  é o mesmo somente para as salas SAC02 e SAC03. Nota-se a partir da observação da tabela 4.4 que as salas deste grupo consideradas boas têm valores muito semelhantes para todos os parâmetros e volume acima de  $150 \text{ m}^3$ . A principal diferença, em relação aos parâmetros, são os valores para  $G$ , que na sala SAC03 é de 21 dB e na sala SAC02 é de 25 dB. Isto pode justificar a divergência nas opiniões a respeito da sala SAC02 obtidas na avaliação subjetiva que ora a avaliam como boa, ora como ruim.

A sala SE02 é considerada ruim e descrita como muito reverberante pelos músicos, contudo os valores obtidos para os parâmetros de avaliação da qualidade acústica nesta sala estão muito semelhantes ao da sala SAC03, considerada preferida. A justificativa encontrada para esta avaliação oposta dos músicos em salas acusticamente muito semelhantes é de que a ausência de material absorvedor sonoro na sala SE02 e o seu volume reduzido ocasionaram um TR muito alto em relação ao seu volume, o parâmetro  $G$ , que leva em consideração o TR e volume se mostrou bastante alto, o que reforça esta ideia.

A partir da análise dos dados obtidos nas medições e através da avaliação subjetiva, infere-se que para salas de prática e estudo musical com volume em torno de  $70 \text{ m}^3$ , um TR de 0,4 s, pode ser considerado adequado. Esta informação é reforçada por pesquisas anteriores para este tipo de sala, apresentadas no item 2.4.1.1. Os demais parâmetros, relacionados aos critérios de energia e de palco, estão com valores acima dos recomendados na literatura. Porém, cabe salientar que não foram encontradas referências para estes parâmetros para salas com volumes reduzidos, ou similares aos aqui estudados. Assim, infere-se que para este tipo de salas, os valores adequados estão em torno de 15 dB para  $C_{80}$ , 90% para o  $D_{50}$ , 20 ms para o  $T_s$ , e próximos a zero para o  $ST_{\text{early}}$ . Os valores de  $G$  para as salas consideradas boas, tanto de estudo quanto coletivas devem se manter na faixa de 21 a 24 dB.

Para as salas de aula coletiva, com volume variando de 150 a  $330 \text{ m}^3$ , o valor de TR adequado deve ser próximo a 1,5 segundos,  $C_{80}$ , em torno de 2,0 dB,  $D_{50}$  em torno de 40%,  $T_s$ , próximo aos 100 ms e  $ST_{\text{early}}$  por volta de 6,0 dB.

### 4.3 Simulações e concordância com os resultados medidos

#### 4.3.1 Considerações a respeito das simulações

Em geral, todos os modelos obtiveram resultados bastante próximos aos resultados obtidos nas medições para todos os parâmetros (uma descrição detalhada dos dados simulados pode ser vista no apêndice G). A tabela 4.6 apresenta a diferença entre dados medidos e simulados, na faixa de frequências de 500 a 1.000Hz, para comparação com o JND indicado para cada parâmetro. De acordo com Christensen (2009), o JND é útil para avaliar a precisão de uma simulação acústica, os valores abaixo da diferença abaixo do JND podem ser considerados precisos, os quais aparecem sombreados na tabela 4.6.

Os modelos mais precisos são os das salas de aula coletiva SAC01, SAC02 e SAC03. Nota-se que estes são os modelos de salas com maiores volumes, a primeira apresenta tratamento acústico em todas as superfícies e as duas últimas não tem tratamento acústico algum. As salas SE01, SE02 e SE03 não se mostraram precisas para parâmetros como o  $T_{30}$ , EDT, e  $C_{80}$ , estas salas apresentam volumes semelhantes. Contudo as salas SE01 e SE03 têm tratamento acústico em todas as superfícies e tempos de reverberação muito baixos, em torno de 0,3 segundos, enquanto a sala SE02 não apresenta nenhum tipo de tratamento acústico e tem um tempo de reverberação em torno de 1,5 segundos.

Tabela 4.5 - Diferença entre valores medidos e simulados, as áreas sombreadas correspondem aos valores iguais ou abaixo do JND indicado para o parâmetro.

Sala	$T_{30}$ (%)	EDT (%)	$C_{80}$ (dB)	$D_{50}$ (%)	$T_s$ (ms)
SE01	14	9	0,4	1	4,30
SE02	6	8	0,3	1	4,60
SE03	48	10	5,4	5	0,75
SAC01	5	5	6,0	5	3,4
SAC02	0,6	2	0,6	4	7,65
SAC03	0,6	1	1,0	3	5,20

Supõe-se que o coeficiente de absorção sonora utilizado no piano, bem como o formato de caixa (com espaço de ar interno) do objeto, so mado ao reduzido volume das salas SE01, SE02 e SE03 tenha prejudicado a simulação para a frequência de 500 Hz, pois para as salas SAC01, SAC02 e SAC03 não se verifica esta deficiência ou ela se apresenta pouco significativa. Da mesma forma, a existência de alguma ressonância relacionada às proporções das dimensões das salas pode ter afetados os resultados simulados para esta frequência em particular.

Apesar de algumas imprecisões nos modelos, é possível observar, através das figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.134 que, assim como os dados obtidos das medições os dados das simulações se apresentam em dois grupos distintos para todos os parâmetros, os quais são compostos pelas mesmas salas. Um com as salas com baixo tempo de reverberação, e tratamento acústico em todas as superfícies e outro grupo com as salas com tempo de reverberação mais alto, consideradas vivas, e sem qualquer tipo de tratamento acústico.

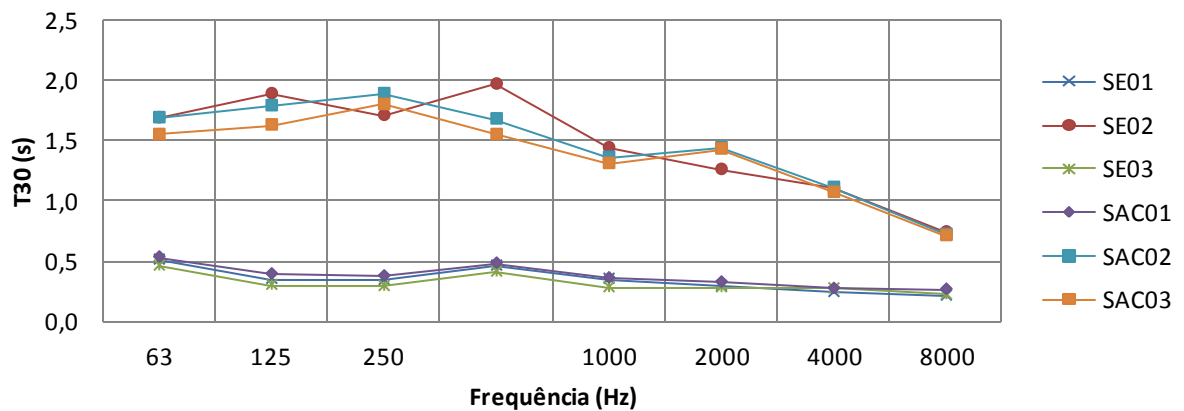


Figura 4.10 – Valores simulados do parâmetro  $T_{30}$ , por frequência, das salas simuladas.

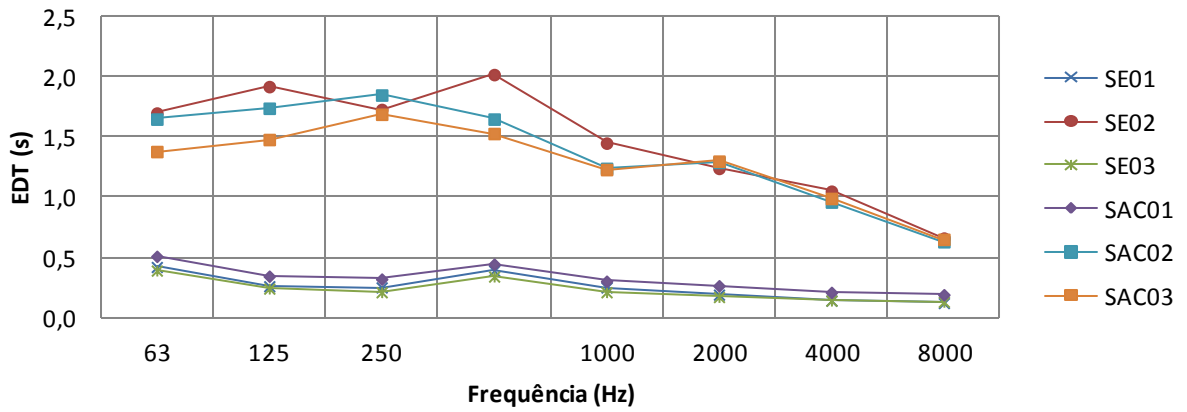


Figura 4.11 - Valores simulados do parâmetro EDT, por frequência, das salas simuladas.

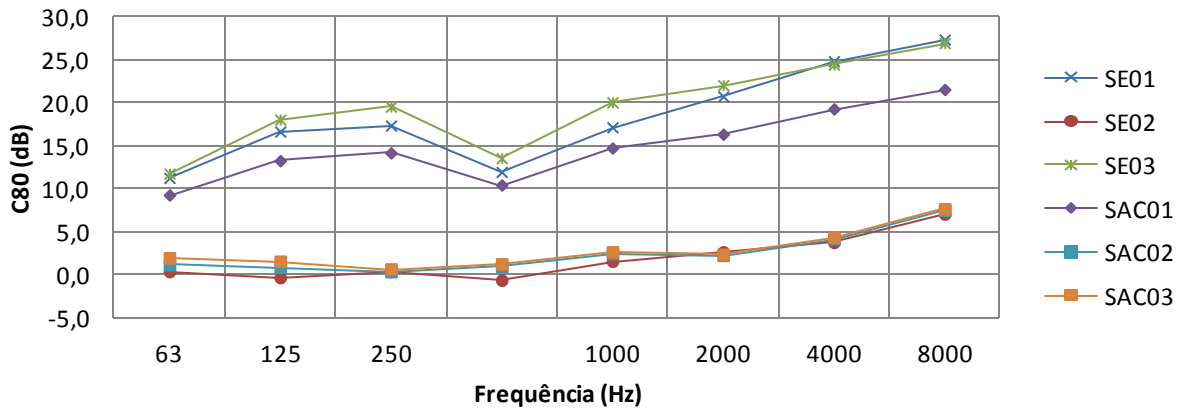


Figura 4.12 - Valores simulados do parâmetro  $C_{80}$ , por frequência, das salas simuladas.

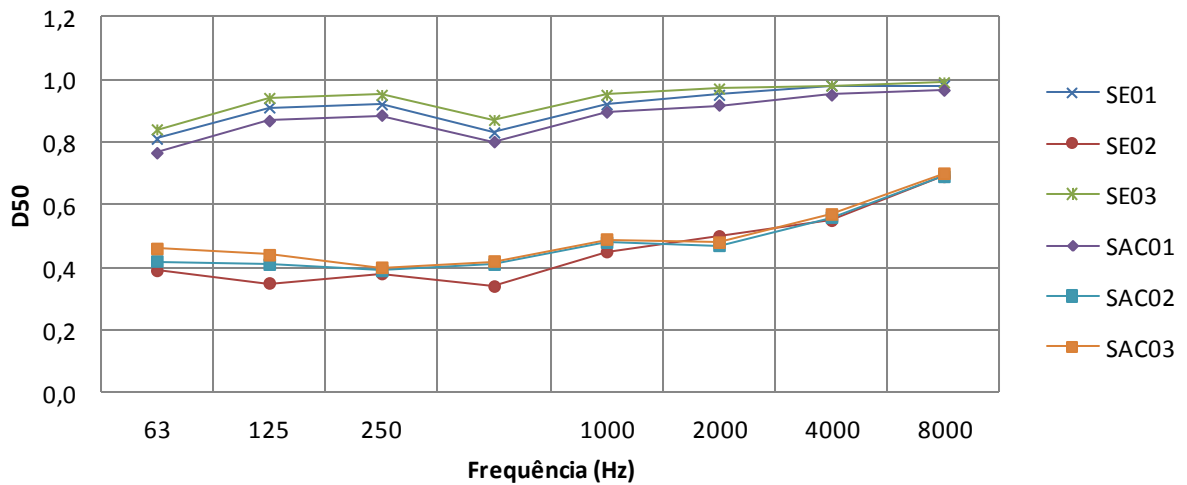


Figura 4.13 - Valores simulados do parâmetro  $D_{50}$ , por frequência, das salas simuladas.

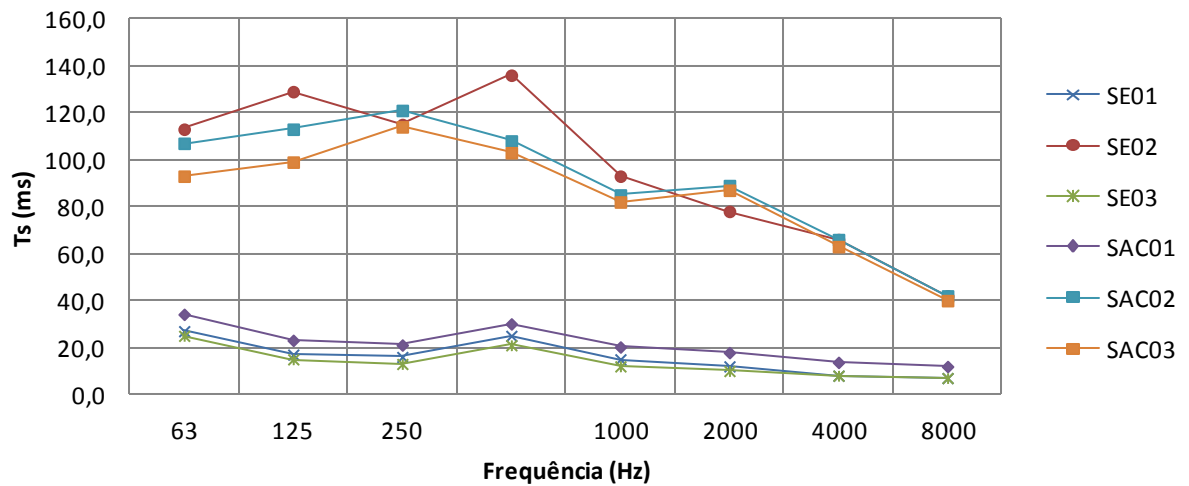


Figura 4.14 - Valores simulados do parâmetro  $T_s$ , por frequência, das salas simuladas.

A dificuldade de encontrar e definir materiais e coeficientes de absorção sonora para os modelos foi o principal problema encontrado nas simulações. A ferramenta se mostrou válida e bastante útil para avaliação acústica de salas, contudo há certa insegurança em relação aos materiais e coeficientes de absorção disponíveis para utilização nos modelos, pois desde a sua composição até a forma de aplicação podem afetar os resultados para os diversos parâmetros.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foram caracterizadas seis salas de prática e ensino musical do curso de música da UFSM, três salas de estudo e três salas de aula coletiva. A aplicação dos questionários foi imprescindível para o reconhecimento das salas mais utilizadas pelos estudantes e professores de música. Além disso, permitiu uma maior proximidade com a linguagem dos músicos e a constatação das suas preferências em relação ao condicionamento acústico de salas para estudo e prática. Verificou-se dificuldade por parte dos músicos para expressar suas percepções a respeito da acústica de salas, bem como certa confusão dos conceitos: condicionamento e isolamento acústico. A análise das descrições obtidas nos questionários mostra que tanto estudantes como professores utilizam os mesmos termos para descrever suas percepções quanto ao comportamento do som dentro dos recintos, caracterizando-os, principalmente em função da reverberação e projeção sonora. Sendo que, as salas consideradas preferidas são avaliadas como tendo reverberação boa ou equilibrada e as salas consideradas ruins são julgadas como sem reverberação ou reverberação excessiva.

As seis salas mais citadas nos questionários - quatro salas consideradas ruins e duas preferidas - foram avaliadas acusticamente através da resposta impulso conforme recomendações da norma ISO 3382:2009. Os resultados das medições confirmaram a opinião dos músicos em relação aos tempos de reverberação. As salas ruins descritas como muito secas têm tempos de reverberação muito baixos, em torno de 0,4 s, e as consideradas com reverberação excessiva têm tempos de reverberação em torno de 1,6 s, o que para uma sala de volume reduzido pode ser considerado muito alto. Foram consideradas adequadas as salas com tempos de reverberação de 0,4 s para 79,9 m<sup>3</sup>, e 1,6 s para 327,85 m<sup>3</sup>.

As salas sem tratamento acústico com tempo de reverberação em torno de 1,6 s, para as frequências de 500 a 1.000 Hz, têm valores de Clareza em torno de 2,0 dB, enquanto as salas com tempo de reverberação mais baixo, em torno de 0,4 s, têm valores de Clareza variando de 15 a 22 dB, para a mesma faixa de frequência. A Definição para

todas as salas apresentou valores acima de 40% e o Tempo Central, para as salas secas, variou em torno de 20 ms e para as salas reverberantes acima de 90 ms, para a faixa de frequência já citada.

Em geral, conforme a análise dos parâmetros acústicos, a maioria das salas aqui estudadas apresenta deficiências em relação ao condicionamento acústico para atividades musicais. Sendo que somente duas das seis salas foram consideradas pela grande maioria como adequadas, sem receber críticas negativas consideráveis.

Os dados obtidos para os parâmetros relacionados ao decaimento de energia ( $C_{80}$ ,  $D_{50}$ ,  $T_s$  e  $G$ ) se mostraram muito distantes dos valores indicados nas referências bibliográficas, porém estas dizem respeito a salas com volumes muito maiores do que os aqui estudados. Nota-se que há carência de valores de referência para salas com volumes abaixo de 500 m<sup>3</sup>. Desta forma, os dados encontrados nesta pesquisa foram considerados adequados ou não de acordo com a comparação dos dados medidos com as descrições obtidas nos questionários.

Quanto a simulação computacional da resposta impulso das salas, foi possível comprovar sua utilidade para predição dos valores relacionados aos parâmetros utilizados para avaliação da qualidade acústica para a faixa de frequência de 63 a 8.000 Hz. Os valores obtidos através da simulação ficaram semelhantes aos valores reais para todos os parâmetros aqui estudados, mantendo, em geral a mesma tendência, e inclusive, se agrupando em dois conjuntos distintos como aconteceu aos valores medidos.

Os resultados relacionados ao tempo de decaimento ( $T_{30}$  e EDT) mostraram-se mais fáceis de controlar, com o programa computacional utilizado, visto que existem ferramentas para estimativas rápidas para o  $T_{30}$ . Porém para as salas que apresentavam mais detalhes de mobiliário e superfícies com material absorvedor sonoro - placas de papelão compensado perfuradas fixadas a 5 cm das paredes, por exemplo - houve certa dificuldade em ajustar os valores para o tempo de reverberação, sendo que os dados para os parâmetros relacionados à energia apresentaram-se bastante próximos dos valores reais, principalmente para a Definição ( $D_{50}$ ) e Tempo Central ( $T_s$ ).

Foi constatado que uma boa precisão dos resultados fornecidos pelos modelos acústicos da simulação computacional depende de dados dos coeficientes de absorção sonora dos diversos materiais componentes de cada sala, especificamente ao painel

absorvedor sonoro e elementos característicos em sala de ensino da música, como foi o caso do piano acústico presente nas salas avaliadas.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

O presente trabalho não tem a pretensão de esgotar o tema proposto, mas sim, iniciar uma investigação a respeito da acústica de salas dedicadas ao estudo da música, que apresentam volume reduzido em relação às salas de concerto comumente estudadas. A fim de ampliar os conhecimentos a respeito do assunto, complementando os resultados aqui obtidos, propõem-se o desenvolvimento dos seguintes assuntos:

- Avaliação subjetiva mais completa, realizada com maior número de estudantes e professores de música, inclusive de outras universidades, definindo suas preferências em relação às salas de estudo e prática musical, bem como entender a linguagem utilizada pelos músicos associando-a com a linguagem técnica da acústica de salas;
- Avaliação experimental com maior número de salas, abordando também parâmetros relacionados à espacialidade e a correlação cruzada interauricular. E, além disso, definir valores de referência para os parâmetros de avaliação da qualidade acústica de salas para música relacionados às salas com volumes reduzidos;
- Avaliar as salas em relação às suas dimensões segundo o método da acústica odulatória;
- Auralização de modelos computacionais de salas de volumes reduzidos, para auxílio na avaliação subjetiva.



## **6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ASTOLFI, A.; CORRADO, V.; GRIGINIS, A. **Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms.** Applied Acoustics, v. 69, 2008.

BALLOU, G. **Handbook for sound engineers.** 3. ed. EUA: Focal Press, 2002

BARRON, M. **Auditorium acoustics and architectural design.** 2. ed. New York: Spon Press, 2010.

BERANEK, L.; **Concert and opera halls: how they sound.** EUA: Acoustical Society of America, 1996.

\_\_\_\_. **Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption.** J. Acoust. Soc. Am., v. 120, 2006.

\_\_\_\_. **Subjective rank-orderings and acoustical measurements for fifty-eight concert halls.** Acta Acustica, v. 89, 2003.

BISTAFA, S.; BRADLEY, J. **Predicting reverberation times in a simulated classroom.** J. Acoust. Soc. Am., v. 108, 2000.

BLANKENSHIP, J.; FITZGERALD, R.; LANE, R. **Comparison of Objective and Subjective Observations on Music Rooms.** J. Acoust. Soc. Am., v.27, 1955.

BRADLEY, J. **Review of objective room acoustics measures and future needs** Applied Acoustics, Applied Acoustics, 2011.

BRADLEY, D.; WANG, L. **Comparison of measured and computer-modeled objective parameters for an existing coupled volume concert hall.** Building Acoustics, Multi-Science, 2007.

BUILDING BULLETIN 93: **Acoustic, Design of Schools**, 2003. Disponível em: <<http://www.teachernet.gov.uk/docbank/index.cfm?id=5640>>. Acesso em: março 2011.

CHRISTENSEN, C. L. **Odeon Room Acoustics Program**, Version 10, User Manual. Universidade Técnica da Dinamarca, 2009.

CHRISTENSEN, C.; NIELSEN, G.; RINDEL, J. **Danish Acoustical Society Round Robin on room acoustic computer modeling**, 2008.

CUSTÓDIO, M. F. **Qualidade sonora através da modelagem numérica e ensaios experimentais no centro de convenções “Centro Sul” de Florianópolis-SC**, 2004, 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

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

EGAN, M. D. **Architectural acoustics**. New York: McGraw-Hill, 1998.

FIGUEIREDO, F. L. **Parâmetros acústicos subjetivos: Critérios para avaliação da Qualidade acústica de salas de música**, 2005. 259 p. Dissertação (Mestrado em Musicologia) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

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

GRAY, C. **Music buildings, rooms and equipment**. Music Educator National Conference, EUA: 1966.

HALL, D. E. **Musical Acoustics**. 3. ed. EUA: Brooks/Cole, 2002.

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

ISO 3382 - 2: 2008 Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 2: Reverberation time in ordinary rooms

KUTTRUFF, H. **Room acoustics**. 5. ed. New York: Spon Press, 2000.

LAMBERTY, D. **Music practice rooms**. Journal of Sound and Vibration, v. 69, 1980.

LANE, R. **Study of Acoustical**, Requirements for Teaching Studios and Practice Rooms in Music School Buildings. J. Acoust. Soc. Am., v. 27, 1955.

LLINARES G.; LLOPIS R. A.; SANCHO J. V. **Acústica arquitectónica y urbanística**. Valência: Universidade Politécnica de Valência, 1996.

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

MANNIS, J. A. **Design de difusores sonoros a partir de processo serial**: adequação acústica de pequenas salas à performance e audição musical. 2008. 396 p. Tese (Doutorado em Música) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

MASIERO, B. S.; IAZZETTA, F. **Estudo e implementação de métodos de medição de resposta impulsiva**. In: I Seminário Música Ciência Tecnologia: Acústica Musical, São Paulo, 2004.

MARROS, F. ; PAUL, S. ; VERGARA, E. F. M. **Avaliação da confiabilidade de um modelo computacional**. In: Semana Acadêmica da UFSM, Santa Maria: 2010.

MARROS, F. ; VERGARA, E. F. M.; DORNELES, L. F. F. **Compatibilidade de modelos geométricos com programa de simulação acústica**. In: I Congresso de Iniciação Científica e Pós- Graduação do Sul do Brasil, Florianópolis: 2010.

MELO, V. et al. **Aperfeiçoamento do software RAIOS para simulação numérica de acústica de salas com inclusão de modelo modal para baixas frequências**. Acústica e Vibrações, v. 38, 2007.

MEYER, J. **Acoustics and the Performance of Music**. Applied Mathematics and Mechanics, 2009.

MULLER, S. **Medir o STI**. In: II Seminário de Música, Ciência e Tecnologia, São Paulo, 2005. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0\\_00000102005000100001&lng=en&nrm=iso](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0_00000102005000100001&lng=en&nrm=iso)> Acesso em: agosto, 2010.

NEUBAUER, R.; KOSTEK, B. **Prediction of the reverberation time in rectangular rooms with non-uniformly distributed sound absorption.** Archives of Acoustics, 2001.

OLSSON, O.; SÖDERSTRÖM, D.; MESTRE, J. S. de. **Sound levels for trumpet players in practice rooms.** In: BNAM, 2010.

PASSERO, C.; ZANNIN, P. **Statistical comparison of reverberation times measured by the integrated impulse response and interrupted noise methods, computationally simulated with ODEON software, and calculated by Sabine, Eyring and Arau-Puchades formulas.** Applied Acoustics, 2010.

RINDEL, J. **The use of computer modeling in room acoustics.** Journal of Vibro engineering, 2000.

RINDEL, J.; SHIOKAWA, H.; CHRISTENSEN, C.; GADE, A. **Comparisons between computer simulations of room acoustical parameters and those measured in concert halls.** J. Acoust. Soc. Am., v. 105, 1999.

RYHERD, E. **Acoustic design of music rehearsal rooms.** Physics Today, v. 61, 2008.

SÁ, L. R. de. **Acústica e educação em música: estudo qualitativo para sala de ensaio e prática de instrumento e canto,** 2010. 153 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SAHER, K.; ÖZIS, F.; RINDEL, J. **Assessment of musical instrument performances for practice rooms by musicians.** In: 19<sup>th</sup> International Congress on Acoustics, Madrid: 2007.

TREIN, P. **A linguagem musical.** Porto Alegre: Mercado aberto, 1986.

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

VORLÄNDER, M. **International Round Robin on Room Acoustical Computer Simulations**  
In: 15<sup>th</sup> International Congress on Acoustics Trondheim, Norway: 1995.

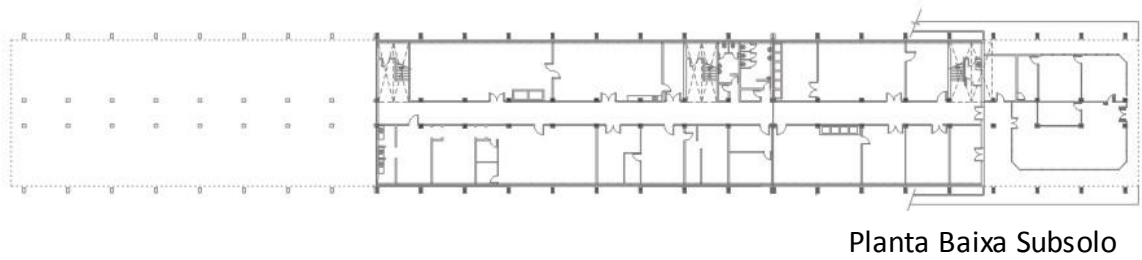
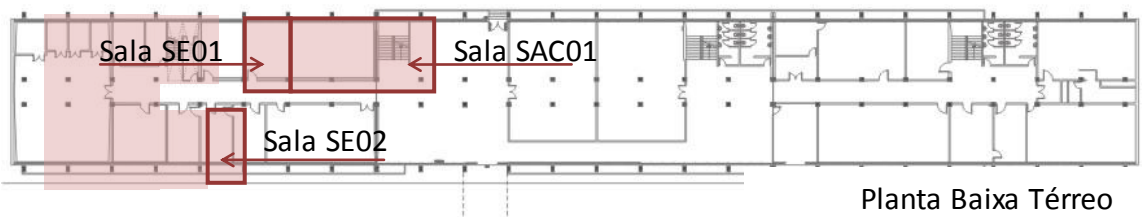
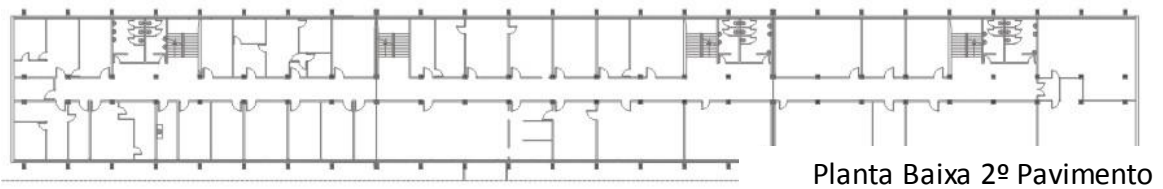
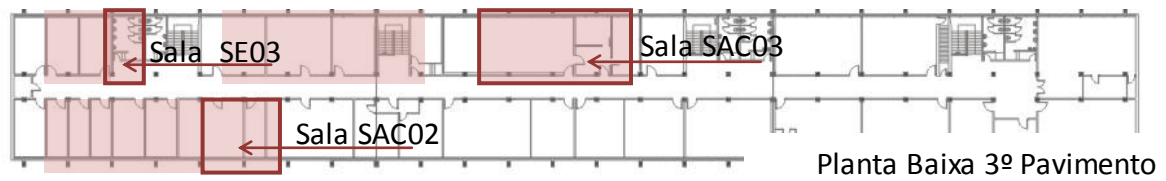


WANG, L.; VIGEANT, M. **Evaluations of output from room acoustic computer modeling and auralization due to different sound source directionalities.** Applied Acoustics, v. 69, 2008.

ZHA, X.; FUCHS, H.; DROTLEFF, H. **Improving the acoustic working conditions for musicians in small spaces.** Applied Acoustics, v. 63, 2002.



**Anexo A - Plantas baixas do edifício 40, referente ao CAL, com salas do curso da Música, em destaque.**





**Apêndice A - Questionário aplicado aos estudantes e professores do curso de Música da UFSM.**

**QUESTIONÁRIO SOBRE A ACÚSTICA DAS SALAS DE ESTUDO/PRÁTICA MUSICAL**

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Este trabalho servirá de embasamento à dissertação de mestrado da acadêmica Fernanda Marros. Visa compilar informações sobre a percepção dos estudantes e professores de música a respeito da acústica interna das salas disponíveis nas instituições para estudo/prática, bem como salas de aula coletiva.

Atenção!

- O questionário deve ser respondido de acordo com a sua opinião a respeito da acústica das salas disponíveis no curso de música da sua universidade.
- Solicita-se que sejam ignoradas questões relativas à qualidade dos instrumentos disponíveis ou mobiliário presente no ambiente.

**1 IDENTIFICAÇÃO**

1. Universidade: \_\_\_\_\_
2. Instrumento que estuda: \_\_\_\_\_
3.  Aluno                       Professor do curso de música
4. Se aluno,  
 Bacharelado               Licenciatura
5. Em que semestre do curso se encontra: \_\_\_\_\_

**2 EXPERIÊNCIA MUSICAL**

1. Há quanto tempo você toca este instrumento? \_\_\_\_\_
2. Toca outros instrumentos? Se sim, quais? \_\_\_\_\_
3. Toca em algum:  
Grupo               Qual? \_\_\_\_\_  
Orquestra         Qual? \_\_\_\_\_  
Nenhum

## SALAS PARA PRÁTICA/ESTUDO

1. Indique as três salas do curso de música da UFSM que você considera melhor acusticamente e três salas que você considera péssimas acusticamente e avalie-as numa escala de 1 a 10, onde 1 representa uma sala muito ruim e 10 representa uma sala ótima.

### Preferidas

Nº da sala \_\_\_\_\_ Nota ( )

Porque? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Nº da sala \_\_\_\_\_ Nota ( )

Porque? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Nº da sala \_\_\_\_\_ Nota ( )

Porque? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### Ruins

Nº da sala \_\_\_\_\_ Nota ( )

Porque? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Nº da sala \_\_\_\_\_ Nota ( )

Porque? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Nº da sala \_\_\_\_\_ Nota ( )

Porque? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

2. Você já esteve em uma sala que considera ideal do ponto de vista acústico? Se sim, porque a considera ideal?

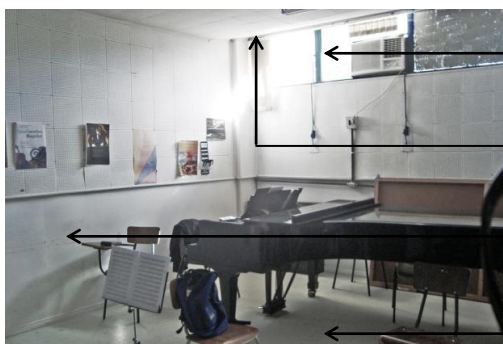
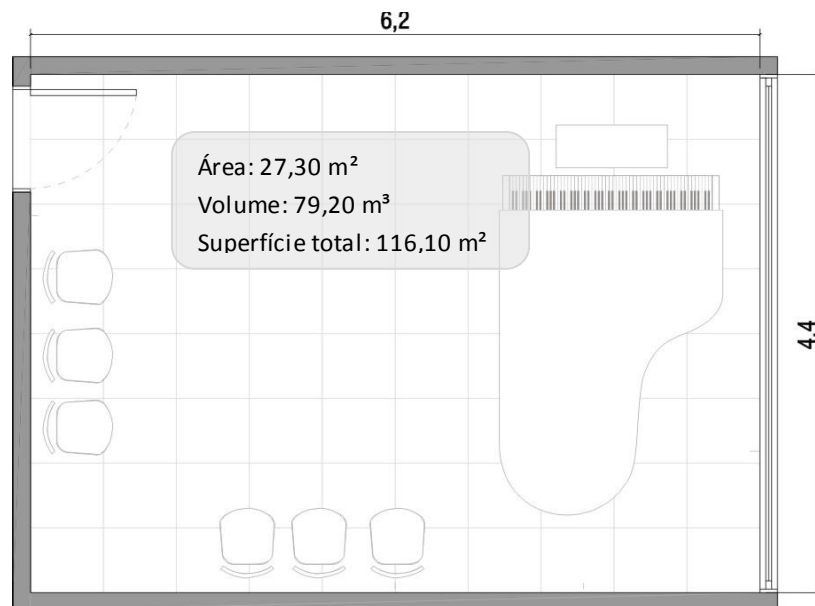
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Apêndice B – Planta baixa e descrição de materiais das salas de estudo e de aula coletiva.

### Sala de estudo SE01



**Esquadria metálica com vidro simples**

Área: 3,0 m<sup>2</sup>

**Forro com material absorvedor**

Área: 27,30 m<sup>2</sup>

**Chapa de MDF 5mm de espessura a 5 cm da parede**

Área: 6,80 m<sup>2</sup>

**Piso vinílico**

Área: 27,30 m<sup>2</sup>



**Material absorvedor**

Área: 31,80 m<sup>2</sup>

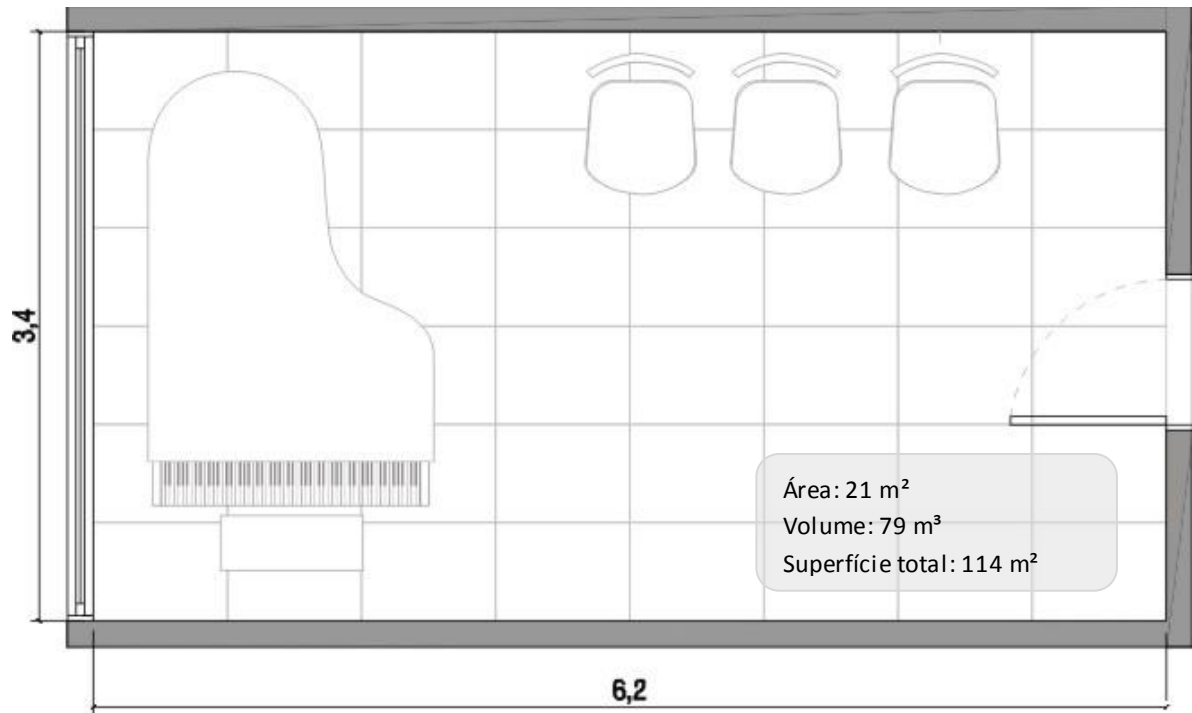
**Porta madeira**

Área: 1,90 m<sup>2</sup>

**Placas gesso acartonado fixada a 5 cm da parede**

Área: 21m<sup>2</sup>

## Sala de estudo SE02



### Forro de laje de concreto

Área: 21m<sup>2</sup>

### Parede em alvenaria

Área: 65,35 m<sup>2</sup>

### Persiana vertical sobre esquadria metálica com vidro simples

Área janela: 4,75 m<sup>2</sup>

Área persiana: 7,0 m<sup>2</sup>

### Porta madeira

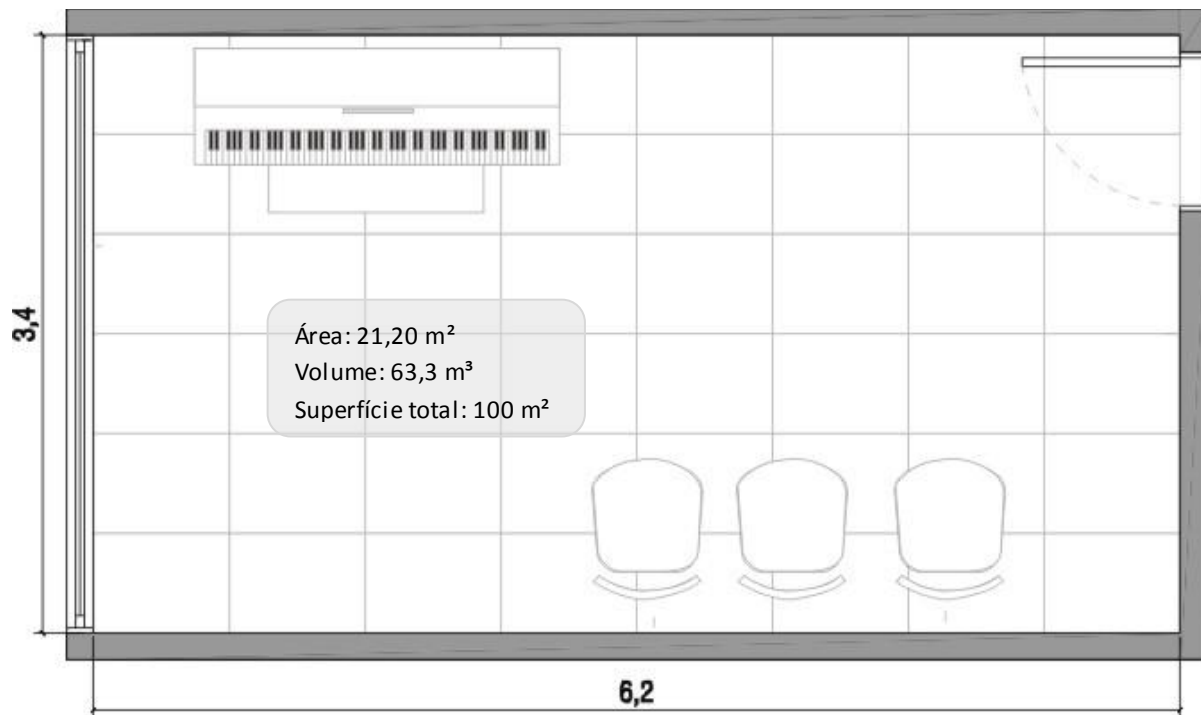
Área: 1,90 m<sup>2</sup>

### Piso vinílico

Área: 21m<sup>2</sup>



### Sala de estudo SE03



**Material absorvedor**

Área: 55,20 m<sup>2</sup>

**Forro com material absorvedor**

Área: 21,20 m<sup>2</sup>

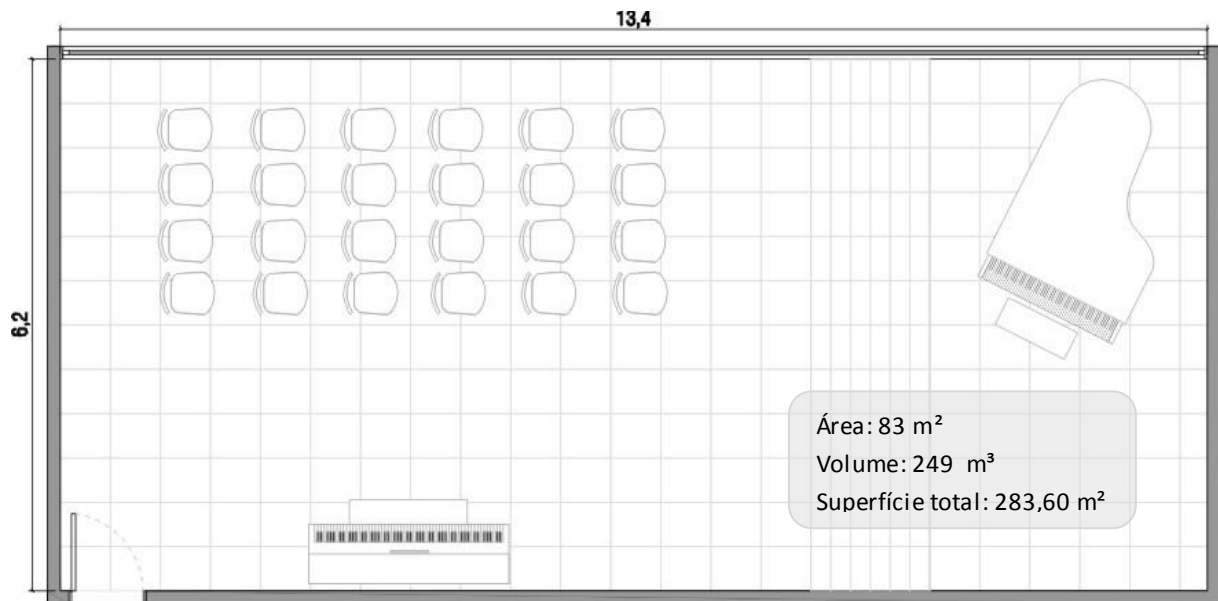
**Esquadria metálica com vidro simples**

Área: 2,40 m<sup>2</sup>

**Piso parquet**

Área: 21,20 m<sup>2</sup>

## Sala de estudo SAC01



### Carpete de baixa espessura

Área: 18,60 m<sup>2</sup>

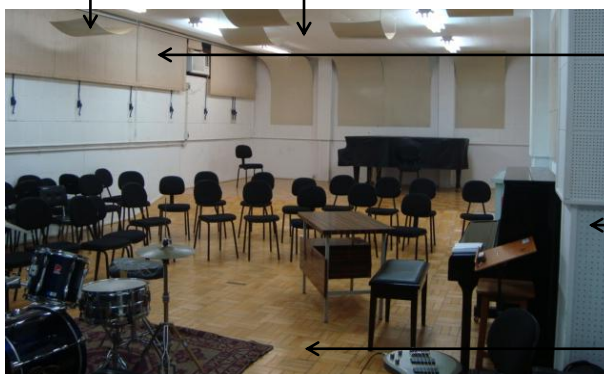
### Porta de madeira

Área: 1,90 m<sup>2</sup>

### Placas metálicas

### Forro com material absorvedor

Área: 83 m<sup>2</sup>



### Persiana vertical sobre esquadria metálica com vidro simples

Área janela: 9,40 m<sup>2</sup>

Área persiana: 12,00 m<sup>2</sup>

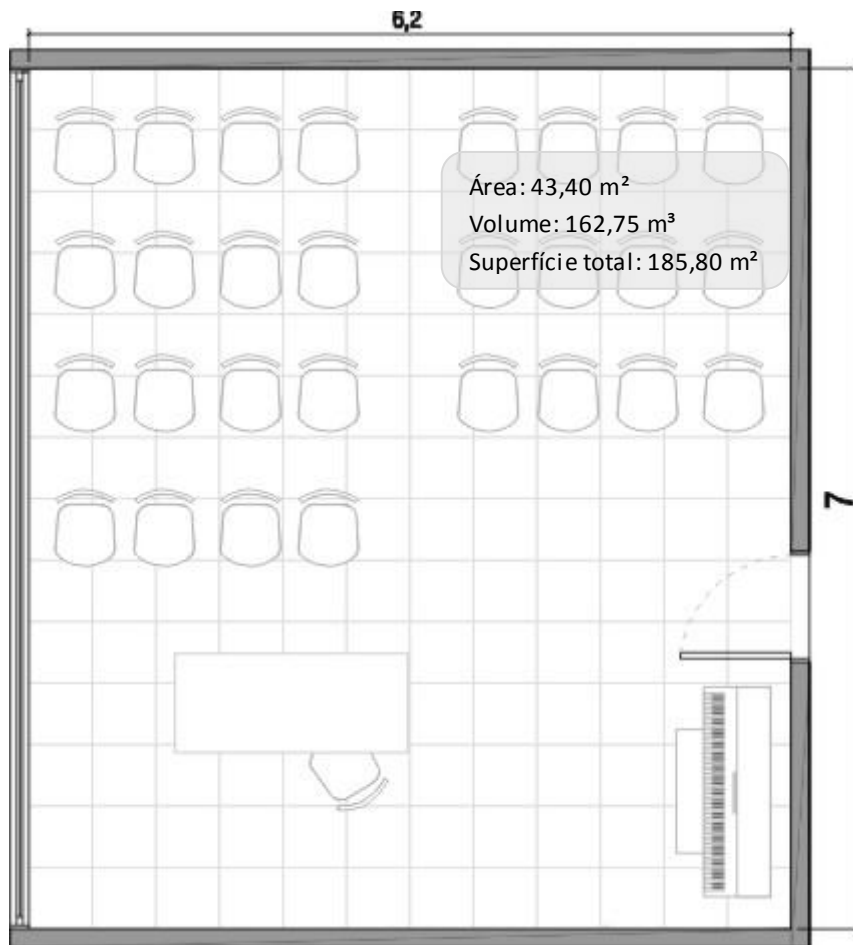
### Material absorvedor

Área: 87,70 m<sup>2</sup>

### Piso parquet

Área: 83 m<sup>2</sup>

## Sala de estudo SAC02



### Esquadria metálica com vidro simples

Área janela: 9,80 m<sup>2</sup>

### Cortina blackout

Área: 13,30 m<sup>2</sup>

### Parede em alvenaria

Área: 87,30 m<sup>2</sup>

### Porta de madeira

Área: 1,90 m<sup>2</sup>

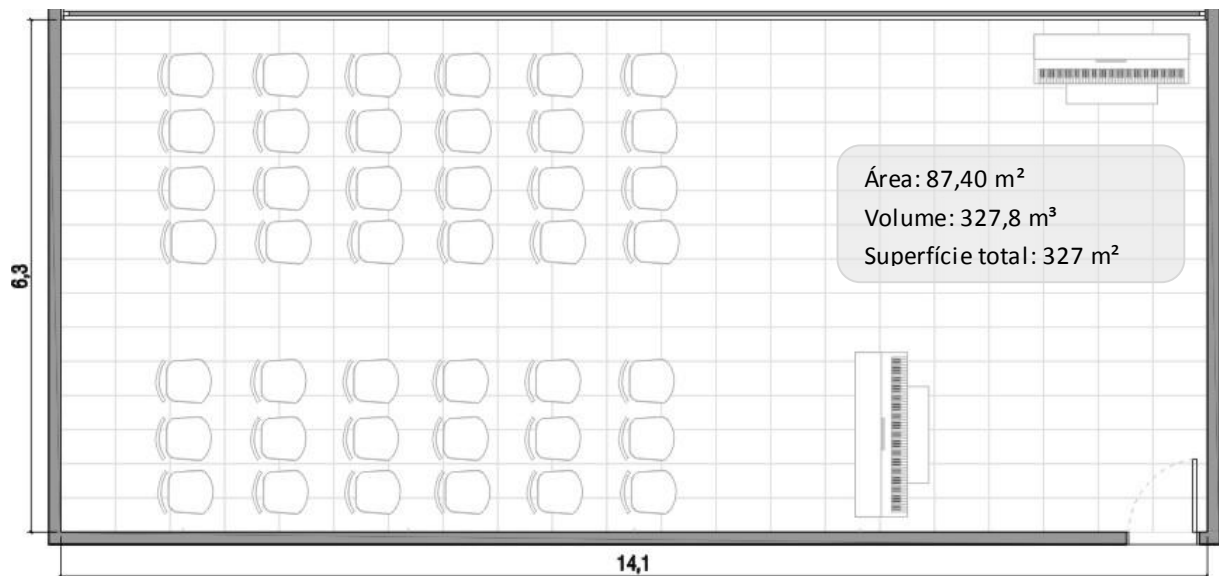
### Forro de laje de concreto

Área: 43,40 m<sup>2</sup>

### Piso parquet

Área: 43,40 m<sup>2</sup>

### Sala de estudo SAC03



← **Forro de laje de concreto**

Área janela: 87,40 m<sup>2</sup>

← **Parede em alvenaria**

Área: 112 m<sup>2</sup>

← **Chapa de MDF 5mm de espessura a 5 cm da parede**

Área janela: 18,60 m<sup>2</sup>

↑ **Cortina *blackout* sobre esquadria**

**Metálica com vidro simples**

Área janela: 19,70 m<sup>2</sup>

Área cortina: 26,80 m<sup>2</sup>

← **Porta de madeira**

Área: 1,90 m<sup>2</sup>

← **Piso parquet**

Área: 87,40 m<sup>2</sup>

**Apêndice C - Opinião dos estudantes e professores de música a respeito das seis salas selecionadas: de estudo e de aula coletiva.**

**Sala SE01**

<b>Opinião positiva</b>	<b>Opinião negativa</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Possui um pouco mais de eco em relação as outras, o que pode distorcer um pouco, mas não influencia o som;</li> <li>▪ Tem acústica seca e é pequena, ideal para ensaiar pequenos grupos de câmara e solo (2);</li> <li>▪ Boa reverberação (2);</li> <li>▪ Boa projeção sonora (2);</li> <li>▪ Tem menor reverberação mas o som viaja mais;</li> <li>▪ Possui isolamento razoável, ajuda a transmitir o som do instrumento;</li> <li>▪ Proporciona um som cheio sem fazer eco;</li> <li>▪ É uma sala muito boa que ressoa bem e consegue projetar o som do instrumento;</li> <li>▪ Reverbera muito;</li> <li>▪ Tem um pouco mais de reverberação o que proporciona um som mais cheio sem fazer eco.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Acústica ruim</li> </ul>

Quadro C. 1 - Sala de ensaio SE01

## Sala SE02

Opinião positiva	Opinião negativa
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ É pequena e tem uma boa ressonância ideal para ouvir e avaliar os níveis de intensidade do meu instrumento;</li> <li>▪ Apesar de muito reverberante é mais confortável em relação ao retorno do som;</li> <li>▪ Embora não tenha isolamento acústico é uma sala que soa bem, com harmônicos;</li> <li>▪ Sala com muita reverberação, ideal para estudar com instrumento de baixa projeção;</li> <li>▪ As paredes são livres de material isolante acústico, o pé-direito bastante alto, gerando bastante reverberação;</li> <li>▪ Boa reverberação (2);</li> <li>▪ É uma sala que possui uma boa reverberação, que permite que o som se propague mais e conseqüentemente melhora a qualidade;</li> <li>▪ Tem uma quantidade legal de reverberação, que valoriza o som;</li> <li>▪ O som do instrumento se propaga com maior facilidade, o retorno sonoro é maior;</li> <li>▪ Tem bom retorno auditivo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Muita reverberação (14);</li> <li>▪ Não se entende o que está sendo tocado;</li> <li>▪ Possui eco (3);</li> <li>▪ Sem potência;</li> <li>▪ Não possui projeção sonora;</li> <li>▪ Ressoa demais;</li> <li>▪ Não possui isolamento (3);</li> <li>▪ Som “embola” demais.</li> </ul>

Quadro C. 2 - Sala de ensaio SE02

## Sala SE03

Opinião positiva	Opinião negativa
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ O aluno percebe todos os erros;</li> <li>▪ Como todas as salas com isolamento acústico dá condições de ouvir todos os problemas de técnica que tenho com o instrumento;</li> <li>▪ Pequena e com pouco ruído;</li> <li>▪ Tem isolamento acústico;</li> <li>▪ Acústica boa para estudar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Muito seca (4)</li> <li>▪ Acústica ruim (2)</li> <li>▪ Não favorece o piano;</li> <li>▪ Pouco espaço;</li> <li>▪ Não tem reverberação (2)</li> <li>▪ É uma sala de estudo e aula de instrumento. É relativamente boa para estudar, pois é seca e faz com que a gente busque mais potência na emissão. No entanto, podia ter mais ambiência para haver um pouco mais de interação do instrumento com o ambiente.</li> </ul>

Quadro C. 3 - Sala de ensaio SE03

## Sala SAC01

Opinião positiva	Opinião negativa
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Acústica, tratamento acústico e isolamento acústico muito bom;</li> <li>▪ É grande, o som é mais seco, bom para m instrumento como o acordeon. Porém o som sai da sala;</li> <li>▪ Poucos harmônicos, boa reverberação;</li> <li>▪ Um pouco seca demais, mas boa (2);</li> <li>▪ Sala deixa o som seco, melhor para perceber questões como afinação do instrumento;</li> <li>▪ Boa para estudo;</li> <li>▪ Boa para piano;</li> <li>▪ Boa para recitais;</li> <li>▪ Espalha bem o som;</li> <li>▪ Boa sala para coral;</li> <li>▪ Acústica apropriada para instrumentos de bastante intensidade sonora;</li> <li>▪ Bom isolamento, porém muito seca;</li> <li>▪ Bom tamanho e projeção acústica;</li> <li>▪ É um pouco isolada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pouca propagação sonora (2);</li> <li>▪ Não tem reverberação (5);</li> <li>▪ Abafa o som (2);</li> <li>▪ Muito seca (21);</li> <li>▪ Acústica ruim;</li> <li>▪ Pouca reverberação (2);</li> <li>▪ Som se perde;</li> <li>▪ Som ruim principalmente para apresentações;</li> <li>▪ Não ressoa;</li> <li>▪ O som do instrumento parece menor;</li> <li>▪ Seca para concerto, boa para estudo;</li> <li>▪ Muito seca, sem reverberação, o som não viaja, mas para os músicos tocando a impressão é que não é tão ruim;</li> <li>▪ Não tem projeção sonora (2);</li> <li>▪ Sala relativamente grande, projetada para tocar em público, mas com nenhuma ambiência. A sensação é que o instrumento perde tanto potência, quanto qualidade (timbre) dentro desta sala. É uma sala horrível para o fim que é utilizada (recital e estudos).</li> </ul>

Quadro C. 4 - Sala de ensaio SE03



## Sala SAC02

Opinião positiva	Opinião negativa
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Possui boa acústica (2);</li> <li>▪ Boa reverberação (7);</li> <li>▪ Boa propagação sonora (2);</li> <li>▪ Não reverbera demais;</li> <li>▪ Som bastante estridente por conta da falta de material para absorver o som;</li> <li>▪ Reverbera bastante, mas para o violão solo funciona;</li> <li>▪ O som do instrumento parece mais próximo;</li> <li>▪ Ressoa bem;</li> <li>▪ Bastante ambiência;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Muita reverberação (8);</li> <li>▪ Muito eco, difícil perceber a afinação;</li> <li>▪ Não se entende o que está sendo tocado;</li> <li>▪ Pouca reverberação (2);</li> <li>▪ Som se propaga demais;</li> <li>▪ Falta de isolamento (3);</li> <li>▪ O aluno fica com a sensação de que o som está com bastante intensidade, mas se engana.</li> </ul>

Quadro C. 5 - Sala de ensaio SAC02

### Sala SAC03

Opinião positiva	Opinião negativa
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Boa reverberação (7);</li> <li>▪ Boa acústica para concerto;</li> <li>▪ Acústica boa;</li> <li>▪ Não reverbera demais, tem bom retorno;</li> <li>▪ Ressonancia do piano bem definida;</li> <li>▪ Melhor sala para estudo ou recital;</li> <li>▪ Não é nem muito seca, nem muito úmida (2);</li> <li>▪ Reverberação equilibrada;</li> <li>▪ Projeção sonora adequada;</li> <li>▪ Sala com maior ambiência, relativamente boa, por ser maior é boa no sentido de estudar pensando no público.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Muito grande, sem projeção sonora;</li> <li>▪ Um pouco seca.</li> </ul>

Quadro C.6 - Sala de ensaio SAC03

**Apêndice D - Valores médios, mínimos e máximos para os parâmetros acústicos, em função da frequência, obtidos a partir das medições da resposta impulsiva acústica das salas de ensaio e de aula coletiva.**

Tabela D. 1 - Sala de estudo SE01

Parâmetro acústico	Frequência (Hz)							
	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
T <sub>30</sub> (s)	0,58	0,47	0,35	0,37	0,34	0,32	0,29	0,29
	0,97	0,63	0,39	0,39	0,37	0,33	0,31	0,31
	0,40	0,31	0,26	0,35	0,32	0,29	0,27	0,28
EDT (s)	0,63	0,49	0,29	0,35	0,35	0,30	0,31	0,29
	1,12	0,97	0,41	0,51	0,44	0,32	0,37	0,33
	0,38	0,19	0,19	0,27	0,28	0,24	0,27	0,25
C <sub>80</sub> (dB)	8,47	10,45	16,67	14,30	13,88	16,10	16,50	16,89
	12,48	15,61	18,96	15,98	15,21	17,72	17,94	19,24
	3,95	4,64	14,63	11,67	12,57	15,17	15,5	14,55
D <sub>50</sub>	0,75	0,79	0,94	0,88	0,88	0,91	0,91	0,91
	0,82	0,93	1,00	0,93	0,91	0,95	0,93	0,95
	0,58	0,68	0,87	0,79	0,82	0,88	0,86	0,87
T <sub>s</sub> (ms)	52,40	43,70	22,00	24,10	24,50	20,00	20,40	19,40
	69,10	59,50	30,50	32,80	28,80	24,90	26,50	28,20
	38,40	27,40	13,80	20,20	20,70	12,40	15,50	11,60
ST <sub>early</sub>	4,97	4,62	-1,36	-0,82	0,68	-0,87	-0,22	-0,79
	15,11	9,69	5,78	3,11	4,01	2,56	4,82	5,71
	-0,20	-3,33	-7,53	-3,49	-2,08	-4,70	-3,99	-5,24

Figura D. 1 - Valores mínimos, médios e máximos para os diversos parâmetros obtidos para a sala SE01.

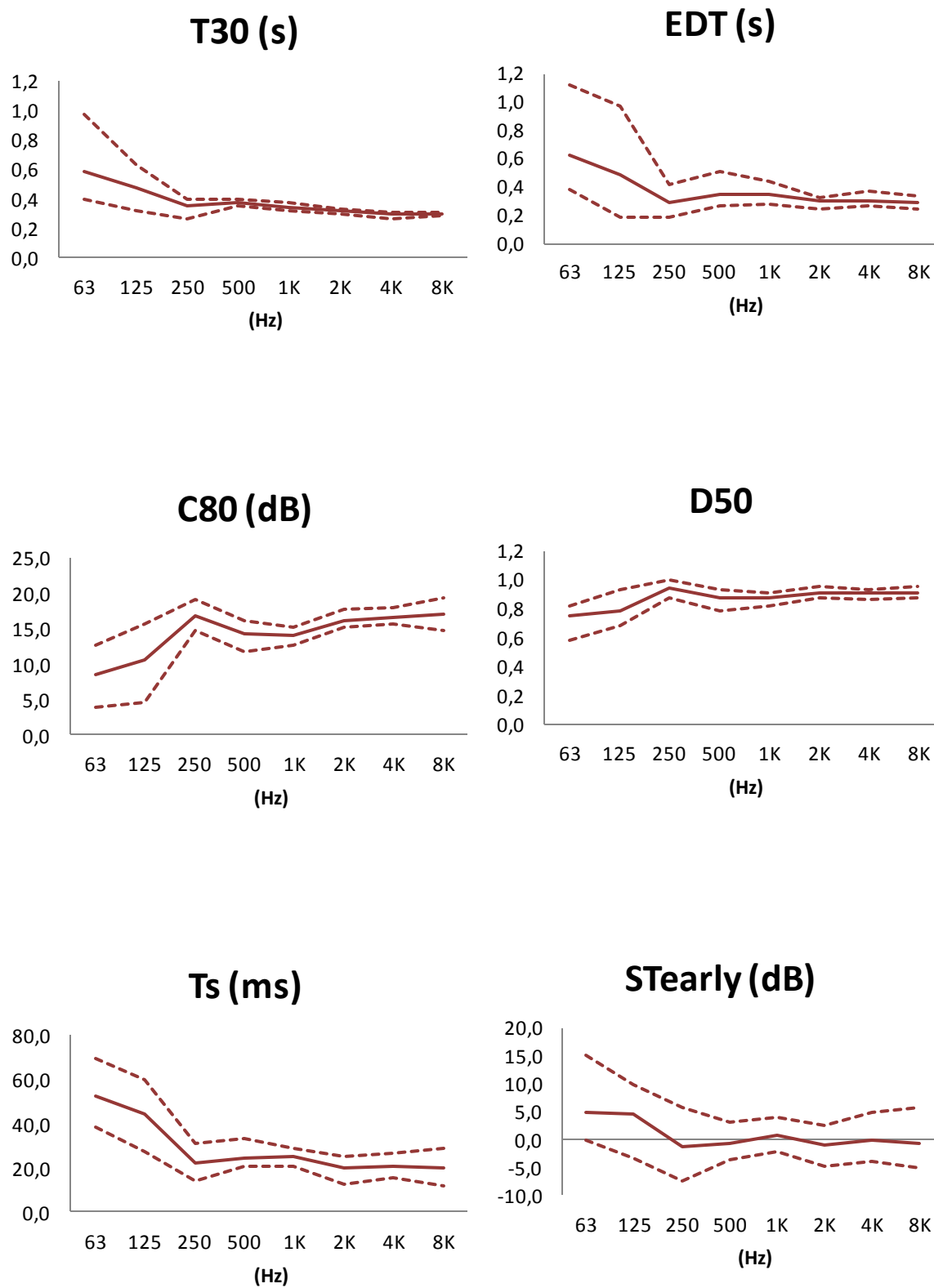


Tabela D. 2 - Sala de estudo SE02

Parâmetro acústico	Frequência (Hz)							
	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
T <sub>30</sub> (s)	1,79	1,93	2,02	1,65	1,56	1,31	1,11	0,87
	2,17	2,15	2,24	1,73	1,61	1,33	1,13	0,89
	1,37	1,82	1,75	1,52	1,50	1,27	1,08	0,85
EDT (s)	1,76	1,82	1,94	1,60	1,61	1,26	1,07	0,79
	2,00	2,36	2,23	1,92	1,71	1,35	1,17	0,87
	1,31	1,57	1,57	1,39	1,53	1,18	0,99	0,72
C <sub>80</sub> (dB)	-0,51	-1,48	-0,73	0,65	0,86	1,63	2,64	5,21
	3,76	0,19	1,53	1,46	1,50	2,55	3,11	5,97
	-6,56	-3,79	-2,47	-0,65	-0,13	0,91	1,97	4,71
D <sub>50</sub>	0,34	0,30	0,33	0,40	0,40	0,44	0,48	0,59
	0,64	0,40	0,43	0,47	0,47	0,49	0,52	0,64
	0,24	0,15	0,19	0,27	0,32	0,39	0,44	0,54
T <sub>s</sub> (ms)	141,00	148,00	138,80	111,30	108,50	90,20	76,90	55,90
	185,60	165,60	164,60	125,70	118,30	95,60	81,30	60,80
	87,50	125,20	107,90	102,90	99,50	82,70	73,50	51,70
ST <sub>early</sub>	8,38	11,2	4,99	5,23	5,71	6,59	5,66	4,76
	12,84	16,78	9,78	7,81	7,73	9,80	7,36	6,90
	1,43	6,50	0,18	2,40	3,69	3,47	3,94	1,92

Figura D. 2 - Valores mínimos, médios e máximos para os diversos parâmetros obtidos para a sala SE02.

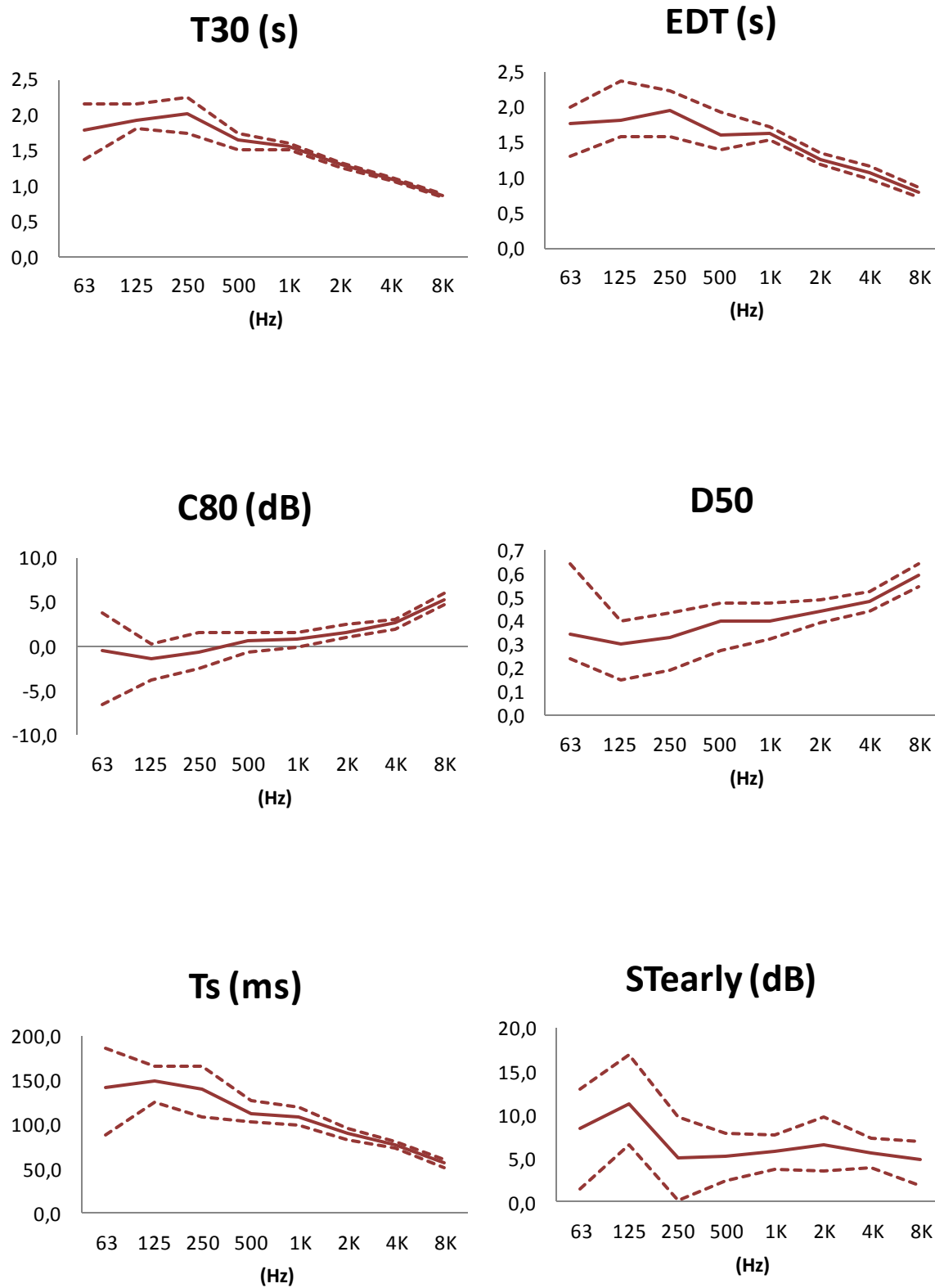


Tabela D. 3 - Sala de estudo SE03

Parâmetro acústico	Frequência (Hz)							
	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
T <sub>30</sub> (s)	0,46	0,26	0,23	0,25	0,22	0,23	0,25	0,27
	0,82	0,54	0,27	0,27	0,24	0,24	0,27	0,28
	0,22	0,01	0,21	0,22	0,20	0,22	0,22	0,25
EDT (s)	0,41	0,29	0,21	0,20	0,21	0,21	0,25	0,25
	0,61	0,41	0,30	0,31	0,26	0,26	0,29	0,30
	0,20	0,11	0,08	0,17	0,16	0,19	0,24	0,21
C <sub>80</sub> (dB)	12,03	20,28	23,37	21,48	22,76	21,59	18,84	19,08
	18,66	31,18	25,65	22,82	23,48	23,08	20,64	20,99
	6,11	17,58	19,14	19,59	21,7	19,77	17,07	17,91
D <sub>50</sub>	0,80	0,92	0,98	0,96	0,96	0,95	0,93	0,94
	0,95	1,00	0,98	0,98	0,98	0,97	0,95	0,95
	0,57	0,89	0,96	0,93	0,94	0,93	0,91	0,92
T <sub>s</sub> (ms)	37,80	26,20	16,20	16,00	15,50	16,60	18,60	16,00
	42,70	34,30	21,90	18,20	18,70	20,60	21,40	21,70
	31,50	20,70	11,70	13,20	13,40	11,60	14,60	11,00
ST <sub>early</sub>	2,46	1,43	-5,28	-3,75	-2,77	-1,54	-0,72	-2,8
	8,43	8,20	-0,45	-1,69	-0,78	2,45	1,10	1,83
	-1,68	-4,02	-10,73	-6,61	-4,83	-6,02	-3,28	-6,23

Figura D. 3 - Valores mínimos, médios e máximos para os diversos parâmetros obtidos para a sala SE03.

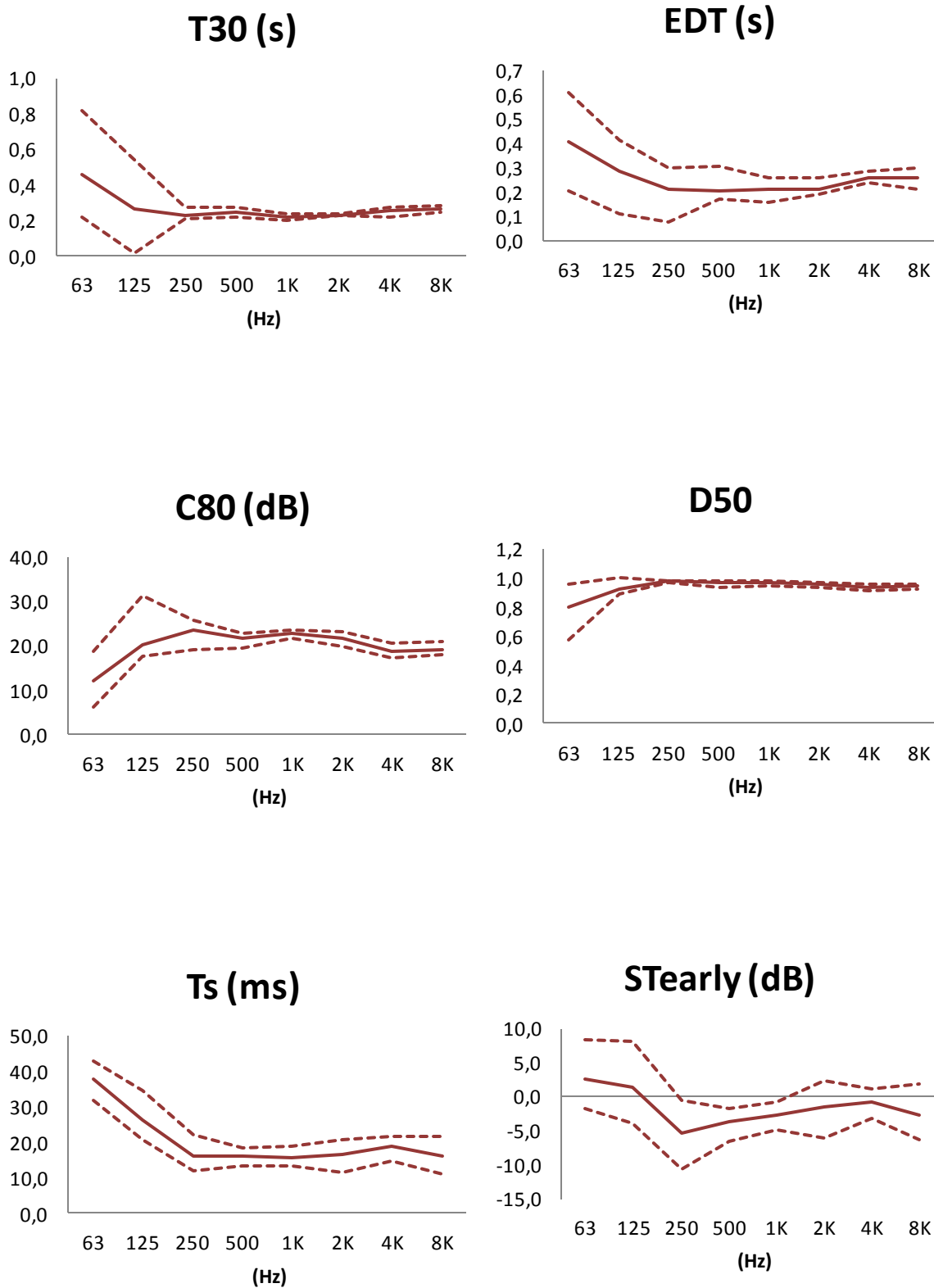




Tabela D. 4 - Sala de estudo SAC01

Parâmetro acústico	Frequência (Hz)							
	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
T <sub>30</sub> (s)	1,36	0,57	0,37	0,38	0,36	0,37	0,38	0,36
	1,89	0,82	0,42	0,44	0,41	0,46	0,43	0,39
	0,53	0,24	0,29	0,25	0,29	0,31	0,30	0,31
EDT (s)	1,21	0,40	0,30	0,33	0,31	0,30	0,30	0,29
	1,90	0,70	0,50	0,50	0,40	0,40	0,40	0,40
	0,20	0,15	0,13	0,10	0,12	0,17	0,18	0,18
C <sub>80</sub> (dB)	2,82	11,24	14,87	14,79	14,91	14,83	14,77	15,16
	10,11	20,10	20,27	18,71	18,62	19,4	19,58	19,24
	-2,49	5,86	9,97	10,77	10,69	11,45	12,15	12,79
D <sub>50</sub>	0,52	0,83	0,89	0,89	0,90	0,90	0,90	0,91
	0,87	0,96	0,96	0,97	0,97	0,96	0,97	0,96
	0,09	0,64	0,79	0,79	0,83	0,84	0,85	0,83
T <sub>s</sub> (ms)	91,10	35,90	26,70	22,60	20,90	20,80	21,10	19,40
	127,20	49,30	39,90	31,90	27,60	27,70	28,10	29,30
	39,80	19,80	15,40	12,30	9,10	8,70	8,30	9,70
ST <sub>early</sub>	1,69	2,01	0,34	- 1,38	- 1,39	- 1,19	- 0,66	- 1,53
	10,71	10,50	13,43	6,42	2,20	2,78	4,37	4,02
	-10,52	-7,68	-7,49	-7,60	-9,28	-7,55	-7,93	-6,88

Figura D. 4 - Valores mínimos, médios e máximos para os diversos parâmetros obtidos para a sala SAC01.

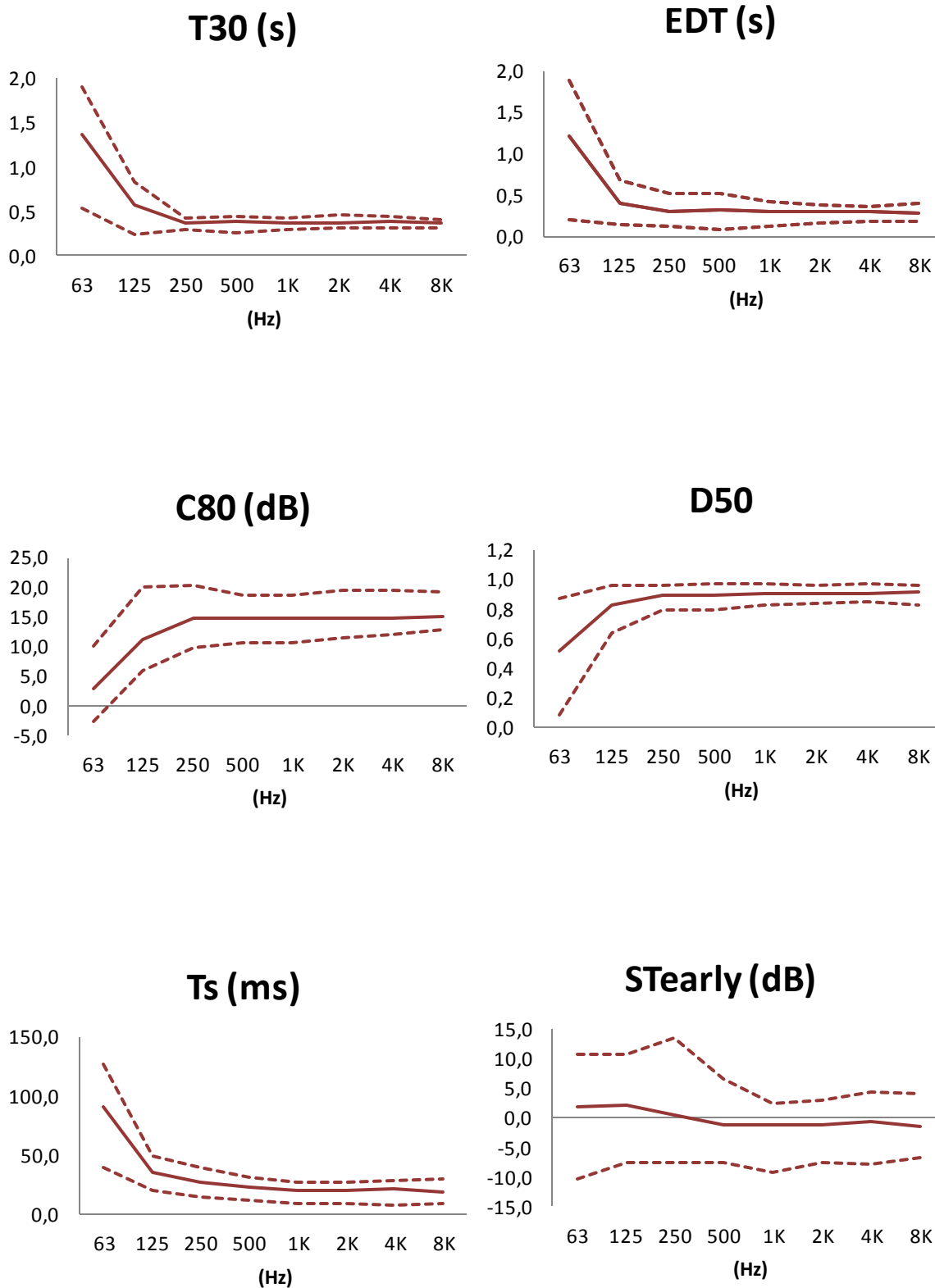


Tabela D. 5 - Sala de estudo SAC02

Parâmetro acústico	Frequência (Hz)							
	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
T <sub>30</sub> (s)	3,00	2,59	2,10	1,74	1,29	1,14	1,11	0,87
	4,82	3,40	2,27	1,85	1,42	1,17	1,14	0,94
	2,06	1,73	1,89	1,61	1,16	1,03	1,06	0,79
EDT (s)	2,47	2,13	2,14	1,69	1,27	1,15	1,10	0,84
	4,11	2,58	2,52	2,04	1,38	1,22	1,25	0,97
	1,63	1,47	1,80	1,40	1,07	1,05	0,99	0,75
C <sub>80</sub> (dB)	-3,03	-2,27	-1,43	0,08	1,92	2,79	3,04	4,79
	3,81	1,07	0,48	1,72	4,08	4,51	6,07	6,14
	-9,05	-5,30	-3,02	-1,51	0,64	1,54	1,38	2,50
D <sub>50</sub>	0,24	0,25	0,3	0,35	0,45	0,49	0,51	0,60
	0,50	0,50	0,41	0,44	0,62	0,64	0,71	0,68
	0,07	0,12	0,22	0,22	0,36	0,41	0,39	0,44
T <sub>s</sub> (ms)	197,40	172,90	153,70	120,60	87,70	77,80	74,30	57,40
	319,10	226,30	188,90	137,50	99,80	90,50	90,10	76,4
	120,30	128,40	133,70	105,70	68,40	57,50	45,10	46,4
ST <sub>early</sub>	9,74	9,32	4,95	6,28	4,76	5,11	4,86	3,94
	24,28	19,54	13,73	11,02	8,70	10,72	8,68	8,45
	0,73	4,69	-1,93	1,39	-0,68	-0,53	-2,54	0,91

Figura D. 5— Valores mínimos, médios e máximos para os diversos parâmetros obtidos para a sala SAC02.

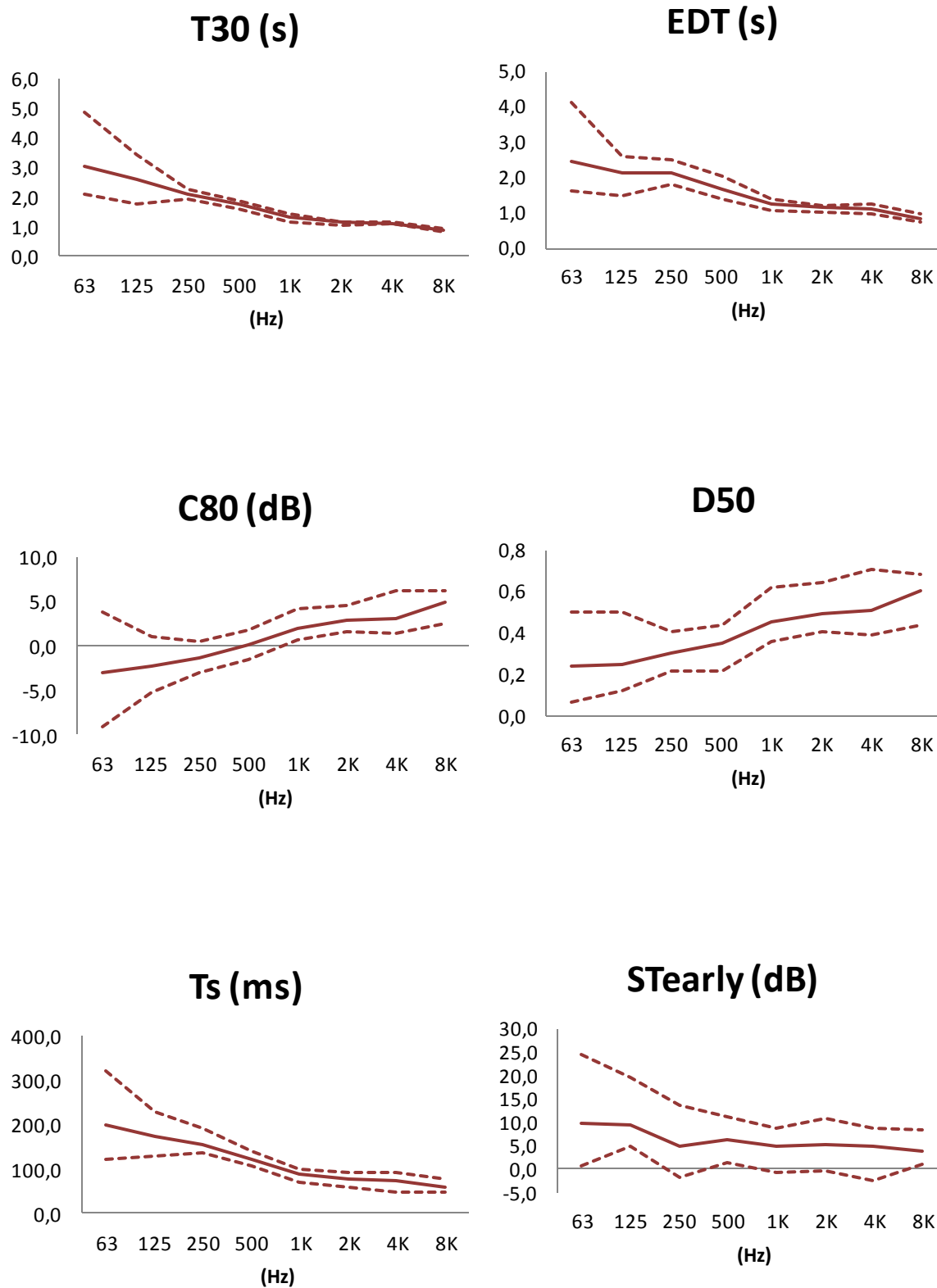
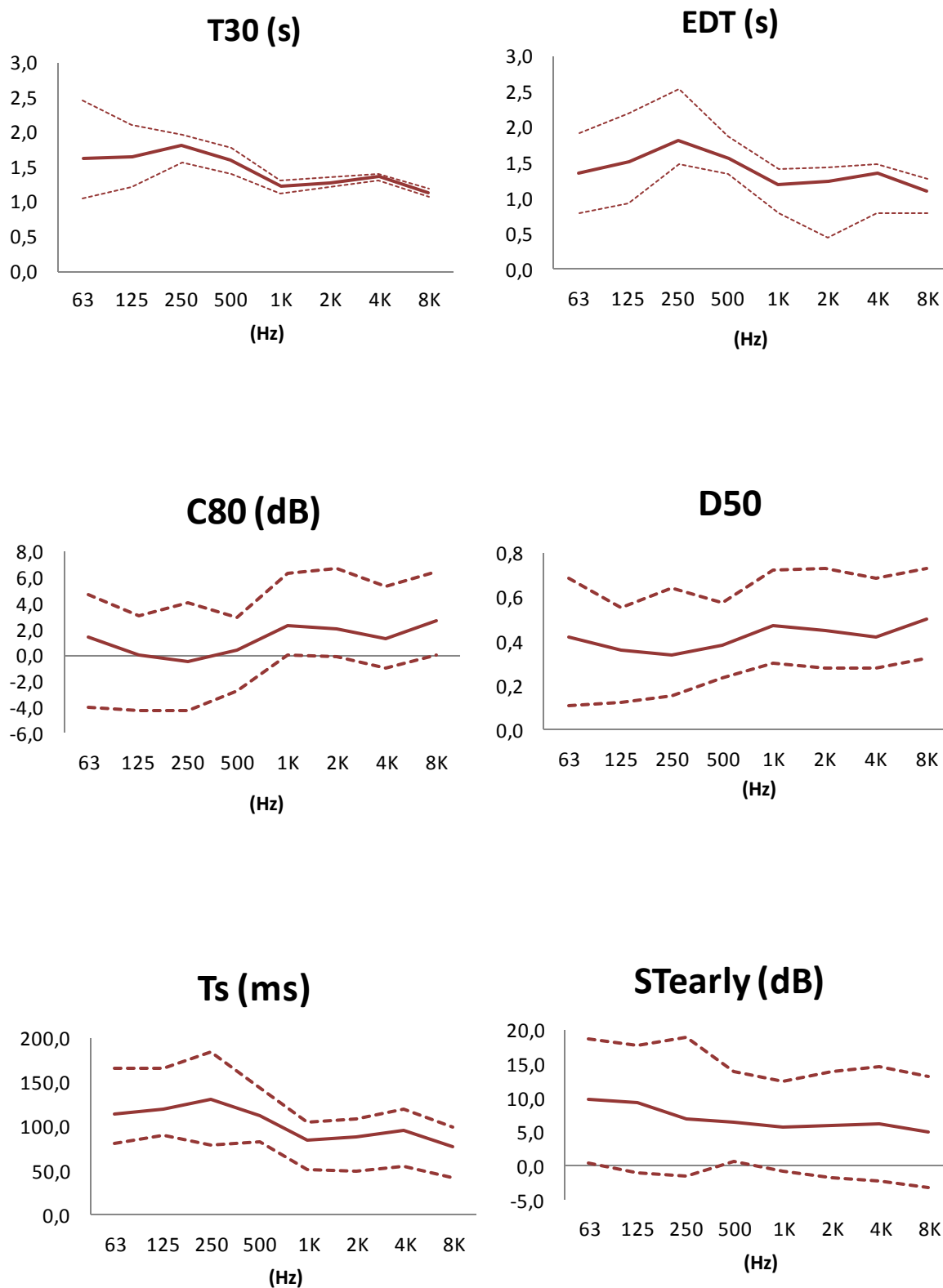


Tabela D. 6 - Sala de estudo SAC03

Parâmetro acústico	Frequência (Hz)							
	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
T <sub>30</sub> (s)	1,64	1,66	1,82	1,61	1,23	1,29	1,37	1,13
	1,91	2,19	2,53	1,86	1,41	1,43	1,48	1,26
	0,79	0,93	1,48	1,33	0,78	0,44	0,78	0,79
EDT (s)	1,35	1,50	1,80	1,55	1,18	1,23	1,34	1,11
	2,46	2,11	1,98	1,77	1,31	1,36	1,41	1,19
	1,05	1,21	1,58	1,39	1,13	1,21	1,31	1,07
C <sub>80</sub> (dB)	1,44	-0,03	-0,48	0,35	2,27	2,00	1,28	2,7
	4,68	2,98	4,05	2,89	6,35	6,74	5,36	6,48
	-3,97	-4,20	-4,23	-2,81	0,08	-0,12	-0,93	-0,01
D <sub>50</sub>	0,42	0,36	0,34	0,38	0,47	0,45	0,42	0,50
	0,68	0,55	0,64	0,57	0,72	0,73	0,68	0,73
	0,11	0,12	0,15	0,23	0,3	0,28	0,28	0,32
T <sub>s</sub> (ms)	112,9	118,4	130,2	111,8	83,6	87,3	95,20	76,40
	165,90	164,90	182,80	142,50	104,00	107,80	119,00	99,60
	80,10	89,70	78,20	81,40	51,40	49,00	54,50	41,70
ST <sub>early</sub>	9,78	9,16	6,92	6,34	5,69	5,84	6,16	4,82
	18,61	17,70	18,82	13,87	12,28	13,87	14,51	13,08
	0,32	-1,10	-1,53	0,51	-0,88	-1,80	-2,43	-3,33

Figura D. 6 – Valores mínimos, médios e máximos para os diversos parâmetros obtidos para a sala SAC03.



**Apêndice E - Materiais aplicados nos modelos computacionais e seus respectivos coeficientes de absorção sonora, em banda de oitava.**

Materiais	Frequência (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Porta	0,14	0,14	0,1	0,06	0,08	0,1	0,1	0,1
Janela	0,35	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,04
Quadro	0,2	0,2	0,28	0,26	0,09	0,12	0,11	0,11
Absorvedor perfurado a 5 cm da parede	0,24	0,43	0,5	0,31	0,53	0,66	0,83	0,83
Absorvedor perfurado aplicado direto na parede	0,01	0,01	0,01	0,05	0,08	0,07	0,07	0,07
Gesso	0,14	0,14	0,10	0,06	0,04	0,04	0,03	0,03
MDF aplicado a 5 cm da parede	0,2	0,2	0,28	0,26	0,09	0,12	0,11	0,11
Piano	0,32	0,32	0,43	0,12	0,07	0,07	0,11	0,11
Cadeiras de plástico	0,10	0,06	0,10	0,10	0,20	0,30	0,20	0,20
Cadeiras de madeira	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
Banqueta	0,40	0,40	0,50	0,58	0,61	0,58	0,50	0,50
Cortina	0,05	0,05	0,06	0,39	0,63	0,70	0,73	0,73
Piso vinílico	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05
Piso parquet	0,20	0,20	0,15	0,10	0,10	0,05	0,10	0,10

## Apêndice F – Simulações e concordância com os resultados medidos

Como explicado no item 3.4, após a confecção dos modelos geométricos no *software* Google Sketchup e exportação para o *software* Odeon, foram aplicados os materiais com seus respectivos coeficientes de absorção sonora em cada superfície do modelo. Como as características das superfícies freqüentemente se repetem em todas as salas, utilizaram-se sempre, em todas as salas, os mesmos materiais e coeficientes de absorção sonora, os quais se encontram tabelados no apêndice F.

Em sua maioria, os materiais utilizados na simulação foram extraídos da biblioteca do *software* Odeon. Os valores dos coeficientes de absorção sonora do material absorvedor perfurado foram obtidos por meio de medições acústicas na câmara reverberante em escala do Grupo de Vibrações e Acústica da Universidade Federal do Pará, realizadas com amostras retiradas das salas do curso de Música da UFSM. Os valores para os coeficientes de absorção foram obtidos em bandas de 1/3 de oitava, de 350 a 4.000 Hz. Para aplicação no modelo foram extraídos os valores das bandas centrais e combinados aos resultados obtidos pelo cálculo matemático do coeficiente do material, isolando-se o  $\alpha$  na equação de Sabine.

O ajuste dos materiais e verificação do valor estimado do  $T_{30}$  foi executado para cada sala antes de rodar a simulação, as ferramentas de estimativa rápida, permitem o cálculo do  $T_{30}$  (através do método de Schröder) ou  $T_{60}$  (a partir das equações de Sabine, Eyring e Arau-Puchades), além de dados a respeito da distribuição da absorção sonora e dos materiais. Estas estimativas são obtidas em apenas alguns segundos, já o tempo de simulação da resposta impulso da sala e obtenção dos demais parâmetros utilizados para a avaliação da qualidade acústica de salas varia de acordo com as dimensões das superfícies, detalhamento do modelo, número de raios, número de *Jobs*, entre outros fatores. A simulação das salas SE01, SE02 e SE03 levou em torno de 4 horas para ser finalizada, para a sala SAC02 foram 8 horas, e para as salas SAC01 e SAC02 as simulações demoraram por volta de 42 horas.

Os resultados comparativos obtidos para os parâmetros:  $T_{30}$ , EDT,  $C_{80}$ ,  $D_{50}$ ,  $T_s$  e STI, para as seis salas simuladas, serão apresentados nos itens a seguir.



## Tempo de reverberação ( $T_{30}$ )

Em geral, para os tempos de reverberação ( $T_{30}$ ), os valores obtidos nas simulações ficaram muito próximos dos valores medidos, para todas as seis salas, contudo, isto era esperado, visto que as ferramentas de cálculo rápido permitem estimar o  $T_{30}$  antecipadamente, e os valores finais normalmente não apresentam grandes alterações.

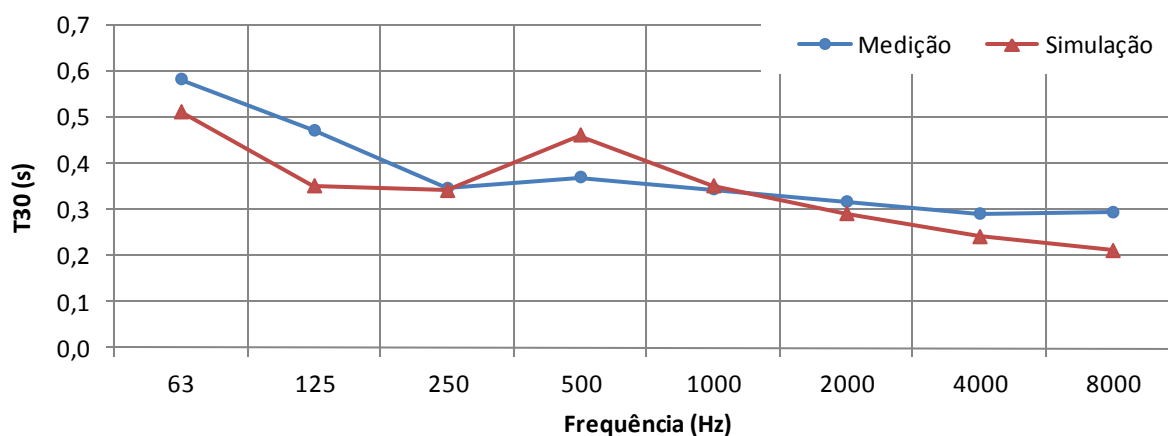


Figura F. 1- Comparação entre os valores de  $T_{30}$  medidos e simulados para a SE01.

A figura 4.10 mostra a comparação entre os valores medidos e simulados do  $T_{30}$  para a sala SE01, os valores simulados seguem a mesma tendência dos valores medidos, decrescendo à medida que aumenta a frequência, porém permanecem abaixo dos valores reais, em torno de 0,01 a 0,12 segundos para todas as frequências, exceto na faixa de 500 Hz, onde se observa um aumento de 0,09 segundos do  $T_{30}$  simulado em relação ao real.

O JND para o  $T_{30}$ , de acordo com a referência apresentada no item 2.5.3, é de 5% para as médias frequências (500 e 1.000 Hz). Desta forma, conclui-se que o valor de  $T_{30}$  simulado para 500 Hz está acima do sugerido pelo JND, enquanto o valor para 1.000 Hz está abaixo, com 3% de diferença, como pode ser visto na tabela 4.6.

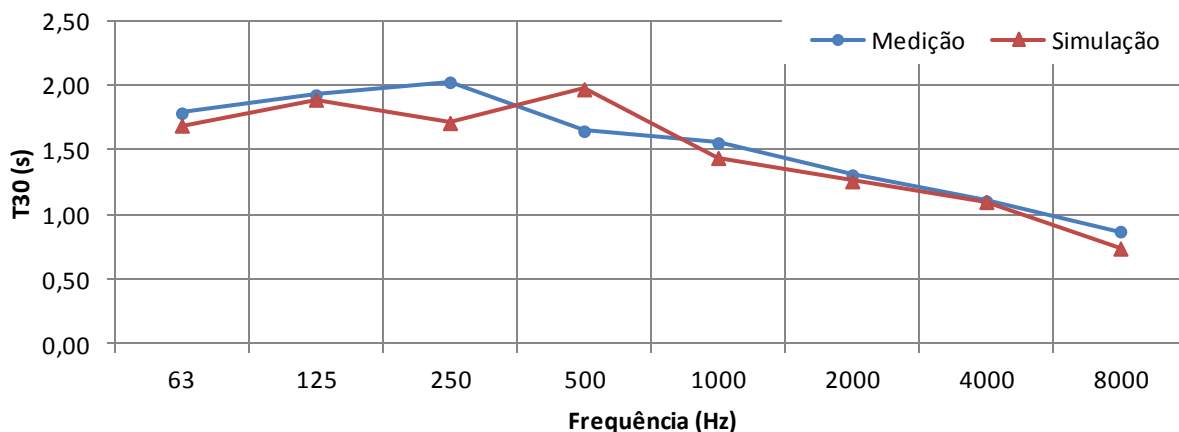


Figura F. 2 - Comparação entre os valores de  $T_{30}$  medidos e simulados para a SE02.

Os valores de  $T_{30}$ , simulados e medidos, para a sala SE02, apresentados na figura 4.11, são muito semelhantes para todas as frequências, com exceção das bandas de 250 e 500 Hz, variando entre 0,01 e 0,13 segundos de diferença. Em 250 Hz há uma diminuição do valor simulado em relação ao valor real, enquanto em 500 Hz ocorre o contrário, porém mantendo a mesma diferença, de aproximadamente 0,30 segundos.

Na figura 4.12 podem-se observar os valores obtidos na simulação da sala SE03. Nota-se uma maior diferença  $T_{30}$  na banda de frequência de 500 Hz, chegando a 0,16 segundos. Nas outras bandas a diferença entre o valor de  $T_{30}$  medido e simulado não supera 0,06 segundos.

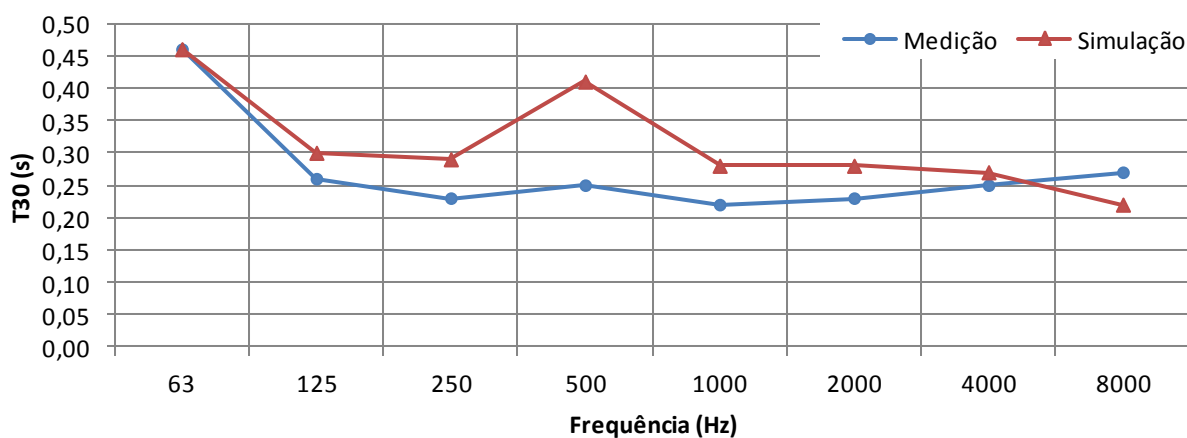


Figura F. 3 - Comparação entre os valores de  $T_{30}$  medidos e simulados para a SE03

A comparação entre os valores de  $T_{30}$  simulados e medidos para as salas de aula coletiva SAC01, SAC02 e SAC03 são apresentados nas figuras 4.13, 4.14 e 4.15, respectivamente. Em todas as três salas, os valores simulados para as frequências de 500 a 1.000 Hz estão bastante próximos dos valores reais, alcançando uma porcentagem de erro de 0,6 a 3% como pode ser visualizado na tabela 4.6.

Nas salas SAC01 e SAC02 os valores simulados apresentam-se bastante distantes dos valores reais para as baixas frequências (63 e 125 Hz), chegando a ser 0,9 e 1,31 segundos menor, para a banda de 63 Hz, na sala SAC01 e SAC02, respectivamente. Na sala SAC03 esta discrepância não ocorre para as baixas frequências, mas sim para as altas, a partir de 2.000 Hz, chegando a 0,42 segundos em 8.000 Hz.

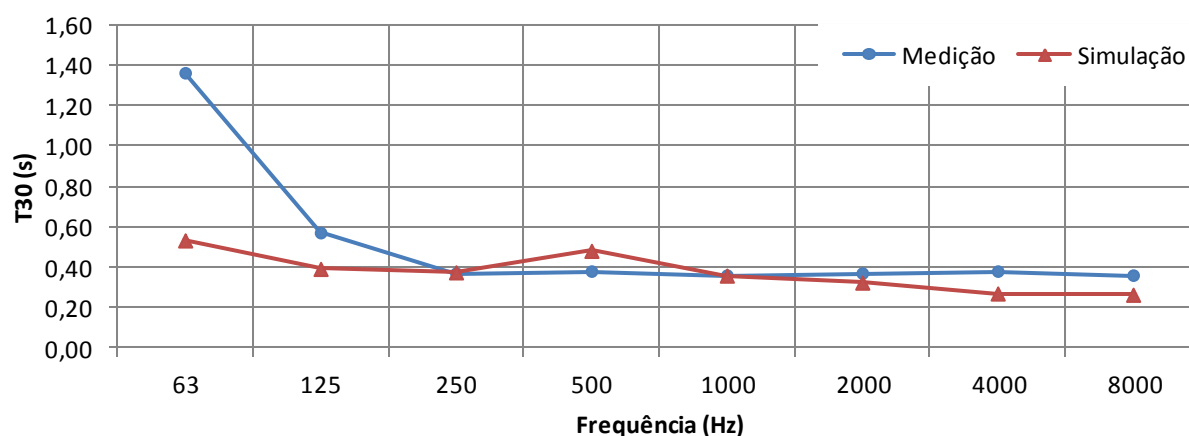


Figura F. 4- Comparação entre os valores de  $T_{30}$  medidos e simulados para a SAC01

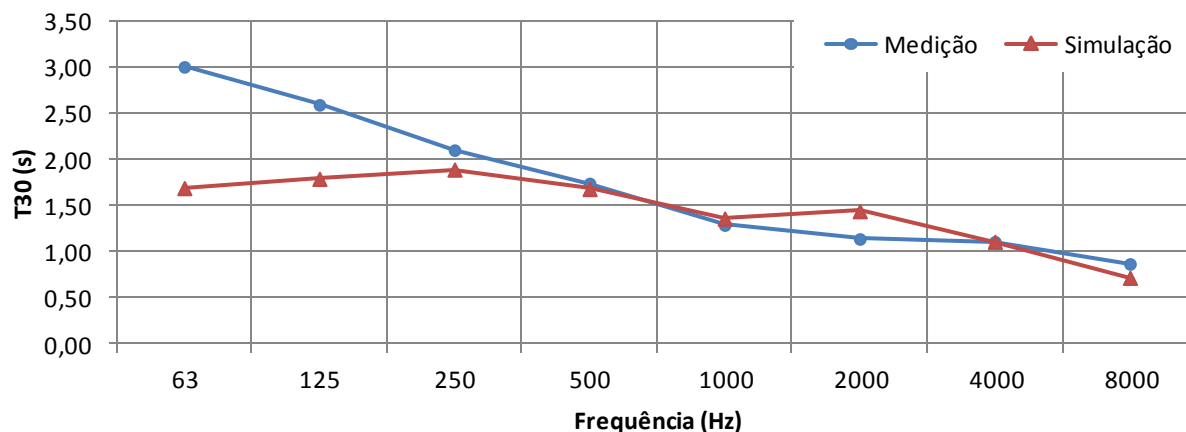


Figura F. 5 - Comparação entre os valores de  $T_{30}$  medidos e simulados para a SAC02

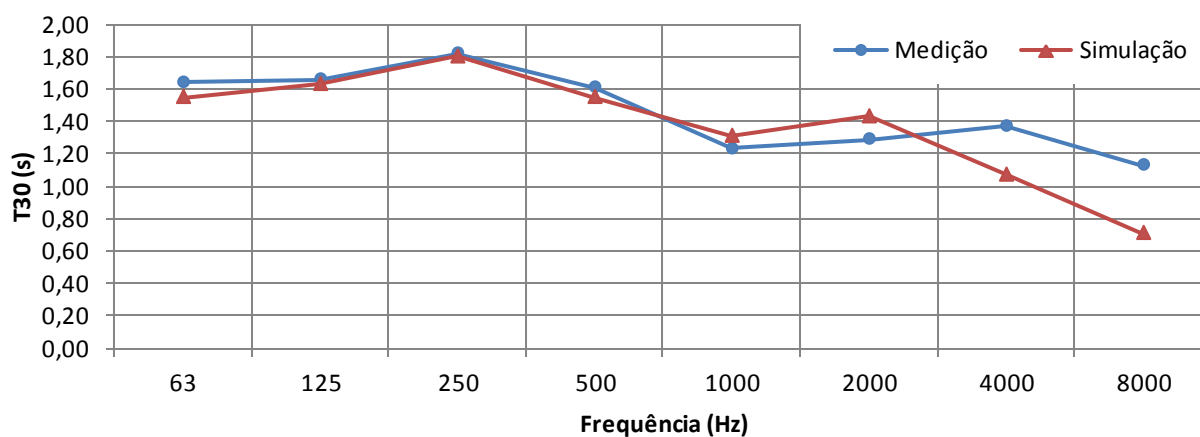


Figura F. 6 - Comparação entre os valores de  $T_{30}$  medidos e simulados para a SAC03.

A partir da observação das figuras 4.10, 4.11 e 4.12, referentes ao  $T_{30}$  para as salas de estudo SE01, SE02 e SE03 nota-se que os valores simulados apresentam a mesma tendência que os valores medidos em relação às frequências, porém percebe-se uma variação muito grande do valor simulado em relação ao real para a faixa de frequência de 500 Hz nas três salas, o que não ocorre com as salas de aula coletiva SAC01, SAC02 e SAC03.

As salas SE01, SE02 e SE03 têm em comum um volume médio em torno de  $73 \text{ m}^3$ , a distribuição dos materiais pelas superfícies é similar somente nas salas SE01 e SE03, pois estas salas contêm o mesmo material absorvedor sonoro, enquanto a sala SE02 não contém nenhum tipo de tratamento acústico. Da mesma

forma as salas SAC01, SAC02 e SAC03 apresentam em comum um volume médio de  $246,50 \text{ m}^3$ , contudo, novamente, a composição dos materiais entre as salas não é a mesma, pois duas delas não contêm tratamento acústico, enquanto uma apresenta tratamento em todas as superfícies. Assim, infere-se que o problema apresentado principalmente na frequência de 500 Hz para os modelos das salas SE01, SE02 e SE03, esteja relacionado com a distribuição dos materiais e coeficientes de absorção sonora, ou com as dimensões dos contornos das mesmas.

#### 4.1.1 Tempo de decaimento inicial (EDT)

As comparações entre os valores de EDT medidos e simulados são apresentadas, a seguir, para as seis salas selecionadas. Em geral, os valores simulados alcançaram valores muito próximos dos valores reais obtidos através das medições da resposta impulsiva.

A figura 4.16 exibe os valores de EDT da sala SE01, observa-se que nas bandas de 63 e 125 Hz os valores simulados apresentam-se distantes dos valores medidos, com uma diferença em torno de 0,2 segundos menor, este comportamento se repete nas bandas de 4.000 e 8.000 Hz. A divergência diminui na faixa de frequência de 250 a 2.000 Hz, com uma diferença média em torno de 0,07 segundos.

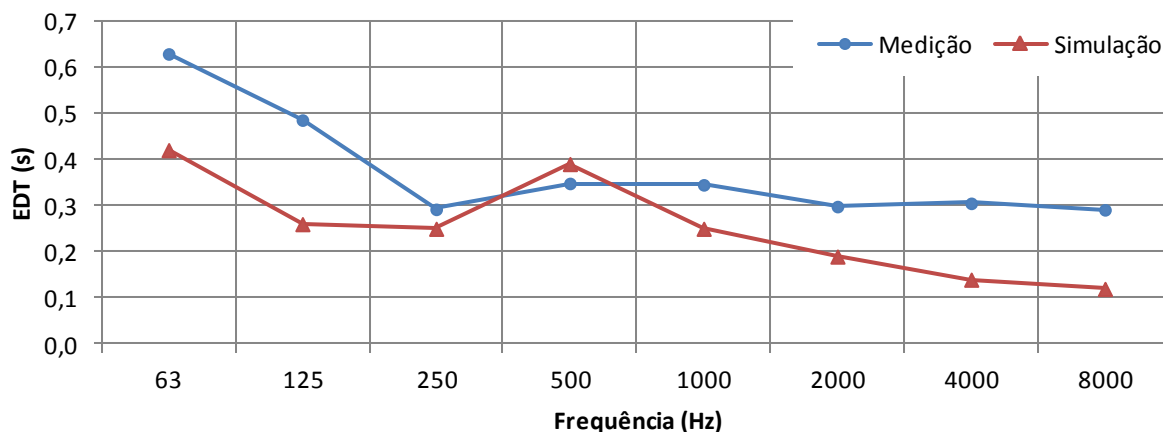


Figura F. 7 - Comparação entre os valores de EDT medidos e simulados para a SE01.

A simulação do modelo da sala SE02 apresentou bons resultados em relação à medição, com uma diferença média de 0,14 segundos. A discrepância entre resultados medidos e simulados, para a maior parte das bandas de frequência, varia entre 0,02 e 0,16 segundos, exceto para as bandas de 250 e 500 Hz quando esta passa a ser 0,21 e 0,42 segundos, respectivamente, como pode ser observado na figura 4.17.

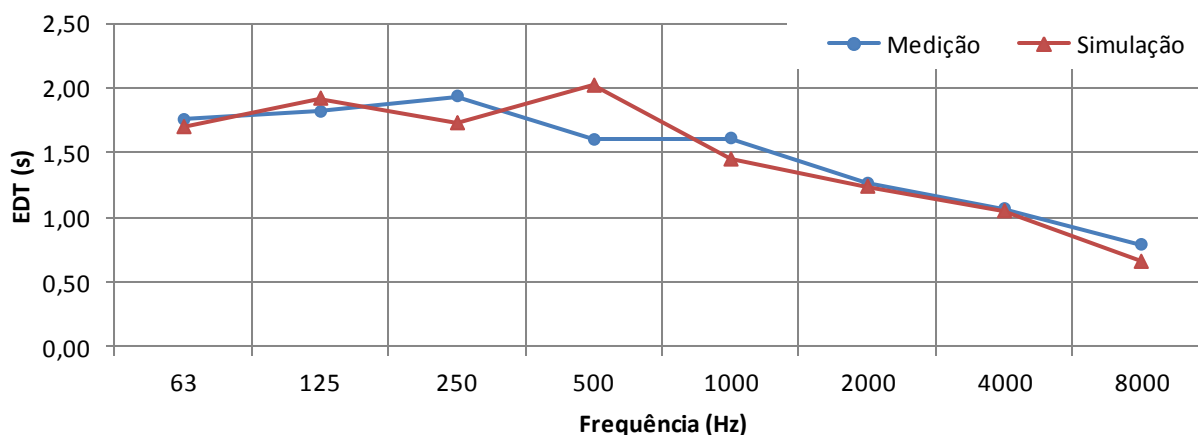


Figura F.8 - Comparação entre os valores de EDT medidos e simulados para a SE02.

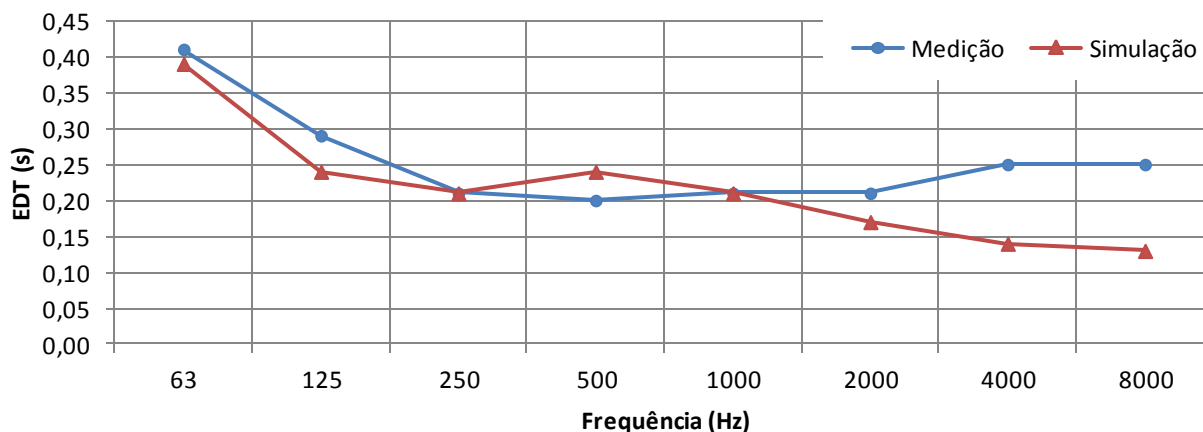


Figura F.9 - Comparação entre os valores de EDT medidos e simulados para a SE03.

Dentre as salas de estudo, a sala SE03, apresentada na figura 4.18, foi a que apresentou maior similaridade entre valores medidos e simulados, com uma diferença variando entre 0,00 a 0,05 segundos para baixas e médias frequências, e 0,4 a 0,12 segundos para altas frequências.

A simulação do EDT para a sala SAC01 (figura 4.19) resultou em valores muito próximos dos reais, variando de 0,02 a 0,16 segundos, para todas as bandas de frequência a partir de 125 Hz. Com exceção da banda de 500 Hz, os valores simulados se mantêm sempre abaixo dos valores medidos para todas as bandas de frequência de 63 a 8.000 Hz. Este comportamento é comum às salas SE01 e SE03.

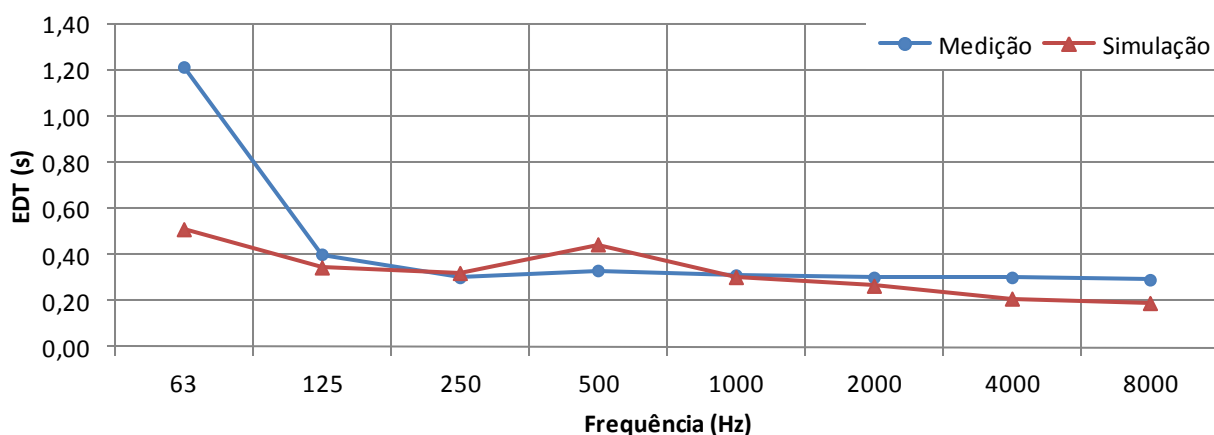


Figura F.10 - Comparação entre os valores de EDT medidos e simulados para a SAC01

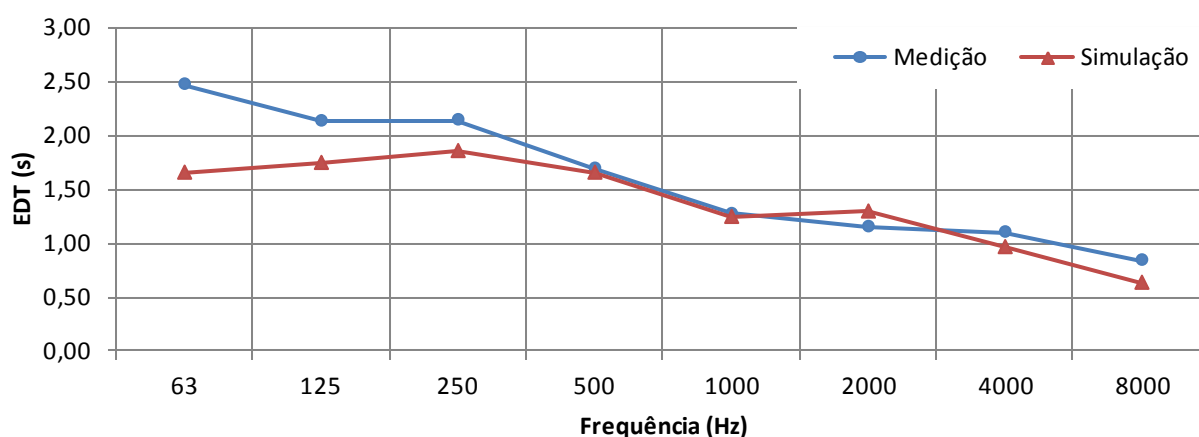


Figura F.11 - Comparação entre os valores de EDT medidos e simulados para a SAC02

Na figura 4.20 é possível observar que os resultados para o EDT obtidos através da simulação, para a sala SAC02 são muito semelhantes aos valores reais na faixa de frequência de 500 a 4.000 Hz, com uma diferença variando entre 0,03 a 0,14 segundos, chegando a 0,21 em 8.000 Hz. Na faixa compreendida entre 63 a 250 Hz, esta diferença aumenta chegando a 0,89 segundos em 63 Hz.

Na sala SAC03, os resultados da simulação, apresentados na figura 4.21, estão muito próximos dos valores medidos, variando de 0,02 a 0,11 segundos, nas bandas de frequências de 63 até 2.000 Hz. Nas altas frequências, 4.000 e 8.000, esta diferença aumenta para 0,35 e 0,49 segundos respectivamente. Nota-se, apesar da variação nas diferenças entre valores medidos e simulados, que a tendência do decaimento em função da frequência é a mesma, fato que geralmente se repete para as demais salas, excetuando-se algumas discrepâncias mais significativas na banda de 500 Hz.



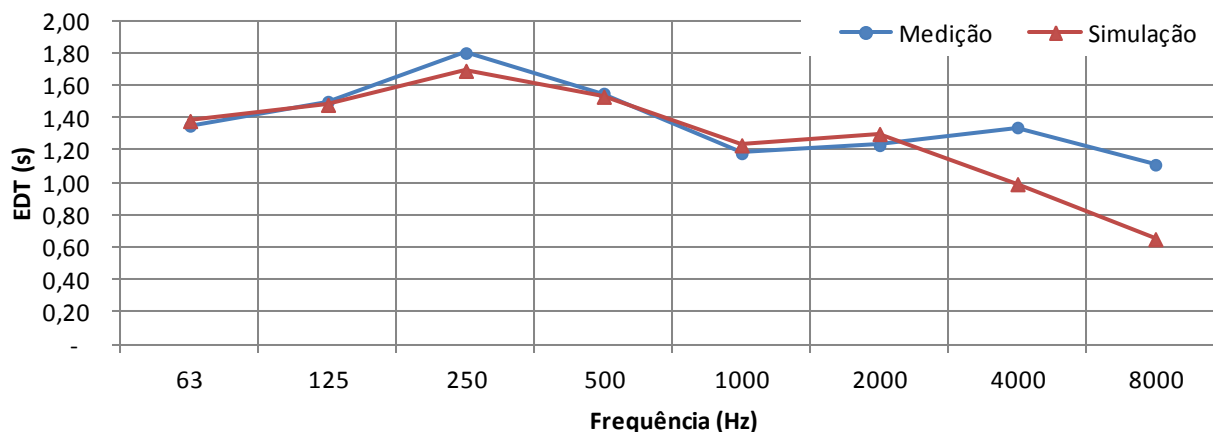


Figura F.12 - Comparação entre os valores de EDT medidos e simulados para a SAC03

Na tabela 4.6 estão expostos os valores, em porcentagem, para comparação da diferença em porcentagem para comparação com o JND indicado para esse parâmetro pela norma ISO 3382 (tabela 2.3). Observando os resultados obtidos para a média entre as bandas de 500 e 1.000 Hz, conclui-se que os modelos para as três salas de aula coletiva, SAC01, SAC02 e SAC03, podem ser considerados precisos. Contudo, considerando que atingir uma precisão de 5% é bastante difícil, segundo Christensen (2009), os valores obtidos para as salas SE01, SE02 e SE03 podem ser considerados adequados, apesar das discrepâncias.

#### 4.1.2 Clareza ( $C_{80}$ )

A seguir são apresentados os valores obtidos nas simulações para o parâmetro  $C_{80}$ , comparados com os valores medidos. Os resultados derivados da diferença entre dados medidos e simulados para as salas SE02, SAC02 e SAC03 (figuras 4.23, 4.26 e 4,27) foram relativamente baixos, em torno de 0,3 a 5,0 dB, a tendência se manteve a mesma, aumentando conforme o aumento da frequência, porém, ao contrario do que ocorreu com os parâmetros anteriores, os dados simulados se mostraram, geralmente, mais altos do que os valores reais. Este comportamento se repetiu em todas as salas simuladas, com algumas alterações

em bandas de frequência isoladas, com exceção da sala SAC01 (figura 4.25), onde os valores simulados se apresentaram muito abaixo dos valores medidos, com uma diferença variando de 60 a 70 dB.

Nos modelos das salas SE01 e SE03, a discrepância entre simulação e medição foi maior, variando de 0,33 a 10,41 dB, como pode ser visto nas figuras 4.22 e 4.24. Na sala SE01 as diferenças mais significativas aconteceram somente nas altas frequências (de 2.000 a 8.000 Hz), enquanto para a sala SE03, ocorreram em 500, 2.000 e 4.000 Hz.

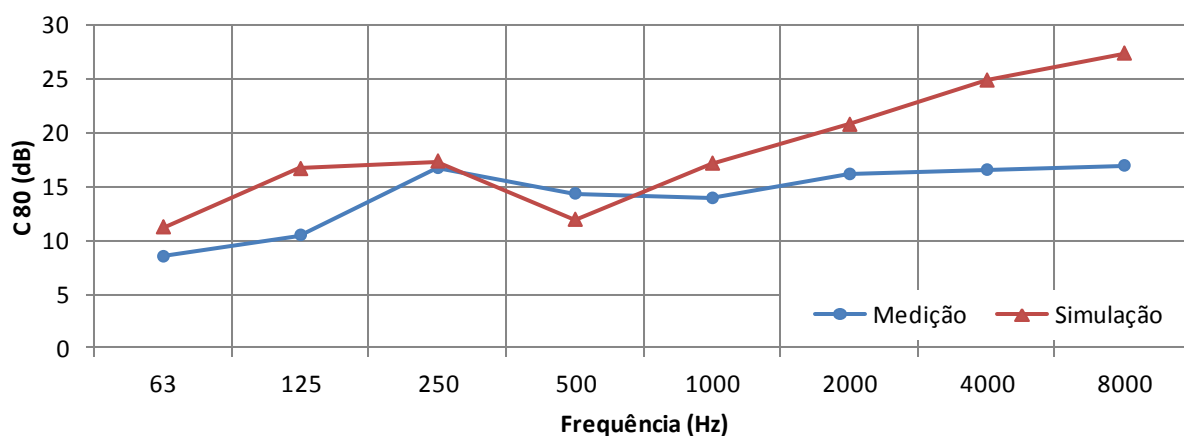


Figura F.13 - comparação entre os valores de  $C_{80}$  simulados e medidos para a SE01.

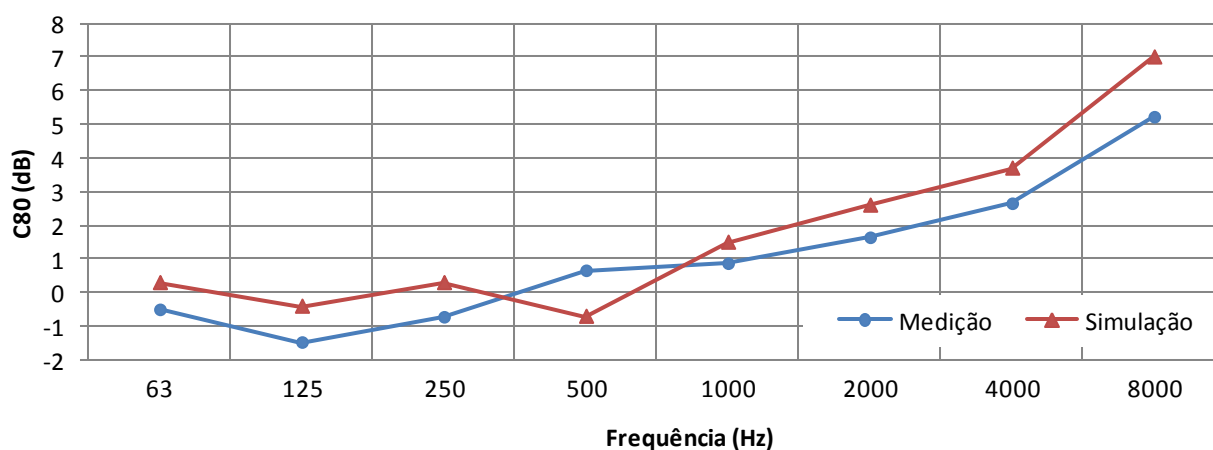


Figura F.14 - Comparação entre os valores de  $C_{80}$  simulados e medidos para a SE02

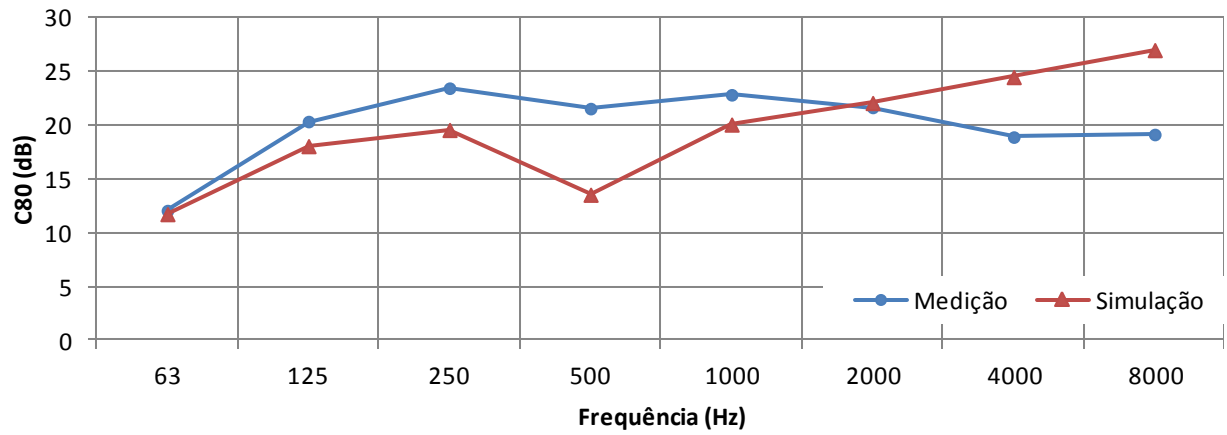


Figura F.15 - Comparação entre os valores de  $C_{80}$  simulados e medidos para a SE03

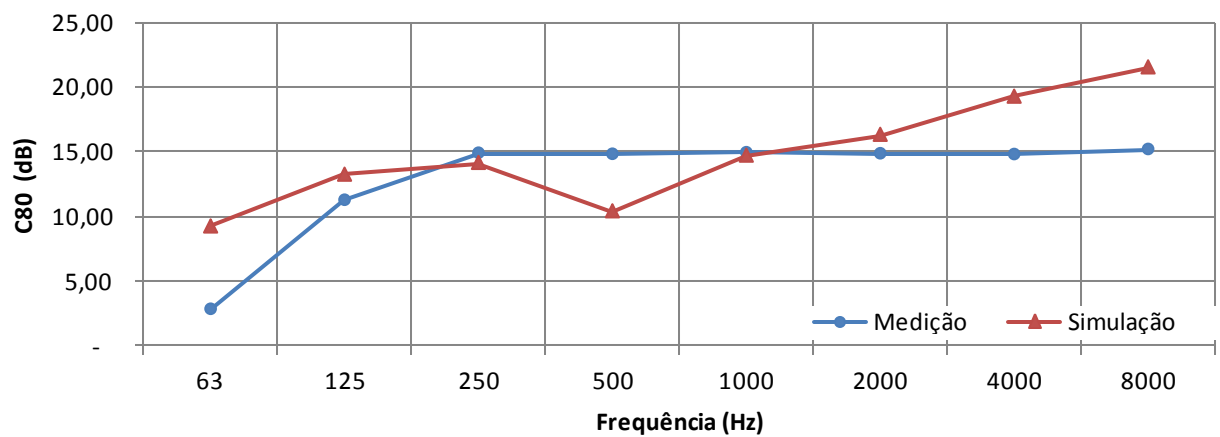


Figura F.16 - Comparação entre os valores de  $C_{80}$  simulados e medidos para a SAC01

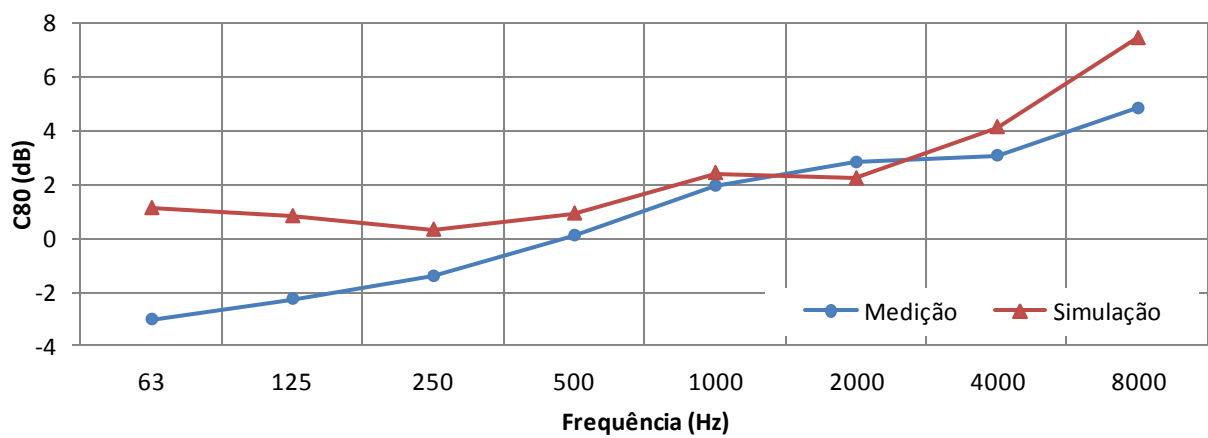


Figura F.17 - Comparação entre os valores de  $C_{80}$  simulados e medidos para a SAC02

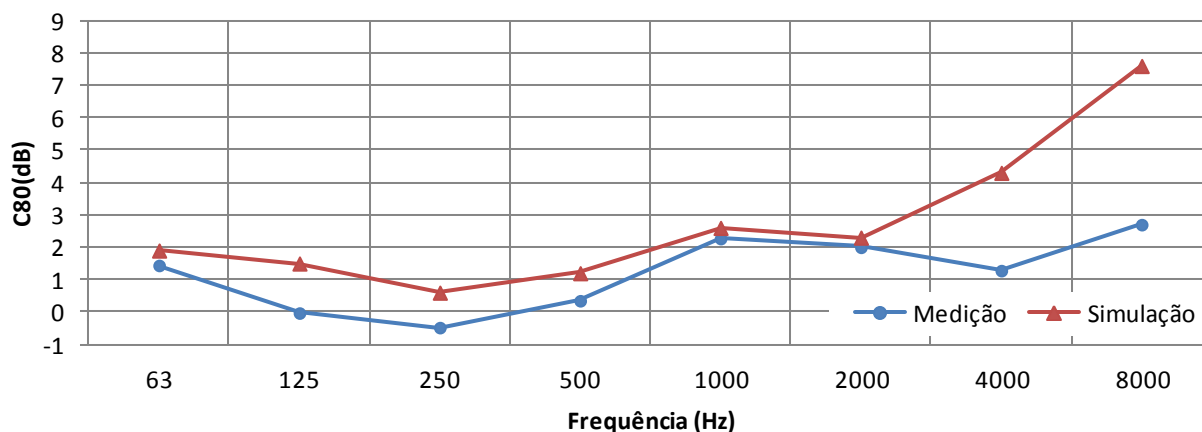


Figura F.18 - Comparação entre os valores de  $C_{80}$  simulados e medidos para a SAC03

Tendo como base um JND de 1 dB, e analisando os dados tabelados para a diferença entre dados medidos e simulados para a média entre as frequências de 500 e 1.000 Hz, conclui-se que as salas SE01, SE02, SAC02 e SAC03 apresentam uma boa precisão para o parâmetro  $C_{80}$ . Nota-se que as duas salas que não alcançaram valores adequados, a sala SE03 e SAC01, são salas que tem todas as superfícies cobertas por material absorvedor sonoro e o tempo de reverberação nestas salas é muito baixo.

#### 4.1.3 Definição ( $D_{50}$ )

Os valores para a definição ( $D_{50}$ ) simulados estão conforme os valores reais obtidos nas medições experimentais, apresentando diferenças muito pequenas para todas as seis salas. As discrepâncias entre valores reais e simulados variaram entre 2 e 21%. As salas SE01, SE02 e SE03 apresentaram valores para esta diferença de até 12%. Sendo que, nas salas SE01 e SE02 a maior diferença foi de 7%, para a maioria das bandas de frequência, aumentando para 12% em 125 Hz na sala SE01, e 10% para 8.000 Hz na sala SE02, como pode ser observado nas figuras 4.26 e 4.27, respectivamente. A figura 4.30, mostra os resultados para a sala SE03,

na qual a maior diferença entre valores medidos e simulados foi de 9% em 500 Hz, se mantendo numa variação de 1 a 5% para as demais bandas de frequência.

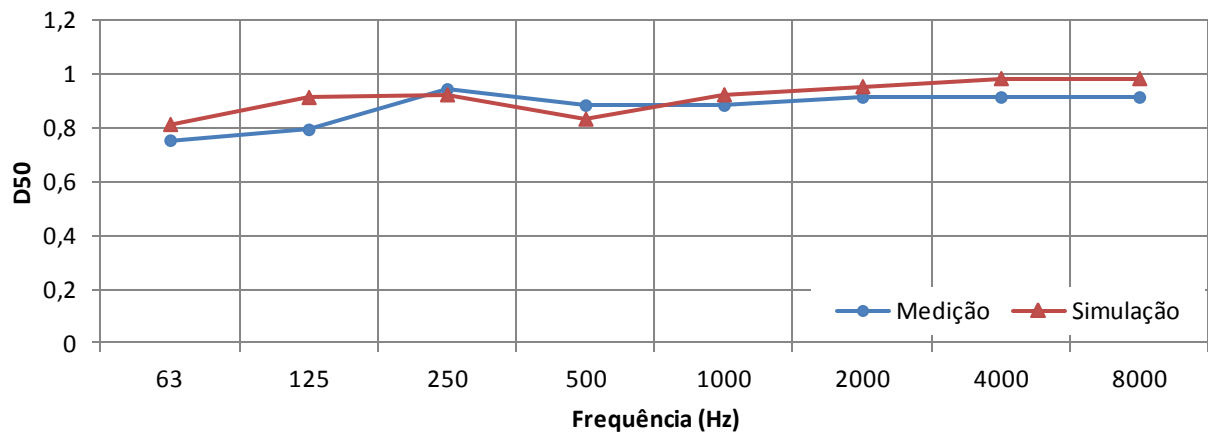


Figura F.19 - Comparação entre os valores de D<sub>50</sub> simulados e medidos para a SE01.

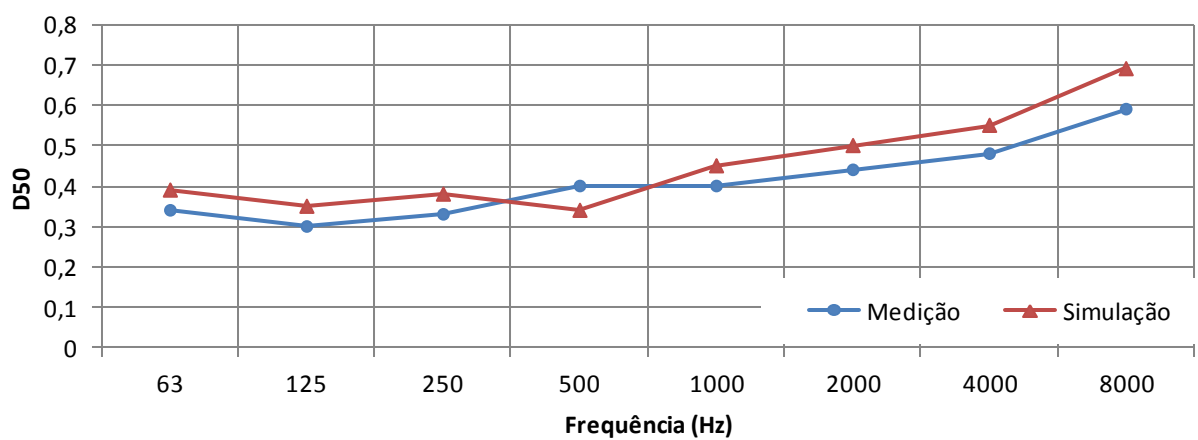


Figura F.20 - Comparação entre os valores de D<sub>50</sub> simulados e medidos para a SE02

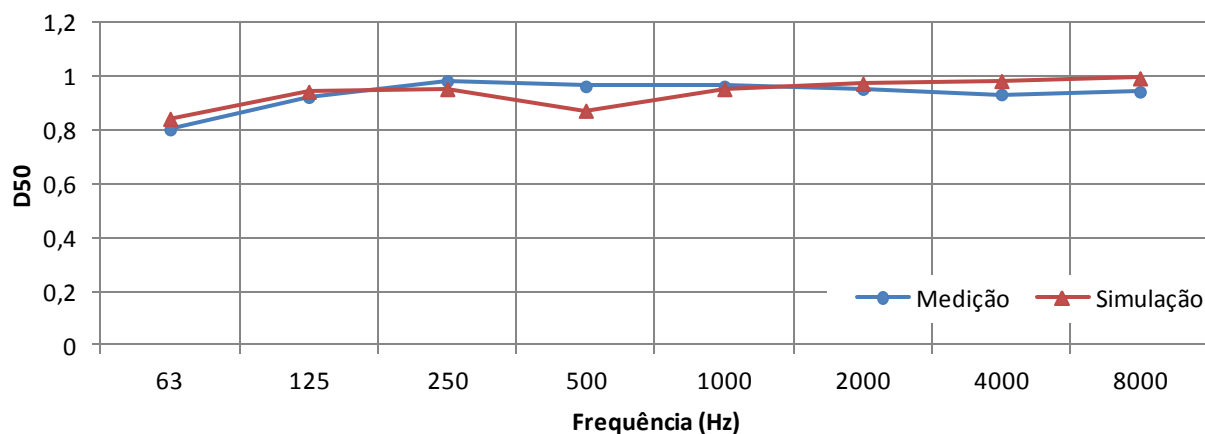


Figura F.21 - Comparação entre os valores de  $D_{50}$  simulados e medidos para a SE03.

Nas figuras 4.31, 4.32 e 4.33 é possível visualizar o comportamento dos valores de  $D_{50}$  medidos e simulados para as salas de aula coletiva SAC01, SAC02 e SAC03. Na sala SAC01 o  $D_{50}$  simulado manteve-se próximo do valor medido apresentando uma diferença de 1% a 6% para a maioria das frequências, sendo que nas frequências de 63 e 500 Hz, esta chegou a 21% e 13%, respectivamente. Nas salas SAC02 e SAC03, a diferença entre valores simulados e reais variou de 1% a 9% para maioria das frequências, contudo na SAC01 este valor aumentou para as baixas frequências chegando a 18%, enquanto na SAC03 este aumento ocorreu nas altas frequências, chegando a 20%.

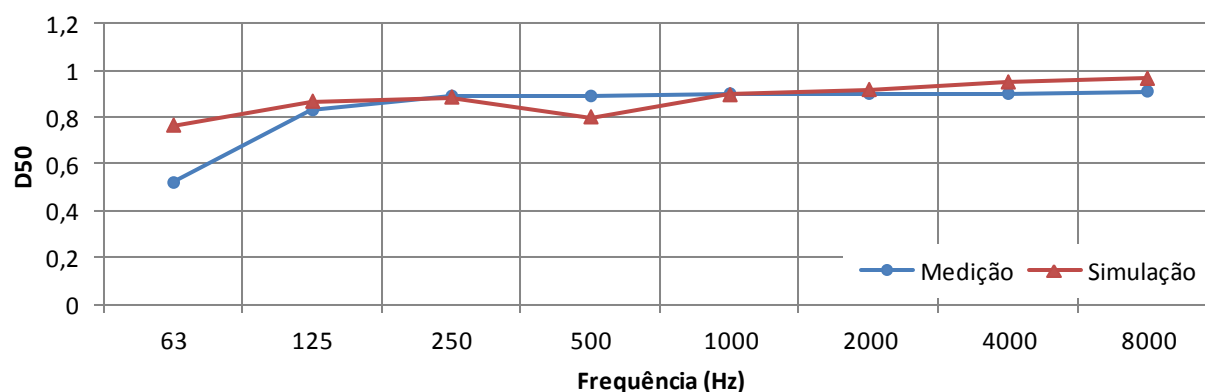


Figura F.22 - Comparação entre os valores de  $D_{50}$  simulados e medidos para a SAC01

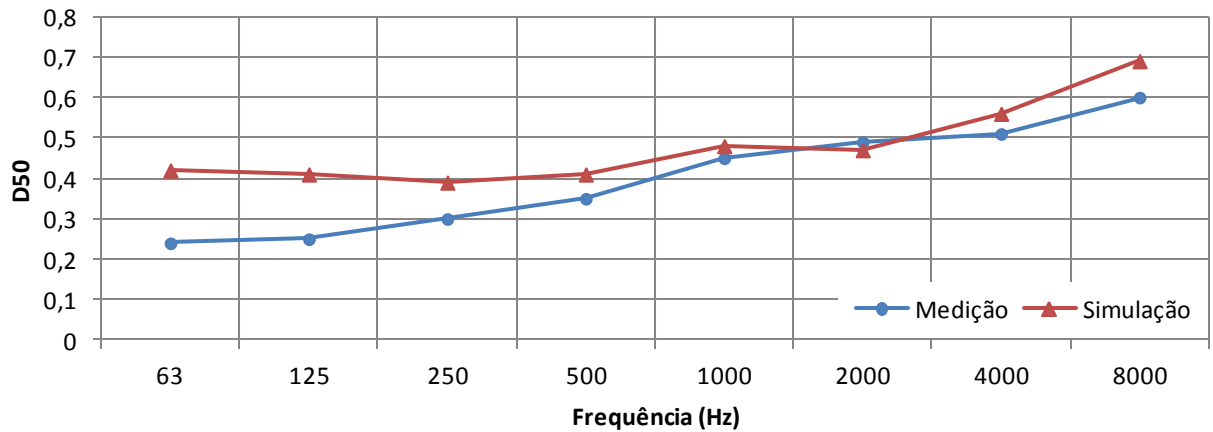


Figura F.23 - Comparação entre os valores de D<sub>50</sub> simulados e medidos para a SAC02

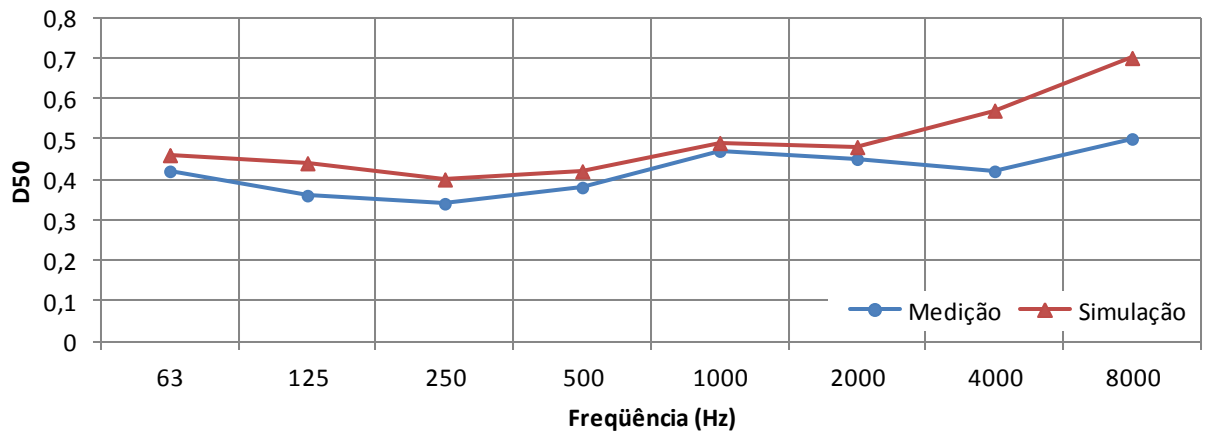


Figura F.24 - Comparação entre os valores de D<sub>50</sub> simulados e medidos para a SAC03

Na tabela 4.6 estão os valores obtidos pela diferença entre os resultados simulados e medidos para as frequências de 500 e 1.000 Hz, os quais se encontram abaixo do JND recomendado para a média entre as bandas de 500 e 1.000 Hz, desta forma, conclui-se que todas as salas estão com boa precisão.

#### 4.1.4 Tempo central ( $T_s$ )

A seguir são apresentados os valores obtidos nas simulações para o parâmetro  $T_s$  em comparação aos valores reais obtidos através das medições da resposta impulsiva para as seis salas selecionadas.

Os valores de  $T_s$  simulados para a sala SE01, apresentados na figura 4.34, estão próximos dos valores medidos para as médias frequências, variando de 0,90 a 9,50 ms. Contudo, nas baixas e altas frequências a discrepância aumenta para 26,70 e 12,40 ms, respectivamente. O mesmo comportamento pode ser observado na figura 4.34 para a sala SE03, porém a diferença nas médias frequência é levemente menor, variando de 3,20 a 6,60 ms, aumentando nas baixas e médias para 10,80 e 12,60 ms, respectivamente.

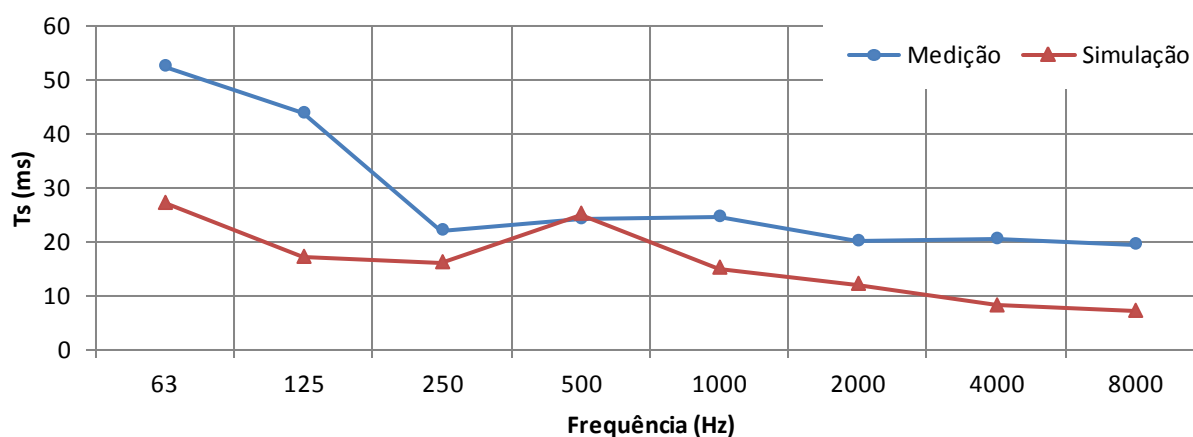


Figura F.25 - Comparação entre os valores de  $T_s$  simulados e medidos para a SE01.



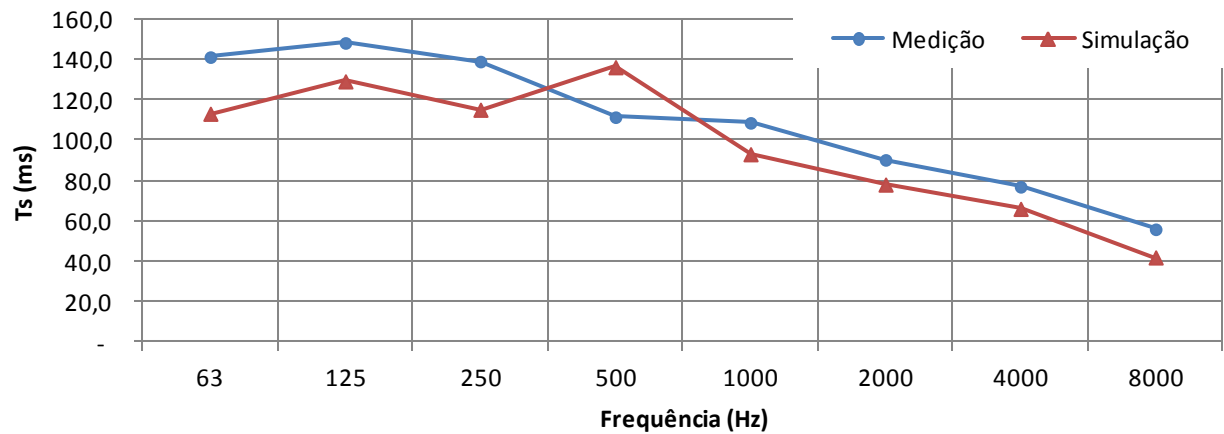


Figura F.26 - Comparação entre os valores de  $T_s$  simulados e medidos para a SE02.

Na figura 4.35 é possível observar que os valores obtidos através da simulação para a sala SE02 acompanham a mesma tendência dos valores medidos para a maioria das frequências, com exceção da banda de 500 Hz. A diferença entre valores medidos e simulados decresce à medida que a frequência aumenta, variando de 19,00 a 28,00 ms de 63 a 500 Hz, e de 10,90 a 15,50 ms de 1.000 a 8.000 Hz.

Os resultados obtidos para a sala SAC01 são apresentados na figura 4.37, os valores simulados, a partir da frequência de 250 Hz, tem muita semelhança com os valores reais, com uma diferença variando de 2,90 a 9,40 ms. Em 63 Hz esta diferença é maior, com um valor equivalente a 61,10 ms, diminuindo para 15,90 ms em 125 Hz.

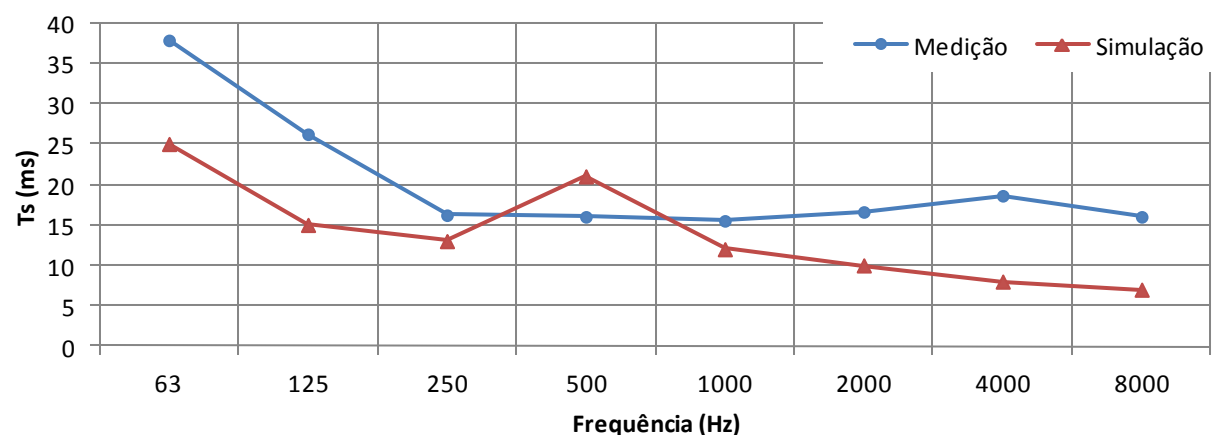


Figura F.27 - Comparação entre os valores de  $T_s$  simulados e medidos para a SE03

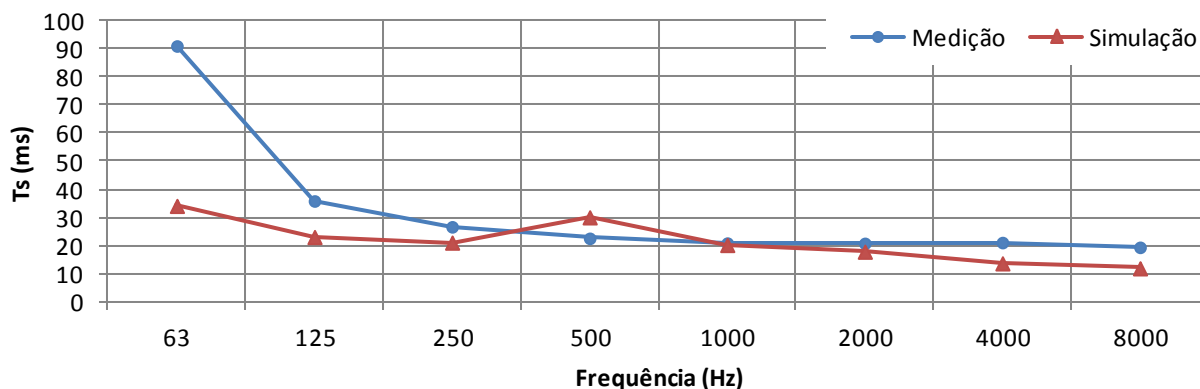


Figura F.28 - Comparação entre os valores de  $T_s$  simulados e medidos para a SAC01.

A simulação da sala SAC02 (figura 4.38) resultou em valores muito abaixo dos medidos para as baixas frequências, variando de 32,70 a 90,40 ms. Esta diferença diminuiu para as frequências médias- altas, apresentando um valor médio de 5,56 ms. Na sala SAC03 a proximidade entre valores medidos e simulados ocorreu nas bandas de 500, 1.000 e 2.000 Hz, variando de 0,3 a 8,80 ms. As maiores discrepâncias ocorreram nas altas frequências, em 4.000 e 8.000 Hz, com um valor médio de 34,3 ms. Nas baixas frequências a diferença ficou em torno de 18,5 ms.

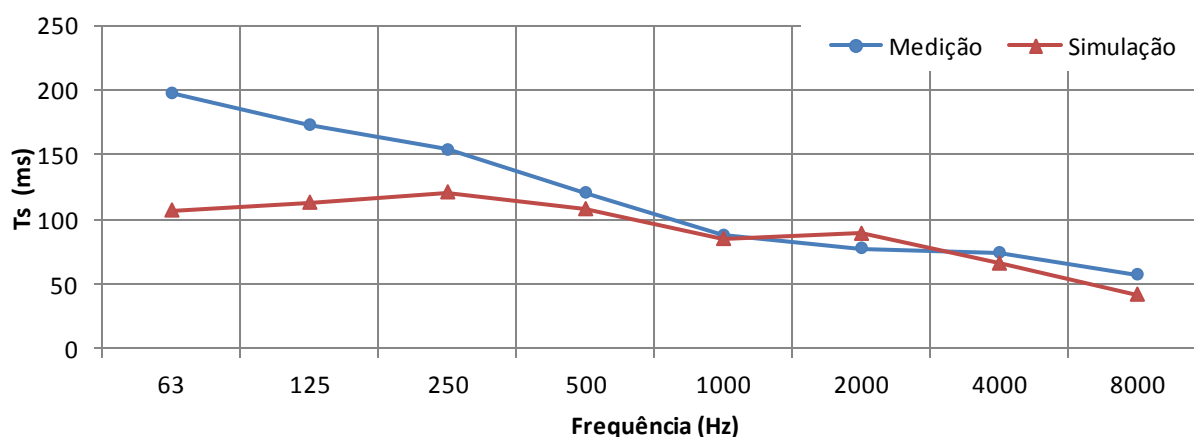


Figura F.29 - Comparação entre os valores de  $T_s$  simulados e medidos para a SAC02.

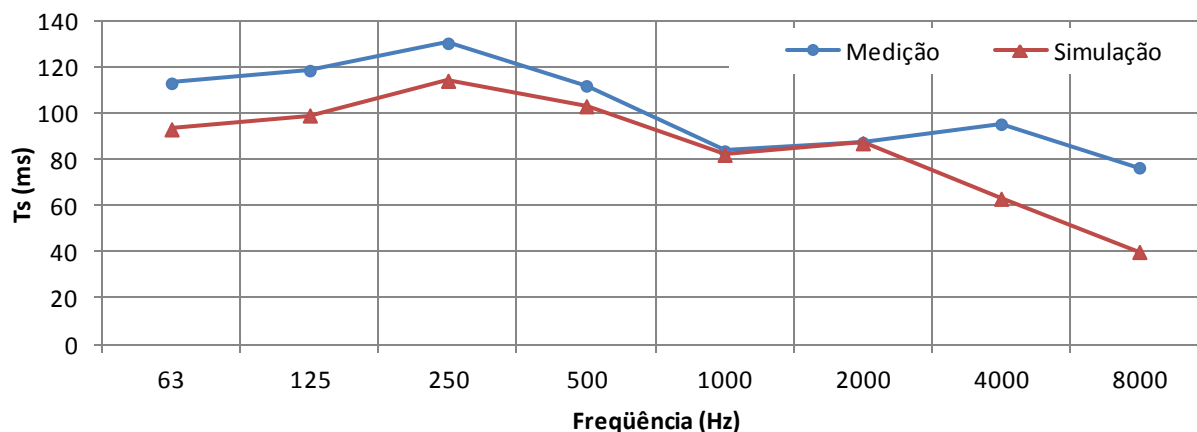


Figura F.30 - Comparação entre os valores de  $T_s$  simulados e medidos para a SAC03

A tabela 4.6 apresenta os dados obtidos para a diferença entre simulação e medição em comparação com o JND indicado pela norma ISO 3382 para as frequências de 500 e 1.00 Hz e a média entre os valores obtidos para cada uma. Todas as seis salas apresentaram uma diferença menor do que o considerado adequado pelo JND. Desta forma, pode-se concluir que para o parâmetro  $T_s$ , todos os modelos estão ajustados com o a sala real.

#### 4.1.5 Índice de transmissão da fala (STI)

Os valores simulados para o índice de transmissão da fala, apresentados na tabela 4.5, estão muito próximos dos valores reais, em todas as seis salas, com valores maiores que os medidos, à exceção da sala SAC01 onde o valor simulado ficou levemente menor que o medido. Apesar da discrepância entre medição e simulação, os valores continuaram sempre na mesma faixa de avaliação, ou seja, as salas SE01, SE03 e SAC01 continuaram a ter valores considerados excelentes para o STI, e as salas SE02, SAC02 e SAC03 valores adequados.

Tabela F.31 - Comparação entre os valores de STI medidos e simulados para as seis salas.

Sala	STI medido	STI simulado
SE01	0,82	0,87
SE02	0,54	0,55
SE03	0,87	0,88
SAC01	0,83	0,83
SAC02	0,55	0,56
SAC03	0,53	0,57