

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

Edna Sofia de Oliveira Santos

**COMPARAÇÃO ENTRE MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO
UTILIZANDO DISTINTOS PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO
ACÚSTICA DE SALAS PARA DOIS AMBIENTES
DIFERENTES**

Santa Maria, RS

2021

Edna Sofia de Oliveira Santos

**COMPARAÇÃO ENTRE MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO UTILIZANDO DISTINTOS
PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS PARA DOIS AMBIENTES
DIFERENTES**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), 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. (UFSM) Eric Brandão Carneiro

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. (UFSM) Viviane Suzey Gomes de Melo

Santa Maria, RS

Novembro

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Santos, Edna Sofia de Oliveira
COMPARAÇÃO ENTRE MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO UTILIZANDO
DISTINTOS PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS PARA
DOIS AMBIENTES DIFERENTES / Edna Sofia de Oliveira
Santos.- 2021.
120 f.; 30 cm

Orientador: Eric Brandão Carneiro
Coorientadora: Viviane Suzey Gomes de Melo
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2021

1. Simulação acústica de salas 2. Comparação de
desempenho de software 3. Acústica geométrica I.
Carneiro, Eric Brandão II. Melo, Viviane Suzey Gomes de
III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

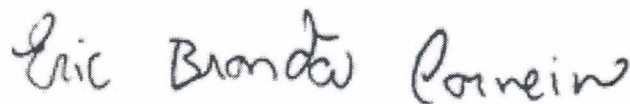
Declaro, EDNA SOFIA DE OLIVEIRA SANTOS, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Edna Sofia de Oliveira Santos


COMPARAÇÃO ENTRE MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO UTILIZANDO DISTINTOS PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS PARA DOIS AMBIENTES DIFERENTES

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), 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**

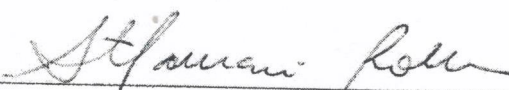
Aprovado em 5 de Novembro de 2021:



Eric Brandão Carneiro, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Roberto Aizik Tenenbaum, Dr. (UFSM)



Stelamaris Rola Bertoli, Dr.^a. (UNICAMP)

Santa Maria, RS

2021

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Cintia e Neto, por tudo e sempre, serem incansáveis por mim.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Cintia e Neto, e minha irmã, Erica, que se fizeram farol e guiaram cada passo meu. Por acreditarem, mais que eu mesma, em que sou capaz.

Ao meu parceiro de vida e marido, Gilberto, que sempre me apresentou caminhos, viabilizou rotas, e sonha comigo novos destinos.

Ao professor Dr. Roberto Tenenbaum e à professora e minha co-orientadora Dr^a. Viviane Melo, que forneceram suporte da chegada à Santa Maria até a saída. Por irem além da docência. Obrigada por tanto.

Ao meu orientador, Dr. Eric Brandão, minha eterna referência bibliográfica, que dirigiu toda a orientação com organização e responsabilidade exemplar. É uma honra inestimável tê-lo tido como colaborador em minha formação.

À professora, mãe acadêmica e minha eterna orientadora, Dr^a. Elisabeth Duarte, responsável pelos meus primeiros passos na acústica, por ter se feito presente em todos os momentos em que precisei. Obrigada por ter me acompanhado até aqui.

Aos amigos e colegas que Santa Maria me deu, em especial ao William, Lucas, Gabriela e Ana. Vocês tornaram a jornada mais leve. Obrigada pela parceria profissional e pessoal.

À Me. Arq. Marselle Barbo e Eng. Acústica Caroline Gaudeoso, pela rede de apoio fornecida e colaboração fundamental neste trabalho e em minha formação.

Aos alunos e professores do curso de Engenharia Acústica da UFSM, sobretudo ao professor Dr. William D'Andrea Fonseca e ao agora Eng. Acústico Eduardo Vieira, pela colaboração e fornecimento de parte dos dados utilizados nesta pesquisa.

À UFSM, por toda a estrutura fornecida, que juntamente com a UFAL me proporcionou educação pública e de qualidade.

Ao Dr.-Ing. Lukas Aspöck e ao Institute of Technical Acoustics (ITA) da Aachen University, por gentilmente fornecerem acesso ao *software* RAVEN utilizado nesta pesquisa.

À CAPES, pela bolsa de fomento à pesquisa fornecida.

“Conhecimento não é garantia de felicidade, mas pode fornecer a coragem de lutar por ela.”

(SIMONE DE BEAUVOIR)

RESUMO

COMPARAÇÃO ENTRE MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO UTILIZANDO DISTINTOS PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS PARA DOIS AMBIENTES DIFERENTES

AUTORA: EDNA SOFIA DE OLIVEIRA SANTOS
ORIENTADOR: ERIC BRANDÃO CARNEIRO
CO-ORIENTADORA: VIVIANE SUZEY GOMES DE MELO

A comparação entre programas de simulação acústica de salas e dados experimentais permite a investigação das potencialidades e imprecisões de cada modelo computacional implementado. Com isso, a partir de 1994, as intercomparações internacionais entre programas de simulação, denominadas Round Robin, passaram a acontecer. O objetivo desta pesquisa é investigar os resultados fornecidos por três algoritmos distintos em dois espaços com características arquitetônicas diferentes. Os *software* RAIOS 7, RAVEN e ODEON (Versão 11.23) foram utilizados e todos eles lidam com acústica geométrica, mas com características peculiares. Quatro parâmetros acústicos, sendo eles, o tempo de reverberação, o tempo de decaimento inicial, o fator de clareza e a definição, são calculados para um dado conjunto de pares fonte-receptor. Os erros médios relativos ao JND ("*Just Noticeable Difference*") também foram calculados, assim como uma análise das respostas impulsivas quadráticas fornecidas para uma das salas. Percepções preliminares sobre as vantagens e limitações de cada algoritmo são apresentadas.

Palavras-chave: Simulação acústica de salas. Comparação de desempenho de software. Acústica geométrica.

ABSTRACT

COMPARISON BETWEEN MEASUREMENT AND SIMULATION UTILIZING DISTINCT ROOM ACOUSTIC SOFTWARE FOR TWO DIFFERENT ENVIRONMENTS

AUTHOR: EDNA SOFIA DE OLIVEIRA SANTOS
ADVISOR: ERIC BRANDÃO CARNEIRO
COADVISOR: VIVIANE SUZEY GOMES DE MELO

The comparison between room acoustics simulation software and experimental data allows us to analyze the potentialities and the accuracy of each implemented computational model. Thus, since 1994, the international intercomparisons between simulation programs, named Round Robin, began. The purpose of this research is to investigate the results from different algorithms in two spaces with different characteristics, in volume and architecture, comparing simulated and measured values in loco. For this purpose, the following software were used: RAIOS 7, RAVEN and ODEON (Version 11.23). All the software deals with geometrical acoustics (GA), however with particular applications. Four acoustic parameters, being them, the reverberation time, the early decay time, the clarity factor and the definition, are calculated for a certain amount of source-receptor pairs. The relative mean errors, to the just noticeable difference (JND), were also computed, as well as an analysis of the quadratic impulse responses provided for one of the rooms. Preliminary insights about the advantages and the limitations of every algorithm are also provided.

Keywords: Room acoustics simulation. Software performance comparison. Geometrical acoustics.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Esquema da divisão por regiões de um espectro audível e a função resposta em frequência (FRF) de um sistema sala-fonte-receptor mostrando como acontece a divisão.	18
2.2	Gráfico representativo de uma resposta ao impulso normalizada típica medida em uma sala.	20
2.3	Análise do decaimento sonoro por bandas de oitava para uma sala pequena, com 82,7 m ³ . As variações são maiores nas baixas frequências devido à menor densidade modal.	22
2.4	Distribuição temporal da energia sonora, em um dado ponto de uma sala, a partir da emissão de um som impulsivo. O som direto é seguido pelas reflexões discretas espaçadas no tempo.	22
2.5	Visualização do Raven integrado ao <i>software</i> SketchUp.	24
2.6	Modelo da resposta impulsiva simulada com os métodos utilizados.	25
2.7	Esquema ilustrativo do método de cálculo das reflexões difusas por meio das matrizes de transição.	26
2.8	Visualização do RAIOS 7 para uma das salas estudadas.	26
2.9	Visualização do Odeon 11 para uma das salas estudadas.	27
3.1	Cenas simuladas para a quarta versão do <i>Round Robin</i> , e disponibilizadas no BRAS, com a Sala 10 destacada em vermelho.	29
3.2	Salão de música de câmara Konzerthaus, em Berlim.	30
3.3	Planta baixa da Sala 10 do RR4 com os pontos de fonte-recepção indicados.	30
3.4	Localização da câmara reverberante da UFSM.	31
3.5	Esquema de medição exemplificando os equipamentos e conexões.	33
3.6	Fotos da medição na situação da câmara com a amostra posicionada, na posição de fonte LS02.	33
3.7	Planta baixa da câmara reverberante com os pontos de fonte-recepção indicados.	34
3.8	Modelo virtual da câmara reverberante do Laboratório de Acústica e Vibrações da UFSM nas situações de sala vazia, em (a), e com amostra, em (b).	35
3.9	Coeficientes de absorção e espalhamento, originais e ajustados, atribuídos aos materiais da câmara reverberante.	35
3.10	Coeficiente de absorção da espuma, extraído no ensaio experimental na câmara reverberante.	36
4.1	Dados experimentais e simulados, na Sala 10 do RR4, dos parâmetros acústicos em função da frequência (média dos resultados obtidos para os 10 pontos de fonte-recepção), sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (✕), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).	40
4.2	Dados experimentais e simulados, na Sala 10 do RR4, dos parâmetros acústicos em função dos pontos de fonte-recepção para a frequência de 125 Hz, sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (✕), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).	41

4.3	Dados experimentais e simulados, na Sala 10 do RR4, dos parâmetros acústicos em função dos pontos de fonte-recepção para a frequência de 500 Hz, sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).	42
4.4	Dados experimentais e simulados, na Sala 10 do RR4, dos parâmetros acústicos em função dos pontos de fonte-recepção para a frequência de 2 kHz, sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).	42
4.5	Dados experimentais e simulados, na Sala 10 do RR4, dos parâmetros acústicos em função dos pontos de fonte-recepção para a frequência de 8 kHz, sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).	43
4.6	Erro médio normalizado para os 10 pares de fonte-recepção, em função da frequência, na Sala 10 do RR4, sendo: (a) T_{30} , (b) EDT, (c) C_{80} e (d) D_{50} . . .	44
4.7	Erro médio normalizado para os 10 pares de fonte-recepção, em função dos pontos de fonte-recepção, na Sala 10 do RR4, sendo: (a) T_{30} , (b) EDT, (c) C_{80} e (d) D_{50}	45
4.8	Comparação das respostas impulsivas monoauriculares para o par fonte/receptor LS01MP03 na coluna esquerda, e LS02MP04 na coluna direita.	47
4.9	Média dos dados experimentais e simulados dos parâmetros acústicos em função da frequência para a sala vazia, sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲).	49
4.10	Média dos dados experimentais e simulados dos parâmetros acústicos em função da frequência para a sala com amostra, sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲).	49
4.11	Dados experimentais e simulados, na câmara reverberante para a sala vazia, dos parâmetros acústicos em função dos pontos de fonte-recepção para a frequência de 125 Hz, sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲).	50
4.12	Dados experimentais e simulados, na câmara reverberante para a sala com amostra, dos parâmetros acústicos em função dos pontos de fonte-recepção para a frequência de 125 Hz, sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲).	51
4.13	Erro médio normalizado para os 10 pares de fonte-recepção, em função da frequência, para a condição da sala vazia, sendo: (a) T_{30} , (b) EDT, (c) C_{80} e (d) D_{50}	53
4.14	Erro médio normalizado para os 10 pares de fonte-recepção, em função da posição, para a condição da sala vazia, sendo: (a) T_{30} , (b) EDT, (c) C_{80} e (d) D_{50}	54
4.15	Erro médio normalizado para os 10 pares de fonte-recepção, em função da frequência, para a condição da sala com amostra, sendo: (a) T_{30} , (b) EDT, (c) C_{80} e (d) D_{50}	55
4.16	Erro médio normalizado para os 10 pares de fonte-recepção, em função da posição, para a condição da sala com amostra, sendo: (a) T_{30} , (b) EDT, (c) C_{80} e (d) D_{50}	56

LISTA DE TABELAS

3.1	Coeficientes de absorção (α) e espalhamento (s) dos materiais determinados para a Sala 10 do RR4, em bandas de oitava, para as frequências centrais de 125 Hz a 8 kHz.	30
3.2	Coeficientes de absorção (α) e espalhamento (s) atribuído à amostra com base na medição realizada.	36
3.3	Configurações atribuídas ao Odeon para as duas salas em estudo.	37
3.4	Configurações atribuídas ao RAVEN para as duas salas em estudo.	37
3.5	Configurações atribuídas ao RAIOS para a Sala 10 do RR4.	38

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A – RESULTADOS DA SALA 10 DO RR4	65
APÊNDICE B – RESULTADOS DA CÂMARA REVERBERANTE DA UFSM.....	81

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – ON THE PERFORMANCE INVESTIGATION OF DISTINCT ALGORITHMS FOR ROOM ACOUSTICS SIMULATION	108
---	-----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
1.3 ESTRATÉGIA METODOLÓGICA	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 ACÚSTICA DE SALAS.....	18
2.2 RESPOSTA IMPULSIVA	20
2.3 PARÂMETROS OBJETIVOS PARA ACÚSTICA DE SALAS	21
2.3.1 Parâmetros relativos ao tempo de decaimento	21
2.3.2 Parâmetros de energia relativa	22
2.3.3 Definição do erro médio relativo ao JND	23
2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM ACÚSTICA DE SALAS.....	24
2.4.1 Método computacional utilizado pelo RAVEN	24
2.4.2 Método computacional utilizado pelo RAIOS 7	25
2.4.3 Método computacional utilizado pelo ODEON	27
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	28
3.1 SALAS OBJETO DE ESTUDO	28
3.1.1 Salão de música de câmara Konzerthaus (Sala 10 do RR4)	28
3.1.2 Câmara reverberante do laboratório de acústica e vibrações da UFSM	31
<i>3.1.2.1 Ensaios experimentais (procedimentos preparatórios e instrumentação)</i>	32
<i>3.1.2.2 Configurações do modelo virtual e dos materiais atribuídos</i>	34
3.2 CONFIGURAÇÕES DA SIMULAÇÃO ACÚSTICA	36
3.3 MÉTODO EMPREGADO PARA A APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 SALA 10 DO RR4	39
4.1.1 Erro médio relativo ao JND	43
4.1.2 Comparação entre as respostas impulsivas calculadas e medidas	46
4.2 CÂMARA REVERBERANTE DA UFSM	47
4.2.1 Erro médio relativo ao JND	52
5 CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS	59
APÊNDICES	64
ANEXOS	107

1 INTRODUÇÃO

A simulação em acústica de salas se tornou uma etapa relevante no processo projetual de ambientes. Contudo, apesar dos avanços conquistados quanto a confiabilidade dos programas em mais de 20 anos de desenvolvimento, dispersões ainda podem ser observadas, tendo em vista as dificuldades intrínsecas à caracterização dos materiais e as limitações dos métodos de cálculo conhecidos que aliem eficiência computacional e exatidão (1; 2; 3; 4).

Fomentando a discussão quanto à eficiência e confiabilidade em *software* deste gênero, a partir de 1994 foram criadas as intercomparações internacionais entre programas de simulação, intituladas *Round Robin* (RR). A partir da divulgação dos dados referentes a uma ou mais salas, um certo número de equipes desenvolve simulações em seus algoritmos e posteriormente os resultados obtidos são recolhidos e divulgados pelo grupo organizador do RR, assim como os dados de medição das salas. Dessa forma, o desempenho dos *software* participantes pode ser analisado de forma anônima (5).

Neste estudo, tendo em vista a importância da análise do desempenho de diferentes algoritmos, três *software* serão colocados em evidência utilizando como objeto de estudo dois ambientes com volume e características distintos, sendo um deles uma sala de concertos utilizada na quarta edição do Round Robin, e o outro, a câmara reverberante do Laboratório de Acústica e Vibrações da Universidade Federal de Santa Maria.

1.1 JUSTIFICATIVA

Ferramentas que possibilitem prever características de um ambiente em fase de projeto, ou seja, antes que custos ambientais e financeiros significativos sejam lançados, podem ser ditas como essenciais, tendo em vista a urgência pela garantia de projetos realmente eficientes (6; 7). Para tanto, comparar tais ferramentas, expondo problemas e potencialidades, traz aos desenvolvedores um leque de possíveis melhorias, viabilizando aos programas a simulação de espaços de maneira mais exata.

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar comparativamente, entre os *software* a partir de simulações, os principais parâmetros acústicos de salas em dois ambientes com características distintas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Obter os parâmetros acústicos, a partir de respostas impulsivas monoauriculares, levantadas por meio de medições nos ambientes em estudo;
- Realizar a simulação acústica dos ambientes em questão (Sala 10 do *Round Robin* 4 e a Câmara Reverberante do Laboratório de Acústica e Vibrações da UFSM) em três diferentes *software*: ODEON Room Acoustics Software (versão 11.23), RAIOS 7 – Room Acoustics Integrated and Optimized Software e RAVEN - Room Acoustics for Virtual Environments);
- Avaliar os parâmetros de tempo de reverberação (TR), tempo de decaimento inicial (EDT), clareza (C_{80}) e definição (D_{50}), obtidos em simulação, frente aos resultados encontrados em medição, para as duas salas;
- Analisar, para os parâmetros observados, o erro médio relativo ao JND (Just Noticeable Difference);
- Comparar as respostas impulsivas quadráticas fornecidas pelos programas com os dados experimentais.

1.3 ESTRATÉGIA METODOLÓGICA

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi traçado como estratégia a investigação de duas salas com características distintas procurando compreender tendências no comportamento dos programas em realidades diversas.

O primeiro ambiente foi escolhido pela acessibilidade permitida aos dados precisos de medição, sendo este já utilizado na versão 4 do Round Robin. Para o segundo ambiente, as respostas ao impulso foram medidas de acordo com a ISO 354:2003, e as propriedades dos materiais foram estimadas com base nos dados experimentais. As simulações foram realizadas

nos programas Odeon (versão 11.23), RAIOS e RAVEN, cujas licenças estão disponíveis para a universidade na qual esta pesquisa foi produzida.

No capítulo 2, a teoria por trás do desenvolvimento deste trabalho é apresentada, onde os principais conceitos foram brevemente explanados. O capítulo 3, explica a metodologia utilizada para a medição e simulação das duas salas em questão. O capítulo 4, apresenta os resultados encontrados de acordo com a configuração sala/fonte/receptor. Por fim, no capítulo 5, são apontadas as principais conclusões a respeito dos dados observados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

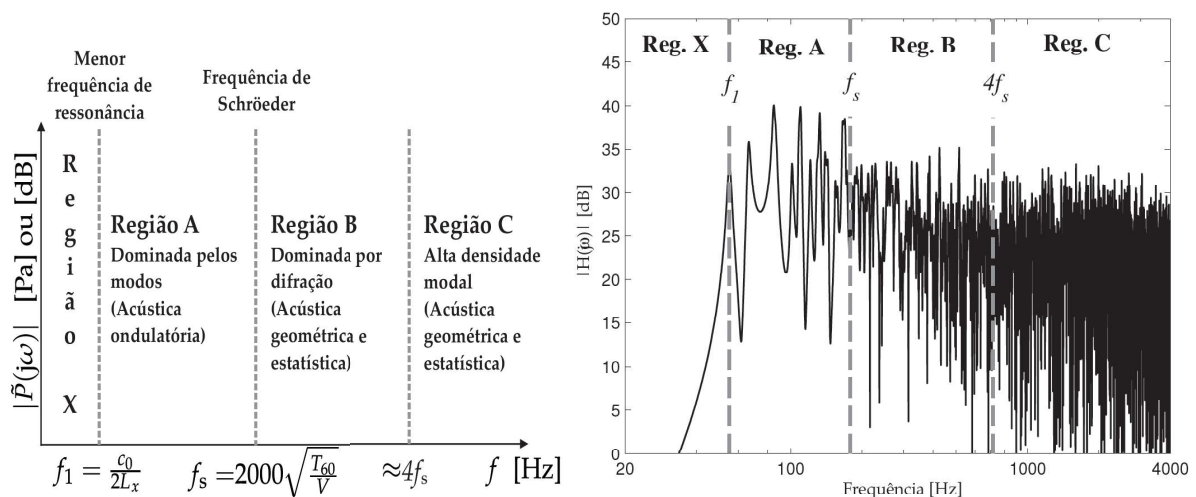
O estudo da acústica por meio da física promove uma extensa discussão entre diversas áreas. Dentre elas, a chamada acústica de salas busca aprofundar o entendimento da propagação do som no interior de ambientes. As ferramentas utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho baseiam-se em tais estudos, e a teoria por trás delas será apresentada neste capítulo.

2.1 ACÚSTICA DE SALAS

Espaços fechados ou salas são lugares onde o tempo é substancialmente vivido pela maior parte da sociedade. Nesses espaços, sons diversos são emitidos, como a fala, a música ou simplesmente ruído. A forma como os sons irão interagir com o meio à sua volta, determina as características do campo acústico no recinto (8).

Para que compreender a propagação sonora em recintos, segundo Brandão (4), é preciso considerar como as frentes de onda se comportam no espaço e como elas interagem com as superfícies do ambiente. Como a teoria ondulatória possui limitações intrínsecas (9; 10; 11), a solução é dividir o espectro audível em regiões, como observado na Figura 2.1.

Figura 2.1: Esquema da divisão por regiões de um espectro audível e a função resposta em frequência (FRF) de um sistema sala-fonte-receptor mostrando como acontece a divisão.



Fonte: BRANDÃO, 2016 (4), p. 286 e 288.

Na Região X, os comprimentos de onda são maiores do que as dimensões da sala em questão, não havendo assim um meio favorável à propagação da energia sonora. A Região A

acomoda múltiplos inteiros desses comprimentos de onda, e dá suporte a formação de modos acústicos em determinadas frequências. O limite entre estas regiões se dá com a identificação do primeiro modo acústico da sala, por meio da equação 2.1 dada em Hertz e válida para salas em formato de paralelepípedo de paredes rígidas, onde c_0 é a velocidade do som no ar e L_x a maior dimensão da sala (4).

$$f_1 = \frac{c_0}{2L_x} \quad (2.1)$$

A frequência que estabelece a transição da Região A para a Região B é chamada de frequência de Schroeder (12; 13; 14), dada pela equação 2.2.

$$f_s = 2000\sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (2.2)$$

De maneira simplificada, Schroeder (12) deduziu que a frequência f_s é o limite a partir do qual o tratamento estatístico do campo sonoro é viável, onde o T_{60} refere-se ao tempo de reverberação máximo da sala, e o V , o volume do ambiente em questão.

A Região B é tomada por fenômenos de difração, marcando a transição entre a Região A e C, sendo seu limite superior é múltiplo da frequência de Schroeder. Já na Região C, como o comprimento de onda é muito menor que as dimensões da sala. Segundo Brandão (4), há tantos modos acústicos que se pode assumir um campo difuso.

Para uma sala com geometria qualquer, o Método dos Elementos Finitos (FEM) (15; 16), o Método dos Elementos de Contorno (BEM) (17; 18) e o Método das Diferenças Finitas (FDTD) (19; 20), podem ser aplicados com um custo computacional alto, quando comparado aos métodos de Acústica Geométrica por exemplo, nas médias e altas frequências, sendo então métodos utilizados sobretudo para a solução de baixas frequências. A Acústica Geométrica (GA) (21), passa a ser aplicável a partir da frequência de Schroeder, e leva em consideração que as frentes de onda são discretizadas em raios acústicos, viajando em uma direção ortogonal a elas. A energia de cada raio é somada e nenhuma interferência é considerada. As imprecisões deste método tendem a ser maiores abaixo da frequência de Schroeder, o que justifica seu uso acima dela.

2.2 RESPOSTA IMPULSIVA

Todas as propriedades de um sistema linear e invariante no tempo (SLIT) estão contidas em sua resposta ao impulso (8), que é a resposta do SLIT a uma distribuição de Dirac¹ (22).

Para uma determinada configuração sala-fonte-receptor, é possível demonstrar que, se uma fonte emite um sinal $x(t)$ qualquer, o sinal recebido pelo receptor $y(t)$ é dado pela integral de convolução expressa pela equação 2.3, em que a resposta ao impulso $h(t)$ imprime suas características no sinal $x(t)$.

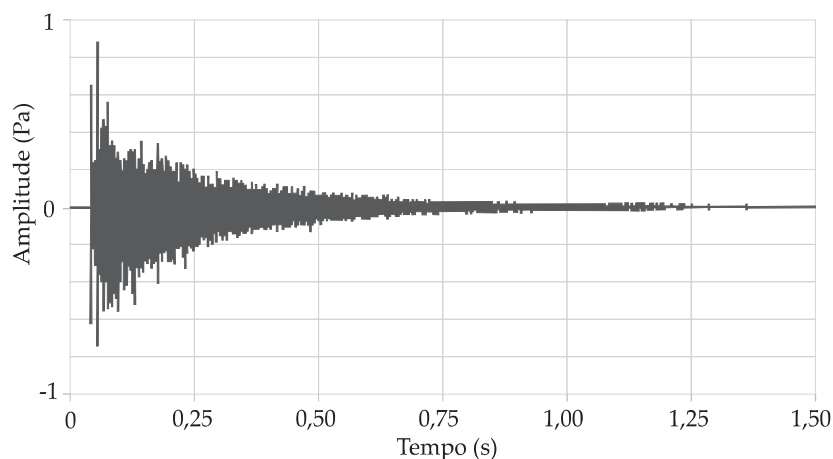
$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau) d\tau \quad (2.3)$$

Com isso, $y(t)$ passa a carregar as informações da sala, como a reverberação, ressonâncias, entre outras (4). Essa relação, expressa no domínio do tempo, também pode ser expressa no domínio da frequência por meio do produto de transformadas de Fourier dada pela equação 2.4.

$$\hat{y}(f) = \hat{x}(f)\hat{h}(f) \quad (2.4)$$

Um exemplo gráfico de uma resposta impulsiva $h(t)$ típica pode ser observada na Figura 2.2.

Figura 2.2: Gráfico representativo de uma resposta ao impulso normalizada típica medida em uma sala.



Fonte: Autora deste trabalho.

Com isso, é válido afirmar que a determinação da resposta impulsiva é uma das atribuições mais fundamentais em experimentos de acústica de salas.

¹ Também conhecida como delta de Dirac ou ainda como impulso unitário, é uma função generalizada em que não está definido o seu valor ou sua derivada em $t = 0$ e que vale zero para todo $t \neq 0$ e, por assim dizer, "tende a infinito" em $t = 0$, de modo que sua integral em todo o domínio dos reais é unitária. O conceito foi introduzido pelo físico britânico Paul Adrien Maurice Dirac, em 1930.

2.3 PARÂMETROS OBJETIVOS PARA ACÚSTICA DE SALAS

As respostas impulsivas adquiridas por meio de medições, ou por simulações, são, na maioria dos casos, a base utilizada para o cálculo dos parâmetros objetivos. A avaliação pode ser feita sob vários critérios. Dentre os principais, estão os que avaliam o tempo de decaimento (como o TR e o EDT) e a energia relativa (assim como o D_{50} e o C_{80}) (23).

Como os dados são extraídos sempre relativos a uma determinada configuração sala-fonte-recepção, uma alta variabilidade pode acontecer. Visto isso, o JND (*Just Noticeable Difference*) ou diferença no limiar do observável, representa a taxa aceitável de variação de cada parâmetro, sem que um ser humano, na média, consiga perceber a variação (24).

2.3.1 Parâmetros relativos ao tempo de decaimento

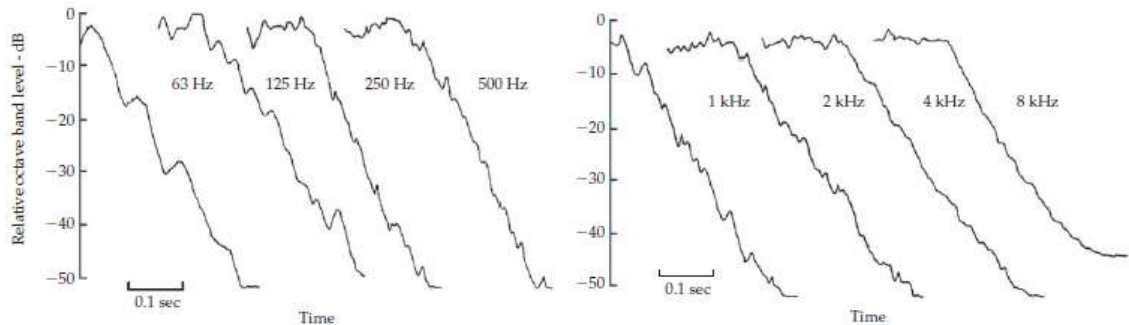
O tempo de reverberação (TR) é definido como o tempo que a energia sonora leva para decair a 1 milionésimo da energia do estado estacionário ao volume da sala e à sua quantidade de absorção média existente, segundo Sabine ((25), apud Brandão (4)), na forma da equação 2.5, onde V indica o volume da sala, S a área correspondente as superfícies dela e $\bar{\alpha}$ os respectivos coeficientes de absorção dos materiais.

$$TR = \frac{0,161 V}{S \bar{\alpha}}. \quad (2.5)$$

Tanto o TR como o EDT (Early Decay Time) são determinados por meio da velocidade com a qual se realiza o processo de decaimento da energia sonora, sendo o EDT para os primeiros 10 dB de queda, e o TR normalmente por volta de 30 dB, entre -5 dB e -35 dB abaixo do nível inicial. Ambos são calculados com base no tempo necessário para um decaimento de 60 dB, com a taxa de decaimento ajustada para as faixas indicadas (26).

Contudo, embora simples de medir em teoria, na prática, problemas podem ser encontrados. Para que um decaimento de 60 dB seja obtido, o ruído de fundo deverá ser muito baixo, ou a fonte sonora deverá emitir um sinal de nível maior, o que nem sempre é viável. Além disso, aferir o decaimento para uma ampla faixa de frequência pode ser dificultoso devido o número de modos característicos em bandas mais baixas (causando uma alta variabilidade entre as medições) e as limitações relativas à fonte sonora utilizada (27), como pode ser observado na Figura 2.3. A variabilidade permitida pelo JND para estes parâmetros é de 5% (24).

Figura 2.3: Análise do decaimento sonoro por bandas de oitava para uma sala pequena, com $82,7 \text{ m}^3$. As variações são maiores nas baixas frequências devido à menor densidade modal.

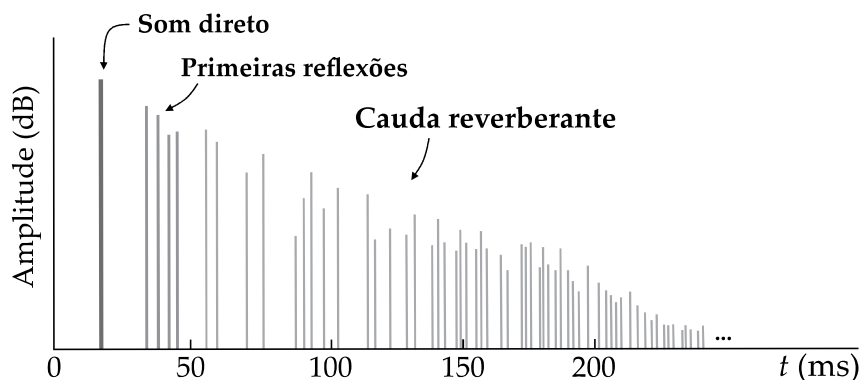


Fonte: EVEREST, 2009 (27), p. 164.

2.3.2 Parâmetros de energia relativa

A Figura 2.4 ilustra o comportamento de uma resposta impulsiva, onde a primeira linha vertical indica o som direto e cada linha adicional representa uma reflexão que chega a um determinado receptor. Geralmente, a audição humana não é capaz de notar reflexões com atrasos menores que 50 ms como eventos acústicos separados. Ao contrário, tais reflexões aumentam o volume aparente do som direto, sendo frequentemente referidas como "reflexões úteis". As demais reflexões com maiores atrasos são responsáveis pelo que é percebido como a reverberação da sala. A contribuição dessas reflexões pode ser caracterizada por vários parâmetros derivados da resposta ao impulso (8).

Figura 2.4: Distribuição temporal da energia sonora, em um dado ponto de uma sala, a partir da emissão de um som impulsivo. O som direto é seguido pelas reflexões discretas espaçadas no tempo.



Fonte: Autora deste trabalho.

Um desses parâmetros é a "Definição", ou D_{50} , que pode ser descrita pela equação 2.6 e é utilizada como medida objetiva para a inteligibilidade da fala (28).

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0.05} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (2.6)$$

Além deste, a "Clareza" ou C_{80} , por meio da equação 2.7, é usada comumente para caracterizar a qualidade da sala para apresentações musicais (29).

$$C_{80} = 10 \log \cdot \frac{\int_0^{0.08} h^2(t) dt}{\int_{0.08ms}^{\infty} h^2(t) dt} \quad (2.7)$$

De acordo com Hak *et al.* (24), o JND para a Clareza é de 1 dB, enquanto para a Definição é de 5 %.

2.3.3 Definição do erro médio relativo ao JND

Neste trabalho, para que o desempenho dos algoritmos fosse avaliado devidamente, foi calculado a média do erro absoluto entre os parâmetros simulados e medidos, levando o JND em consideração, segundo o proposto por Bork (30). A vantagem desse calculo se dá pelo fato de uma única escala ser considerada para todos os parâmetros acústicos. Além disso, também é possível facilmente estimar se tais erros representam diferenças subjetivamente percebidas entre respostas impulsivas reais e simuladas.

O erro médio relativo foi aqui calculado de duas maneiras diferentes:

- Para todos os pares fonte-receptor, por frequência,

$$\bar{E}(f) = \frac{1}{\text{JND}(f)} \frac{1}{10} \sum_{p=1}^{N_{sr}} |x_{s_p}(f) - x_{m_p}(f)|. \quad (2.8)$$

- Para todas as bandas de frequência, por par fonte-receptor,

$$\bar{E}_{sr} = \frac{1}{N_k} \sum_{k=1}^{N_k} \frac{1}{\text{JND}_k} |x_{s_k} - x_{m_k}|, \quad (2.9)$$

em que p representa o par fonte-receptor, o índice k indica as bandas de frequência consideradas, x_s são os parâmetros acústicos obtidos por simulação e x_m obtidos por medição. Aqui, o JND é sempre calculado em relação aos dados medidos. Na somatória, N_{sr} representa o número de pares fonte-receptor em uma dada simulação / experimento (sendo 10 o número de pares para a Sala 10, e 8 para a câmara reverberante), e N_k o número de bandas de frequência (31).

2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM ACÚSTICA DE SALAS

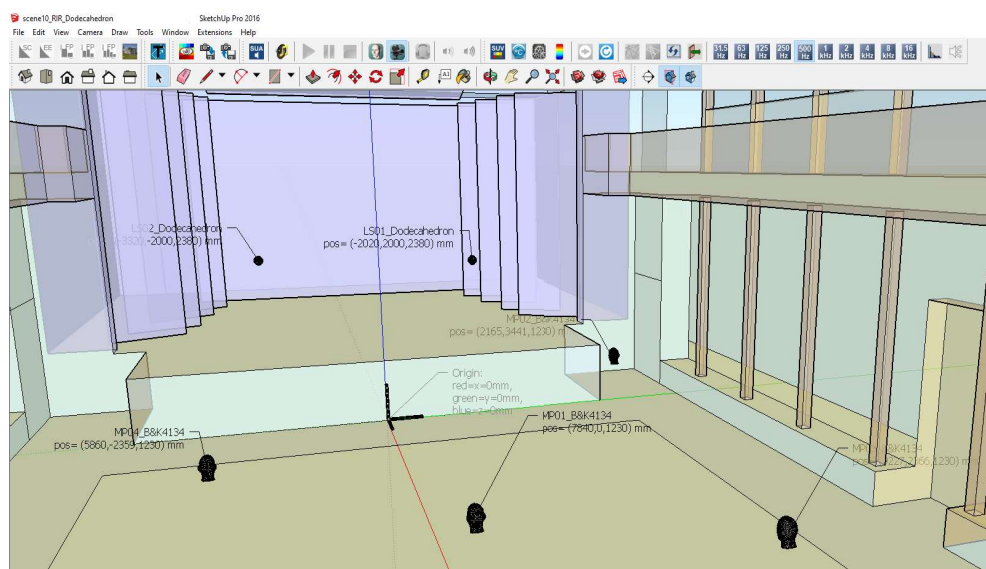
Com o avanço tecnológico, a predição acústica em fase de projeto ganhou rapidez e confiabilidade. Os algoritmos hoje existentes, apesar de não revelarem uma completa expressão da verdade, conseguem imprimir um senso de realidade virtual, sobretudo a partir da possibilidade da geração de auralização¹ dos projetos (32; 33; 34).

Cada algoritmo é desenvolvido a partir da utilização de métodos de cálculo que buscam a melhor maneira de simular um campo acústico. Em cada método, vantagens e limitações podem ser identificadas. Os programas utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa serão listados a seguir, buscando explanar brevemente os modelos matemáticos por eles utilizados.

2.4.1 Método computacional utilizado pelo RAVEN

Desenvolvido a partir de 2005 no Institute of Technical Acoustics, RWTH Aachen University, em Aachen (Alemanha), o RAVEN (Room Acoustics for Virtual Environments) propõe-se a entregar uma renderização em tempo real, adicionando um feedback acústico 3D adequado ao projetista (35). A Figura 2.5 ilustra a *Interface* quando integrado ao *software* SketchUp.

Figura 2.5: Visualização do Raven integrado ao *software* SketchUp.



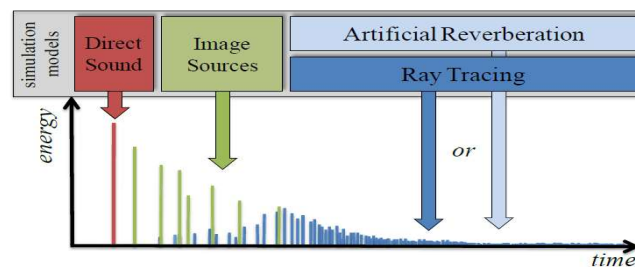
Fonte: Autora deste trabalho.

¹ Segundo Tenenbaum *et al.* (1), "auralização" é a técnica de gerar som audível a partir de dados numéricos, permitindo que se ouça como soar, em um determinado ponto da sala, um determinado conteúdo sonoro (por exemplo, um trecho de música ou um discurso).

Com um algoritmo híbrido, combina o método de fontes virtuais (determinístico) e de traçado de raios (estocástico). A estrutura permite um cálculo físico da respostas ao impulso de sala onde, além dos componentes do campo sonoro refletidos especularmente, também são levados em consideração os fenômenos sonoros da dispersão, transmissão e difração do som (36).

RAVEN é um algoritmo de última geração que inclui um método de cálculo híbrido na simulação da resposta impulsiva de ambientes. A Figura 2.6 mostra uma resposta impulsiva energética da sala incluindo o som direto, as reflexões iniciais (calculadas pelo método de fontes virtuais) e a reverberação (gerada por um algoritmo de traçado de raios ou um modelo estatístico de reverberação artificial). A reverberação artificial foi integrada para demonstrar a diferença entre os dois modelos de reverberação. Como a geração de uma reverberação artificial requer significativamente menos cálculos em comparação com o traçado de raios, ela também pode ser usada para fornecer um feedback plausível em tempo real no caso de baixas capacidades computacionais. (36, Tradução da autora)

Figura 2.6: Modelo da resposta impulsiva simulada com os métodos utilizados.



Fonte: ASPÖCK, 2014 (36).

A parte principal do algoritmo do RAVEN foi escrita em C++, com suporte aos principais sistemas operacionais. Há suporte para computação paralela em máquinas de memória local fragmentada, máquinas de memória distribuída pela rede ou combinações de ambas. Isso permite um melhor desempenho, tirando proveito de todo o poder computacional das GPUs² modernas (37). O RAVEN também possui uma interface com o *software* Matlab®, que foi utilizada nesta pesquisa.

2.4.2 Método computacional utilizado pelo RAIOS 7

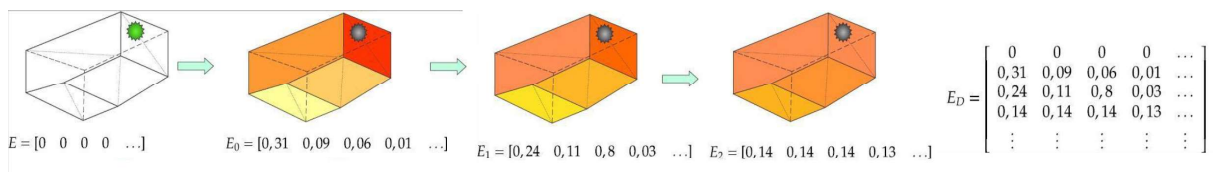
O código computacional para acústica de salas RAIOS (*Room Acoustics Integrated and Optimized Software*), segundo Taminato *et al.* (38), é um *software* implementado por pesquisadores brasileiros que vem sendo desenvolvido desde o final da década de 1990, estando

² Graphics Processing Units, ou unidades de processamento gráfico.

atualmente em sua Versão 7. Conforme indicado por Tenenbaum *et al.* (39), a simulação é baseada num método híbrido, sendo as reflexões especulares obtidas por uma técnica aprimorada de traçado de raios e as reflexões difusas calculadas usando o método de transição de energia levemente modificado.

No instante inicial, a energia sonora está toda contida na fonte; passado um intervalo de tempo, essa energia é distribuída entre as diversas superfícies segundo o ângulo sólido com que cada uma delas é vista pela fonte (a parede mais próxima à fonte fica mais energizada, como mostra a Figura 2.7). Na sequência, todas as superfícies emitem para todas as demais, sempre segundo os ângulos sólidos relativos, de modo que, aos poucos, a energia sonora vai se distribuindo mais uniformemente pela sala. O procedimento é descrito matematicamente e numericamente por meio de matrizes – cujas colunas representam as diversas superfícies em que a sala é subdividida e cujas linhas representam o tempo discretizado – que vão se atualizando ao longo do processo de difusão. O resultado é uma cauda reverberante mais densa, ou “preenchida”, e mais próxima daquela que é observada experimentalmente. (38, Tradução da autora)

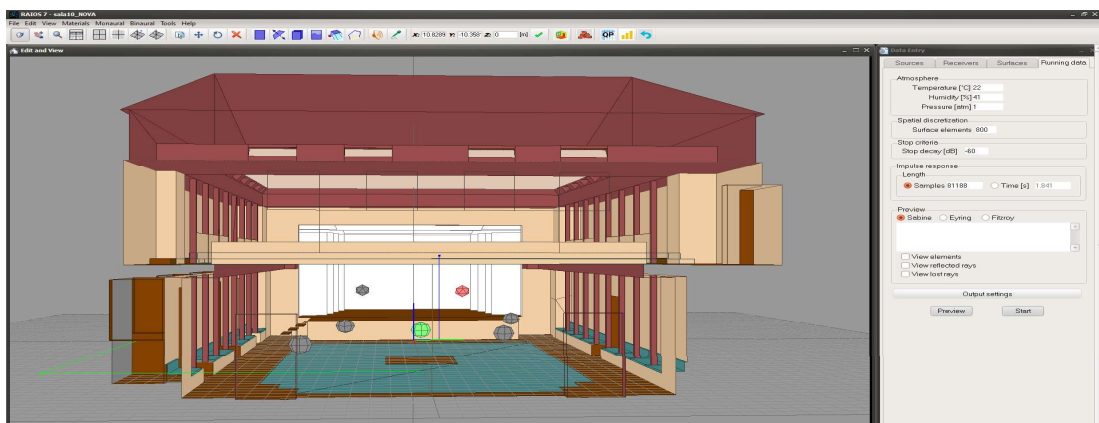
Figura 2.7: Esquema ilustrativo do método de cálculo das reflexões difusas por meio das matrizes de transição.



Fonte: TAMINATO, 2018 (38).

O programa RAIOS participou do Round Robin 3 em sua Versão 3. Resultados satisfatórios foram obtidos como o reportado por Tenenbaum *et al.* (40). A *interface* do programa pode ser visualizada na Figura 2.8.

Figura 2.8: Visualização do RAIOS 7 para uma das salas estudadas.



Fonte: Autora deste trabalho.

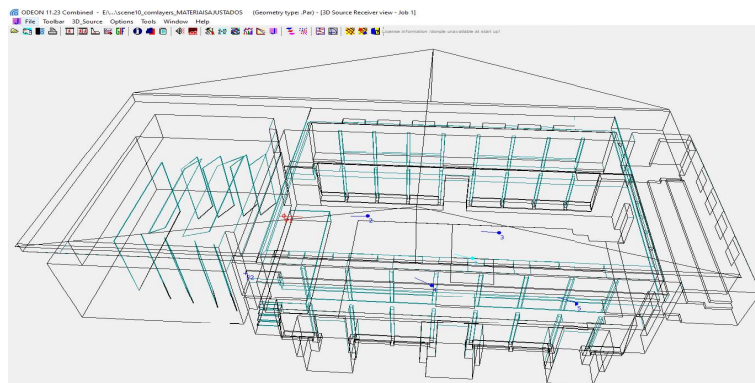
2.4.3 Método computacional utilizado pelo ODEON

O projeto ODEON teve início em 1984 a partir de uma cooperação entre a Universidade Técnica da Dinamarca (Dpt. of Acoustic Technology) e um grupo de empresas de consultoria (41). Para a versão 11.23 utilizada neste estudo, o *software* utiliza métodos híbridos de cálculo baseados em uma combinação do método das fontes virtuais e um método similar ao de radiosidade dos raios, buscando assim prever o tempo de chegada das reflexões em um receptor e a intensidade delas por banda de oitava. Segundo Rindel *et al.* (42), como o método de cálculo é baseado em adicionar a energia por banda de oitava a um histograma de tempo e formar diretamente a resposta ao impulso ao quadrado necessária para que sejam obtidos os parâmetros objetivos, sem a necessidade de filtragem digital.

A parte inicial da resposta (reflexões iniciais) é determinada por uma lista de fontes virtuais até uma determinada ordem de transição, normalmente de 2ª ordem. Para reflexões de ordem superior, é iniciado um disparo de raios em espiral de Fibonacci, resultando num grande número de pontos de reflexão, distribuídos nas superfícies da sala. Cada ponto é substituído por uma fonte secundária, que irradia o som de acordo com a força relativa e o atraso da reflexão correspondente. Algoritmos de reflexão e dispersão baseados em vetores usam como dados de entrada o coeficiente de espalhamento da superfície, a distância entre ela e os pontos de reflexão anteriores, bem como o ângulo de incidência, para produzir um padrão de direcionalidade exclusivo para esta fonte secundária. Depois que todas as imagens e fontes secundárias são detectadas, as informações de energia que elas carregam podem ser coletadas de todos os receptores visíveis na sala, levando efetivamente a uma resposta ao impulso ao quadrado. (42, Tradução da autora)

Atualmente, o *software* se encontra na Versão 16, onde descreve o método como uma combinação entre os métodos de origem da imagem, espalhamento precoce (Early-Scattering), traçado de raios e radiosidade (43). A *interface* do programa pode ser visualizada na Figura 2.9.

Figura 2.9: Visualização do Odeon 11 para uma das salas estudadas.



Fonte: Autora deste trabalho.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Tendo em vista a importância das intercomparações entre programas de simulação acústica, este capítulo pretende apresentar as salas e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho, composto basicamente em duas etapas: realização de ensaios experimentais e simulação.

3.1 SALAS OBJETO DE ESTUDO

As salas estudadas foram escolhidas devido a acessibilidade aos dados experimentais e diferenças entre volume e características acústicas, permitindo que os programas fossem comparados de forma mais ampla.

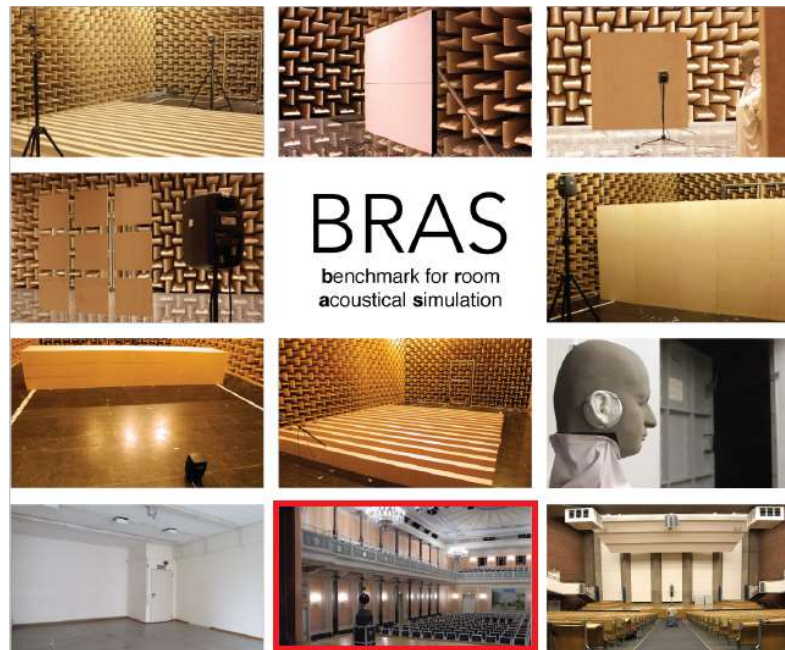
O salão de música de câmara da Konzerthaus foi utilizada na versão 4 do Round Robin, e a equipe idealizadora fornece todos os dados desta e das demais salas em um banco de dados disponível *on-line* (5). A câmara reverberante do laboratório de acústica e vibrações da UFSM é uma sala localizada na universidade para qual este trabalho foi realizado. Devido às dificuldades encontradas com a pandemia do COVID-19, uma colaboração foi firmada e os dados experimentais fazem parte dos resultados extraídos por Vieira (44) em sua pesquisa³.

3.1.1 Salão de música de câmara Konzerthaus (Sala 10 do RR4)

Para que a capacidade de reprodução do campo acústico em salas pudesse ser analisada, foram criados, a partir de 1994, as intercomparações internacionais entre programas de simulação, denominadas de Round Robin (RR). A quarta e última versão do RR iniciou-se em 2016, tendo sua primeira publicação em revista científica em 2019 (45). Foram disponibilizados 9 cenários propostos a serem simulados. Um aspecto buscado por esta versão do RR foi a criação de um banco de dados com uma coleção abrangente de fatores no contexto da modelagem acústica e processamento de sinais biauriculares, denominado BRAS – *Benchmark for Room Acoustical Simulation* (Figura 3.1) (5).

³ Intitulada como "Projeto de uma câmara anecoica para avaliação de ruído em médias e altas frequências", as medições realizadas para a caracterização do material absorvedor utilizado no projeto foram reaproveitadas neste trabalho.

Figura 3.1: Cenas simuladas para a quarta versão do *Round Robin*, e disponibilizadas no BRAS, com a Sala 10 destacada em vermelho.



Fonte: ASPÖCK, 2019 (5).

Os dados apresentados para a Sala 10, ou CR3 (*Complex Room 3*), são referentes ao salão de música de câmara da Konzerthaus, em Berlim (Figura 3.2), com volume de aproximadamente 2.350 m^3 e capacidade para 386 pessoas. Foram fornecidos: a geometria da sala em *Sketchup* (modelada por uma geometria de 546 superfícies), os coeficientes de absorção e espalhamento de todas as superfícies internas (Tabela 3.1), as coordenadas cartesianas dos centros das fontes sonoras bem como dos receptores, e o banco de dados de direcionalidade de fontes sonoras e receptores biauriculares.

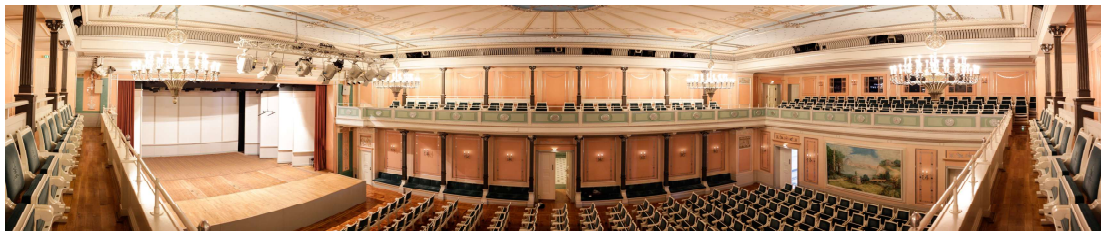
Três tipos de fonte e dois tipos de receptor foram utilizados nas medições. Para as fontes, foram utilizados dodecaedros, assumidos como fontes onidirecionais, e os monitores de estúdio Genelec 8020c e QSC K8, direcionais. As duas primeiras fontes foram utilizadas em medições de repostas impulsivas monoauriculares, e a última, para repostas biauriculares com o uso de uma cabeça artificial como receptor. Neste trabalho, apenas as repostas impulsivas monoauriculares geradas a partir das fontes onidirecionais (dodecaedro) serão analisadas. Na Figura 3.3, por exemplo, podem-se observar os 2 pontos de fontes e 5 pontos de receptores para a situação do dodecaedro como fonte. As medições foram obtidas à temperatura de $22,4 \text{ }^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de 40,9%.

Tabela 3.1: Coeficientes de absorção (α) e espalhamento (s) dos materiais determinados para a Sala 10 do RR4, em bandas de oitava, para as frequências centrais de 125 Hz a 8 kHz.

Materiais	Coeficientes	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Piso	α	0,062	0,077	0,064	0,054	0,043	0,061	0,078
	s	0,005	0,008	0,013	0,042	0,110	0,128	0,136
Teto	α	0,084	0,080	0,114	0,111	0,107	0,185	0,144
	s	0,009	0,013	0,019	0,027	0,038	0,177	0,319
Assentos	α	0,228	0,344	0,405	0,347	0,459	0,318	0,410
	s	0,151	0,574	0,739	0,763	0,789	0,815	0,842
Gesso	α	0,149	0,131	0,131	0,107	0,095	0,139	0,121
	s	0,004	0,006	0,008	0,010	0,014	0,018	0,056
Estrutura em gesso	α	0,133	0,115	0,151	0,151	0,136	0,139	0,121
	s	0,018	0,027	0,040	0,060	0,284	0,499	0,535
Painéis do palco	α	0,043	0,080	0,085	0,078	0,070	0,108	0,099
	s	0,002	0,003	0,003	0,005	0,006	0,008	0,010
Janelas	α	0,166	0,096	0,070	0,058	0,107	0,076	0,082
	s	0,006	0,008	0,010	0,014	0,018	0,023	0,030

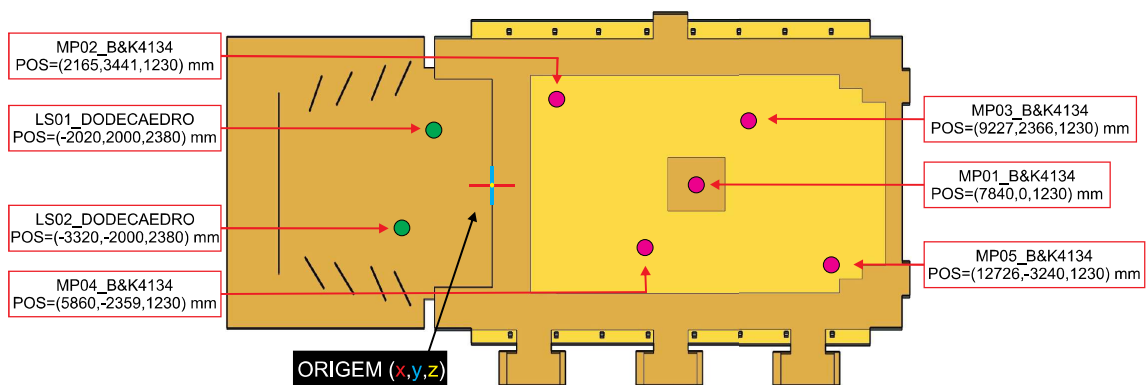
Fonte: Adaptado de ASPÖCK, 2019 (45).

Figura 3.2: Salão de música de câmara Konzerthaus, em Berlim.



Fonte: ASPÖCK, 2019 (45).

Figura 3.3: Planta baixa da Sala 10 do RR4 com os pontos de fonte-recepção indicados.

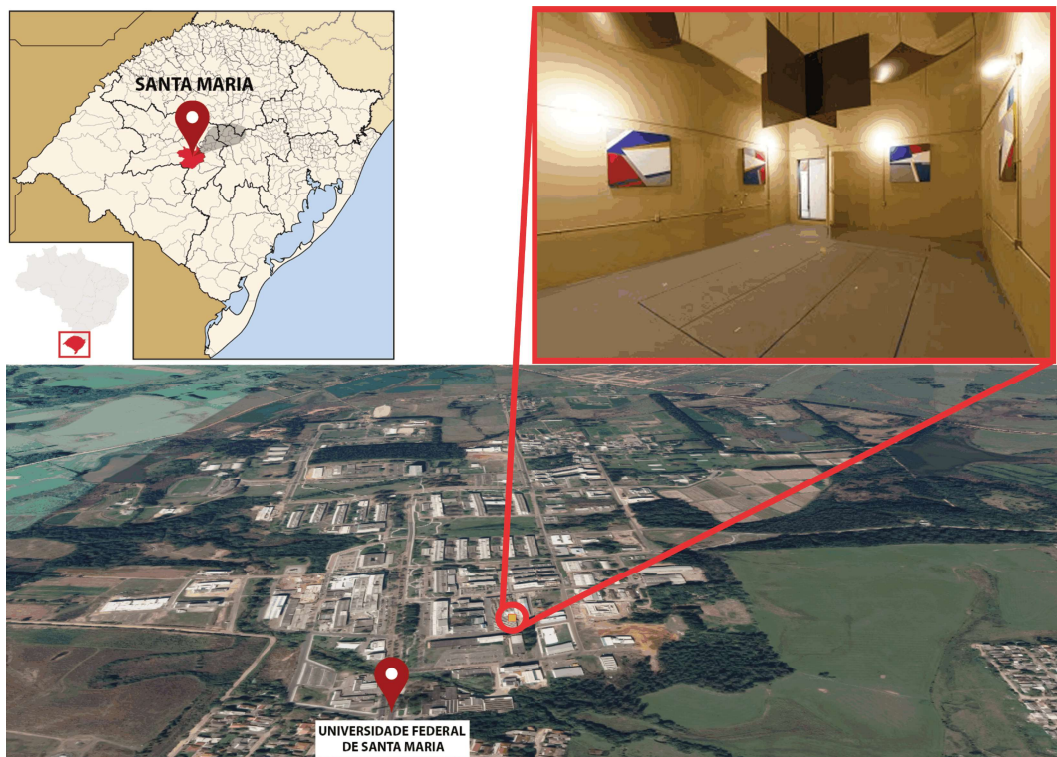


Fonte: Autora deste trabalho.

3.1.2 Câmara reverberante do laboratório de acústica e vibrações da UFSM

Localizada em Santa Maria, Rio Grande do Sul, em um dos anexos do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (Figura 3.4), a câmara reverberante do Laboratório de Acústica e Vibrações possui 198,72 m², o que a enquadra na ISO 354 (46).

Figura 3.4: Localização da câmara reverberante da UFSM.



Fonte: Autora deste trabalho.

A câmara possui paredes, teto e piso construídos em concreto armado com espessura de 30 cm, e porta dupla em chapa de aço vedada com borracha. A câmara se encontra desacoplada mecanicamente da estrutura da fundação, sendo o contato feito por suportes de neoprene, buscando assim um maior isolamento acústico e vibracional.

Conforme mencionado anteriormente, os dados aqui utilizados são parte do trabalho realizado por Vieira (44) em sua pesquisa, e foram gentilmente compartilhados visto as dificuldades relativas ao cenário atual da pandemia do COVID-19. Parte dos procedimentos realizados foram acompanhados pela autora deste trabalho e serão aqui descritos.

3.1.2.1 Ensaios experimentais (procedimentos preparatórios e instrumentação)

Para a realização das medições, uma rotina no programa *Matlab*® foi criada. Nela, todas as configurações necessárias para uma medição adequada de acordo com a ISO 354 (46) foram escritas, também utilizando o ITA-Toolbox (47; 48; 49), programa de código aberto orientado ao objeto para o *Matlab*®, desenvolvido no Instituto Técnico de Acústica (ITA), na RWTH University of Aachen, Alemanha.

A instrumentação utilizada para este experimento inclui:

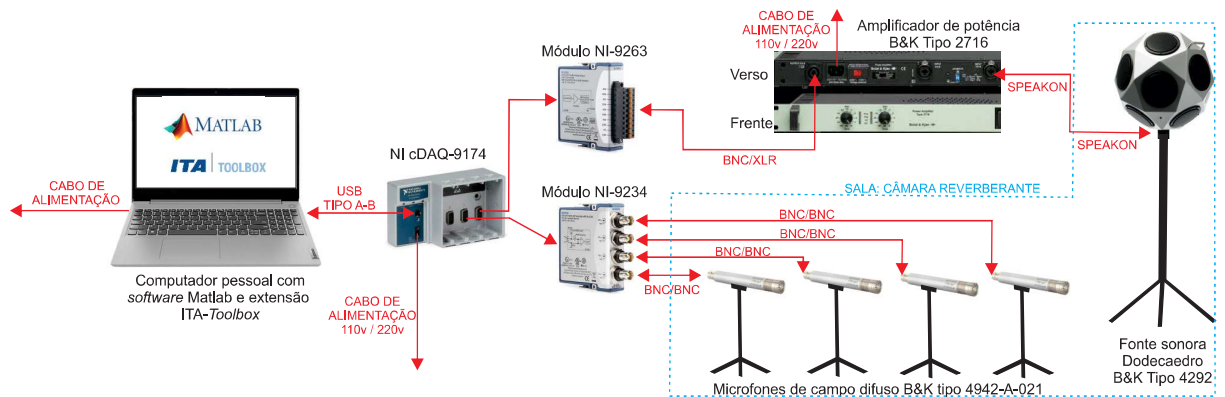
- Termo-higrômetro (medidor de temperatura e umidade);
- Calibrador de microfone (B&K Tipo 4231);
- Computador pessoal com *software Matlab*® e ITA-Toolbox instalado;
- Placa de aquisição e geração de sinais (National Instruments NI cDAQ-9174) com 2 módulos (NI-9234 e NI-9263);
- Amplificador (B&K Tipo 2716);
- Quatro microfones (microfone de campo difuso B&K tipo 4942-A-021, de 1/2 polegada com pré-amplificador tipo 2671, pré-polarizado), cabos BNC/BNC e tripés correspondentes;
- Fonte sonora onidirecional (dodecaedro B&K Tipo 4292), cabo speakon/speakon e tripé correspondente.

O esquema de medição pode ser observado na Figura 3.5, assim como as fotos na Figura 3.6. Os resultados foram extraídos para duas configurações diferentes. Primeiro com a câmara reverberante vazia. Depois com a amostra posicionada em situação de ensaio experimental de acordo com o exigido pela ISO 354(46). Foi utilizada a espuma Sonex Illtec Perfilado - 34 placas de 625 × 625 mm, totalizando 13,28 m².

Os condicionantes ambientais no momento das medições foram: temperatura ambiente de 25,9 °C, umidade relativa do ar de 55% e pressão atmosférica de 101,3 kPa. As aferições foram feitas no início e no término do ensaio.

Foram consideradas oito configurações de par fonte/receptor que podem ser observadas na Figura 3.7. Para a mudança de local da fonte sonora, apenas foi trocada a posição original

Figura 3.5: Esquema de medição exemplificando os equipamentos e conexões.



Fonte: Autora deste trabalho.

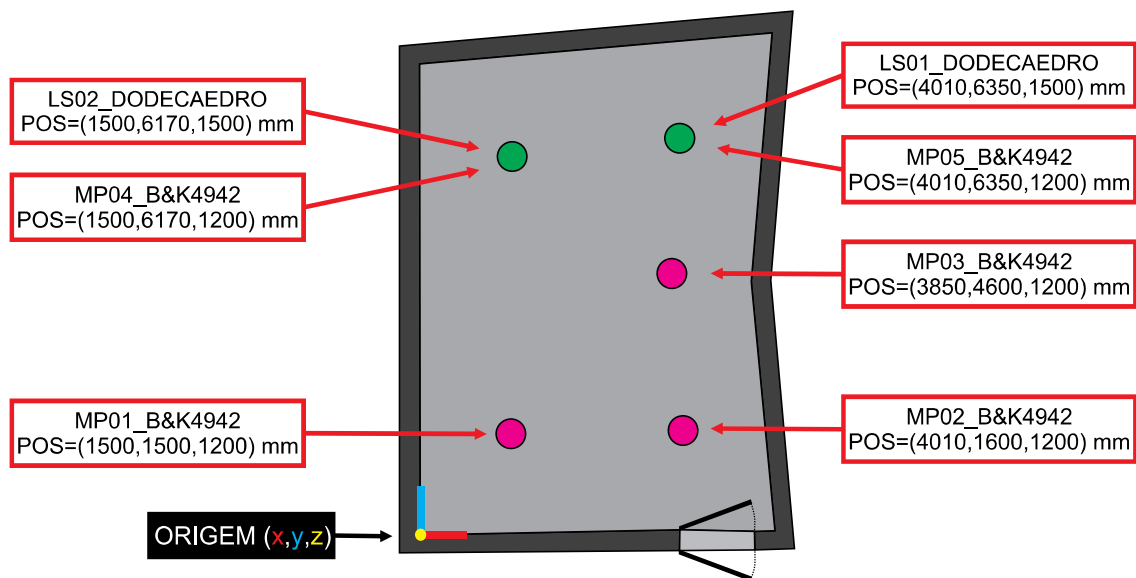
Figura 3.6: Fotos da medição na situação da câmara com a amostra posicionada, na posição de fonte LS02.



Fonte: Autora deste trabalho.

com um dos pontos de recepção. Ou seja, quando a fonte se encontra na posição LS01, os receptores em medição são: MP01, MP02, MP03 e MP04. Enquanto na posição de fonte LS02, os receptores em medição são: MP01, MP02, MP03 e MP05.

Figura 3.7: Planta baixa da câmara reverberante com os pontos de fonte-recepção indicados.



Fonte: Autora deste trabalho.

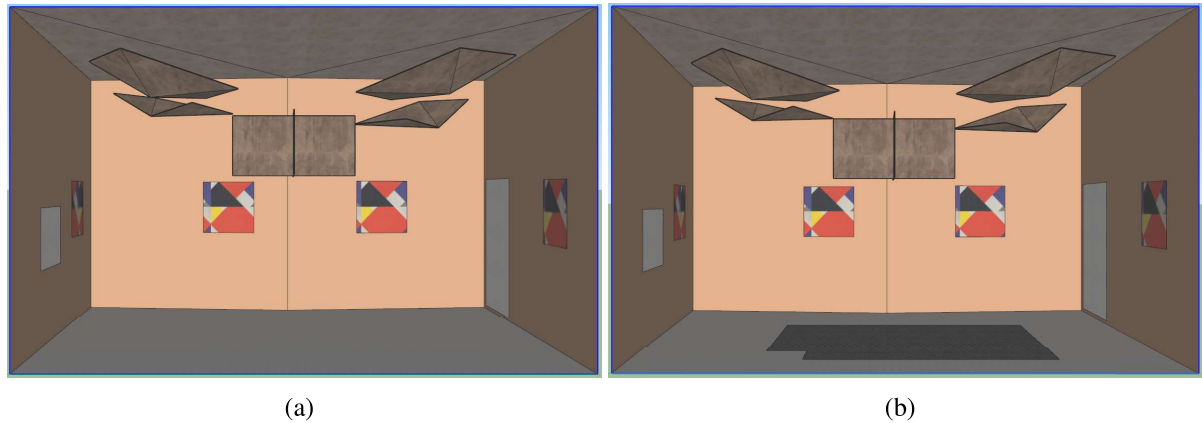
3.1.2.2 Configurações do modelo virtual e dos materiais atribuídos

O modelo virtual para a simulação foi criado por meio do *software* de modelagem SketchUp, desenvolvido em 74 superfícies na situação de sala vazia e 75 superfícies para a sala com amostra, como apresentado da Figura 3.8.

Foram caracterizados seis materiais diferentes para a câmara reverberante, com coeficientes de absorção e espalhamento inicialmente extraídos do banco de dados do BRAS (*Benchmark for Room Acoustical Simulation*) (5) e do GRAP (*Ground Truth on Room Acoustical Analysis and Perception*) (50), e posteriormente ajustados para haver uma aproximação dos valores encontrados em medição, como pode ser observado na Figura 3.9. Os materiais foram atribuídos de acordo com a similaridade observada pelas fotos também disponibilizadas no banco de dados. Apenas os coeficientes de absorção foram alterados de acordo com o necessário para a calibração do modelo a ser simulado.

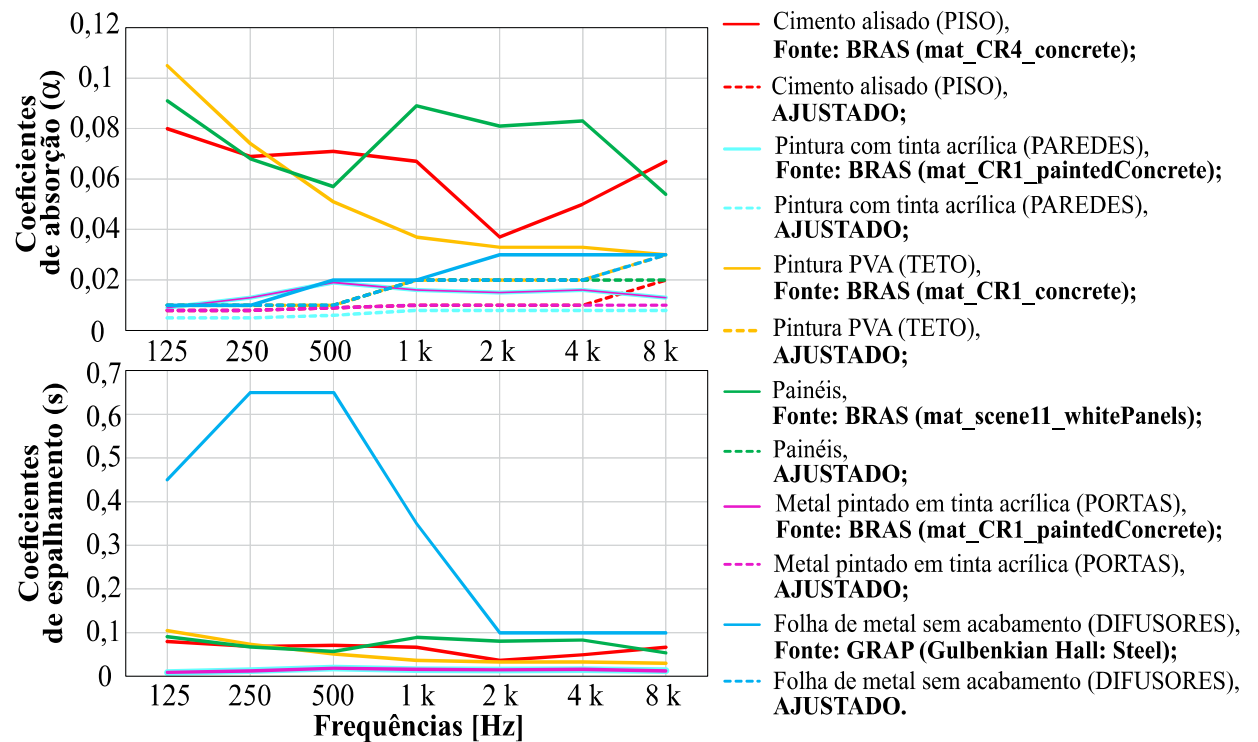
O coeficiente de absorção atribuído à amostra foi o adquirido por meio da medição, de acordo com a ISO 354 ((**year?**)), e pode ser observado no gráfico da Figura 3.10.

Figura 3.8: Modelo virtual da câmara reverberante do Laboratório de Acústica e Vibrações da UFSM nas situações de sala vazia, em (a), e com amostra, em (b).



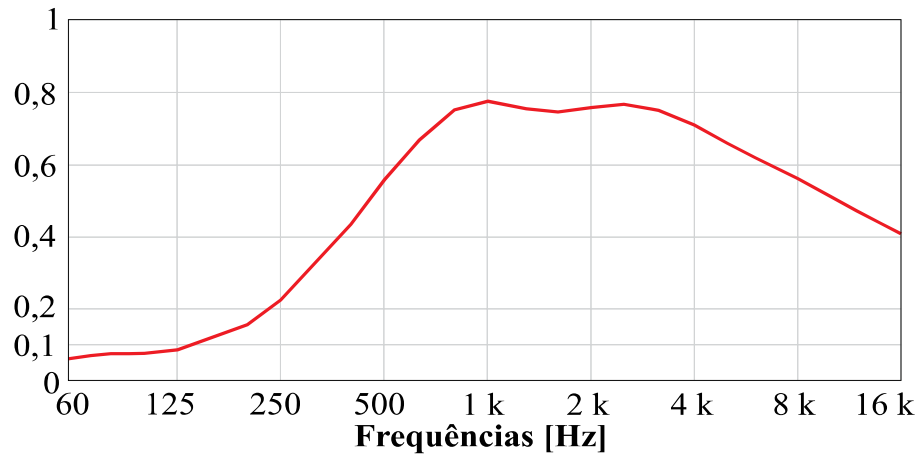
Fonte: Autora deste trabalho.

Figura 3.9: Coeficientes de absorção e espalhamento, originais e ajustados, atribuídos aos materiais da câmara reverberante.



Fonte: Autora deste trabalho.

Figura 3.10: Coeficiente de absorção da espuma, extraído no ensaio experimental na câmara reverberante.



Fonte: VIEIRA, 2021 (44).

Tabela 3.2: Coeficientes de absorção (α) e espalhamento (s) atribuído à amostra com base na medição realizada.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Coeficiente de absorção (α)	0,08	0,22	0,56	0,77	0,76	0,71	0,56
Fonte:	Medição realizada por Vieira (2021).						
Coeficiente de espalhamento (s)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,054	0,076
Fonte:	BRAS (mat_CR1_absorber).						

Fonte: Adaptado de VIEIRA, 2021 (44) e ASPÖCK, 2019 (5).

3.2 CONFIGURAÇÕES DA SIMULAÇÃO ACÚSTICA

Em cada programa de simulação utilizado, configurações foram atribuídas de acordo com o recomendado nos manuais de operação fornecidos. Assim, as definições para o Odeon estão especificadas na Tabela 3.3, para o RAVEN, na Tabela 3.4, e para o RAIOS, na Tabela 3.5.

Para o Raios, apenas a Sala 10 do RR4 será apresentada neste trabalho devido a problemas técnicos encontrados na simulação da segunda sala.

Tabela 3.3: Configurações atribuídas ao Odeon para as duas salas em estudo.

	Sala 10 RR4	Câmara reverberante (com e sem amostra)	Informações
Número de raios	20.032	16.000	Valor calculado pelo próprio programa ao escolher entre "Survey", "Engineering" e "Precision", a última opção.
Máxima ordem de reflexão	2.000	2.000	Critério de parada que determina quantas vezes o raio pode ser refletido. Valor ajustado automaticamente ao escolher a opção "Precision".
Ordem de transição	2	2	Determina em qual ordem de reflexão o programa mudará o método inicial de imagens virtuais para o traçado de raios. Configuração atribuída automaticamente.
Número de reflexões iniciais	2.504	2.000	Configuração atribuída automaticamente.
<i>Screen diffraction</i>	Ativado	Ativado	Configuração atribuída automaticamente. Quando ligado, busca calcular o som difratado quando a fonte sonora não é visível pelo receptor.
Comprimento da resposta impulsiva	3,5 s	20,0 s	Padrão mantido para todos os programas.

Fonte: Odeon User's Manual, 2020 (43).

Tabela 3.4: Configurações atribuídas ao RAVEN para as duas salas em estudo.

	Sala 10 RR4	Câmara reverberante (com e sem amostra)	Informações
Número de raios	20.157	11.872	Valor calculado pelo próprio programa por meio do comando "N = rpf.getNumberOfParticles Recommendation();"
Ordem de transição	2	2	Determina em qual ordem de reflexão o programa mudará o método inicial de imagens virtuais para o traçado de raios.
Energy Loss	- 60 dB	- 60 dB	Perda máxima de energia em dB, até que os raios parem de ser rastreados, definindo a faixa dinâmica da reverberação.
Comprimento da resposta impulsiva	3,5 s	20,0 s	Padrão mantido para todos os programas.

Fonte: SCHRODER, 2011 (37).

Tabela 3.5: Configurações atribuídas ao RAIOS para a Sala 10 do RR4.

	Sala 10 do RR4	Informações
Número de raios	20.000	Número ideal atribuído por meio de testes, em que o valor definido cresce até o ponto em que os valores retornados para os parâmetros calculados passam a não mais variar.
Número elementos	2.652	Calculado automaticamente, mas pode ser definido a fim de que uma leitura mais detalhada (ou mais superficial, tornando o modelo mais leve) da sala seja feita.
<i>Energy Loss</i>	- 60 dB	Perda máxima de energia em dB, até que os raios parem de ser rastreados, definindo a faixa dinâmica da reverberação.
Comprimento da resposta impulsiva	3,5 s	Padrão mantido para todos os programas.

Fonte: TENENBAUM, 2019 (51).

3.3 MÉTODO EMPREGADO PARA A APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados encontrados foram organizados para nas condições: **parâmetros acústicos vs. frequência** e **parâmetros acústicos vs. par fonte-receptor**. Dessa forma, é possível que uma comparação ponto-a-ponto seja analisada.

Os parâmetros EDT, T_{30} , D_{50} e C_{80} , calculados para todas as frequências de banda de oitava, e todos os pares fonte-receptor, totalizam 68 gráficos para a Sala 10 do RR4, e 60 gráficos para a Câmara Reverberante da UFSM, e encontram-se todos anexados nos Apêndices A e B deste trabalho.

Para que os resultados sejam melhor discutidos, buscando brevidade na abordagem do próximo capítulo, na condição **parâmetros acústicos vs. frequência** uma média aritmética simples foi realizada para os resultados dos 10 pares de fonte-recepção na Sala 10 do RR4 e 8 pares da Câmara Reverberante.

Na condição **parâmetros acústicos vs. par fonte-receptor**, apenas as frequências centrais de 125 Hz, 500 Hz, 2 kHz e 8 kHz foram trazidas no corpo do texto para a Sala 10, e a frequência de 125 Hz para a Câmara Reverberante na condição de sala vazia e com amostra, sob o entendimento que estas já se mostram significativas para os apontamentos que foram realizados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, os resultados são apresentados de acordo com descrito na metodologia. Também será incluído nesta discussão o cálculo do erro médio relativo ao JND, de acordo com a Seção 2.3.3, e uma comparação, para a Sala 10 do RR4, entre as respostas ao impulso monoauriculares quadráticas.

4.1 SALA 10 DO RR4

As médias dos valores obtidos entre os 10 pontos de fonte-recepção, para o T_{30} , EDT, C_{80} e D_{50} estão apresentadas nas Figuras 4.1(a), 4.1(b), 4.1(c) e 4.1(d). Em cada gráfico pode-se observar os valores médios medidos e calculados para cada um dos parâmetros em função da frequência, de 125 Hz a 8 kHz.

Uma análise válida, por meio do T_{30} mostrado na Figura 4.1(a), é a estimativa da Frequência de Schroeder, f_s . Conforme observado, sendo aproximadamente 1,6 s o maior T_{30} encontrado em medição, e considerando o volume da sala 2.350 m³ dado por Aspöck et al.(5) para o modelo virtual, tem-se o cálculo apresentado em 4.1.

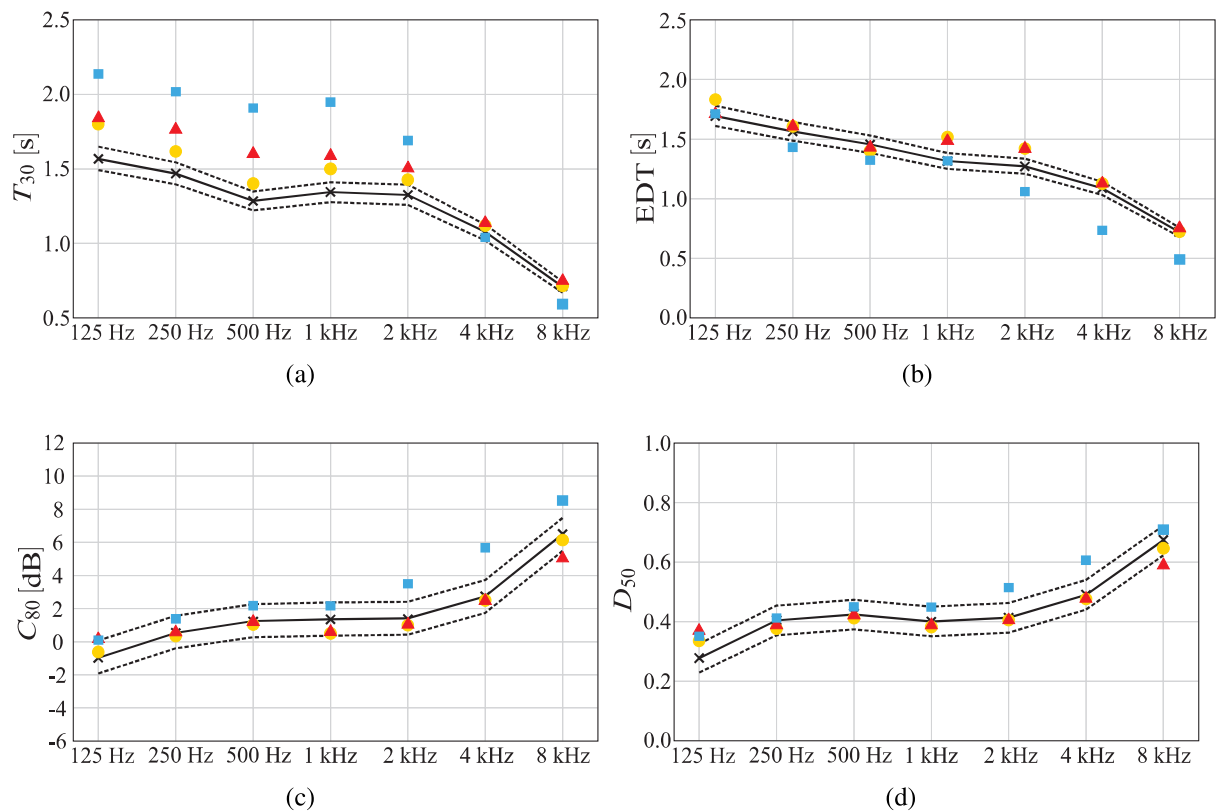
$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{1,6}{2350}} \approx 52,18 \text{ Hz} \quad (4.1)$$

Conclui-se que a faixa de análise adotada, entre 125 Hz e 8 kHz, está acima do limite estabelecido pela frequência de Schroeder. Apesar da densidade modal nas primeiras bandas de oitava não ser idealmente grande para a aplicação dos cálculos em acústica geométrica (GA), este limite propõe que pelo menos mais do que 3 modos por Hz estão em análise.

Ao observar os gráficos nas Figuras 4.1(a) e 4.1(b), pode-se notar que para os parâmetros de decaimento EDT e T_{30} os dados simulados tendem a ficar fora da faixa estabelecida para o \pm JND. Para o T_{30} (Fig.4.1(a)), os três programas apresentaram uma tendência de superestimar os valores nas frequências inferiores a 4 kHz. Entre eles, o RAIOS apresentou um maior afastamento dos valores medidos, seguido pelo RAVEN. Com o melhor desempenho dentre os dados analisados, o Odeon ainda apresentou valores acima do limite superior estabelecido pelo JND.

Para o EDT (Fig.4.1(b)), em 1 kHz e 2 kHz, os programas Odeon e RAVEN tiveram a tendência de superestimar os valores calculados. Já o RAIOS mostra uma tendência a subestimativa dos valores a partir de 2 kHz. A causa disto pode ter ligação com uma certa imprecisão dos algoritmos no registro do decaimento inicial da resposta ao impulso da sala, o que será melhor discutido posteriormente.

Figura 4.1: Dados experimentais e simulados, na Sala 10 do RR4, dos parâmetros acústicos em função da frequência (média dos resultados obtidos para os 10 pontos de fonte-recepção), sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle), RAIOS (\blacksquare).



Para o C_{80} e D_{50} , na maior parte do espectro, as simulações conseguiram acompanhar a tendência da curva medida. Para o C_{80} (Fig. 4.2(c)), os resultados do RAIOS foram registrados acima do JND para as frequências a partir de 1 kHz, com alguns desvios também observados pelo RAVEN em 125 Hz e 8 kHz. Para o D_{50} (Fig.4.2(d)), na banda de 125 Hz, os três programas apresentaram um resultado superestimado, assim como em 2 kHz e 4 kHz para o RAIOS. Além disso, em 8 kHz o RAVEN apresentou um valor abaixo do limite inferior proposto pelo JND.

Analisando os dados de uma outra maneira, que não a média deles, as Figuras 4.2 a 4.5 ilustram os valores encontrados para os parâmetros em função dos pares fonte-receptor para uma determinada frequência especificada entre 125 Hz, 500 Hz, 2 kHz e 8 kHz.

Para o T_{30} , os valores simulados aparecem nitidamente superestimados, acima do limite superior do JND, para as frequências de 125 Hz e 500 Hz (Fig. 4.2(a) e 4.3(a)), com o Odeon apresentando menores desvios entre os programas. Uma menor dispersão nas altas frequências é percebida, como observado na Fig. 4.5(a), em que apenas o RAIOS subestimou os valores. O EDT apresentou resultados mais acertados, apesar de registrar oscilações observáveis nas baixas frequências (Fig. 4.2(b)).

Uma observação evidente, essencialmente percebida nos parâmetros C_{80} e D_{50} , é o fato dos *software* não conseguirem reproduzir as variações espaciais registradas em medição, fenômeno claramente observado para a frequência de 500 Hz (Fig. 4.3(c) e 4.3(d)).

Figura 4.2: Dados experimentais e simulados, na Sala 10 do RR4, dos parâmetros acústicos em função dos pontos de fonte-recepção para a frequência de 125 Hz, sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (\blacktriangle), RAIOS (\blacksquare).

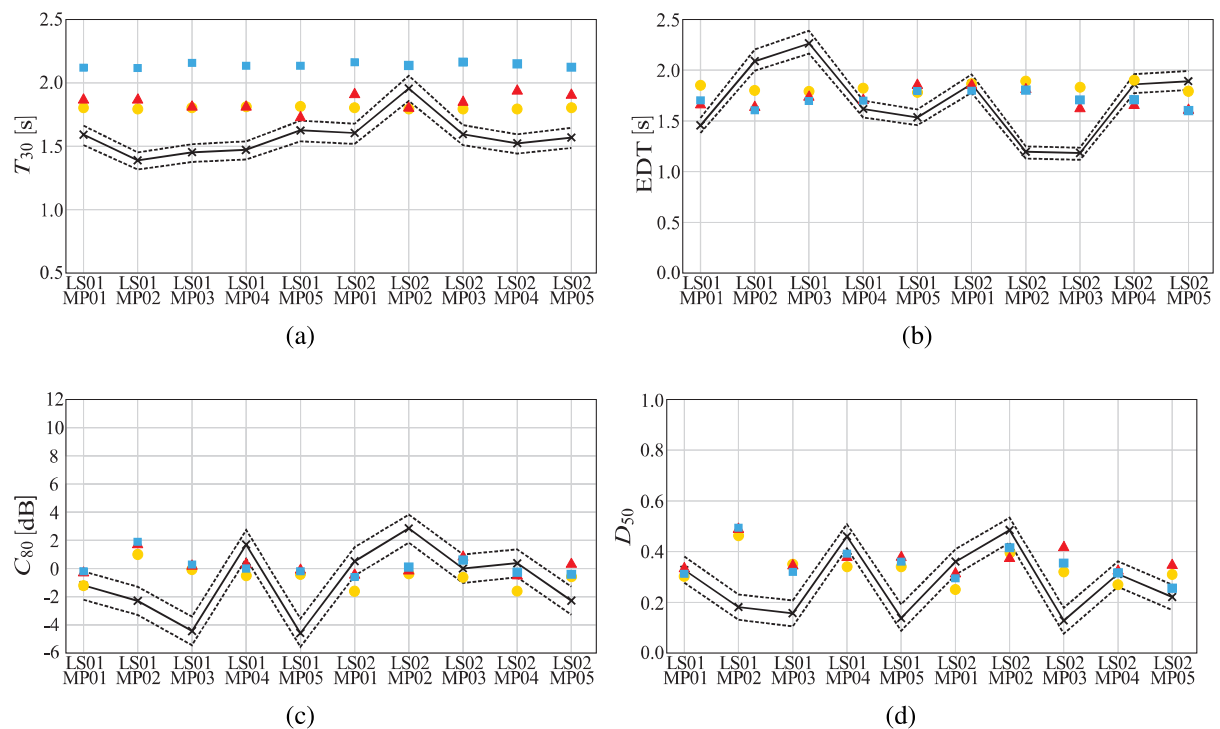


Figura 4.3: Dados experimentais e simulados, na Sala 10 do RR4, dos parâmetros acústicos em função dos pontos de fonte-recepção para a frequência de 500 Hz, sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle), RAIOS (\blacksquare).

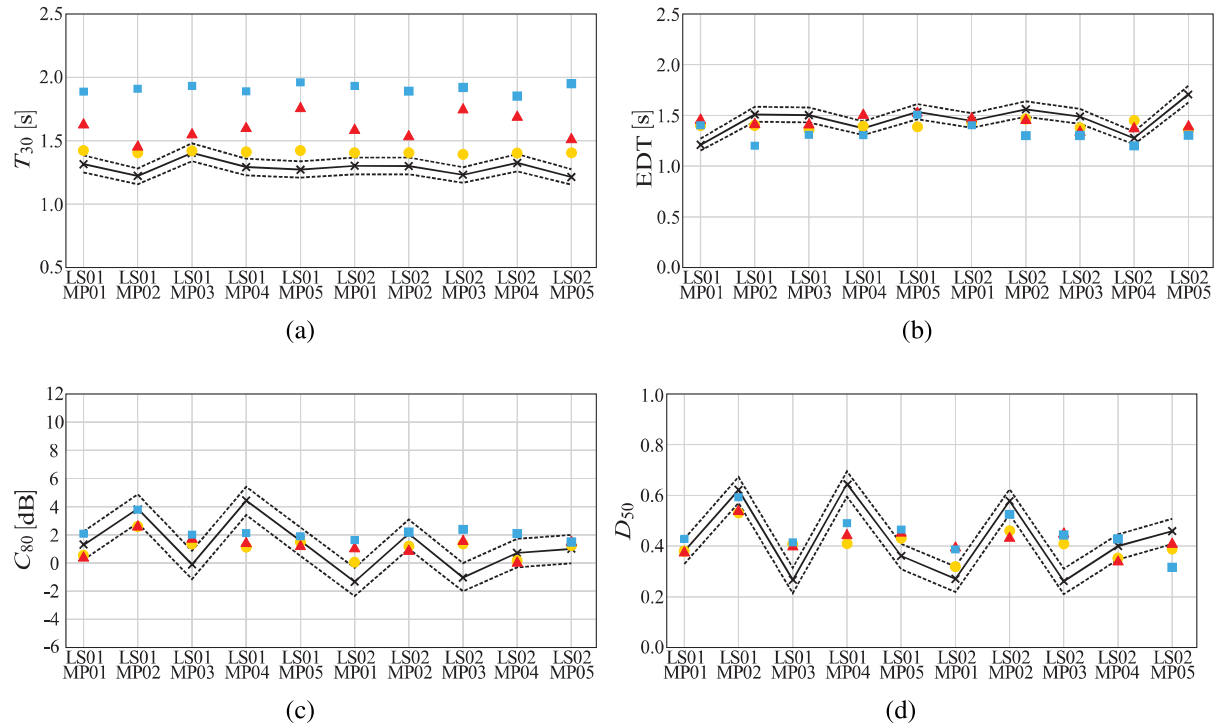


Figura 4.4: Dados experimentais e simulados, na Sala 10 do RR4, dos parâmetros acústicos em função dos pontos de fonte-recepção para a frequência de 2 kHz, sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle), RAIOS (\blacksquare).

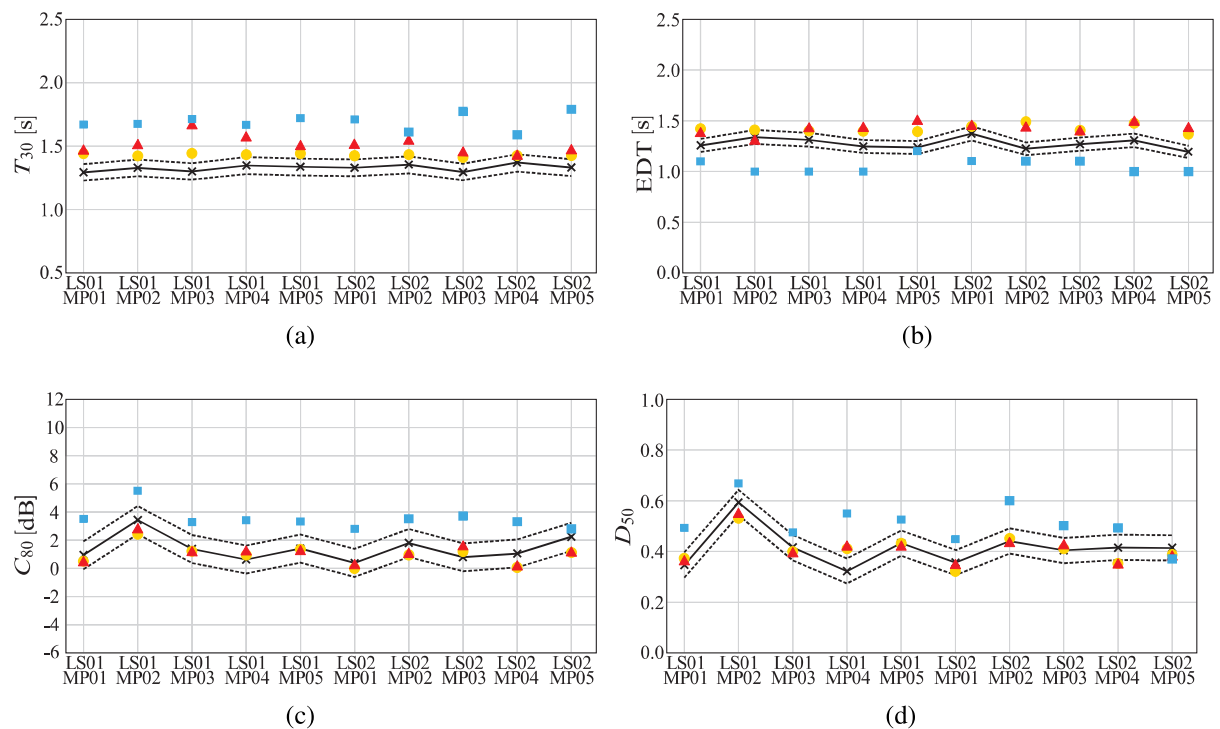
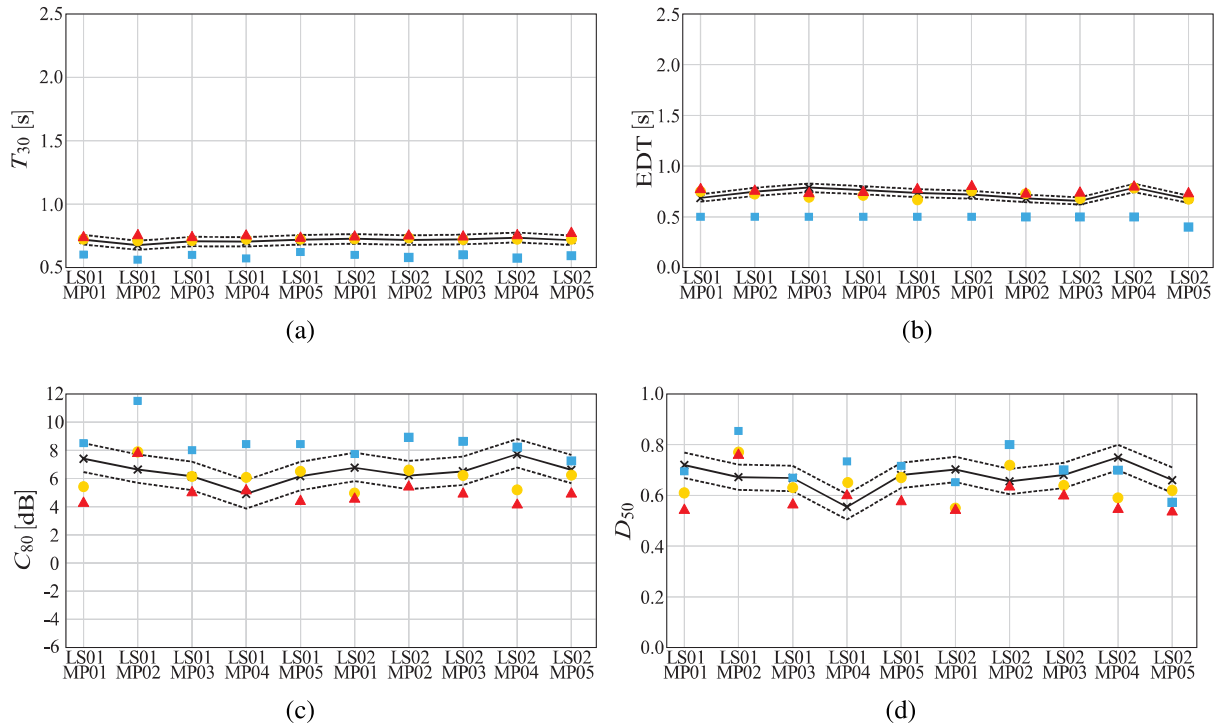


Figura 4.5: Dados experimentais e simulados, na Sala 10 do RR4, dos parâmetros acústicos em função dos pontos de fonte-recepção para a frequência de 8 kHz, sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).

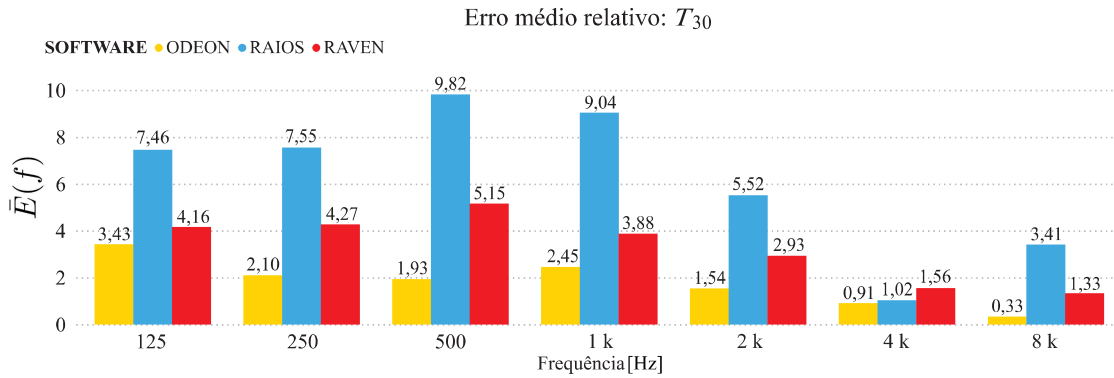


4.1.1 Erro médio relativo ao JND

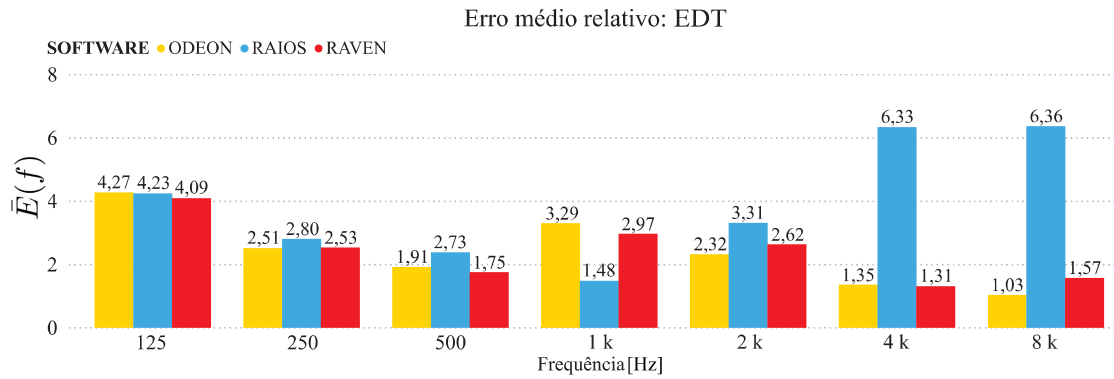
De acordo com o conceito já apresentado na Sec.2.3.3, o erro médio relativo foi calculado para todos os pares fonte-receptor em função da frequência ($\bar{E}(f)$), apresentado na Figura 4.6, e para todas as bandas de frequência em função do par fonte-receptor (\bar{E}_{sr}), visto na Figura 4.7.

Segundo o cálculo desenvolvido, tanto para $\bar{E}(f)$ quanto para \bar{E}_{sr} , um valor acima da unidade indica diferenças perceptíveis a um ser humano dentro da média. Tais valores são notadas ao analisar os dados simulados com base nos dados medidos, o que para a maioria das bandas de frequências é observável. O Odeon e o RAVEN apresentaram desempenhos semelhantes, visto também que ambos possuem algoritmos com características em comum. Desempenhos inferiores foram observados para o RAIOS sobretudo no cálculo do T_{30} , e do EDT, para $\bar{E}(f)$, nas frequências de 4 kHz e 8 kHz. O C_{80} e o D_{50} foram os parâmetros melhor representados por todos os programas.

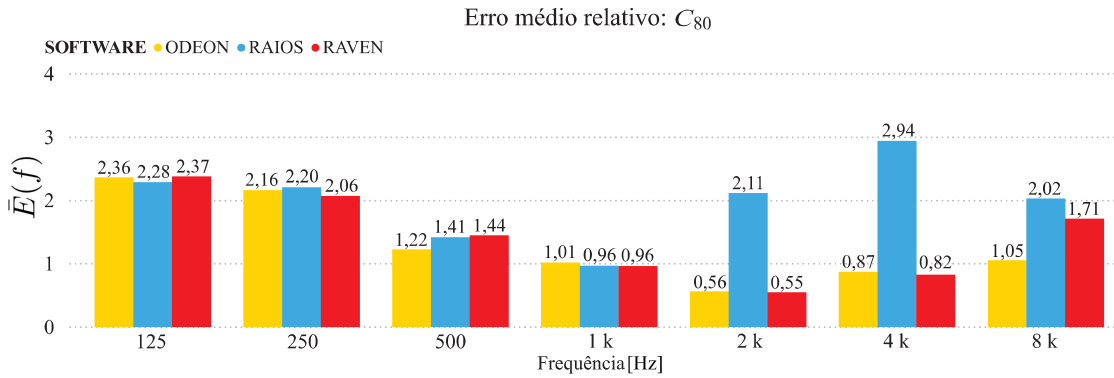
Figura 4.6: Erro médio normalizado para os 10 pares de fonte-recepção, em função da frequência, na Sala 10 do RR4, sendo: (a) T_{30} , (b) EDT, (c) C_{80} e (d) D_{50} .



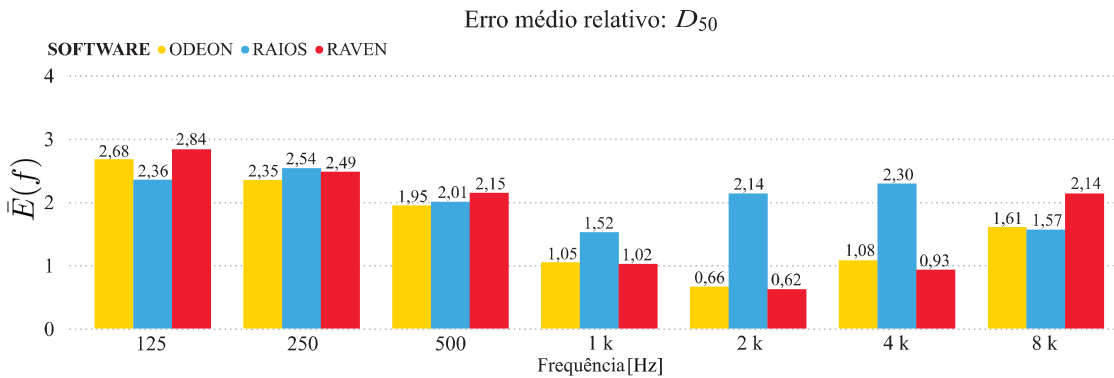
(a)



(b)

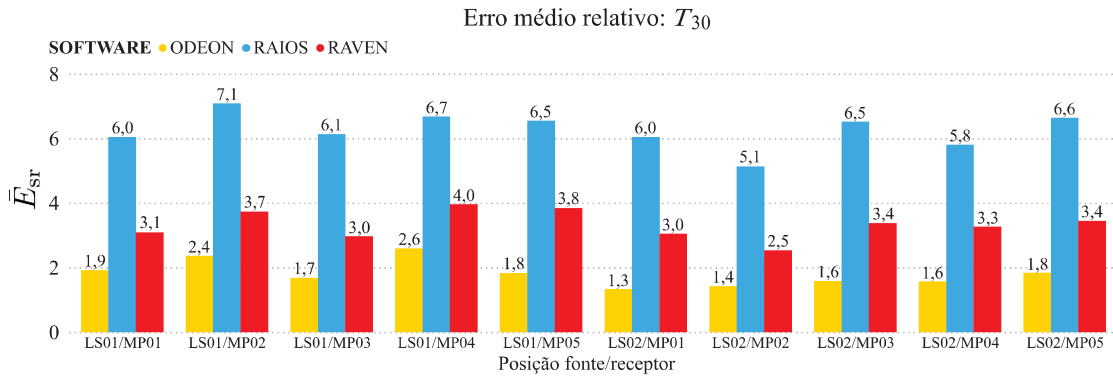


(c)

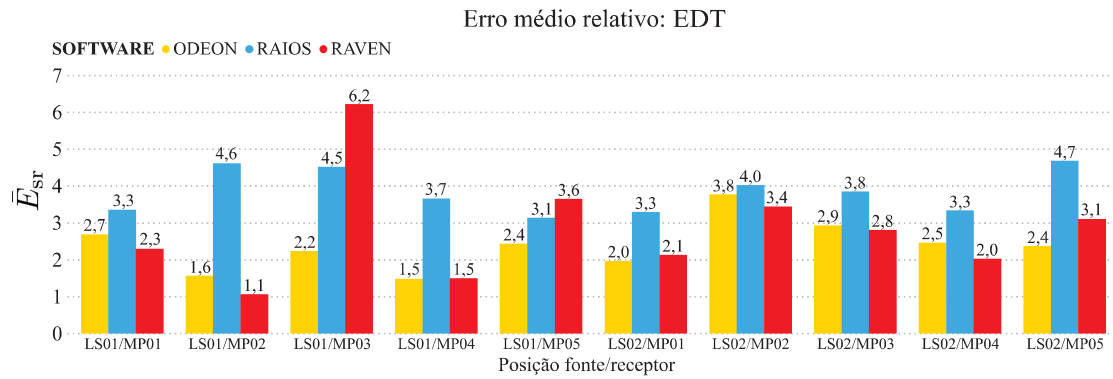


(d)

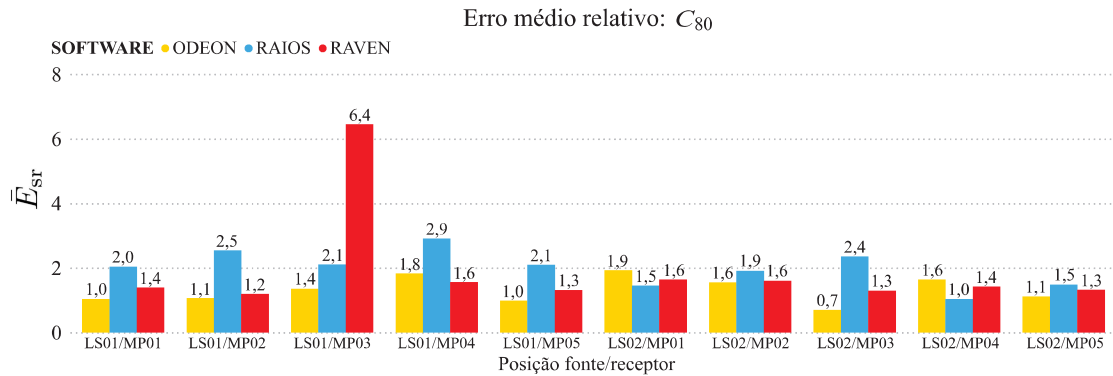
Figura 4.7: Erro médio normalizado para os 10 pares de fonte-recepção, em função dos pontos de fonte-recepção, na Sala 10 do RR4, sendo: (a) T_{30} , (b) EDT, (c) C_{80} e (d) D_{50} .



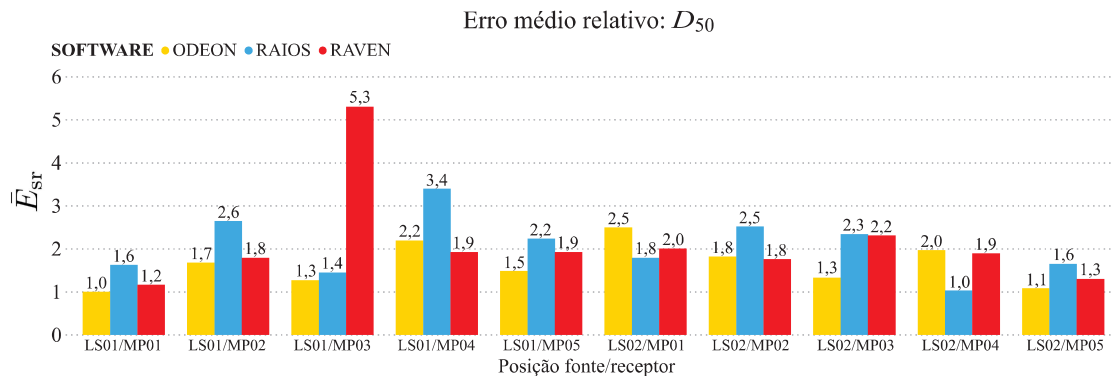
(a)



(b)



(c)



(d)

Em $\bar{E}(f)$ (Figura 4.6), é notada uma tendência a melhores desempenhos para bandas de frequências superiores. Isto pode indicar, que para o cálculo em acústica geométrica, uma maior densidade modal seja necessária, não garantida no limite estabelecido pela frequência de Schroeder.

Para o EDT, C_{80} e D_{50} , os desempenhos dos três programas foram semelhantes até banda de 2 kHz. Estes parâmetros possuem uma relação direta com a distribuição de energia da parte inicial da resposta impulsiva, que será melhor detalhada na próxima seção.

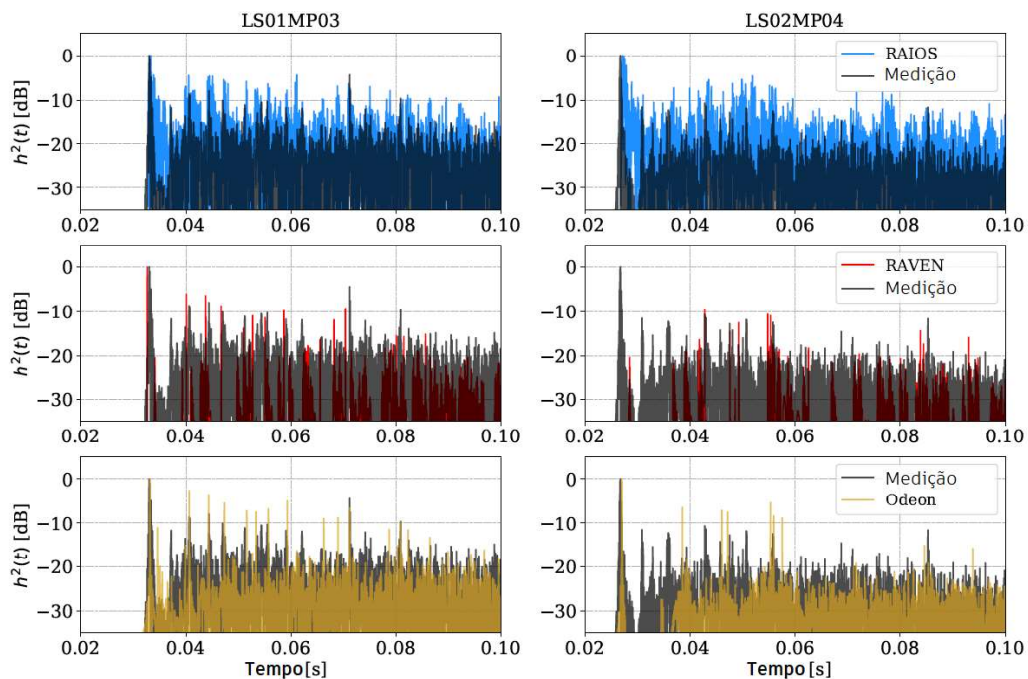
4.1.2 Comparação entre as respostas impulsivas calculadas e medidas

Um estudo da resposta impulsiva quadrática monauricular foi realizado por Brandão et. al (31), em que a parte inicial de $h^2(t)$, ou da resposta impulsiva quadrática, para os mesmos pares fonte/receptor foi analisada (Figura 4.8). A partir das respostas impulsivas provenientes dos dados experimentais, uma série de picos são observados, provavelmente resultantes de fortes reflexões especulares. Os três programas apresentam respostas consistentes, com o tempo e a amplitude bem calculados, porém, com características diferentes.

Os intervalos de tempo entre essas reflexões especulares tende a ter a energia preenchida pelos fenômenos de espalhamento e a difração que ocorrem na sala. Ao usar o método de transição de energia, o RAIOS tende a preencher essas lacunas de tempo com mais energia do que o registrado nos dados medidos, o que leva a uma curva decaimento com menor inclinação, havendo uma tendência a superestimar o T_{30} . Por outro lado, resulta em uma resposta impulsiva com cauda reverberante mais densa e natural. O RAVEN estima níveis de energia mais baixos nessas lacunas entre as reflexões especulares, e o Odeon se coloca de maneira intermediária entre o observado pelo o RAIOS e RAVEN.

Embora os resultados apresentados pelo RAIOS na estimativa dos parâmetros não tenham sido os mais satisfatórios, o método de transição de energia utilizado pode ser benéfico caso o modelo ou os dados de entrada possam ser alterados de maneira a se obter um ajuste dos dados simulados.

Figura 4.8: Comparação das respostas impulsivas monoauriculares para o par fonte/receptor LS01MP03 na coluna esquerda, e LS02MP04 na coluna direita.



Fonte: Adaptado de Brandão et. al (31).

4.2 CÂMARA REVERBERANTE DA UFSM

Os ensaios realizados na câmara reverberante do laboratório de acústica e vibrações da UFSM englobaram os procedimentos necessários para a caracterização acústica do coeficiente de absorção da espuma Sonex Illtec Perfilado 625 x 625 mm da Saint Gobain, que foi posteriormente utilizada na montagem de uma minicâmara anecoica, objeto de estudo de Vieira (44). De tal modo, o procedimento consiste basicamente em realizar medições para a situação da câmara vazia e com o material a ser ensaiado, seguindo os cálculos e diretrizes da norma regulamentadora (46).

Em busca de entender até que ponto os simuladores em questão conseguiriam calcular o cenário acústico para ambas as situações de ensaio, os testes foram realizados, tornando a câmara o segundo objeto de estudo desta pesquisa. Por este motivo, os resultados aqui apresentados mostrarão os desempenhos sempre em duas condições para um mesmo ambiente, onde teremos: a **sala vazia** e **com amostra** aplicada diretamente sobre o piso. Contudo, apenas os resultados dos programas Odeon e RAVEN seguirão sendo apresentados, devido a inconsistências nos resultados encontrados pelo RAIOS.

Seguindo o princípio adotado para a Sala 10 do RR4, foi calculado o valor para a frequência de Schroeder nas duas situações, considerando o volume de 198,34 m³ do modelo simulado, sendo 20 segundos o tempo de reverberação máximo encontrado para a sala vazia e 12 segundos para a sala com amostra. Chegou-se em aproximadamente 634,49 Hz para a primeira condição, e 491,47 Hz para a segunda. De tal forma, teoricamente a aplicação dos cálculos em acústica geométrica não garantem precisão para as frequências de 125 Hz, 250 Hz e 500 Hz aqui avaliadas. Tendo em vista que os valores encontrados sofreram mudanças mínimas devido à variação espacial, as médias de todos os pontos demonstram uma maneira consistente para a visualização das características da sala, e assim foram apresentadas pelos gráficos das Figuras 4.9 e 4.10.

Em observância aos resultados, na condição da sala vazia, o T_{30} (Figura 4.9 (a)) foi subestimado pelos programas em todas as frequências, sobretudo nas bandas de 125 Hz, 250 Hz e 1 kHz. Para o EDT (Figura 4.9(b)) também foram apresentadas maiores dispersões pelos programas para essas frequências, com os valores sendo superestimados em 125 Hz e 250 Hz, e subestimados a partir de 1 kHz, com maior erro nesta banda. O D_{50} (Figura 4.9(d)), por apresentar valores muito baixos nas bandas de 125 Hz, 250 Hz e 500 Hz, por vezes possuiu o JND calculado com uma margem pouco menor que ± 0.05 , considerando zero como o limite mínimo inferior possível. Os parâmetros de energia, C_{80} e D_{50} (Figuras 4.9(c) e 4.9(d)), apresentaram valores superestimados para a banda de 8 kHz. As prováveis causas para isto é que haja um efeito do próprio microfone, por ser uma banda de frequência alta, o que testa o limite da própria instrumentação e que a própria absorção do ar possa contribuir para maiores erros em frequências mais altas.

Para a condição da sala com amostra, observada na Figura 4.10, as maiores dispersões foram observadas nas baixas frequências, sobretudo em 125 Hz para o EDT e o C_{80} , e em 250 Hz para o T_{30} . O D_{50} , para esta condição, marcou valores dentro do estipulado pelo JND em todas as frequências para os dois programas. Este parâmetro, juntamente com o C_{80} , apresentou o melhor desempenho observado dentre as situações até aqui analisadas.

A variação espacial não trouxe diferenças significativas entre os dados de medição para cada par fonte-receptor, havendo alterações mais expressivas sobretudo na faixa de 125 Hz (Figuras 4.11 e 4.12). A tendência observada na Sala 10 do RR4 se manteve para este outro ambiente, em que os resultados simulados tendem extrair valores similares, independente da localização na sala.

Figura 4.9: Média dos dados experimentais e simulados dos parâmetros acústicos em função da frequência para a sala vazia, sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).

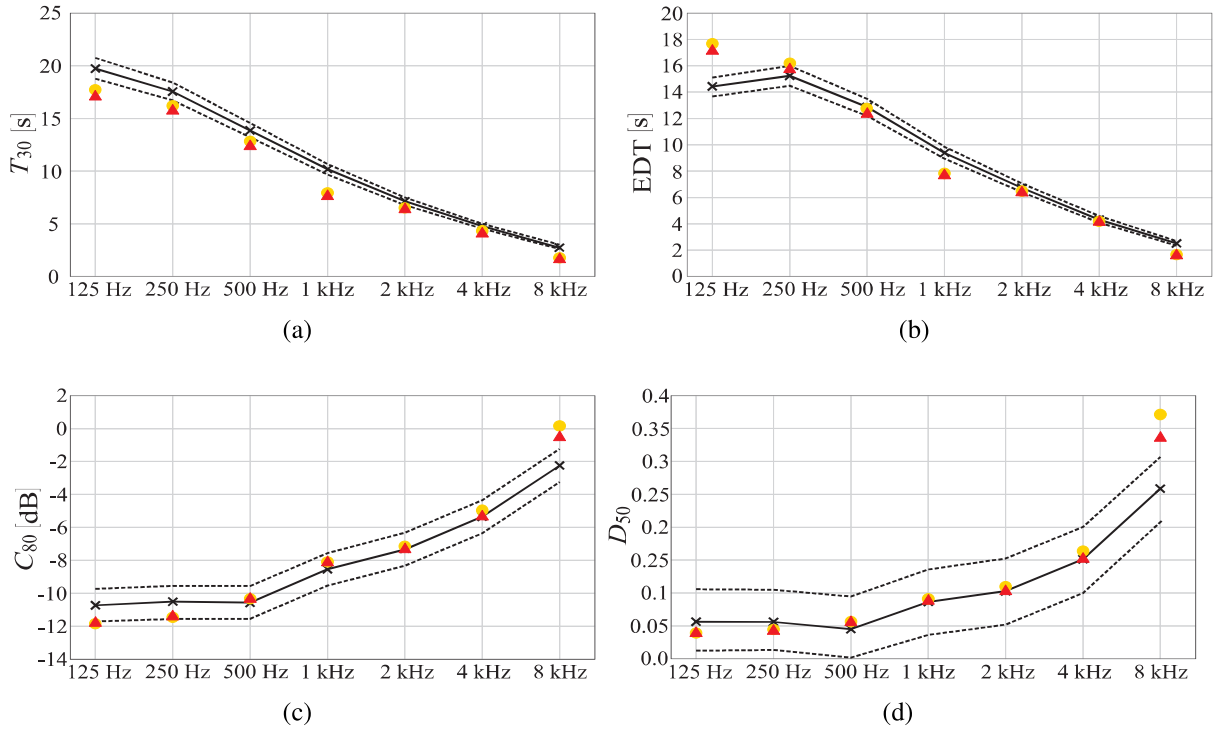


Figura 4.10: Média dos dados experimentais e simulados dos parâmetros acústicos em função da frequência para a sala com amostra, sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).

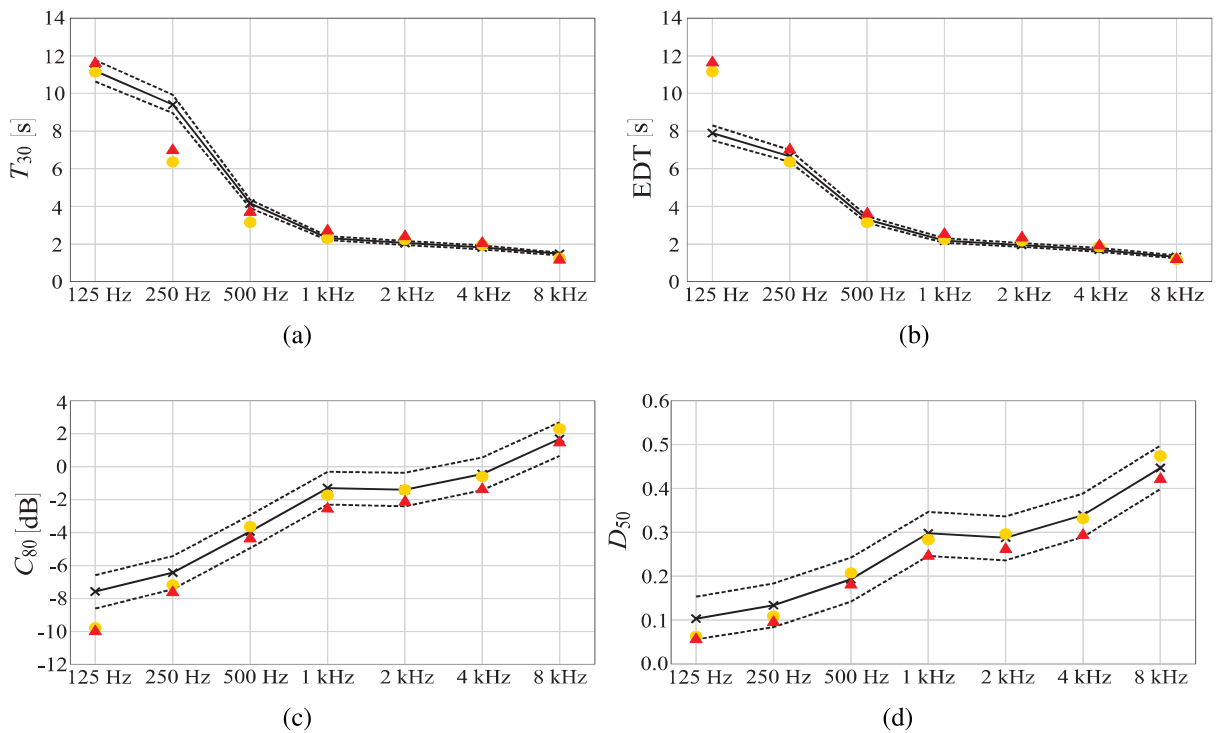
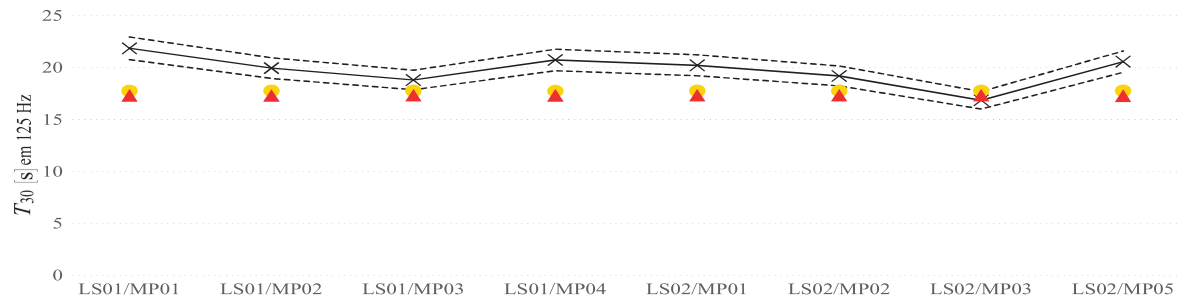
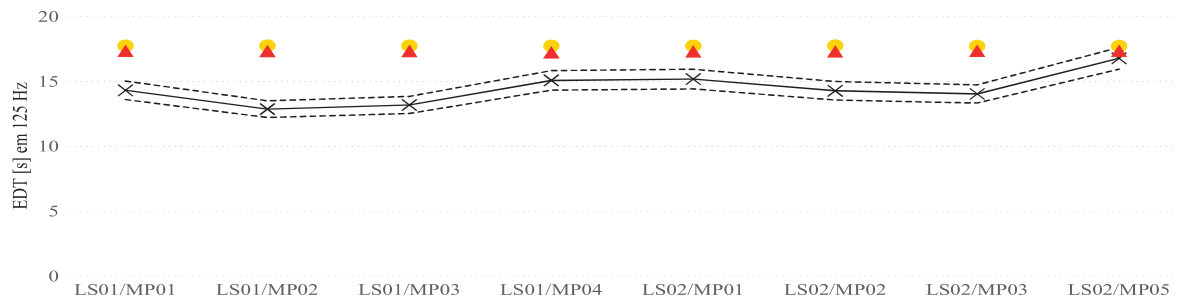


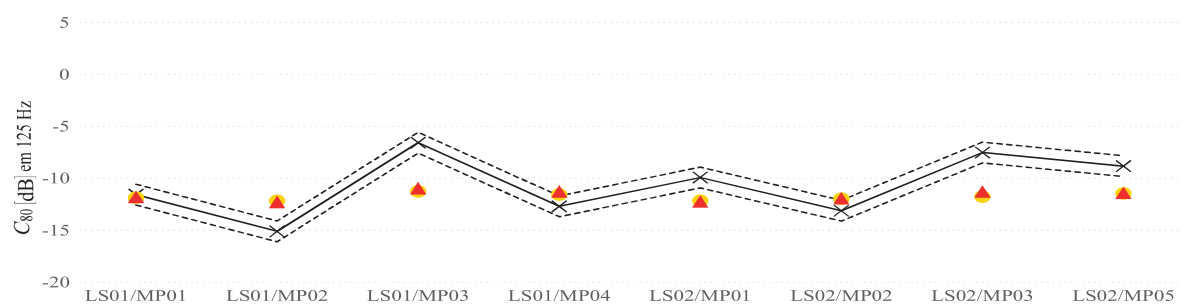
Figura 4.11: Dados experimentais e simulados, na câmara reverberante para a sala vazia, dos parâmetros acústicos em função dos pontos de fonte-recepção para a frequência de 125 Hz, sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).



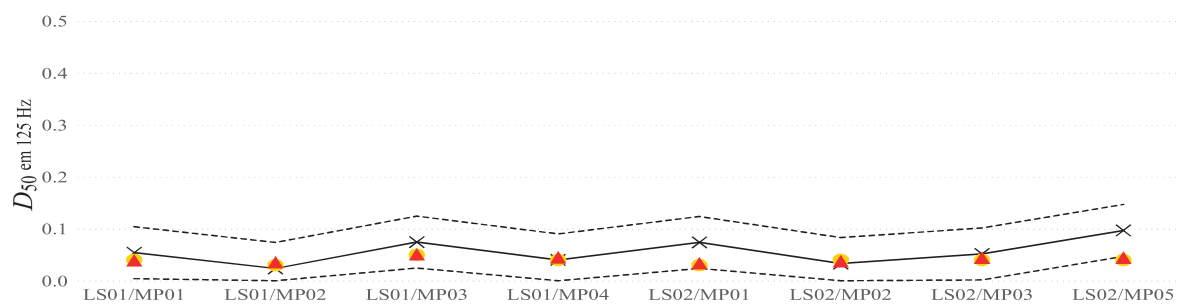
(a)



(b)

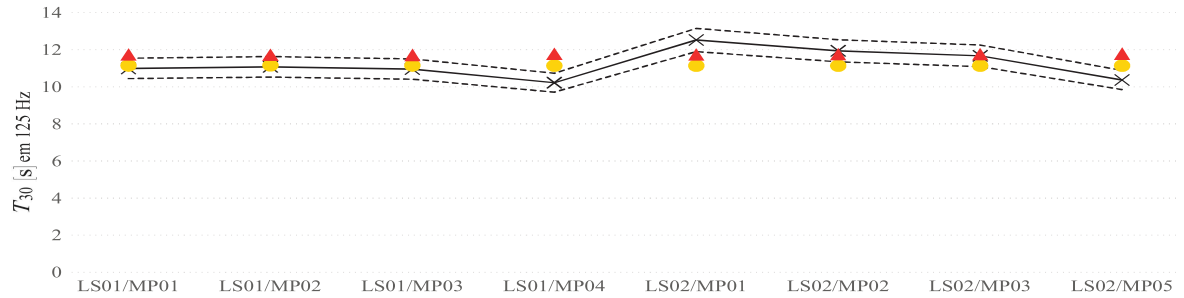


(c)

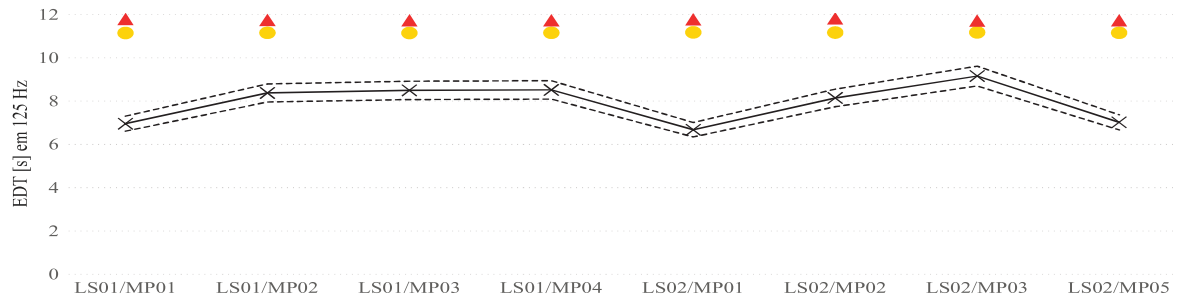


(d)

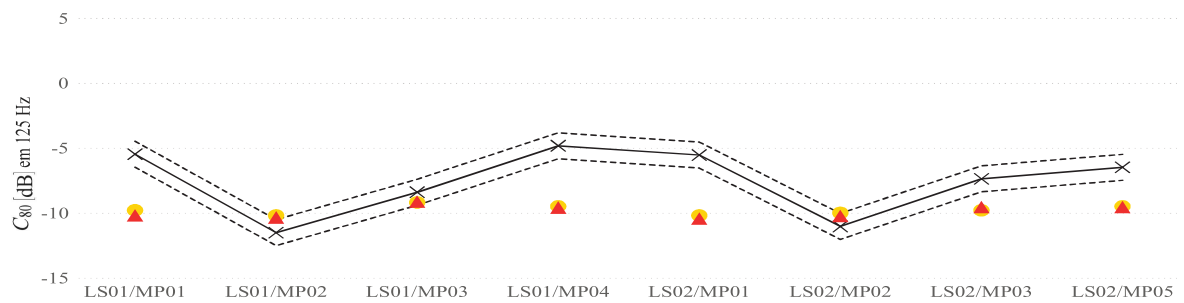
Figura 4.12: Dados experimentais e simulados, na câmara reverberante para a sala com amostra, dos parâmetros acústicos em função dos pontos de fonte-recepção para a frequência de 125 Hz, sendo: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; e (d) D_{50} . Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).



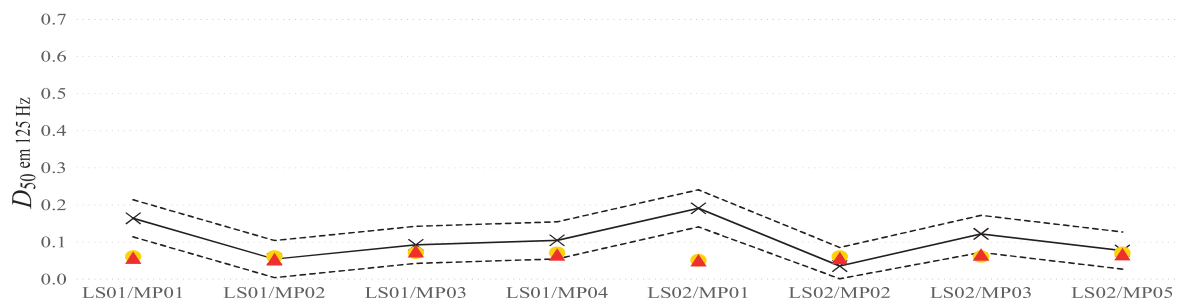
(a)



(b)



(c)



(d)

4.2.1 Erro médio relativo ao JND

De acordo com o apresentado na Seção 2.3.3, o erro médio relativo foi calculado para ambas as condições da sala, vazia e com material, considerando todos os pares fonte-receptor em função da frequência $\bar{E}(f)$, e para todas as bandas de frequência em função da posição fonte-receptor \bar{E}_{sr} .

Observando-se o fato de que acima de 1 os erros passam a ser notados por um ser humano dentro da média, de acordo com o estabelecido pelo JND, para a sala vazia, em todas as frequências avaliadas para o T_{30} no cálculo de $\bar{E}(f)$ observado na Figura 4.13(a), este limite é ultrapassado, com maiores erros notáveis em 1 kHz e 8 kHz. Para o EDT (Figura 4.13(b)), erros maiores são observados em 125 Hz, 1 kHz e 8 kHz. Os parâmetros de balanço de energia foram melhor avaliados, com poucas frequências apresentando resultados acima de 1, como em 125 Hz e 250 Hz para o C_{80} (Figura 4.13(c)), e em 8 kHz para o C_{80} e o D_{50} (Figura 4.13(d)).

Para a sala com material, erros maiores foram observados nas baixas frequências, tanto nos parâmetros temporais como os de energia, sobretudo para as frequências de 125 Hz e 250 Hz (Figura 4.15). O D_{50} nesta configuração obteve erros menores do que 1 para todas as frequências (Figura 4.15(d)).

Avaliando o desempenho dos programas para todos os pares de fonte-receptor \bar{E}_{sr} , de modo geral, o RAVEN obteve um melhor desempenho para a condição da sala vazia em todos os parâmetros (Figura 4.14). Já para a condição da sala com amostra, o melhor desempenho foi conquistado pelo Odeon (Figura 4.16). De todo modo, é nítido que o comportamento de ambos os programas é similar, e mesmo com a distinção no desempenho para cada configuração, a diferença observável não é capaz de apontar que um ou o outro programa se destaca como melhor.

Figura 4.13: Erro médio normalizado para os 10 pares de fonte-recepção, em função da frequência, para a condição da sala vazia, sendo: (a) T_{30} , (b) EDT, (c) C_{80} e (d) D_{50} .

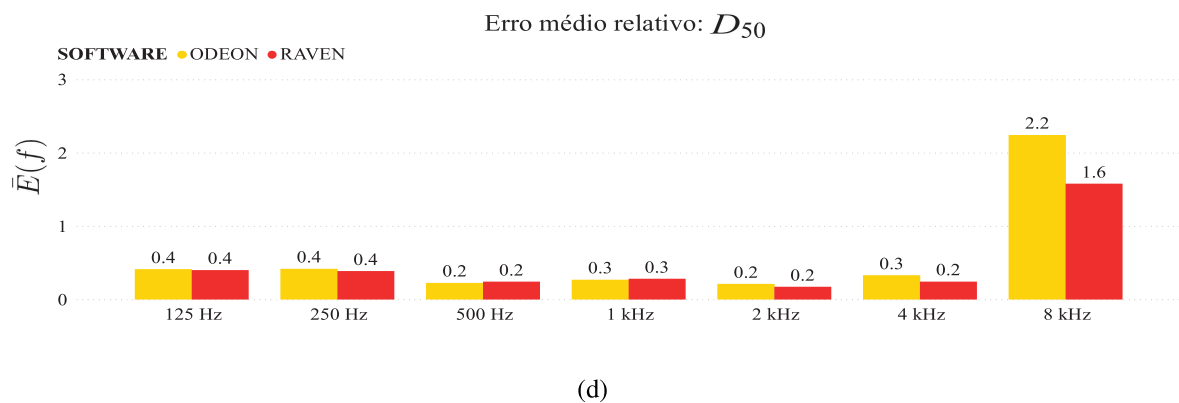
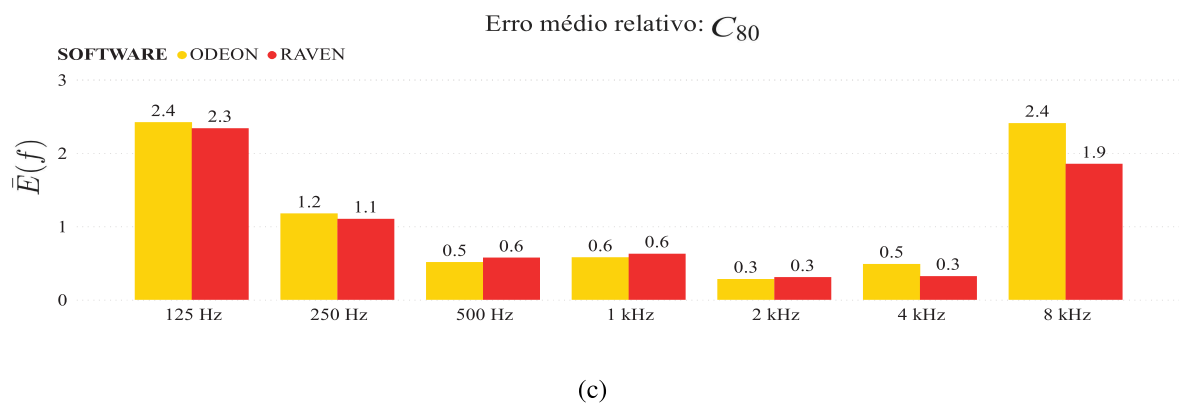
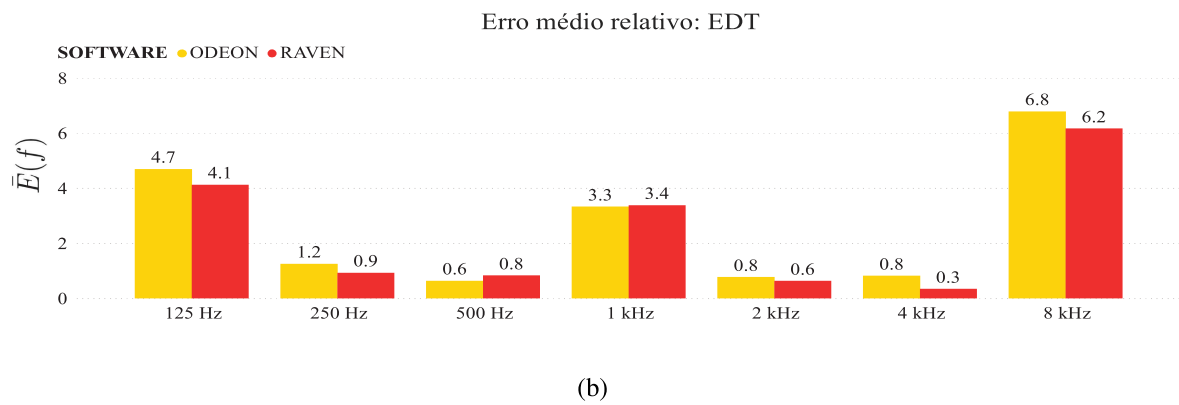
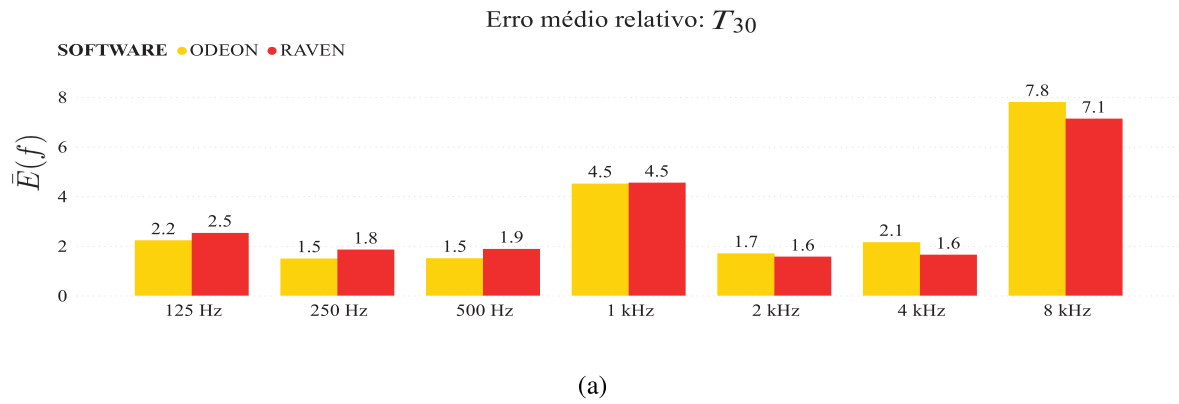
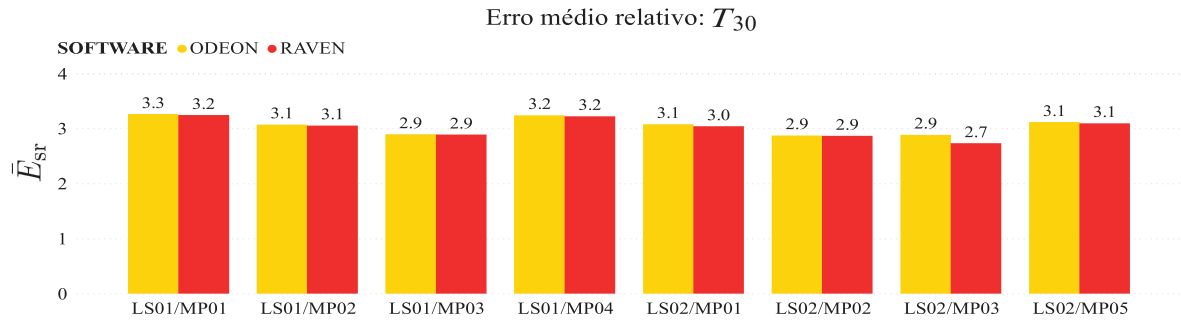
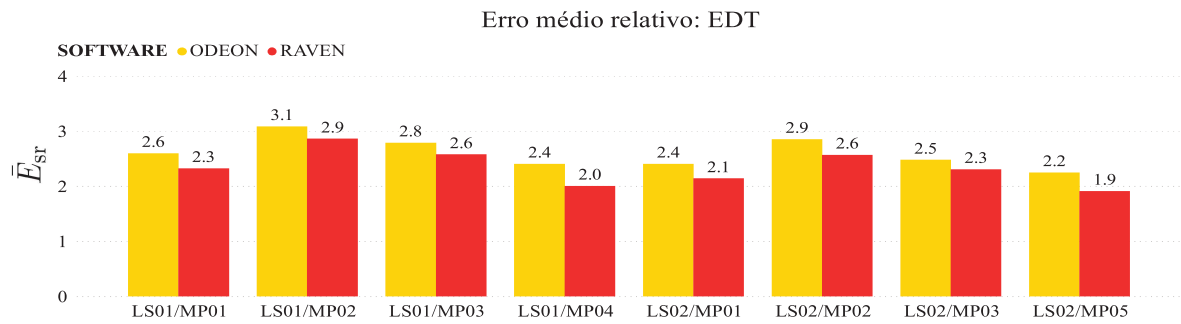


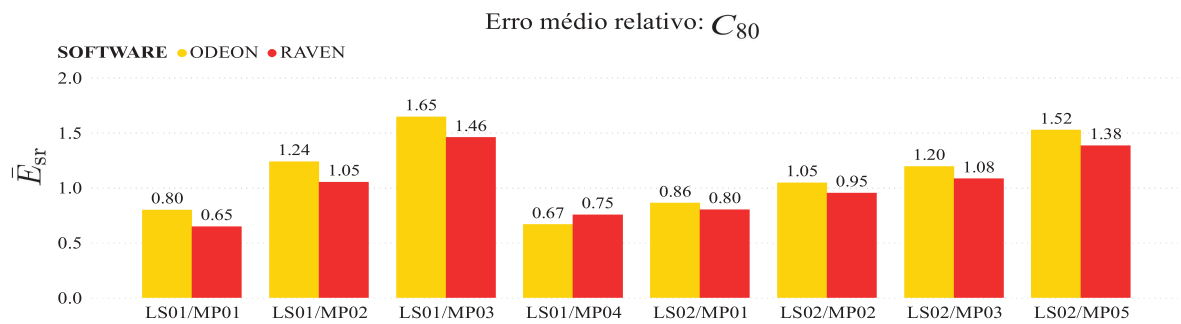
Figura 4.14: Erro médio normalizado para os 10 pares de fonte-recepção, em função da posição, para a condição da sala vazia, sendo: (a) T_{30} , (b) EDT, (c) C_{80} e (d) D_{50} .



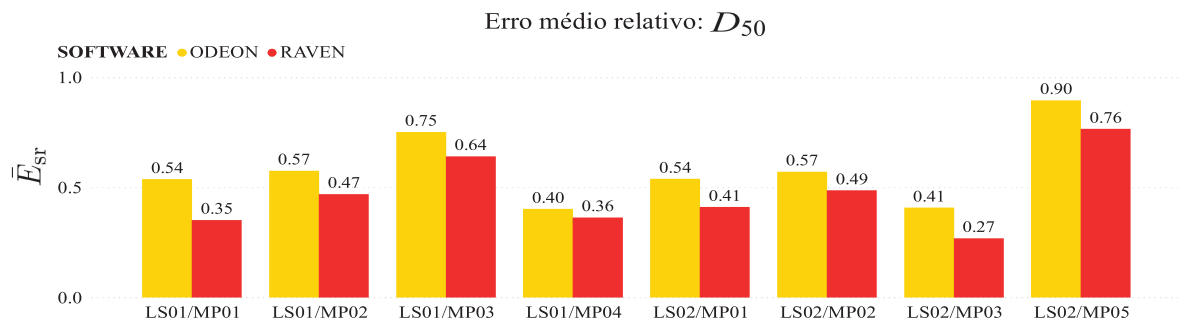
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.15: Erro médio normalizado para os 10 pares de fonte-recepção, em função da frequência, para a condição da sala com amostra, sendo: (a) T_{30} , (b) EDT, (c) C_{80} e (d) D_{50} .

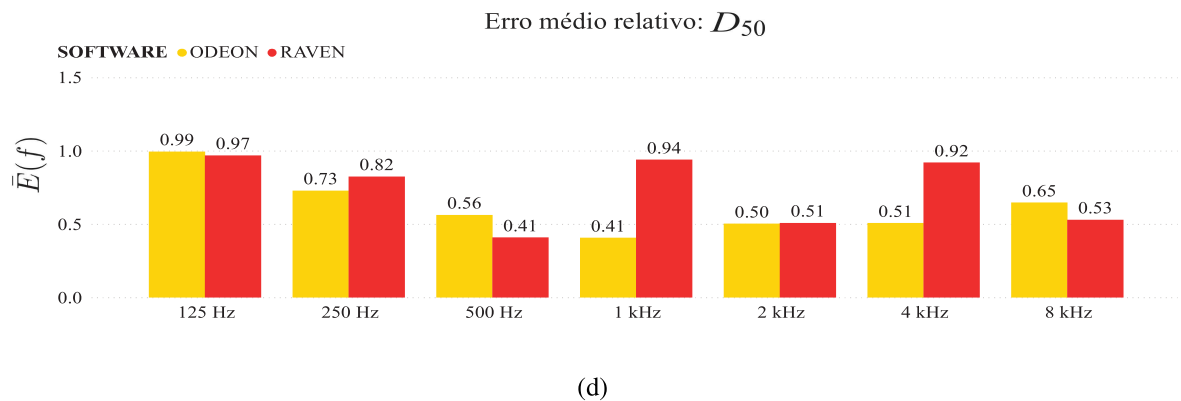
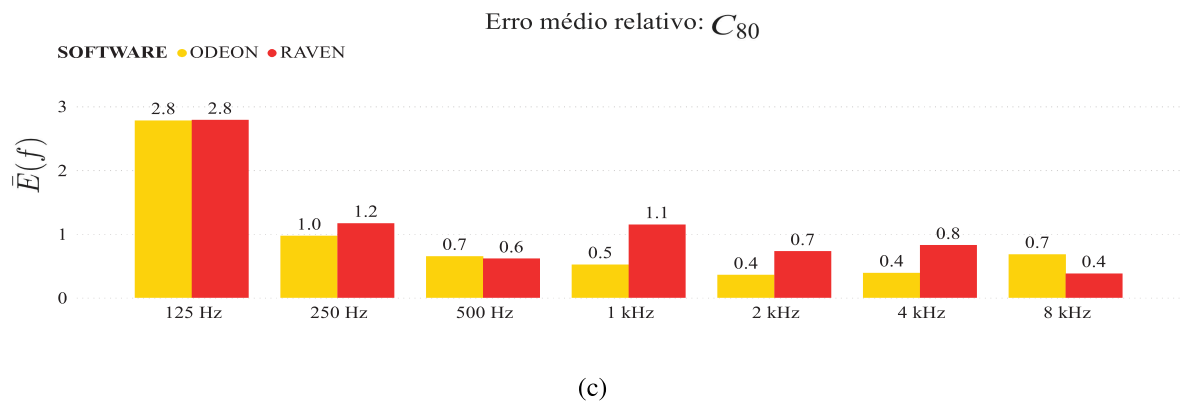
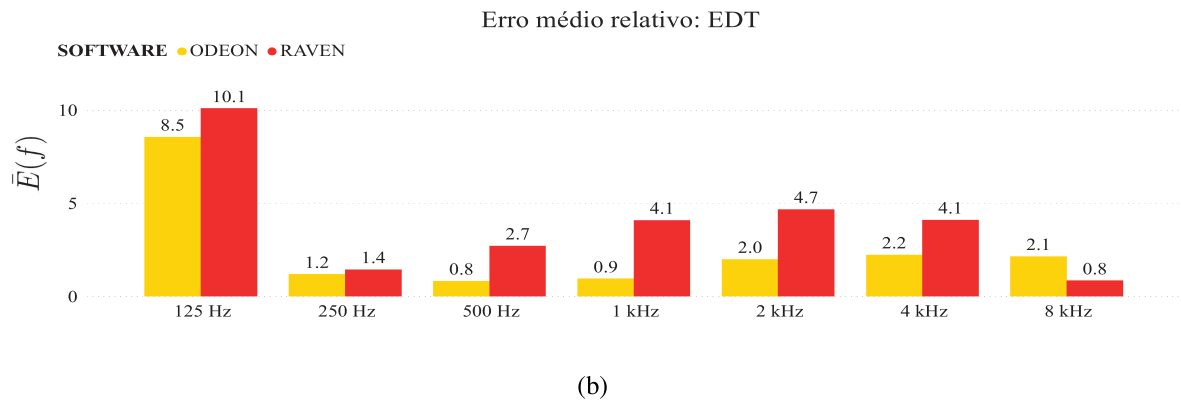
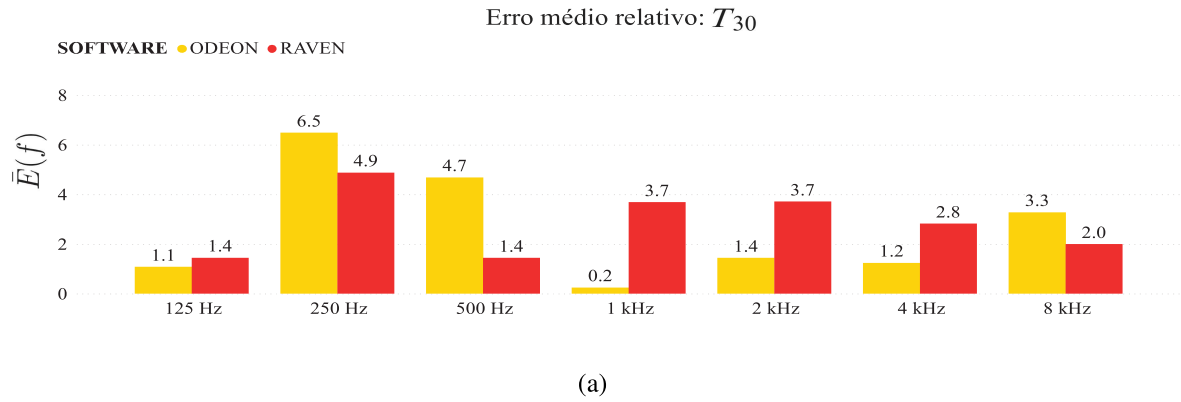
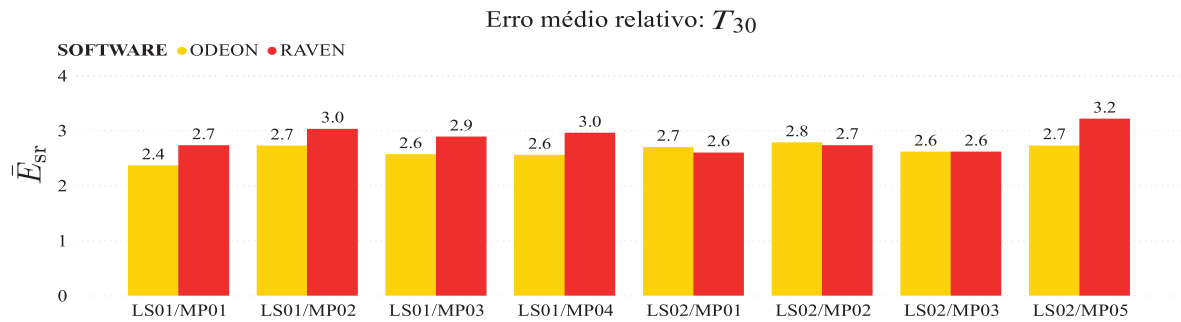
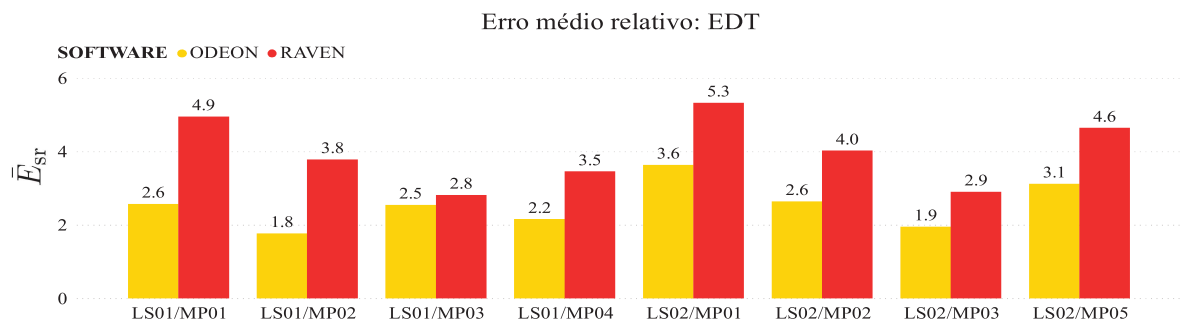


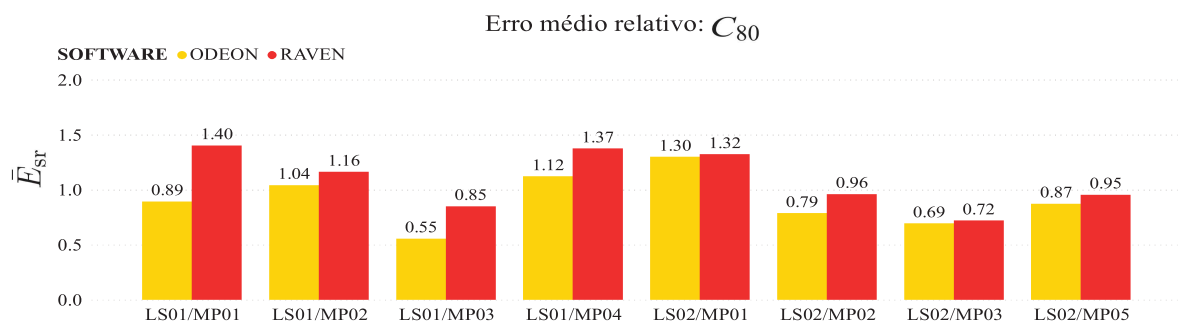
Figura 4.16: Erro médio normalizado para os 10 pares de fonte-recepção, em função da posição, para a condição da sala com amostra, sendo: (a) T_{30} , (b) EDT, (c) C_{80} e (d) D_{50} .



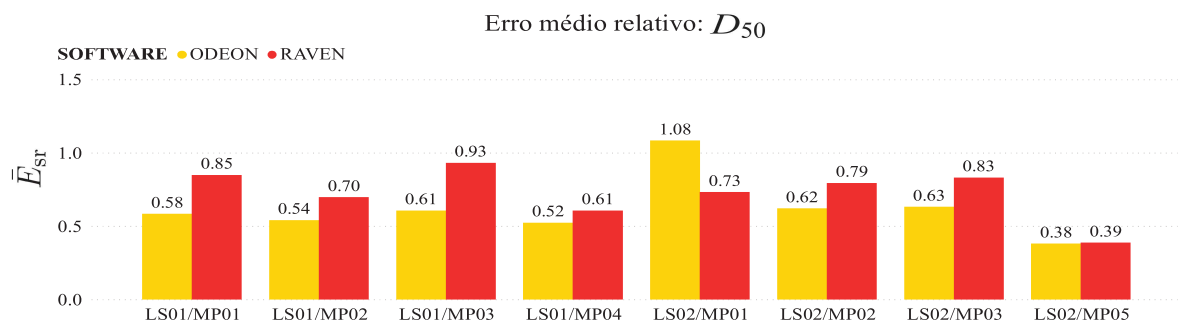
(a)



(b)



(c)



(d)

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa realizou uma investigação do comportamento de três algoritmos de acústica geométrica, usados para a simulação acústica da propagação sonora no interior de ambientes. Duas salas, com volume e características distintas foram estudadas. A primeira delas é o salão de música de câmara da Konzerthaus, um dos ambientes de referência usados no Round Robin 4 de simulação acústica de salas e aurilização (Sala 10 ou CR3). O segundo ambiente é câmara reverberante do Laboratório de Acústica e Vibrações da UFSM, em que dois dos três algoritmos foram comparados. Este segundo ambiente contou com duas configurações diferentes, sendo uma delas a sala vazia e a outra a sala com material absorvedor aplicado sobre o piso, configuração regulamentada por norma (46). Quatro parâmetros acústicos foram avaliados: o tempo de reverberação (T_{30}), o tempo de decaimento inicial (EDT), a clareza (C_{80}) e a definição (D_{50}). Além disso, também se analisou a $h^2(t)$ (resposta impulsiva quadrática) para a Sala 10 ou CR3.

Para a Sala 10 ou CR3, o T_{30} e o EDT foram os parâmetros cujos valores com relação aos dados experimentais apresentaram maiores erros. Em oposição, os parâmetros de energia relativa, C_{80} e D_{50} , foram melhor avaliados. A variação espacial dos pontos de fonte-recepção não é bem representada pelos algoritmos. Para a maioria dos parâmetros, o erro médio relativo ao JND é maior que uma unidade, o que indica diferenças perceptíveis para seres humanos.

Para a câmara reverberante, tanto na configuração de sala vazia quanto na sala com amostra, o T_{30} e o EDT foram os parâmetros com piores avaliações, sobretudo nas baixas frequências. O C_{80} e o D_{50} foram muito bem avaliados, principalmente na configuração da sala com material. Dispersões notáveis em todos os parâmetros foram percebidas na banda de 8 kHz na configuração de sala vazia, e nas baixas frequências para a configuração de sala com material.

O Odeon e o RAVEN possuem modelos numéricos semelhantes, e entregaram resultados similares para as duas salas. A avaliação das respostas impulsiva quadráticas para a primeira sala revelaram que o RAVEN estima níveis mais baixos na parte inicial da resposta impulsiva, o RAIOS computou um sinal com maior energia entre as reflexões especulares, e o Odeon teve um comportamento intermediário. A característica atribuída ao RAIOS se dá devido ao modelo utilizado para calcular a energia espalhada, mas não refletiu bem no cálculo dos parâmetros acústicos.

As informações apresentadas para o estudo da Sala 10 do RR4 foram reunidas e publicadas no artigo "*On the performance investigation of distinct algorithms for room acoustics simulation*", submetido à revista *Applied Acoustics*, e aprovado em 18 de Outubro de 2021. O mesmo foi desenvolvido a várias mãos por Brandão *et al.* (31) e encontra-se disponível no Anexo A.

Para trabalhos futuros, o estudo de um número superior de cenários, ou a mesma geometria com muitas mudanças, poderia trazer resultados mais abrangentes, sendo observado as implicações nos dados dos parâmetros ou nas respostas impulsivas resultantes. Além disso, estudos mais aprofundados quanto ao modelo virtual e as variações na forma adotada são sempre bem-vindos, com um campo vasto a ser explorado.

REFERÊNCIAS

- [1] TENENBAUM, R. A.; TAMINATO, F. O.; MELO, V. S. G. Resultados comparativos para a Sala 10 do Round Robin 4 obtidos pelo código computacional RAIOS 7. *Acústica e Vibrações*, v. 50, p. 30–41, 2018.
- [2] GOMES, M. H. A.; BERTOLI, S. R.; DEDECCA, J. G. Implementação de métodos para a simulação acústica e auralização de salas. *Acústica e Vibrações*, v. 38, p. 12–24, 2007.
- [3] SILVA, G. M.; MAIORINO, A. V.; BERTOLI, S. R. Processo de validação de modelo de simulação acústica de teatro de múltiplo uso com concha orquestral. *XXVII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica - SOBRAC*, Brasília, 2017.
- [4] BRANDÃO, E. *Acústica de Salas: Projeto e Modelagem*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2016. ISBN 978-8521210061.
- [5] ASPÖCK, L. et al. BRAS - Benchmark for Room Acoustical Simulation. 2020. doi: [10.14279/depositonce-6726.3](https://doi.org/10.14279/depositonce-6726.3). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-6726.3>>.
- [6] MENEGOTTO, J. L.; TORRES, J. C. B. Qualificação de câmara reverberante de absorção e validação de modelo computacional. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, v. 10, Maio 2019. ISSN 1980-6809. doi: [10.20396/parc.v10i0.8653934](https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8653934).
- [7] ILHAN, B.; YAMAN, H. IFC-Based Sustainable Construction: BIM and Green Building Integration. *Proc. of the 32nd CIB W78 Conference*, p. 312–319, 2015.
- [8] KUTTRUFF, H. *Acoustics: An Introduction*. Madison Avenue, New York, USA: Taylor Francis, 2007. ISBN 0-203-97089-6.
- [9] BOLT, R. Normal modes of vibration in room acoustics: Angular distribution theory. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 11, n. 1, p. 74–79, 1939.
- [10] BLASZAK, M. Acoustic design of small rectangular rooms: Normal frequency statistics. *Applied Acoustics*, v. 69, n. 12, p. 1356–1360, 2008.
- [11] KLEINER, M.; TICHY, J. *Architectural Acoustics*. Boca Raton, Flórida, USA: Taylor Francis Group, 2014.

- [12] SCHROEDER, M. Die statistischen parameter der frequenzkurven von großen räumen. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 4, p. 594–600, 1954.
- [13] KUTTRUFF, H.; SCHROEDER, M. On frequency response curves in rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 34, n. 1, p. 76–80, 1962.
- [14] SCHROEDER, M. Statistical parameters of the frequency response curves of large rooms. *Journal of the Audio Engineering Society*, v. 35, n. 5, p. 299–306, 1987.
- [15] MAGOULÈS, F. *Computational Methods for Acoustics Problems*. Glasgow: Saxe-Couburg, 2008.
- [16] ATALLA, N.; SGARD, F. *Finite Element and Boundary Methods in Structural Acoustics and Vibration*. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2015.
- [17] HARGREAVES, J.; RENDELL, L.; LAM, Y. A framework for auralization of boundary element method simulations including source and receiver directivity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 145, n. 4, p. 2625–2637, 2019.
- [18] WU, T. W. *Boundary Element Acoustics: Fundamentals and Computer Codes*. Billerica, MA: Wit Press, 2000.
- [19] BILBAO, S.; AHRENS, J.; HAMILTON, B. Incorporating source directivity in wave-based virtual acoustics: Time-domain models and fitting to measured data. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 146, n. 4, p. 2692–2703, 2019.
- [20] SAKUMA, T.; SAKAMOTO, S.; OTSURU, T. *Computational Simulation in Architectural and Environmental Acoustics*. Tokyo: Springer, 2014.
- [21] SAVIOJA, L.; SVENSSON, U. Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 138, n. 2, p. 708–730, 2015.
- [22] TENENBAUM, R. et al. *Processamento de Sinais Aplicado a Acústica e Vibrações*. São Paulo: Blücher, Em elaboração.
- [23] ISO. 3382-2: Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. Switzerland, 2008. 17 p.

- [24] HAK, C. C. J. M.; WENMAEKERS, R. H. C.; LUXEMBURG, L. C. J. van. Measuring room impulse responses: Impact of the decay range on derived room acoustic parameters. *ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA*, v. 98, p. 907–915, September 2012. doi: [10.3813/AAA.918574](https://doi.org/10.3813/AAA.918574).
- [25] SABINE, W. C. *Collected papers on acoustics*. Cambridge: Harvard university press, 1922.
- [26] VIGRAN, T. E. *Building Acoustics*. 1. ed. Madison Avenue, New York, USA: Taylor Francis Group, 2008. ISBN 0-203-93131-9.
- [27] EVEREST, F. A.; POHLMANN, K. C. *Master Handbook of Acoustics*. 5. ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2009. ISBN 978-0-07-160333-1.
- [28] THIELE, R. Richtungsverteilung und zeitfolge der schallrueckwürfe in raumen. *Acustica*, v. 3, p. 291–302, 1953.
- [29] REICHARDT, W.; ALIM, O. A.; SCHMIDT, W. Definition and basis of making an objective evaluation to distinguish between useful and useless clarity defining musical performances. *ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA*, v. 32, n. 3, p. 126–137, September 1975.
- [30] BORK, I. A Comparison of Room Simulation Software - The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 86, p. 943–956, 2000.
- [31] BRANDÃO, E. et al. On the performance investigation of distinct algorithms for room acoustics simulation. *Applied Acoustics*, v. 187, p. 484–495, 2022. ISSN 0003-682X. doi: [10.1016/j.apacoust.2021.108484](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108484).
- [32] LONG, M. *Architectural Acoustics*. Burlington, USA: Elsevier Academic Press, 2006.
- [33] BALLOU, G. M. *Handbook for Sound Engineers*. 4. ed. Burlington, USA: Elsevier, 2008.
- [34] KUTTRUFF, H. *Room Acoustics*. 5. ed. Madison Avenue, New York, USA: Spon Press, 2009. ISBN 978-0-07-160333-1.
- [35] SCHRÖDER, D.; VORLÄNDER, M. RAVEN: A real-time framework for the auralization of interactive virtual environments. *Forum Acusticum*, p. 1541–1546, 2011.

- [36] ASPÖCK, L. et al. A real-time auralization plugin for architectural design and education. *Proc. of the EAA Joint Symposium on Auralization and Ambisonics*, v. 161, p. 156–161, 2014. doi: [10.14279/depositonce-26](https://doi.org/10.14279/depositonce-26).
- [37] SCHRÖDER, D. Physically based real-time auralization of interactive virtual environments. *Logos Verlag Berlin GmbH*, v. 11, 2011. Disponível em: <<http://publications.rwth-aachen.de/record/50580/files/3875.pdf>>.
- [38] TAMINATO, F. O.; TENENBAUM, R. A.; MELO, V. S. G. Técnica rápida para geração de auralizações utilizando redes neurais artificiais. *Acústica e Vibrações*, v. 50, 2018.
- [39] TENENBAUM, R. A. et al. Hybrid method for numerical simulation of room acoustic: Part 1 – theoretical and numerical aspects. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Engin.*, v. 29, n. 2, p. 211–221, 2007a.
- [40] TENENBAUM, R. A. et al. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics: Part 2 – Validation of the computational code RAIOS 3. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Engin.*, v. 29, n. 2, p. 222–231, 2007b.
- [41] ODEON. *Odeon Room Acoustics Software: Odeon 11 Features*. 2019.
- [42] RINDEL, J. H.; CHRISTENSEN, C. L.; KOUTSOURIS, G. An experimental study on the use of waste aggregate for acoustic attenuation: EVA and rice husk composites for impact noise reduction. *ACOUSTIS 2013*, New Delhi, India, Novembro 2013.
- [43] ODEON. *User's Manual - Version 16*. DTU Science Park, Lyngby, Denmark: [s.n.], 2020.
- [44] VIEIRA, E. M. *Projeto de uma câmara anecóica para avaliação de ruído em médias e altas frequências*. Santa Maria, RS, Brasil, 2021.
- [45] BRINKMANN, F. et al. A round robin on room acoustical simulation and auralization. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 145, n. 4, p. 2746–2760, 2019. doi: doi.org/10.1121/1.5096178.
- [46] ISO. 354: Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room. Switzerland, 2003. 21 p.
- [47] DIETRICH, P. et al. Matlab toolbox for the comprehension of acoustic measurement and signal processing. *Fortschritte der Akustik, DAGA*, 2010.

- [48] DIETRICH, P. et al. Measurements and room acoustic analysis with the ita-toolbox for matlab. *40th Italian (AIA) Annual Conference on Acoustics and the 39th German Annual Conference on Acoustics*, DAGA, 2013.
- [49] BERZBORN, M. et al. The ITA-Toolbox: An Open Source MATLAB Toolbox for Acoustic Measurements and Signal Processing. *43th Annual German Congress on Acoustics*, Kiel, Germany, Mar. 2017. Disponível em: <<http://publications.rwth-aachen.de/record/687308>>.
- [50] ACKERMANN, D. et al. *A Ground Truth on Room Acoustical Analysis and Perception (GRAP)*. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-7003.4>>.
- [51] TENENBAUM, R. A. *RAIOS 7: Manual do usuário*. v. 7.12, 2019. 57 p. Disponível em: <<https://ratenenbaum.wixsite.com/acustica/raios-7>>.

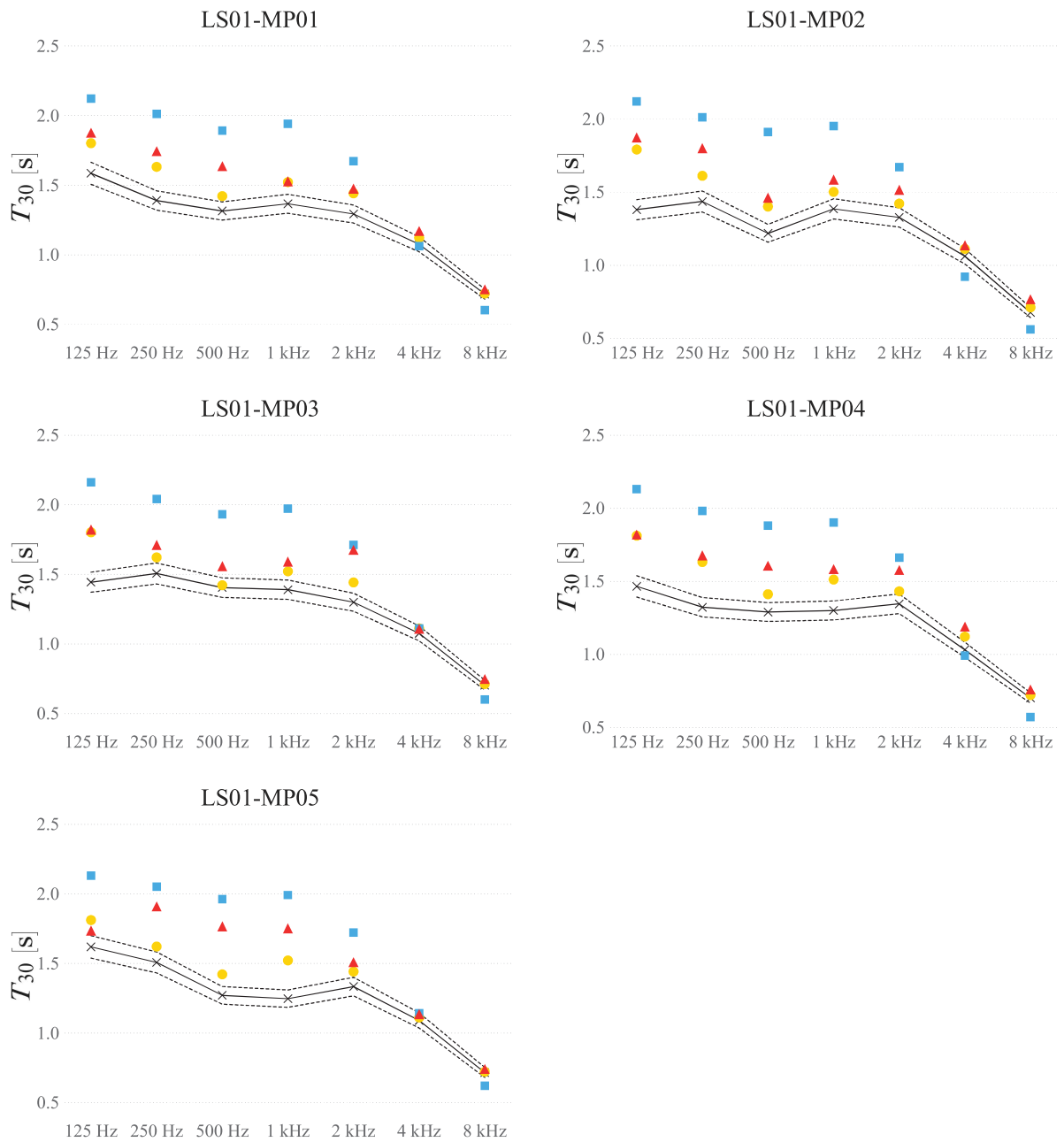
APÊNDICES

APÊNDICE A – Resultados da Sala 10 do RR4

A.1 PARÂMETROS POR POSIÇÃO

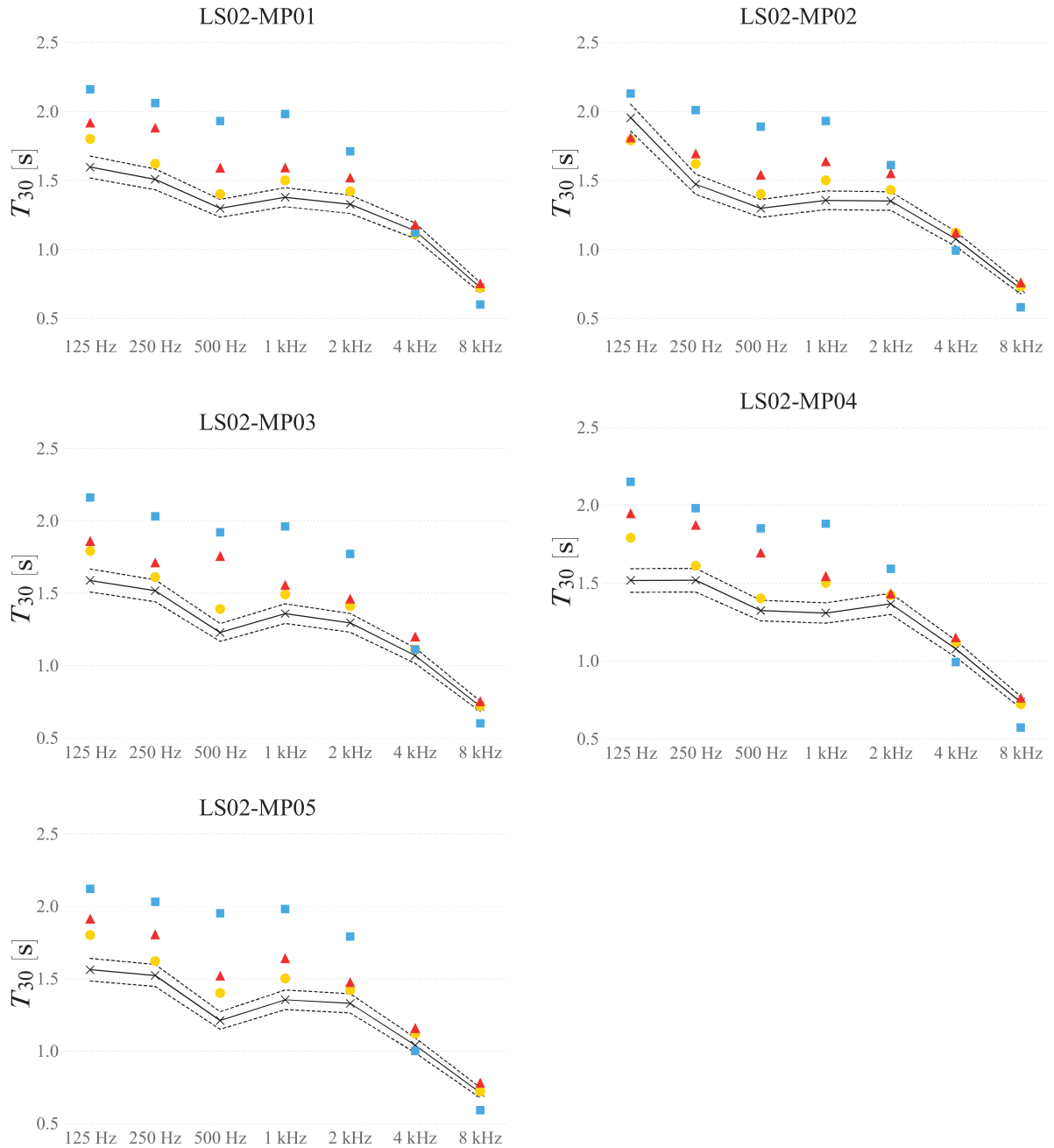
T_{30} , no ponto de fonte LS01, e pontos de recepção do MP01 ao MP05. Dados simulados e medidos em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz.

Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).



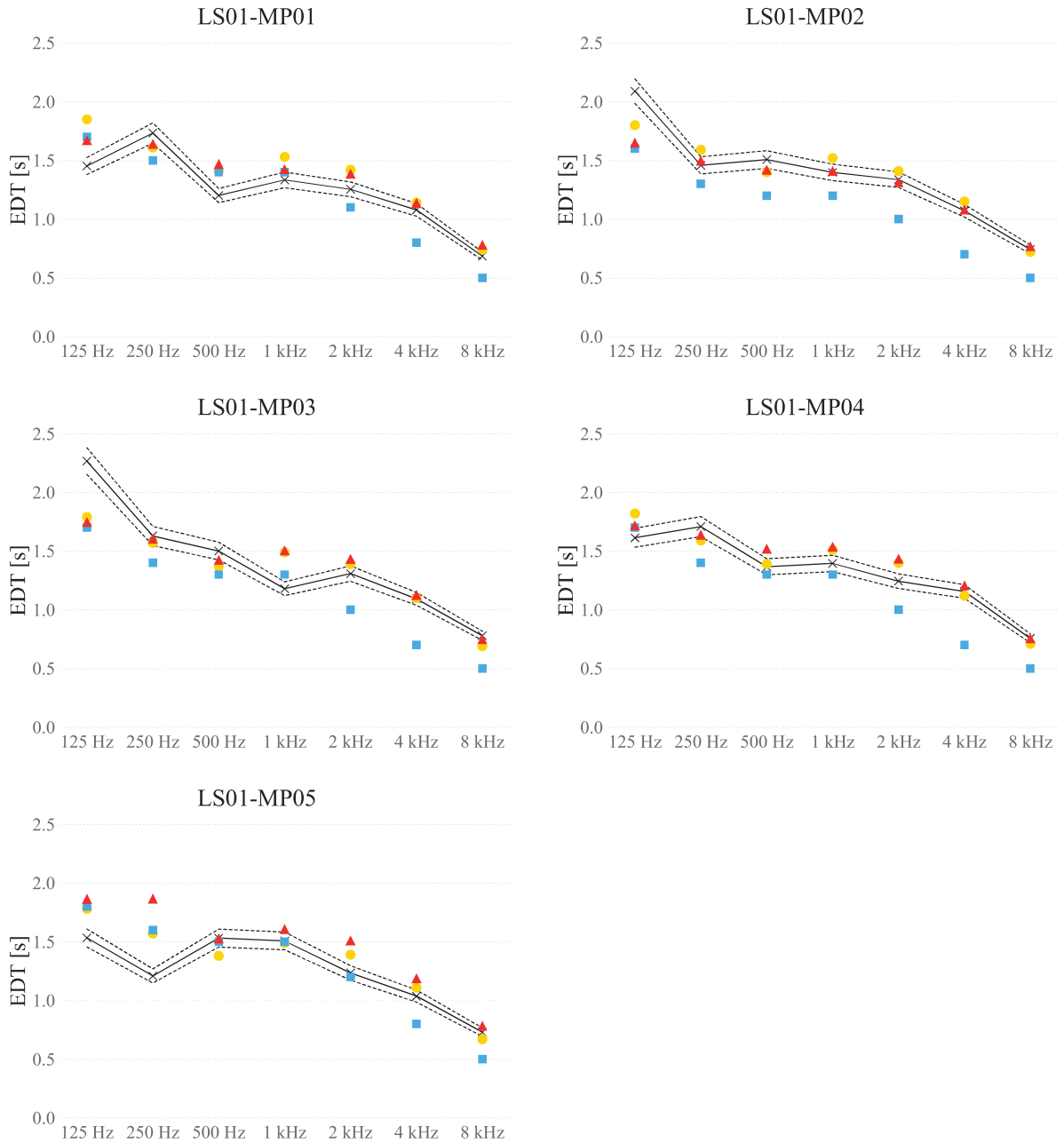
T_{30} , no ponto de fonte LS02, e pontos de recepção do MP01 ao MP05. Dados simulados e medidos em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz.

Legenda: Medição (×), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).



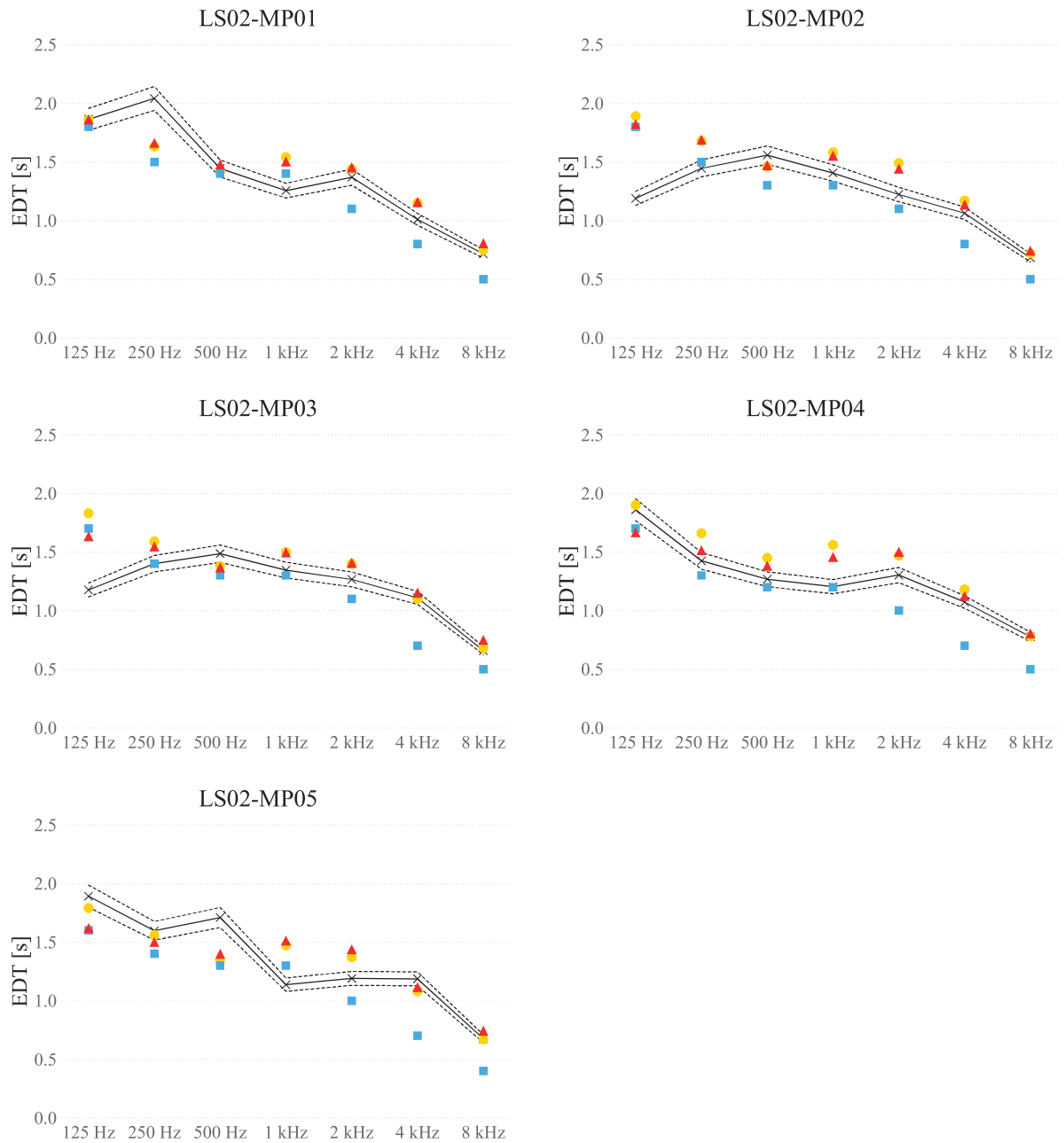
EDT, no ponto de fonte LS01, e pontos de recepção do MP01 ao MP05. Dados simulados e medidos em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz.

Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (\blacktriangle), RAIOS (\blacksquare).



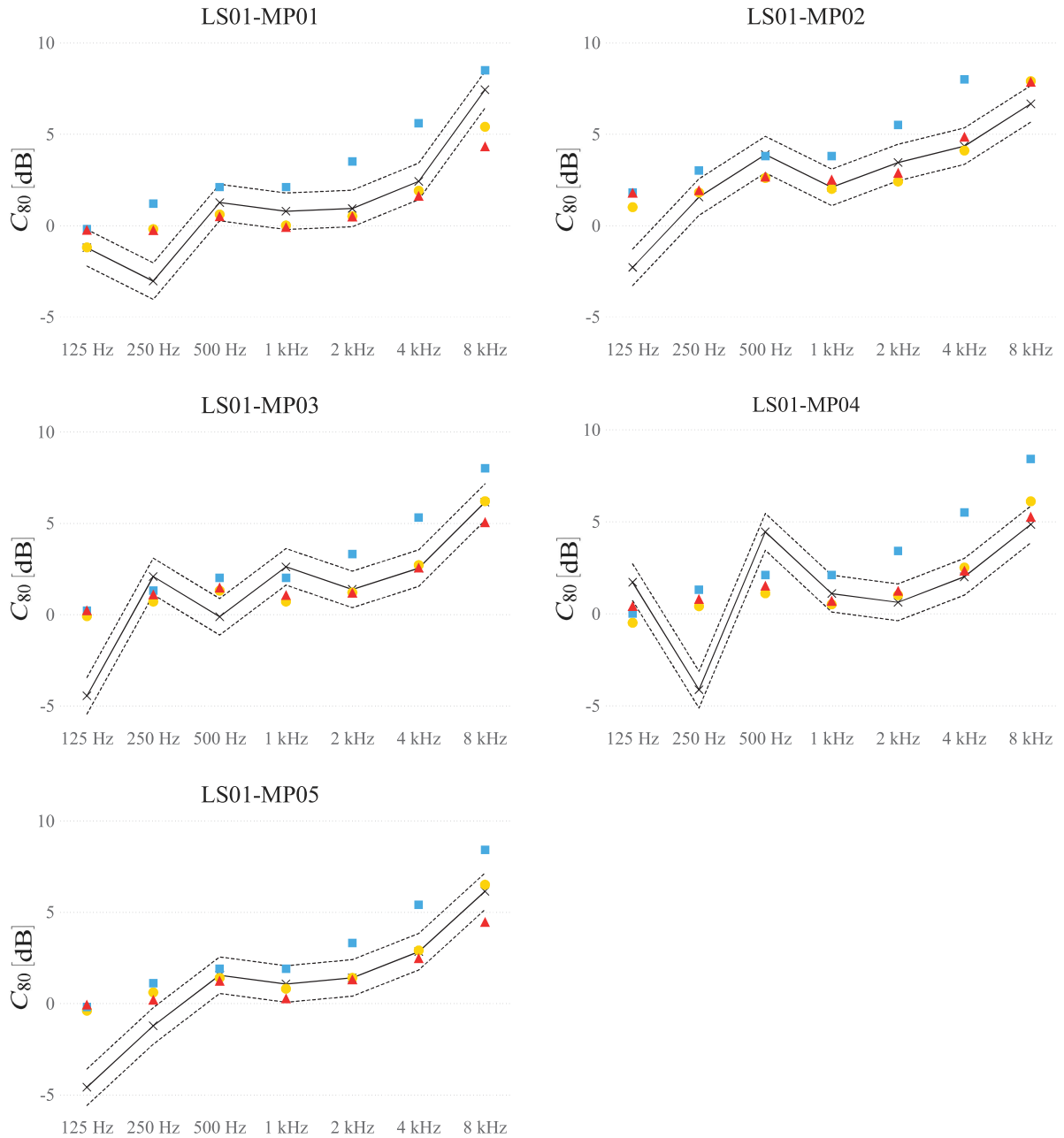
EDT, no ponto de fonte LS02, e pontos de recepção do MP01 ao MP05. Dados simulados e medidos em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz.

Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (\blacktriangle), RAIOS (\blacksquare).



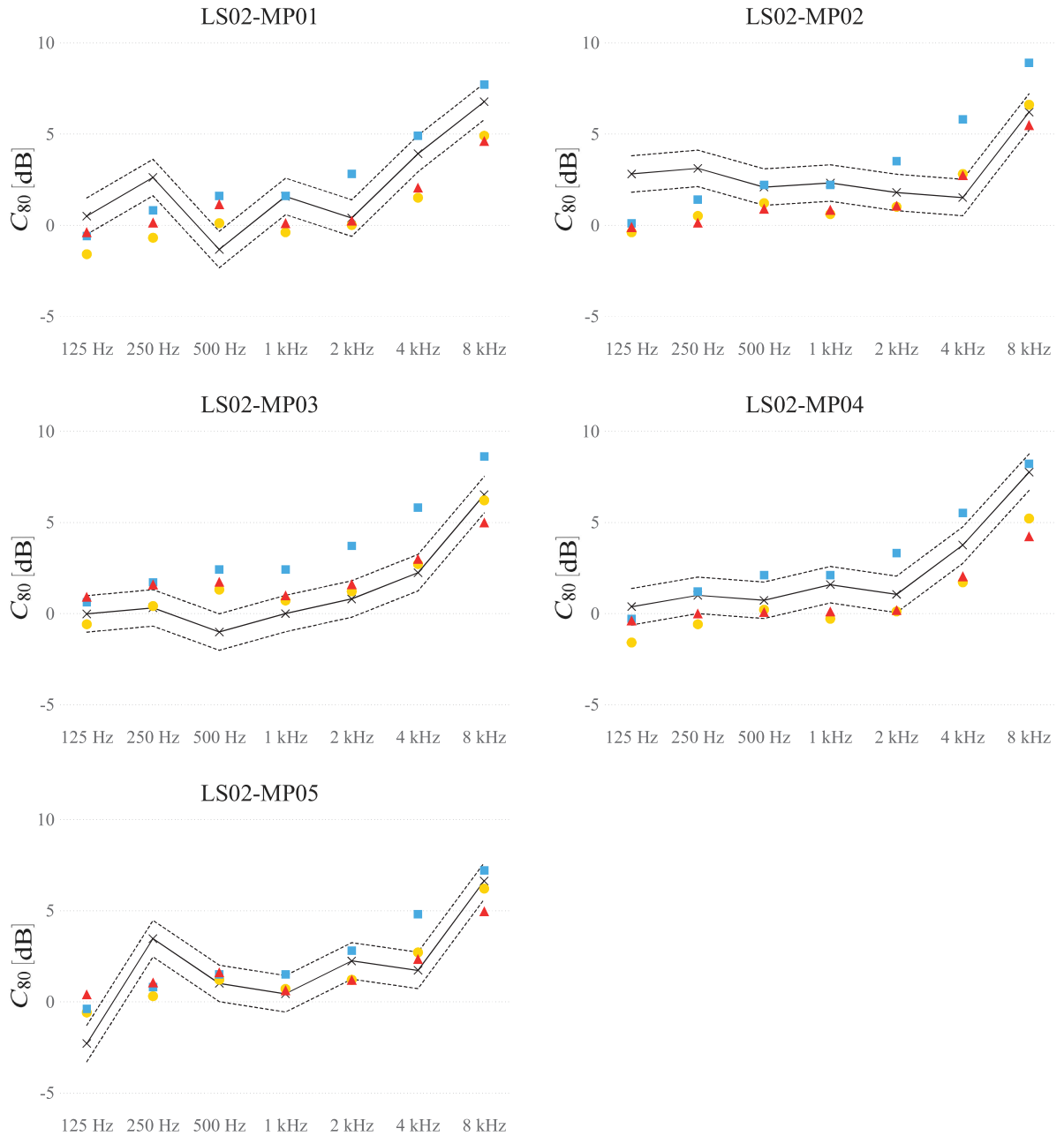
C_{80} , no ponto de fonte LS01, e pontos de recepção do MP01 ao MP05. Dados simulados e medidos em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz.

Legenda: Medição (—x—), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).



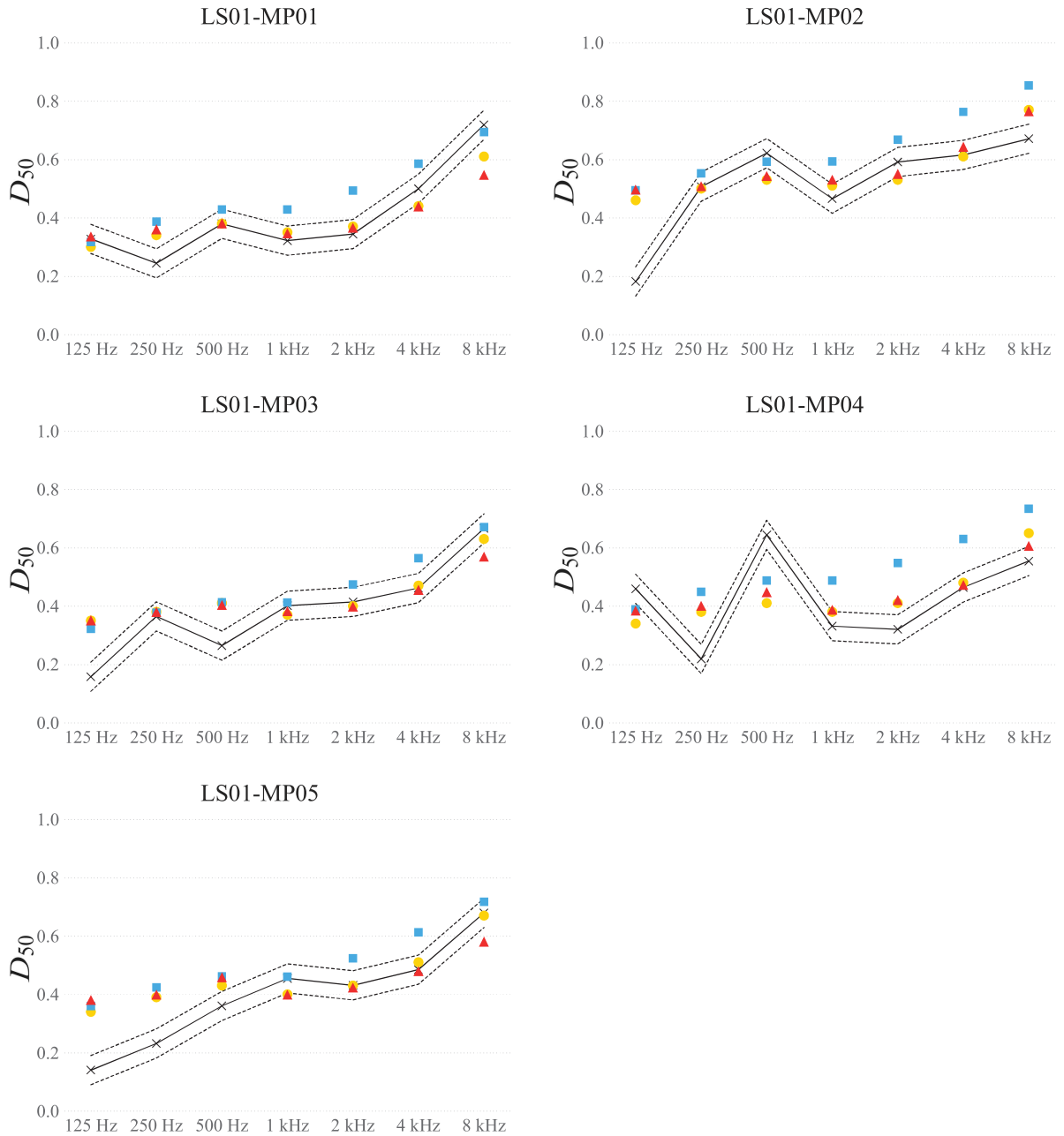
C_{80} , no ponto de fonte LS02, e pontos de recepção do MP01 ao MP05. Dados simulados e medidos em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz.

Legenda: Medição (×), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).



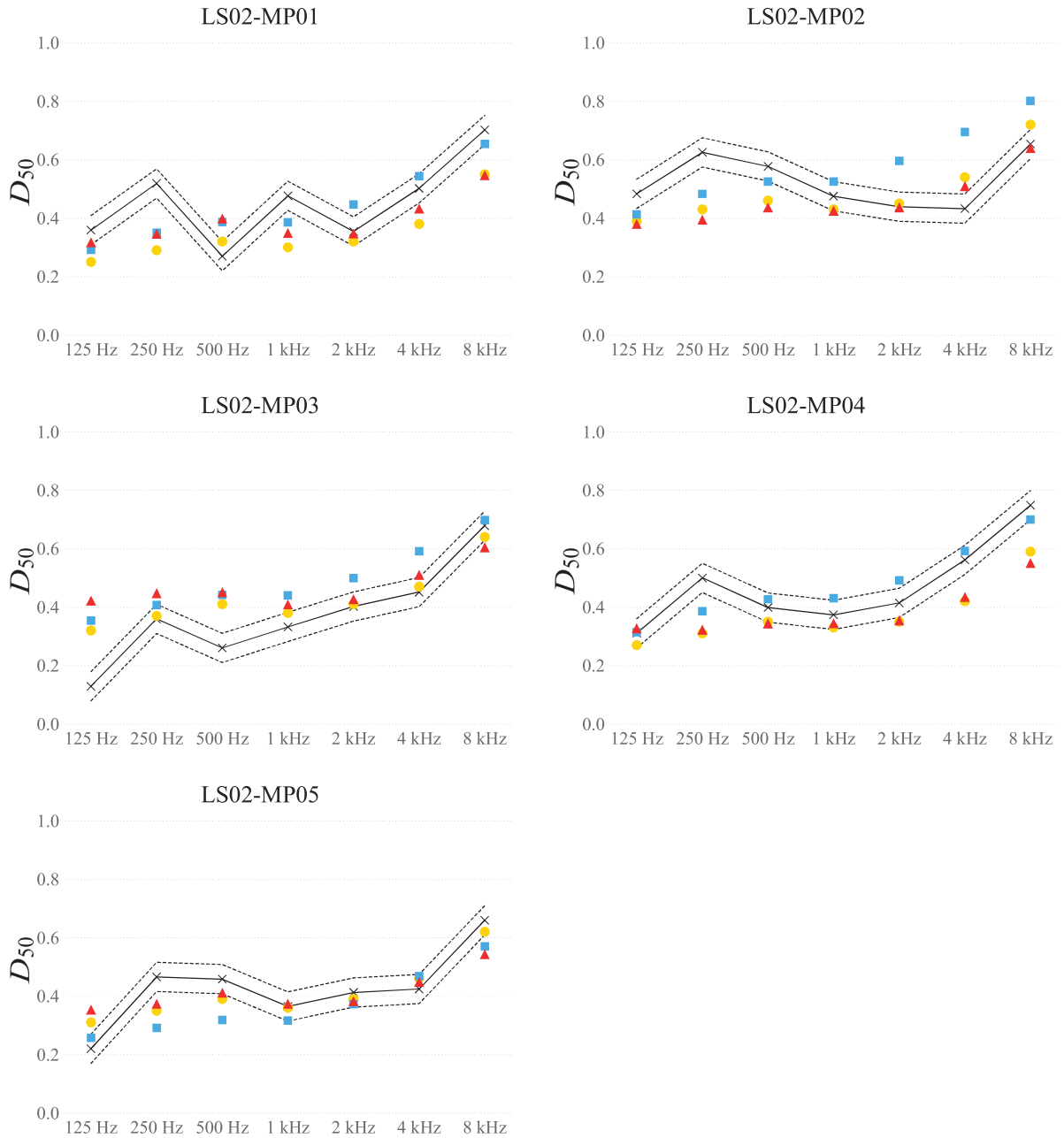
D_{50} , no ponto de fonte LS01, e pontos de recepção do MP01 ao MP05. Dados simulados e medidos em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz.

Legenda: Medição (✕), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).



D_{50} , no ponto de fonte LS02, e pontos de recepção do MP01 ao MP05. Dados simulados e medidos em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz.

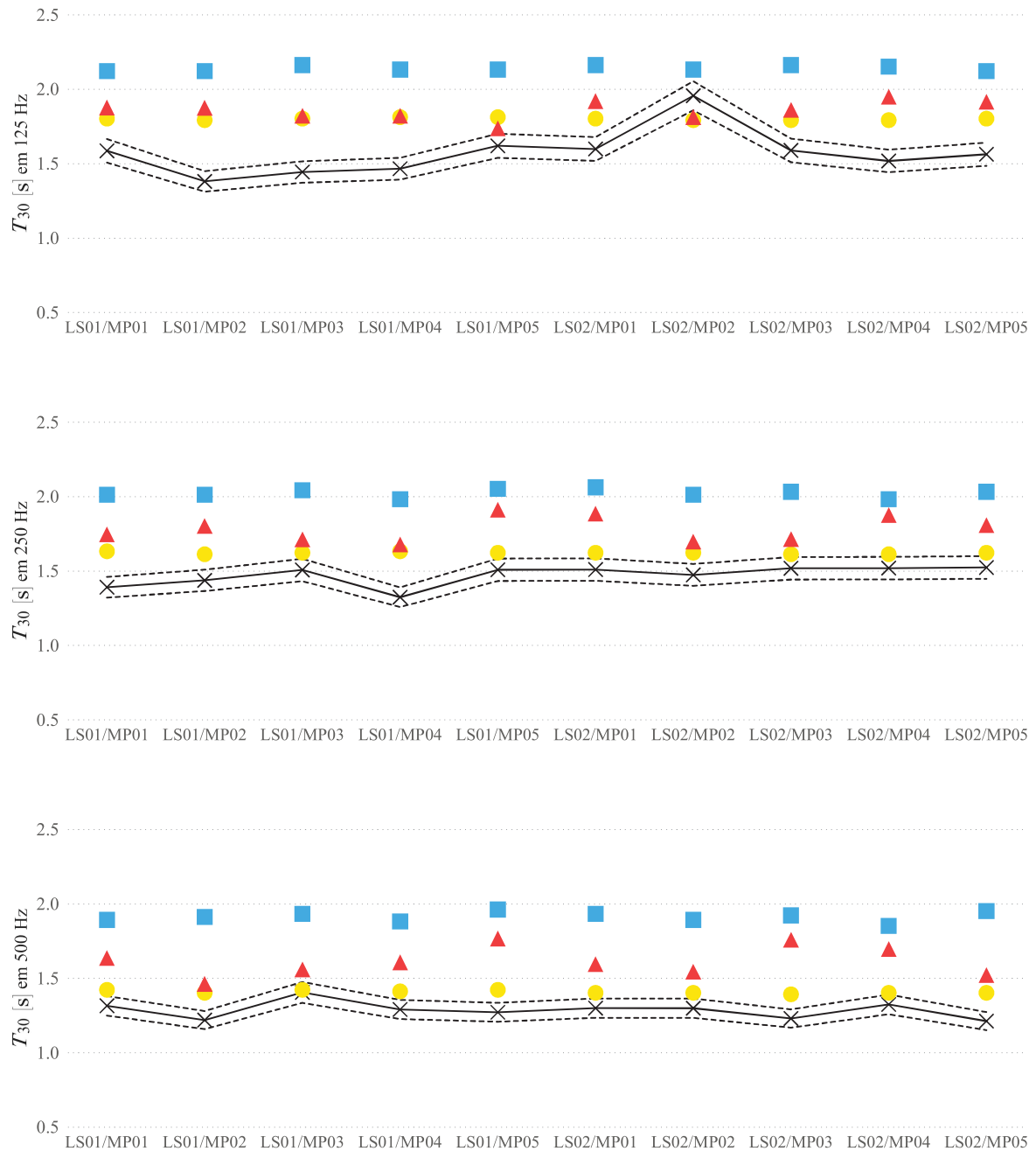
Legenda: Medição (✕), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).

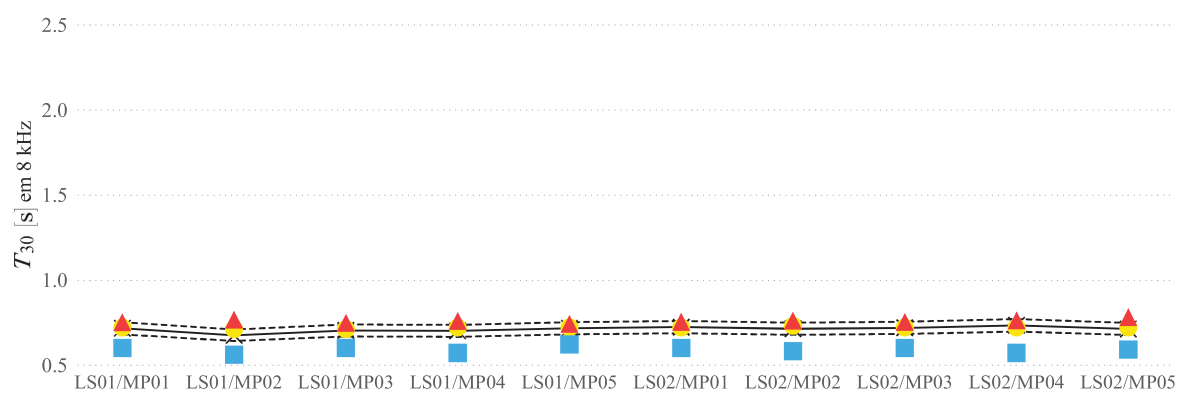
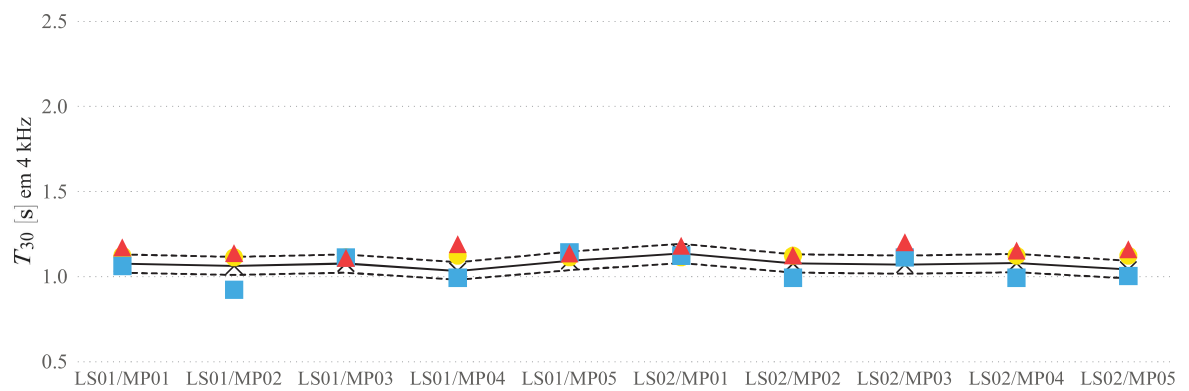
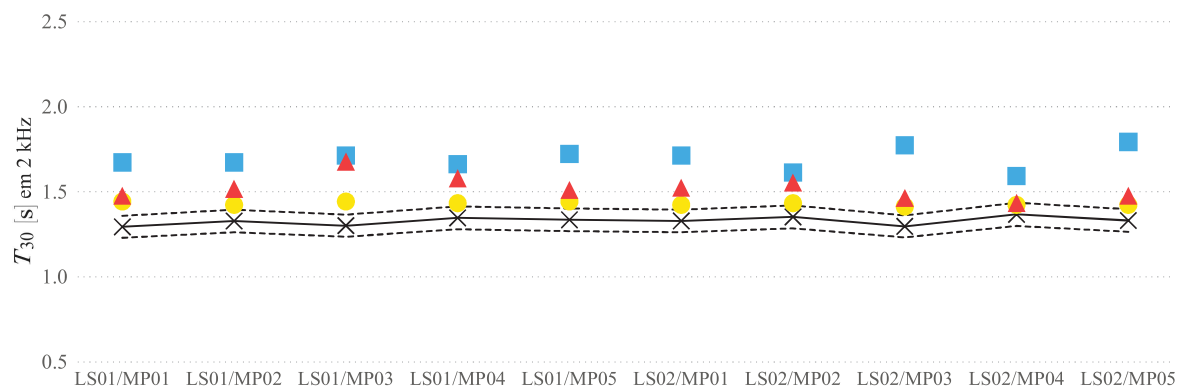
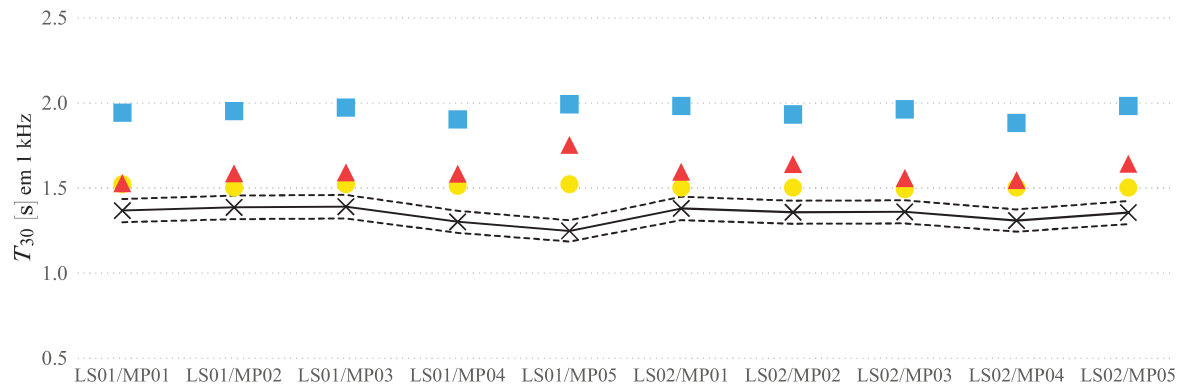


A.2 PARÂMETROS POR FREQUÊNCIA

Resultados referentes ao T_{30} , por frequência, em função das posições na sala.

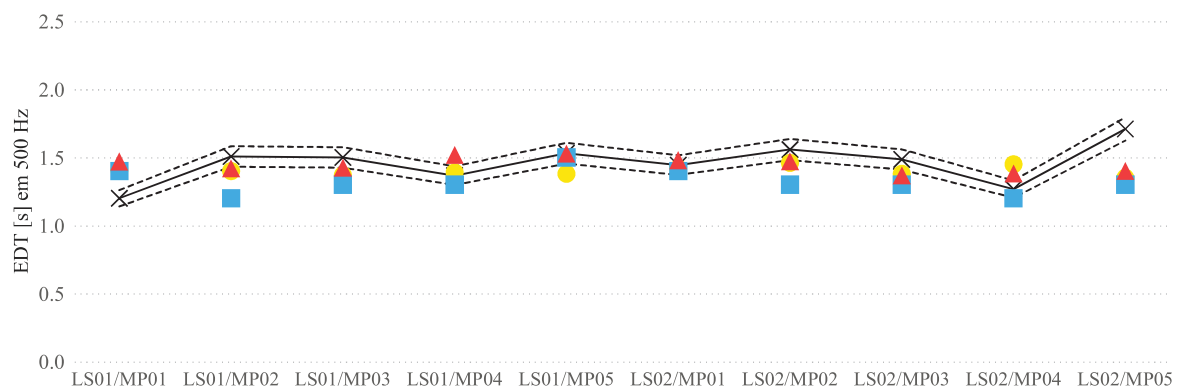
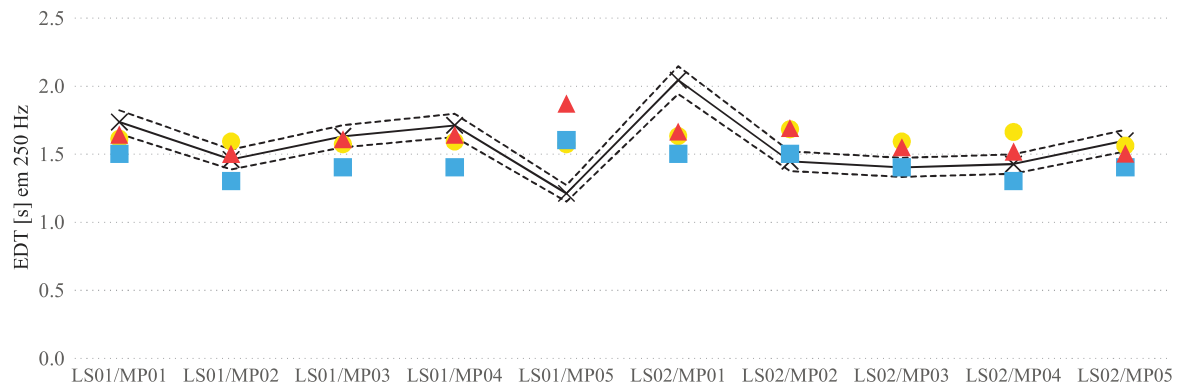
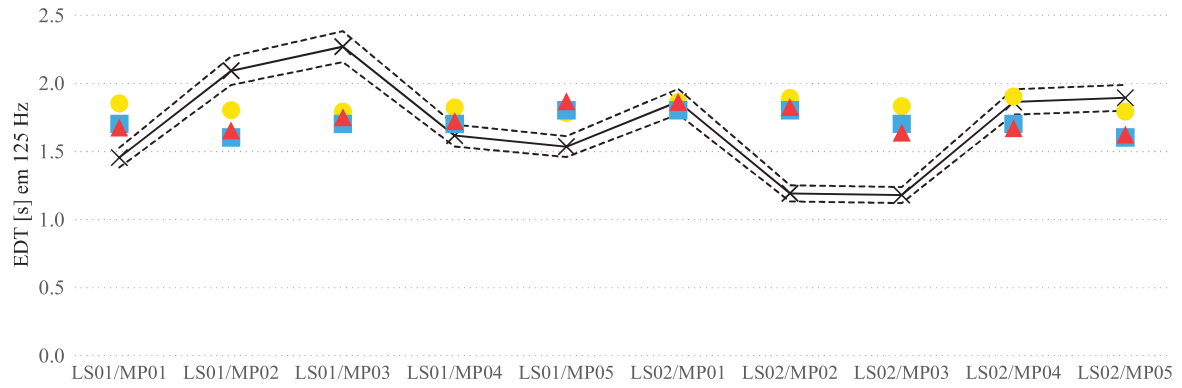
Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle), RAIOS (\blacksquare).

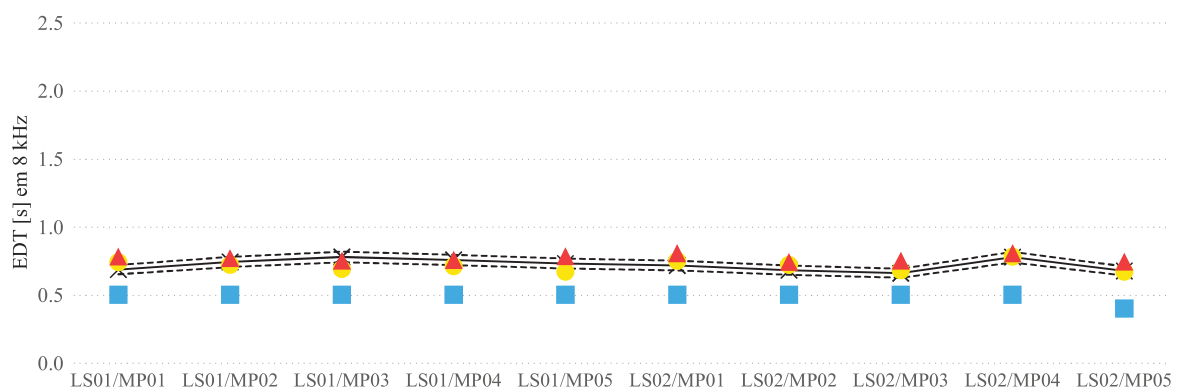
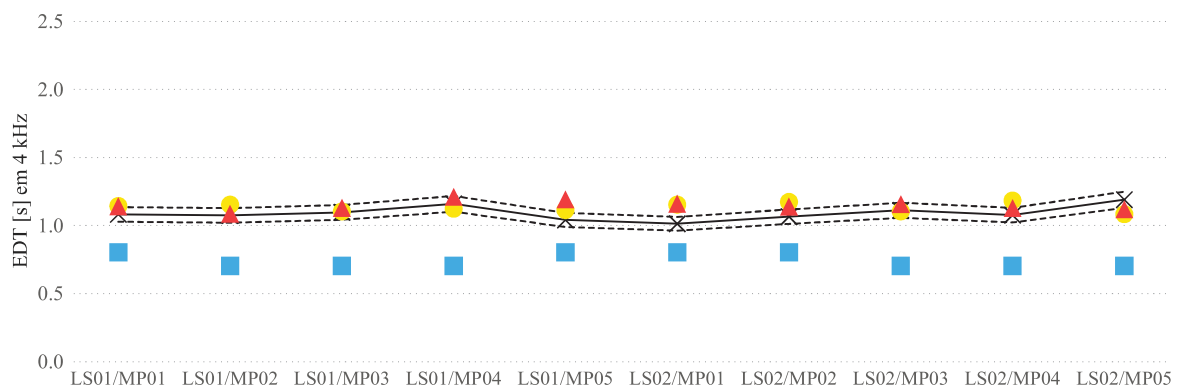
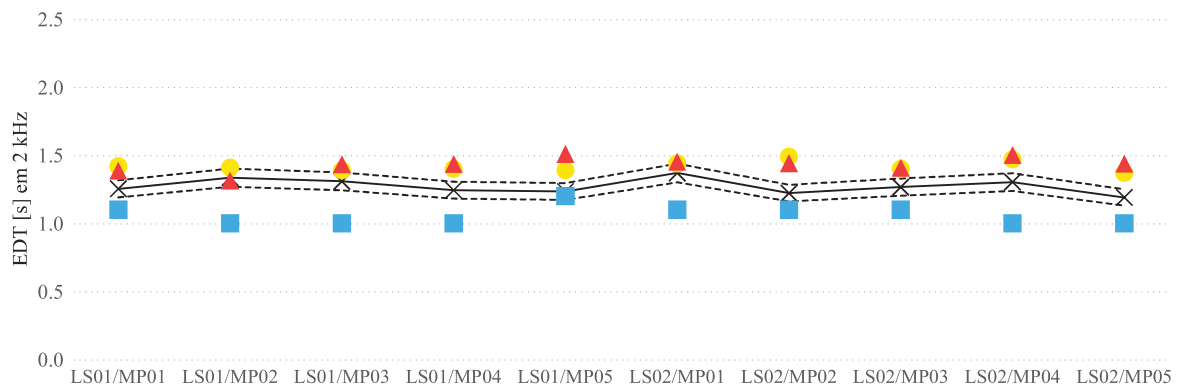
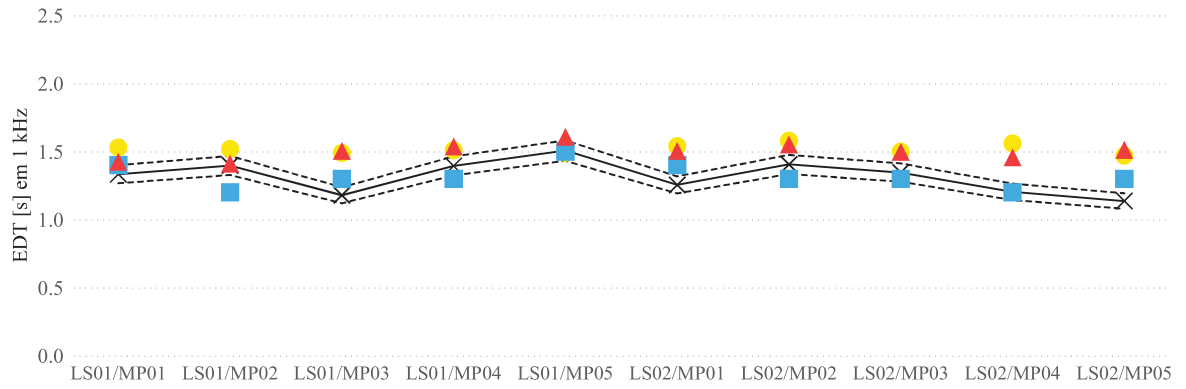




Resultados referentes ao EDT, por frequência, em função das posições na sala.

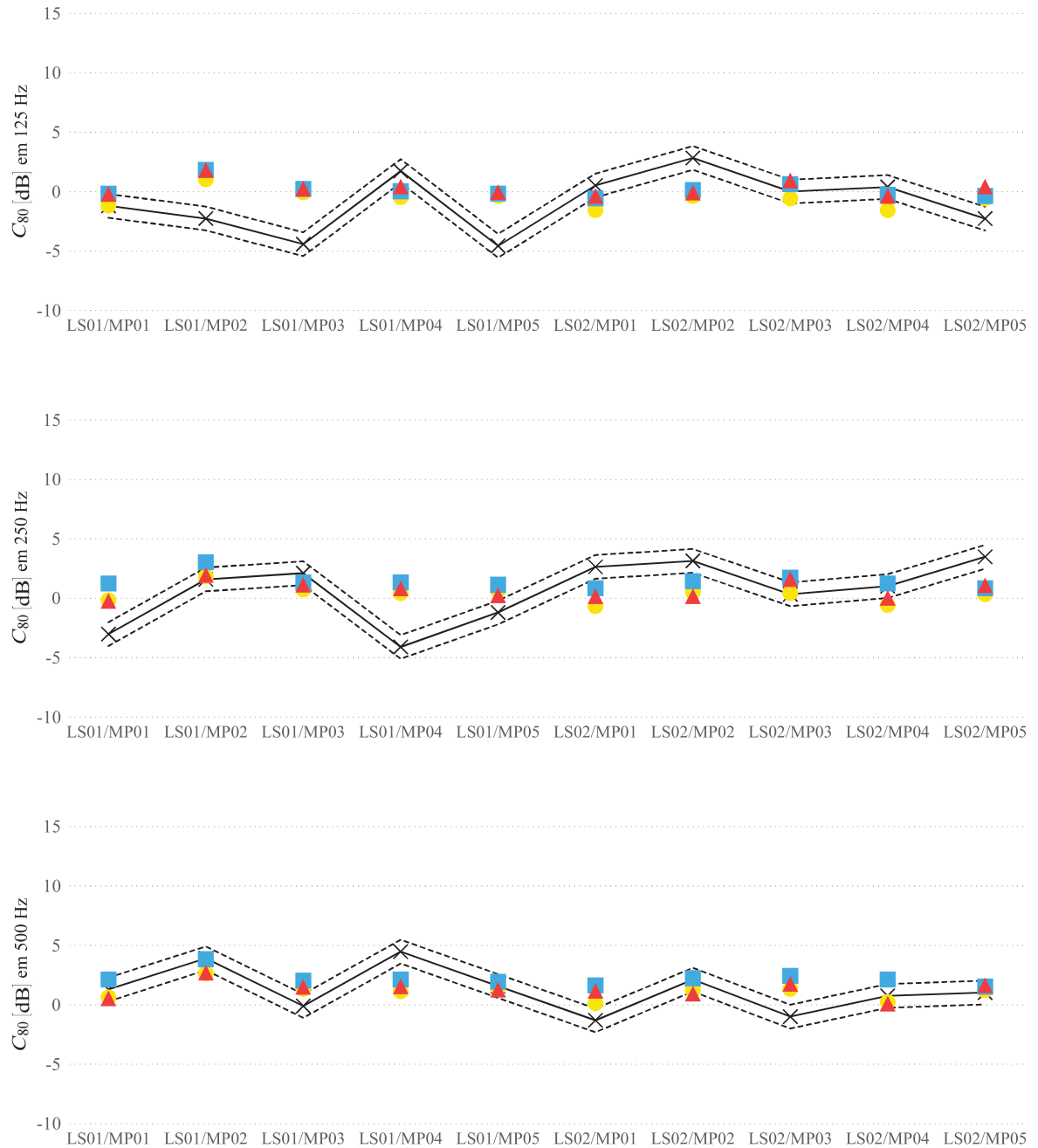
Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle), RAIOS (\blacksquare).

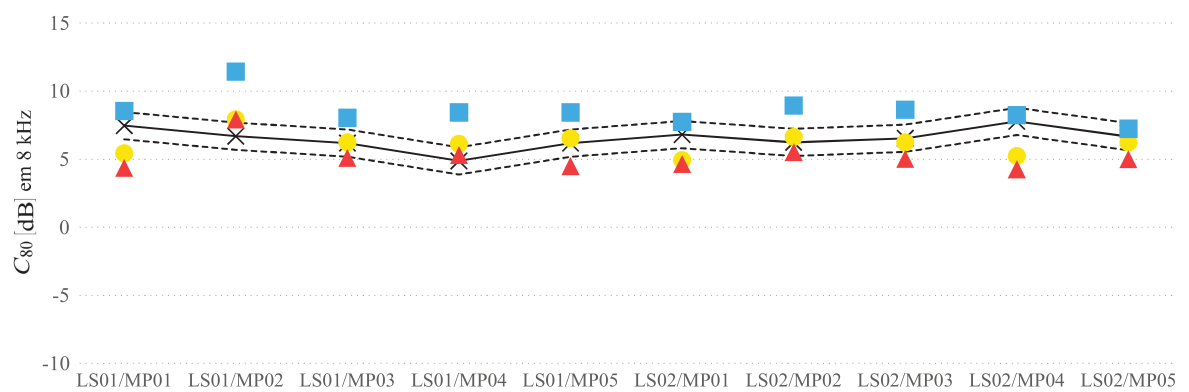
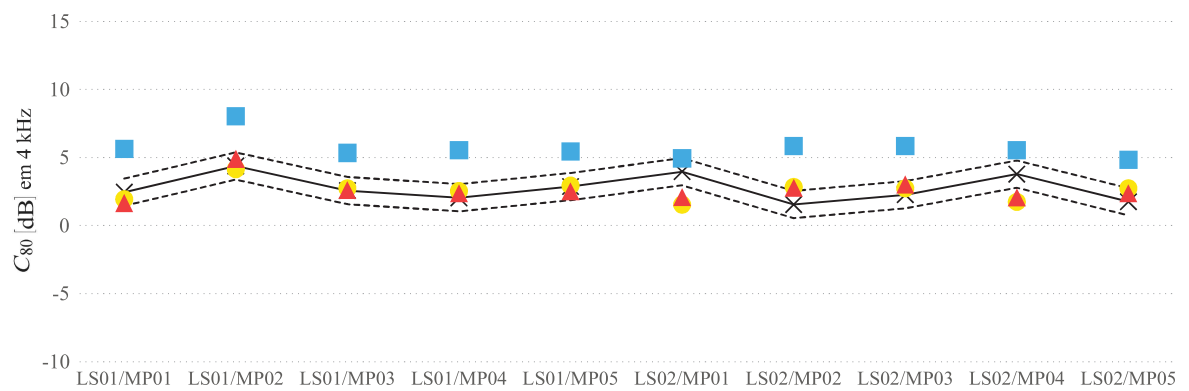
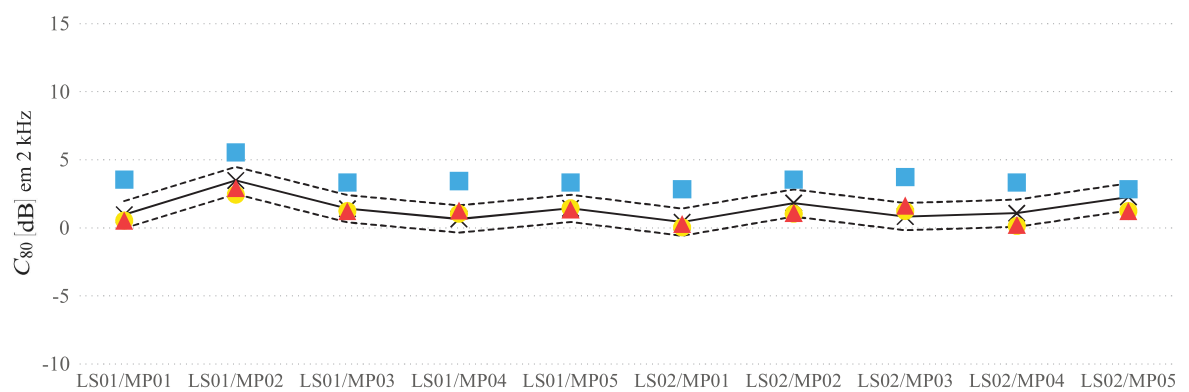
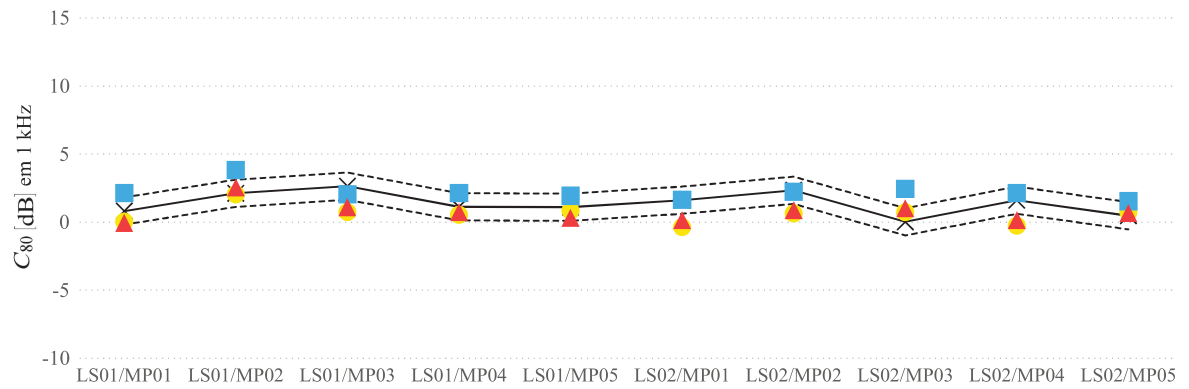




Resultados referentes ao C_{80} , por frequência, em função das posições na sala.

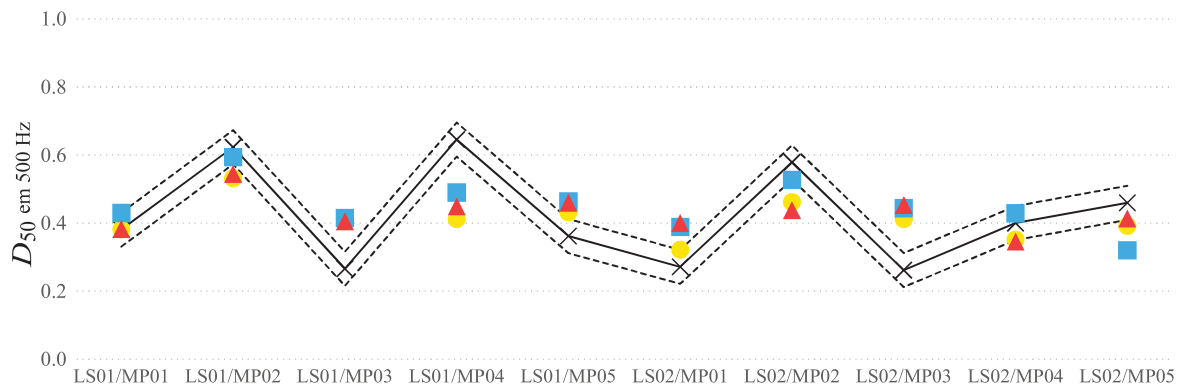
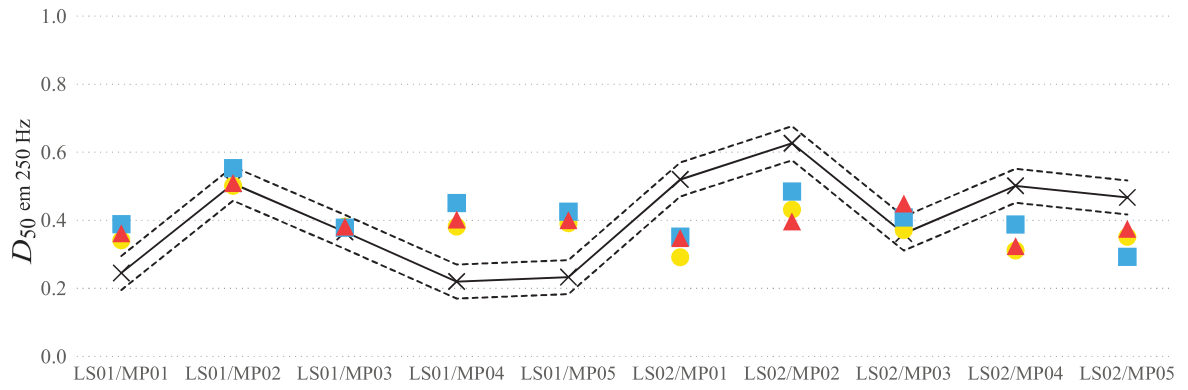
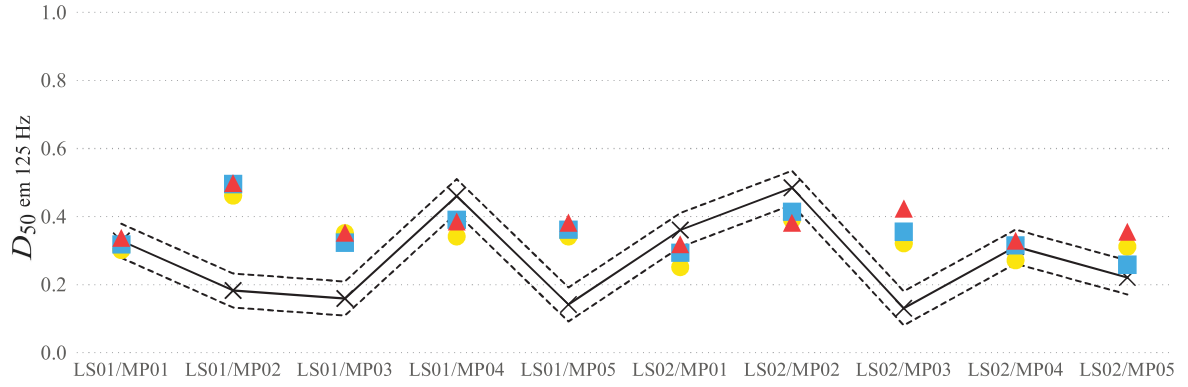
Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle), RAIOS (\blacksquare).

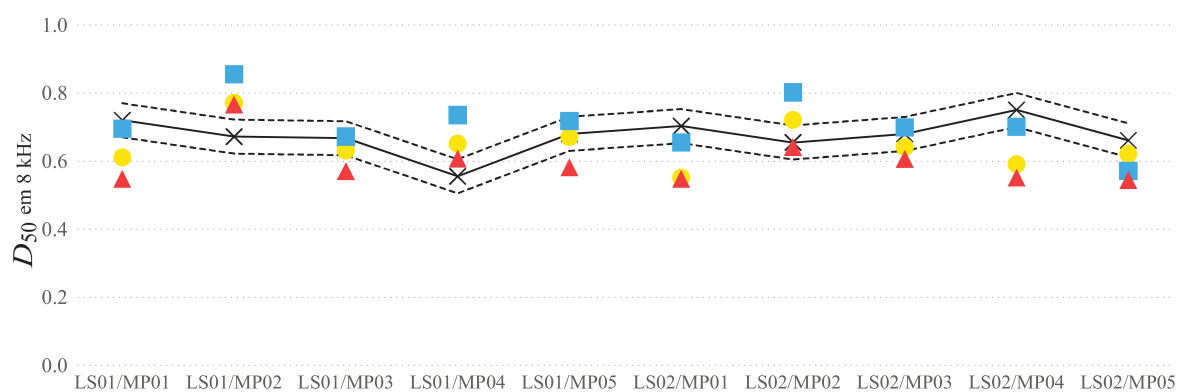
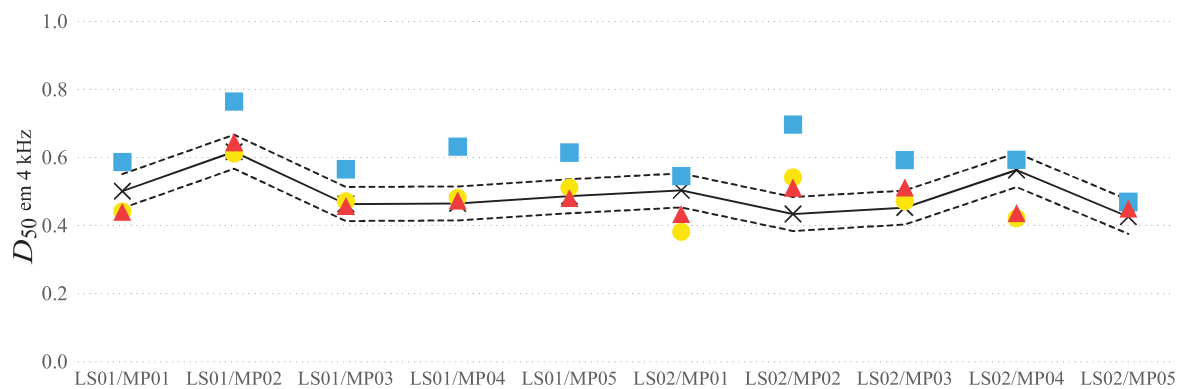
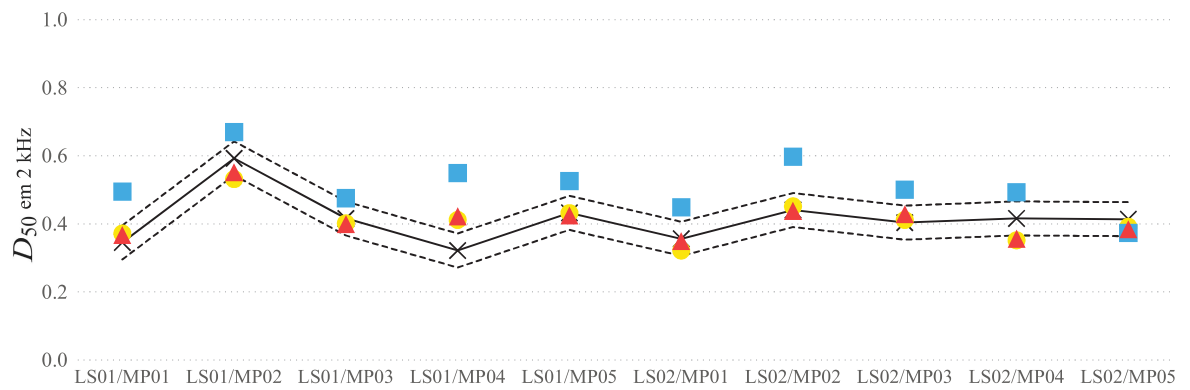
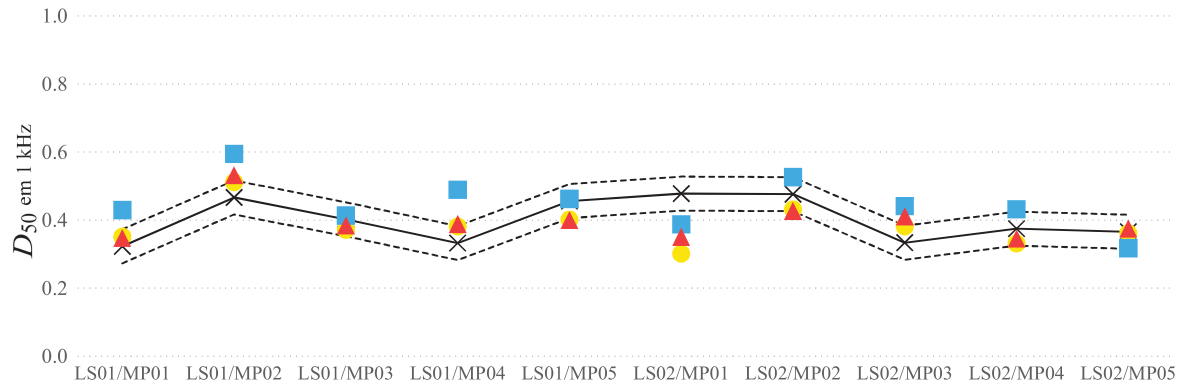




Resultados referentes ao D_{50} , por frequência, em função das posições na sala.

Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle), RAIOS (\blacksquare).





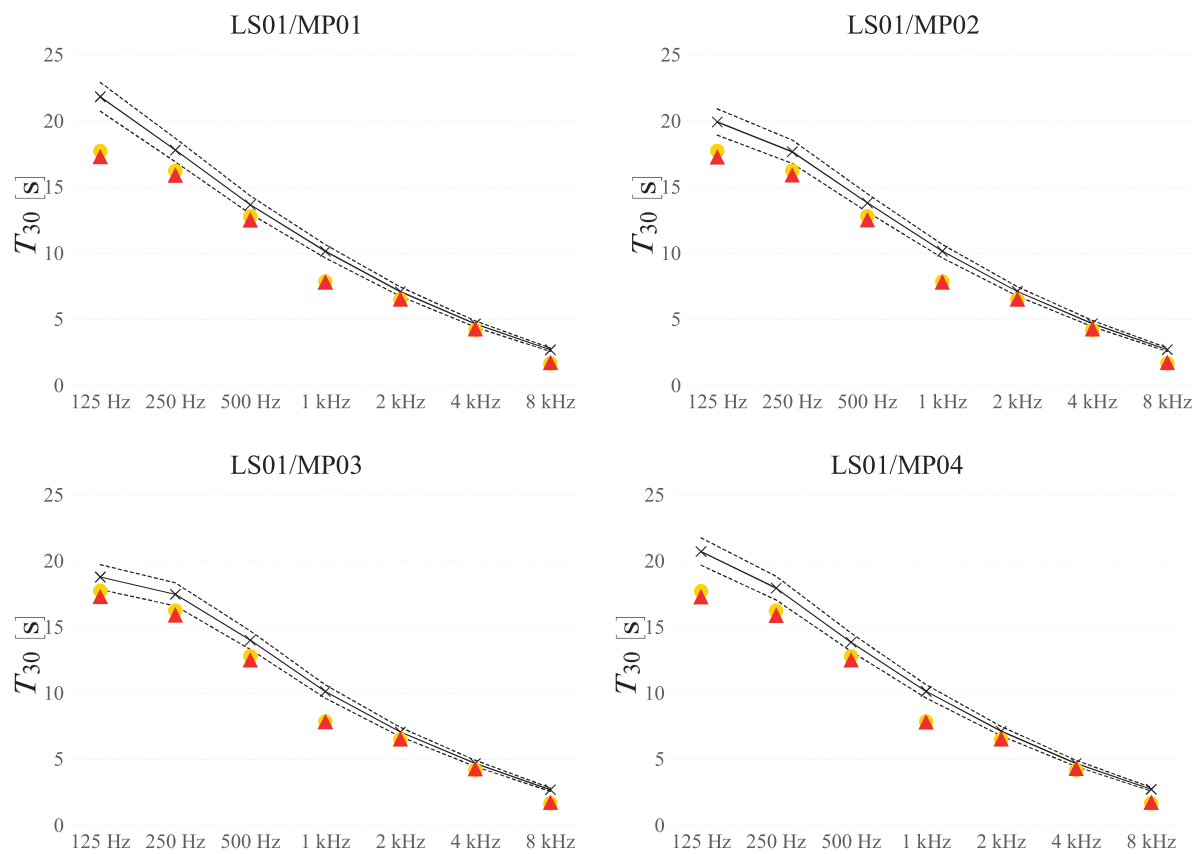
APÊNDICE B – Resultados da Câmara Reverberante da UFSM

B.1 SALA VAZIA

B.1.1 Parâmetros por posição

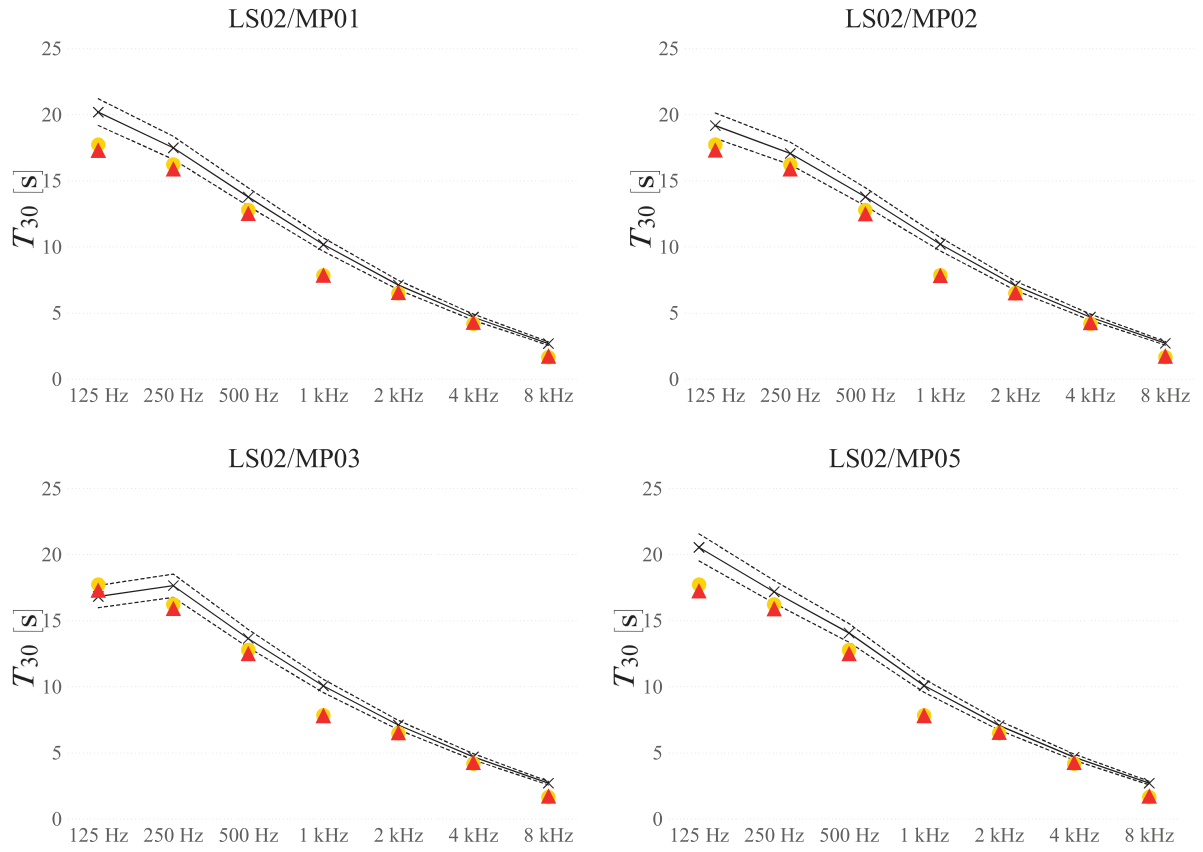
T_{30} , no ponto de fonte LS01, e pontos de recepção do MP01 ao MP04. Dados simulados e medidos em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz.

Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).

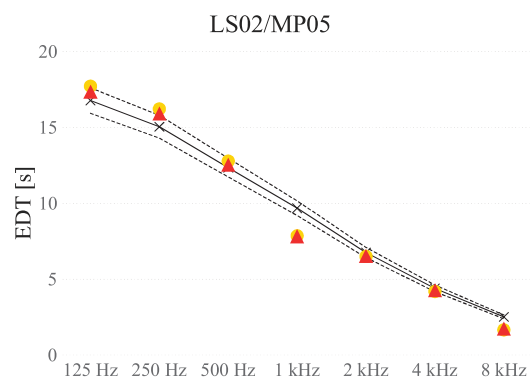
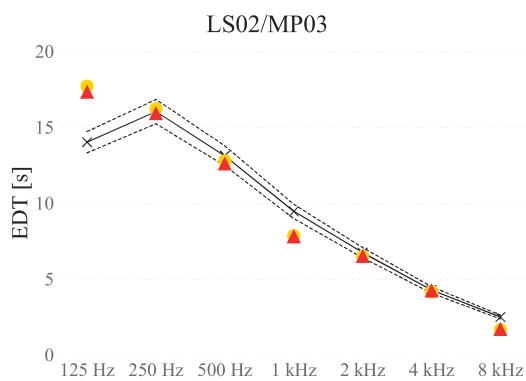
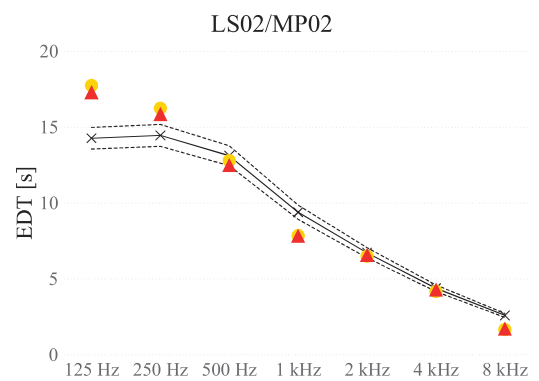
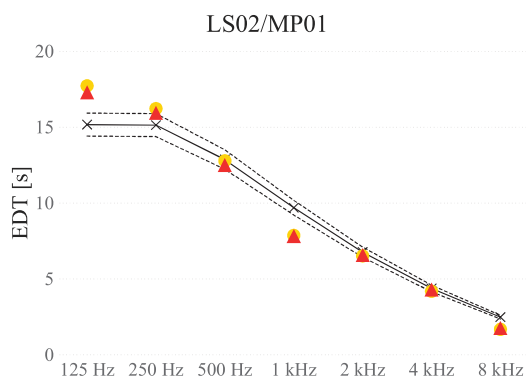
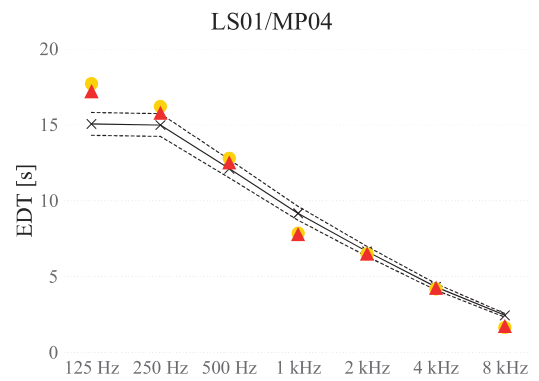
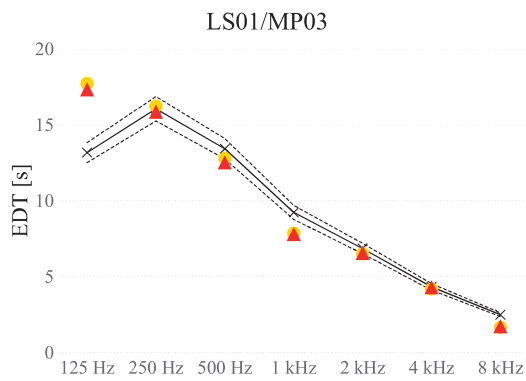
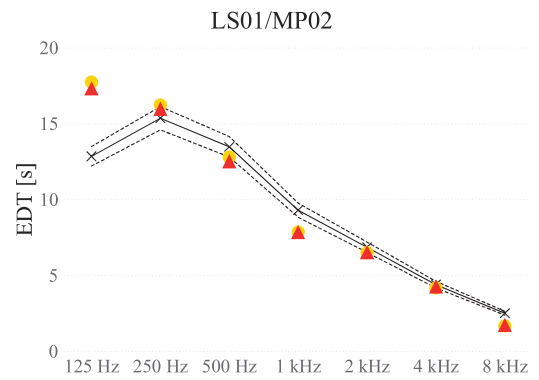
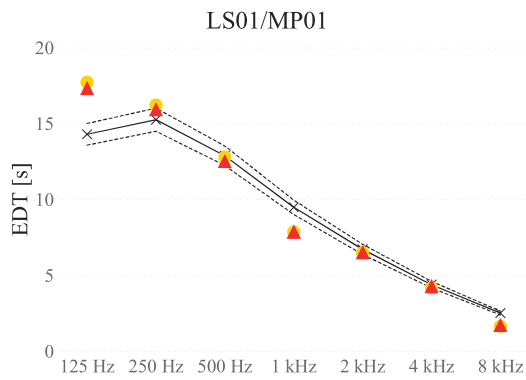


T_{30} , no ponto de fonte LS02, e pontos de recepção do MP01 ao MP05. Dados simulados e medidos em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz.

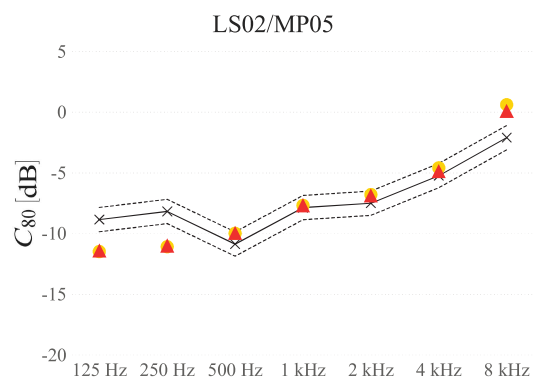
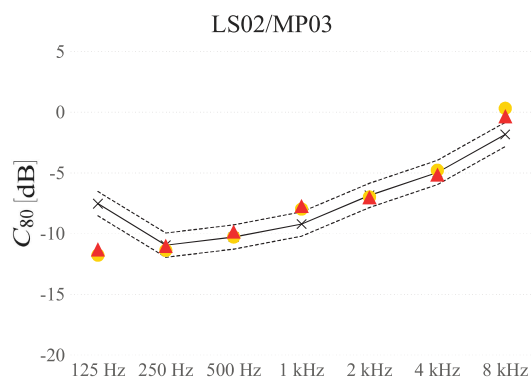
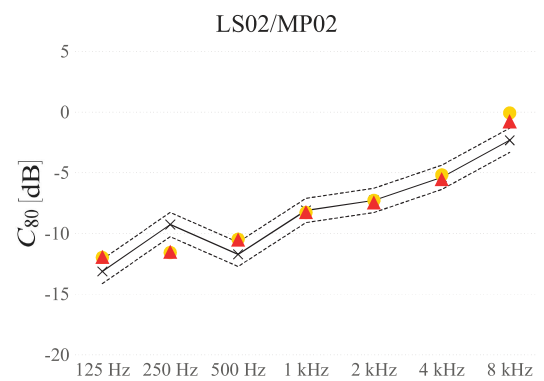
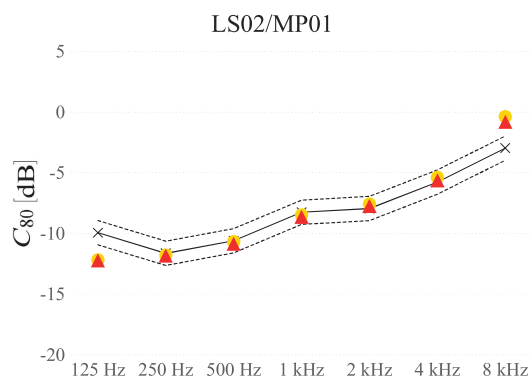
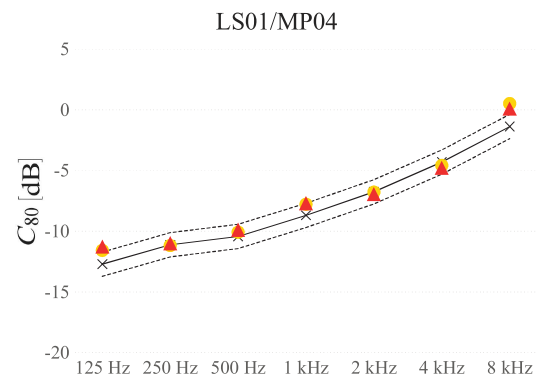
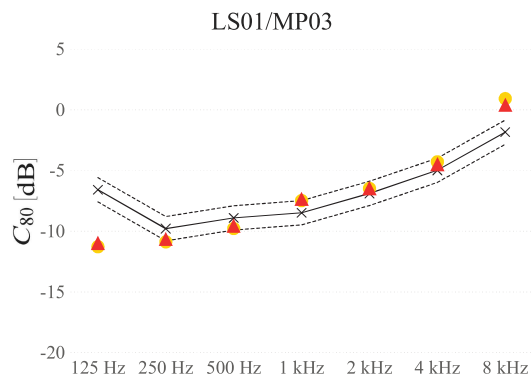
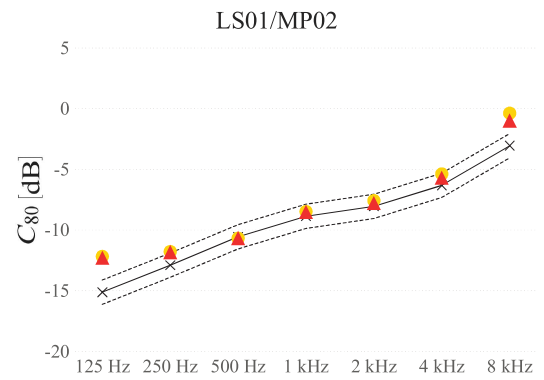
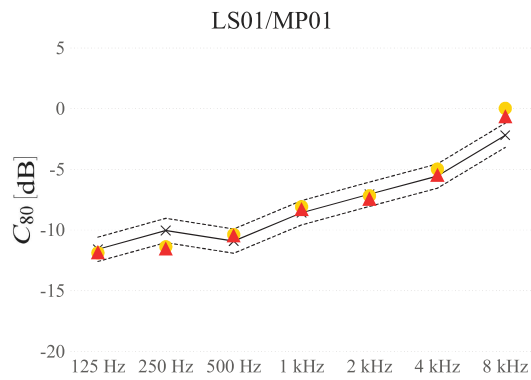
Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).



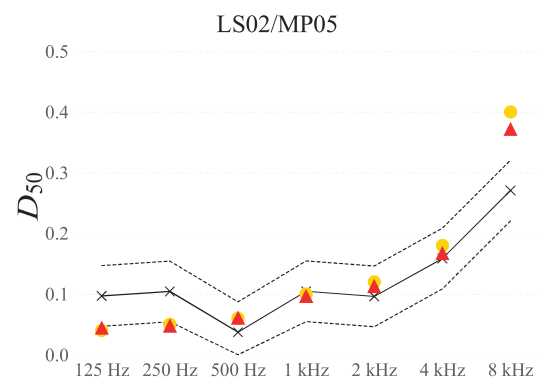
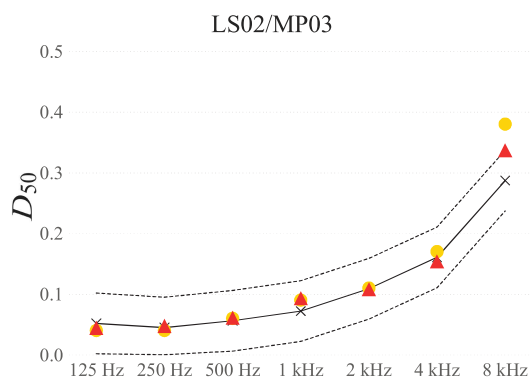
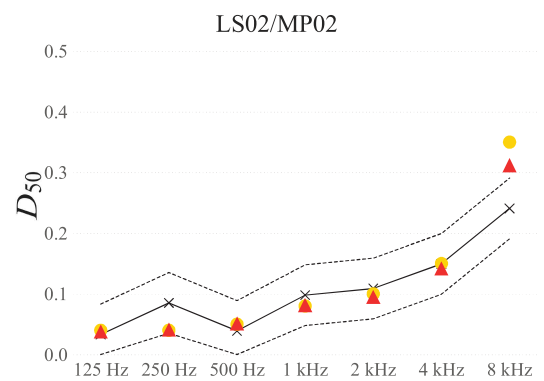
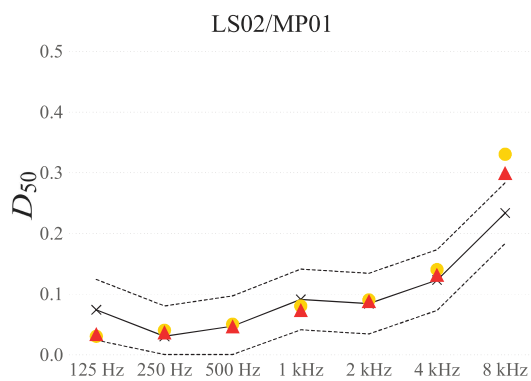
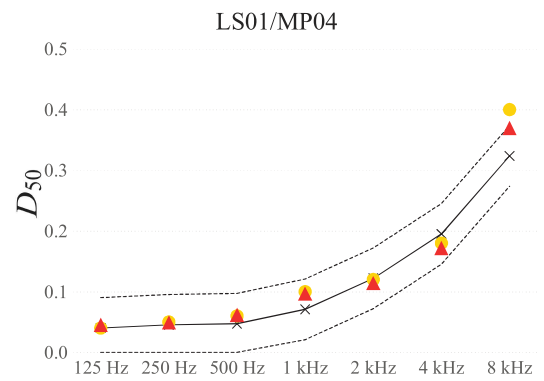
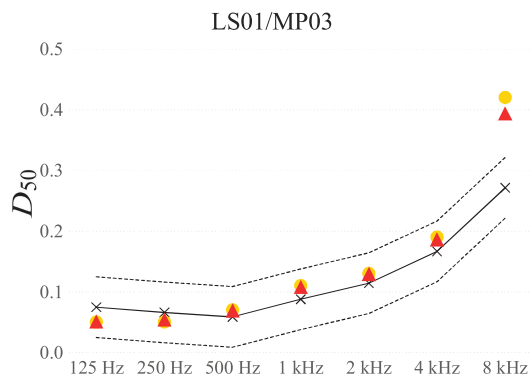
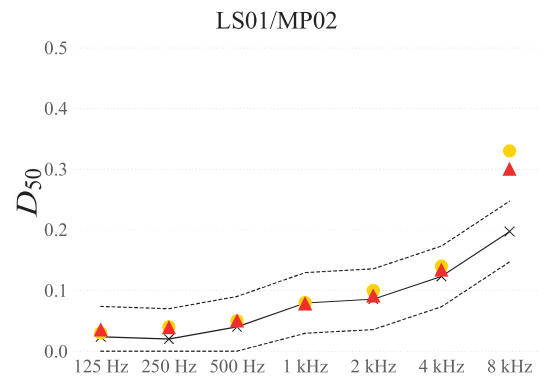
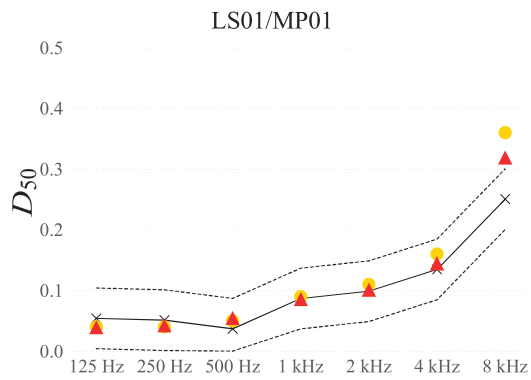
Dados simulados e medidos, em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz, para o EDT.
 Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).



Dados simulados e medidos, em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz, para o C_{80} .
 Legenda: Medição (✕), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲).



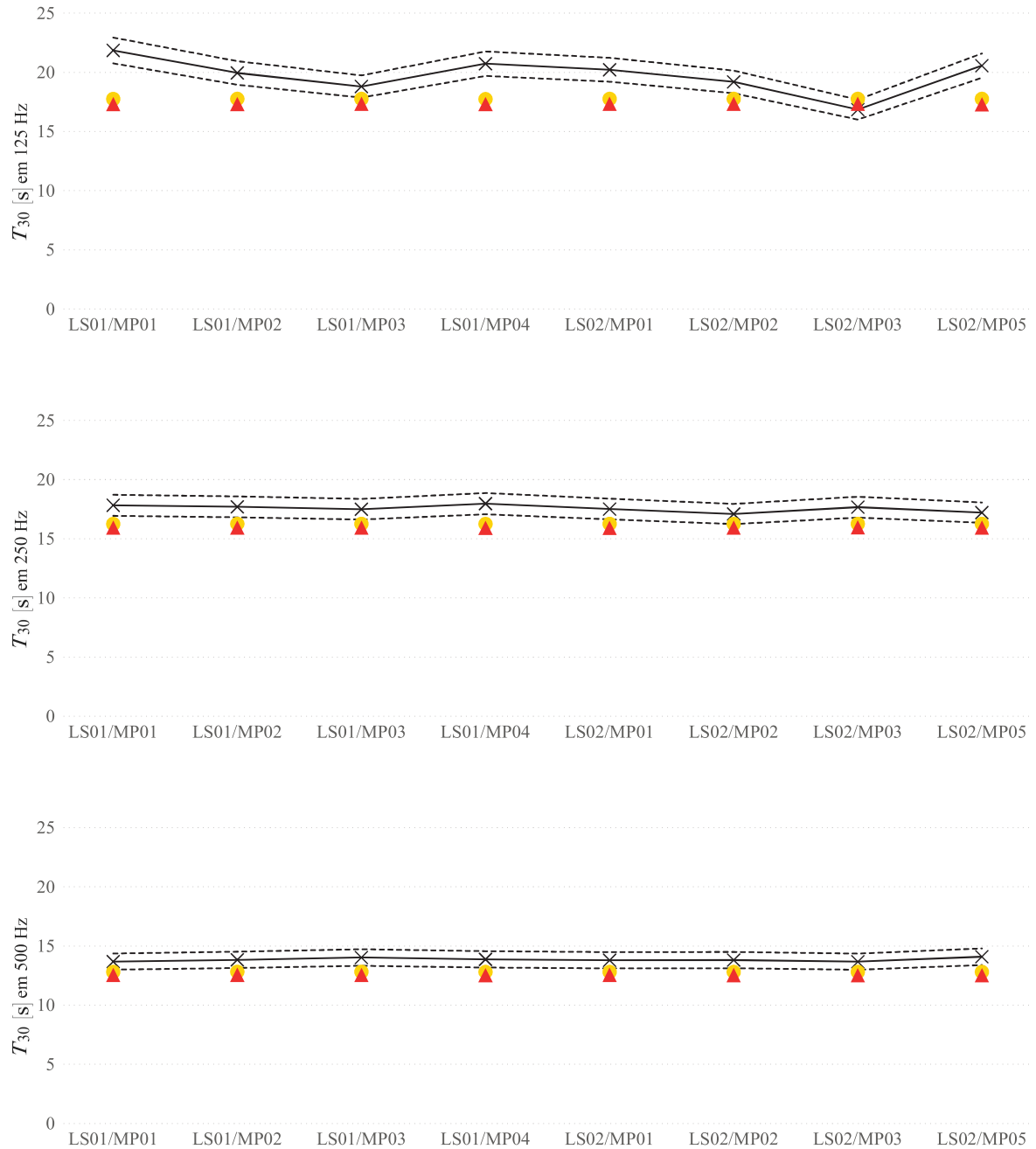
Dados simulados e medidos, em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz, para o D_{50} .
 Legenda: Medição (×), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲).

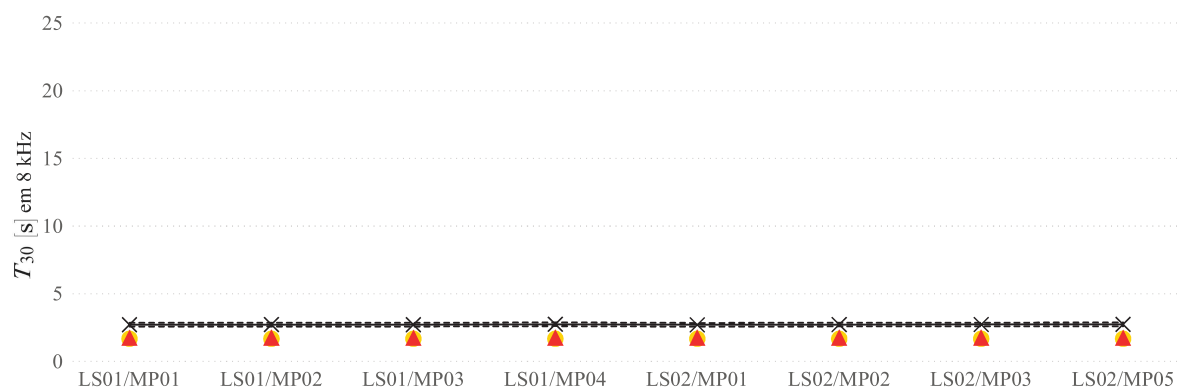
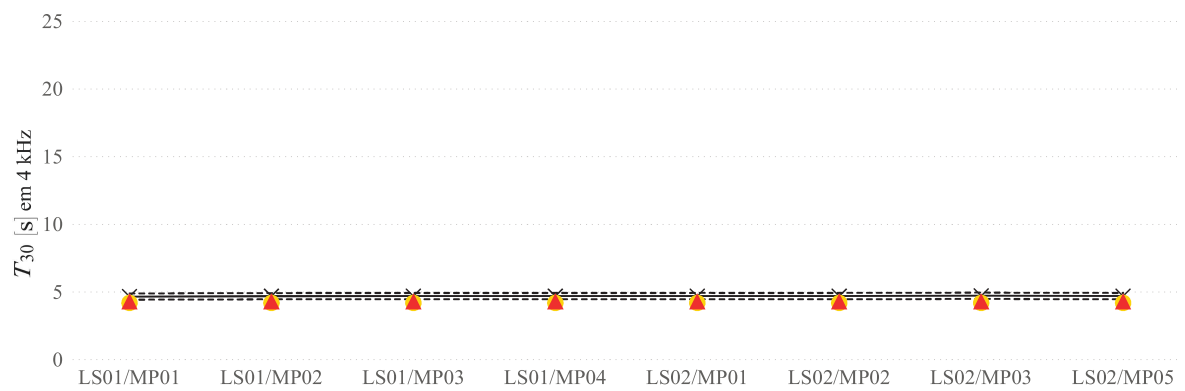
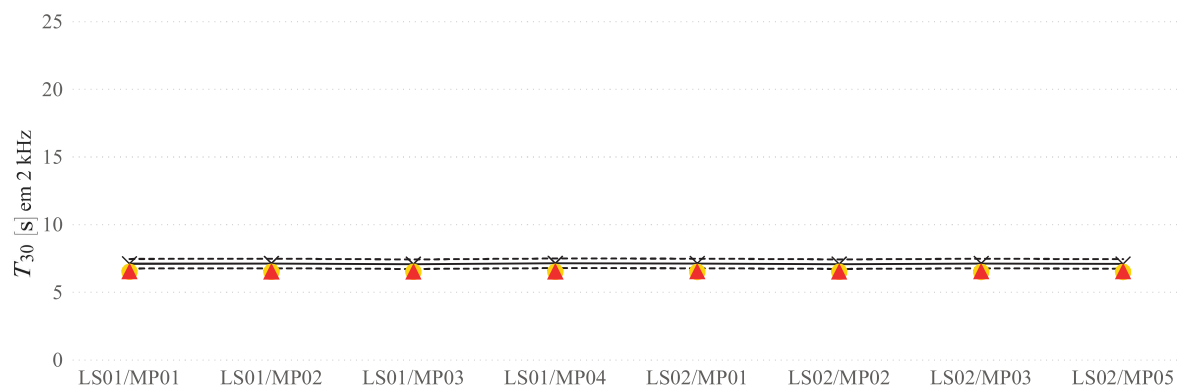
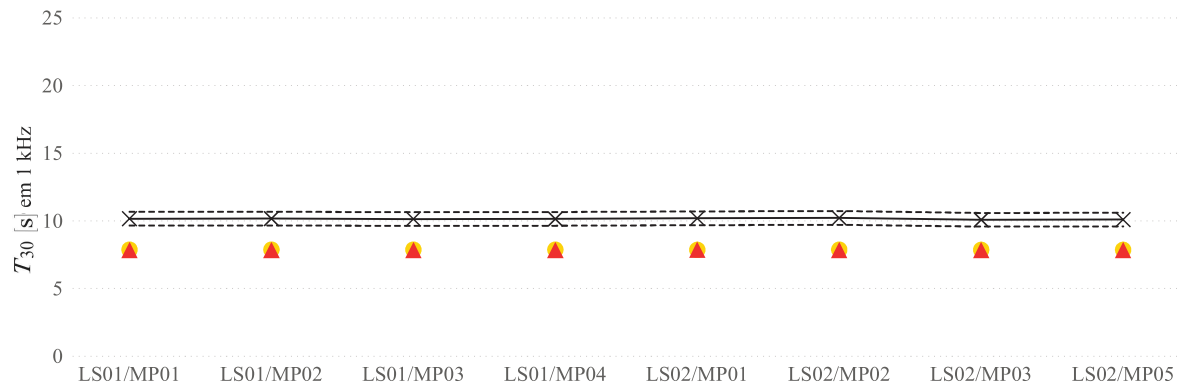


B.1.2 Parâmetros por frequência

Resultados referentes ao T_{30} , por frequência, em função das posições na sala.

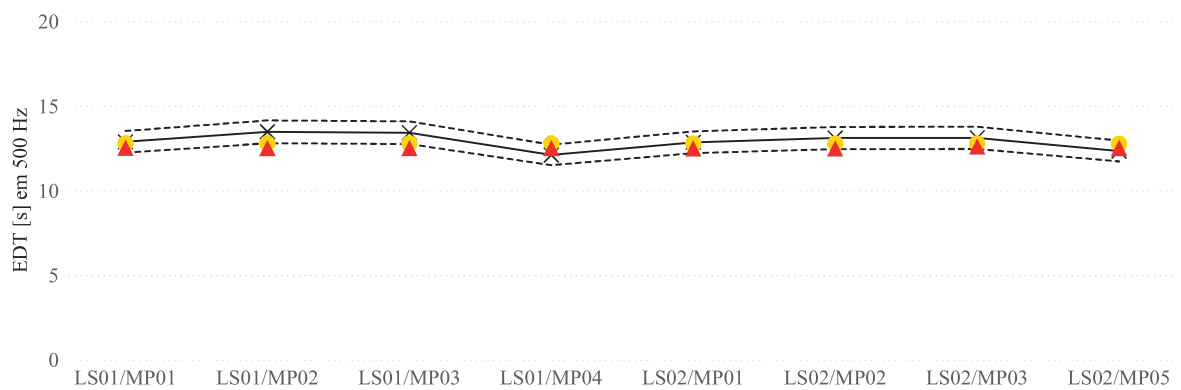
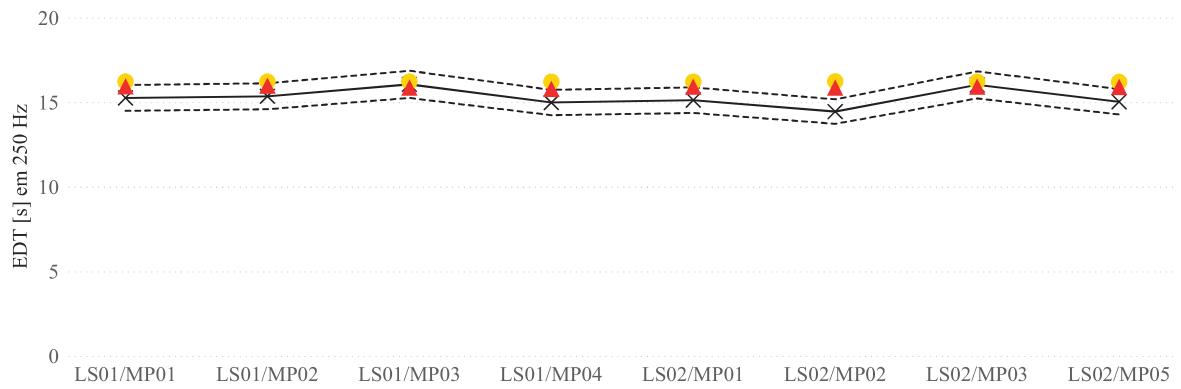
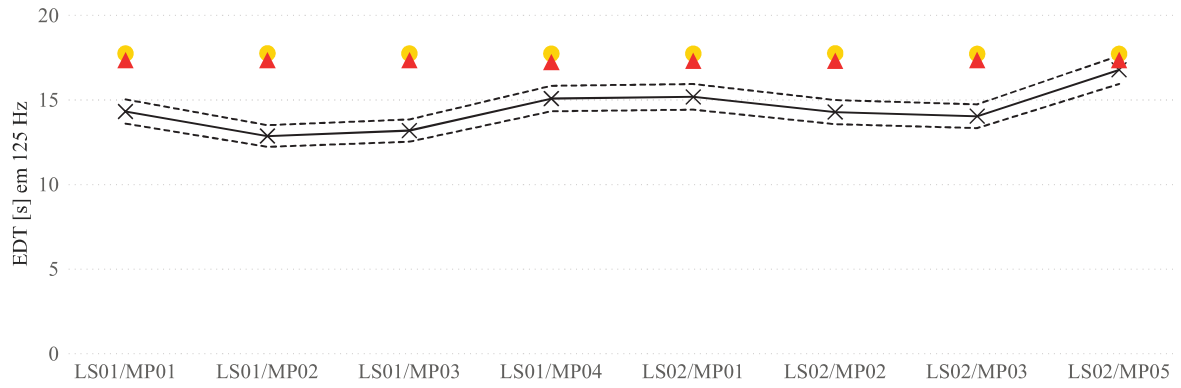
Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).

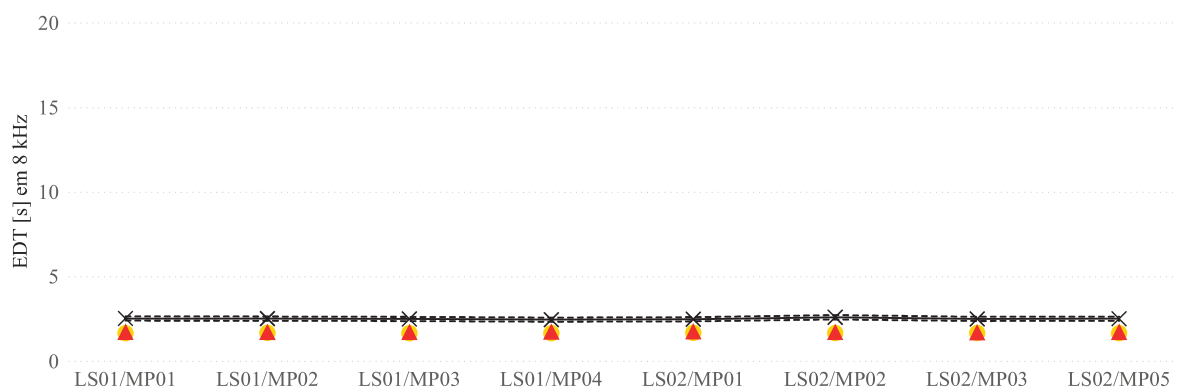
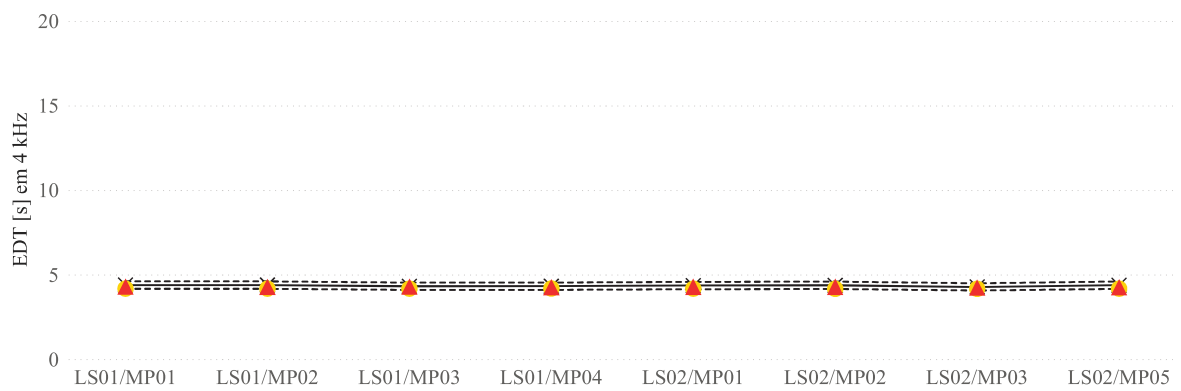
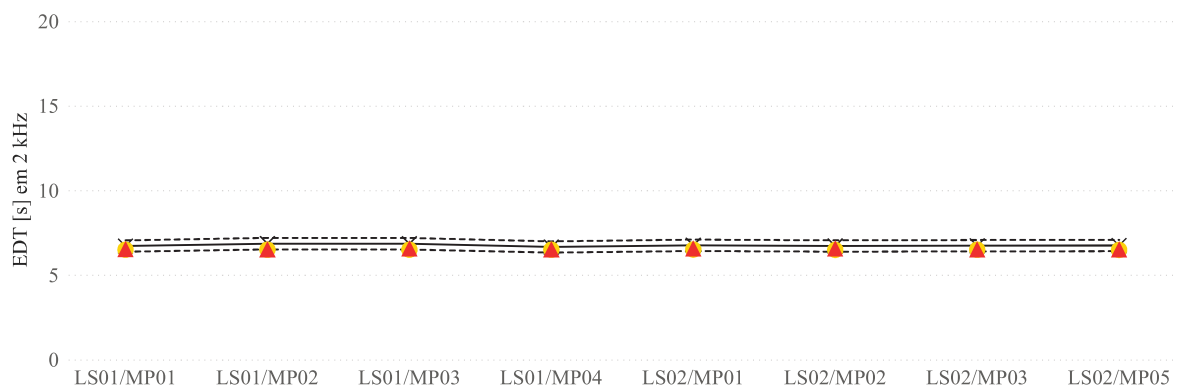
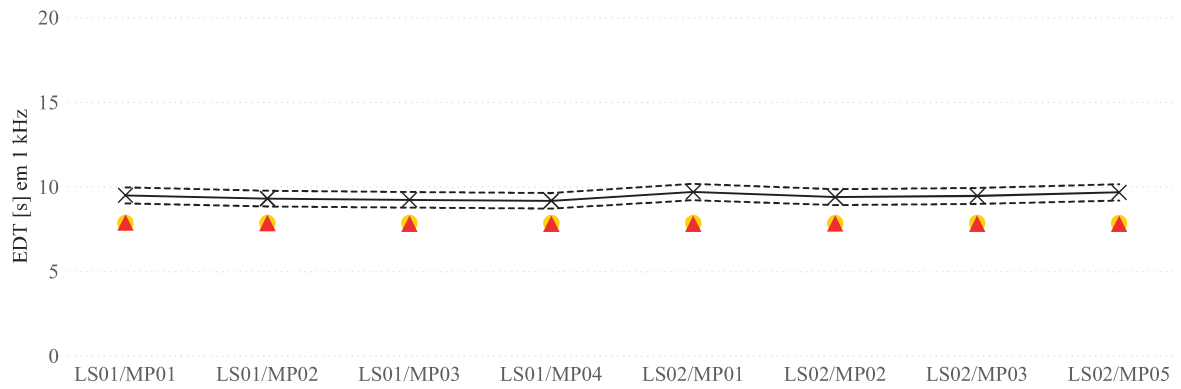




Resultados referentes ao EDT, por frequência, em função das posições na sala.

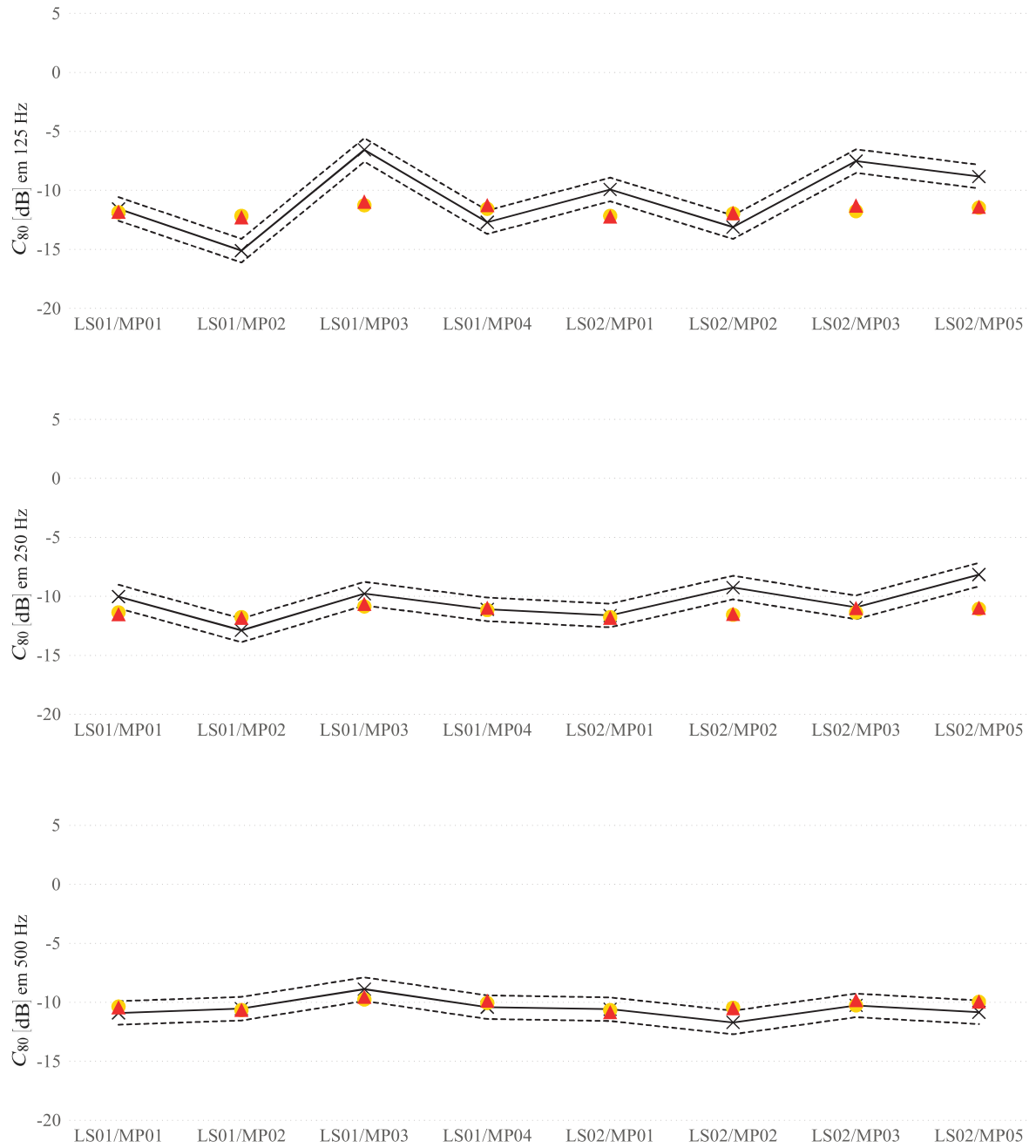
Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).

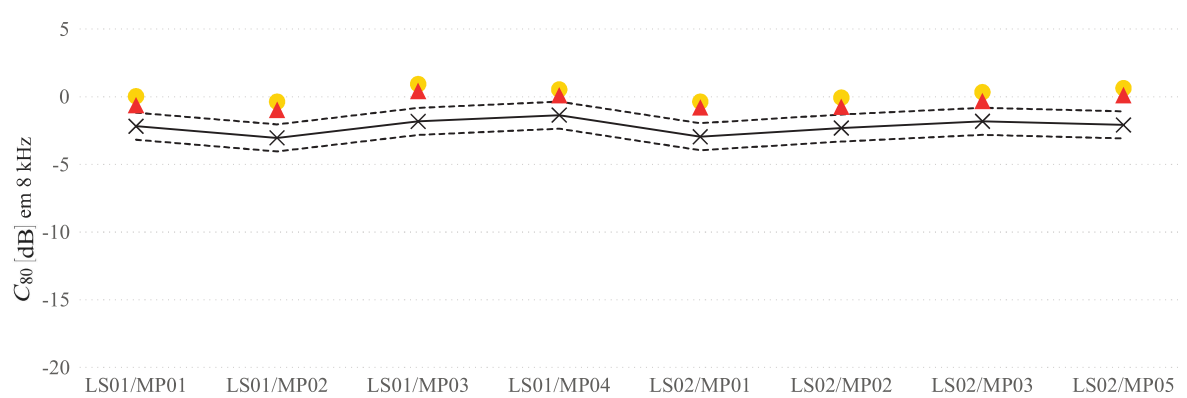
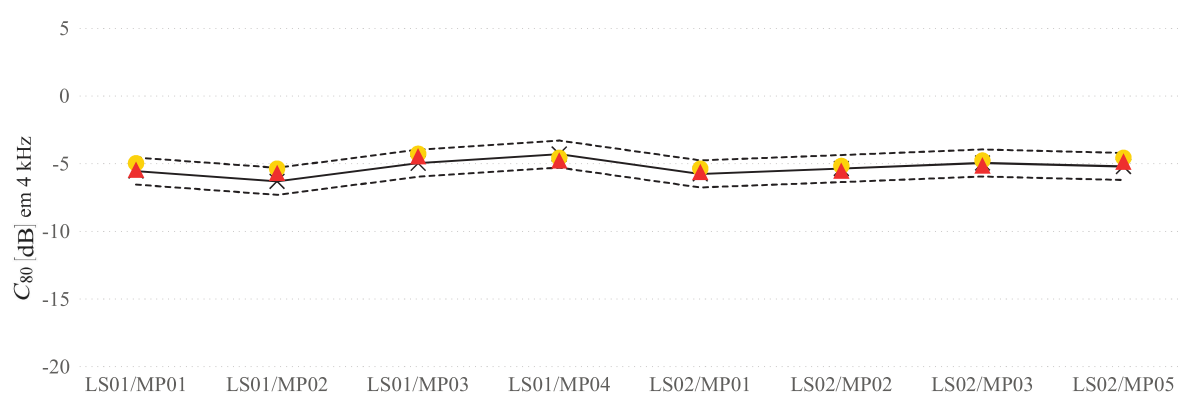
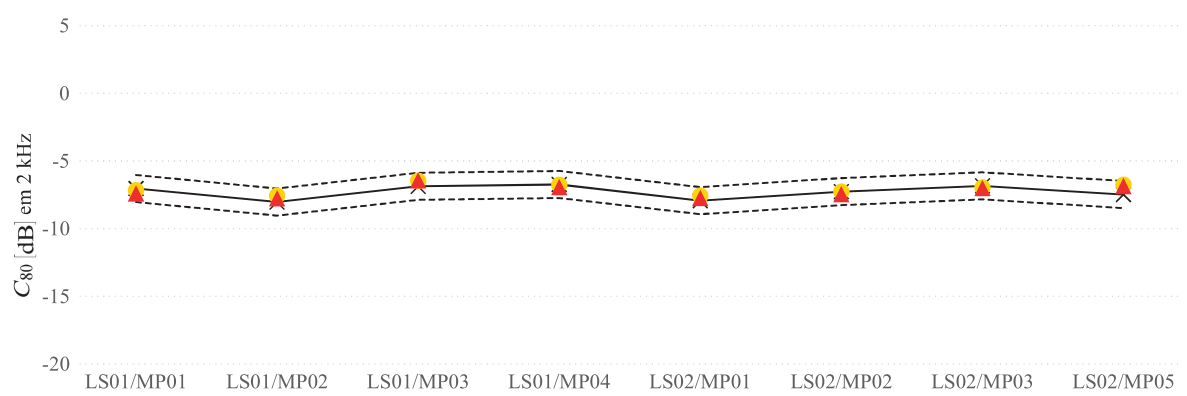
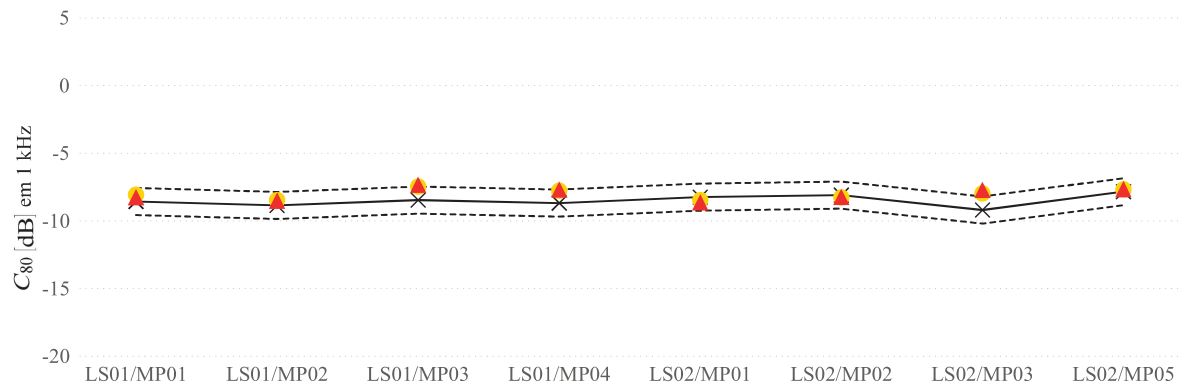




Resultados referentes ao C_{80} , por frequência, em função das posições na sala.

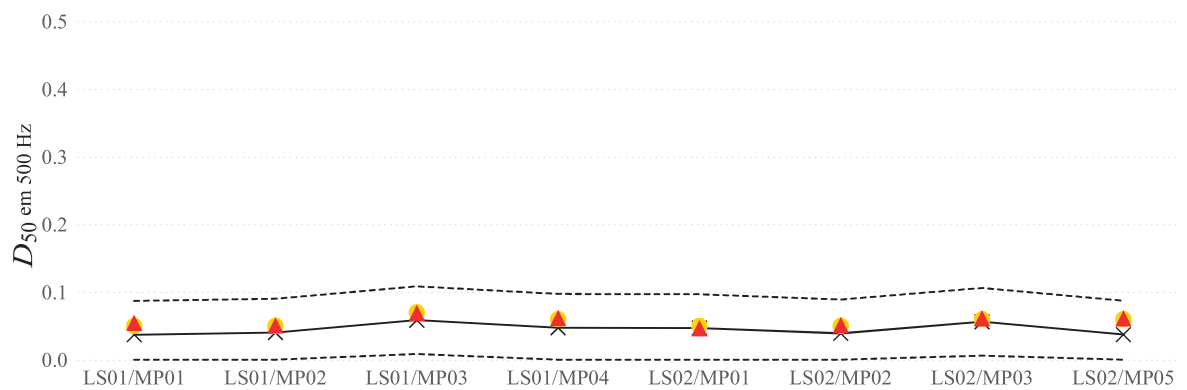
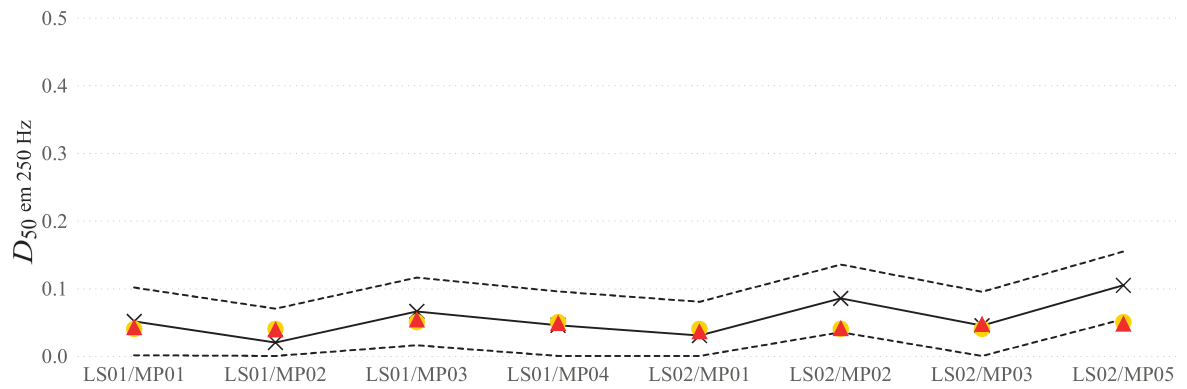
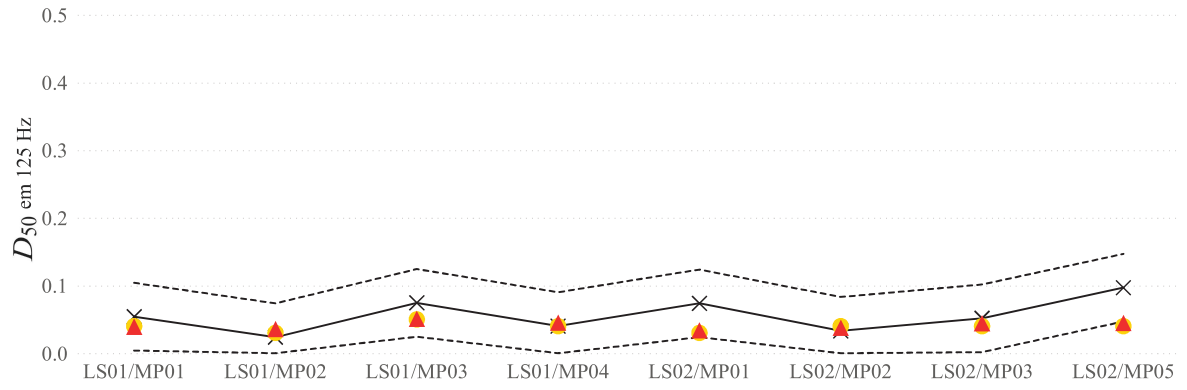
Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).

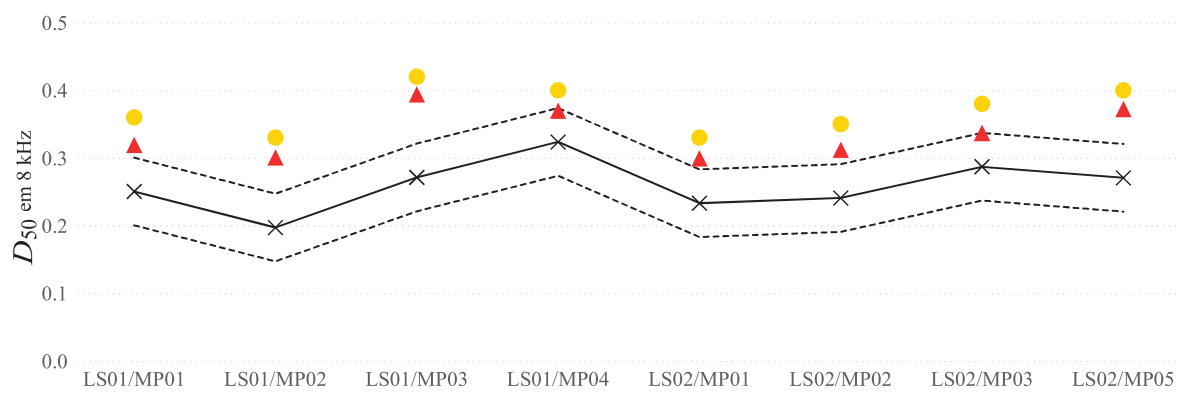
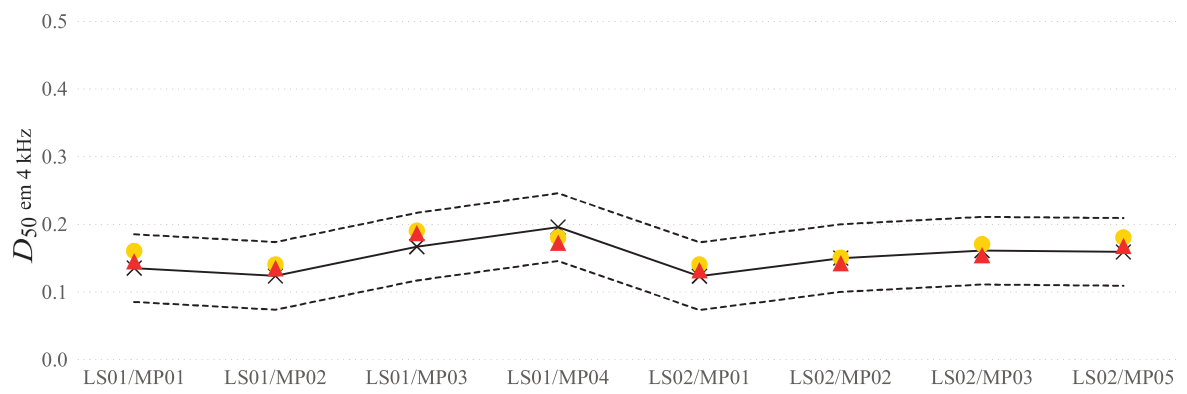
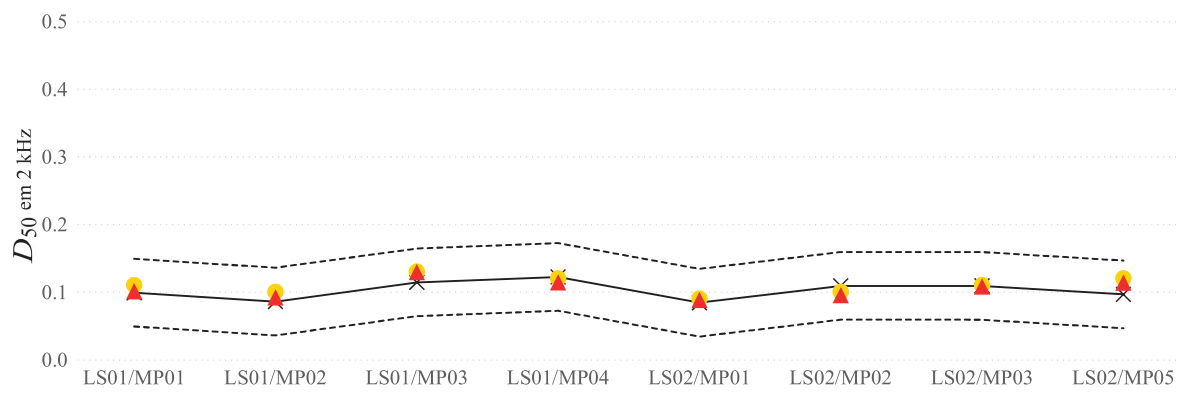
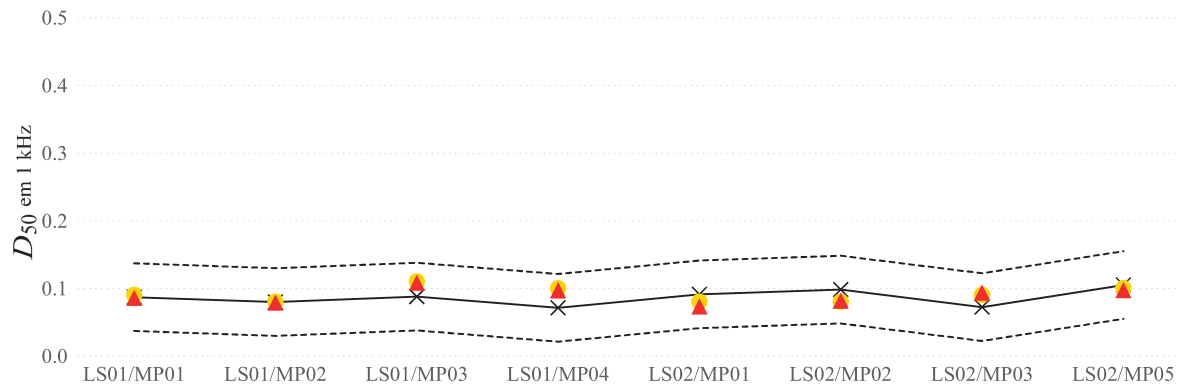




Resultados referentes ao D_{50} , por frequência, em função das posições na sala.

Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).



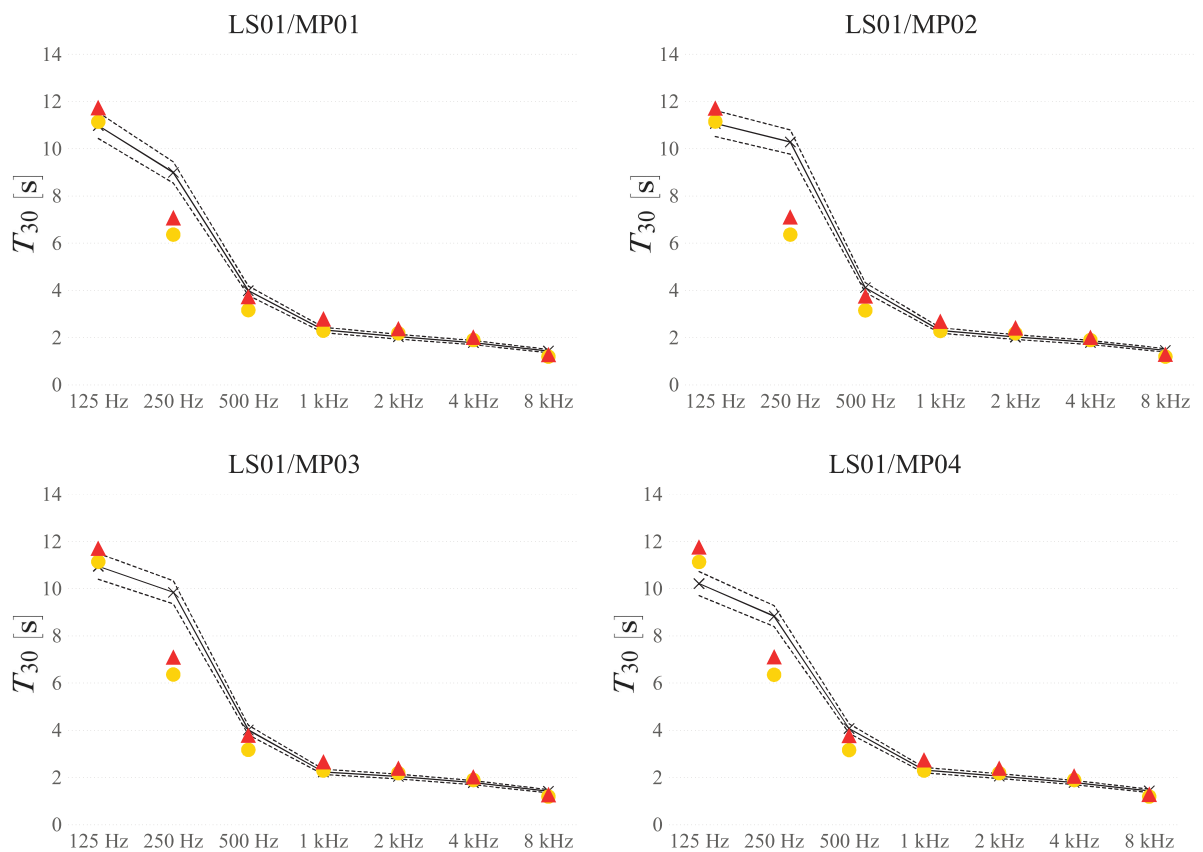


B.2 SALA COM AMOSTRA

B.2.1 Parâmetros por posição

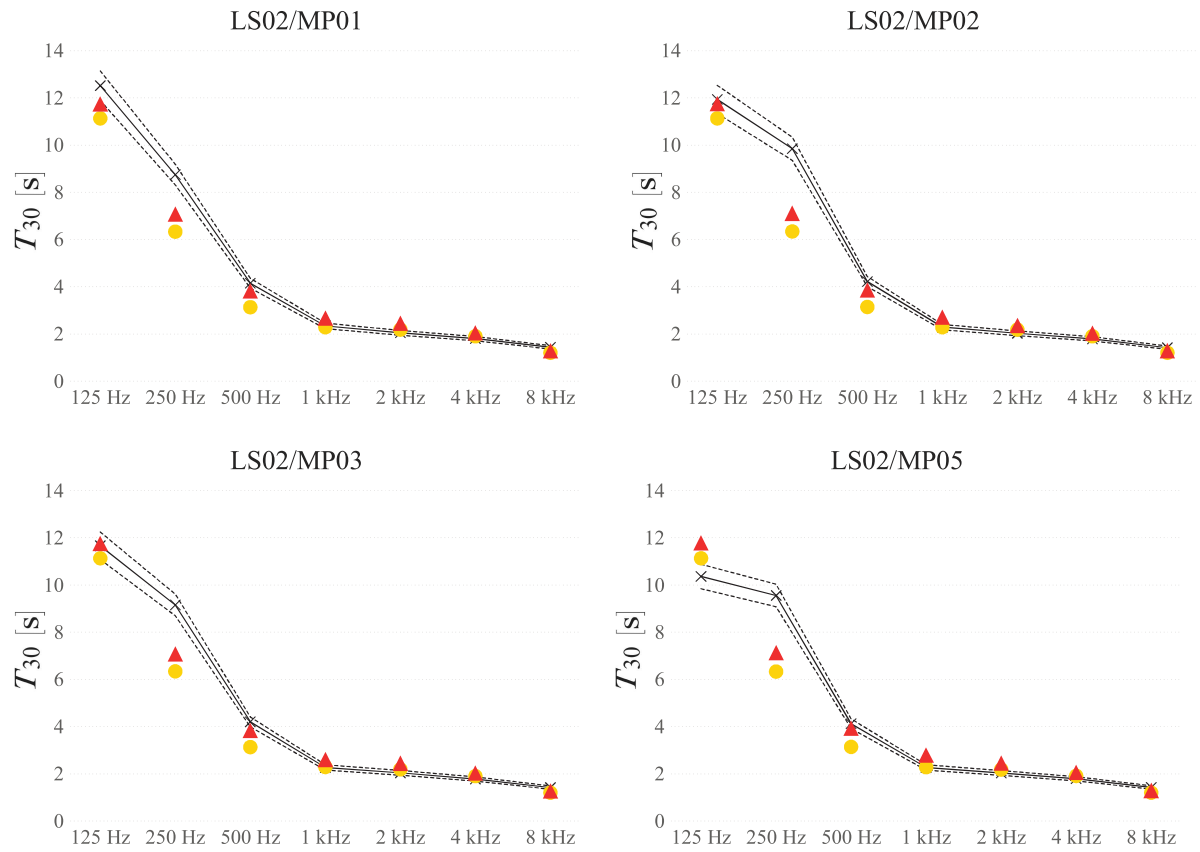
T_{30} , no ponto de fonte LS01, e pontos de recepção do MP01 ao MP04. Dados simulados e medidos em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz.

Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).



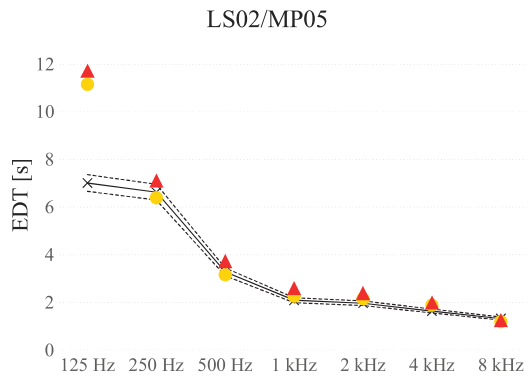
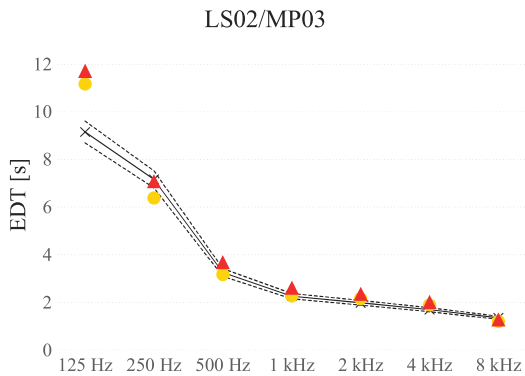
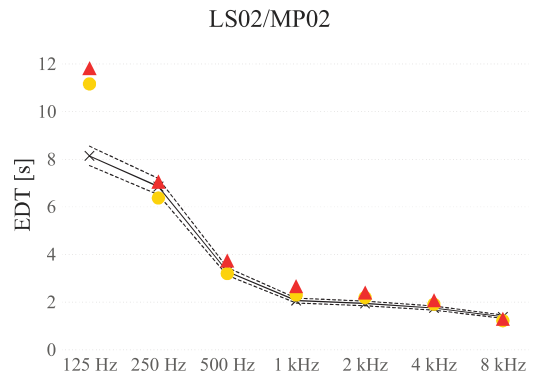
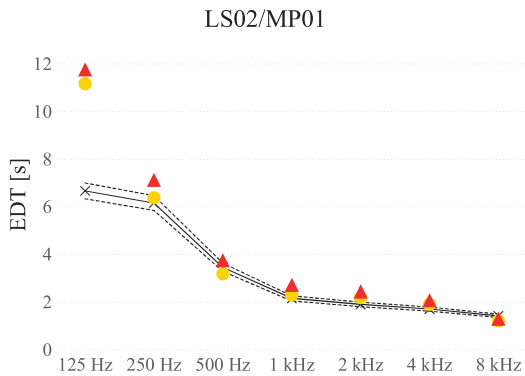
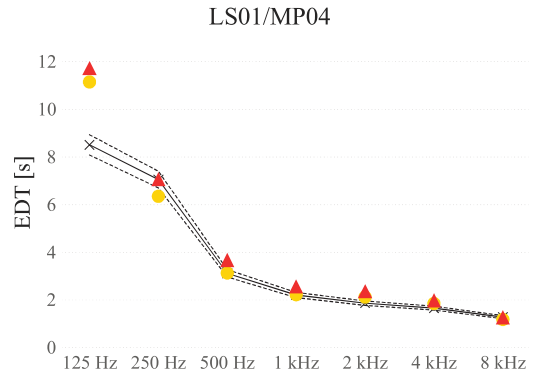
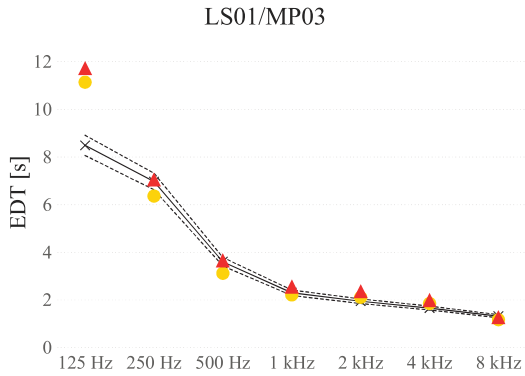
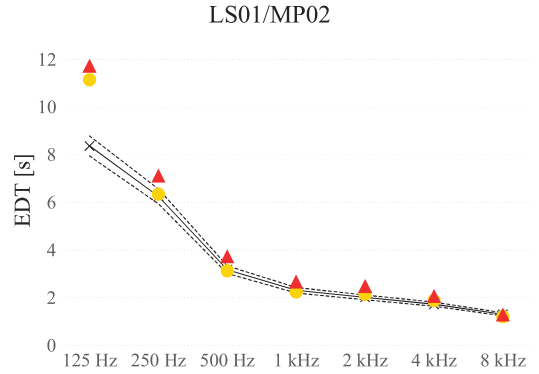
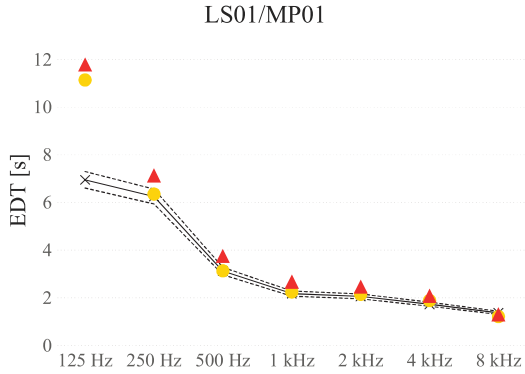
T_{30} , no ponto de fonte LS02, e pontos de recepção do MP01 ao MP05. Dados simulados e medidos em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz.

Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).

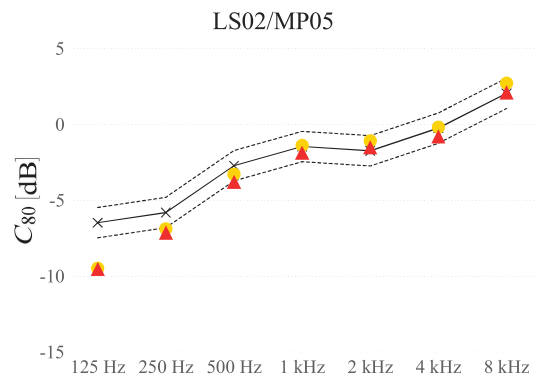
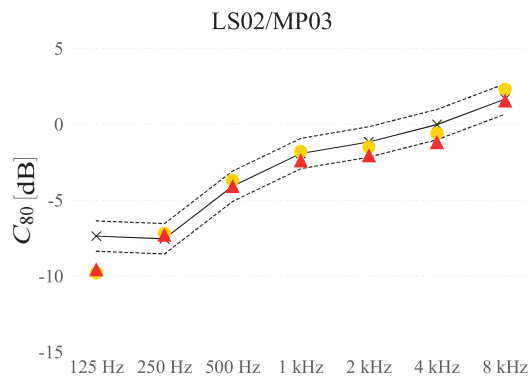
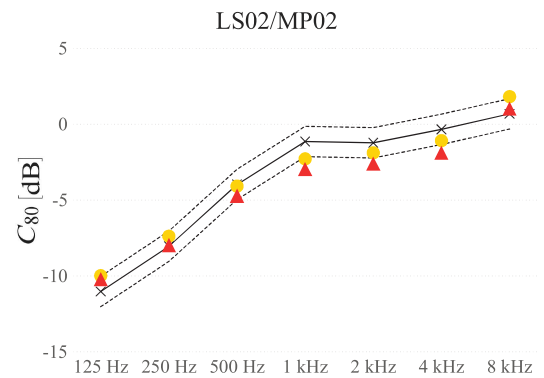
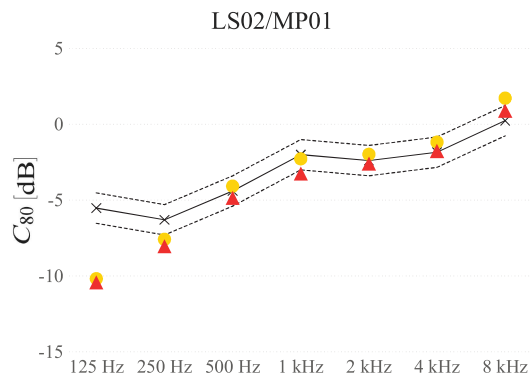
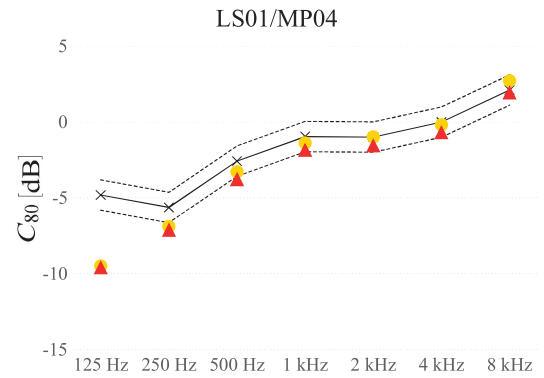
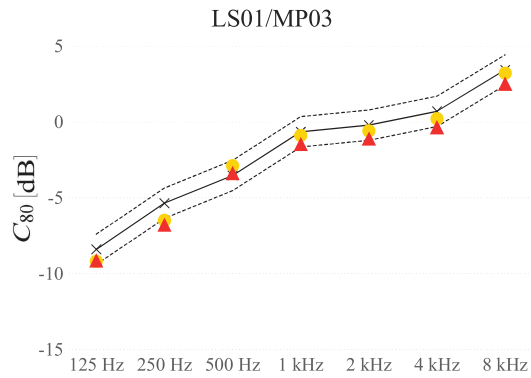
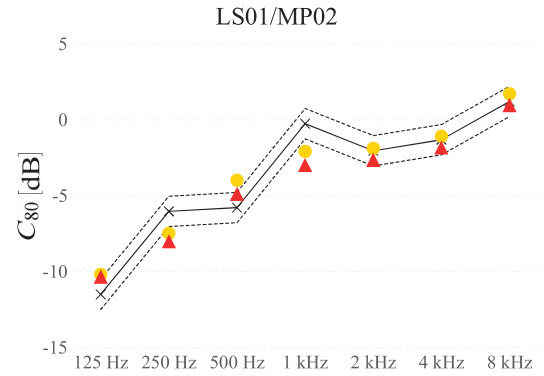
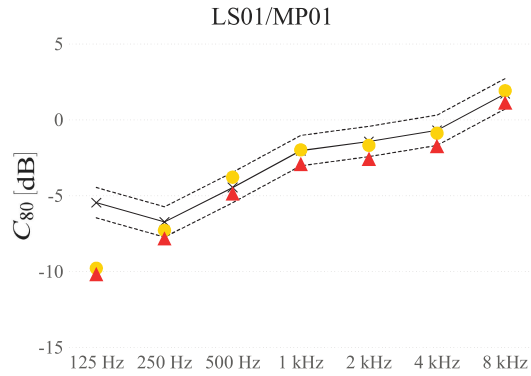


Dados simulados e medidos, em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz, para o EDT.

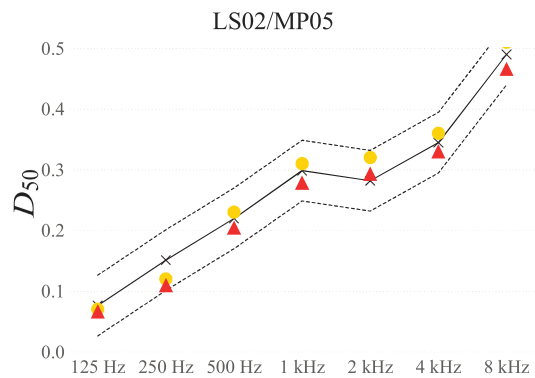
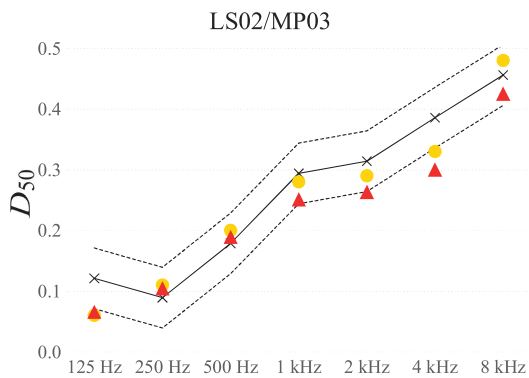
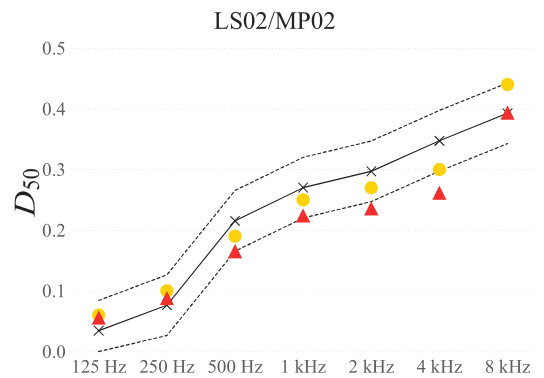
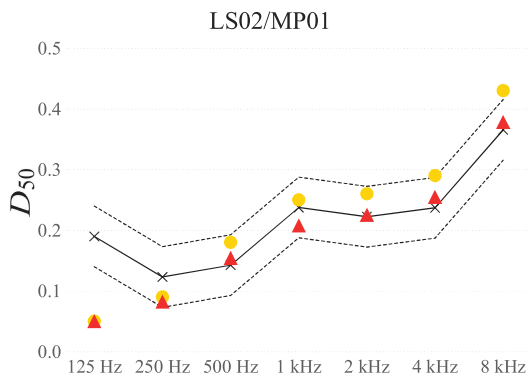
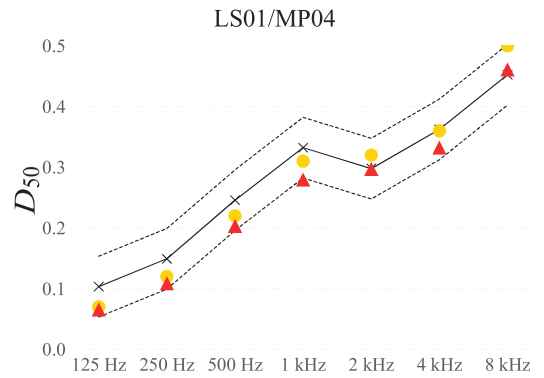
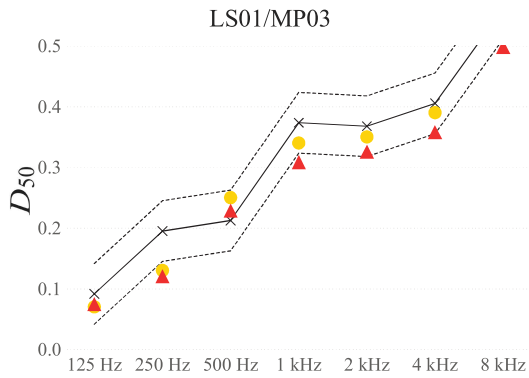
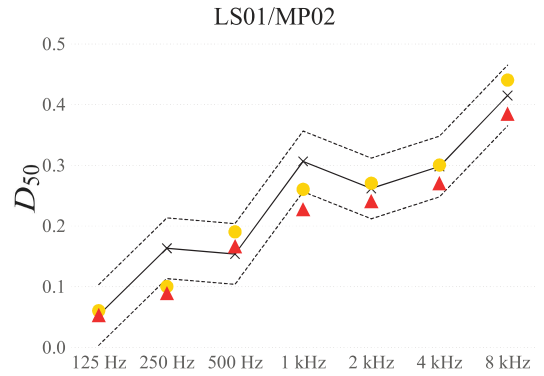
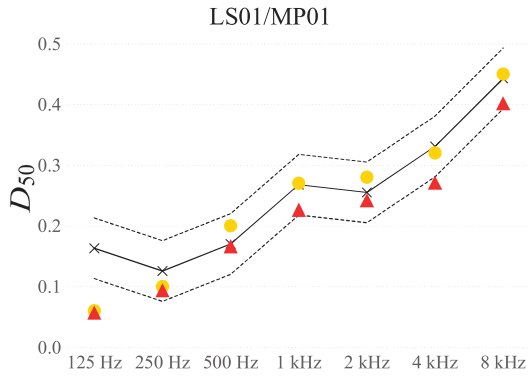
Legenda: Medição (✕), ±JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲).



Dados simulados e medidos, em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz, para o C_{80} .
 Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).



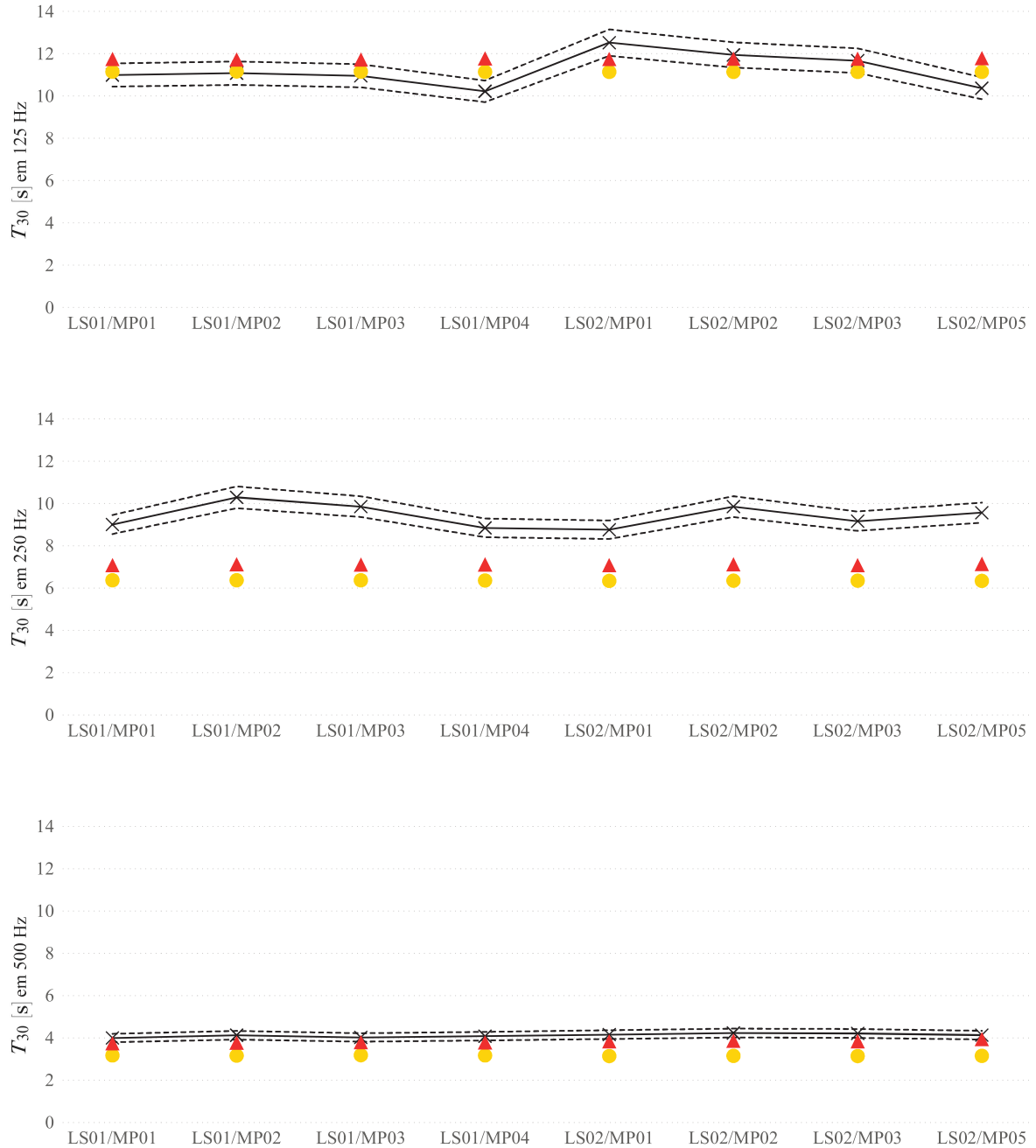
Dados simulados e medidos, em função das frequências de 125 Hz a 8 kHz, para o D_{50} .
 Legenda: Medição (x), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲).

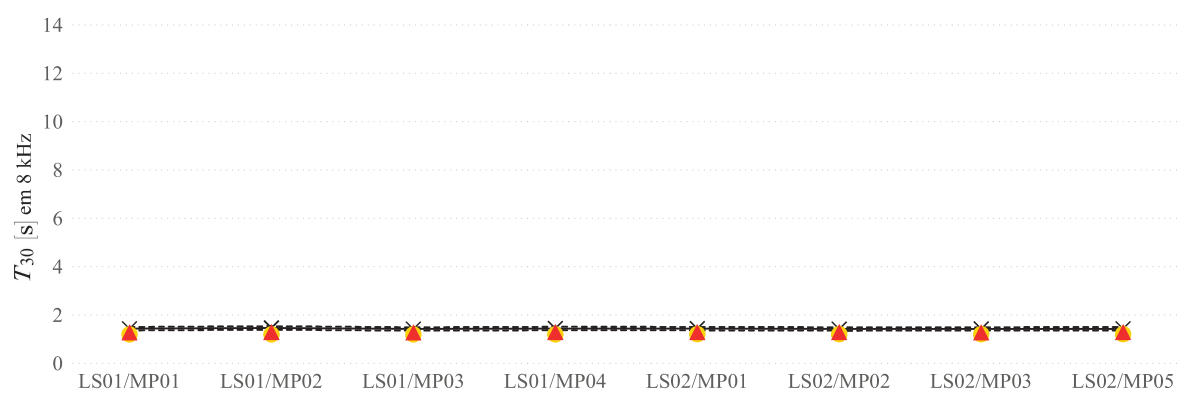
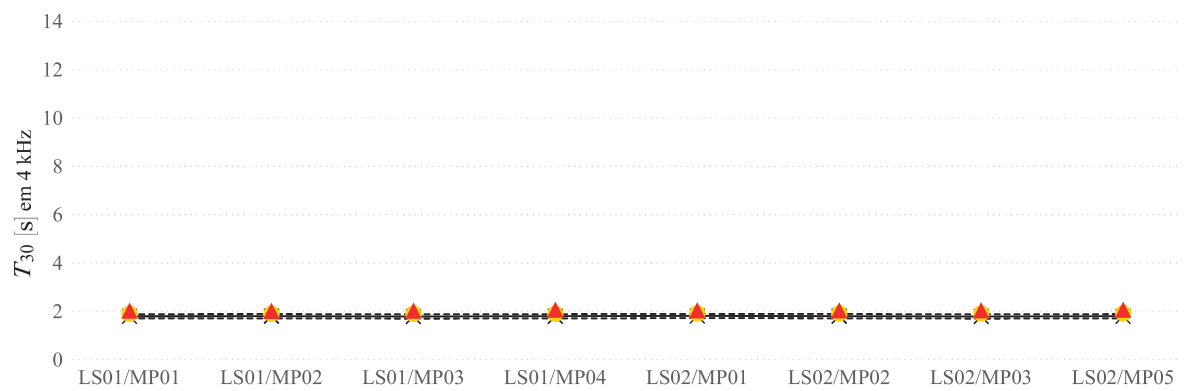
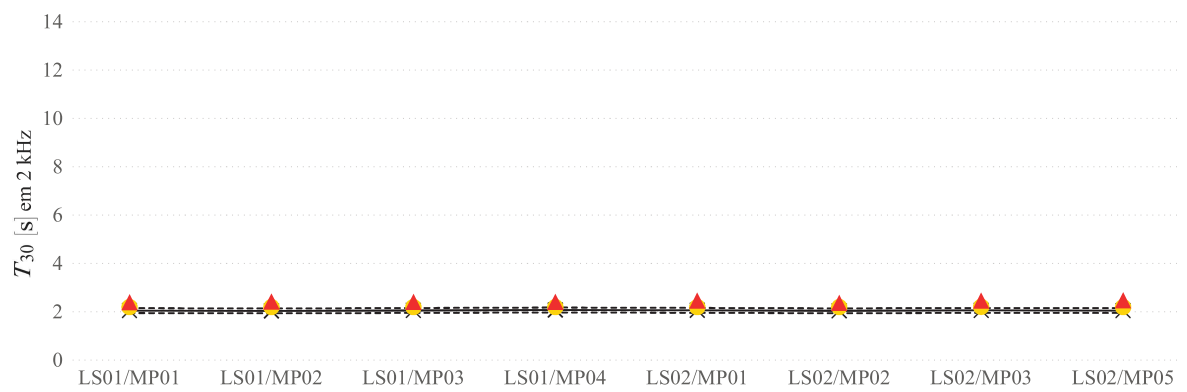
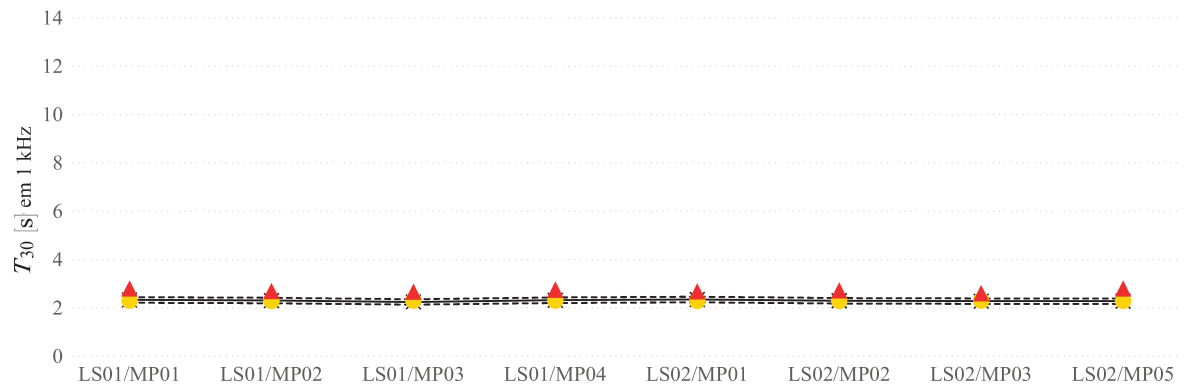


B.2.2 Parâmetros por frequência

Resultados referentes ao T_{30} , por frequência, em função das posições na sala.

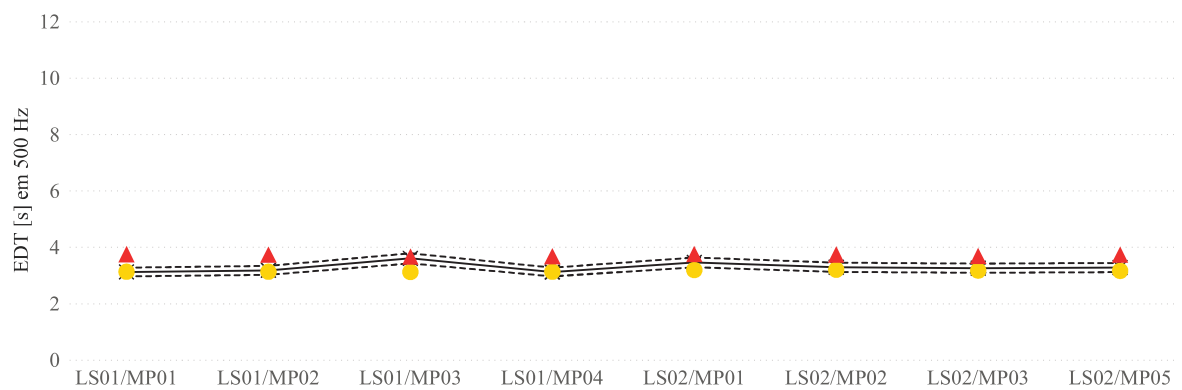
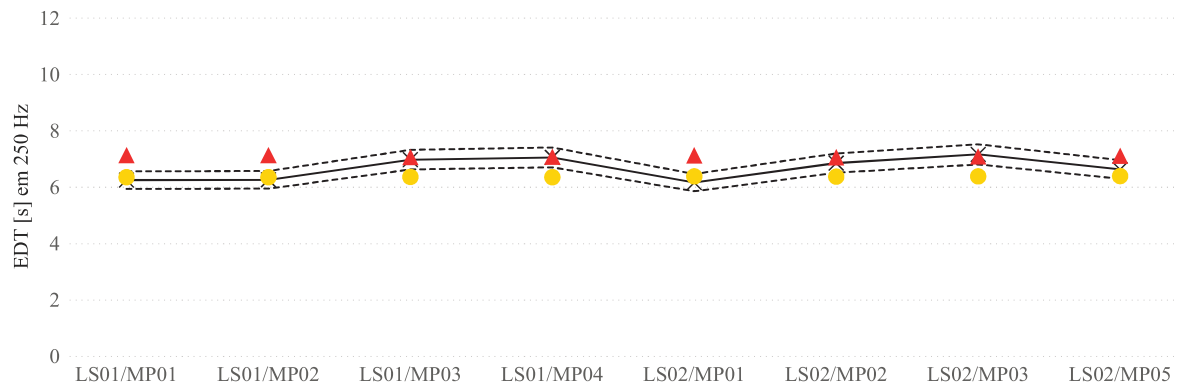
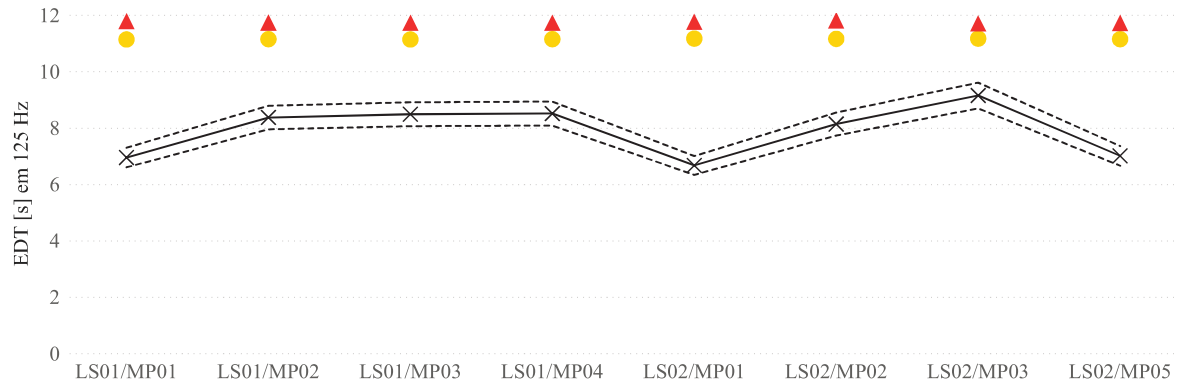
Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).

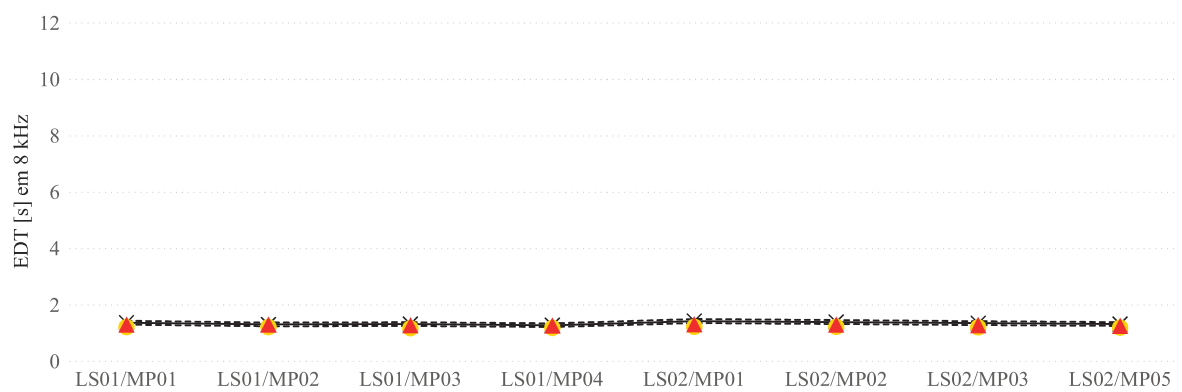
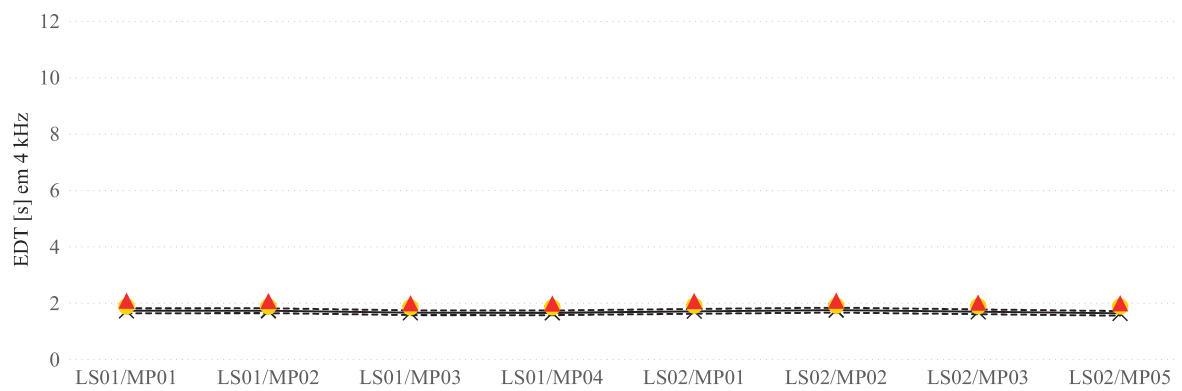
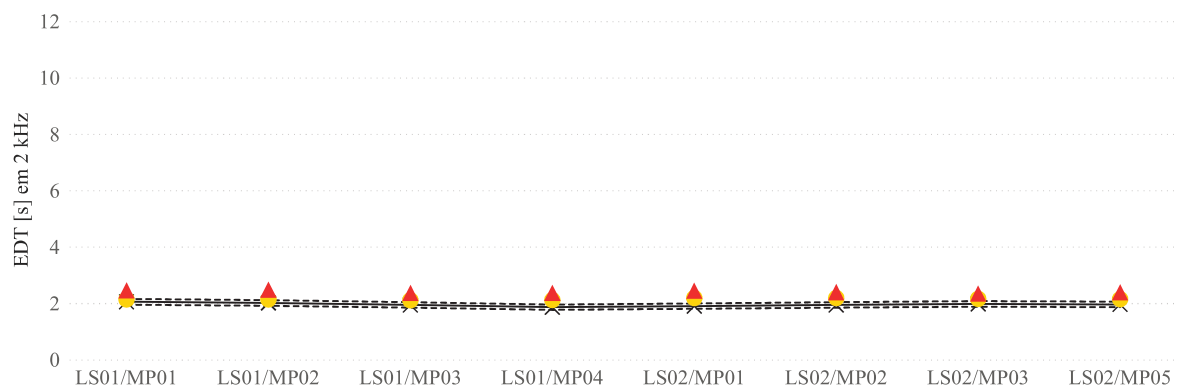
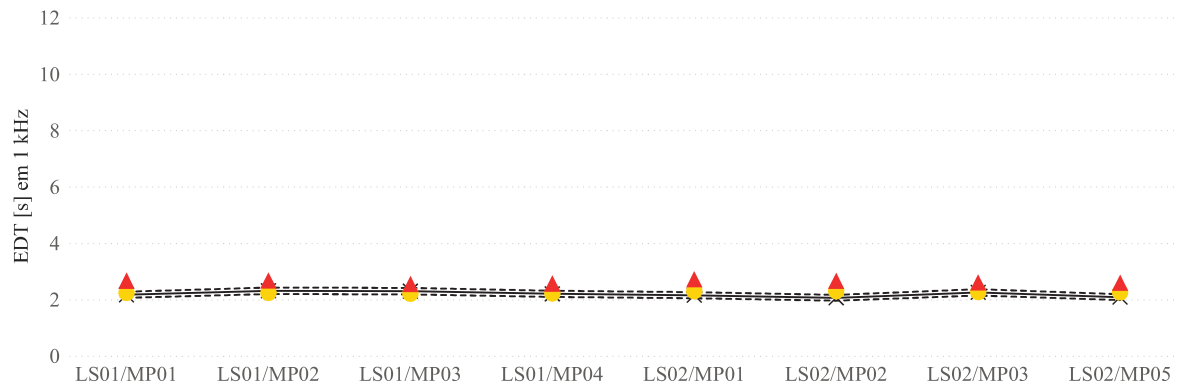




Resultados referentes ao EDT, por frequência, em função das posições na sala.

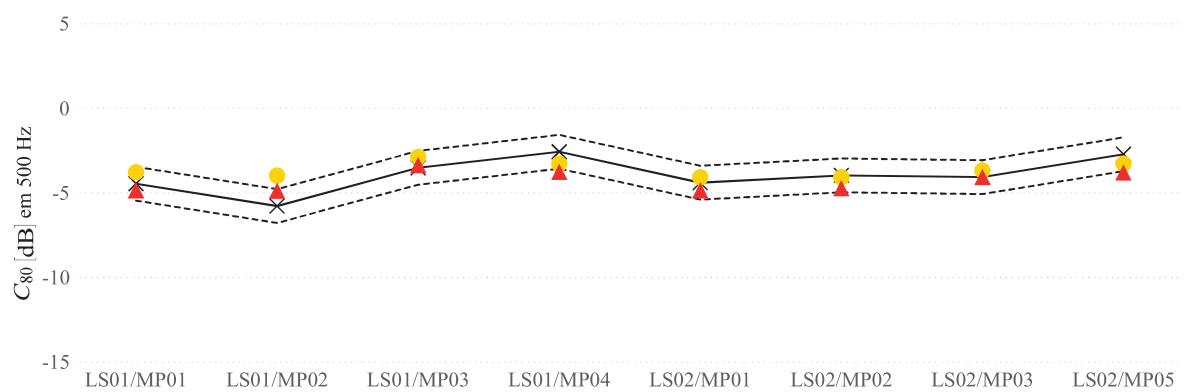
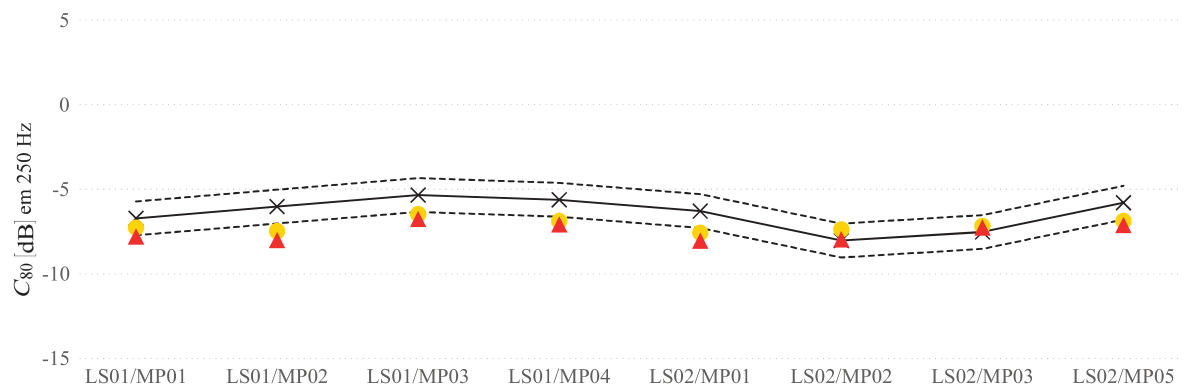
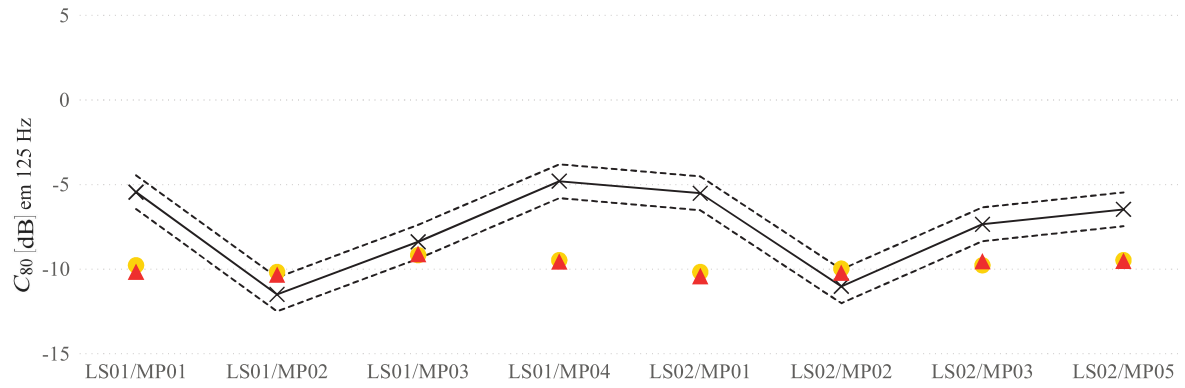
Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).

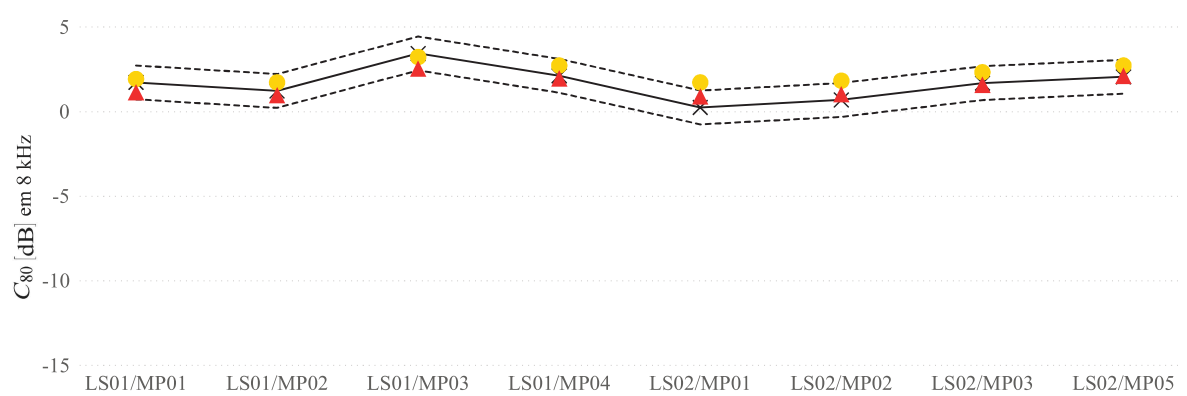
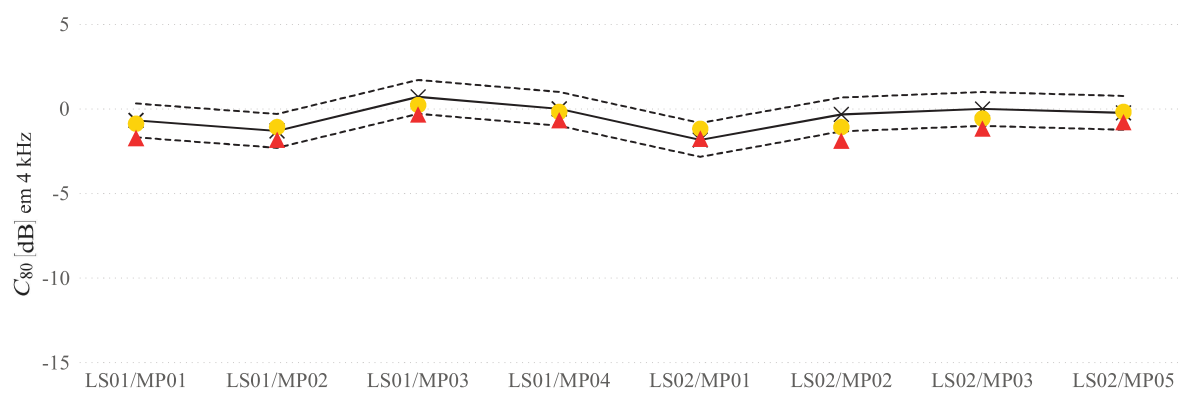
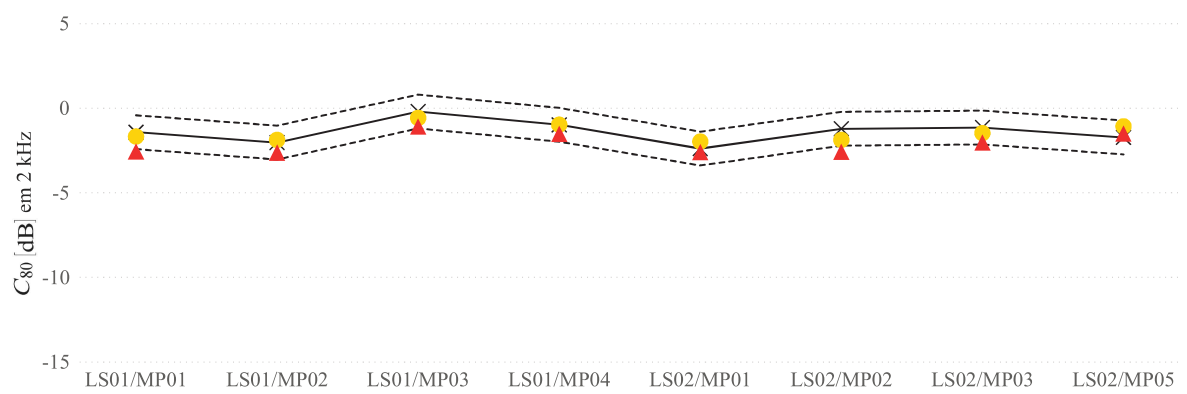
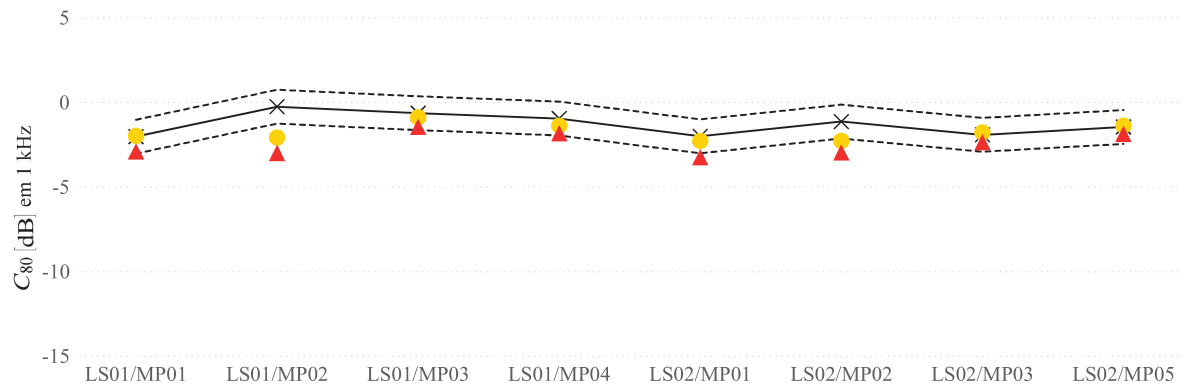




Resultados referentes ao C_{80} , por frequência, em função das posições na sala.

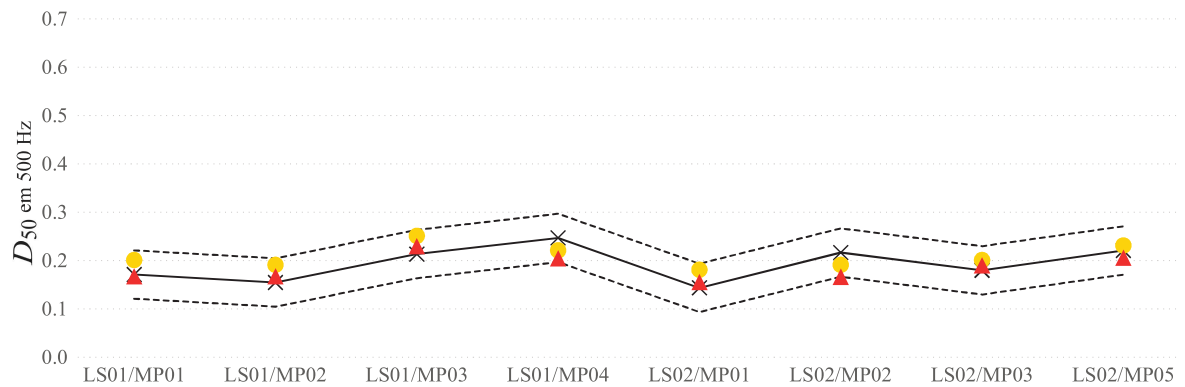
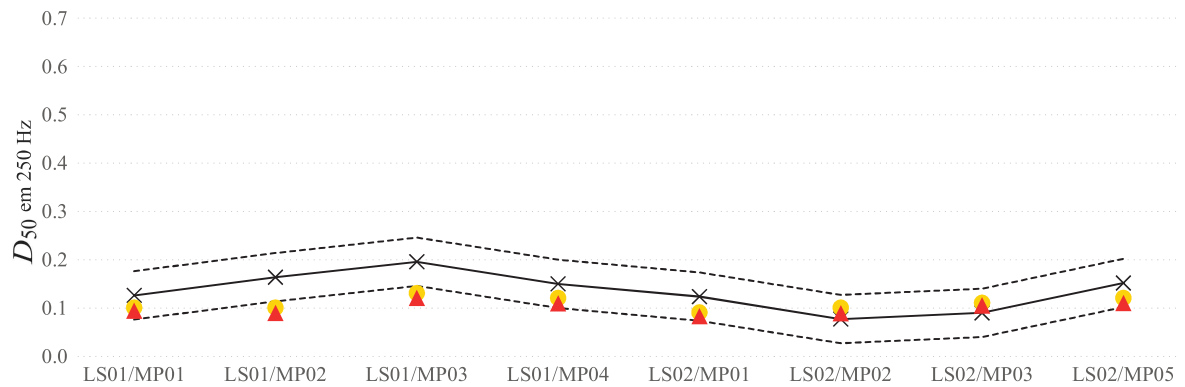
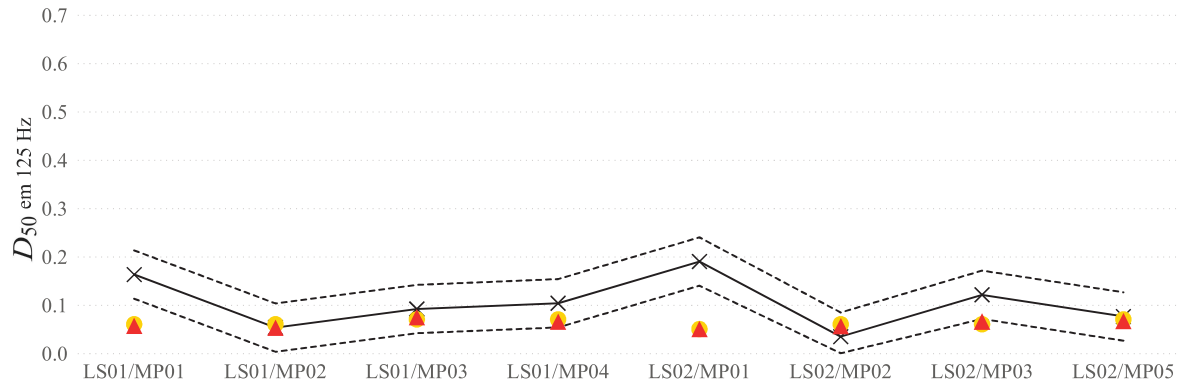
Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).

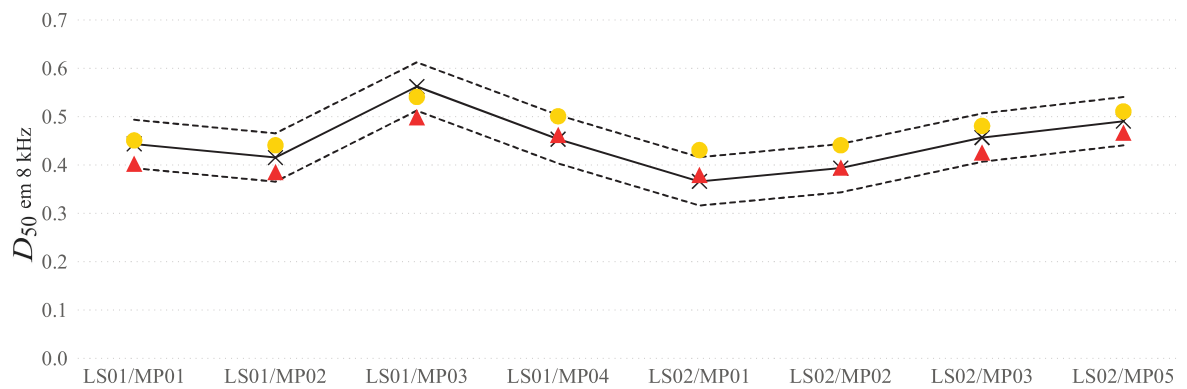
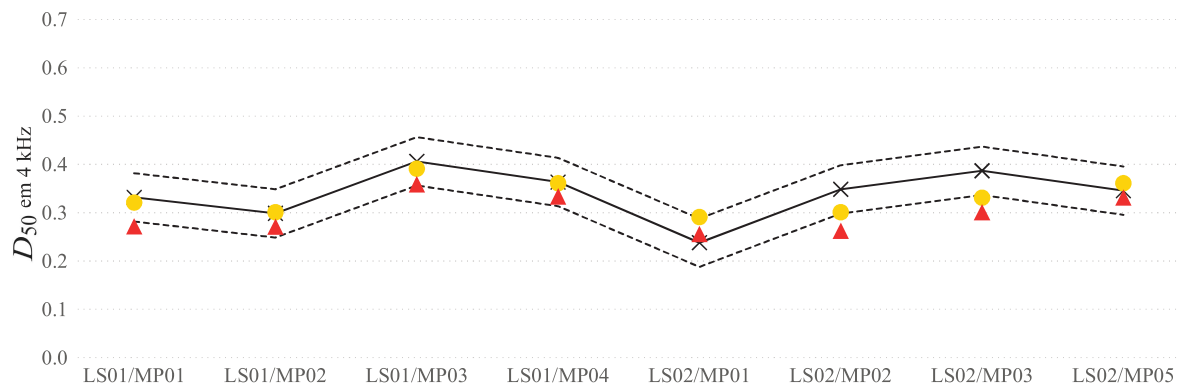
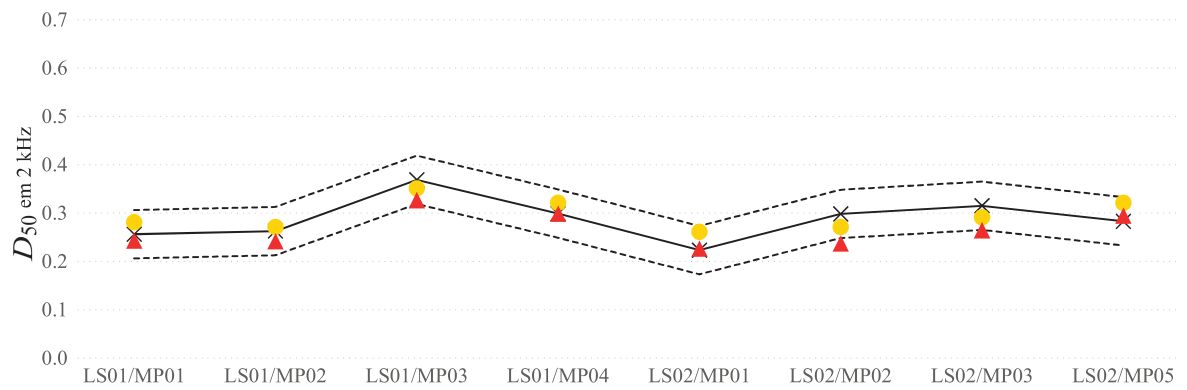
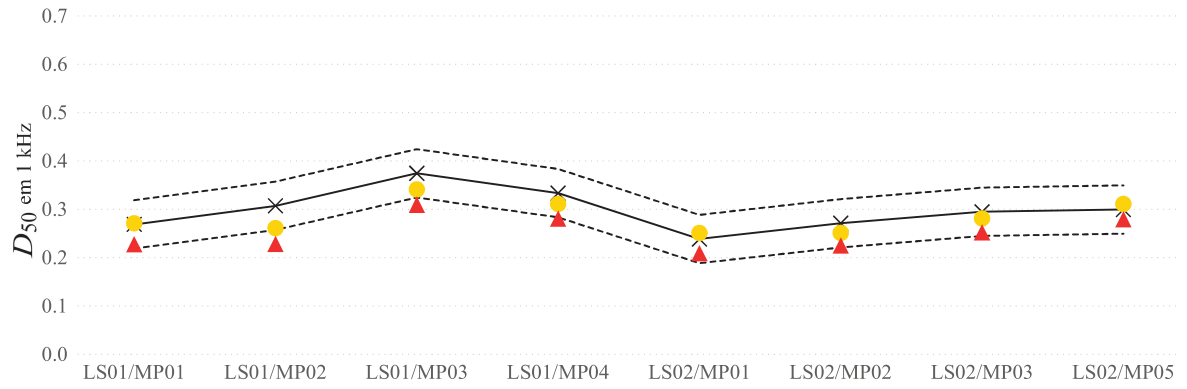




Resultados referentes ao D_{50} , por frequência, em função das posições na sala.

Legenda: Medição (\times), \pm JND (---), Odeon (\bullet), RAVEN (\blacktriangle).





ANEXOS

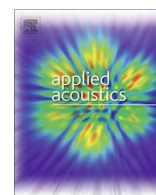
ANEXO A – On the performance investigation of distinct algorithms for room acoustics simulation

O artigo em anexo, submetido à revista Applied Acoustics, abrange parte dos resultados desta dissertação, onde os dados encontrados na Sala 10 do *Round Robin 4*, para o Odeon (versão 11.23), RAIOS 7 e RAVEN, foram observados frente aos dados de medição.

Applied Acoustics

On the performance investigation of distinct algorithms for room acoustics simulation --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	APAC-D-21-00362R2
Article Type:	Research Paper
Section/Category:	Europe and Rest of the World
Keywords:	Room acoustics simulation; Software performance comparison, RAIOS; Round robin; Geometrical acoustics.
Corresponding Author:	Roberto Tenenbaum Federal University of Santa Maria Santa Maria, Rio Grande do Sul Brazil
First Author:	Eric Brandão
Order of Authors:	Eric Brandão Edna Sofia Santos Viviane Melo Roberto Tenenbaum Paulo Mareze
Abstract:	The purpose of this research is to investigate the accuracy provided by different algorithms for room acoustics simulation. Three software packages are used to simulate the monaural room impulse responses of a medium-sized concert hall. All algorithms deal with geometrical acoustics but with distinct implementations. The simulated room is one of those adopted as a benchmark for the first round robin on room acoustical simulation and auralization, the last international inter-comparison, for which the geometrical and acoustic data were carefully measured. The main novelty is the inclusion of the software RAIOS, which participated in the round robin but did not finish the simulations in time to be included in the publication. Four acoustical parameters, namely the reverberation time, the early decay time, the clarity factor for music, and the definition for speech, are computed for ten source-receiver pairs at octave band frequencies from 125 Hz to 8 kHz. The results obtained by the three software are then compared with the measured data for all source-receiver positions and frequency bands. The relative mean errors to the just noticeable difference (JND) are also computed. The main findings are that there are deviations relative to the measured results for all software, with some of the parameters being better evaluated than others are. Preliminary insights into the advantages and limitations of the software packages with respect to the monaural impulse response are also given.
Suggested Reviewers:	Michael Vorländer post@akustik.rwth-aachen.de great specialist in room acoustics and simulation Jose Roberto Arruda arruda@fem.unicamp.br Is a senior researcher in the area of acoustics José Francisco Naranjo jose.lucio@epn.edu.ec Is a specialist in room acoustics simulation
Opposed Reviewers:	
Response to Reviewers:	All responses to reviewer and Editor are included in the Rebuttal Letter



On the performance investigation of distinct algorithms for room acoustics simulation



Eric Brandão^a, Edna S.O. Santos^a, Viviane S.G. Melo^a, Roberto A. Tenenbaum^{a,*}, Paulo H. Marezé^a

^a Federal University of Santa Maria, Av. Roraima, 1000, Santa Maria 97105-900, RS, Brazil

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 March 2021

Received in revised form 15 October 2021

Accepted 18 October 2021

Keywords:

Room acoustics simulation

Software performance comparison

RAIOS

Round robin

Geometrical acoustics

ABSTRACT

The purpose of this research is to investigate the accuracy provided by different algorithms for room acoustics simulation. Three software packages are used to simulate the monaural room impulse responses of a medium-sized concert hall. All algorithms deal with geometrical acoustics but with distinct implementations. The simulated room is one of those adopted as a benchmark for the first round robin on room acoustical simulation and auralization, the last international inter-comparison, for which the geometrical and acoustic data were carefully measured. The main novelty is the inclusion of the software RAIOS, which participated in the round robin but did not finish the simulations in time to be included in the publication. Four acoustical parameters, namely the reverberation time, the early decay time, the clarity factor for music, and the definition for speech, are computed for ten source-receiver pairs at octave band frequencies from 125 Hz to 8 kHz. The results obtained by the three software are then compared with the measured data for all source-receiver positions and frequency bands. The relative mean errors to the just noticeable difference (JND) are also computed. The main findings are that there are deviations relative to the measured results for all software, with some of the parameters being better evaluated than others are. Preliminary insights into the advantages and limitations of the software packages with respect to the monaural impulse response are also given.

© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Room acoustics modeling allows the construction of better spaces, especially in critical listening cases such as theatres, cinemas, concert halls, and opera houses. Furthermore, classrooms, studios, industrial plants, and public environments (e.g., airports, train stations, etc.) may be acoustically improved by using computer simulation in the design phase.

Room acoustics simulation may be performed with two main approaches. The first one involves the wave equation solution, and there are well-known closed-form solutions for rectangular rooms. For arbitrary geometry, the finite element method (FEM) [1,2], the finite-difference time-domain method (FDTD) [3,4] and the boundary element method (BEM) [5,6] may be applied. Nevertheless, these techniques are computationally expensive, especially in medium and high frequencies, and require the knowledge of room boundary surfaces in a rarely available way (i.e., complex surface impedance).

Geometrical acoustics (GA) [7] may be adopted for a frequency range above the Schroeder frequency of the room. Within GA, the wavefronts are discretized in acoustic rays, traveling in an orthogonal direction to the wave-front. The energy of the rays is summed, and no complex interference is considered. The method may be applied to medium and high frequencies, for which the wavelength is short compared to the space dimensions, and there is noticeable imprecision below the Schroeder frequency. Nevertheless, compared to wave-based methods, GA tends to be computationally efficient. Furthermore, to account for the absorption properties of the room boundaries, GA uses the real-valued diffuse sound absorption coefficients instead of complex impedances. To model diffuse reflections, it is necessary to use the scattering coefficients [8], which are rarely available. In the case of wave-based methods, scattering and diffraction phenomena are inherently modeled in the geometry of the room.

Room acoustics simulation goes back to the pioneering works of Allred [9] and Schroeder [10,11]. What was sought then was the determination of the Room Impulse Responses (RIRs). Software aiming to obtain Binaural Room Impulse Responses (BRIRs) began to emerge in the 1990s [12–19] and 2000s [20–25], all in the GA realm. Since then, numerous doctoral theses have been published

* Corresponding author.

E-mail address: ratenenbaum@gmail.com (R.A. Tenenbaum).

on this subject (e.g., [26,27]). Savioja and Svensson organized a special issue of The Journal of the Acoustical Society of America on the subject [28].

There are two main ways to model geometrical acoustics: the ray-tracing method [29,30] and its variations [31], and the image-source method [32,33]. There are also hybrid algorithms that use the image-source method to compute the early part of the impulse response and the ray-tracing method for calculating the late part [34]. Diffuse reflections play an important role in room acoustics simulation through the duration of impulse response, especially for auralization purposes [35,36]. Their modeling may be approximated with the aid of hybrid approaches or the radiosity technique, also known as the random-walk method [37,38].

Given that there are different ways to implement a GA algorithm, there are distinct aspects to deal with, for instance: how to consider the scattering coefficients [36]; the choice of a transition point between two computation methods in hybrid algorithms [39]; the technique used to compute the diffuse reflections [40]; the choice of the level of detail needed in the room geometry. Consequently, different algorithms obtain distinct results when simulating the same room with identical input data [41]. Furthermore, GA simulation outputs are strongly dependent on the input data, which are, basically, the room geometry, the boundary surface octave-band absorption and scattering coefficients, the sound source power and directivities, and, for calculating BRIRs, the binaural receiver head-related impulse response database.

To evaluate different algorithms in a relatively well-controlled environment, international inter-comparisons of room acoustics simulation software called round robins (RR) were launched by room acoustics research groups. The first round robin (RR-I) was launched in 1994. It aimed to compare the measurement and calculation of eight acoustical parameters for the 1 kHz frequency band [42]. The second round robin (RR-II) was launched in 1996 to compare measurements and calculations for ten acoustical parameters in six octave bands, including the inter-aural cross-correlation (IACC), which demands calculating binaural impulse responses [43]. The third round robin (RR-III) was promoted by the Physikalisch-Technische Bundesanstalt, in Germany, from 2001 to 2002 [44,45]. The geometric and acoustic data of a music studio were provided in three phases of increasing complexity. The aim was to compare measurements and simulations of nine acoustical parameters in the octave frequency bands from 125 Hz to 4 kHz. Finally, the fourth round robin was launched in 2016 and called by the organizers the “first round robin on room acoustical simulation and auralization” [47]. The novelty brought by this round robin was the requirement of the calculations of both RIRs and BRIRs, which allows studying auralization and subjective aspects. Furthermore, a set of nine distinct scenarios were measured in several distinct source-receiver configurations [46]. Six scenarios were used to test isolated acoustic phenomena such as specular reflection and diffraction, with three being considered real-life rooms: Scene 9 is deemed as a ‘small’ room (145 m³), Scene 10, studied in this paper, is considered a ‘medium’ room (2,350 m³), see Fig. 1(a), and Scene 11 is deemed a ‘large’ room (8,650 m³).

In this work, the accuracy of the calculations of objective acoustical parameters of three different GA-based software packages is compared. To do so, the Konzerthaus Berlin chamber music hall is considered, being chosen as one of the benchmark rooms in the first round robin on room acoustical simulation and auralization. The main novelty in this research is to comparatively assess the performance of computer code RAIOS, which participated in the mentioned round robin but did not finish the simulations in time to have the results included in Ref. [47]. Also, the room quad-

ratic impulse responses provided by the three software packages are compared to experimental data, which allows some insight into the differences among the algorithms.

The paper structure is as follows. The methodology is explained in Section 2. It comprises the physical room under consideration, the experimental data used, and some discussion on the three GA algorithms used and their configurations. In Section 3, the simulation results for the computation of the acoustical parameters T_{30} (reverberation time), EDT (early decay time), C_{80} (clarity, for music), and D_{50} (definition, for speech) are presented and compared with measured data. First, the four parameters are compared as a function of the frequency. Then, the parameters are shown as a function of source-receiver pairs. In sequence, relative mean errors are evaluated. Finally, some discussion is presented about the impulse responses of the three software packages. The concluding remarks are pointed out in Section 4.

2. Material and methods

This section presents the materials and methods used in this research. The studied room is introduced with details about the experimental data used. A qualitative description of the GA algorithm in each of the three software packages is also presented with the main configuration parameters.

The physical room under consideration may be seen in Fig. 1(a), and its representation in a computer graphics software in Fig. 1(b), with the coordinates of the two sources (LS) and five receivers (MP). The two sound sources are positioned at the stage, and all receivers are in the audience area, none of them on the balconies.

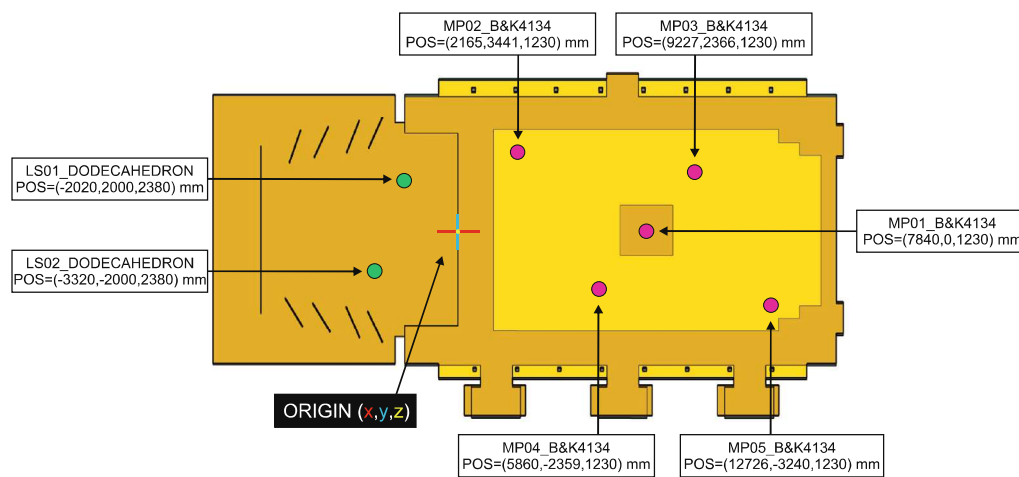
The experimental data is provided by the round robin organizing team and is fully described in Ref. [46]. All acoustic measurements are conducted using exponential sweeps with a sampling rate of 44.1 kHz. In this research, the sound source considered is an omnidirectional dodecahedron compliant with ISO 3382-1 [48], and the receivers are 1/2 in pressure free-field microphones (B&K, type 4134).

From the simulated data, four acoustical parameters were computed in octave bands from 125 Hz to 8 kHz as defined by ISO 3382-1 [48]: the reverberation time, estimated as T_{30} , in s; the early decay time, EDT, in s; the clarity factor for music, C_{80} , in dB; and the dimensionless definition, D_{50} , to assess the room quality for speech. All acoustical parameters were extracted directly from each software package, with no external intervention. Additionally, the monaural broadband impulse response was also extracted from each software package. This data may be computed for each of the ten source-receiver pairs, refereed herein as LS $_x$ -MP $_y$, with x and y being the numbers of the source and receiver, respectively, as shown in Fig. 1(b).

Three software packages for room acoustics simulation are considered in this study. The first one is Odeon, version 11.23, developed initially in the academic realm and currently by Odeon A/S, from Denmark [49]. The second is RAVEN (an acronym for “Room Acoustics for Virtual Environments”), which was developed at the Institute of Technical Acoustics (ITA) of the RWTH Aachen University in Germany [50]. The third is RAIOS (an acronym for “Room Acoustics Integrated and Optimized Software”), version 7, developed in the Brazilian academic environment in long-term cooperation involving the Federal University of Santa Maria, the Federal University of Rio de Janeiro, and the State University of Rio de Janeiro [38]. All computer codes accept arbitrary source and receiver directivities and consider frequency-dependent sound power, air attenuation, and boundary absorption and scattering coefficients. All three computer codes possess hybrid algorithms with their own peculiarities.



(a)



(b)

Fig. 1. The Konzerthaus chamber music hall, Berlin: (a) Physical room; (b) 3D model with sources and receivers coordinates.

Odeon and RAVEN have in common that the impulse response computation is broken into early and late parts. The image-source method is used to calculate the specular paths during the early part, up to a transition order set by the user. The later part is computed via a special kind of ray-tracing. Both Odeon and RAVEN can generate the BRIRs at the receiver positions and produce auralizations.

The ways Odeon and RAVEN handle the early non-specular energy (scattered or diffracted) and the specifics of the computation of the late part of the impulse response vary slightly. In Odeon, the scattered energy at the early part of the impulse response is handled by creating relevant secondary sources from which ray-tracing is performed up to a transition order. Some degree of edge diffraction due to the finiteness of each room boundary is also accounted for. In RAVEN, the scattered energy at the early part of the impulse response is handled by a recursive algorithm calculating new sound sources near the edges of room boundaries [50], aiming at taking diffraction into account in a more precise manner.

In both Odeon and RAVEN, the late part of the impulse response is computed via a special kind of ray-tracing named “diffuse rain” in Ref. [7]. In this case, the rays are traced through the room as in regular ray-tracing. To calculate the reflection direction, the scattering coefficient is used to weigh the specular and a random direction in a linear combination. Thus, surfaces with lower scattering

coefficients tend to redirect the rays closer to the specular direction. A secondary source is generated at each reflection point, from which a ray is cast to each receiver in the room. The energy associated with each secondary source at each receiver depends on Lambert’s law. In RAVEN, the shape of the receiver is also taken into account in this part of the calculation. Furthermore, RAVEN also aims at computing diffracted energy at the late part of the impulse response [50].

The RAIOS computer code is also a hybrid algorithm, yet in another sense. All specular reflections are computed via a ray-tracing algorithm, including the early reflections, and an energy-transition method [51] is used to compute the diffuse reflections [38]. The energy transition method follows the random-walk approach [52], which is similar to the radiosity method used in heat radiation problems [53]. For each specular reflection, the algorithm stores part of the ray energy according to the corresponding octave band scattering coefficient. The room boundary surfaces are sub-divided in triangular surface elements, in which the energy is stored and re-radiated in a second phase of the calculation, feeding a transition matrix [54]. By the end of the transition matrix calculation, the elements of the diffuse reflection are emitted from the room boundary surfaces to the receivers, and the specular and diffuse room impulse responses are added, at each receiver, in octave bands. The general effect is to produce a denser room impulse

response. The binaural room impulse responses in RAIOS are obtained via a machine learning technique [55] with reduced computational cost [56]. The machine learning technique provides the filtered head-related impulse response (HRIR) modeling, and the convolution procedure between each arriving acoustic ray and the corresponding HRIR is avoided, which allows high computational efficiency. The HRTF target of the artificial neural network training and testing used in RAIOS is the one given by Ref. [57].

The main configurations adopted in the Odeon software were as follows: (1) the number of rays is 20,032 (value calculated by the software itself for the selected condition of “accuracy”); (2) the maximum order of reflection is 2,000 (stopping criterion for each acoustic ray); (3) the transition order is 2 (transition between the image source and the ray-tracing methods); (4) the number of early reflections is 2,504 (value also established by the software); (5) screen diffraction is set to on (the software seeks to calculate the diffracted sound when the sound source is not visible to the receiver); (6) the length of the impulse response is 3.5 s.

The settings used in the RAVEN software were the following: (1) the order of reflection of the virtual sources is 2; (2) the number of rays used in the ray-tracing algorithm is 20,157 (parameter calculated by the software itself as a function of the room characteristics); (3) the energy decay of each acoustic ray is -60 dB; (4) the length of the impulse response is 3.5 s.

In RAIOS software, the main configurations given are the following: (1) the number of acoustic rays in the ray-tracing method is 20,000; (2) the number of triangular surface elements is 2,652; (3) the stop decay (decay of each acoustic ray before being discontinued) is -40 dB; (4) the impulse response length is 3.5 s.

3. Results and discussion

In this section, the results are presented, and the discussion follows as they appear. First, the acoustic parameter vs. frequency and acoustic parameter vs. source-receiver pair are presented, which allows one to check how each of the three software pack-

ages behaves on a point-wise comparison. The Konzerthaus chamber music room (Scene 10 of the round robin on room acoustical simulation and auralization (see Fig. 1) is considered a medium-sized hall, with approximately 2,350 m³. As mentioned, the parameters T_{30} , EDT, C_{80} and D_{50} are computed for all ten source-receiver positions and all seven octave band frequencies. This amounts to $4 \times 10 + 4 \times 7 = 68$ distinct comparative plots, and, for brevity, a selection of these plots is presented here.

In Section 3.1, the four acoustical parameters are plotted as a function of the frequency. An average of the simulation for the ten source-receiver pairs is performed for each software. In Section 3.2, the same parameters are presented as a function of the ten LS-MP pairs for each frequency band from 125 Hz to 8 kHz. Mean error measures are presented in Section 3.3, and a point-wise comparison of the squared monaural impulse responses is presented in Section 3.4.

3.1. Acoustical parameters vs. frequency

The simulation results obtained for parameters T_{30} , EDT, C_{80} and D_{50} as functions of the frequencies from 125 Hz to 8 kHz, together with the measured results and the just noticeable difference (\pm JND), are presented in Fig. 2 as an average for all ten source-receiver pairs.

From the T_{30} in Fig. 2(a), one can estimate the Schroeder frequency, f_s , of the room. Considering a worst-case scenario with the largest T_{30} value of approximately 1.5 s (experimental value), $f_s = 2000\sqrt{1.5/2350} \approx 50.5$ Hz. Therefore, the analysis range from 125 Hz to 8 kHz remains above this limit. The modal density at the first octave bands may not be ideally large for GA applications, but it is at least more than three modes per Hz.

As one may observe in Fig. 2, the most significant deviations – always in relation to the measured data – occur at the evaluation of the T_{30} and EDT. For T_{30} , the three software packages overestimate this parameter for frequencies below 4 kHz, with the average estimate given by RAIOS being the worst, followed by RAVEN, and

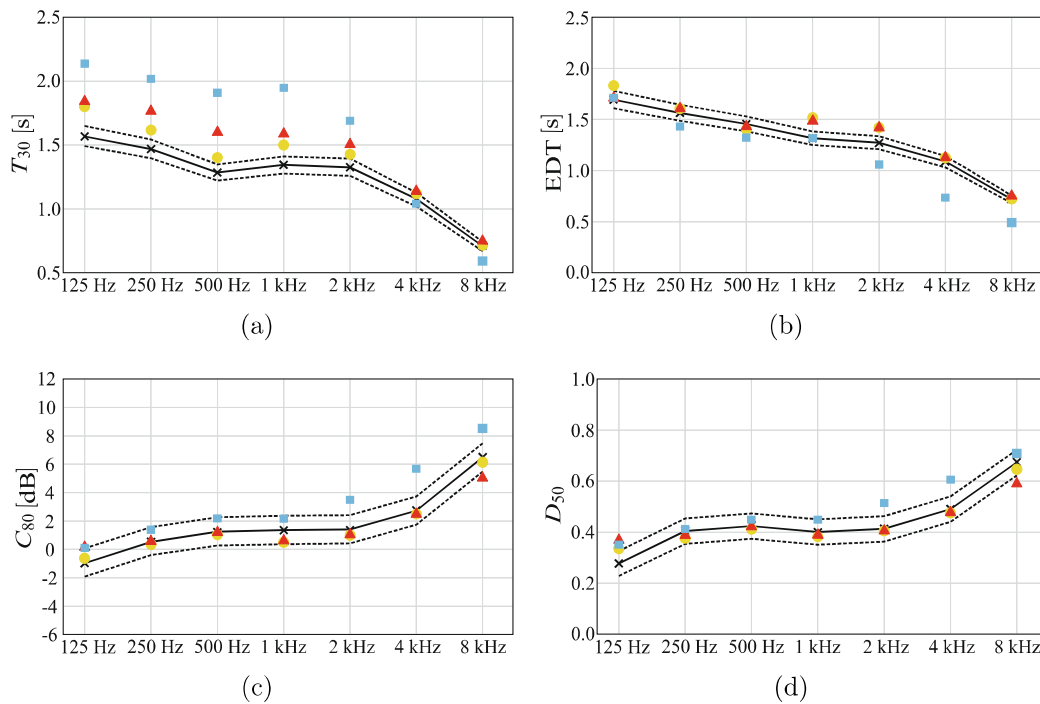


Fig. 2. Simulated and experimental values of the acoustical parameters as functions of the frequency. The values are the average of the simulation results obtained for all ten source-receiver pairs: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; (d) D_{50} . Measurement (\times), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).

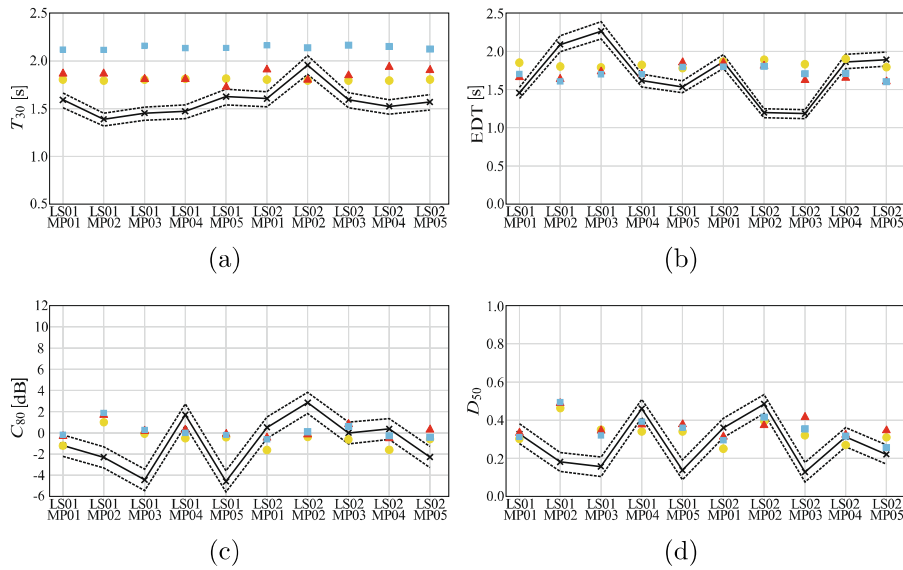


Fig. 3. Simulated and experimental values of the acoustical parameters as functions of source-receiver pairs at the 125 Hz band: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; (d) D_{50} . Measurement (\times), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).

with Odeon showing the best results. However, all of them are above the upper JND limit.

For the EDT, there is a tendency of a minor overestimation by Odeon and RAVEN (for 1 kHz and 2 kHz) and an underestimation by RAIOS above 2 kHz. This probably means that there is some inaccuracy of the algorithms in capturing the initial decay of the impulse response of the room, which will be further discussed in Section 3.4.

For C_{80} and D_{50} , the simulated parameters are closer to the range of the JND. This might happen because the JND is an absolute value of 1 dB for the C_{80} and 0.05 for the D_{50} , as opposed to being a relative value of 5% in the case of the decay times. It is also worth noting that, for most of the spectrum, the simulations follow the trend of the measured curve. However, the RAIOS results remain above the upper JND limit for frequencies over 1 kHz in the C_{80} simulation. For D_{50} , the three software packages deviate at the low-frequency end (125 Hz), and the software RAIOS presented an overestimated result at 2 kHz and 4 kHz. Also, the software

RAVEN underestimated the parameter below the lower JND limit at 8 kHz.

3.2. Acoustical parameters vs. source-receiver pair

Figs. 3–9 show the acoustical parameters as functions of all ten source-receiver pairs in the octave frequency bands of 125 Hz to 8 kHz, respectively. Simulated results, measured data, and JNDs are shown as stated in Section 3.1.

When calculating the T_{30} , it is evident from Figs. 3–9 that, in the frequency range from 125 Hz to 2 kHz, there is a clear overestimation of the simulation results above the upper JND limit that is not observed with the same prominence at high frequencies (4 kHz and 8 kHz).

In the EDT simulation, there is no longer the overestimation present in the case of parameter T_{30} . However, it is clear that the oscillations present in the measured data (for instance, for the LS02-MP02 pair at 250 Hz) are not reproduced by the simulated

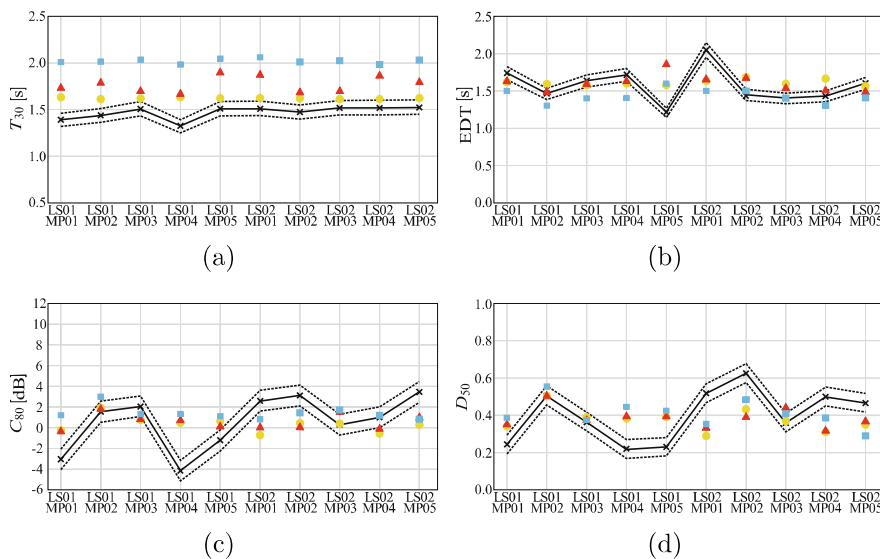


Fig. 4. Simulated and experimental values of the acoustical parameters as functions of source-receiver pairs at the 250 Hz band: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; (d) D_{50} . Measurement (\times), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).

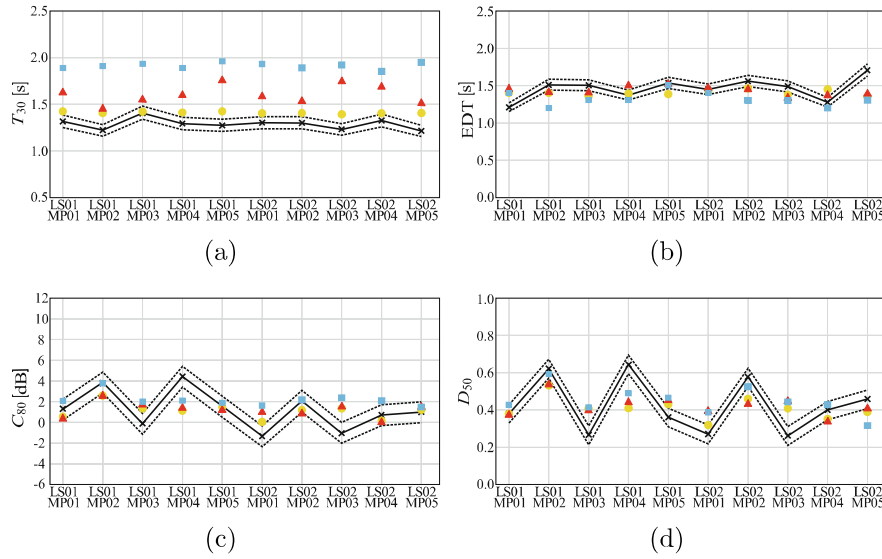


Fig. 5. Simulated and experimental values of the acoustical parameters as functions of source-receiver pairs at the 500 Hz band: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; (d) D_{50} . Measurement (\rightarrow), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).

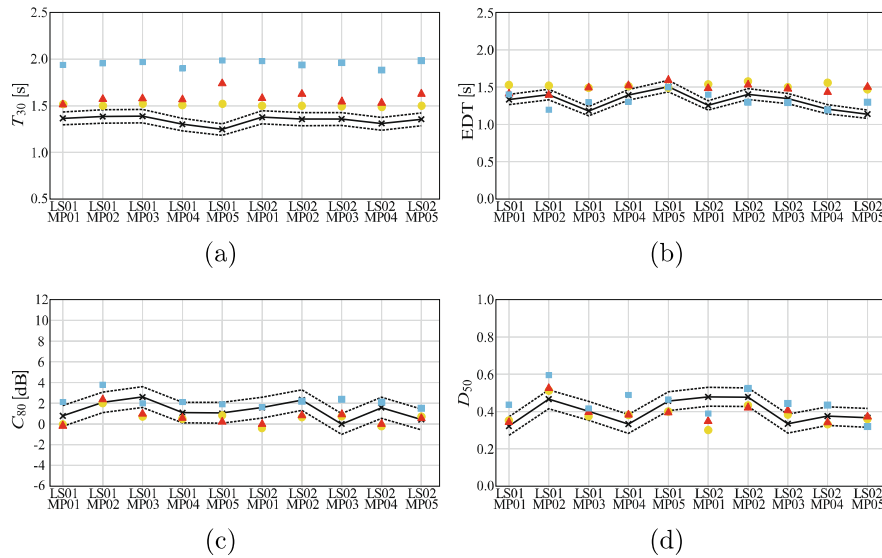


Fig. 6. Simulated and experimental values of the acoustical parameters as functions of source-receiver pairs at the 1 kHz band: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; (d) D_{50} . Measurement (\rightarrow), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).

results. Above 2 kHz, there is a tendency of underestimation of this parameter by RAIOS. see Fig. 4.

Regarding parameter C_{80} , the three software packages did not seem able to capture the spatial variation. For instance, at the frequency of 500 Hz (Fig. 5), the dependence of the parameter on the relative source-receiver position is not captured by any of the simulators.

The same happens with parameter D_{50} : none of the three software packages could capture the dependence of the parameter on the relative source-receiver position in the 500 Hz band. It is worth noting that, at the frequency of 500 Hz, a lower dispersion in the simulation results occurs for this parameter. see Fig. 6.

3.3. Relative mean error

To better assess the performance of the three software packages, one may calculate the mean absolute error between the simulated and measured acoustical parameters. Moreover, this error

figure may be calculated relative to the JND, following Bork [43]. The advantage of using the relative mean error is that it fits the same scaling for all acoustical parameters. It may also easily be estimated if these errors represent subjectively perceived differences between actual and simulated impulse responses. see Fig. 7.

One may choose what data to include in the calculation of an error metric. In this paper, the relative mean error is calculated in two ways: (i) across all source-receiver pairs for each frequency band, $\bar{E}(f)$; (ii) across all frequency bands for each source-receiver pair, \bar{E}_{sr} . These mean errors are given as follows: see Fig. 8.

$$\bar{E}(f) = \frac{1}{\text{JND}(f)} \frac{1}{10} \sum_{p=1}^{10} |x_{sp}(f) - x_{mp}(f)|; \tag{1}$$

$$\bar{E}_{sr} = \frac{1}{7} \sum_{k=1}^7 \frac{1}{\text{JND}_k} |x_{sk} - x_{mk}|, \tag{2}$$

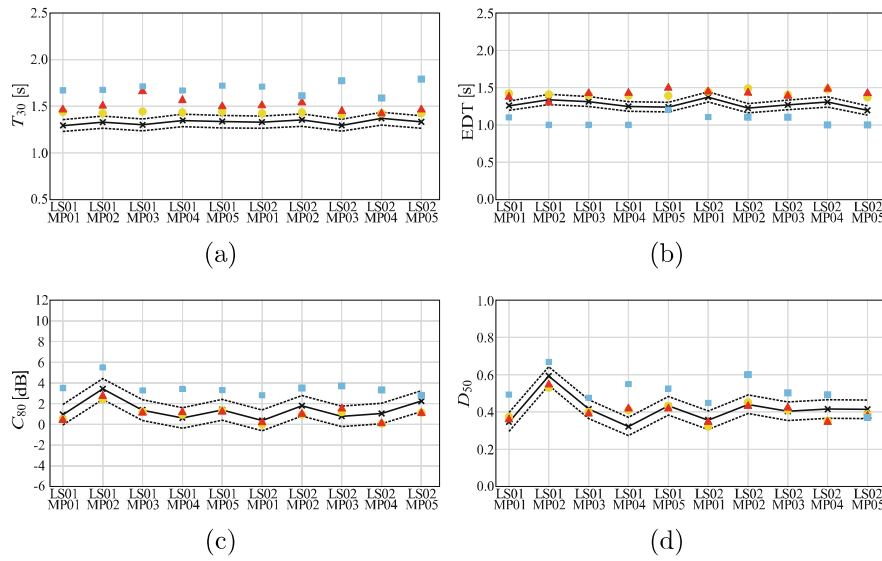


Fig. 7. Simulated and experimental values of the acoustical parameters as functions of source-receiver pairs at the 2 kHz band: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; (d) D_{50} . Measurement ($\rightarrow \times$), \pm JND (- - -), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).

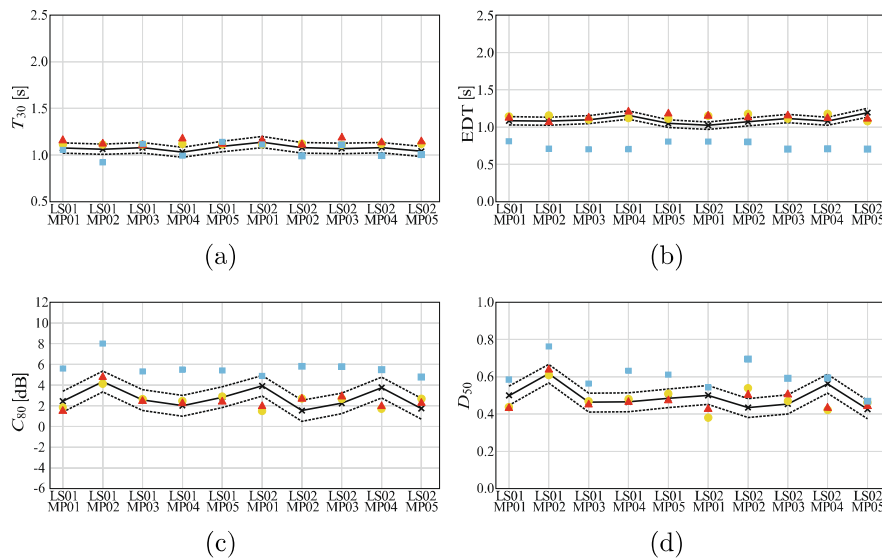


Fig. 8. Simulated and experimental values of the acoustical parameters as functions of source-receiver pairs at the 4 kHz band: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; (d) D_{50} . Measurement ($\rightarrow \times$), \pm JND (- - -), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).

where p is the source-receiver pair, k sweeps across all frequency bands, x_s is the simulated data, and x_m is the measured data. The JND is always taken relative to the measured data¹. The upper bound on the sums is ten for all source-receiver pairs and seven for all frequency bands.

Figs. 10,11 show the relative mean error as a function of the frequency. For most frequency bands, $\bar{E}(f)$ is larger than one, indicating perceivable differences in the simulated data. Odeon and RAVEN have similar performances, which is not surprising since both algorithms operate on the same principles. RAIOS presents the worst performance for T_{30} and EDT above 4 kHz. Overall, $\bar{E}(f)$ tends to decrease with the increase in frequency. This indicates that either GA might need a higher modal density than the Schroeder frequency states or the characterization of input parameters

such as the absorption and scattering coefficients is less precise in the lower frequency range.

Figs. 12,13 show the relative mean error as a function of the source-receiver pairs. For most pairs \bar{E}_{sr} is larger than one. Again, Odeon and RAVEN have similar performances, while RAIOS has the worst performance for T_{30} . C_{80} was the parameter with the lowest overall \bar{E}_{sr} , and the three software packages had similar performances for EDT, C_{80} and D_{50} . These parameters are closely related to energy distribution in the early part of the impulse response and indicate a need to investigate it more deeply, which is done in the following section.

3.4. Impulse responses

This section provides an investigation of the broadband monaural quadratic impulse responses, $h^2(t)$, shown in Fig. 14. Besides the differences among the hybrid GA algorithms, Odeon, RAVEN, and

¹ JND values for C_{80} and D_{50} are absolute. For T_{30} and EDT, the values are relative to the measured data.

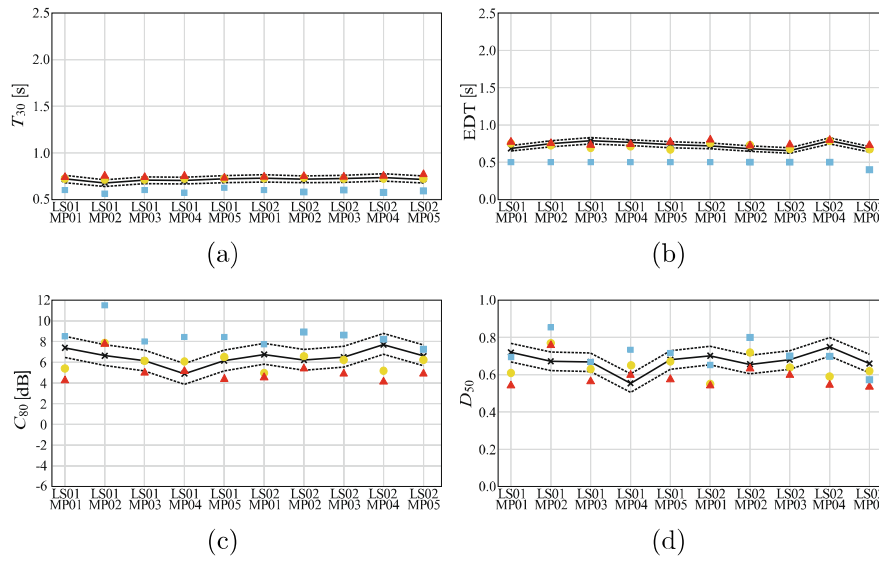


Fig. 9. Simulated and experimental values of the acoustical parameters as functions of source-receiver pairs at the 8 kHz band: (a) T_{30} ; (b) EDT; (c) C_{80} ; (d) D_{50} . Measurement (\times), \pm JND (---), Odeon (●), RAVEN (▲), RAIOS (■).

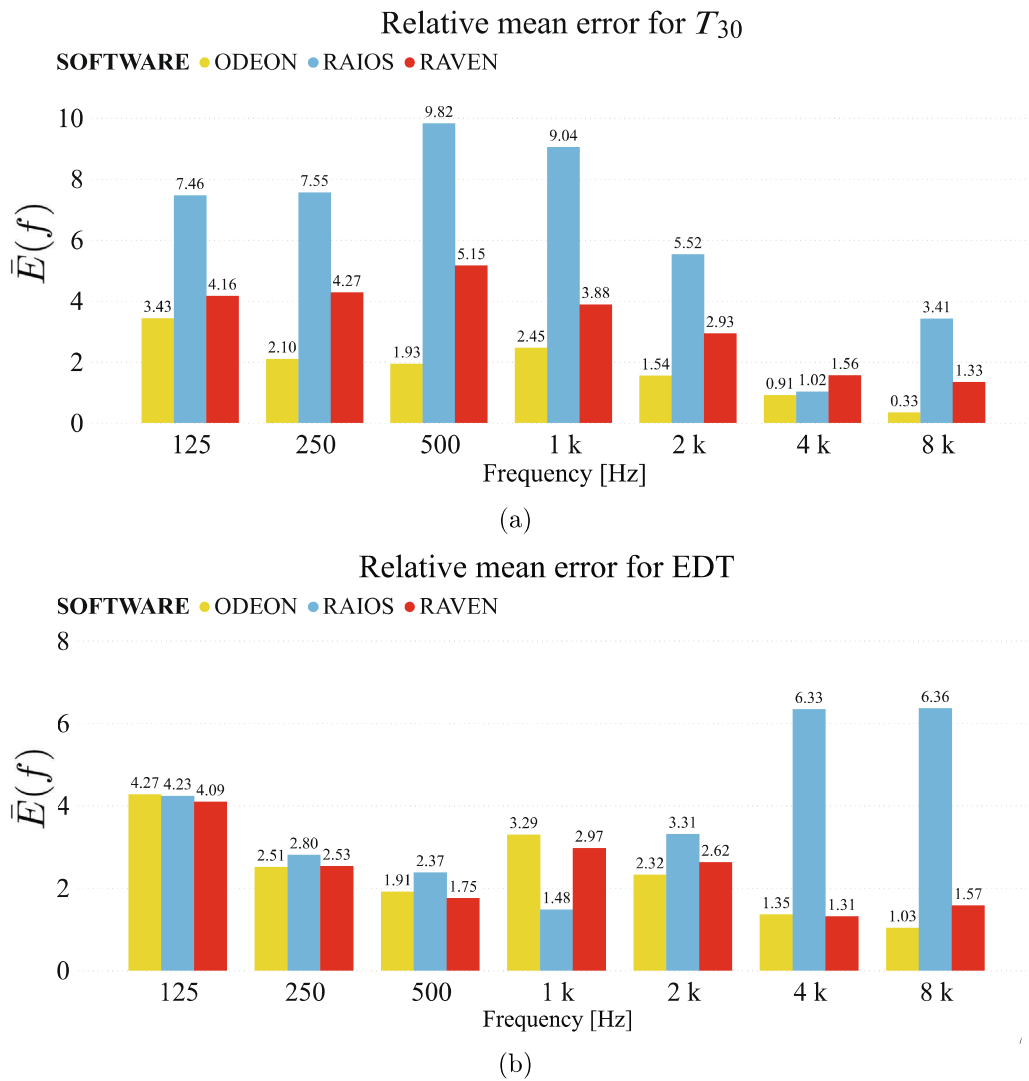


Fig. 10. Relative mean error for all ten source-receiver pairs, as functions of the frequency: (a) T_{30} ; (b) EDT.

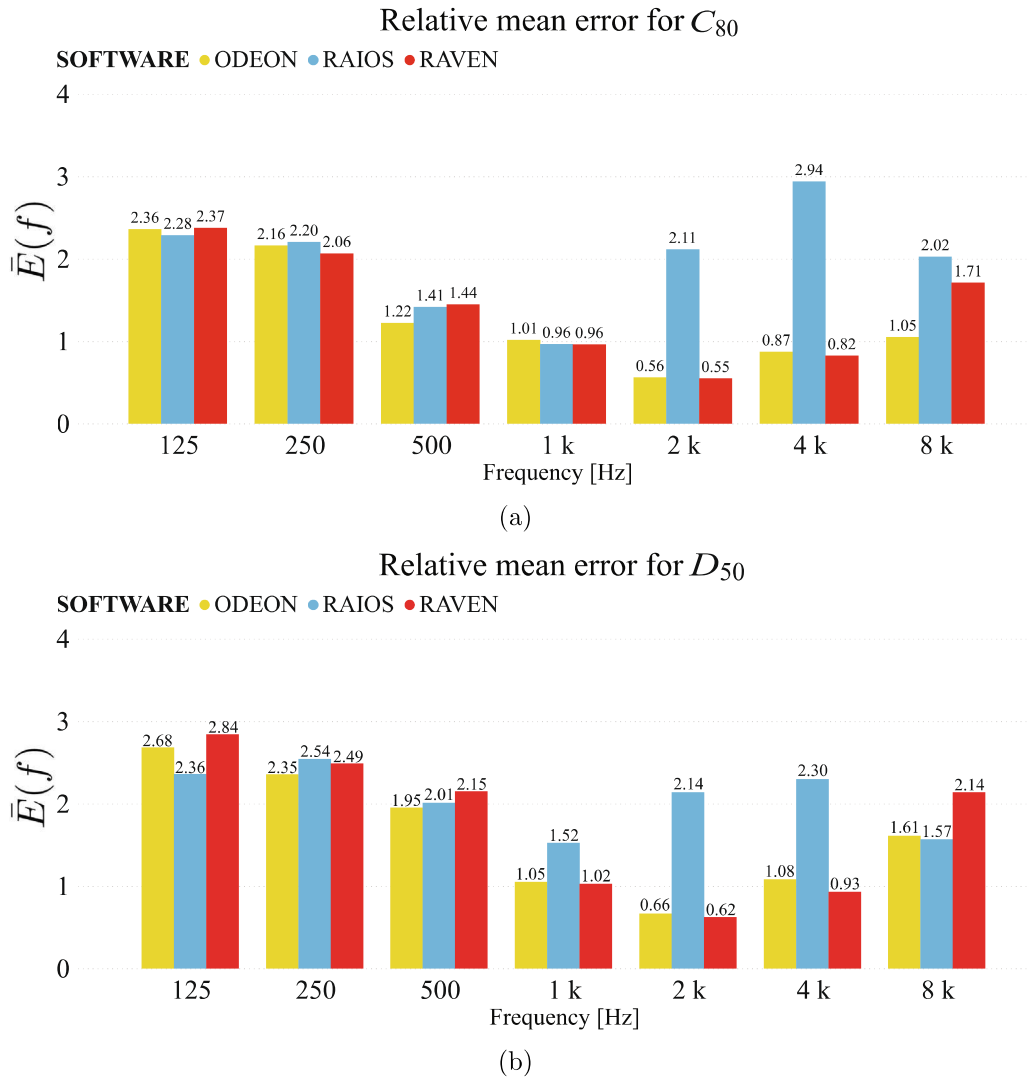


Fig. 11. Relative mean error for all ten source-receiver pairs, as functions of the frequency: (a) C_{80} ; (b) D_{50} .

RAIOS calculate this monaural impulse response by different means, as explained in Refs. [49,50,38], respectively. The initial part of $h^2(t)$ is plotted in Fig. 14 to emphasize the differences between the three software packages. Two source-receiver pairs (LS01-MP03 and LS02-MP04) are chosen to compare the simulations vs. measurements of $h^2(t)$.

One may observe a series of prominent peaks on the experimental data, attributed to strong specular reflections. Odeon, RAVEN, and RAIOS seem to calculate them well enough both in time and amplitude, but with slightly different features. The time instants in between these specular reflections are caused by scattering and diffraction in the room. Using the energy transition method, RAIOS tends to fill these time gaps with more energy than in the measured data. This may lead to an energy decay curve with

a smaller slope, which, in turn, leads to a tendency to overestimate T_{30} . On the other hand, the consequence is a more natural and dense reverberant tail. RAVEN tends to estimate lower energy levels in the initial part of the diffracted impulse response, and Odeon returns energy levels between RAIOS and RAVEN. Evaluating these results, one may consider that, even though RAIOS has worse performance on parameter estimation, the energy transition method might be beneficial if the computational model or the input parameters may be adjusted with good physical balance. The analysis made here provides some insight, and future work may focus on establishing a more formal cause and effect link between a given GA algorithm and the results for acoustical parameters or impulse responses. To do so, one should study many different acoustic scenarios (or the same geometry with many changes).

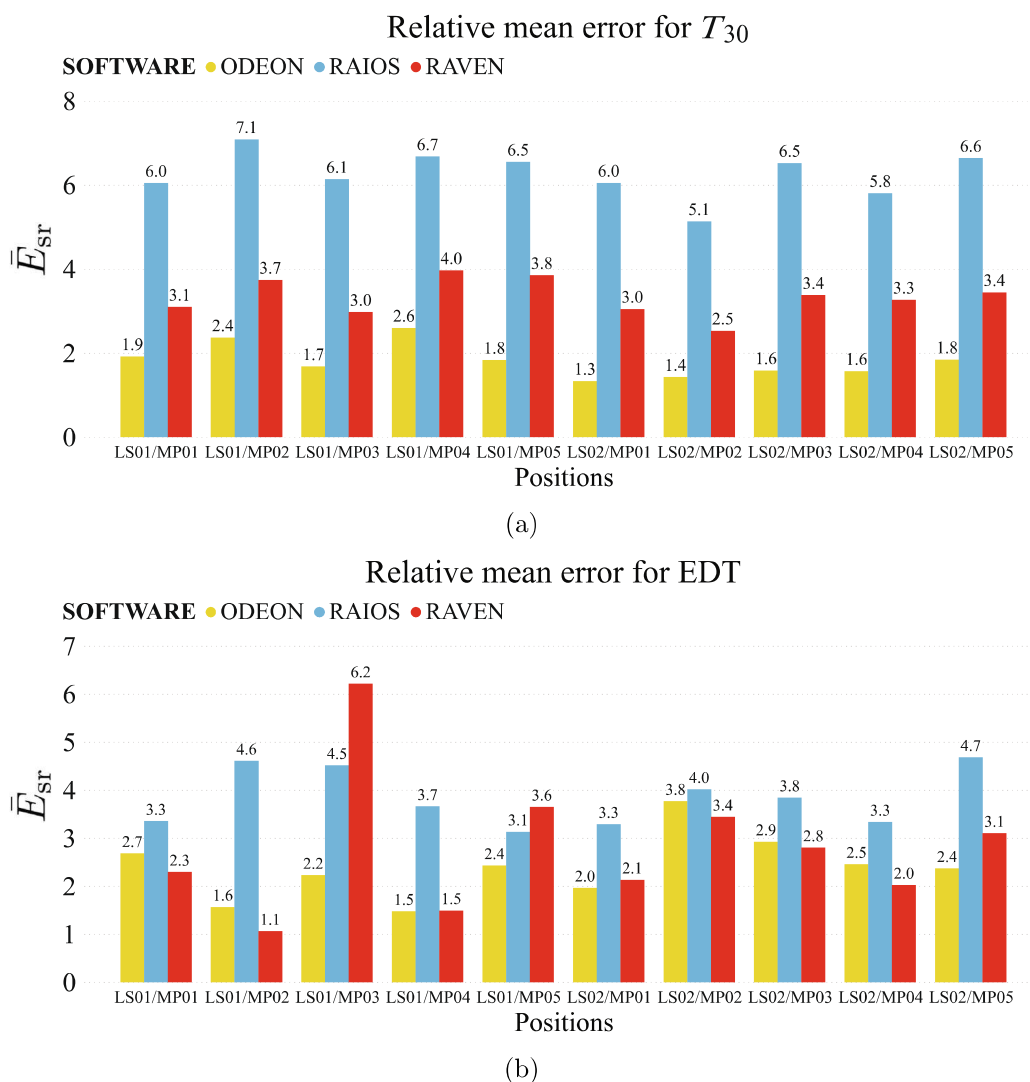


Fig. 12. Relative mean error for all seven frequency bands, as functions of the source-receiver pairs, obtained by the three software packages: (a) T_{30} ; (b) EDT.

4. Conclusions

This article investigated the behavior of three geometrical acoustics algorithms used for room acoustics simulation. Four acoustical parameters and the squared monoaural impulse responses were compared for one of the benchmark rooms used in the round robin on room acoustical simulation and auralization.

From the simulations, the reverberation time and early decay time resulted in more considerable errors relative to the measured data, which is not the case for parameters that compute a balance between early and late parts of impulse responses. Also, the spatial variation of acoustical parameters is not represented well by the algorithms, as shown in Figs. 3–9. For most source-receiver pairs and parameters, the relative mean error to the JND is greater than one, indicating audible cues in auralization.

Since Odeon and RAVEN have similar numerical models, the parameters computed by them are in good agreement. On the other hand, RAIOS presents more significant relative mean errors for T_{30} and EDT above 4 kHz. Also, the examination of the squared impulse responses revealed that RAVEN presents a lack of information at the beginning of the impulse response, RAIOS computed a denser signal between the specular reflections, and Odeon had an intermediate behavior. This is attributed to the model used to com-

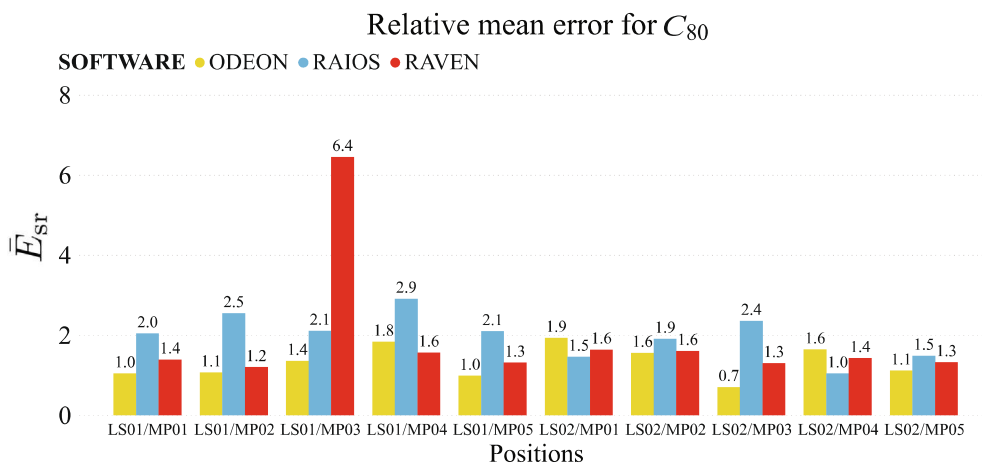
pute the scattered energy in RAIOS, but it did not reflect well on the acoustic parameter computation.

Declaration of Competing Interest

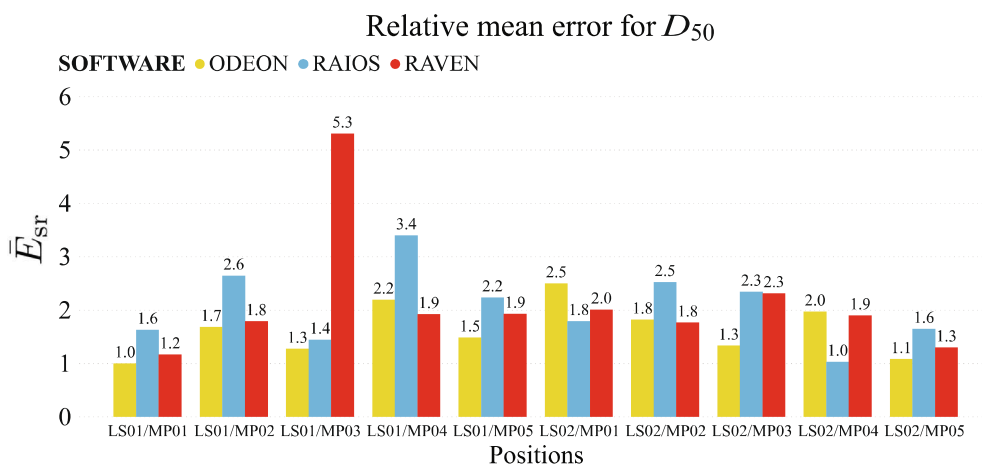
The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

The authors would like to thank Dr. Lukas Aspöck, from the Institute of Technical Acoustics (ITA) of the RWTH Aachen University, for kindly giving access to the software RAVEN used in this comparative research. They would also like to recognize the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq – grant no 301024/2018-9) and the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES – grant no 88887.488177/2020-00) for the partial financial support to this research.



(a)



(b)

Fig. 13. Relative mean error for all seven frequency bands, as functions of the source-receiver pairs, obtained by the three software packages: (a) C_{80} ; (b) D_{50} .

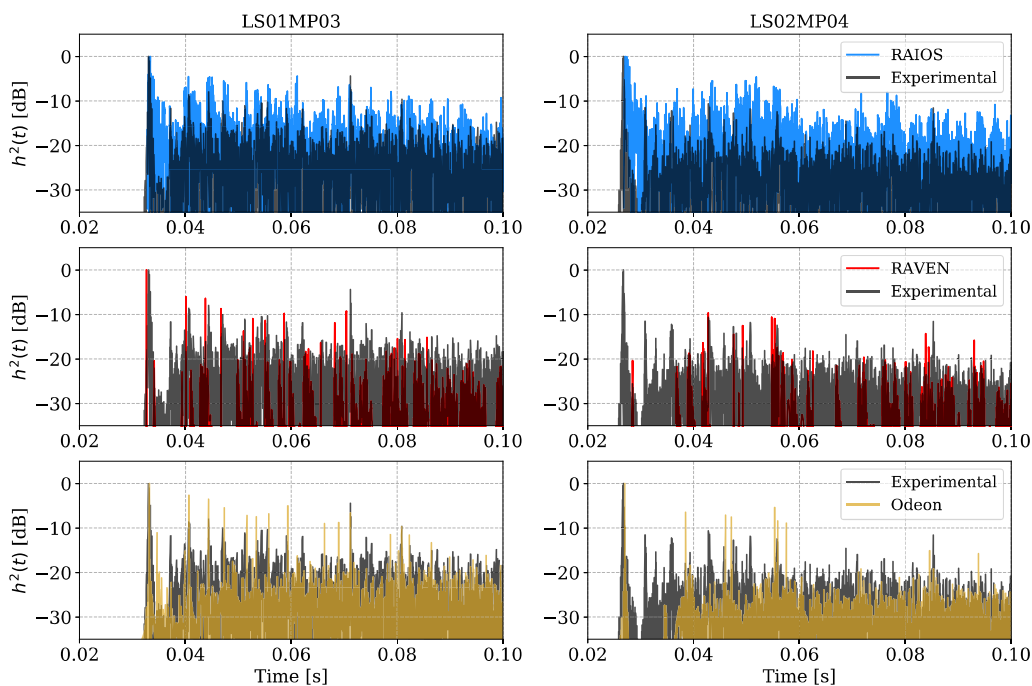


Fig. 14. Monoaural impulse response comparison, left column: Source 1/Receiver 3; right column: Source 2/Receiver 4.

References

- [1] Magoulès F, editor. *Computational Methods for Acoustics Problems*. Glasgow: Saxe-Coburg; 2008.
- [2] Atala N, Sgard F. *Finite Element and Boundary Methods in Structural Acoustics and Vibration*. CRC Press; 2015.
- [3] Bilbao S, Ahrens J, Hamilton B. Incorporating source directivity in wave-based virtual acoustics: Time-domain models and fitting to measured data. *J Acoust Soc Am* 2019;146(4):2692–703.
- [4] Sakuma T, Sakamoto S, Otsuru T. *Computational Simulation in Architectural and Environmental Acoustics*. Tokyo: Springer; 2014.
- [5] Hargreaves JA, Rendell LR, Lam YW. A framework for auralization of boundary element method simulations including source and receiver directivity. *J Acoust Soc Am* 2019;145(4):2625–37.
- [6] Wu TW, editor. *Boundary Element Acoustics: Fundamentals and Computer Codes*. Wit Press; 2000.
- [7] Savioja L, Svensson UP. Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *J Acoust Soc Am* 2015;138(2):708–30.
- [8] Vorländer M, Mommertz E. Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. *Appl Acoust* 2000;60(2):187–99.
- [9] Allred JC, Newhouse A. Applications of Monte Carlo method to architectural acoustics. *J Acoust Soc Am* 1958;30(1):1–3.
- [10] Schröder M. Digital computers in room acoustics. In: *Proc. 4th ICA, Copenhagen*.
- [11] Schröder MR. Computer models for concert hall acoustics. *Am J Phys* 1973;41:471–81.
- [12] Blauert J, Lehnert H, Pompetzki W, Xiang N. Binaural room simulation. *Acustica* 1990;72:295–6.
- [13] Ahnert W, Feistel R. Binaural auralization from a sound system simulation programme. In: *Proc. 91th AES Convention, New York*.
- [14] Lehnert H, Blauert J. Principles of binaural room simulation. *App Acoustics* 1992;36:259.
- [15] Møller H. Fundamentals of binaural technology. *Appl Acoustics* 1992;36:171.
- [16] Vian J-P, Martin J. Binaural room acoustics simulation: Practical uses and applications. *Appl Acoustics* 1992;36:293.
- [17] Kleiner M, Dalenbäck B-I, Svensson P. Auralization – an overview. *J Audio Eng Soc* 1993;41:861.
- [18] Begault D. *3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia*. Cambridge: Academic Press Professional; 1994.
- [19] Dalenbäck B-I, McGrath D. Narrowing the gap between virtual reality and auralization. In: *Proc. 15th ICA, Trondheim*.
- [20] Sottek R. Virtual binaural auralization of product sound quality: Importance and application in practice. In: *Proc. EURONOISE*.
- [21] Rindel JH, Otondo F, Christensen CL. Sound source representation for auralization. In: *Proc. Int. Symp. on Room Acoust., Awaji*.
- [22] Torres JCB, Petraglia MR, Tenenbaum RA. An efficient wavelet-based HRTF for auralization. *Acta Acust Acust* 2004;90:108.
- [23] Otondo F, Rindel JH. A new method for the radiation representation of musical instruments in auralizations. *Acta Acust Acust* 2005;91:902.
- [24] Dalenbäck, B-I, Strömberg, M. Real time walkthrough auralization – the first year. *Proc. IOA Spring Conference, Copenhagen, 2006*.
- [25] Summers JE. What exactly is meant by the term 'auralization'? *J Acoust Soc Am* 2008;124(2):697.
- [26] Dalenbäck, B-I. A new model for room acoustics prediction and auralization. Doctoral thesis, Chalmers University, Gothenburg, 1995.
- [27] Taminato, FO. Artificial neural networks applied to model head-related impulse responses to generate auralization. Ph.D. Thesis, State University of Rio de Janeiro, 2018.
- [28] Savioja L, Xiang N. Introduction to the Special Issue on Room Acoustic Modeling and Auralization, *J Acoust Soc Am*, 145(4), 2597–2600, 2019.
- [29] Krokstad A, Strom S, Sorsdal S. Calculating the acoustical room response by the use of ray tracing technique. *J Sound Vib* 1968;8(1):118–25.
- [30] Ondet M, Barbry JL. Modeling of sound propagation in fitted workshops using ray tracing. *J Acoust Soc Am* 1989;85(2):787–96.
- [31] Farina A. Pyramid tracing vs. ray tracing for the simulation of sound propagation in large rooms. *WIT Trans Built Environ* 1995;10:109–16.
- [32] Allen JB, Berkley DA. Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *J Acoust Soc Am* 1979;65(4):943–50.
- [33] Borish J. Extension of the image model to arbitrary polyhedra. *J Acoust Soc Am* 1984;75:1827.
- [34] Vorländer M. Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm. *J Acoust Soc Am* 1989;86(1):172–8.
- [35] D'Antonio P, Cox TJ. Diffusor application in rooms. *Appl Acoustics* 2000;60:113–42.
- [36] Cox TJ, Dalenbäck BI, D'Antonio P, Embrechts JJ, Jeon JY, Mommertz E, Vorländer M. A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces. *Acta Acust Acust* 2006;92(1):1–15.
- [37] Alarcão D, Bento Coelho JL, Tenenbaum RA. On modeling of room acoustics by a sound energy transition approach. In: *Proceedings of EEA Symposium on Architectural Acoustics*.
- [38] Tenenbaum RA, Camilo TS, Torres JCB, Gerges SNY. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics: Part 1 – theoretical and numerical aspects. *J Braz Soc Mech Sci Eng* 2007;29(2):211–21.
- [39] Stephenson U. Analytical derivation of a formula for the reduction of computation time by the voxel crossing technique used in room acoustical simulation. *Appl Acoust* 2006;67(10):959–81.
- [40] Noriega-Linares JE, Navarr JM. On the relation of room acoustic diffusion over binaural loudness. *Proc. of EuroRegio 2016, Porto, 2016*.
- [41] Vorländer M. Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties. *J Acoust Soc Am* 2013;133(3):1203–13.
- [42] Vorländer, M. International Round Robin on room acoustical computer simulation, *Proceedings of 15th ICA, Trondheim, 1995*.
- [43] Bork I. A comparison of room simulation software – The 2nd Round Robin on room acoustical computer simulation. *Acta Acust Acust* 2000;86:943–56.
- [44] Bork I. Report on the 3rd Round Robin on room acoustical computer simulations – Part I: Measurements. *Acta Acust Acust* 2005;91(4):740–52.
- [45] Bork I. Report on the 3rd Round Robin on room acoustical computer simulations – Part II: Calculations. *Acta Acust Acust* 2005;91(4):753–63.
- [46] Aspöck L, Brinkman F, Ackermann D, Weinzierl S, Vorländer M, BRAS – Benchmark for room acoustical simulation. Available at <https://doi.org/10.14279/depositonnce-67263>, 2018 (Last viewed November 2020).
- [47] Brinkmann F, Aspöck L, Ackermann D, Lepa S, Vorländer M, Weinzierl S. A round robin on room acoustical simulation and auralization. *J Acoust Soc Am* 2019;145(4):2746–60.
- [48] ISO 3382-1. Measurement of room acoustical parameters – Part 1: Performance spaces. International Organization for Standards, Geneva, 2009.
- [49] Odeon A/S. Odeon room acoustics software user's manual (Accessed in November, 2020). <https://odeon.dk/download/Version16/OdeonManual.pdf>.
- [50] Schröder, D. Physically based real-time auralization of interactive virtual environments. Ph.D. thesis, RWTH Aachen University, Ge, 2011.
- [51] Varga RS. *Matrix Interative Analysis*. New Jersey: Englewood Cliffs; 1962.
- [52] Kruszins E, Fricke FR. The prediction of sound fields in non-diffuse spaces by a 'random walk' approach. *J Sound Vib* 1982;81(4):549–64.
- [53] Özisik MN. *Boundary Value Problems of Heat Conduction*. Scanton: International Texbook; 1968.
- [54] Alarcão D, Bento Coelho JL, Tenenbaum RA. Randomly traced sound ray techniques. In: *Proc. EEA Symposium on Architectural Acoustics, Madrid*.
- [55] Tenenbaum RA, Taminato FO, Melo VSG, Torres JCB. Auralization generated by modeling HRIRs with artificial neural networks and its validation using articulation tests. *Appl Acoustics* 2018;130:260–9.
- [56] Tenenbaum RA, Taminato FO, Melo VSG. Fast auralization using radial basis functions type of artificial neural network techniques. *Appl Acoustics* 2020;157:106993.
- [57] Brinkmann F, Lindau A, Weinzierl S, Geissler G, van de Par S, Müller-Trapet M, Opdam R, Vorländer M. The FABIAN head-related transfer function database. Available at <https://doi.org/10.14279/depositonnce-5718.2> (Last viewed September, 2020).