

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**RODRIGO SCOCZYNSKI RIBEIRO**

**CARACTERIZAÇÃO DO CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE UMA  
SALA DE AULA COM O USO DE PAINÉIS DE MADEIRA**

**TESE**

**CURITIBA  
2020**

**RODRIGO SCOCZYNSKI RIBEIRO**

**CARACTERIZAÇÃO DO CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE UMA  
SALA DE AULA COM O USO DE PAINÉIS DE MADEIRA**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Adalberto Matoski.

Coorientador: Prof. Dr. Márcio Henrique de Avelar Gomes.

**CURITIBA  
2020**

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

Ribeiro, Rodrigo Scoczynski

Caracterização do condicionamento acústico de uma sala de aula com o uso de painéis de madeira [recurso eletrônico] / Rodrigo Scoczynski Ribeiro. -- 2020.

1 arquivo texto (305 f.): PDF; 12,8 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Título extraído da tela de título (visualizado em 05 jun. 2020).

Texto em português com resumo em inglês.

Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2020.

Bibliografia: f. 203-216.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Engenharia acústica. 3. Resinas compostas - Madeira. 4. Percepção da fala. 5. Pressão sonora I. Matoski, Adalberto, orient. II. Gomes, Marcio Henrique de Avelar, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, inst. IV. Título.

---

CDD: Ed. 23 -- 624

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba  
Bibliotecária: Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271  
Aluna de Biblioteconomia: Josiane Mangueira

## TERMO DE APROVAÇÃO DE TESE Nº16

A Tese de Doutorado intitulada: **CARACTERIZAÇÃO DO CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE UMA SALA DE AULA COM O USO DE PAINÉIS DE MADEIRA**, defendida em sessão pública pelo Candidato **Rodrigo Scoczynski Ribeiro**, no dia 29 de maio de 2020, foi julgada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, área de concentração: Construção Civil, linha de pesquisa: Materiais E Componentes de Construção, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

### BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Adalberto Matoski- Presidente - UTFPR

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Juliana de Conto - Unicentro

Prof. Dr. Alexadre Augusto Pescador Sardá - UFPR

Prof. Dr. Key Fonseca de Lima - PUC-PR

Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Catai - UTFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

**Curitiba**, 29 de maio de 2020.

Aos meus avós, Ary e Nadir.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ary e Deonéia. Sem o apoio de vocês eu não teria nem iniciado esta jornada. E muitas outras também não.

Ao meu irmão Rafael, que sempre esteve ao meu lado. À minha irmã Marcella, por também ter estado ao meu lado e principalmente por ter me ajudado com as diversas etapas desta pesquisa.

À Fernanda pelo apoio incondicional.

Aos meus avós que sempre foram meus exemplos.

A todos meus amigos e amigas que participaram desta trajetória, em especial ao meu amigo Felipe Venske que gravou os áudios das listas balanceadas e à Rosemara Amarilla com quem dividi várias discussões acadêmicas.

Aos amigos Luis Sant'Ana e José Larcher pelas horas dedicadas nas medições da sala de aula e na câmara reverberante.

Agradeço ao amigo Fernando Jun Terashima pelo apoio com as medições no tubo de impedância.

Ao servidor Paulo Sabino, que sempre se mostrou disponível para me auxiliar nas preparações dos ensaios.

À professora Juliana De Conto e Bruno Schwertz pela disponibilidade em realizar os testes subjetivos.

À todas as empresas que doaram seus materiais para a execução desta pesquisa.

Ao meu orientador, professor Adalberto Matoski, que me orientou desde o mestrado, e ao meu coorientador, professor Márcio Avelar, que dividiu sem conhecimento comigo.

Thank you Dr. Aryn Amlani for your support and for opening my eyes to this study.

Agradeço aos amigos e amigas da UTFPR - Campus Guarapuava pelo apoio.

## RESUMO

Em ambientes fechados destinados às atividades intelectuais, ou ao silêncio, faz-se imprescindível a preocupação com os diferentes parâmetros acústicos destes espaços, relacionados aos aspectos do ambiente construído, tais como geometria e acabamentos das superfícies. Um ambiente já construído pode ser tratado acusticamente por meio de soluções bastante diversas em termos de custo ou complexidade. Um exemplo de solução que pode ser utilizada para condicionamento acústico destes ambientes é a inserção de materiais com propriedades (ou características) absorventes ou difusores. Neste contexto, esta pesquisa propõe uma alternativa para condicionamento acústico de uma sala de aula já construída por meio da inserção de compósitos de madeira, painéis, que foram fixados nas vedações verticais. Essa proposição buscou demonstrar uma alternativa que fosse prática em termos de execução e viável da perspectiva da sustentabilidade. Foram escolhidos compósitos industrializados fabricados na região sul do Brasil, do tipo MDF (*Medium Density Fiberboard*), OSB (*Oriented Strand Board*) e o WWCB (*Wood-Wool Cement Board*) em diferentes espessuras. Os materiais foram analisados e caracterizados por meio do coeficiente de absorção sonora. Adicionalmente, uma utilização para os painéis do tipo OSB e WWCB foi proposta como revestimento interno de uma alvenaria de blocos de resíduo de construção e demolição (RCD) em uma câmara reverberante, onde foi avaliado o aumento da isolamento sonora proporcionado à alvenaria. Na sala de aula condicionada, as variáveis objetivas mensuradas foram o tempo de reverberação, a definição ( $D_{50}$ ) e o índice de transmissão de fala (STI). Para complementar as análises, foram realizados testes subjetivos com uma amostra de indivíduos homens e mulheres para a determinação de índices percentuais de reconhecimento de fala (IPRF), aplicado ao ambiente em estudo. Ainda, modelos tridimensionais foram elaborados utilizando o software I-SIMPA que tem código aberto, onde simulações acústicas apresentaram diferentes cenários de condicionamento acústico junto às suas variáveis objetivas. Para os testes de isolamento, os resultados da pesquisa mostraram que os painéis de OSB podem aumentar em até 4dB o índice de redução sonora ponderado ( $R_w$ ) de uma alvenaria com blocos de RCD. Os painéis do tipo WWCB proporcionaram aumento nos valores de STI em diferentes assentos da sala de aula, tendo o painel de 50,0mm de espessura resultados estatisticamente diferentes dos demais. Análises dos níveis de pressão sonora no ambiente educacional permitiram concluir que não houve absorção excessiva da energia em altas frequências, o que ocorre com muitos absorvedores convencionais e não sustentáveis, e os testes subjetivos demonstraram que os compósitos melhoraram a inteligibilidade de fala

**Palavras chave:** Acústica de salas de aula. Compósitos de madeira. Inteligibilidade de fala.

## ABSTRACT

In indoor environments designed for silence and intellectual activities, the concern about the different acoustical parameters of these spaces is a fundamental topic, which are related to different aspects of the built environment, such as geometry and surface finishes. A built environment might be acoustically treated in different ways in terms of complexity and cost. The insertion of absorbent materials or diffusers is an example of an acoustic solution for that environment. In this context, this research proposes an alternative for the acoustical treatment of a classroom already built through the insertion of wooden composites, panels, which were screwed to the walls. This proposition sought to demonstrate an alternative that was easy in terms of implementation and feasible from the perspective of sustainability. Industrialized wood composites from the south part of Brazil were chosen, such as the MDF (Medium Density Fiberboard), the OSB (Oriented Strand Board) and the WWCB (Wood-Wool Cement Board) with different thicknesses. The materials were analyzed and characterized through the sound absorption coefficient. In addition, a building material application for OSB and WWCB panels was proposed as an internal coating system of a masonry built with construction and demolition waste (CDW) inside of a reverberating chamber, where the increase in sound insulation provided to the masonry was evaluated. In the already treated classroom, objective acoustic parameters were evaluated, such as the reverberation time, the Definition ( $D_{50}$ ) and the Speech Transmission Index (STI). In order to complement the analysis, subjective tests were carried out with a sample of men and women to determine the Speech Recognition Percentage Index (SRPI) applied to the classroom environment. Three-dimensional models were built and validated with measurements using an open source software (I-SIMPA), where acoustic simulations showed different schemes of acoustic conditioning along with their objective acoustic parameters. For the sound insulation evaluation, the thesis concluded that the OSB panels might increase up to 4dB the weighted sound reduction index ( $R_w$ ) of a masonry with CDW blocks. WWCB-type panels increased the STI values at different seats over the classroom. The scenario with the 50.0mm thick panels showed itself as statistically different from the others. Analysis of the sound pressure levels in the classroom environment led to the conclusion that there was no excessive absorption of high-frequency energy, which occurs with many conventional and non-sustainable absorbers, and the subjective tests proved that the WWCB type (50.0 mm thick) improved the speech intelligibility.

**Keywords:** Classroom acoustics. Wooden composites. Speech intelligibility.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de materiais absorventes. ....	36
Figura 2 – Variação de pressão sonora em um tubo de impedância.....	37
Figura 3 – Seções do espectro audível.....	41
Figura 4 – Sala retangular com dimensões $L_x$ , $L_y$ e $L_z$ . ....	42
Figura 5 – Formas de propagação da onda sonora com os modos acústicos.....	43
Figura 6 – Propagação de um raio sonoro com fontes virtuais. ....	45
Figura 7 – Reflexões de terceira ordem em um teatro.....	46
Figura 8 – Princípio da visibilidade.....	46
Figura 9 – Resposta ao impulso por diferentes métodos de modelagem.....	47
Figura 10 – SLIT com resposta ao impulso.....	49
Figura 11 – Deconvolução linear com separações das distorções produzidas em uma medição com <i>sweep</i> logarítmico. ....	53
Figura 12 – Desenho esquemático de medição em laboratório. ....	58
Figura 13– Coeficientes de absorção para o painel tipo MDF – 9,00 mm (literatura).....	62
Figura 14– Coeficientes de absorção para o painel tipo OSB – 17,5 mm.....	62
Figura 15– Comparações dos coeficientes de absorção para painéis tipo WWCB. ....	63
Figura 16 – Relação de trabalhos citados com a palavras (( " <i>acoustic</i> " ) AND ( " <i>classroom</i> " ). .....	69
Figura 17 – Etapas da pesquisa.....	75
Figura 18– Sequência de atividades da primeira etapa.....	76
Figura 19– Amostras para ensaio de densidade.....	78
Figura 20– Aferição do tamanho da amostra. ....	78
Figura 21– Obtenção da massa da amostra. ....	79
Figura 22 – Equipamento para medição de porosidade.....	80
Figura 23– Sequência de atividades para a segunda etapa. ....	81
Figura 24– Amostras para ensaio de absorção sonora.....	81
Figura 25 – Tubo de impedância da Universidade PUC-PR. ....	83
Figura 26 – Posição dos microfones no tubo de impedância de $\varnothing$ 100 mm. ....	83
Figura 27 – Exemplo de diagrama de caixa. ....	85
Figura 28 – Etapas da etapa 3. ....	85
Figura 29 – Perspectivas da câmara reverberante. ....	86
Figura 30– Planta baixa da câmara reverberante.....	87
Figura 31– Cortes AA' e BB' da câmara reverberante. ....	87
Figura 32– Vedação vertical de blocos com RCD. ....	87
Figura 33– Vedação vertical com painéis tipo WWCB – TKS 50 mm.....	88
Figura 34– Painel fixado na vedação de blocos. ....	88
Figura 35– Vedação com painéis tipo OSB 8,00 mm e instrumentos de medição.....	88
Figura 36– Esquema de ligação dos equipamentos – medição da resposta ao impulso.....	90
Figura 37– Esquema de ligação dos equipamentos – medição do NPS. ....	90
Figura 38– Pontos de medição. ....	91
Figura 39– Configuração das medições de respostas aos impulsos. ....	92
Figura 40– Sequência de procedimentos da quarta etapa.....	95
Figura 41– Planta baixa da sala de aula.....	95
Figura 42– Corte da sala de aula. ....	96
Figura 43– Perspectivas da sala de aula. ....	96
Figura 44– Perspectivas da sala de aula com painéis para condicionamento acústico.....	97

Figura 45– Distribuição dos painéis acústicos em uma sala de aula feita por Amlani e Russo (2016). .....	98
Figura 46– Lateral com painéis. ....	98
Figura 47– Fundo com painéis. ....	98
Figura 48– Fotografia da sala de aula com painéis tipo MDF.....	99
Figura 49– Medição do ruído de fundo. ....	99
Figura 50– Posição fonte-microfone. ....	100
Figura 51 – Posição fonte-microfone tipo professor-aluno. ....	101
Figura 52 – Cabeça artificial posicionada no assento B.....	102
Figura 53 – Medição de uma resposta ao impulso biauricular. ....	102
Figura 54 – Esquema de gravação de palavras reproduzidas na sala. ....	103
Figura 55 – Medição de NPS à 1,00m do alto falante. ....	104
Figura 56– Gravação do áudio ATP. ....	104
Figura 57 – Detalhamento da quinta etapa. ....	106
Figura 58 – Sala de aula sem painéis.....	107
Figura 59 – Sala de aula com painéis na orientação vertical.....	108
Figura 60 – Sala de aula com painéis na orientação horizontal.....	108
Figura 61 – Forma das mesas e cadeiras no modelo. ....	109
Figura 62 – Procedimento de obtenção do coeficiente de espalhamento. ....	109
Figura 63 – Modelo com painéis de orientação vertical inserido no <i>software</i> I-SIMPA. ....	110
Figura 64 – Visualização da malha gerada no <i>software</i> I-SIMPA. ....	111
Figura 65 – Definição ( $D_{50}$ ) com condicionamento tipo WWCB – 50,0 mm em 1000 Hz. ..	113
Figura 66 – Tempo de reverberação com condicionamento tipo WWCB – 50,0 mm em 1000 Hz. ....	114
Figura 67 – EDT com condicionamento tipo WWCB – 50,0 mm em 1000 Hz.....	117
Figura 68- Procedimentos da sexta etapa. ....	118
Figura 69– Lista 1 gravada no assento C – situação com painéis tipo WWCB - 50,0 mm....	118
Figura 70– Convolução de sinais (lista 1 com RI do assento C) – situação com painéis tipo WWCB – 50,0 mm. ....	119
Figura 71– Sobreposição dos sinais da Figura 69 e Figura 70. ....	119
Figura 72– Sinal resultante da convolução com amplitude reduzida. ....	120
Figura 73– Fluxograma para a convolução dos áudios dos testes subjetivos.....	121
Figura 74– Fluxograma para a gravação dos áudios dos testes subjetivos.....	122
Figura 75– Diminuição da amplitude para o áudio final a ser reproduzido nos testes.....	122
Figura 76– Procedimentos da sétima etapa. ....	123
Figura 77– Ligação de componentes para o teste de IPRF. ....	123
Figura 78– Resultado da ANOVA entre as densidades de diferentes espessuras do painel MDF. ....	127
Figura 79– Resultado do teste de Tukey entre as densidades de diferentes espessuras do painel MDF. ....	127
Figura 80– Resultado da ANOVA entre as densidades de diferentes espessuras do painel OSB. ....	128
Figura 81– Resultado do teste de Tukey entre as densidades de diferentes espessuras do painel OSB. ....	128
Figura 82– Resultado do teste de Tukey entre as densidades de diferentes espessuras do painel WWCB. ....	129
Figura 83– Resultado do teste de Tukey entre as porosidades de diferentes espessuras do painel WWCB. ....	130
Figura 84– Coeficientes de absorção para o painel tipo MDF – 9,00 mm. ....	132
Figura 85– Coeficientes de absorção para o painel tipo MDF – 12,0 mm. ....	132

Figura 86– Coeficientes de absorção para o painel tipo MDF – 15,0 mm.....	133
Figura 87– Comparação dos coeficientes de absorção para o painel tipo MDF. ....	133
Figura 88– Coeficientes de absorção para o painel tipo OSB – 8,00 mm.....	134
Figura 89– Coeficientes de absorção para o painel tipo OSB – 12,0 mm.....	135
Figura 90– Coeficientes de absorção para o painel tipo OSB – 25,0 mm.....	135
Figura 91– Comparação dos coeficientes de absorção para o painel tipo OSB. ....	136
Figura 92– Coeficientes de absorção para o painel tipo WWCB – 17,0 mm.....	137
Figura 93– Coeficientes de absorção para o painel tipo WWCB – 25,0 mm com palha grossa. .....	137
Figura 94– Coeficientes de absorção para o painel tipo WWCB – 50,0 mm.....	138
Figura 95– Coeficientes de absorção para o painel tipo WWCB – 25,0 mm com palha superfina. ....	138
Figura 96– Comparação dos coeficientes de absorção para o painel tipo WWCB. ....	139
Figura 97– Índice de redução sonora ponderado para os blocos com RCD.....	140
Figura 98– Tempo de reverberação e incerteza de medição para os blocos com RCD. ....	141
Figura 99– Índice de redução sonora ponderado para os blocos com painéis de OSB de 8,00 mm. ....	142
Figura 100– Índice de redução sonora ponderado para os blocos com painéis de OSB de 12,0 mm. ....	142
Figura 101– Índice de redução sonora ponderado para os blocos com painéis de OSB de 25,0 mm. ....	143
Figura 102– Tempos de reverberações e incertezas para as medições realizadas com painéis do tipo OSB. ....	143
Figura 103– Aumento de isolamento com painéis tipo OSB com diferentes espessuras. ....	144
Figura 104– Comparação dos aumentos de isolamento com painéis OSB.....	145
Figura 105– Índice de redução sonora ponderado para os blocos com painéis tipo WWCB de 17,0 mm. ....	146
Figura 106– Índice de redução sonora ponderado para os blocos com painéis tipo WWCB de 25,0 mm (palha grossa). ....	146
Figura 107– Índice de redução sonora ponderado para os blocos com painéis tipo WWCB de 25,0 mm (palha superfina).....	147
Figura 108– Índice de redução sonora ponderado para os blocos com painéis tipo WWCB de 50,0 mm.....	147
Figura 109– Tempos de reverberações e incertezas para as medições realizadas com painéis do tipo WWCB. ....	148
Figura 110– Aumento de isolamento com painéis tipo WWCB.....	149
Figura 111– Comparação dos aumentos de isolamento com painéis WWCB.....	150
Figura 112– Teste de Tukey para diferentes assentos na sala sem painéis. ....	151
Figura 113– Valores de STI para painéis tipo MDF. ....	153
Figura 114– Teste de Tukey para diferentes assentos na sala com painel OSB de 12,0 mm. ....	155
Figura 115– Teste de Tukey para diferentes assentos na sala com painel OSB de 25,0 mm. ....	155
Figura 116– Valores de STI para painéis tipo OSB. ....	156
Figura 117– Teste de Tukey para diferentes assentos na sala com painel WWCB de 25,0 mm (palha grossa).....	158
Figura 118– Valores de STI para painéis tipo WWCB. ....	158
Figura 119– Teste de Tukey entre os painéis. ....	160
Figura 120– Diminuição do NPS em cada assento.....	161
Figura 121– Distâncias de cada assento em relação à mesa do professor. ....	162
Figura 122– Variação do NPS no assento <i>A</i> .....	163
Figura 123– Variação do NPS no assento <i>B</i> .....	164

Figura 124– Variação do NPS no assento C. ....	164
Figura 125– Variação do NPS no assento D. ....	165
Figura 126– Resposta ao impulso no assento A na sala de aula sem condicionamento. ....	166
Figura 127– Resposta ao impulso no assento B na sala de aula sem condicionamento. ....	166
Figura 128– Resposta ao impulso no assento C na sala de aula sem condicionamento. ....	167
Figura 129– Resposta ao impulso no assento D na sala de aula sem condicionamento. ....	167
Figura 130– Tempo de reverberação em cenários com MDF. ....	170
Figura 131– Tempo de reverberação em cenários com OSB. ....	170
Figura 132– Tempo de reverberação em cenários com WWCB. ....	171
Figura 133– Variação espectral em cada assento nos cenários com painéis do tipo MDF. ....	177
Figura 134– Diferenças mínimas perceptíveis no assento D para cenários com MDF. ....	178
Figura 135– Diferenças mínimas perceptíveis no assento C para cenários com MDF. ....	178
Figura 136– Diferenças mínimas perceptíveis no assento B para cenários com MDF. ....	179
Figura 137– Diferenças mínimas perceptíveis no assento A para cenários com MDF. ....	179
Figura 138– Variação espectral em cada assento nos cenários com painéis do tipo OSB. ....	180
Figura 139– Diferenças mínimas perceptíveis no assento D para cenários com OSB. ....	181
Figura 140– Diferenças mínimas perceptíveis no assento C para cenários com OSB. ....	181
Figura 141– Diferenças mínimas perceptíveis no assento B para cenários com OSB. ....	182
Figura 142– Diferenças mínimas perceptíveis no assento A para cenários com OSB. ....	182
Figura 143– Variação espectral em cada assento nos cenários com painéis do tipo WWCB. .....	183
Figura 144– Diferenças mínimas perceptíveis no assento D para cenários com WWCB. ....	184
Figura 145– Diferenças mínimas perceptíveis no assento C para cenários com WWCB. ....	184
Figura 146– Diferenças mínimas perceptíveis no assento B para cenários com WWCB. ....	185
Figura 147– Diferenças mínimas perceptíveis no assento A para cenários com WWCB. ....	186
Figura 148– Teste de Nemenyi para o EDT entre diferentes cenários com compósitos do tipo WWCB. ....	188
Figura 149– Diferenças perceptíveis entre cenários quanto ao EDT – <i>Mic1</i> a <i>Mic4</i> . ....	189
Figura 150– Diferenças perceptíveis entre cenários quanto ao EDT – <i>Mic5</i> a <i>Mic8</i> . ....	189
Figura 151– Quantidades totais de diferenças perceptíveis por cenários (comparações por pares). ....	190
Figura 152– Teste de Dunn (com ajustes tipo Benjamini-Hochberg) entre indivíduos. ....	193
Figura 153– Alterações nas dificuldades de entendimento da fala com IPRF. ....	197
Figura 154– Porcentagens de alterações no entendimento da fala com IPRF. ....	198
Figura 155– Média dos valores de IPRF por assento. ....	198
Figura 156– Teste de Nemenyi entre os grupos da Tabela 41. ....	265
Figura 157– Teste de Nemenyi entre os grupos da Tabela 43. ....	267
Figura 158– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 44. ....	268
Figura 159– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 45. ....	269
Figura 160– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 46. ....	270
Figura 161– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 47. ....	271
Figura 162– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 50. ....	273
Figura 163– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 51. ....	274
Figura 164– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 52. ....	275
Figura 165– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 53. ....	276
Figura 166– Teste de Nemenyi entre os grupos da Tabela 54. ....	277
Figura 167– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 55. ....	278
Figura 168– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 56. ....	279
Figura 169– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 58. ....	280
Figura 170– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 59. ....	281

Figura 171– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 61. ....	283
Figura 172– Teste de Nemenyi entre os grupos da Tabela 62.....	284
Figura 173– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 65. ....	286
Figura 174– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 67. ....	287
Figura 175– Teste de Nemenyi entre os grupos da Tabela 68.....	288

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Definições de propriedades importante para materiais absorventes.....	35
Quadro 2 – Relação de amostras para ensaio de absorção .....	82
Quadro 3 – Relação de painéis para ensaio de isolamento. ....	86
Quadro 4 – Legendas de cores dos modos naturais utilizada no <i>software</i> REW. ....	112
Quadro 5 – Cenários simulados de condicionamentos acústicos. ....	115
Quadro 6 – Cenários simulados de condicionamentos acústicos apenas com painéis do tipo WWCB. ....	116
Quadro 7 – Resumo dos procedimentos de análise entre os valores medidos e simulados. ...	117
Quadro 8 – Classificação da dificuldade de inteligibilidade da fala segundo a porcentagem de reconhecimento obtida no teste . ....	124
Quadro 9 – Organização das listas para o indivíduo 1. ....	125
Quadro 10 – Organização das listas para o indivíduo 2. ....	125
Quadro 11 – Organização dos resultados do ensaio de densidade. ....	126
Quadro 12 – Valores de porosidade para painéis do tipo WWCB. ....	129
Quadro 13 – Estimativas de resistividade ao fluxo para painéis do tipo WWCB.....	130
Quadro 14 – Resultados para a situação sem painéis. ....	151
Quadro 15 – Resultados para a situação com painéis MDF com espessura de 9,00 mm. ....	152
Quadro 16 – Resultados para a situação com painéis MDF com espessura de 12,0 mm. ....	152
Quadro 17 – Resultados para a situação com painéis MDF com espessura de 15,0 mm. ....	152
Quadro 18 – Efeito dos painéis tipo MDF na inteligibilidade de fala. ....	153
Quadro 19 – Resultados para a situação com painéis OSB de espessura 8,00 mm. ....	154
Quadro 20 – Resultados para a situação com painéis OSB de espessura 12,0 mm. ....	154
Quadro 21 – Resultados para a situação com painéis OSB de espessura 25,0 mm. ....	154
Quadro 22 – Efeito dos painéis tipo OSB na inteligibilidade de fala.....	156
Quadro 23 – Resultados para a situação com painéis WWCB de espessura 17,0 mm (palha grossa).....	157
Quadro 24 – Resultados para a situação com painéis WWCB de espessura 25,0 mm (palha grossa).....	157
Quadro 25 – Resultados para a situação com painéis WWCB de espessura 50,0 mm (palha grossa).....	157
Quadro 26 – Resultados para a situação com painéis WWCB de espessura 25,0 mm (palha superfina).....	157
Quadro 27 – Semelhança entre valores medidos e simulados quanto ao $T_{20}$ em 500 Hz. ....	172
Quadro 28 – Semelhança entre valores medidos e simulados quanto ao $T_{20}$ em 1000 Hz. ...	173
Quadro 29 – Semelhança entre valores medidos e simulados quanto ao $T_{20}$ em 2000 Hz. ...	173
Quadro 30 – Alterações observadas entre diferentes cenários quanto à Definição considerando JND.....	175
Quadro 31 – Semelhança entre valores medidos e simulados de Definição considerando JND. ....	176
Quadro 32 – Resultados de IPRF para cada assento na sala sem condicionamento acústico.	191
Quadro 33 – Teste de Kruskal-Wallis entre os indivíduos na sala sem condicionamento (continua).....	191
Quadro 34 – Resultados de IPRF para cada assento na sala com condicionamento acústico. ....	192
Quadro 35 – Teste de Kruskal-Wallis entre os indivíduos na sala com condicionamento (continua).....	193
Quadro 36 – Comparação de IPRF para o assento A. ....	195

Quadro 37 – Comparação de IPRF para o assento B. ....	195
Quadro 38 – Comparação de IPRF para o assento C. ....	196
Quadro 39 – Comparação de IPRF para o assento D. ....	197
Quadro 40 – Coeficientes de absorção utilizados na modelagem acústica (continua).....	229
Quadro 41 – Coeficientes de espalhamento utilizados na modelagem acústica (continua) ...	230
Quadro 42 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 1.....	245
Quadro 43 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 2.....	245
Quadro 44 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 3.....	245
Quadro 45 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 4.....	246
Quadro 46 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 5.....	246
Quadro 47 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 6.....	246
Quadro 48 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 7.....	247
Quadro 49 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 8.....	247
Quadro 50 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 9.....	247
Quadro 51 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 10.....	248
Quadro 52 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 11.....	248
Quadro 53 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 12.....	249
Quadro 54 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 13.....	249
Quadro 55 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 14.....	250
Quadro 56 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 15.....	250
Quadro 57 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 16.....	251
Quadro 58 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 17.....	251
Quadro 59 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 18.....	252

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pegada de carbono dos painéis em estudo.....	29
Tabela 2 – Coeficientes de ponderação para o MTI.....	57
Tabela 3 – Resultados da busca por palavras-chave no <i>Scopus</i> . ....	68
Tabela 4 – Faixas de erro para o coeficiente de absorção medido no tubo de impedância.....	84
Tabela 5 – Exemplo - valores calculados de STI para a condição sem painel.....	105
Tabela 6 – Valores sugeridos para o coeficiente de espalhamento. ....	110
Tabela 7 – Valores de NPS RE para cálculo do dBNA.....	124
Tabela 8 – <i>P-valores</i> obtidos no teste de Shapiro-Wilk para absorção sonora. ....	131
Tabela 9 – Valores NRC para cada painel.....	139
Tabela 10 – Valores de isolamento com correções espectrais. ....	150
Tabela 11 – Diminuição no NPS entre os assentos. ....	161
Tabela 12 – Distância crítica para diferentes condicionamentos. ....	163
Tabela 13 – Cálculo dos modos acústicos para o assento <i>A</i> . ....	166
Tabela 14 – Cálculo dos modos acústicos para o assento <i>B</i> . ....	167
Tabela 15 – Cálculo dos modos acústicos para o assento <i>C</i> . ....	167
Tabela 16 – Cálculo dos modos acústicos para o assento <i>D</i> .....	168
Tabela 17 – Valores medidos do tempo de reverberação na sala de aula. ....	168
Tabela 18 – Incertezas de medições do TR. ....	169
Tabela 19 – Valores simulados do tempo de reverberação na sala de aula.....	169
Tabela 20 – Valores medidos para Definição em diferentes cenários.....	174
Tabela 21 – Valores simulados para Definição em diferentes cenários.....	175
Tabela 22 – Desvios-padrões entre valores medidos e simulados.....	176
Tabela 23 – Diferenças entre os valores de Definição simulados para diferentes orientações dos compósitos. ....	187
Tabela 24 – Valores de Definição simulados para diferentes combinações de painéis WWCB. ....	187
Tabela 25 – Valores de EDT simulados para diferentes combinações de painéis WWCB.....	188
Tabela 26 – Quantidade de diferenças mínimas perceptíveis por receptor. ....	189
Tabela 27 – Densidade das amostras de painel tipo MDF – 9,00 mm. ....	254
Tabela 28 – Densidade das amostras de painel tipo MDF – 12,0 mm. ....	254
Tabela 29 – Densidade das amostras de painel tipo MDF – 15,0 mm. ....	255
Tabela 30 – Densidade das amostras de painel tipo OSB – 8,00 mm. ....	255
Tabela 31 – Densidade das amostras de painel tipo OSB – 12,0 mm. ....	256
Tabela 32 – Densidade das amostras de painel tipo OSB – 25,0 mm. ....	256
Tabela 33 – Densidade das amostras de painel tipo WWCB – 17,0 mm com palha grossa. .	257
Tabela 34 – Densidade das amostras de painel tipo WWCB – 25,0 mm com palha grossa. .	257
Tabela 35 – Densidade das amostras de painel tipo WWCB – 25,0 mm com palha superfina. ....	258
Tabela 36 – Densidade das amostras de painel tipo WWCB – 50,0 mm com palha grossa ..	258
Tabela 37 – Porosidade das amostras de painel tipo WWCB – 17,0 mm com palha grossa. .	260
Tabela 38 – Porosidade das amostras de painel tipo WWCB – 25,0mm com palha grossa. .	260
Tabela 39 – Porosidade das amostras de painel tipo WWCB – 25,0mm com palha superfina. ....	261
Tabela 40 – Porosidade das amostras de painel tipo WWCB – 50,0mm com palha grossa. ..	261
Tabela 41 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário sem painéis em 500 Hz. .	265
Tabela 42 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário sem painéis em 1000 Hz. .	266
Tabela 43 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário sem painéis em 2000 Hz. .	266



Tabela 44 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com MDF - 9,00 mm em 500 Hz. ....	267
Tabela 45 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com MDF - 9,00 mm em 1000 Hz. ....	268
Tabela 46 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com MDF - 9,00 mm em 2000 Hz. ....	269
Tabela 47 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com MDF - 12,0 mm em 500 Hz. ....	270
Tabela 48 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com MDF - 12,0 mm em 1000 Hz. ....	271
Tabela 49 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com MDF - 12,0 mm em 2000 Hz. ....	272
Tabela 50 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com MDF - 15,0 mm em 500 Hz. ....	272
Tabela 51 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com MDF - 15,0 mm em 1000 Hz. ....	273
Tabela 52 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com MDF - 15,0 mm em 2000 Hz. ....	274
Tabela 53 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com OSB - 8,00 mm em 500 Hz. ....	275
Tabela 54 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com OSB - 8,00 mm em 1000 Hz. ....	276
Tabela 55 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com OSB - 8,00 mm em 2000 Hz. ....	277
Tabela 56 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com OSB - 12,0 mm em 500 Hz. ....	278
Tabela 57 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com OSB - 12,0 mm em 1000 Hz. ....	279
Tabela 58 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com OSB - 12,0 mm em 2000 Hz. ....	280
Tabela 59 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com OSB - 25,0 mm em 500 Hz. ....	281
Tabela 60 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com OSB - 25,0 mm em 1000 Hz. ....	282
Tabela 61 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com OSB - 25,0 mm em 2000 Hz. ....	282
Tabela 62 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com WWCB - 17,0 mm em 500 Hz. ....	283
Tabela 63 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com WWCB - 17,0 mm em 1000 Hz. ....	284
Tabela 64 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com WWCB - 17,0 mm em 2000 Hz. ....	285
Tabela 65 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com WWCB - 25,0 mm TKS em 500 Hz. ....	285
Tabela 66 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com WWCB - 25,0 mm TKS em 1000 Hz. ....	286
Tabela 67 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com WWCB - 25,0 mm TKS em 2000 Hz. ....	287
Tabela 68 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com WWCB - 25,0 mm SFS em 500 Hz. ....	288

Tabela 69 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com WWCB - 25,0 mm SFS em 1000 Hz.....	289
Tabela 70 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com WWCB - 25,0 mm SFS em 2000 Hz.....	289
Tabela 71 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com WWCB - 50,0 mm em 500 Hz. ....	290
Tabela 72 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com WWCB - 50,0 mm em 1000 Hz. ....	290
Tabela 73 – Valores medidos e simulados para $T_{20}$ (s) no cenário com WWCB - 50,0 mm em 2000 Hz. ....	291
Tabela 74 – Valores simulados de Definição para o cenário A.....	293
Tabela 75 – Valores simulados de Definição para o cenário A'.....	293
Tabela 76 – Valores simulados de Definição para o cenário B.....	293
Tabela 77 – Valores simulados de Definição para o cenário B'.....	293
Tabela 78 – Valores simulados de Definição para o cenário C.....	294
Tabela 79 – Valores simulados de Definição para o cenário C'.....	294
Tabela 80 – Valores simulados de Definição para o cenário D.....	294
Tabela 81 – Valores simulados de Definição para o cenário D'.....	294
Tabela 82 – Valores simulados de Definição para o cenário E.....	295
Tabela 83 – Valores simulados de Definição para o cenário E'.....	295
Tabela 84 – Valores simulados de Definição para o cenário F.....	295
Tabela 85 – Valores simulados de Definição para o cenário F'.....	295
Tabela 86 – Valores simulados de Definição para o cenário G.....	296
Tabela 87 – Valores simulados de Definição para o cenário G'.....	296
Tabela 88 – Valores simulados de Definição para o cenário H.....	296
Tabela 89 – Valores simulados de Definição para o cenário H'.....	296
Tabela 90 – Valores simulados de Definição para o cenário I.....	297
Tabela 91 – Valores simulados de Definição para o cenário I'.....	297
Tabela 92 – Valores simulados de Definição para o cenário J.....	297
Tabela 93 – Valores simulados de Definição para o cenário J'.....	297
Tabela 94 – Valores simulados de Definição para os cenários K a R.....	298
Tabela 95 – Valores simulados de Definição para os cenários S a V. ....	299

## LISTA DE SIGLAS/SÍMBOLOS

$\alpha$	Coeficiente de absorção sonora.
$\alpha_N$	Coeficiente de absorção sonora de incidência normal.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ANSI	<i>American National Standards Institute.</i>
ASA	<i>Acoustical Society of America.</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
ACV	Análise do ciclo de vida.
BRIR	<i>Binaural Room Impulse Response.</i>
CO <sub>2</sub> eq	Equivalente a dióxido de carbono.
COMEP	Comitê de Ética e Pesquisa da Unicentro.
C <sub>50</sub>	Clareza.
D <sub>50</sub>	Definição.
dB	Decibel.
dBNA	Decibel Nível de Audição.
EDT	<i>Early Decay Time.</i>
EN	<i>European Norme.</i>
$f$	Frequência.
FFT	<i>Fast Fourier Transform.</i>
Ø	Diâmetro.
Hz	Hertz.
IC	Intervalo de Confiança.
IEC	<i>International Electrotechnical Commission.</i>
IPRF	Índice Percentual de Reconhecimento de Fala.
ISO	<i>International Organization for Standardization.</i>
ITA	<i>Institute of Technical Acoustics.</i>
LCIA	<i>Life Cycle Impact Assessment.</i>
m	Metro.
m <sup>2</sup>	Metro quadrado.
m <sup>3</sup>	Metro cúbico.
MDF	<i>Medium Density Fiberboard.</i>
MEDS1	Grupo de valores medidos para a fonte na posição S1.

MEDS2	Grupo de valores medidos para a fonte na posição S2.
MEDPROF	Grupo de valores simulados para a fonte acima da mesa do professor.
<i>Mic1</i>	Posição de microfone número 1.
<i>Mic2</i>	Posição de microfone número 2.
<i>Mic3</i>	Posição de microfone número 3.
<i>Mic4</i>	Posição de microfone número 4.
<i>Mic5</i>	Posição de microfone número 5.
<i>Mic6</i>	Posição de microfone número 6.
<i>Mic7</i>	Posição de microfone número 7.
<i>Mic8</i>	Posição de microfone número 8.
mm	Milímetro.
MTF	<i>Modulated Transfer Function.</i>
NBR	Norma brasileira.
NC	<i>Noise Criterion.</i>
NPS	Nível de Pressão Sonora.
NRC	<i>Noise Reduction Coefficient.</i>
OSB	<i>Oriented Strand Board.</i>
PPGEC-CT	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba.
RASTI	<i>Room Acoustics Speech Transmission Index.</i>
R	Índice de Redução Sonora.
R'	Índice de Redução Sonora Aparente.
R <sub>w</sub>	Índice de Redução Sonora Ponderado.
RCD	Resíduos da Construção e Demolição.
RL <sub>Aeq</sub>	Referencial de Nível Sonoro Equivalente Ponderado no filtro A.
RL <sub>NC</sub>	Referencial de Nível Sonoro NC.
RIR	<i>Room Impulse Response.</i>
S1	Posição de fonte sonora número 1.
S2	Posição de fonte sonora número 2.
SIMS1	Grupo de valores simulados para a fonte na posição S1.
SIMS2	Grupo de valores simulados para a fonte na posição S2.
SIMPROF	Grupo de valores simulados para a fonte acima da mesa do professor.
SFS	<i>Superfine Straw.</i>
SLIT	Sistema Linear Invariante no Tempo.
SNR	<i>Signal-to-noise ratio.</i>

STI	<i>Speech Transmission Index.</i>
TNT	Tecido não-tecido.
TDF	Transformada Discreta de Fourier.
TKS	<i>Thick Straw.</i>
TR	Tempo de reverberação.
$T_{20}$	Tempo obtido a partir do tempo no qual a curva de decaimento primeiro alcança 5dB e depois 25dB abaixo do instante inicial.
$T_{60}$	Tempo de reverberação com decaimento de 60dB.
Unicentro	Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná.
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
WWCB	<i>Wood-wool Cement Board.</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>26</b>
1.1	CONTEXTO DO PROBLEMA .....	28
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	29
1.3	OBJETIVOS .....	30
1.3.1	<i>Objetivo Geral</i> .....	30
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i> .....	30
1.4	JUSTIFICATIVAS .....	30
1.5	ESTRUTURA DA TESE .....	32
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>33</b>
2.1	REFERENCIAL TEÓRICO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS .....	33
2.1.1	<i>Inteligibilidade</i> .....	33
2.1.2	<i>Reflexão Sonora</i> .....	34
2.1.3	<i>Absorção Sonora</i> .....	34
2.1.4	<i>Modos acústicos de uma sala retangular</i> .....	40
2.1.5	<i>Modelagem acústica de sala</i> .....	44
2.1.6	<i>Resposta ao Impulso, Sistema Linear Invariante no Tempo e Convolução</i> .....	48
2.1.7	<i>Deconvolução</i> .....	51
2.1.8	<i>Técnicas de Medição da Resposta ao Impulso</i> .....	52
2.1.9	<i>Tempo de Reverberação</i> .....	53
2.1.10	<i>Clareza e Definição</i> .....	54
2.1.11	<i>Speech Transmission Index (STI)</i> .....	55
2.1.12	<i>Índice de Redução Sonora</i> .....	58
2.2	REFERENCIAL TEÓRICO DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA .....	60
2.2.1	<i>Medium Density Fiberboard</i> .....	60
2.2.2	<i>Oriented Strand Board</i> .....	60
2.2.3	<i>Wood-Wool Cement Board</i> .....	60
2.2.4	<i>Coeficientes de Absorção Sonora de Incidência Normal para Compósitos de Madeira</i> .....	62
2.3	REFERENCIAL TEÓRICO DOS TESTES ESTATÍSTICOS .....	63
2.3.1	<i>Verificação da Distribuição Normal</i> .....	63
2.3.2	<i>Definição de Intervalos de Confiança</i> .....	64
2.3.3	<i>Métodos de Análise de Variância e Testes de Comparações Múltiplas</i> .....	65
2.4	REVISÃO SISTEMÁTICA .....	68
2.5	ESTUDOS RELACIONADOS AO TEMA DA PESQUISA .....	69
2.5.1	<i>Condicionamento Acústico</i> .....	69

2.5.2	<i>Acústica de Salas de Aula</i> .....	72
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>75</b>
3.1	PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	75
3.2	PRIMEIRA ETAPA: DEFINIÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA .....	75
3.2.1	<i>Realização do Ensaio de Densidade</i> .....	77
3.2.2	<i>Realização do Ensaio de Porosidade e Estimativas de Resistividade ao Fluxo</i> .....	79
3.3	SEGUNDA ETAPA: DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO SONORA .....	80
3.3.1	<i>Preparação das Amostras</i> .....	81
3.3.2	<i>Realização do Ensaio de Absorção Sonora (Incidência Normal) – <math>\alpha_N</math></i> .....	82
3.3.3	<i>Análise Estatística e Determinação do Valor Final</i> .....	84
3.4	TERCEIRA ETAPA: ENSAIO DE ISOLAÇÃO SONORA .....	85
3.5	QUARTA ETAPA: CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DA SALA DE AULA ....	94
3.5.1	<i>Escolha da Sala de Aula</i> .....	95
3.5.2	<i>Medição das Respostas ao Impulso</i> .....	99
3.5.3	<i>Medição de Respostas ao Impulso Biauriculares</i> .....	102
3.5.4	<i>Gravação de Listas Foneticamente Balanceadas</i> .....	103
3.5.5	<i>Gravação do Áudio Arizona Travelogue Passage</i> .....	104
3.5.6	<i>Análise Estatística das Medições do STI</i> .....	105
3.6	QUINTA ETAPA: SIMULAÇÃO COM ACÚSTICA GEOMÉTRICA .....	106
3.7	SEXTA ETAPA: PREPARAÇÃO DOS ÁUDIOS PARA A SÉTIMA ETAPA.....	117
3.8	SÉTIMA ETAPA: ANÁLISES SUBJETIVAS.....	122
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>126</b>
4.1	ENSAIO DE DENSIDADE .....	126
4.1.1	<i>Painéis do Tipo MDF</i> .....	126
4.1.2	<i>Painéis do Tipo OSB</i> .....	128
4.1.3	<i>Painéis do Tipo WWCB</i> .....	129
4.2	ENSAIO DE POROSIDADE E ESTIMATIVAS DE RESISTIVIDADE AO FLUXO . .....	129
4.3	ENSAIO DE ABSORÇÃO SONORA .....	131
4.3.1	<i>Painéis do Tipo MDF</i> .....	131
4.3.2	<i>Painéis do Tipo OSB</i> .....	134
4.3.3	<i>Painéis do Tipo WWCB</i> .....	136
4.4	ENSAIO ISOLAÇÃO SONORA .....	140
4.4.1	<i>Blocos com RCD</i> .....	140
4.4.2	<i>Painéis do Tipo OSB</i> .....	141
4.4.3	<i>Painéis do Tipo WWCB</i> .....	145
4.5	ENSAIOS QUANTITATIVOS DE INTELIGIBILIDADE DE FALA .....	151

4.5.1	<i>Ensaaios na Sala de Aula sem Condicionamento Acústico</i> .....	151
4.5.2	<i>Ensaaios na Sala de Aula com Painéis Tipo MDF</i> .....	152
4.5.3	<i>Ensaaios na Sala de Aula com Painéis Tipo OSB</i> .....	154
4.5.4	<i>Ensaaios na Sala de Aula com Painéis Tipo WWCB</i> .....	156
4.5.5	<i>Comparação dos Valores de STI entre os Diferentes Painéis</i> .....	159
4.5.6	<i>Diminuição do Nível de Pressão Sonora entre os Assentos</i> .....	160
4.6	<b>RESULTADOS MEDIDOS E SIMULADOS: TEMPO DE REVERBERAÇÃO E DEFINIÇÃO</b> .....	165
4.6.1	<i>Análise dos Modos Acústicos nas Respostas aos Impulsos Medidas</i> .....	165
4.6.2	<i>Valores Obtidos para o Tempo de Reverberação</i> .....	168
4.6.3	<i>Análise Estatística entre Valores Medidos e Simulados para o Tempo de Reverberação</i> .....	172
4.6.4	<i>Valores Obtidos para a Definição</i> .....	174
4.6.5	<i>Análises entre os Valores Medidos e Simulados pelas Diferenças Mínimas Perceptíveis</i> .....	176
4.7	<b>RESULTADOS SIMULADOS COM DIFERENTES CENÁRIOS</b> .....	186
4.8	<b>ENSAIOS SUBJETIVOS DE INTELIGIBILIDADE DE FALA</b> .....	190
4.8.1	<i>Sala de Aula sem Painéis</i> .....	190
4.8.2	<i>Sala de Aula com Painéis de Palha Grossa de Madeira com Cimento (Espessura de 50,0 mm)</i> .....	192
4.8.3	<i>Comparação das Situações em Cada Assento</i> .....	194
5	<b>CONCLUSÕES</b> .....	199
5.1	<b>PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	202
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	203
	<b>APÊNDICE A – ALGORITMO PARA CÁLCULO DO TEMPO DO COEFICIENTE DE REFLEXÃO NO TUBO DE IMPEDÂNCIA</b> .....	217
	<b>APÊNDICE B – ALGORITMO PARA CÁLCULO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO NA CÂMARA REVERBERANTE</b> .....	219
	<b>APÊNDICE C – ALGORITMO PARA CÁLCULO DAS PARTES REAL E IMAGINÁRIA DA IMPEDÂNCIA NORMALIZADA AO AR</b> .....	221
	<b>APÊNDICE D – ALGORITMO PARA CÁLCULO DO ÍNDICE DE ABSORÇÃO SONORA COM INCIDÊNCIA ALEATÓRIA E SUA ANÁLISE ESTATÍSTICA</b> .....	225
	<b>APÊNDICE E – COEFICIENTES DE ABSORÇÃO E ESPALHAMENTO ADOTADOS NA MODELAGEM DE ACÚSTICA GEOMÉTRICA</b> .....	228
	<b>APÊNDICE F – ALGORITMO PARA ANÁLISE DAS DIFERENÇAS MÍNIMAS PERCEPTÍVEIS ENTRE OS VALORES DE DEFINIÇÃO (D<sub>50</sub>) E EDT</b> .....	232
	<b>APÊNDICE G – ALGORITMO PARA REDUÇÃO DA AMPLITUDE DO ÁUDIO RESULTANTE DA CONVOLUÇÃO PARA A AMPLITUDE MEDIDA DO ÁUDIO GRAVADO</b> .....	234
	<b>APÊNDICE H – RESULTADOS DOS TESTES DE IPRF</b> .....	244



<b>APÊNDICE I – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DENSIDADE.....</b>	<b>253</b>
<b>APÊNDICE J – DETERMINAÇÃO DAS POROSIDADES DOS PAINÉIS DE PALHA DE MADEIRA COM CIMENTO .....</b>	<b>259</b>
<b>APÊNDICE K – ALGORITMO PARA DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE CONFIANÇA (POR FREQUÊNCIA) PARA OS ENSAIOS DE ABSORÇÃO SONORA COM INCIDÊNCIA NORMAL.....</b>	<b>262</b>
<b>APÊNDICE L – ANÁLISE ESTATÍSTICA ENTRE VALORES MEDIDOS E SIMULADOS PARA O TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T<sub>20</sub>).....</b>	<b>264</b>
<b>APÊNDICE M – COMPARAÇÕES ENTRE OS VALORES SIMULADOS DE DEFINIÇÃO (D<sub>50</sub>) PARA CENÁRIOS COM DIFERENTES ORIENTAÇÕES DOS COMPÓSITOS NAS PAREDES .....</b>	<b>292</b>
<b>ANEXO A - LISTAS DE PALAVRAS FONETICAMENTE BALANCEADAS.....</b>	<b>300</b>
<b>ANEXO B – RELATÓRIO TÉCNICO SOBRE TRIAGEM AUDIOMÉTRICA .....</b>	<b>303</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Já é sabido de trabalhos pioneiros que as características físicas de uma sala de aula são relevantes para o processo de aprendizagem, como as suas dimensões e os materiais utilizados como acabamentos (PEKKARINEN; VIIJANEN, 1991). No Brasil, pesquisas como a de Zannin e Zwirtes (2008) e Ribas et al. (2011) mostram como algumas escolas não possuem um ambiente acústico adequado ao processo de aprendizagem, seja devido ao ruído ambiental, ou às características construtivas delas.

Martins et al. (2007) identificaram professores sujeitos à surdez ocupacional de uma determinada amostra, relacionando como válida a relação da perda auditiva induzida pelo ruído (PAIR) para esta profissão.

Para Araújo et al. (2008), em um contexto pedagógico, espera-se que a voz seja clara, e com boa sonoridade; com ritmo e velocidade adequados, coordenação com a respiração e boa projeção, o que reflete o equilíbrio das estruturas do trato vocal. Todavia, as condições ambientais para o uso adequado da voz não são sempre apropriadas. Os autores citam as condições do ambiente de trabalho como um dos efeitos que podem causar o abuso vocal por parte do docente, ou seja, a acústica da sala de aula está diretamente relacionada com o uso da voz pelo professor.

Segundo Gelfand (2016), um ruído excessivo em um ambiente faz com que a intensidade da voz também aumente, o que é chamado de efeito Lombard. Em salas de aula este efeito pode existir em função da má qualidade acústica do ambiente, o que gera um aumento dos níveis de pressões sonoras no ambiente e do abuso vocal do professor (TIESLER et al., 2015).

Sobotova et al. (2000), em seus estudos com discentes universitários, concluíram que o ruído ambiental pode provocar interferências no desenvolvimento das atividades de trabalho intelectuais, assim como o trabalho de Klatte et al. (2010) relata que a qualidade acústica de uma sala de aula é essencial para o bom desempenho acadêmico de crianças, devido à redução das influências de ruídos nas atividades intelectuais.

Existem dois fatores principais que contribuem para a atenuação da incidência do ruído de tráfego na inteligibilidade de uma sala de aula: o posicionamento da sala de aula em relação às fontes sonoras externa (ruído ambiental), e pela minimização dos efeitos destes ruídos dentro da sala de aula, chamados de ruído de fundo (SHIELD; DOCKRELL, 2008).

Além dos ruídos de fundo, segundo Knecht et al. (2002), faz-se necessária a adequação do tempo de reverberação e da relação sinal-ruído, que é definido como a razão da intensidade do sinal (que pode ser a voz do professor) e o ruído de fundo. O tempo de reverberação pode ser controlado por meio da adição de absorvedores, como painéis verticais ou carpetes, sendo que a inserção de carpetes pode necessitar da permissão de autoridades sanitárias. Salas de aula com elevado ruído de fundo e/ou elevado tempo de reverberação reduzem a relação sinal ruído, o que dificulta a inteligibilidade (KNECHT et al., 2002).

O condicionamento acústico do ambiente construído pode ser alcançado por meio da análise da forma geométrica da sala e seu volume, adequados à sua utilização, também com o tratamento das superfícies, que envolve a escolha de absorvedores e/ou difusores, com suas combinações e disposições corretas (COX; D'ANTONIO, 2017).

O ambiente construído, que inclui edifícios e infraestrutura, envolve grandes quantidades de materiais e consumos de energias, sendo um componente essencial do desenvolvimento econômico e social (HUANG et al., 2018). A indústria da construção civil é responsável pela diminuição considerável dos recursos naturais e gera uma quantidade substancial de resíduos (HOSSAIN; POON, 2018).

A redução das emissões de CO<sub>2</sub> no setor da construção é um elemento essencial para o alcance das metas de conservação de energia e da redução de emissões em todo o mundo (SANDANAYAKE et al., 2019).

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma técnica regulamentada pelas normas ABNT NBR ISO 14040:2014 e ABNT NBR ISO 14044:2014 que compila as entradas e saídas de um produto ou serviço, quantificando sua pegada de carbono. A ACV adota uma abordagem abrangente e sistêmica da avaliação ambiental e, por esse motivo, é crescente o interesse em incorporar métodos de ACV na construção civil, apoiando decisões para a seleção de produtos ambientalmente preferíveis, bem como para avaliação e otimização dos processos de construção (ASDRUBALI et al., 2013; CABEZA et al., 2014). A avaliação de impacto do ciclo de vida (LCIA) é a primeira etapa do processo de cálculo da ACV, tendo como resultado a pegada de carbono.

Segundo Caro (2019) a pegada de carbono é uma ferramenta fácil de aplicar para monitorar e quantificar as emissões de gases de efeito estufa, além de verificar programas de mitigação/redução em diferentes escalas. É capaz de capturar a quantidade total de emissões de gases de efeito estufa causada direta e indiretamente por um país, uma atividade ou acumulada ao longo da vida útil de um produto. Sua unidade é o CO<sub>2</sub>eq (equivalente a dióxido de carbono).

Huang et al. (2018) descreveram que as três principais oportunidades centrais para reduzir as emissões de carbono de um setor da construção são o uso de materiais e serviços de baixo carbono incorporados na perspectiva do ciclo de vida; o aumento da eficiência energética das máquinas de construção e a promoção do uso de energia renovável.

Um dos materiais com LCIA reduzido na construção civil é a madeira. Por natureza, a madeira é feita de carbono capturado na atmosfera durante o crescimento das árvores. Os efeitos da substituição e do seqüestro são os motivos pelos quais o impacto de carbono nos produtos de madeira é favorável (BERGMAN, 2014).

## 1.1 CONTEXTO DO PROBLEMA

Pesquisas em salas de aulas brasileiras indicam a má qualidade acústica das mesmas, relacionando esta característica, dentre outros motivos, com o condicionamento acústico ineficiente ou ausente (ZANNIN; ZWIRTES, 2008; ZANNIN; FERREIRA, 2009; RIBAS et al., 2011; RABELO et al., 2014). Tal característica implica na redução da inteligibilidade de fala, o que será demonstrado na revisão de literatura da seção 2.4.

O condicionamento acústico adequado de um ambiente não deve ser apenas focado nos parâmetros acústicos, mas também no potencial de sustentabilidade dos materiais utilizados para este fim. Em construções típicas brasileiras, Evangelista et al. (2018) descreveram o concreto, o aço e os revestimentos cerâmicos como os materiais de maior impacto ambiental, com repercussões nos subsistemas de estrutura, alvenaria e revestimento. Crippa et al. (2018) calcularam uma pegada de carbono de cerca de 335 kg de CO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup> (50,3kg de CO<sub>2</sub>eq/0,15 metros de espessura) para uma vedação construída com blocos cerâmicas e revestida com gesso, e cerca de 302 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup> (45,3kg CO<sub>2</sub>eq /0,15m de espessura) para uma vedação construída com blocos de concreto e revestimento argamassado. Estes sistemas de vedações são comumente construídos em edifícios brasileiros.

Estokova et al. (2017) relataram que paredes verticais e divisórias representavam 28,3% da pegada de carbono estimada para vinte casas de alvenaria convencionais construídas na Europa central, ficando atrás das fundações, que totalizaram 57,8% de representatividade na pegada de carbono.

Neste trabalho serão analisadas as propriedades acústicas de três tipos de compósitos de madeira (construídos com madeira brasileira): *Medium Density Fiberboard* (MDF), *Oriented Strand Board* e o *Wood-Wool Cement Board* (WWCB), com diferentes espessuras, cujas

características serão apresentadas no capítulo 2. A pegada de carbono dos materiais pode ser apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1 – Pegada de carbono dos painéis em estudo.**

Painel	Quantidade de material, m <sup>3</sup>	Kg CO <sub>2</sub> eq	Fonte
OSB	1,00	127,0	FERRO et al., 2018
MDF	1,00	199,0	PIEKARSKI et al., 2017
WWCB	1,00	194,0	THINKSTEP, 2018

**Fonte: Piekarski et al. (2017); Ferro et al. (2018); Thinkstep (2018).**

Percebe-se que a pegada de carbono dos painéis descritos na Tabela 1 são inferiores aos valores dos sistemas de vedações verticais convencionais brasileiros.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Esta pesquisa limita-se à verificação do condicionamento acústico de uma sala de aula realizado por meio de compósitos de madeira (identificados como absorvedores porosos), como componentes de um sistema de vedação vertical. Além das propriedades da sala de aula condicionada, esta pesquisa também traz ensaios de laboratório dos materiais (como absorção e isolamento sonora), buscando identificar diferentes formas de aplicação dos compósitos em estudo.

A pesquisa foi realizada em uma sala de aula da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ecoville (Curitiba-PR), e as análises complementares foram realizadas na Clínica Escola de Fonoaudiologia da Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná, Campus Irati, sob a aprovação de nº 3.622.185 do Comitê de Ética em Pesquisa da Unicentro (COMEP).

Quanto à contribuição desta pesquisa, ela oferece dados para que projetistas (engenheiros e arquitetos) escolham materiais com uma pegada de carbono reduzida (em relação aos sistemas convencionais) para o condicionamento acústico de ambientes que necessitem de adequação para atividades intelectuais (ou silêncio), tendo uma sala de aula como estudo de caso.

Além da escolha de materiais sustentáveis, a pesquisa apresenta uma forma simples e viável para o condicionamento acústico, que consiste na fixação de painéis nas vedações verticais existentes. Vedações verticais, segundo a norma ABNT NBR 15575-4:2013, são partes da edificação que limitam verticalmente a edificação e seus ambientes, como as fachadas e as paredes ou divisórias internas.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta tese é avaliar diferentes cenários de condicionamentos acústicos de uma sala de aula tratada por meio da adição de diferentes compósitos de madeira nas vedações verticais existentes.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

A pesquisa apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o desempenho acústico de uma sala de aula sem aplicação de condicionamento;
- Demonstrar a viabilidade ambiental e a praticidade de execução de um condicionamento acústico de uma sala de aula utilizando materiais sustentáveis;
- Contrastar os efeitos dos diferentes sistemas de condicionamentos acústicos com critérios objetivos e subjetivos quanto aos parâmetros acústicos;
- Identificar as propriedades de absorção acústica dos compósitos;
- Especificar as propriedades de isolamento acústica dos compósitos em um contexto de sistema de vedação vertical;
- Validar parâmetros acústicos de simulações computacionais com parâmetros medidos em campo.

## 1.4 JUSTIFICATIVAS

Uma condição acústica ruim de uma sala de aula pode ser prejudicial à inteligibilidade da fala. Maxwell e Evans (2000) testaram algumas respostas cognitivas de noventa crianças sob exposição ao ruído em uma sala de aula com e sem painéis absorventes de som. Os resultados mostraram que existe relação entre os níveis internos de ruído e as habilidades das primeiras leituras em crianças pré-escolares. Eles descobriram que o uso da linguagem pelas crianças, e a compreensão dela, era pior em salas de aula barulhentas, e o reconhecimento de letras e números, que é uma das primeiras e mais fundamentais habilidades do aprendizado da leitura, foram afetados negativamente.

Segundo Seltz (2001), a redução do tempo de reverberação com materiais absorventes de som em tetos ou paredes é uma solução para más condições acústicas nas escolas entre outras que visam a diminuição do nível de ruído de fundo. Roy (2016) mostrou que a simples instalação de forros acústicos suspensos melhorou a qualidade acústica das salas de aula em diferentes lugares do mundo. Em seu estudo, alunos e professores tinham uma forte preferência pelas salas de aula melhoradas acusticamente em comparação com as salas de aula padrão.

No Brasil, em um trabalho realizado por Azevedo et al. (2018), salas de aula de uma universidade foram condicionadas acusticamente por meio de forros suspensos e parâmetros qualitativos e quantitativos foram medidos, identificando uma significativa melhora com a adição dos materiais.

Sala e Viljanen (1995) realizaram o condicionamento de acústico de uma sala de aula com painéis absorventes, e concluíram que para se atingir níveis adequados de inteligibilidade foi necessária a colocação de materiais absorventes em duas superfícies, e que somente utilizando o forro ou a parede dos fundos da sala de aula não seria suficiente.

Como as consoantes são um componente importante para a inteligibilidade da fala e ocorrem na largura de banda de 2000 – 6000 Hz, não é adequado usar absorvedores em todo o teto. Forros acústicos podem reduzir excessivamente os sons em altas frequências, característicos das consoantes, resultando no mascaramento destas consoantes de alta frequência pelos sons das vogais de baixa frequência (COX; D'ANTONIO, 2017)

Atualmente, na construção civil, os materiais disponíveis no mercado para tratamentos acústicos baseados na absorção sonora são constituídos de fibras de vidro ou minerais. No entanto, existem cada vez mais preocupações com questões relacionadas à saúde e segurança devido aos potenciais riscos à saúde associados a essas fibras quando expostas ao ser humano, como os efeitos das fibras de materiais minerais ou de vidro nos pulmões e olhos quando suspensas no ar (ZULKIFLI et al., 2008).

Apesar do Brasil não possuir regulamentações específicas para a inteligibilidade de fala em salas de aula, tais análises se fazem importantes devido à relação direta do condicionamento acústico na saúde e qualidade de vida de docentes e discentes. A norma ABNT NBR 10152:2017 apresenta apenas recomendações quanto à níveis de pressões sonoras.

Este trabalho, portanto, buscou uma solução sustentável de condicionamento acústico apenas utilizando as vedações verticais disponíveis em uma sala aula, de uma forma a alterar acusticamente um ambiente já construído, sem ocasionar grandes modificações construtivas.

## 1.5 ESTRUTURA DA TESE

A tese é composta por cinco capítulos, dispostos da seguinte forma:

- O primeiro capítulo consiste na introdução e a delimitação do tema, apresentando o contexto do problema, os objetivos e a justificativa da pesquisa;
- O segundo capítulo é baseado no referencial teórico do trabalho, com conceitos e definições dos materiais utilizados, das diferentes propriedades acústicas que foram avaliadas e dos procedimentos para obtenções dos dados. Também é identificada nesta etapa a revisão de literatura do trabalho, realizada de forma sistemática, com artigos que convergem com o tema da tese;
- O capítulo três trata da classificação da metodologia da pesquisa, dividindo-a em sete etapas, que vão desde a caracterização do material e do local de estudo até a análise subjetiva do ambiente condicionado;
- O quarto capítulo apresenta os resultados das análises quantitativas referentes aos ensaios físicos (densidade e porosidade) e aos ensaios acústicos (absorção sonora; isolamento sonora; tempos de reverberação, definições e índices de transmissão de fala na sala de aula). Relata também os resultados das simulações acústicas com diferentes cenários de condicionamento acústico e apresenta os resultados dos testes subjetivos baseados no índice percentual de reconhecimento de fala;
- O capítulo cinco é composto pelas conclusões do trabalho e das sugestões para trabalhos futuros.



## 2 ESTADO DA ARTE

Este capítulo tem por objetivo apresentar a fundamentação teórica da pesquisa, dividida em três partes: referencial teórico, revisão sistemática e revisão bibliográfica.

O referencial teórico apresenta conceitos e definições de assuntos da literatura considerados relevantes para o desenvolvimento da tese.

A revisão sistemática demonstra a forma com que os principais trabalhos sobre o tema da tese foram buscados, elencando os resultados encontrados no banco de dados *Scopus*.

A revisão bibliográfica relaciona os principais estudos da área e posiciona a tese em relação a estes trabalhos

### 2.1 REFERENCIAL TEÓRICO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS

São descritas nesta etapa as definições das principais propriedades acústicas que foram avaliadas na pesquisa. Buscou-se por uma definição objetiva de cada propriedade, porém é devido informar que todas possuem suas peculiaridades e são constante objeto de pesquisa na área da Acústica.

Esta etapa também classifica os diferentes painéis de madeira que foram utilizados na pesquisa, descrevendo sobre seus processos de produção e os fins que se destinam.

#### 2.1.1 Inteligibilidade

A inteligibilidade de um som é a capacidade dele de ser entendido. A inteligibilidade de fala é uma medida direta da fração de palavras (ou sentenças) captadas por um ouvinte (LONG, 2014). Se a palavra falada ou diálogo for ininteligível, muito do conteúdo poderá ser perdido.

A diferença entre um discurso inteligível e um discurso audível é que o primeiro envolve uma discriminação e identificação complexas, enquanto o segundo é simplesmente uma discriminação, de presença ou ausência (MILLER et al., 1951).

A classificação de uma unidade de fala como inteligível ocorre quando é possível para um ouvinte comum com audição normal distingui-la de um conjunto de unidades alternativas. Uma unidade de fala pode ser qualquer combinação de ruídos vocais, que inclui fonemas, sílabas, palavras, frases e/ou sentenças (MILLER et al., 1951).

### 2.1.2 Reflexão Sonora

Ao se propagar em uma sala, uma frente de onda encontra várias superfícies em seu caminho. A reflexão especular ocorre quando o raio sonoro refletido forma o mesmo ângulo com a linha normal à superfície da amostra (BRANDÃO, 2016).

Uma reflexão difusa ocorre quando uma onda incidente é refletida para diversas direções, assim como na ótica. Do ponto de vista da difração, existem três fenômenos com os quais há um grau de preocupação em acústica de salas: a reflexão difusa em superfícies irregulares (comprimentos de onda iguais ou menores que a profundidade das irregularidades superficiais do aparato, levando às ondas que são refletidas em diferentes tempos); transmissão em torno de superfícies finitas (comprimento de onda muito maior que as dimensões do aparato, fenômeno observado em barreiras acústicas) e a reflexão difusa nas bordas de superfícies finitas (BRANDÃO, 2016)

As primeiras reflexões de um som caracterizam-se por chegar aos ouvidos do ouvinte logo (aproximadamente 50 ms) após o som direto (ARWEILER; BUCHHOLZ, 2011). No estudo de Arweiler e Buchholz (2011), eles descobriram que, do ponto de vista acústico da sala, as paredes devem fornecer o mínimo de absorção possível às reflexões iniciais em frequências entre 1 kHz e 4 kHz, aumentando a eficiência das reflexões iniciais para obter uma melhor inteligibilidade da fala. Por outro lado, aumentar o nível das reflexões iniciais também aumentaria o nível das reflexões tardias, o que poderia diminuir a inteligibilidade da fala.

Reflexões demoradas e reverberação persistente, junto com o ruído de fundo, diminuem a inteligibilidade. Em uma situação de fala, as reflexões sonoras de paredes, telhados e tetos podem gerar um efeito negativo na inteligibilidade da fala, seja através de reflexões individuais muito atrasadas ou como parte da acumulação do ruído de fundo (LONG, 2014).

### 2.1.3 Absorção Sonora

A absorção sonora é uma relação da energia transmitida e absorvida por um elemento pela energia incidente neste elemento (LONG, 2014). Se 55,0% da energia de um som incidente é absorvida, o coeficiente de absorção ( $\alpha$ ) é de 0,55. Um metro quadrado deste material fornece 0,55 unidades de absorção. Uma janela aberta é considerada um absorvedor perfeito porque a passagem de som através dela nunca volta para a sala, logo seu coeficiente de absorção é de 1,00 (EVEREST, 2001).

Palomar et al. (2015) mediram o coeficiente de absorção sonora para diferentes traços de argamassas (compostas de cimento e cal), obtendo um NRC com valor máximo de 0,10 para uma argamassa de densidade igual à 1,59 g/cm<sup>3</sup>, diâmetro de 96 ± 2 mm com espessura de 40 ± 2 mm. O revestimento argamassado é uma das formas de revestimentos mais utilizadas no Brasil.

A absorção sonora de um material poroso (e para painéis de madeira também) está relacionada com sua resistividade ao fluxo, densidade, porosidade, tortuosidade e espessura (WASSILIEFF, 1996; WANG; TORNG, 2001). Cox e D'Antonio (2017) citam que as propriedades mais importantes para a caracterização de um material poroso são a resistividade ao fluxo e a porosidade, e que outras propriedades, como os comprimentos característicos viscoso e térmico, são úteis para modelos matemáticos de predição do coeficiente de absorção sonora. O Quadro 1 apresenta as definições de algumas destas propriedades segundo Cox e D'Antonio (2017).

**Quadro 1– Definições de propriedades importante para materiais absorventes.**

Propriedade	Definição
Resistividade ao fluxo, $\sigma$	Facilidade com que o ar entra e se propaga através de poros do material absorvente.
Porosidade, $\phi$	Fração de ar dentro do material absorvente disponível para a propagação das ondas sonoras.
Tortuosidade, $\alpha_{\infty}$	Medida da irregularidade dos caminhos cheios de ar através da matriz sólida do material (VÉR; BERANEK, 2006).
Comprimentos característicos viscoso ( $\Lambda$ ) e térmico ( $\Lambda'$ )	Definem as perdas por efeitos térmicos e viscosos em função do formato geométrico e da seção transversal dos poros.

**Fonte: Cox e D'Antonio (2017).**

Materiais lisos e densos são tidos como altamente refletidos, enquanto os materiais porosos, como espumas de poliuretano, lãs de vidro e lãs de rocha são absorventes (COWAN, 2016). Lãs minerais, como a lã de rocha e a lã de vidro, apresentam uma porosidade entre 92 e 99% (MECHEL, 2008) e são conhecidas como absorvedores de alto desempenho (COX; D'ANTONIO, 2017).

Berardi e Ramakrishnan (2016) identificaram os valores de 12000 Ns/m<sup>4</sup> e 9000 Ns/m<sup>4</sup> para amostras de lã de rocha (densidade de 32 kg/m<sup>3</sup> e espessura de 10,0 cm) e lã de vidro (densidade de 10,0 kg/m<sup>3</sup> e espessura de 5,00 cm), respectivamente.

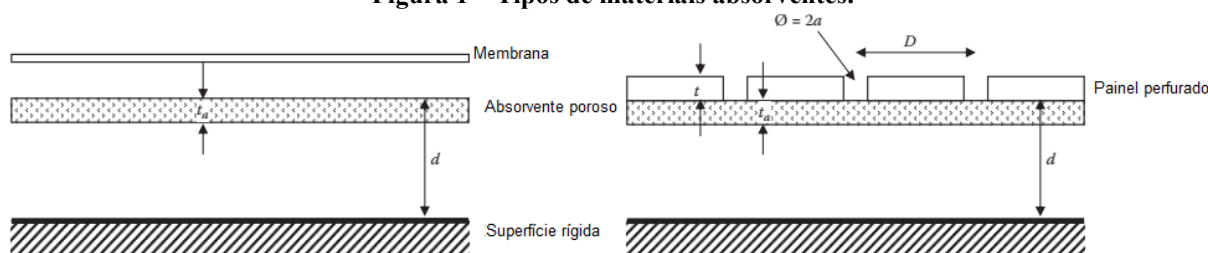
Segundo Brandão (2016, p. 153):

Uma alta resistividade significa que o material tende a se comportar como uma barreira à onda incidente. Uma pequena resistividade faz com que uma onda sonora

(ou um fluxo de ar) atravesse o material sem que este ofereça uma boa quantidade de resistência (perdas).

Os dispositivos de absorção acústica podem ser divididos em duas categorias: absorvedores porosos e dispositivos ressonantes (COX; D'ANTONNIO, 2017). Os materiais porosos são bons absorvedores para frequências altas, e os dispositivos ressonantes absorvem bem em médias ou baixas frequências (BRANDÃO, 2016). Exemplos de materiais ressonantes são absorvedores de membrana e painéis de placas perfuradas, ilustrados na Figura 1.

**Figura 1 – Tipos de materiais absorventes.**



**Fonte: Adaptado de Maekawa et al. (2011).**

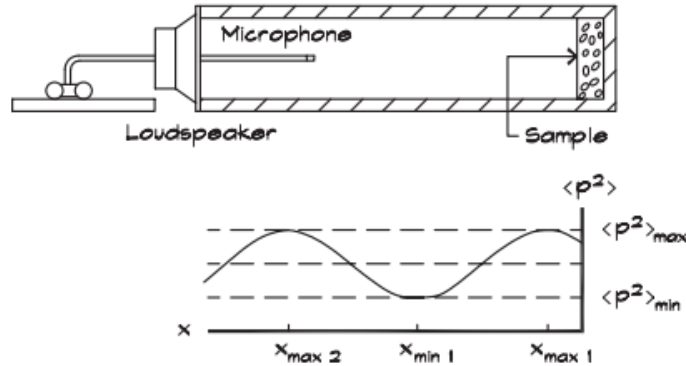
Os parâmetros podem ser dimensionados em função das frequências desejadas para o condicionamento acústico, como tipo da membrana ou tamanho dos furos no caso de painéis perfurados, além de outras variáveis. O coeficiente de absorção de um material varia com a frequência e com o ângulo em que a onda ou raio sonoro incide no material. Em um campo sonoro de uma sala de aula, por exemplo, o som está viajando em todas as direções imagináveis. Nos projetos de condicionamentos acústicos são necessários coeficientes de absorção sonora calculados sobre todos os ângulos possíveis de incidência (EVEREST, 2001).

Existem três procedimentos para a determinação do coeficiente de absorção sonora: o método do tubo de impedância para um coeficiente de absorção com incidência normal; o método da câmara reverberante, para um coeficiente de absorção sob incidência difusa e o método de medição *in situ* para coeficientes de incidência oblíqua.

O tubo de ondas estacionárias (ou tubo de impedância) pode ser usado para determinar o coeficiente de absorção sonora de incidência normal (ISO 10534-1, 1996; ISO 10534-2, 1998). É particularmente útil para comparar pequenas amostras de materiais durante o desenvolvimento de um produto ou no controle de qualidade. Também pode ser usado como base de conhecimento para utilizações em extremidades de cavidades longas no espectro de baixa frequência. No entanto, em situações de salas de aula, por exemplo, existe uma grande variedade dos ângulos de incidência e os valores obtidos à incidência normal são de uso limitado. Para muitos materiais, leis empíricas podem ser usadas para calcular a coeficiente de absorção sob incidência normal (HOPKINS, 2007).

O método consiste na medição das variações das pressões máximas e mínimas dentro de um tubo construído de acordo as orientações normativas, conforme a Figura 2.

**Figura 2 – Variação de pressão sonora em um tubo de impedância.**



Fonte: Long (2014).

A medição destas variações leva a um coeficiente de reflexão, e dele a impedância acústica é então calculada. O coeficiente de reflexão é definido pela Equação 1 (KUTTRUFF, 2017):

$$R = |R|e^{i\chi} \quad (1)$$

onde:

$|R|$  é a magnitude do coeficiente de reflexão;

$\chi$  é o ângulo de fase da onda refletida, que depende da direção e frequência da onda incidente (KUTTRUFF, 2017).

A impedância acústica da superfície ( $Z_{a,n}$ ) do elemento é definida como a razão da pressão sonora ( $p$ ) pela velocidade da partícula ( $u_n$ ) sonora normais à esta superfície, ambas expressas em formas complexas, conforme a Equação 2 (HOPKINS, 2007).

$$Z_{a,n} = \frac{p}{u_n} \quad (2)$$

A impedância específica do elemento é definida pela Equação 3 (HOPKINS, 2007).

$$Z_{a,s} = \frac{Z_{a,n}}{\rho_0 c_0} \quad (3)$$

onde:

$\rho_0 c_0$  é a impedância característica do ar (densidade multiplicada pela sua velocidade), variando conforme as condições ambientais, como temperatura e pressão.

Por vezes é interessante trabalhar com a admissão acústica, que é o inverso da impedância específica, dada pela Equação 4.

$$\beta_{a,s} = \frac{1}{Z_{a,s}} \quad (4)$$

A impedância específica em função do coeficiente de reflexão da Equação 1, em sua forma complexa, pode ser escrita pela Equação 5 (HOPKINS, 2007).

$$Z_{a,s} = \frac{1}{\cos \theta} \frac{1+R}{1-R} \quad (5)$$

Esta equação considera que a superfície é localmente reagente, ou seja, a reação do material em qualquer ponto de sua superfície independe do que acontece em qualquer outro lugar (COX; D'ANTONNIO, 2017). Nesta situação assume-se que a velocidade da partícula sonora perpendicular à superfície depende apenas da pressão sonora na superfície e não do ângulo de incidência (MAEKAWA et al., 2011). Ainda, é assumido que a impedância específica também independe do ângulo de incidência, o que permite que o valor obtido pelo tubo de impedância (com  $\theta = 0^\circ$ ) possa ser utilizado para a determinação de um coeficiente com incidência randômica, demonstrado na seção 4.3.

Isolando o coeficiente de reflexão na Equação 5, tem-se a Equação 6 (HOPKINS, 2007).

$$R = \frac{\cos \theta - \beta_{a,s}}{\cos \theta + \beta_{a,s}} \quad (6)$$

O coeficiente de absorção é então calculado com a Equação 7.

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (7)$$

Em função do ângulo de incidência, o coeficiente de absorção pode ser expresso na Equação 8 (KUTTRUFF, 2017).

$$\alpha_\theta = \frac{4\beta_{Re} \cos \theta}{(\beta_{Re} + \cos \theta)^2 + \beta_{Im}} \quad (8)$$

onde:

$\beta_{Re}$  e  $\beta_{Im}$  são as partes real e imaginária da admissão sonora, apresentadas na Equação 9.

$$\beta_{a,s} = \frac{1}{Z_{a,s}} = \frac{1}{Z_{Re} + iZ_{Im}} = \beta_{Re} - i\beta_{Im} \quad (9)$$

O coeficiente de absorção por incidência normal pode então ser obtido pela Equação 10 (HOPKINS, 2007).

$$\alpha_0 = \frac{4\beta_{Re}}{(\beta_{Re} + 1)^2 + \beta_{Im}} \quad (10)$$

O coeficiente de absorção estatístico ( $\alpha_{st}$ ), ou de incidência randômica, é determinado pela Equação 11, também conhecida como equação de Paris (PARIS, 1928), que considera uma onda plana incidindo uniformemente em uma superfície, vindo de todas as direções.

$$\alpha_{st} = \int_0^{\pi/2} \alpha_\theta \sin(2\theta) d\theta \quad (11)$$

Substituindo a Equação 8 na equação de Paris, o resultado é a Equação 12 (MORSE; INGARD, 1968 apud HOPKINS, 2007; MAEKAWA et al., 2011; KUTTRUFF, 2017).

$$\alpha_{st} = 8\beta_{Re} \left\{ 1 + \frac{\beta_{Re}^2 - \beta_{Im}^2}{\beta_{Im}} \tan^{-1} \left( \frac{\beta_{Im}}{\beta_{Re}^2 + \beta_{Im}^2 + \beta_{Re}} \right) - \beta_{Re} \ln \left[ \frac{(\beta_{Re} + 1)^2 + \beta_{Im}^2}{\beta_{Re}^2 + \beta_{Im}^2} \right] \right\} \quad (12)$$

A consideração de que a impedância independe do ângulo de incidência nem sempre é adequada, o que torna a Equação 12 não apropriada para algumas situações (MAEKAWA et al., 2011). Materiais fibrosos, com lã minerais, geralmente possuem uma impedância variável em função do tipo e do ângulo da onda incidente devido à anisotropia de sua composição (COX; D'ANTONIO, 2017).

O segundo método consiste na utilização de uma câmara reverberante para a determinação do coeficiente de absorção de incidência aleatória. Uma câmara reverberante normalmente possui paredes não paralelas, superfícies refletivas duras e difusores para fornecer um campo sonoro que se aproxime de um campo difuso. As medições podem ser usadas para determinar o coeficiente de absorção sonora difuso de uma determinada área de um material. A norma ISO 354 (2003) descreve as diretrizes e orientações para este tipo de ensaio (HOPKINS, 2007).

Devido às restrições sobre o que pode ser testado em um tubo de onda estacionária (tubo de impedância), os valores de absorção determinados usando método da câmara reverberante tem maior aplicação prática, principalmente no cálculo do tempo de reverberação. Porém, segundo Cox e D'Antonio (2017), existem dois problemas que surgem na extrapolação dos resultados da câmara reverberante para ambientes reais:

- Efeito das bordas: a amostra testada na câmara reverberante é geralmente menor que a amostra que será utilizada na real aplicação. Consequentemente, os efeitos das bordas são geralmente maiores na câmara reverberante do que na o ambiente acusticamente tratado. Isto pode resultar em coeficientes de absorção efetivos com diferença significativa dos que foram encontrados na câmara reverberante. Estes efeitos podem levar à valores de coeficientes de absorção maiores do que 1,00 devido à excessiva difração nas bordas, geralmente situada nas frequências de 200 a 500 Hz. Algumas soluções seriam testar diferentes tamanhos de amostras na câmara reverberante, para uma extrapolação adequada ou utilizar formulações que considerem o perímetro da amostra na câmara;
- Ausência de difusão: as condições acústicas da câmara reverberante e do ambiente real podem ser muito diferente. As câmaras reverberantes geralmente possuem amostras em apenas uma superfície (no chão, conforme a norma ISO

354), enquanto que o ambiente real pode possuir absorção distribuída em seu volume. Isto leva a coeficientes de absorção de incidência aleatória diferentes entre os resultados da câmara reverberante e os observados na situação real. O cenário mais comum é que tanto a câmara reverberante quanto o ambiente real não são difusos, mas a ausência de difusão ocorre por diferentes formas.

O terceiro método de medição, chamado *in situ*, permite a medição por meio de ângulos de incidência quaisquer, diferente do método do tubo de impedância e da câmara reverberante, que medem com ângulos de 0° e de forma difusa, respectivamente. Segundo Brandão et al. (2015) existem três metodologias de medição do coeficiente *in situ*: os métodos baseados em separação temporal; os métodos baseados em formulações do campo acústico próximo à amostra e os métodos alternativos.

A primeira metodologia, tendo como expoente o trabalho de Mommertz (1995), consiste na medição respostas ao impulso próxima à amostra e sem a amostra (em uma situação de campo livre). Após as medições é realizada uma subtração das respostas, e com o auxílio de janelas temporais o coeficiente de reflexão da amostra é obtido, convertendo-o em coeficiente de absorção sonora

No segundo grupo são realizadas formulações matemáticas do campo acústico em frente à amostra bem como medições para a determinação da impedância da superfície da mesma (BRANDÃO et al., 2015). No grupo das medições alternativas se encontram as medições realizadas com equipamentos que medem as velocidades das partículas sonoras (*PU probes*), por exemplo.

Por fim, um valor único para representar um coeficiente de absorção sonora (visto que este varia por frequência) é o NRC (em inglês *Noise Reduction Coefficient* - NRC). O coeficiente de redução sonora de um material é calculado conforme a norma norte-americana ASTM C423-17 (2017), sendo a média aritmética dos coeficientes de absorção sonora às frequências de 250, 500, 1000 e 2000 Hz, com um arredondamento para o múltiplo de 0,05 mais próximo.

#### 2.1.4 Modos acústicos de uma sala retangular

Uma das características de uma onda sonora é a variação dos valores de pressão e velocidade das partículas no tempo e no espaço. Utilizando as leis da termodinâmica, da conservação da massa e da quantidade de energia de movimento é possível escrever a equação



da onda, que representa esta variação temporal e espacial da velocidade da partícula ou da pressão sonora (BRANDÃO, 2016).

A equação da onda pode ser descrita por meio da Equação 13 (KUTTRUFF, 2017).

$$c^2 \cdot \nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (13)$$

onde:

$c$  é a velocidade do som no meio, m/s;

$\nabla^2 p$  é operador Laplaciano, que representa a variação espacial da pressão sonora, definido pela Equação 14.

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad (14)$$

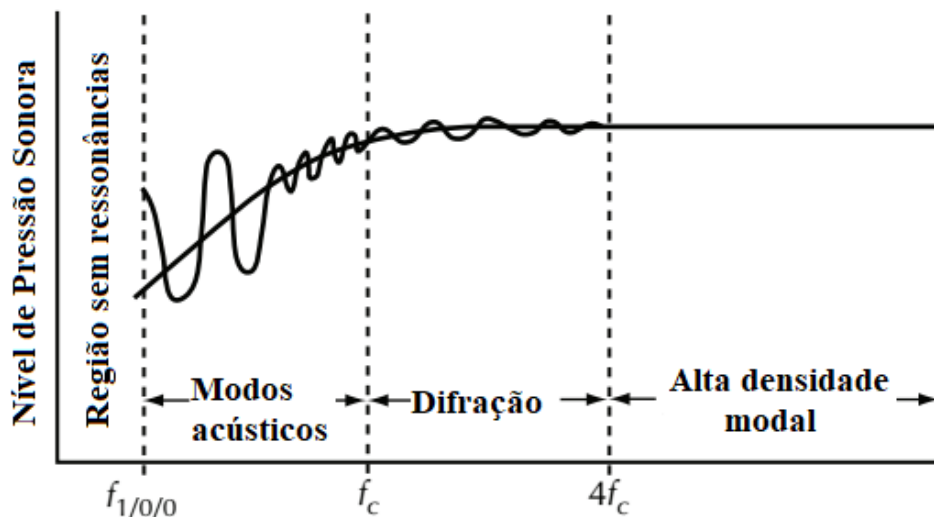
onde:

$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$  representa a variação temporal da pressão sonora.

A manipulação matemática da Equação 13 permite identificar o comportamento das distribuições espaciais e temporais da pressão sonora nos ambientes, bem como os modos naturais de uma sala retangular em baixas frequências.

O espectro audível pode ser dividido em quatro seções, conforme a Figura 3.

Figura 3 – Seções do espectro audível.



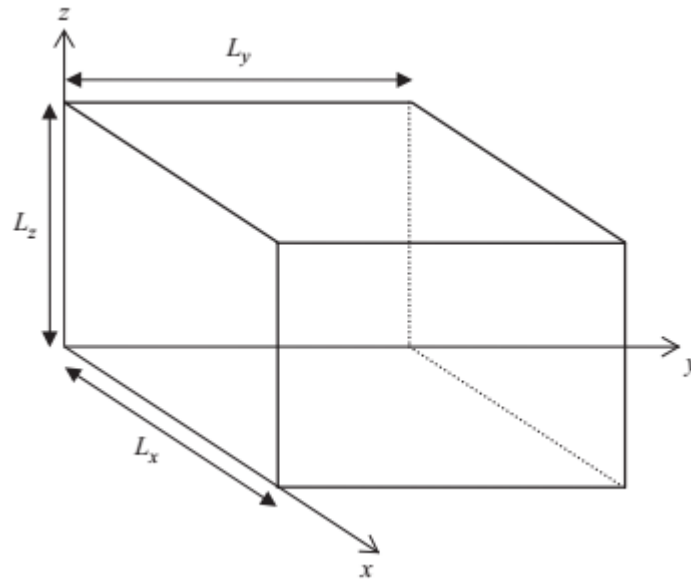
Fonte: Adaptado de Davis et.al. (2013).

Na região sem ressonâncias os comprimentos de onda são maiores que o dobro da maior dimensão da sala. As ondas sonoras dessa região podem até ser geradas, mas sua energia decai rapidamente, de modo a não existir propagação sonora eficiente (BRANDÃO, 2016).

Os modos naturais (modos acústicos ou autovalores) referem-se às ressonâncias da sala. O termo está associado ao fato de que a distribuição da pressão sonora no espaço para uma

determinada ressonância tende a seguir um padrão, ou “modo” (BRANDÃO, 2016). Considerando um receptor, seja um microfone ou o ouvido humano, movendo-se em uma sala retangular excitada por uma fonte sonora com dimensões  $L_x$ ,  $L_y$  e  $L_z$ , conforme a Figura 4, tem-se uma percepção (ou captação no caso no microfone) de uma elevada flutuação da intensidade do nível de pressão sonora nas frequências modais.

**Figura 4 – Sala retangular com dimensões  $L_x$ ,  $L_y$  e  $L_z$ .**



**Fonte: Hopkins (2007).**

As frequências modais podem ser obtidas pela Equação 15 (HOPKINS, 2007).

$$f_{p,q,r} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{q}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{r}{L_z}\right)^2} \quad (15)$$

onde:

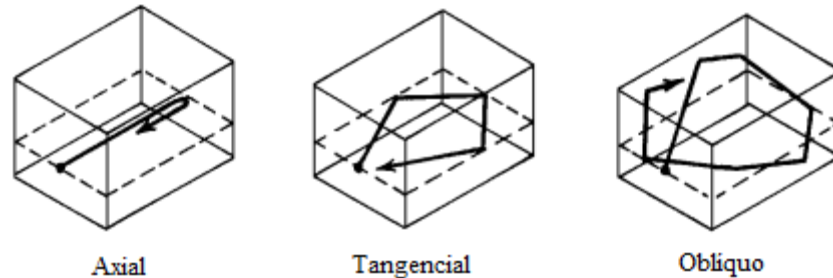
$p$ ,  $q$  e  $r$  são números naturais, e suas diversas combinações são as chaves para as frequências modais (EVEREST, 2001).

A dimensão  $L_x$  é a maior dimensão da sala, e a segunda maior é referente à  $L_y$ . Os modos em salas retangulares podem ser definidos como axiais, tangenciais ou oblíquos. Os modos axiais descrevem situações onde a propagação da onda ocorre paralelamente aos eixos  $x$ ,  $y$  ou  $z$ , tendo dois valores nulos e um valor não nulo, como por exemplo “0, 3, 0”, “1, 0, 0”, “0, 0, 2” (HOPKINS, 2007).

Já os modos tangenciais descrevem a propagação da onda sonora em duas superfícies opostas sob um ângulo oblíquo entre estas. Possuem um valor nulo e dois não-nulos, como por exemplo “1, 2, 0”, “3, 0, 1” e “0, 2, 2” (HOPKINS, 2007). Os modos oblíquos são referentes às situações onde a propagação da onda sonora ocorre sob ângulos oblíquos à todas as superfícies,

não possuindo valores nulos, como por exemplo “2, 3, 1”. A Figura 5 ilustra a forma de publicação dos diferentes modos.

Figura 5 – Formas de propagação da onda sonora com os modos acústicos.



Fonte: Adaptado de Everest (2001).

A transição entre a região dos modos acústicos e a região dominada pela difração é delimitada pela frequência de Schroeder, dada pela Equação 16.

$$f_c = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (16)$$

onde:

$V$  é o volume da sala em  $m^3$ ;

$T_{60}$  é o tempo de reverberação, em segundos.

A região de difração é a transição entre a região definida pela equação da onda e a região de alta densidade modal, que necessita de ferramentas como a acústica de raios para ser analisada (descrita na seção 2.1.5.1). É uma região dominada por ondas sonoras cujos comprimentos são muito longos para serem analisadas pela acústica de raios, porém muito curtos para serem analisados pela equação da onda (EVEREST, 2001). O limite superior da região de difração é estimado como sendo quatro vezes a frequência de Schroeder.

Avelar et al. (2020) descreveram uma nova metodologia para a determinação da frequência de corte baseada em curtose. Os autores identificaram que o método de Schroeder apresentou frequências de corte menores do que as encontradas pelo novo método. A partir da frequência de Schroeder é necessária a utilização da acústica estatística para as avaliações do campo acústico, cujos parâmetros da acústica de salas podem ser calculados por meio de equações, como a de Sabine apresentada na seção 2.1.9, ou por meio da acústica geométrica, que utiliza *softwares* apropriados para sua execução.

### 2.1.5 Modelagem acústica de sala

A principal motivação para a modelagem acústica de salas é permitir a construção de ambientes acusticamente melhores. Isto é essencial em ambientes como teatros, estúdios de música e locais onde a acústica seja de grande importância, o que também pode incluir salas de aula e diversos outros locais de acesso ao público. A modelagem acústica permite a análise do ambiente a ser construído por meio de atributos acústicos dos componentes construtivos, permitindo também a auralização, que é a possibilidade de escutar os sons no ambiente projetado (SAVIOJA; SVENSSON, 2015).

A acústica de uma sala pode ser modelada por meio de diferentes ferramentas e para várias finalidades. São duas as principais técnicas para modelagens acústicas: soluções numéricas da equação da onda para um dado ambiente ou utilização de parâmetros da acústica geométrica. As modelagens baseadas na equação da onda tendem a apresentar melhores resultados, mas possuem uma desvantagem relacionada ao custo computacional para suas realizações, o que envolve também um elevado tempo. As soluções baseadas na acústica geométrica são mais rápidas, porém menos precisas (SAVIOJA; SVENSSON, 2015).

Na acústica geométrica todas as propriedades da onda sonora são negligenciadas, levando em conta apenas a densidade ou intensidade da energia sonora, considerando a propagação sonora por meio de raios. Esta consideração é válida para as altas frequências, onde os comprimentos de ondas sonoras são pequenos comparados com as dimensões das superfícies ou do tamanho geral do ambiente. Em baixas frequências os erros aumentam, pois trata-se da região dominada pela equação da onda e pelos modos acústicos (KUTTRUFF, 2017).

A acústica geométrica pode refletir apenas um aspecto parcial dos fenômenos acústicos que ocorrem em uma sala. Este aspecto é, no entanto, de grande importância devido à sua simplicidade conceitual e à facilidade de cálculos práticos do campo sonoro (KUTTRUFF, 2017). Os principais modelos matemáticos da acústica geométrica são os métodos de traçados de raios, o método das fontes virtuais e os métodos híbridos.

#### 2.1.5.1 Método de traçado de raios

O método do traçado de raios usa um grande número de partículas que são emitidas em várias direções a partir de um ponto de origem. As partículas são traçadas ao redor do ambiente perdendo energia em cada reflexão conforme o coeficiente de absorção da superfície. Quando uma partícula atinge uma superfície ela sofre uma reflexão, o que significa que uma nova

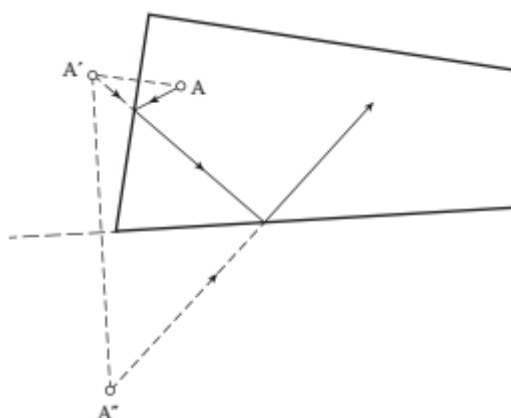
direção de propagação é determinada, podendo ser especular ou em uma direção mais ou menos aleatória, conforme o coeficiente de espalhamento da superfície em questão (MAEKAWA et al., 2011).

A variável de saída de um programa de rastreamento de raios inclui a resposta ao impulso do ambiente em um determinado receptor a partir da qual várias medidas de interesse podem ser calculadas, como tempo de reverberação, definição, clareza, entre outras. Quando um receptor capta um raio ele armazena o momento em que isso ocorre, a direção e a amplitude em função da frequência. Os ângulos de incidência e as amplitudes de cada raio recebido permitem uma reprodução do som precisa (uma auralização) do ambiente. Devido a limites computacionais e à reação humana às respostas sonoras tardias, são estabelecidos limites para o tempo de propagação dos raios. Após um determinado tempo (ou distância), a energia restante de um raio é deixada no campo reverberante ou simplesmente esquecida (LONG, 2014).

#### 2.1.5.2 Método das fontes virtuais

O método das fontes virtuais é baseado no princípio de que uma reflexão especular pode ser geometricamente construída pelo espelho da fonte sonora no plano de uma superfície refletora (MAEKAWA et al., 2011). Se uma sonora refletida bate em uma segunda superfície, a continuação de sua propagação pode ser obtida pela continuação do processo de espelhamento, como mostrado na Figura 6. Uma imagem de segunda ordem ( $A''$ ) é construída como uma imagem espelhada de uma imagem espelhada de ordem anterior ( $A'$ ). Por meio deste processo cada vez mais imagens de ordens maiores são criadas (KUTTRUFF, 2017).

**Figura 6 – Propagação de um raio sonoro com fontes virtuais.**

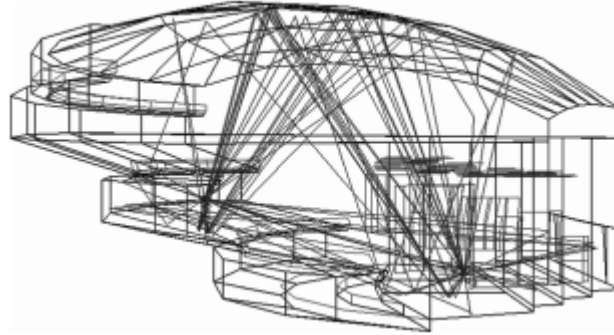


**Fonte: Kuttruff (2017).**

O método é bastante preciso, porém se a sala não é retangular, surge um problema relacionado à grande quantidade de imagens virtuais de ordens elevadas que podem ser geradas.

Por este motivo o método de imagens virtuais é usado apenas em ambientes onde reflexões de ordens menores são suficientes, como em espaços não reverberantes (MAEKAWA et al., 2011). Um exemplo de reflexões de terceira ordem em um teatro pode ser verificado na Figura 7.

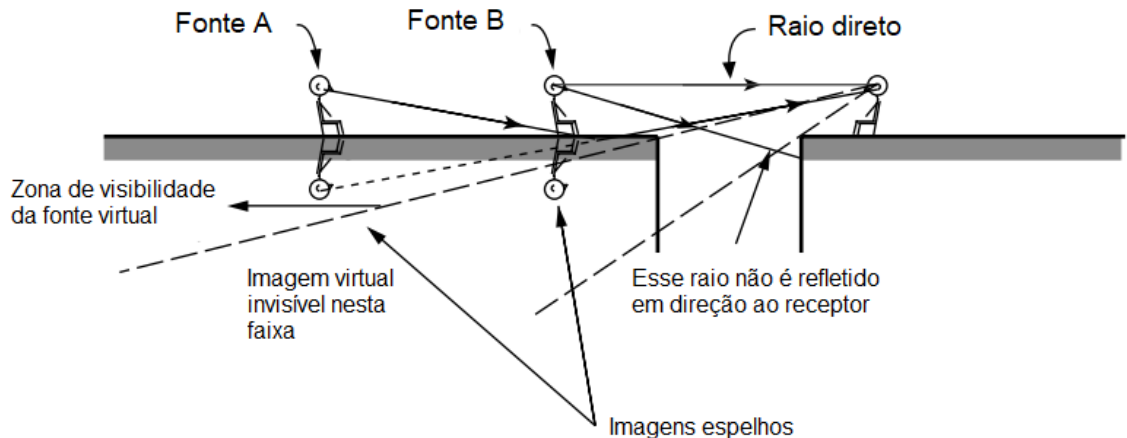
**Figura 7 – Reflexões de terceira ordem em um teatro.**



Fonte: Maekawa et al. (2011).

Outro fator importante neste método é a visibilidade das fontes virtuais. Em uma geometria descontínua, algumas fontes podem ficar invisíveis, não contribuindo na criação da resposta ao impulso (KLEINER; TICHY, 2014). Na Figura 8 a imagem virtual da fonte A é visível para o receptor, porém a imagem virtual da fonte B não é.

**Figura 8 – Princípio da visibilidade.**

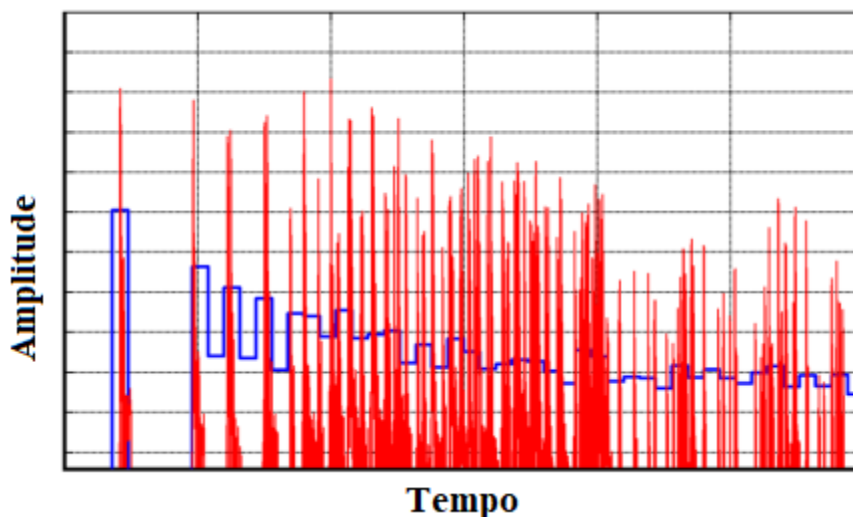


Fonte: Adaptado de Kleiner e Tichy (2014).

O teste de visibilidade consiste em realizar um produto vetorial entre todos os pares de vetores gerados. O produto cruzado terá como resultado um vetor normal à direção do plano. Caso todos os vetores normais calculados apontem na mesma direção, a fonte será considerada visível. Caso um dos vetores aponte para uma direção diferente dos demais, a fonte é considerada invisível e é descartada do cálculo da resposta ao impulso (BRANDÃO, 2016).

A principal diferença entre o método das imagens virtuais e o método do traçado de raios é a forma como a resposta ao impulso é calculada. O método de traçado de raios gera uma resposta ao impulso de baixa resolução, enquanto o método das fontes virtuais permite a construção exata da amplitude e da distribuição nas reflexões no tempo (VÖRLANDER, 2013). Na Figura 9 a resposta ao impulso resultante de um traçado de raios é um histograma azul e resposta ao impulso resultante do método de fontes virtuais é a detalhada em vermelho.

**Figura 9 – Resposta ao impulso por diferentes métodos de modelagem.**



**Fonte: Vörlander (2013).**

### 2.1.5.3 Métodos híbridos

Métodos determinísticos como o das fontes virtuais resultam em erros sistemáticos inerentes ao método e devido às limitações das implementações dos softwares. Métodos estocásticos, como o de traçado de raios, possuem baixa resolução temporal, porém incluem o espalhamento em seus cálculos. Simulações com métodos puramente baseados nas imagens virtuais criam aproximações grosseiras das propriedades físicas do som nos ambientes, pois o espalhamento, que é um importante aspecto, é negligenciado (VÖRLANDER, 2008).

Vörlander (1989) identificou que a quantidade de fontes virtuais invisíveis é muito maior que a quantidade de fontes virtuais visíveis, propondo um método de traçado de raios para identificar uma quantidade menor de fontes possivelmente visíveis. Os modelos híbridos, em geral, combinam modelos matemáticos de fontes virtuais, traçado de raios e métodos estatísticos. O método das fontes virtuais atua na região das primeiras reflexões, cuja ordem de transição é determinada pelo usuário. Após esta ordem, entra em cena o método do traçado de raios até que o ambiente possua tantas reflexões que possa ser assumido um ambiente difuso, onde finalmente pode ser utilizada a acústica estatística (como a fórmula de Sabine), cujos

parâmetros de entrada são os parâmetros extraídos do ambiente (como o coeficiente de absorção médio) (BRANDÃO, 2016).

### 2.1.6 Resposta ao Impulso, Sistema Linear Invariante no Tempo e Convolução

Um sinal é um conjunto de dados ou informação que pode ser processado por sistemas. Os sistemas modificam e/ou extraem informações adicionais dos sinais. Portanto, um sistema é uma entidade que processa um conjunto de sinais (entradas) resultando em um outro conjunto de sinais (saídas) (LATHI, 2006). Neste trabalho os sinais considerados são funções da variável independente tempo.

Um sinal impulsivo que excita uma sala é um sinal com magnitude constante, resultando em uma excitação com a mesma energia para todas as frequências de interesse. Considerando uma sala onde uma fonte é colocada, em uma determinada posição, capaz de gerar um sinal impulsivo, e em outro local, um receptor que grava a resposta da sala por um certo período de tempo, tem-se que o som que chega no receptor é o som direto seguido de suas reflexões, além disso, o som que chega no receptor é diferente se ele ou a fonte mudarem de posição dentro da sala. Este sinal recebido no receptor é a resposta ao impulso da sala (denominada em inglês como *Room Impulse Response - RIR*), geralmente identificada como  $h(t)$ . Como a resposta ao impulso muda conforme as posições de fonte e/ou receptor, o correto é utilizar a denominação resposta ao impulso da configuração sala-receptor fonte (BRANDÃO, 2016).

Segundo BRANDÃO (2016), a configuração sala-fonte-receptor pode ser aceita como um sistema linear invariante no tempo se as características da sala (propriedades do ar, materiais aplicados e geometria) não sejam alteradas com o tempo, e que as características do receptor e da fonte sejam lineares.

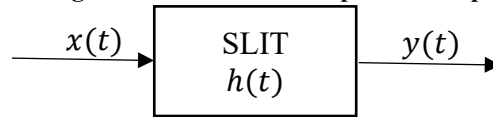
A resposta ao impulso é suficiente para descrever todas as características do Sistema Linear Invariante no Tempo (SLIT) para sistemas com estas configurações (BRANDÃO, 2016). Ainda, se uma fonte emite um sinal  $x(t)$  qualquer (por exemplo música, fala, etc), o sinal recebido pelo receptor  $y(t)$  é dado pela integral de convolução (Equação 17), de modo que o símbolo “\*” significa a operação da convolução e “ $\tau$ ” um tempo específico.

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (17)$$



Pode-se afirmar então que o SLIT sala-fonte-receptor, com resposta ao impulso  $h(t)$ , impõe suas características sobre o sinal  $x(t)$ . Dessa forma  $y(t)$  incorpora as características da sala como as ressonâncias, reverberações, etc (BRANDÃO, 2016).

Figura 10 – SLIT com resposta ao impulso.



Fonte: Adaptado de Brandão (2016).

A Figura 10 representa, no domínio do tempo, a relação entre o sinal emitido pela fonte  $x(t)$ , a resposta impulsiva  $h(t)$  do SLIT sala-fonte-receptor e o sinal obtido pelo receptor  $y(t)$ . Pode-se expressar essa relação no domínio da frequência por meio do teorema da convolução (Equação 18):

$$Y(j\omega) = X(j\omega)H(j\omega) \quad (18)$$

onde:

$X(j\omega)$ ,  $Y(j\omega)$  e  $H(j\omega)$  são obtidos pela transformada de Fourier de seu respectivo sinal, que é representada pela Equação 19.

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt = \mathcal{F}\{x(t)\} \quad (19)$$

onde:

$x(t)$  é o respectivo sinal para  $X(j\omega)$ ,  $\omega$  é a frequência angular e  $j$  é a unidade imaginária do sinal (identidade de Euler).

No domínio da frequência, uma importante propriedade a ser calculada é a magnitude, que é o módulo da parte complexa da Transformada de Fourier, geralmente descrita em dB no eixo das ordenadas de um espectro de sinal. Na acústica, as frequências compõem as abscissas, e são normalmente descritas em escala logarítmica (HAMMOND; WHITE, 2008).

A resposta ao impulso de uma sala é a função de transferência entre a fonte de som e o microfone. Como já descrito, ela define completamente as propriedades de um sistema, e é possível prever o resultado da introdução de uma função arbitrária (fala) integrando a entrada com a resposta de impulso da sala (LONG, 2014). Com a previsão da resposta ao impulso, pode-se ouvir o som de uma sala antes que ela seja construída. O tempo de reverberação pode ser alcançado com a análise dos decaimentos da resposta ao impulso (KUTTRUFF, 2017).

Uma resposta ao impulso biauricular (traduzida em inglês como *Binaural Room Impulse Response* - BRIR), por sua vez, é medida nos canais auditivos de alguém em uma sala com uma certa distância de uma fonte sonora. Esta resposta contém as contribuições do som direto, das

reflexões e da reverberação. Quando esta resposta ao impulso binaural é convoluída com um sinal e reproduzida por fones de ouvido, os ouvintes podem perceber o som como se eles estivessem na sala, onde a BRIR foi gravada (PULKKI; KARJALAINEN, 2015).

A resposta de um SLIT, em síntese, à soma de dois sinais de entrada é igual à soma das respostas ao entradas individuais separadamente, e os valores correspondentes do sinal de entrada e saída podem ser redimensionados linearmente por um fator de ganho constante (PULKKI; KARJALAINEN, 2015). Além disso, se aplicarmos uma entrada ao sistema agora ou “t” segundos a partir de agora, a saída será idêntica, exceto por um atraso de tempo de “t” segundos. A análise e implementação de SLIT é normalmente mais fácil e mais eficiente do que para sistemas que não possuem ou não se aproximam dessa propriedade. Um SLIT também garante que nenhum componente novo em qualquer frequência seja criado, um componente que não exista no sinal de entrada, ou seja, não gera distorção não linear. Assim, um tom puro (um sinal senóide) permanece um tom puro ao se propagar através de um SLIT (PULKKI; KARJALAINEN, 2015).

Exemplos de sistemas em que a linearidade é importante são os equipamentos de gravação e reprodução de áudio. Os amplificadores podem ser projetados para ter baixa distorção não linear, mas, por exemplo, os alto-falantes em níveis de potência relativamente altos e em baixas frequências podem ser altamente não lineares (PULKKI; KARJALAINEN, 2015).

A linearidade é uma meta no processamento de sinais, embora em algumas tarefas, como processamentos motivados pela percepção, métodos de processamento não lineares são necessários (PULKKI; KARJALAINEN, 2015).

Quanto ao processamento computacional de uma resposta ao impulso algumas considerações são importantes. Um sinal em tempo contínuo pode ser processado, a partir de suas amostras, por um sistema que opere em tempo discreto. Um sinal em tempo contínuo amostrado é uma sequência de impulsos, enquanto que um sinal em tempo discreto apresenta a mesma informação em uma sequência de números ( $n$ ) (LATHI, 2006). A transformada discreta de Fourier (Equação 20) é uma transformação que se aplica para sinais amostrados.

$$X[\Omega] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\Omega n} \quad (20)$$

onde:

$\Omega$  é a frequência angular, rad/s.

Uma maneira computacionalmente eficaz de se resolver a transformada discreta de Fourier é a implementação do algoritmo de cálculo da transformada rápida de Fourier (em inglês *Fast Fourier Transform* - FFT). O algoritmo da FFT permite calcular  $N/2$  componentes do espectro contidos no intervalo  $0 \leq \Omega \leq \pi/T$ , a partir do processamento de  $N$  amostras temporais do sinal, igualmente espaçadas de  $T$  (intervalo de amostragem) (LATHI, 2006).

A frequência angular da  $k$ -ésima harmônica do sinal amostrado é  $\Omega_k = (2\pi k)/N$ , onde  $k=0, \dots, N-1$ . Portanto, para obter a TDF do sinal amostrado tem-se que variar os valores de  $n$  e  $k$ , conforme Equação 21:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\Omega_k n} \quad (21)$$

Para implementar o algoritmo da FFT deve-se separar a sequência de amostras em subconjuntos pares e ímpares (Equação 22). Esses subconjuntos são transformados e subdivididos sucessivamente até se chegar à operação elementar entre duas amostras. Essa decomposição requer que  $N$  seja potência inteira de 2 (LATHI, 2006).

$$X(k) = \sum_{npar}^{N-1} x(n)e^{-j\Omega_k n} + \sum_{nímpar}^{N-1} x(n)e^{-j\Omega_k n} \quad (22)$$

### 2.1.7 Deconvolução

Segundo Avelar et al. (2016) a deconvolução consiste na excitação de um sistema com um sinal conhecido, seguida da medição da resposta à esta excitação e da separação da resposta medida da resposta característica do sistema. A resposta característica do sistema pode ser determinada pela Equação 23 (PULKKI; KARJALAINEN, 2015).

$$y(t) = x(t) * h(t) + n(t) \quad (23)$$

onde:

$n(t)$  é o ruído presente no sistema.

Se o sistema responde linearmente à excitação, e as características não mudarem durante as medições, a deconvolução é um processo simples.

Como já descrito, a resposta de um SLIT para uma determinada excitação pode ser calculada por meio da integral de convolução do sinal de uma resposta ao impulso de um sistema. A técnica de deconvolução, por sua vez, pode ser apresentada pela transformada inversa de Fourier por meio da Equação 24 (PULKKI; KARJALAINEN, 2015).

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1} \frac{\mathcal{F}\{y(t)\}}{\mathcal{F}\{x_0(t)\}} \quad (24)$$

Avelar et al. (2016) identificaram que o processo de deconvolução proporciona menores incertezas nas medições quando comparado à procedimentos medição que utilizam a convolução.

### 2.1.8 Técnicas de Medição da Resposta ao Impulso

Até 1980 a resposta ao impulso era medida por meio de estouro de balões, pistolas de festim ou amplificadores com alta potência com pequenos pulsos eletrônicos. O principal problema destas técnicas era a baixa performance para a diretividade da fonte sonora, repetitividade das medições e o potencial em distribuir a energia em todo o espectro de frequência de interesse (ROSELL, 2009).

Com o surgimento das técnicas de processamento digital de sinais, principalmente com a implementação das transformadas de Fourier como a FFT, diferentes técnicas começaram a surgir para a determinação da função de transferência de um sistema, como as seguintes técnicas:

- *Time-Stretched Pulses;*
- *Logarithmic SineSweep;*
- *Maximum Length Sequence;* e
- *Inverse Repeated Sequence*

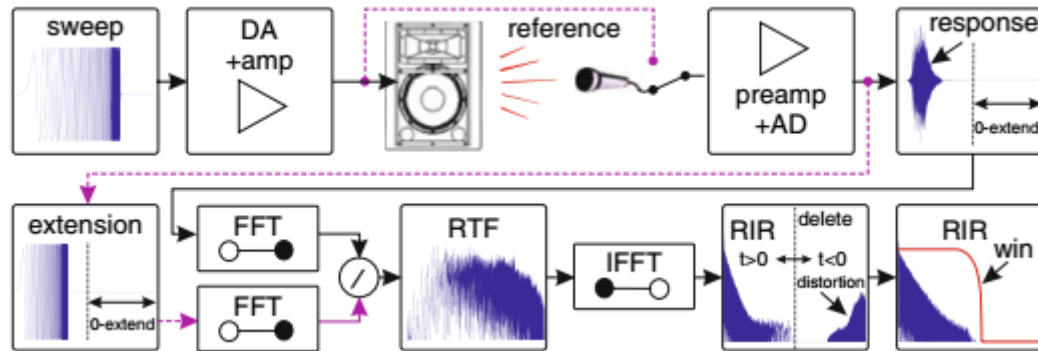
As diferenças entre as técnicas podem ser encontradas no trabalho de Stan et al. (2002).

Este trabalho utilizará a técnica do *sweep* logarítmico com uma deconvolução linear, ou *logarithmic Sine Sweep*, identificado por Stan et al. (2002) como o melhor método para medições de respostas ao impulso em salas não ocupadas e quietas devido a sua excelente relação sinal-ruído e rejeição às distorções harmônicas que ocorrem antes do decaimento.

O método consiste em uma varredura exponencial de frequências crescente no tempo. Por meio deste método é possível deconvoluir a resposta ao impulso do sistema eliminando as distorções que possam surgir simultaneamente (STAN et al., 2002), tendo como resultado uma resposta ao impulso livre de quaisquer distorções harmônicas (MÜLLER, 2008). A Figura 11 mostra a medição por meio de um *sweep* logarítmico, seguida de uma deconvolução linear e da separação das distorções que possam surgir. A deconvolução (em inglês *inverse FFT* - IFFT) é

aplicada na função de transferência da sala (traduzida em inglês como *room transfer function - RTF*), resultando na resposta ao impulso da sala (RIR).

**Figura 11 – Deconvolução linear com separações das distorções produzidas em uma medição com *sweep* logarítmico.**



Fonte: Müller (2008).

### 2.1.9 Tempo de Reverberação

O Tempo de Reverberação (TR) é o tempo necessário para que o Nível de Pressão Sonora de um som decaia em 60 dB (KINSLER et al., 1999). O tempo de reverberação pode ser estimado por alguns modelos teóricos (acústica estatística), como o trabalho pioneiro de Wallace Clement Sabine (SABINE, 1927), que desenvolveu um modelo baseado na teoria estatística do campo sonoro – que considera a mesma densidade de energia sonora em qualquer ponto da uma sala, com a mesma probabilidade de incidência em qualquer direção. Este modelo pode ser usado em uma sala com volume conhecido e coeficientes de absorção sonora também conhecidos. A Equação 25 apresenta a relação estabelecida por Sabine (1927).

$$T_{60} = \frac{0,161V}{S\bar{\alpha}} \quad (25)$$

onde:

$V$  é o volume da sala, em  $m^3$ ;

$S\bar{\alpha}$  representa a quantidade de absorção presente no ambiente. A Equação 26 define o termo  $\bar{\alpha}$ :

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \alpha_i \quad (26)$$

onde:

$S = \sum_i S_i$  é o somatório das áreas dos absorvedores e aparatos dentro da sala,  $S_i$  são áreas de cada aparato encontrado no ambiente e  $\alpha_i$  são seus respectivos coeficientes de absorção sonora de incidência randômica (BRANDÃO, 2016).

Diferentes modelos foram desenvolvidos ao longo dos anos, melhorando o modelo de Sabine, como mostra a pesquisa de Nowoświat e Olechowska (2016). Os coeficientes de absorção sonora são obtidos de acordo com as normas internacionais ISO 354 (2003) (incidência aleatória de ondas sonoras), ISO 10534-1 (1996) e ISO 10534-2 (1998) (incidência normal de ondas sonoras), com as respectivas normas norte-americanas ASTM C423 (2017) e ASTM E1050 (2019).

Para as medições do tempo de reverberação em campo devem ser seguidas as orientações das normas ABNT NBR ISO 3382-1:2017 e ABNT NBR ISO 3382-2:2017. As medições consistem na análise do decaimento da energia sonora em um ambiente em função do tempo.

Obter uma curva de decaimento abrangendo 60 dB em medições do tempo de reverberação é uma tarefa difícil, devido à necessidade de um ruído de fundo baixo e uma fonte sonora com potência suficiente que proporcione um nível de pressão sonora 60 dB maior que o ruído de fundo (EVEREST, 2001).

Segundo a norma ABNT NBR ISO 3382-1 (2017, p. 2):

O tempo de reverberação (T) pode ser avaliado com base em uma faixa dinâmica menor que 60 dB e, em seguida, ser extrapolado para um tempo de decaimento de 60 dB. Ele então é rotulado de acordo. Assim, se T for obtido a partir do tempo no qual a curva de decaimento primeiro alcança 5 dB e depois 25 dB abaixo do instante inicial, ele é rotulado  $T_{20}$ . Se forem usados os valores de decaimento de 5 dB a 35 dB abaixo do nível inicial, ele é rotulado  $T_{30}$ .

Outro parâmetro relacionado ao tempo de reverberação é o Tempo de Decaimento Inicial (em inglês *Early Decay Time* - EDT), definido como tempo decorrido para o decaimento em 10dB a partir do início deste decaimento multiplicado por 6 (KUTTRUFF, 2017). Segundo a norma ABNT NBR ISO 3382-1:2017, o tempo de decaimento inicial é subjetivamente mais importante e relacionado com a percepção da reverberação, enquanto o tempo de reverberação em si está relacionado com as propriedades físicas do ambiente.

#### 2.1.10 Claridade e Definição

Segundo Long (2014), claridade é o nível em que os sons individuais que ocorrem rapidamente são distinguíveis. O termo definição é utilizado para situações relacionadas à inteligibilidade de fala, e claridade, à inteligibilidade de música. A clareza e/ou a definição estão relacionadas ao fato de que as primeiras reflexões (que ocorrem até 50 ou 80 ms), tendem

a ser somadas ao som direto pela audição humana. Logo, se houver bastante energia nas primeiras reflexões, o som direto é percebido como amplificado em detrimento da cauda reverberante. Do contrário, se houver pouca energia, e/ou se a cauda reverberante for longa, essa irá mascarar o próximo som direto a chegar no ouvinte (BRANDÃO, 2016).

Os parâmetros objetivos relacionados à definição medem a razão entre a energia contida nas primeiras reflexões e a energia do restante da resposta ao impulso ou à sua energia total (THIELE, 1953 apud BRANDÃO, 2016). Enquanto que a Claridade é medida na escala decibel, a Definição é medida em escala linear. Este trabalho utilizou o parâmetro da Definição, com limite de 50 ms, como sendo o indicado para situações de fala. Tal parâmetro é matematicamente demonstrado pela Equação 27 (BISTAFIA; BRADLEY, 2000; BRANDÃO, 2016).

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} = 1 - e^{-\frac{c_0 S \bar{\alpha}}{4V} 0.05} = \frac{1 + (r_l/r)^2 - e^{-0.69/T_{60}}}{1 + (r_l/r)^2} \quad (27)$$

onde:

$c_0$  é a velocidade do som no ar, m/s;

$r_l$  é a distância crítica, em metros, sendo o local onde a densidade de energia refletida é equivalente à densidade de energia direta, podendo ser calculada como  $0,20 \sqrt{\frac{V}{T_{60}}}$  (PEUTZ,

1971);

$r$  é a distância do receptor em relação à fonte sonora, metros;

$T_{60}$  é o tempo de reverberação da sala, segundos;

$V$  é o volume da sala, m<sup>3</sup>;

$S = \sum_i S_i$  é o somatório das áreas dos absorvedores e aparatos dentro da sala, m<sup>2</sup>;

$\bar{\alpha}$  é definido pela Equação 26.

Valores maiores que 0,50 indicam que a região das primeiras reflexões possui a maior parte da energia contida da resposta ao impulso, e valores menores que 0,50 indicam que a cauda reverberante é quem possui a maior parte da energia.

### 2.1.11 *Speech Transmission Index* (STI)

Houtgast e Steeneken (1973) desenvolveram um sistema de medição denominado Função de Transferência de Modulação (em inglês *Modulated Transfer Function* - MTF), que replica muitas das propriedades da fala humana. A MTF considera a fala como uma combinação

de faixas de ruído moduladas. As pregas vocais vibram, produzindo uma faixa de ruído, enquanto a boca a modula em diferentes frequências, formando palavras. Com uma faixa de ruído em uma banda de oitava e uma modulação em um tom de baixa frequência, podemos recriar uma fala humana (LONG, 2014).

A análise espectral dos sons da fala permite aprender sobre as energias dos componentes da frequência audível e as energias dos componentes da frequência de modulação da fala humana. Os principais componentes audíveis estão no intervalo de 125 Hz e 8 kHz. As componentes importantes da modulação ocorrem entre 0,63 Hz até cerca de 12,5 Hz. Estas frequências de modulação estão ligadas à fala humana em sua cadência natural (LONG, 2014).

A emissão do sinal de fala artificial e sua medição são realizadas em duas posições diferentes, mas no mesmo ambiente. Uma relação sinal-ruído (em inglês *Singal-to-Noise ratio* - SNR) é medida, obtida em cada uma das sete bandas de oitava centralizada entre 125 e 8000 Hz, modulada em cada uma das bandas de oitava em 14 frequências (0,63, 0,80, 1,00, 1,25, 1,60, 2,00, 2,50, 3,15, 4,00, 5,00, 6,30, 8,00, 10,0 e 12,5 Hz). O STI é a convolução dos sinais nas 7 bandas de oitava com as 14 modulações de frequência por oitava, resultando em um total de 98 sinais de ruído integrados (AMLANI; RUSSO, 2016).

O STI pode ser obtido pelo método direto, que consiste na emissão de um ruído rosa apropriado, conforme orientações da norma ABNT NBR IEC 60268-16:2011, utilizando um equipamento capaz de gerar um ruído calibrado com os espectros de fala, ou ainda, ser obtido pelo método indireto, que consiste na medição de uma resposta ao impulso seguida do seu processamento conforme orientações da mesma norma. Este trabalho utilizou o método indireto, que consiste no seguinte:

- Uma resposta ao impulso  $h(t)$  é obtida utilizando o método do *sweep* exponencial, considerado pela norma ABNT NBR IEC 60268-16:2011 como um dos mais indicados para o cálculo do índice de transmissão de fala. Segundo a norma, a resposta ao impulso medida deve ser superior a 1,60 segundos e não inferior à metade do tempo de reverberação da sala;
- A resposta ao impulso passa então por um banco de filtros composto por sete filtros de largura de banda de uma oitava, com as frequências entre 125 Hz e 8,00 kHz. Logo, sete respostas ao impulso são geradas ( $h_k(t)$ , com  $k = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ ).
- São calculados 98 índices de modulação, dados pela Equação 28.



$$m_{k,m} = \frac{|\int_0^{\infty} h_k(t) e^{-j2\pi f_m t} dt|}{\int_0^{\infty} h_k^2(t)} [1 + 10^{-SNR_k/10}]^{-1} \quad (28)$$

onde:

$f_m$  são as 14 frequências de modulação entre 0,63 e 12,5 Hz,  $m$  é o índice de cada frequência de modulação (variando de 1 a 14) e  $SNR_k$  é a relação sinal-ruído da  $k$ -ésima banda de oitava (BRANDÃO, 2016).

- A relação sinal ruído efetiva é então calculada, conforme a Equação 29.

$$SNR_{eff_{k,m}} = 10 \log \left( \frac{m_{k,m}}{1 - m_{k,m}} \right) \quad (29)$$

Os valores de  $SNR_{eff_{k,m}}$  são limitados a um intervalo de -15 dB a +15 dB.

- Em seguida, o índice de transmissão ( $TI_{k,m}$ ) é calculado, seguindo a Equação 30.

$$TI_{k,m} = \frac{SNR_{eff_{k,m}} + 15,0}{30,0} \quad (30)$$

- Com os 98 valores de  $TI_{k,m}$ , 7 índices de transmissão ( $MTI_k$ ) são calculados, sendo a média aritmética dos 14 índices de modulação para uma das 7 bandas de oitava. A Equação 31 mostra a relação para os índices de transmissão.

$$MTI_k = \frac{1}{14} \sum_{m=1}^{14} TI_{k,m} \quad (31)$$

onde:

$k$  varia de 1 a 7.

- O STI então é calculado por meio da Equação 32.

$$STI = \sum_{k=1}^7 \alpha_k MTI_k - \sum_{k=1}^6 \beta_k \sqrt{MTI_k MTI_{k+1}} \quad (32)$$

onde:

$\alpha_k$  e  $\beta_k$  são pesos para ponderações relativas a uma fala de um gênero masculino ou feminino, conforme a Tabela 2:

Tabela 2 – Coeficientes de ponderação para o MTI.								
Banda de oitava (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Masculino	$\alpha$	0,085	0,127	0,230	0,233	0,309	0,224	0,173
	$\beta$	0,085	0,078	0,065	<b>0,011</b>	0,047	0,095	-
Feminino	$\alpha$	-	0,117	0,223	0,216	0,328	0,250	0,194
	$\beta$	-	0,099	0,066	0,062	<b>0,025</b>	0,076	-

Fonte: ABNT NBR IEC 60268-16:2011.

A teoria da STI se baseia no seguinte: o tempo de reverberação e o ruído de fundo tornam a amplitude do sinal modulado recebido por um ouvinte em uma sala menor que a amplitude do sinal modulado que é gerado sem reverberação e sem ruído de fundo. Uma perda na amplitude modulada está associada a uma perda na inteligibilidade da fala. Valores próximos a 0,00 significam má transmissão da fala e quase 1,00 estão ligados à transmissão ideal da fala.

### 2.1.12 Índice de Redução Sonora

O índice de redução sonora, ou perda de transmissão de um elemento teste é calculado em uma câmara reverberante que possui uma sala de emissão e outra de recepção cujas características construtivas sejam controladas. As normas ISO 10140 em suas 5 partes orientam quanto às dimensões e características acústicas da câmara, bem como discorrem sobre os procedimentos para obtenção do valor do índice de redução sonora, expresso pela Equação 33.

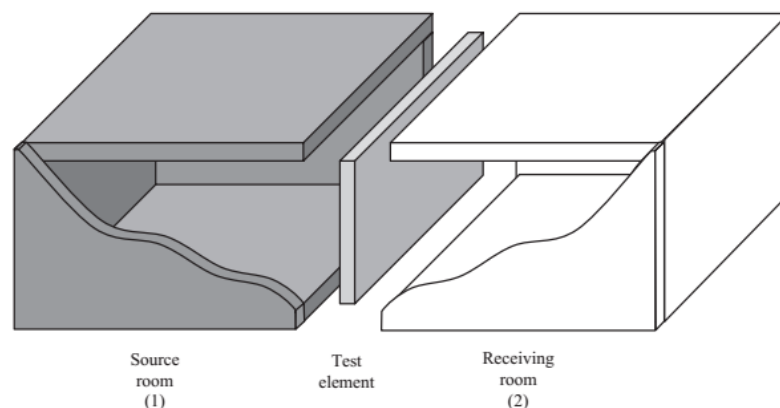
$$R = L_{p1} - L_{p2} + 10 \log \left( \frac{S}{A} \right) \quad (33)$$

onde:

$R$  é o índice de redução sonora, dB;

$L_{p1}$  e  $L_{p2}$  são as médias dos níveis de pressões sonoras temporais e espaciais nas salas de emissão e recepção, respectivamente (HOPKINS, 2007). A Figura 12 ilustra uma câmara reverberante.

**Figura 12 – Desenho esquemático de medição em laboratório.**



**Fonte: Hopkins (2007).**

A área do elemento teste ( $S$ ) é de aproximadamente 10,0 m<sup>2</sup>. A Equação 34 indica a relação para  $A$ .

$$A = \frac{0,16V}{T} \quad (34)$$

onde:

$V$  é volume da câmara de recepção em  $m^3$ , e  $T$  o tempo de reverberação medido, em segundos.

A amostra construída na câmara reverberante pode ser qualquer sistema de vedação vertical. Warnock (1990) testou a influência acústica de uma placa de gesso acartonado com 16,0 mm de espessura (*drywall*) fixada diretamente sobre uma parede de blocos de concreto com 150,0 mm de espessura. O resultado foi que para as baixas frequências a perda de transmissão piorou, tendo apenas um aumento nas médias frequências (500 Hz a 2000 Hz). Segundo o autor isso ocorre pois os painéis podem vibrar bastante se parafusados ou colados, independentemente dos blocos e, ainda, uma pequena cavidade de ar continua existindo, levando a ressonâncias neste sistema massa-ar-massa.

Segundo a norma ISO12354-1 (2017), o aumento de isolamento em um sistema de vedação vertical devido ao acréscimo de uma camada de um determinado material, fixado diretamente sobre outro, pode ser estimado a partir da frequência de ressonância do conjunto, dada pela Equação 35.

$$f_{0,conjunto} = 160 \sqrt{S' \left( \frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad (35)$$

onde:

$f_{0,conjunto}$  é a frequência de ressonância do sistema de vedação, Hz;

$S'$  é a rigidez dinâmica do painel adicionado ao sistema de vedação, MN/m<sup>3</sup>;

$m'_1$  é a densidade superficial do elemento que recebe a camada adicional, kg/m<sup>2</sup>;

$m'_2$  é a densidade superficial da camada adicional, kg/m<sup>2</sup>.

A norma ISO 12354-1 (2017) cita que para frequências de ressonâncias do conjunto superiores à 160 Hz ocorre uma redução no índice de redução sonora de todo o sistema de modo progressivo até 1600 Hz. Para valores de  $f_{0,conjunto}$  superiores à 1600 Hz também ocorrem reduções, porém em intensidades menores.

Friedrich (2010) verificou em uma câmara reverberante um índice de redução sonora ponderado ( $R_w$ ) de 38 dB para uma amostra de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos de dimensões iguais à 140 x 190 x 290 mm. Após a aplicação de um revestimento argamassado composto por chapisco, emboço e reboco, com espessuras de 5,00, 20,0 e 2,00 mm para a face externa e de 5,00, 15,0 e 2,00 mm para a face interna, respectivamente, a pesquisadora verificou um novo valor de  $R_w$  igual à 43 dB, ou seja, o revestimento argamassado proporcionou um aumento de isolamento ( $\Delta R_w$ ) de 5 dB.

Na seção 3.5 é apresentada a metodologia para a determinação do valor do índice de redução sonora.

## 2.2 REFERENCIAL TEÓRICO DOS COMPÓSITOS DE MADEIRA

### 2.2.1 *Medium Density Fiberboard*

O *Medium Density Fiberboard* (MDF) é um produto de madeira projetado, composto por pequenas fibras lignocelulósicas, combinadas com uma resina sintética e unidas sob calor e pressão para formar painéis. As fibras lignocelulósicas mais utilizadas são de madeira, mas podem ser utilizadas outras fibras vegetais, como bagaço e palha de cereais (THOEMEN, 2010).

Segundo a norma ABNT NBR 15316-1:2019, um painel de fibras de média densidade é um painel produzido em processo a seco, com umidade menor que 20% na linha de formação, sob ação de calor e pressão, com adição de adesivo sintético. O MDF pode ser encontrado na maioria dos móveis residenciais e comerciais, assim como pode ser utilizado na arquitetura de interiores (PIEKARSKI et al., 2017).

### 2.2.2 *Oriented Strand Board*

O *Oriented Strand Board* (OSB) é um painel multicamada feito com tiras de madeira com comprimentos superiores a 50 mm e espessuras inferiores a 2 mm coladas com resina sintética. As tiras nas camadas externas são paralelas e alinhadas ao comprimento do painel. As tiras na camada central podem ser orientadas aleatoriamente ou alinhadas (geralmente perpendiculares às camadas externas) (EN 300, 2006). Em geral, os painéis tipo OSB brasileiros são fabricados com partículas de madeira obtidas de reflorestamentos, principalmente de espécies como *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* (FERRO et al., 2018).

Os painéis do tipo OSB são utilizados para aplicações estruturais como paredes, suporte para pisos e forros, componentes de vigas estruturais e embalagens (CLOUTIER, 1998 apud BASTOS, 2009).

### 2.2.3 *Wood-Wool Cement Board*

Os compósitos de palha de madeira com cimento são feitos com tiras de madeira (lã de madeira), partículas ou fibras, unidos por um ligante inorgânico, geralmente o cimento Portland.

Compósitos de lã de madeira com cimento Portland foram desenvolvidos pela primeira vez na década de 1920. As placas do tipo *Wood-Wool Cement Board* (WWCB) têm sido usadas principalmente como barreiras acústicas e para fornecer isolamento térmico e acústico em edifícios. Existem estudos que indicam uma maior resistência à intempéries nos painéis do tipo WWCB do que nos compósitos que utilizam resinas (PINION, 1975 apud EVANS, 2013).

Como descrito por De la Grée et al. (2014), o painel de palha de cimento com madeira (tradução da sigla WWCB) é produzido pela seguinte sequência: os troncos de madeira armazenados são cortados em pequenos blocos (cerca de 25,0 cm de comprimento), seguida de uma operação que os desfia em palha superfina (largura  $\leq 1,00$  mm), palha fina (1,00 - 3,00 mm de largura) ou palha grossa (largura  $\geq 3,00$  mm). Em seguida, a lã de madeira é mergulhada em uma solução para acelerar a aglutinamento da pasta (cimento com lã de madeira) e depois pressionada para diminuir o novo teor umidade. A lã de madeira úmida é colocada junto ao cimento em um misturador contínuo. Depois disso, a mistura é transportada para uma máquina de distribuição que espalha a mistura por camadas em moldes que serão pressionados por uma prensa hidráulica. Após a fixação do cimento, as placas são retiradas dos moldes para posterior cura, e um processo de armazenamento é iniciado. Após a cura, as placas podem ser pintadas, empilhadas e empacotadas.

Soriano et al. (2002) construíram dois protótipos de sistemas construtivos baseados em vedações verticais e horizontais com o painel do tipo WWCB, sendo um deles estruturado em madeira (sistema de *wood framing*), e o outro estruturado em perfis de aço formados a frio (*light steel framing*) com o objetivo de determinar o custo de fabricação destes sistemas enquanto abrigos para situações de desastres nas Filipinas. Os autores concluíram que o painel do tipo WWCB possui uma elevada trabalhabilidade, não tendo encontrado problemas na utilização do material.

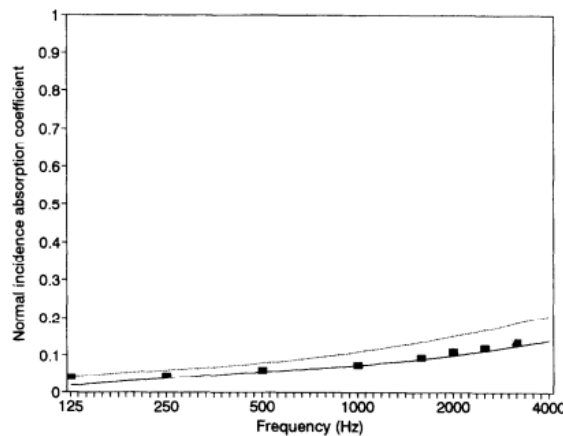
Noh et al. (2018) verificaram o desempenho estrutural de uma vedação vertical composta por painéis do tipo WWCB com 50,0 mm de espessura em duas camadas estruturadas por perfis de aço e argamassa de cimento e areia, concluindo que a vedação possui um bom desempenho estrutural. Os autores relataram ainda que o painel de 50,0 mm de espessura é utilizado como elemento de vedação vertical interna na Malásia, e painéis de 75,0 mm e 100,0 mm são utilizados como elementos de vedação vertical externa.

Segundo Nogueira et al (2018) o painel é conhecido no Brasil como placa de madeira mineralizada, sendo pouco difundido no país, visto que sua utilização está mais voltada para composição de forros e divisórias, cujo foco é o isolamento acústico em ambientes internos.

#### 2.2.4 Coeficientes de Absorção Sonora de Incidência Normal para Compósitos de Madeira

Wassilieff (1996) apresentou alguns resultados de ensaios do coeficiente de absorção sonora de incidência normal para alguns compósitos de madeira. Os resultados encontrados por Wassilieff (1996) para um painel do tipo MDF com 9,00 mm de espessura e densidade igual à  $0,59 \text{ g/cm}^3$  são exibidos na Figura 13.

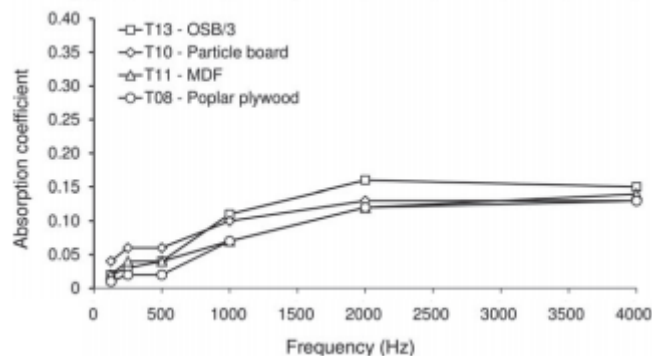
**Figura 13– Coeficientes de absorção para o painel tipo MDF – 9,00 mm (literatura).**



Fonte: Wassilieff (1996).

Smardzewski et al. (2015) mediram os coeficientes de absorção sonora para um painel tipo OSB com 17,5 mm de espessura com densidade de  $0,613 \text{ g/cm}^3$  e 59% de porosidade, encontrando os resultados descritos na Figura 14 (amostra denominada T13).

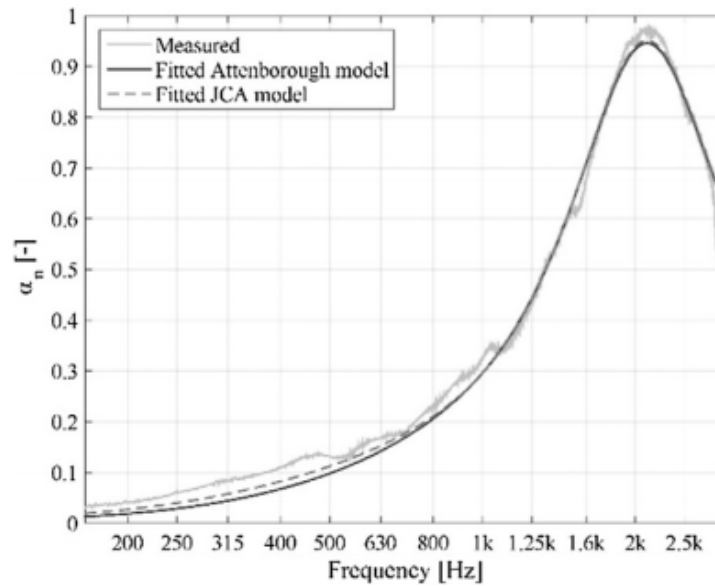
**Figura 14– Coeficientes de absorção para o painel tipo OSB – 17,5 mm.**



Fonte: Smardzewski et al. (2015).

Valores para um painel de palha de madeira com cimento e 25,0 mm de espessura, com uma densidade de  $0,448 \text{ g/cm}^3$  e composto por palhas de 1,00 mm de espessura média são apresentados na Figura 15, conforme trabalho realizado por Botterman et al. (2018).

**Figura 15– Comparações dos coeficientes de absorção para painéis tipo WWCB.**



**Fonte: Botterman et al. (2018).**

Heng (1988) realizou testes de coeficiente de absorção sonora (incidência normal) em alguns materiais de construção, inclusive em um painel de gesso com 13,0mm de espessura e densidade de 0,70 g/cm<sup>3</sup>, obtendo um valor NRC de 0,20, cujo comportamento em frequências é similar aos painéis de palha grossa de madeira com cimento: um aumento considerável do coeficiente de absorção sonora para frequências superiores à 1000 Hz.

## 2.3 REFERENCIAL TEÓRICO DOS TESTES ESTATÍSTICOS

Nesta seção são abordadas as técnicas e testes estatísticos utilizadas na análise de resultados deste trabalho.

### 2.3.1 Verificação da Distribuição Normal

A suposição de normalidade de dados experimentais é uma situação exigida para a realização de diversas inferências válidas a respeito de parâmetros populacionais. Diferentes métodos de estimação e testes de hipóteses existentes foram desenvolvidos sob a suposição de que uma amostra aleatória tenha sido obtida de uma população normal (CANTELMO; FERREIRA, 2007).

Dentre os diversos testes para a verificação da distribuição normal destaca-se o teste de Shapiro-Wilk. O teste baseia-se nos valores amostrais ordenados elevados ao quadrado e tem

sido o teste de normalidade preferido por se mostrar mais poderoso que diversos testes alternativos (LEOTTI et al., 2005). O teste consiste na determinação do parâmetro  $W$ , dado pela Equação 36.

$$W = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i (x_{(n-i+1):n} - x_{i:n}) \right\}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (36)$$

onde:

$\alpha_i$  são coeficientes obtidos de uma tabela apresentada no trabalho de Shapiro e Wilk (1965), implementados computacionalmente por Royston (1992);

$x_i$  são os valores das amostras, ordenados; e

$\bar{x}$  é a média aritmética dos valores.

A hipótese nula do teste é a de que os dados são normalmente distribuídos, e a hipótese alternativa é a de que os dados não são normalmente distribuídos. A rejeição da hipótese nula ocorre quando os valores da variável  $W$  são menores que valores críticos tabelados e quando o *p-valor* é menor que o nível de significância, geralmente igual à 5,00%. Caso não haja rejeição da hipótese nula, os dados podem ser testados mediante estatística paramétrica, como a o teste *t* e a ANOVA (em inglês *Annalysis of Variance*) (SALKIND, 2007).

### 2.3.2 Definição de Intervalos de Confiança

Para distribuições normais com uma quantidade de amostras ( $n$ ) menor ou igual à 30 o procedimento indicado para definição de intervalos de confiança consiste na distribuição *t* de Student. Os intervalos podem ser obtidos pela Equação 37, considerando a variância populacional desconhecida (HINES et al., 2011).

$$\bar{X} - t_{\alpha/2, n-1} \cdot S / \sqrt{n} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{\alpha/2, n-1} \cdot S / \sqrt{n} \quad (37)$$

onde:

$\bar{X}$  é a média aritmética dos valores;

$t_{\alpha/2, n-1}$  é o valor crítico de *t*, tabelado em função do grau de liberdade das amostras ( $n-1$ );

$S$  é o desvio-padrão amostral;

$\mu$  é a média esperada dentro do intervalo de confiança.

Para distribuições não-normais são necessárias técnicas de estatística não-paramétrica. O teste de postos com sinais de Wilcoxon é a versão não-paramétrica do teste *t*, e a construção do intervalo de confiança é definida por Hollander et al. (2014), tendo como primeiro passo a



ordenação dos valores das amostras em ordem crescente, estabelecendo um número de ordem para cada valor.

Em seguida são calculadas médias aos pares, denominadas médias de Walsh, conforme a Equação 38.

$$W_{ij} = \frac{(X_i + X_j)}{2} \quad (38)$$

onde:

$$1 \leq i \leq j \leq n.$$

Os valores obtidos também são ordenados, e a quantidade máxima de valores é determinada pela Equação 39.

$$M = \frac{n(n+1)}{2} \quad (39)$$

Em sequência é realizado o cálculo do valor crítico transformado por meio da Equação 40.

$$C_\alpha = \frac{n(n+1)}{2} + 1 - t_{\alpha/2} \quad (40)$$

onde:

$t_{\alpha/2}$  é o ponto percentual superior  $\alpha/2$  da distribuição nula dos valores de  $T^+$ ;

$T^+$  é a soma dos sinais positivos ranqueados do teste de Wilcoxon.

O intervalo de confiança por fim é calculado por meio na Equação 41.

$$W^{C_\alpha} \leq \theta \leq W^{(t_{\alpha/2})} \quad (41)$$

onde:

$\theta$  é o valor esperado dentro do intervalo de confiança;

$W^{C_\alpha}$  é o valor que ocupa a posição  $C_\alpha$  na lista de  $M$  valores ordenados;

$W^{(t_{\alpha/2})}$  é o valor que ocupa a posição  $t_{\alpha/2}$  na lista de  $M$  valores ordenados.

### 2.3.3 Métodos de Análise de Variância e Testes de Comparações Múltiplas

A análise de variância (ANOVA, de *ANalysis Of VAriance*, em inglês) generaliza o teste de comparação de duas médias de populações de mesma variância. O teste enfoca o problema sob o comportamento das variâncias envolvidas e tem como hipótese nula a de que as médias dos grupos envolvidos no teste são semelhantes, baseando-se em um teste denominado  $F$  (LOESCH, 2012).

A rejeição da hipótese nula ocorre como o valor do teste  $F$  é superior a um valor tabelado e quando o  $p$ -valor é menor ou igual ao nível de significância. O teste é utilizado em amostras com distribuições normais, ou seja, um método de estatística paramétrica. A sua opção não-paramétrica é o teste de Kruskal-Wallis, que utiliza postos associados aos valores numéricos dos dados, tendo como resultado o teste  $H$  (LOESCH, 2012). Tem a mesma consideração de hipótese nula que o teste ANOVA.

Quando a hipótese nula é rejeitada por meio das análises de variâncias, sejam elas paramétricas ou não-paramétricas, teste de comparações múltiplas permitem identificar quais grupos diferem entre si estatisticamente. Para a estatística paramétrica um dos testes que pode ser utilizado é o teste de Tukey, utilizado neste trabalho.

O teste faz uso de uma distribuição denominada distribuição de amplitude *studentizada*, cuja estatística teste é dada pela Equação 42 (HINES et al., 2011).

$$q = \frac{\bar{y}_{máx} - \bar{y}_{mín}}{\sqrt{MQ_E/n}} \quad (42)$$

onde:

$\bar{y}_{máx}$  é a maior média amostral;

$\bar{y}_{mín}$  é a menor média amostral;

$MQ_E$  é a média quadrática correspondente à variância dentro dos grupos, calculada no teste de ANOVA.

Dois médias ( $\bar{y}_i$  e  $\bar{y}_j$ ) são consideradas diferentes se a Equação 43 for atendida.

$$|\bar{y}_i - \bar{y}_j| > T_\alpha \quad (43)$$

onde:

$i$  é diferente de  $j$ ;

O parâmetro  $T_\alpha$  é calculado pela Equação 44.

$$T_\alpha = q_\alpha(a, f) \sqrt{\frac{MQ_E}{n}} \quad (44)$$

onde:

$q_\alpha(a, f)$  é o ponto percentual superior  $\alpha$  do parâmetro  $q$ , onde  $a$  é o número de tratamentos e  $f$  é o número de graus de liberdade para o erro. Os valores podem ser encontrados em tabelas na literatura (HINES et al., 2011).

Quanto à estatística não-paramétrica, os testes de comparações múltiplas utilizados neste trabalho foram o de Nemenyi e o de Dunn, posteriores à análise de variância pelo teste de Kruskal-Wallis, que identificou que pelo menos um grupo difere estatisticamente de outro. Para

saber qual grupo difere de qual o teste de Nemenyi também utiliza a distribuição *studentizada*. O teste inicia pela determinação das diferenças mínimas significativas (DMS), dada pela Equação 45 (WHEATER; COOK, 2000).

$$DMS = q \cdot SE \quad (45)$$

onde

$q$  é um valor obtido da distribuição *studentizada*, porém com grau de liberdade infinito. O parâmetro pode ser encontrado em tabelas da literatura (WHEATER; COOK, 2000).

$SE$  é o erro padrão, calculado pela Equação 46.

$$SE = \sqrt{\frac{k(n_T + 1)}{12}} \quad (46)$$

onde:

$k$  é o número total de grupos sendo comparados;

$n_T$  é o número de observações realizadas.

A hipótese nula é rejeitada quando a diferença entre duas médias de postos (definidas no teste de Kruskal-Wallis) é superior ao valor encontrado para a DMS e quando o  $p$ -valor do teste é igual ou inferior ao nível de significância. O teste de Dunn, por sua vez, inicia-se pelo cálculo da diferença mínima significativa entre dois grupos  $A$  e  $B$  ( $DMS_{A,B}$ ), conforme a Equação 47.

$$DMS_{A,B} = Q \cdot SE_{A,B} \quad (47)$$

onde:

$Q$  é uma distribuição típica para o teste de Dunn considerando um número  $k$  de grupos analisados. Tabelas com estas distribuições podem ser verificadas na literatura (WHEATER; COOK, 2000).

$SE_{A,B}$  é o erro padrão entre dois grupos, dado pela Equação 48.

$$SE_{A,B} = \sqrt{\frac{n_T(n_T + 1)}{12} \left[ \frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B} \right]} \quad (48)$$

onde:

$n_A$  e  $n_B$  são os números de observações nos grupos A e B, respectivamente.

Assim como no teste de Nemenyi, as diferenças entre as médias dos postos de dois grupos que resultarem em valores superiores à  $DMS_{A,B}$  levam à rejeição da hipótese nula, ou seja, os dois grupos são estatisticamente diferentes. Isto também ocorre caso o  $p$ -valor do teste seja igual ou inferior ao nível de significância. Benjamini e Hochberg (1995) desenvolveram

um ajuste nos *p-valores* resultantes do teste de Dunn para que fosse evitado o erro tipo I, que consiste na rejeição da hipótese nula quando ela é verdadeira e absoluta.

As correções podem ser aplicados em testes de variáveis independentes. Os *p-valores* são ordenados de forma decrescente, em seguida são ajustados conforme a Equação 49.

$$p_i^* = p \frac{m}{(m + 1 - i)} \quad (49)$$

onde:

$p_i^*$  são os *p-valores* ajustados conforme a sua ordem  $i$ ;

$m$  é a quantidade de *p-valores* resultante do teste.

Os testes de Nemenyi e Dunn foram implementados por Pohlert (2014) no *software* R (R CORE TEAM, 2019), utilizado para a realização das análises desta pesquisa. O teste Dunn foi aplicado em uma situação cuja quantidade de grupos foi de 18, e o teste de Nemenyi em situações de grupos menores. Dolgun e Demirhan (2017) relatam que para grupos maiores o teste de Dunn é mais eficaz do que o teste de Nemenyi.

## 2.4 REVISÃO SISTEMÁTICA

De forma a buscar pelos artigos relevantes sobre os temas da pesquisa, realizou-se uma busca por palavras-chave na plataforma *Scopus*, obtendo, em abril de 2020, as seguintes quantidades de artigos, conforme a Tabela 3.

**Tabela 3 – Resultados da busca por palavras-chave no *Scopus*.**

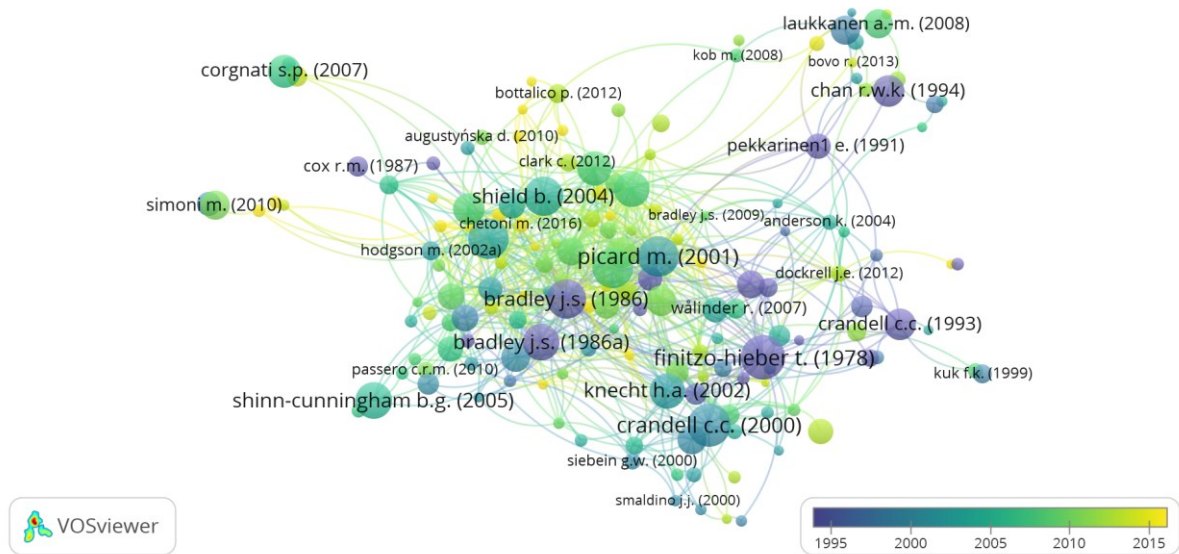
Palavras buscadas	Quantidade de artigos
(( "intelligibility" ) AND ( "building" ))	472
(intelligibility AND classrooms)	390
(acoustic AND properties AND wood)	850
(( "sound" ) AND ( "properties" ) AND ( "wood" ))	647
(( "acoustic treatment" ))	715
(( "acoustic" ) AND ( "classroom" ))	1238
(( "noise" ) AND ( "classroom" ))	1247
(acoustic AND classroom AND Brazil)	19
(acoustic AND panel AND classroom)	29
("acoustic panel")	146
("speech recognition") AND "classroom"	264

Fonte: Autor (2020).

Após cada busca, a relação de artigos foi exportada em formato “.csv”. Realizou uma análise no software *VOS Viewer* (VAN ECK; WALTMAN, 2009) com a seguinte opção: artigos com mais de 10 citações cujos autores e coautores se relacionassem. Com esta ferramenta,

foram identificados os artigos mais importantes para cada combinação de palavras da Tabela 3, bem como os principais autores. A Figura 16 ilustra a busca realizada para as palavras ("*acoustic*") AND ("*classroom*") como exemplo, que, após o filtro descrito, apresentou 160 artigos (que antes era de 1238 artigos). O ano de publicação está em escala de cores na própria figura.

**Figura 16 – Relação de trabalhos citados com a palavras ( ("*acoustic*" ) AND ( "*classroom*" ).**



**Fonte: Autor (2020).**

O mesmo procedimento foi feito para cada combinação de palavras da Tabela 3.

## 2.5 ESTUDOS RELACIONADOS AO TEMA DA PESQUISA

### 2.5.1 Condicionamento Acústico

Substituir um forro refletivo por um forro com um alto coeficiente de absorção sonora, adicionar painéis nas paredes ou elementos absorventes são maneiras típicas de aumentar a quantidade total de absorção sonora (REINTEN et al., 2017).

A inteligibilidade da fala é influenciada pela acústica da sala. Reduzir a reverberação adicionando absorção do som melhorará a inteligibilidade da fala para situações de distâncias curtas entre o receptor e a fonte (considerando um campo sonoro direto), enquanto para distâncias mais longas, a inteligibilidade de fala piorará devido a uma deterioração mais acentuada da amplitude do som (REINTEN et al., 2017).

Outro efeito do aumento da quantidade de absorção em uma sala é a redução do ruído de fundo, o que aumenta a inteligibilidade da fala se o ouvinte estiver próximo da fonte de som, ou seja, quando o som direto é predominante sobre o som reverberante. Segundo Reiten et al. (2017) utilizar a variação dos índices de transmissão de fala para condicionamento acústico é uma tarefa complexa, e relatam que são poucos os estudos que relacionam a acústica de salas com a capacidade de realização de tarefas pelos seres humanos.

Os painéis de absorção sonora para aplicações em acústica de salas são geralmente compostos de materiais sintéticos porosos, como lã de rocha, lã de vidro, poliuretano ou poliéster, que possuem um alto custo de produção e geralmente são baseados em derivados do petróleo (BERARDI; IANNANCE, 2015).

Nos dias atuais tem sido difundida a atenção para o uso de materiais sustentáveis, ou seja, materiais que no final de sua vida útil podem ser descartados sem poluir o meio ambiente. Os materiais sustentáveis são produtos obtidos pela transformação de materiais de origem vegetal; e eles têm esta vantagem no final de sua vida útil. Dentre os materiais sustentáveis, alguns que podem ser utilizados com a finalidade acústica são o cânhamo-brasileiro (*hibiscus cannabinus*), a maconha (*cannabis ruderalis*), a madeira, a juta (*corchorus capsularis*), e materiais obtidos da lã de ovelha (TREMATERRA et al., 2013).

A madeira sólida e alguns compósitos à base de madeira podem ser considerados como materiais acústicos devido à sua capacidade de absorver uma quantidade importante de som incidente, podendo reduzir o nível de pressão sonora ou o tempo de reverberação em uma sala. Os materiais de madeira são aplicados em paredes e superfícies de teto (podendo ser também forros suspensos) no volume da sala, dependendo dos requisitos de desempenho do espaço da sala conforme sua finalidade (para fala, música, escritórios, edifícios industriais, residências etc.) (BUCUR, 2006).

Trematerra et al. (2013) condicionaram uma sala de aula com 15,0 m<sup>2</sup> de painéis feitos juncos de água doce moídos. A sala escolhida possuía uma grande reverberação (volume de 240,0 m<sup>3</sup>) e após a adição dos painéis foi verificada uma melhora na D<sub>50</sub> (Definição), uma diminuição no tempo de reverberação e um aumento no RASTI (índice de transmissão de fala medido de forma rápida que utiliza apenas as bandas de 500 e 2000 Hz para a modulação) de 0,40 para 0,50.

Sala e Viljanen (1995) colocaram painéis absorventes nas dimensões de 0,60 x 1,20 metros em uma sala de aula com dimensões de 7,60 x 10,0 metros e altura de 3,00 metros. Foram realizadas 20 combinações de posições de painéis, ou seja, foram colocados painéis apenas no forro; em seguida no forro e em parte de uma lateral; depois em ambas as laterais e

assim por diante. Os autores também variaram o percentual de área a ser preenchida em cada face da sala, e o material utilizado foi uma lã mineral. Dentre os resultados da pesquisa, verificou-se que adição de painéis nas vedações verticais do lado direito e do fundo resultou em um TR de 1,28 segundos e um valor de RASTI de 0,76, com uma área total absorvente igual à 25,0% de toda a área do forro e paredes existente. A adição de painéis em toda a área do forro (o que corresponde à 40% de toda a área de paredes e forro), por sua vez, resultou em um mesmo valor de TR, porém em um valor de RASTI igual à 0,69. Sala e Viljanen (1995) perceberam, portanto, que a colocação dos painéis nas vedações verticais proporcionou uma melhor inteligibilidade de fala se comparado com um forro de mesmo material, que ainda utilizou mais material absorvente.

Russo e Ruggiero (2019) realizaram medições de descritores acústicos – Claridade, STI e tempo de reverberação – em uma sala de aula com dimensões de 7,10 x 5,80 x 3,80 metros (volume aproximado de 174 m<sup>3</sup>) assim como identificaram os modos acústicos da mesma em baixas frequências, porém os negligenciaram pois as frequências de interesse foram de 500 a 2000 Hz. O objetivo era propor um condicionamento acústico com painéis absorventes. Os autores então realizaram três simulações com 32,0 m<sup>2</sup> ( $S_{\alpha}$  - área equivalente absorvente) de painéis de poliuretano expandido (em formato conhecido com colmeia) distribuídos no forro e na parte superior das vedações verticais. O *software* utilizado foi o CadnaR com o método de traçado de raios com 100000 partículas. Os pesquisadores aplicaram a solução simulada no ambiente, e por meio de medições, verificaram o atendimento aos valores mínimos dos descritores sugeridos por normas técnicas, juntamente com depoimentos satisfatórios de docentes.

Amlani e Russo (2016) estudaram a influência de painéis acústicos no esforço realizado para o entendimento do som em salas de aula que não atendiam às orientações das normas ANSI/ASA S12.60 (2010). Doze painéis (compostos de algodão reciclado, fibras de celulose e poliéster) medindo 0,60 x 1,20 metros com 50,0 mm de espessura foram colocados em uma sala de aula, de modo a adequar o tempo de reverberação e a relação sinal-ruído conforme a norma norte-americana. O índice de transmissão de fala (STI) foi medido em quatro posições na sala de aula e testes subjetivos com Índices Percentuais de Reconhecimento de Fala (IPRF) e de memorização de números foram realizados, utilizando uma amostra de 27 pessoas (12 homens e 15 mulheres). Os resultados mostraram que o esforço para o entendimento do som aumentou com o tratamento acústico realizado com os painéis. Isto ocorreu pois os painéis absorveram energia em altas frequências que são essenciais para o entendimento do som.

Shimizu e Onaga (2018) mediram a inteligibilidade de fala em duas salas de vídeo-conferência (sala de emissão e recepção) com e sem painéis de absorção sonora (feitos de tecido não tecido – TNT – de poliéster) em ambas as salas. Os parâmetros avaliados em função da resposta ao impulso foram o STI, a Claridade ( $C_{50}$ ) e o tempo de reverberação. Os pesquisadores também aplicaram um teste subjetivo baseado em 20 palavras japonesas, ouvidas por meio de um fone de ouvido e escritas pelas ouvintes com uma escala de diferentes níveis de dificuldade de audição. Os resultados encontrados foram que a dificuldade para o entendimento foi reduzida à medida que foram sendo adicionados painéis de absorção sonora em ambas as salas (emissão e recepção).

### 2.5.2 Acústica de Salas de Aula

Rennies et al. (2014) pesquisaram sobre o esforço auditivo afetado pelo ruído e pelo tempo de reverberação em situações de escuta de fala. Eles usaram um teste subjetivo com palavras alemãs foneticamente balanceadas em 16 sujeitos. Os pesquisadores também calcularam a STI com diferentes respostas ao impulso. Os autores descobriram que o esforço de escuta diminui uniformemente com o aumento da STI para diferentes combinações da relação sinal-ruído com tempo de reverberação. Por outro lado, aumentar a STI também aumenta a inteligibilidade da fala, mas um valor máximo foi encontrado em valores intermediários de STI. Conseqüentemente, uma estimativa do esforço de escuta como sendo em escala, baseando-se no STI, é imprecisa.

O método mais direto de medir a inteligibilidade é a utilização de sentenças que contenham palavras individuais ou sílabas sem sentido (LONG, 2014), utilizando listas de palavras ou frases fonemicamente balanceadas lidas para os ouvintes para quem são solicitadas as identificações das mesmas (GALBRUN; KITAPCI, 2016). As listas podem ser apresentadas em vários níveis, na presença de reverberação ou ruído de fundo. Os testes podem ser realizados por falantes em tempo real ou com listas gravadas, mas as vozes gravadas são mais consistentes e controláveis (LONG, 2014).

Quanto ao gênero do locutor para a gravação das listas, De Conto (2003) concluiu em sua pesquisa que uma lista de palavras balanceadas eram mais inteligíveis em um material de fala repetido pela voz masculina do que quando reproduzidas por uma voz feminina.

Galbrun e Kitapci (2016) estudaram o impacto da acústica de salas na inteligibilidade da fala em quatro idiomas: inglês, polonês, árabe e mandarim. Eles descobriram uma grande diferença entre os escores de inteligibilidade das palavras entre estes idiomas, sob o mesmo



tempo de reverberação e relação sinal-ruído. Isso significa que o *design* acústico ideal da sala usada para atividades de escuta pode mudar conforme o idioma falado naquela sala.

Nos Estados Unidos da América existe uma norma que limita o nível de ruído e tempo de reverberação em escolas. A norma ANSI/ASA S12.60 (2010) fornece orientação útil para engenheiros, arquitetos, *designers* e para o público em geral sobre instalações educacionais. Os parâmetros da norma auxiliam na otimização da capacidade das crianças de aprenderem no ambiente da sala de aula (ASHA LEADER, 2005).

No Brasil a norma ABNT NBR 10152:2017 apresenta valores de referência para níveis de pressão sonora em ambientes internos de edificações, sendo de 35 dB(A) para salas de aula (descriptor apresentado como  $RL_{Aeq}$ ). A norma brasileira também estabelece os procedimentos técnicos a serem adotados na execução das medições. Outra comparação que a norma brasileira apresenta é quanto às curvas NC (em inglês *Noise Criterion*). As curvas NC foram desenvolvidas por Beranek (1957) para estabelecer condições satisfatórias para a inteligibilidade da fala e valores de referência de ruídos para diferentes tipos de ambiente. As curvas são designadas NC-30, NC-35 e assim por diante, de acordo com o ponto em que a curva cruza a linha de frequência de 1750 Hz em uma antiga (agora obsoleta) classificação de bandas de oitava (LONG, 2014). O nível NC representativo de um ambiente (descriptor apresentado como  $L_{NC}$ ) é determinado a partir da curva NC mais baixa que pode ser definida dentre as frequências de 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz e 8kHz, de tal forma que valor em um espectro de banda de oitava medido está acima dela. Como as curvas NC são definidas em Intervalos de 5 dB, entre estes valores o nível NC é interpolado. A curva NC recomendada pela norma brasileira para salas de aula é a NC-30 ( $RL_{NC}$ ).

Yang e Bradley (2009) realizaram gravações binaurais de listas de palavras foneticamente balanceadas e simularam o ambiente de uma sala de aula para gravá-las com o objetivo de verificar os níveis de inteligibilidade de fala na sala. Os autores descobriram que em um condicionamento acústico de salas o correto não é visar um tempo de reverberação máximo, e sim um intervalo de valores aceitáveis, pois poucas reflexões sonoras podem levar à sérios problemas. O trabalho foi realizado tendo como base estudantes de no máximo 11 anos de idade.

Berg et al. (1996) sugeriram algumas modificações em uma sala de aula com o objetivo de melhorar o desempenho acústico da mesma, tais como: fazer das paredes laterais e do forro uma superfície refletiva, com o intuito de aumentar a intensidade do som; instalar carpetes no piso para cobrir reflexões inúteis e reduzir o ruído e inserir painéis absorventes na parede de fundo para minimizar o tempo de reverberação. Os autores ressaltaram que combinações de

tratamentos acústicos que utilizem forro e piso ao mesmo tempo devem ter um estudo mais aprofundado.

A literatura científica não apresenta um consenso de elementos a serem rigidamente seguidos a fim de conceber uma sala de aula ideal, pois mais do que um ambiente padronizado e único, é preciso considerar a necessidade dos usuários (BERNARDES et al, 2020).

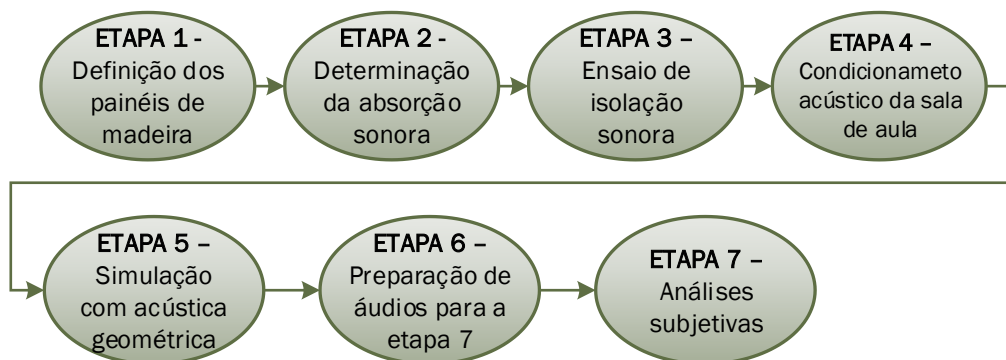
### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta como foram realizadas as etapas da pesquisa, seus métodos e procedimentos. Ele descreve as ações realizadas para a obtenção dos objetivos definidos, bem como as organiza de forma sistemática.

#### 3.1 PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Foi estabelecida uma sequência de atividades organizadas em sete etapas, conforme a Figura 17.

**Figura 17 – Etapas da pesquisa.**



**Fonte: Autor (2020).**

Nas etapas 1 a 6 são apresentadas algumas das propriedades físicas e acústicas dos materiais e os parâmetros acústicos da sala de aula com e sem painéis nas paredes. Também são apresentadas as simulações computacionais quanto aos diferentes cenários de condiçiomameto acústico.

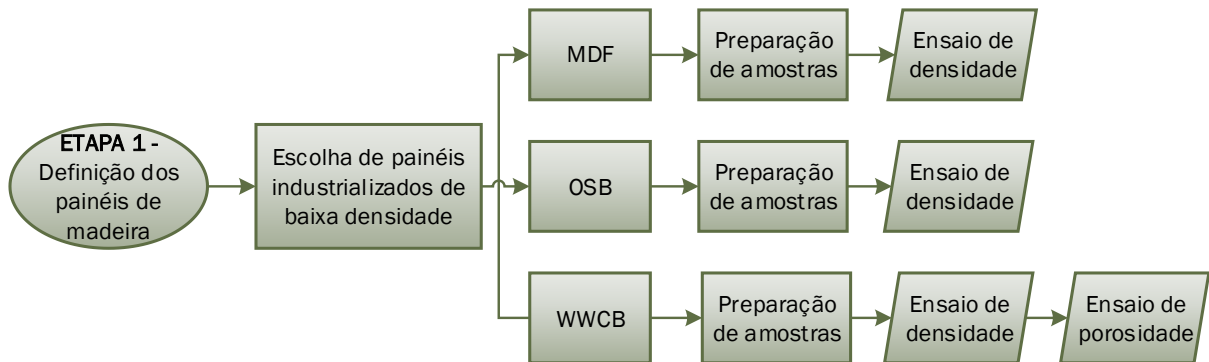
Na etapa 7, uma análise subjetiva com uma amostra de indivíduos homens e mulheres é apresentada.

A seguir estão detalhadas todas as etapas e procedimentos necessários para o desenvolvimento da tese.

#### 3.2 PRIMEIRA ETAPA: DEFINIÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA

A Figura 18 exhibe as sequências de atividades da primeira etapa.

**Figura 18– Sequência de atividades da primeira etapa.**



**Fonte: Autor (2020).**

Na primeira etapa do trabalho foi definida uma solução de condicionamento acústico baseada em diferentes painéis industrializados de madeira com as mais baixas densidades de suas categorias. A busca pela baixa densidade teve como justificativa o trabalho de Koizumi et al. (2002) que identificou que o aumento da densidade aparente de materiais feitos com fibras de bambu também aumenta o coeficiente de absorção sonora nas médias e altas frequências, e, segundo BRANDÃO (2016), as energias sonoras em altas frequências são essenciais para o entendimento de alguns sons. Amlani e Russo (2016) também identificaram que a absorção sonora em altas frequências pode levar a um aumento do esforço realizado para o entendimento do som.

Outras variáveis que foram consideradas para escolha dos materiais foram as resistências à ataques biológicos, à umidade e ao fogo, que garantem a utilização deles como elementos do ambiente construído. Depois do contato com as indústrias madeireiras da região sul do Brasil, e utilizando os critérios citados, decidiu-se pela utilização de painéis de fibras de madeira de média densidade, painéis de tiras orientadas de madeira e painéis de madeira mineralizada. Estes painéis são comercialmente conhecidos pelas suas denominações em inglês, sendo *Medium Density Fiberboard (MDF)*, *Oriented Strand Board (OSB)* e *Wood-Wool Cement Board (WWCB)*, respectivamente.

Além da densidade foram determinadas a porosidade e resistividade ao fluxo dos painéis de palha de madeira com cimento (WWCB), identificados na literatura como materiais sustentáveis com bom desempenho acústico relacionado à absorção sonora (DESARNAULDS et al., 2005; ASDRUBALI et al, 2012). Painéis do tipo MDF ou OSB possuem um desempenho melhor para a reflexão sonora do que para a absorção em função do seu processo de fabricação que envolve uma elevada compressão das fibras ou tiras de madeira, criando uma certa impermeabilidade ao ar, conseqüentemente ao som (WASSILIEFF, 1996).

Após o contato com diferentes fabricantes de painéis de madeira, optou-se pela utilização dos painéis em MDF, OSB e WWCB em diferentes espessuras, sendo:

- MDF: espessuras comerciais de 9,00mm, 12,0 mm e 15,0 mm;
- OSB: espessuras comerciais de 8,00 mm, 12,0 mm e 25,0 mm
- WWCB: espessuras comerciais de 17,0 mm, 25,0 mm e 50,0 mm para o material com palha grossa e de 25,0 mm para o material com palha superfina.

As diferentes espessuras foram avaliadas pois, segundo Cox e D'Antonio (2017), a absorção acústica varia conforme este parâmetro para absorvedores porosos, aumentando em baixas frequências com o aumento da espessura. No entanto, existe uma espessura na qual não existem ganhos, ou seja, o aumento da espessura não causa aumento nos valores de absorção sonora em nenhuma frequência (PFRETZSCHNER; ALVES, 2001).

Por mais que os painéis de OSB e MDF fabricados no Brasil possuam características que os classifiquem como materiais não adequados para a absorção sonora, criou-se a hipótese de que mesmo com suas composições não tão porosas seus desempenhos poderiam ser maiores que os revestimentos tradicionais de vedações verticais, como o revestimento argamassado e os painéis de gesso acartonado (*drywall*).

Logo, é apresentada nesta tese a utilização de dez diferentes tipos de painéis para o condicionamento acústico de uma sala de aula, que incluem os painéis do tipo MDF, OSB e WWCB. O primeiro dado apresentado dos painéis é a sua densidade.

### 3.2.1 Realização do Ensaio de Densidade

Para o ensaio de densidade dos painéis foi utilizada a norma europeia EN 323 (1993) como orientação. A quantidade de amostras, bem como o plano de corte, é definida pela norma EN 326-1 (1994). No Brasil, a norma ABNT NBR 15316-2:2019 orienta quanto aos métodos de ensaio para painéis do tipo MDF, tendo como base as normas europeias citadas.

A diferença entre a norma brasileira e a norma europeia quanto ao ensaio de densidade está na quantidade de amostras, que é de no mínimo 10 para a primeira, e de no mínimo 6 para a segunda. Neste trabalho, para garantir o atendimento à ambas as normas, foi adotada a quantidade de 10 amostras por tipo de painel, o que leva a um total de 100 amostras. As áreas de bordas a excluir e as faixas para extração dos corpos de prova foram respeitados no plano de corte dos painéis.

Conforme as orientações normativas, as amostras foram separadas com dimensões de 50,0 x 50,0 mm e estabilizadas em uma câmara climática até atingirem a umidade de equilíbrio, nas condições de  $(65 \pm 5)\%$  de umidade relativa e  $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$  de temperatura. A umidade de equilíbrio foi considerada quando o resultado de duas operações subsequentes de pesagem do corpo de prova, em um intervalo de 24 horas, não diferiu mais de 0,1% da massa do corpo de prova. A Figura 19 expõe as amostras cortadas, preparadas e acomodadas na câmara climatizada.

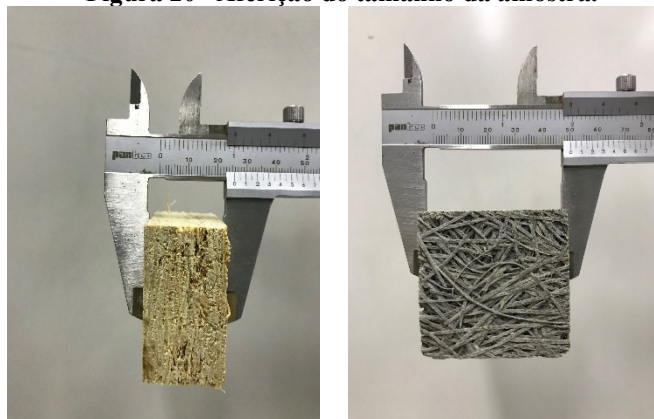
**Figura 19– Amostras para ensaio de densidade.**



Fonte: Autor (2020).

Foram realizadas medições com o auxílio de paquímetro nas quatro laterais da amostra, bem como quatro medições de espessura, uma em cada ponto médio das laterais. A Figura 20 ilustra como as amostras foram medidas, quanto à espessura e comprimento, respectivamente.

**Figura 20– Aferição do tamanho da amostra.**



Fonte: Autor (2020).

Após a permanência na câmara climatizada, as amostras foram pesadas em uma balança com precisão de quatro casas decimais, conforme a Figura 21.

**Figura 21– Obtenção da massa da amostra.**



**Fonte: Autor (2020).**

Com os valores medidos foi realizado um teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade da amostra (o que ocorre quando o  $p\text{-valor} > 5,00\%$ ), seguida de uma definição de um intervalo de confiança (IC) com 95,0% de grau de confiança utilizando um teste  $t$ . Após a definição do intervalo de confiança uma nova média foi calculada com os resultados compreendidos entre o IC.

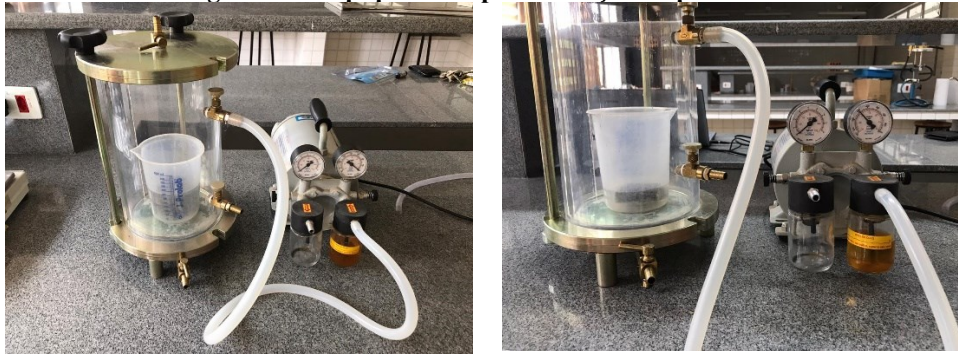
### 3.2.2 Realização do Ensaio de Porosidade e Estimativas de Resistividade ao Fluxo

O ensaio de porosidade foi realizado de forma não-acústica, conforme os trabalhos de Vašina et al. (2006) e Maderuelo-Sanz et al. (2012). Neste ensaio foram apenas consideradas as amostras de palha de madeira com cimento, identificadas como materiais absorvedores porosos (COX e D'ANTONIO, 2017).

Dez amostras de cada tipo do compósito WWCB (um total de 40 amostras) foram colocadas em uma estufa à uma temperatura de 105 °C por 12 horas e em seguida foram pesadas.

Um tubo utilizado para ensaios de permeabilidade à carga constante de solos foi utilizado como câmara de vácuo (Figura 22). Em sequência, as amostras, uma a uma, foram colocadas nesta câmara com uma fina camada de água em suas superfícies. Uma bomba de vácuo foi ligada até que a pressão de, aproximadamente, -67 kPa (500 mmHg) fosse gerada no interior da câmara, fazendo com que os vazios das amostras fossem preenchidos com água. Após este procedimento, as amostras foram cuidadosamente pesadas

**Figura 22 – Equipamento para medição de porosidade.**



Fonte: Autor (2020).

A porosidade ( $\Omega$ ) é dada pela Equação 50.

$$\Omega = \frac{V_w}{V_s} \quad (50)$$

Onde:

$\Omega$  é a porosidade, %;

$V_w$  é o volume de água na amostra, sendo  $V_w = \frac{(m_{úmida} - m_{seca})}{\rho_{água}}$ , cm<sup>3</sup>;

$m_{úmida}$  é a massa da amostra com seus vazios preenchidos com água, gramas;

$m_{seca}$  é a massa da amostra seca, gramas;

$V_s$  é o volume total da amostra, cm<sup>3</sup>;

$\rho_{água}$  é a densidade da água utilizada no ensaio, igual à 0,997 g/cm<sup>3</sup> (LIDE, 2004) para a temperatura de 25 °C observada no fluido.

O mesmo procedimento estatístico realizado para o ensaio de densidade (verificação da normalidade da amostra e definição de intervalo de confiança) foi realizado para a determinação da porosidade média.

A resistividade ao fluxo dos painéis de palha grossa de madeira com cimento pode ser estimada pela Equação 51 (WASSILLIEFF, 1996).

$$\sigma = 0,06\rho^{1,73} \quad (51)$$

onde:

$\rho$  é a densidade aparente em kg/m<sup>3</sup>.

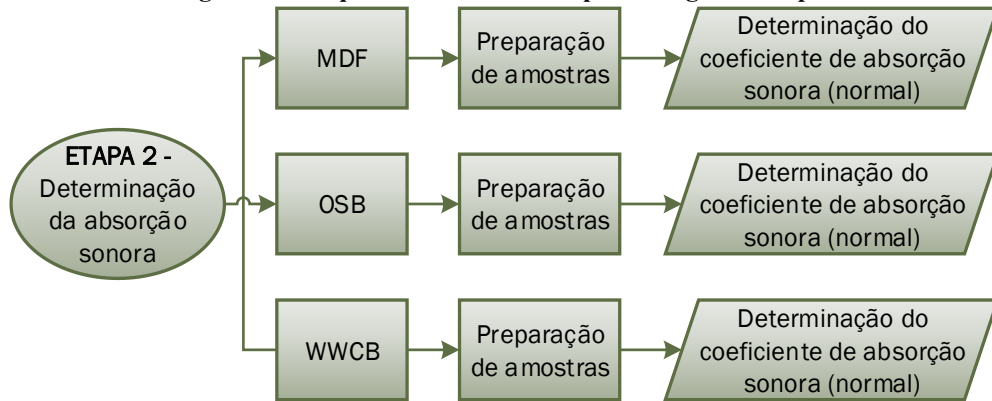
A unidade da resistividade ao fluxo é Ns/m<sup>4</sup>, também conhecida como rayl/m.

### 3.3 SEGUNDA ETAPA: DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO SONORA

A Figura 23 descreve sequências de atividades da segunda etapa.



**Figura 23– Sequência de atividades para a segunda etapa.**

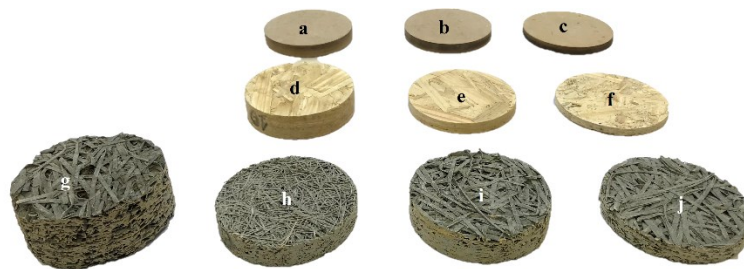


Fonte: Autor (2020).

### 3.3.1 Preparação das Amostras

Foram selecionadas dez amostras de cada tipo de painel com diâmetros de  $98 \pm 2$  mm, conforme a Figura 24.

**Figura 24– Amostras para ensaio de absorção sonora.**



Fonte: Autor (2020).

O Quadro 2 apresenta a relação da quantidade de amostras por tipo de painel, bem como sua correspondência com a Figura 24.

**Quadro 2 – Relação de amostras para ensaio de absorção**

Tipo de painel	Espessura (mm)	Quantidade de amostras	Como é referenciado	Letra correspondente na Figura 24
MDF	9,00	10	MDF – 9,00 mm	c
MDF	12,0	10	MDF – 12,0 mm	b
MDF	15,0	10	MDF – 15,0 mm	a
OSB	8,00	10	OSB – 8,00mm	f
OSB	12,0	10	OSB – 12,0 mm	e
OSB	25,0	10	OSB – 25,0 mm	d
WWCB com palha grossa	17,0	10	WWCB – 17,0 mm	j
WWCB com palha grossa	25,0	10	WWCB – 25,0 mm TKS	i
WWCB com palha grossa	50,0	10	WWCB – 50,0 mm	g
WWCB com palha superfina	25,0	10	WWCB – 25,0 mm SFS	h

Fonte: Autor (2020).

A forma de referência para cada tipo de compósito analisado foi mantida em outras seções desta pesquisa.

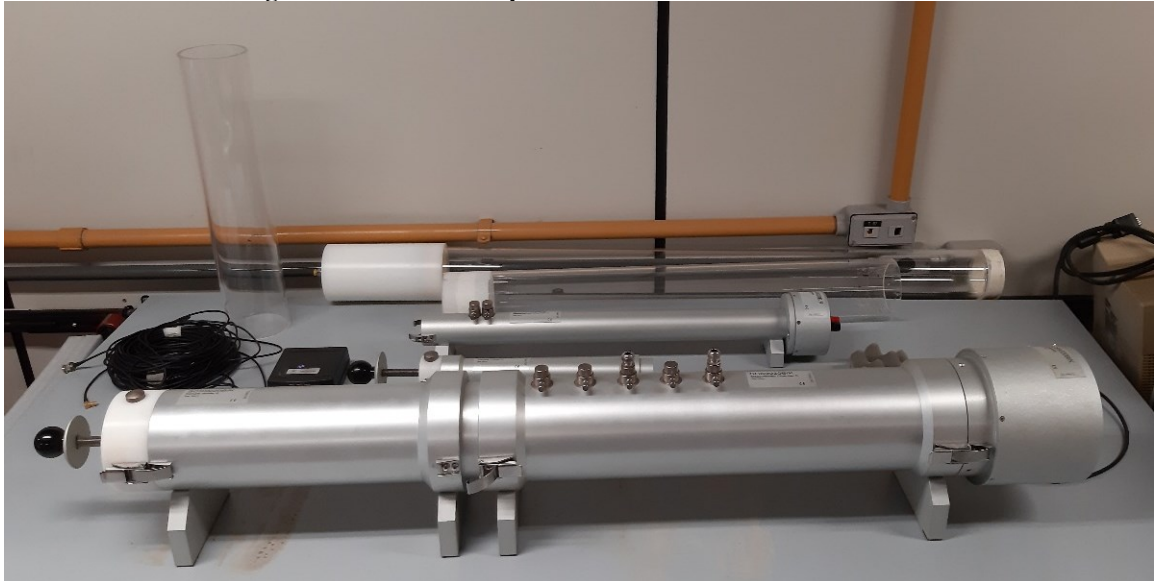
### 3.3.2 Realização do Ensaio de Absorção Sonora (Incidência Normal) – $\alpha_N$

O ensaio foi realizado na Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR), e os seguintes equipamentos e softwares foram utilizados:

- Gerador de ruído Brüel & Kjær tipo 3160-A-042 (6 canais);
- Dois microfones do tipo *array* (diâmetro de 1/4”), do fabricante Brüel & Kjær, tipo 4935;
- Tubo de impedância da marca SCS 9020 B/K com 100,0 mm de diâmetro interno, conforme a Figura 25;
- *Software* PULSE do fabricante Brüel & Kjær para geração do ruído e medição da impedância da amostra;
- *Software* MatLab (MATHWORKS, 2018), versão teste, para conversão dos valores encontrados de impedância em coeficientes de absorção sonora. O algoritmo utilizado para a obtenção do coeficiente de reflexão a partir das funções de transferência, adaptado do trabalho de Terashima (2016), encontra-se no Apêndice A;

- *Software R* (R CORE TEAM, 2019) para análises estatísticas e geração de gráficos.

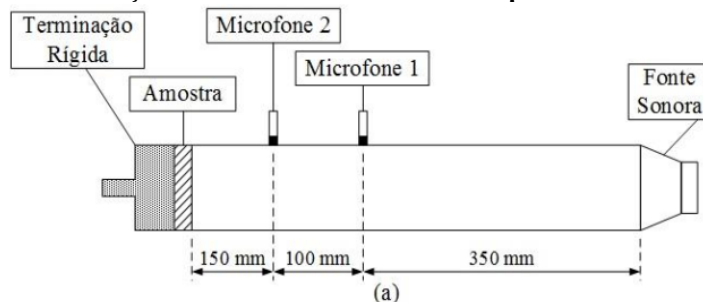
**Figura 25 – Tubo de impedância da Universidade PUC-PR.**



Fonte: Amarilla (2019).

A Figura 26 exibe a posição da distância entre os microfones no tubo.

**Figura 26 – Posição dos microfones no tubo de impedância de  $\varnothing$  100 mm.**



Fonte: Terashima (2016).

Foram seguidas todas as orientações das normas ASTM E1050 (2019) e ISO 10534-2 (1998) para a determinação do coeficiente de absorção sonora de incidência normal ( $\alpha_N$ ). A norma ASTM E1050 (2019) apresenta valores de referência para erros de medições encontrados em resultados de repetição (em um mesmo laboratório) e de reprodução (entre laboratórios), o que não é descrito na norma ISO 10534-2 (1998). Segundo Amadasi e Milani (2015), resultados obtidos para o modelo de tubo utilizado em medições de repetições dentro de um mesmo laboratório levaram às faixas de erro descritas na Tabela 4, calculadas conforme a norma ASTM E1050 (2019) e considerando um grau de confiança de 95,0%.

**Tabela 4 – Faixas de erro para o coeficiente de absorção medido no tubo de impedância.**

Variável	Frequência (Hz)				
-	125	250	500	1000	2000
$\alpha_N$	0,04	0,02	0,04	0,05	0,01

**Fonte: Amadasi e Milani (2015).**

O método para esta medição foi idealizado por Seybert e Ross (1977), que utiliza a função de transferência como base. Uma função de transferência é a transformada de Fourier (em sua forma complexa) de uma resposta ao impulso, que descreve as propriedades da transmissão linear de qualquer sistema capaz de transportar ou transformar energia em um certo espectro de frequência (MÜLLER, 2008).

Foram obtidas cinco funções de transferência para cada par de combinações de microfones e duas foram escolhidas, sendo uma para frequências mais altas e outra frequências mais baixas. A escolha foi realizada por meio de uma análise gráfica, verificando as que melhor poderiam ser concatenadas, ou seja, duas funções que, juntas, a partir de uma certa frequência, apresentaram uma melhor continuidade.

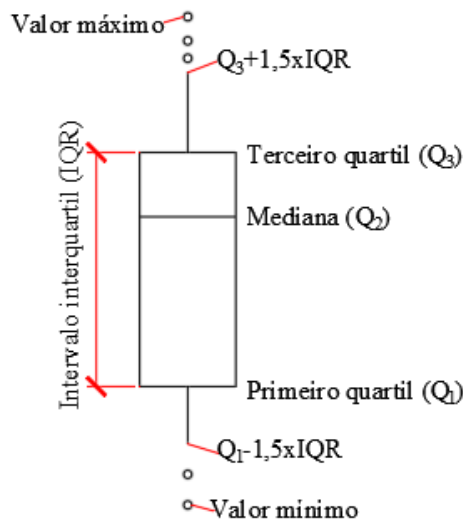
### 3.3.3 Análise Estatística e Determinação do Valor Final

Para as frequências de 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600 e de 2000 Hz foram realizados os seguintes procedimentos estatísticos:

- O teste de Shapiro-Wilk foi realizado para verificação da normalidade da amostra (se a amostra possui distribuição normal). Caso o parâmetro *p-valor* do teste fosse maior que 0,05 (nível de significância), a hipótese de que as amostras não possuem uma distribuição normal seria rejeitada;
- Após a verificação da normalidade, um intervalo de confiança (com 95,0% de grau de confiança) foi estabelecido por meio de uma distribuição do tipo *t* para cada frequência em análise;
- Uma nova média foi calculada apenas com os valores que ficaram dentro do intervalo de confiança;
- Caso a normalidade não fosse verificada (*p-valor* no teste de Shapiro-Wilk menor que 5%), um intervalo de confiança (com 95,0% de grau de confiança) seria estabelecido por meio do teste de Wilcoxon (utilizado em distribuição não-normais – estatística não paramétrica), e uma nova média seria calculada com os valores dentro do intervalo de confiança;

- Para cada uma das frequências descritas foi apresentado um diagrama de caixa (em inglês *boxplot*). Um diagrama de caixas apresenta os três quartis e os valores mínimo e máximo dos dados em uma caixa retangular, podendo ser alinhada vertical ou horizontalmente. A caixa inclui o intervalo interquartil (IQR), com uma linha inferior (ou à esquerda) no primeiro quartil ( $Q_1$ ) e uma linha superior (ou à direita) no terceiro quartil ( $Q_3$ ). Uma linha então é traçada através da caixa no segundo quartil ou mediana ( $Q_2$ ). Outras linhas, em ambas as pontas, estendem-se até os extremos inferior e superior, definidos como  $Q_1 - 1,5IQR$  e  $Q_3 + 1,5IQR$ , respectivamente (HINES et al., 2011). O diagrama de caixa é representado pela Figura 27.

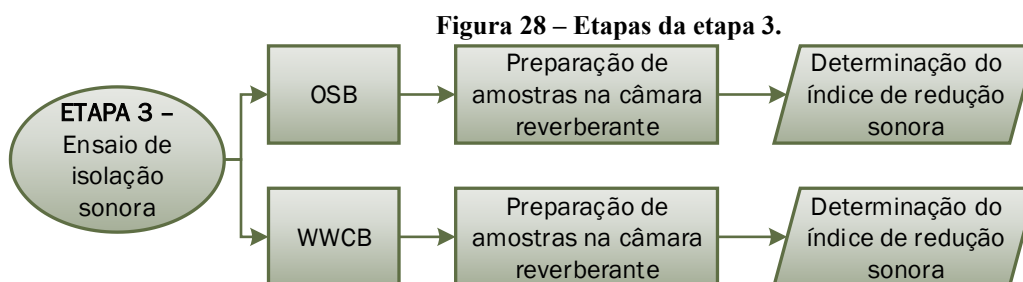
Figura 27 – Exemplo de diagrama de caixa.



Fonte: Autor (2020).

### 3.4 TERCEIRA ETAPA: ENSAIO DE ISOLAÇÃO SONORA

A Figura 28 demonstra as etapas que foram seguidas para a caracterização sonora de alguns painéis quanto à isolação.



Fonte: Autor (2020).

Uma propriedade identificada é a isolamento sonora dos painéis caso eles sejam executados com componentes de um sistema de vedação vertical. Acrescentar um painel a uma vedação existente pode trazer ganhos ou perdas de isolamento em função da frequência de ressonância do conjunto, dada pela Equação 35.

Foram escolhidos os painéis do tipo WWCB e os painéis tipo OSB para a análise de isolamento, devido ao fato de ambos poderem ser utilizados em sistemas de vedações verticais. O painel do tipo MDF não foi testado devido a sua utilização ser muito mais explorada na indústria moveleira, o que está crescente nas últimas décadas (AKGÜL, 2013).

Os painéis não foram testados como elementos únicos do sistema de vedação (ou seja, sem os blocos, apenas os painéis) devido à possibilidade de eles serem utilizados como elementos adicionais em vedações verticais externas ou internas.

O Quadro 3 relaciona as dimensões comerciais dos compósitos testados.

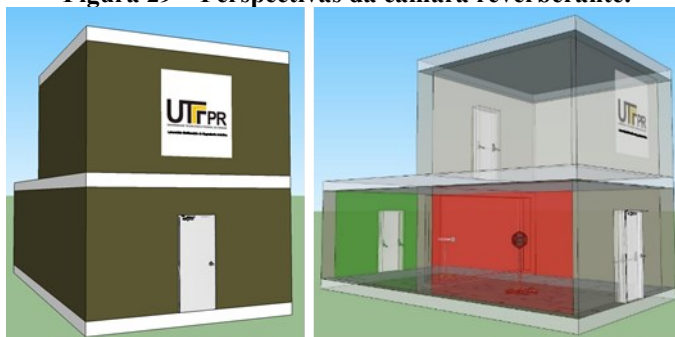
**Quadro 3 – Relação de painéis para ensaio de isolamento.**

Tipos de painéis	Dimensões (m)	Área (m <sup>2</sup> )
OSB – 8,00 mm	1,22x2,44	2,98
OSB – 12,0 mm	1,22x2,44	2,98
OSB – 25,0 mm	1,22x2,44	2,98
WWCB – 17,0vmm	0,60x2,44	1,46
WWCB – 25,0 mm TKS	1,00x2,44	2,44
WWCB – 50,0 mm TKS	1,00x2,60	2,60
WWCB – 25,0 mm SFS	1,00x2,44	2,44

Fonte: Autor (2020).

Os painéis foram colocados em uma câmara acústica reverberante, construída na UTFPR – Campus Curitiba. A modelagem paramétrica é exibida na Figura 29.

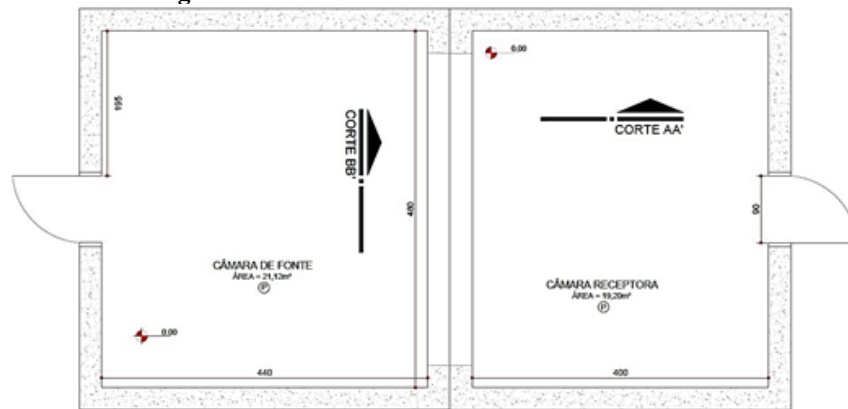
**Figura 29 – Perspectivas da câmara reverberante.**



Fonte: Sousa (2019).

A plantas baixa da câmara constam na Figura 30.

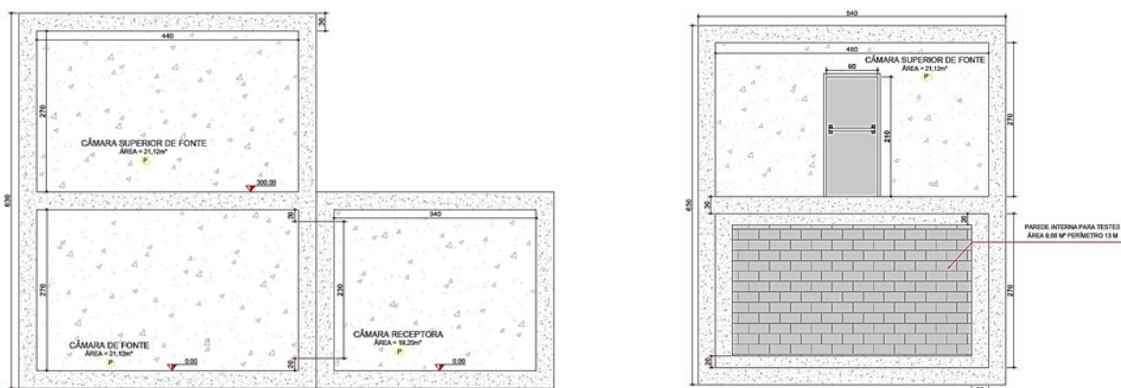
**Figura 30– Planta baixa da câmara reverberante.**



Fonte: Sousa (2019).

Os cortes AA' e BB' da câmara reverberante são detalhados pela Figura 35.

**Figura 31– Cortes AA' e BB' da câmara reverberante.**



Fonte: Sousa (2019).

A câmara acústica possui no térreo uma Sala Fonte (emissão) e Sala de Recepção (receptora), com volumes de  $57,02 \text{ m}^3$  e  $51,84 \text{ m}^3$  respectivamente (SOUSA, 2019). Os painéis foram colocados por meio de pregos em uma vedação vertical com blocos de concreto construídos com resíduos de construção e demolição (Figura 32) detalhados no trabalho de Sousa (2019).

**Figura 32– Vedação vertical de blocos com RCD.**



Fonte: Autor (2020).

A vedação revestida com painéis de palha de madeira com cimento é mostrada na Figura 33.

**Figura 33– Vedação vertical com painéis tipo WWCB – TKS 50 mm.**



**Fonte: Autor (2020).**

A forma de fixação pode ser observada na Figura 34.

**Figura 34– Painel fixado na vedação de blocos.**



**Fonte: Autor (2020).**

A vedação revestida com um painel do tipo OSB é apresentada na Figura 35.

**Figura 35– Vedação com painéis tipo OSB 8,00 mm e instrumentos de medição.**



**Fonte: Autor (2020).**



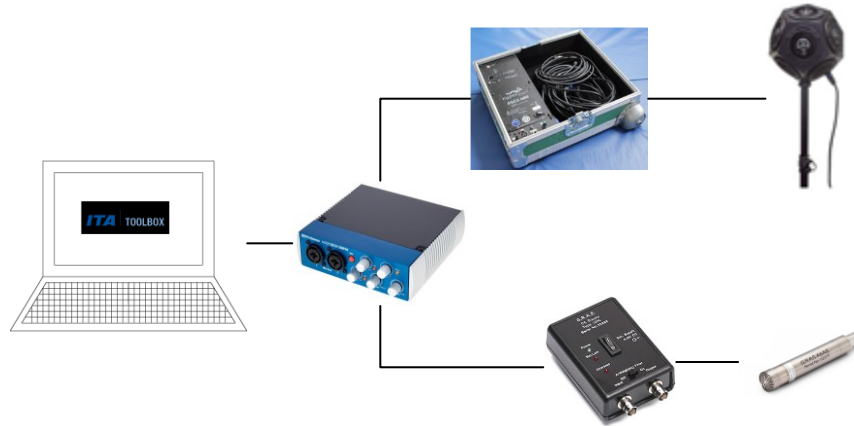
Os painéis foram colocados na câmara de recepção prevendo suas utilizações na face interna das vedações, ou seja, caso fossem utilizados em uma situação de fachada, foi considerado que sua colocação aconteceria no lado interno.

Os seguintes equipamentos foram utilizados:

- Computador marca Lenovo, modelo Ideapad 310, processador Intel Core i7;
- Interface de áudio USB marca PreSonus, modelo USB 96;
- Fonte sonora omnidirecional dodecaédrica e acessórios (modelo DDC-100), construída com 12 alto-falantes dispostos na forma de dodecaedro regular, do fabricante GROM. Alto-falantes de baixa distorção harmônica, interligados eletricamente em fase. Diâmetro nominal (entre vértices): 330 mm. Peso: 13,2 Kg. Impedância nominal: 5,4  $\Omega$ . Sensibilidade (1Vrms @ 1m) – SPL (ruído branco 40Hz – 8kHz): 82 dB. Potência máxima (AES): 720 W. Potência de trabalho com o amplificador Hypex PSC2.400: 300 W RMS. Potência sonora (re 1pW): 109 dB;
- Pré-amplificador de sinal modelo PAA-100 do fabricante GROM;
- Amplificador digital modelo Hypex PSC2.400 do fabricante GROM;
- Microfone da marca GRAS, modelo 46AE de 1/2". Espectro de frequência 0.5 Hz até 20 kHz. *Range* dinâmico: 17 dB(A) a 138 dB(A). Sensitividade: 50 mV/Pa;
- Condicionador de sinais do fabricante GRAS, modelo 12AL;
- Analisador de frequência classe I, modelo 2250 *Light*, do fabricante Brüel & Kjær;
- Calibrador acústico modelo 4231, do fabricante Brüel & Kjær;
- *Software* MatLab (MATHWORKS, 2018) com a utilização da ferramenta ITA *Toolbox* (BERZBORN et al., 2017) para medições de respostas aos impulsos;
- *Software* Audacity (AUDACITY TEAM, 2019) para geração de ruído branco para medições de isolamento;
- *Software* R (R CORE TEAM, 2019) para elaboração de gráficos e processamento de resultados.

O esquema de ligação dos equipamentos para a medição da resposta ao impulso na câmara de recepção é detalhado na Figura 40.

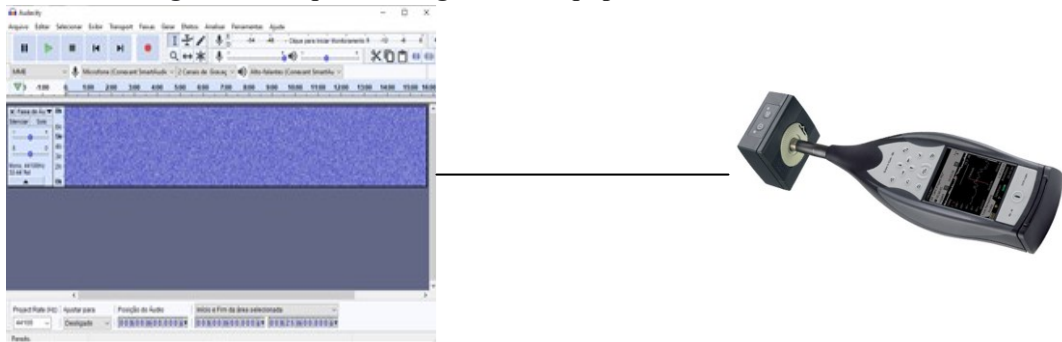
**Figura 36– Esquema de ligação dos equipamentos – medição da resposta ao impulso.**



**Fonte: Presonus (2019); Grom (2019); Gras (2019a); Gras (2019b).**

A Figura 37 ilustra a interface dos equipamentos para a medição do nível de pressão sonora nas câmaras de emissão e recepção.

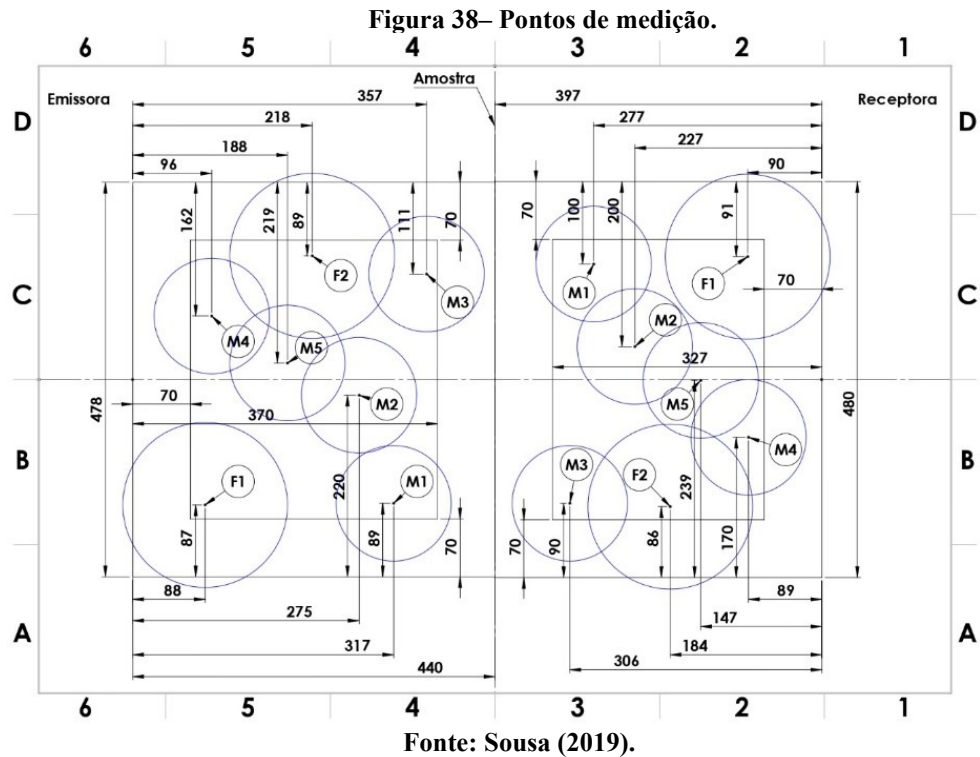
**Figura 37– Esquema de ligação dos equipamentos – medição do NPS.**



**Fonte: Audacity Team (2019); BKSV (2019).**

Para a determinação do índice de redução sonora foram seguidas todas as orientações das normas ISO 10140-2 (2010), 10140-4 (2010), 10140-5 (2010) e 717-1 (2013). A sequência de medição foi a seguinte:

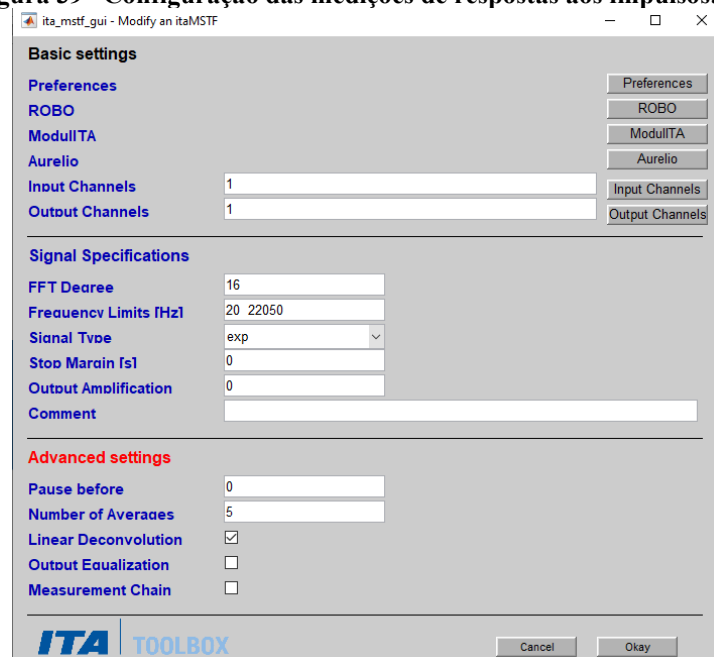
- Determinação dos pontos de medição, respeitando as distâncias entre fonte e microfones descritas na norma ISO 10140-4 (2010) sendo “*M*” a abreviação para microfones e “*F*” para fonte na Figura 38;



- Foram determinadas cinco posições de microfone e duas de fonte sonora em cada lado da câmara, o que totalizou 10 medições para a emissão, e mais 10 para a recepção. Foi utilizado um único microfone, variando sua posição;
- Medição do ruído de fundo conforme a norma ISO 10140-4 (2010), utilizando o analisador de frequência, nas câmaras de recepção e emissão. Se a diferença do nível de pressão sonora gerado e do ruído de fundo fosse superior à 6 dB e inferior à 15 dB em cada frequência, uma correção seria necessária. Caso fosse superior à 15 dB, nenhuma correção seria necessária. Foram feitas cinco medições (uma para cada posição de microfone) na emissão e outras cinco na emissão;
- Medição do nível de pressão sonora na emissão: um ruído branco foi gerado com o *software* Audacity (AUDACITY TEAM, 2019), que passou pelo pré-amplificador e pelo amplificador digital até chegar no dodecaedro (fonte sonora), sendo medido pelo analisador de frequência nas cinco posições de microfone estabelecidas;
- Mantendo a fonte na posição número um da câmara de emissão, foram realizadas cinco medições (nos pontos de microfone “M”) da câmara de recepção, com o mesmo ruído branco sendo gerado na emissão;

- A fonte sonora foi movida para a posição dois na câmara de emissão, e fez-se uma nova bateria de medições ainda na emissão, e, em seguida, foram feitas medições nos pontos “M” da sala de recepção, mantendo a fonte sonora na posição dois da câmara de emissão;
- Os valores dos níveis de pressões sonoras sem ponderações (ou ponderados em Z) para as frequências de interesse foram exportados para o formato “xlsx” por meio do *software* BZ 5503, do mesmo fabricante do analisador de frequência;
- Após o processo de medição dos níveis de pressão sonora, moveu-se a fonte sonora para a câmara de recepção, na posição 1. Iniciou-se então o processo de medição da resposta ao impulso;
- Foi utilizado um ruído do tipo *sweep* exponencial com uma deconvolução linear gerado por meio da *ITA Toolbox* no software MatLab (MATHWORKS, 2018). Este ruído passou por uma interface de áudio USB (marca PreSonus e modelo Audiobox USB 96), que conectava o computador ao dodecaedro. A medição foi realizada por um microfone tipo campo aberto do fabricante GRAS (modelo 12 AE) ligado à um condicionador de sinais de mesmo fabricante (modelo 12 AL), que por sua vez era ligado na mesma interface de áudio com conexão USB e alimentado por uma fonte de corrente contínua. Foram realizadas cinco varreduras por ponto de microfone, conforme a Figura 39, utilizando um valor FFT igual à 16.

**Figura 39– Configuração das medições de respostas aos impulsos.**



Fonte: Autor (2020).

- Posteriormente, com uma rotina descrita no Apêndice B, os valores das medições foram transformados em tempo de reverberação juntamente com a incerteza de medição, e assim, exportados para um arquivo “.txt”, onde foram manipulados no *software* R (R CORE TEAM, 2019).

Após as medições, o processamento dos dados ocorre da seguinte forma (ISO 10140-2, 2010; ISO 10140-4, 2010):

- Foi determinado o nível de pressão sonora médio entre as cinco medições de uma mesma fonte sonora, conforme a Equação 52.

$$L = 10 \log \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 10^{\frac{L_j}{10}} \quad (52)$$

onde:

$L_j$  são os valores de níveis de pressão sonora medidos para as cinco posições de microfones de uma mesma fonte sonora, em decibéis. Logo, foram obtidos dois valores médios para a emissão e dois para a recepção;

- Foi realizada a diferença de níveis entre a emissão e a recepção para uma mesma posição de fonte. Por exemplo, o valor médio medido na emissão para a fonte na posição 1 da emissão menos o valor médio medido na recepção sem alteração na posição da fonte sonora da emissão. O índice de redução sonora aparente foi calculado por meio da Equação 53.

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (53)$$

onde:

$S$  é a área de amostra a ser analisada, neste caso igual à 9,66 m<sup>2</sup>;

$$A = \frac{0,16V}{T}, \text{ m}^2;$$

$V$  é volume da câmara de recepção, igual à 51,84 m<sup>3</sup>;

$T$  o tempo de reverberação medido, segundos;

$L_1$  é o nível de pressão sonora na emissão para a frequência em análise, dB;

$L_2$  é o nível de pressão sonora na recepção para a frequência em análise, dB.

- Desta forma, foram obtidos dois valores de índice de redução sonora aparente, um para a fonte na posição 1 ( $F1$ ), outro para a fonte na posição 2 ( $F2$ ) da sala de emissão.

- Em seguida, foi realizada a média entre os dois valores calculados de  $R_i$  (índice de redução sonora aparente), obtendo-se assim o índice de redução sonora por meio da Equação 54.

$$R = -10 \log \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 10^{-\frac{R_i}{10}} \quad (54)$$

A incerteza das medições foi calculada conforme a norma ISO 3741 (2010), por meio da Equação 55.

$$u_T = \sqrt{\frac{2,42T_{60}}{f} + \frac{s_T^2}{N_{decaimentos}}} \quad (55)$$

onde:

$u_T$  é a incerteza na determinação do tempo de reverberação;

$T_{60}$  é o tempo de reverberação medido, segundos;

$s_T$  é o desvio padrão amostral das medições realizadas;

$f$  é banda de frequência de 1/3 de oitava referente à medição, Hz;

$N_{decaimentos}$  é o número de decaimentos em análise, que neste caso, foram 10 decaimentos (dez medições).

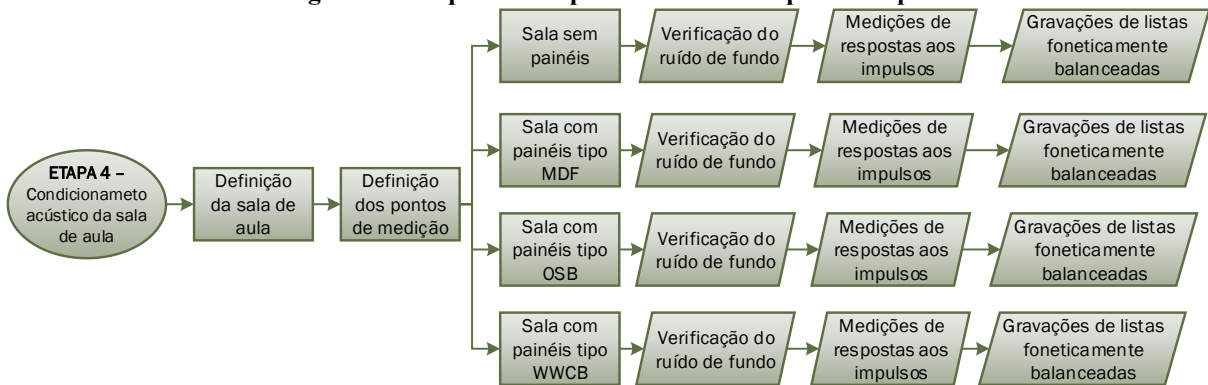
O índice de redução sonora ponderado (cujo descritor é definido como  $R_w$ ) é um número único que corresponde à isolação de uma amostra medida na câmara reverberante. O procedimento de ponderação ocorre com o deslocamento de uma curva padrão em uma unidade de dB sobre a curva com os valores de índice de redução sonora obtidos. A curva padrão é deslocada até que a soma dos desvios desfavoráveis seja máxima e inferior à 32 dB (ISO 717-1, 2013).

O índice de redução sonora ponderado é o valor à 500 Hz na curva padrão deslocada (ISO 717-1, 2013). Complementam a caracterização da isolação os espectros de adaptação  $C$  e  $C_{tr}$ , referentes ao ruído rosa e ao ruído de tráfego, respectivamente.

### 3.5 QUARTA ETAPA: CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DA SALA DE AULA

A quarta etapa consistiu na aplicação dos painéis em uma sala de aula e seus processos podem ser identificados na Figura 40.

**Figura 40– Sequência de procedimentos da quarta etapa.**



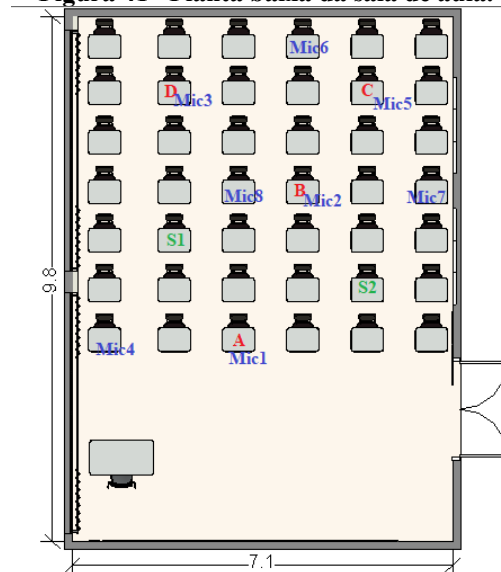
Fonte: Autor (2020).

### 3.5.1 Escolha da Sala de Aula

A sala de aula escolhida se encontra na UTFPR Campus Ecoville – Curitiba/PR, constituída de vedações verticais em alvenaria (lateral com esquadrias) e em painéis de gesso acartonado (*drywall*) com preenchimento de lã de vidro.

A sala não possui forro e o piso é vinílico. A planta baixa é exibida pela Figura 41.

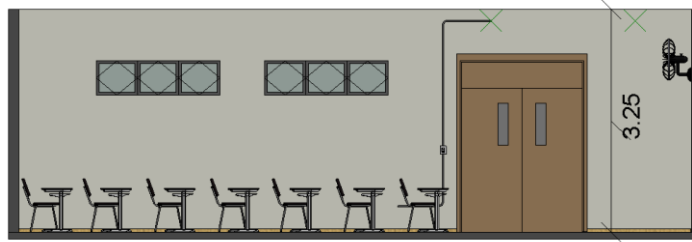
**Figura 41– Planta baixa da sala de aula.**



Fonte: Autor (2020).

O corte no sentido longitudinal da sala é representado pela Figura 42.

**Figura 42– Corte da sala de aula.**



**Fonte: Autor (2020).**

Na Figura 41 estão inseridas as posições de fontes (*S1* e *S2*), as posições de microfones (*Mic1*, *Mic2*, *Mic3*, *Mic4*, *Mic5*, *Mic6*, *Mic7* e *Mic8*) e os assentos que serão analisados (*A*, *B*, *C* e *D*). Os assentos *A*, *B*, *C* e *D* distaram, aproximadamente, 2,73, 5,55, 7,76 e 6,34 metros da fonte sonora (mesa do professor). Modelagens paramétricas originaram as perspectivas da Figura 43.

**Figura 43– Perspectivas da sala de aula.**



**Fonte: Cabral (2019).**

As cortinas foram mantidas com 50,0% de sua área aberta, conforme observado nas perspectivas, e as esquadrias permaneceram fechadas durante toda a etapa. Segundo Fuchs (2013) uma pessoa pode perceber a qualidade acústica de uma sala em três diferentes níveis:

- Esteticamente representada pela arquitetura, onde os elementos do ambiente construído transmitem a impressão de um ambiente acusticamente tratado;
- Ergonomicamente, onde o condicionamento acústico realmente melhora a inteligibilidade para níveis mínimos;



- Funcionalmente, onde o condicionamento acústico é realizado de forma adequada ao que se destina o ambiente, como controle espectral das ondas sonoras.

Foram adotados doze painéis nas dimensões de 60 x 120 cm preenchendo a lateral e o fundo da sala, conforme mostram as modelagens paramétricas da Figura 44. A fixação foi realizada mediante parafusos e as disposições dos painéis, dimensões e quantidades foram baseadas no trabalho de Amlani e Russo (2016), o que permitiu a comparação com o referido estudo que utilizou painéis de poliéster. A estética arquitetônica também influenciou na decisão do posicionamento dos painéis, assim como o espaço disponível nas vedações verticais para as inserções.

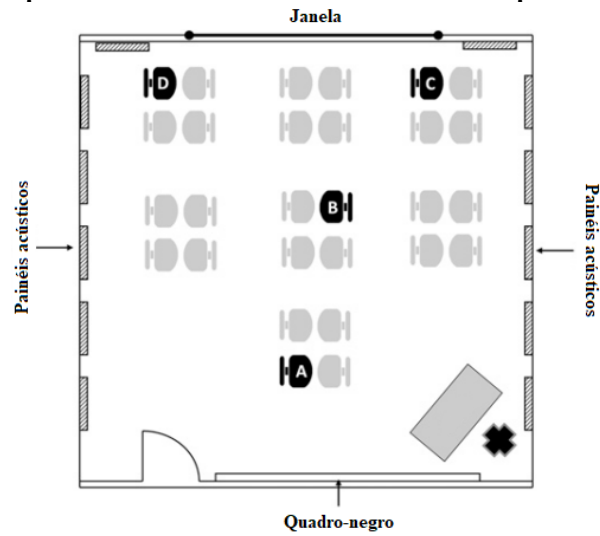
**Figura 44– Perspectivas da sala de aula com painéis para condicionamento acústico.**



**Fonte: Cabral (2019).**

A distribuição dos painéis feita por Amlani e Russo (2016) é apresentada na Figura 45, sendo 12 painéis de 60 x 120 cm distribuídos nas vedações verticais. Também são indicados na Figura 45 os assentos escolhidos para os estudos de inteligibilidade.

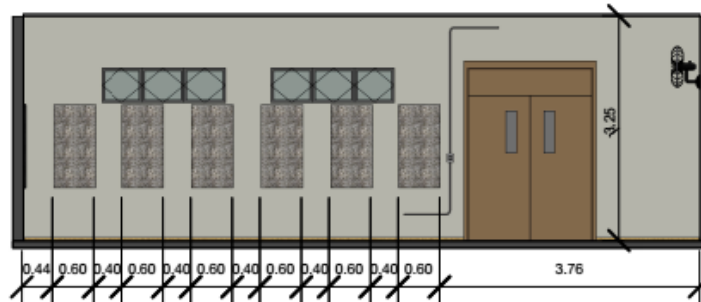
Figura 45– Distribuição dos painéis acústicos em uma sala de aula feita por Amlani e Russo (2016).



Fonte: Amlani e Russo (2016).

A Figura 46 exibe as posições e distâncias dos painéis na vedação vertical lateral da sala de aula.

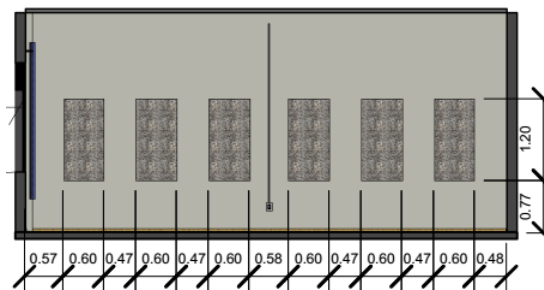
Figura 46– Lateral com painéis.



Fonte: Cabral (2019).

A Figura 47 exibe a vedação vertical do fundo com os painéis fixados.

Figura 47– Fundo com painéis.



Fonte: Cabral (2019).

A Figura 48 mostra uma fotografia da sala de aula acondicionada com painéis do tipo MDF.

**Figura 48– Fotografia da sala de aula com painéis tipo MDF.**



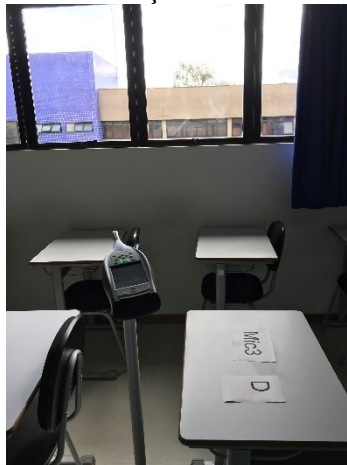
**Fonte: Autor (2020).**

### 3.5.2 Medição das Respostas ao Impulso

Após a fixação dos painéis foram realizadas medições das respostas aos impulsos, utilizando os mesmos equipamentos mostrados na Figura 36 da medição de isolamento. Para as medições da sala de aula foram adotadas três medições por ponto, ao invés de cinco como foi feito na câmara acústica. Para o cálculo do tempo de reverberação, o processo de medição de aquisição das respostas aos impulsos foi realizado conforme a norma ABNT NBR ISO 3382-2:2018, com os seguintes passos:

- Realizaram-se três medições do nível ruído de fundo com um analisador de frequência classe 1, do fabricante Brüel & Kjaer, modelo 2250 *Light*, conforme mostra a Figura 49;

**Figura 49– Medição do ruído de fundo.**



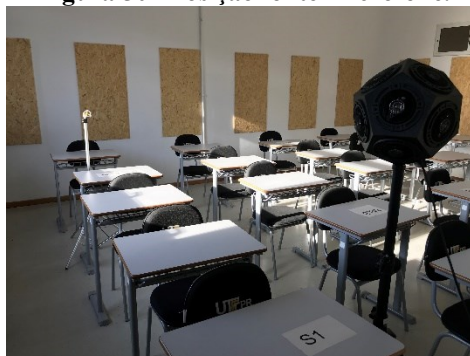
**Fonte: Autor (2020).**

- Com a fonte sonora omnidirecional posicionada na posição 1 (*S1*) foram feitas medições de respostas ao impulso nos pontos *Mic1*, *Mic2*, *Mic3* e *Mic4*, respeitando as distâncias mínimas entre fonte e microfone estabelecidas pela

norma. Foi utilizado método de *sweep* logarítmico com deconvolução linear. Um único microfone foi utilizado, ou seja, as medições não foram simultâneas;

- Moveu-se a fonte sonora para a posição 2 (*S2*) e em seguida foram feitas medições nos pontos *Mic5*, *Mic6*, *Mic7* e *Mic8*. As medições foram realizadas utilizando um microfone modelo 12AE do fabricante GRAS. A Figura 50 exibe uma posição de fonte-microfone;

**Figura 50– Posição fonte-microfone.**



**Fonte: Autor (2020).**

- A fonte sonora foi movida para a posição de fonte acima da mesa do professor e foram realizadas medições de respostas aos impulsos nos locais indicados pelos assentos *A*, *B*, *C* e *D*;
- Com as doze respostas ao impulso e utilizando a ferramenta ITA *Toolbox* o  $T_{20}$  (tempo de reverberação) foi calculado. O tempo  $T_{20}$  é definido como o tempo obtido a partir do tempo no qual a curva de decaimento primeiro alcança 5 dB e depois 25 dB abaixo do instante inicial, multiplicado por três para equivaler ao  $T_{60}$ ;
- O número único para o tempo de reverberação é dado como a média espacial dos valores medidos;
- A incerteza de medição foi calculada por meio da Equação 56.

$$\sigma(T_{20}) = 0,88T_{20} \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{1,90}{n}\right)}{NBT_{20}}} \quad (56)$$

onde:

$\sigma(T_{20})$  é o desvio-padrão do resultado de medição;

$T_{20}$  é o tempo de reverberação médio medido para uma faixa de frequência central de um filtro de banda de 1/3 de oitava, em segundos;

$n$  é número de decaimentos medidos para cada posição. Para medições que utilizem o método de resposta impulsiva integrada, o valor de  $n$  pode ser estabelecido como 10;

$N$  é o número de posições independentes (combinações de fonte-receptor), sendo igual à 12 para o estudo em questão;

$B = 0,23f_c$ , onde  $f_c$  é a frequência de banda central do filtro de 1/3 de oitava, Hz.

As medições de respostas aos impulsos para as situações da fonte sonora posicionada na mesa do professor, para cada assento em análise, foram realizadas à 1,50 metros de altura para a fonte e à 1,20 metros para o microfone, conforme a Figura 51, que apresenta uma medição no assento *A*. Estas alturas correspondem a uma situação de emissão-recepção semelhante à de docente-discente, e foram também adotadas por Amlani e Russo (2016) e Russo e Ruggiero (2019).

**Figura 51 – Posição fonte-microfone tipo professor-aluno.**



**Fonte: Autor (2020).**

Com as medições de respostas ao impulso nas configurações professor-aluno para os assentos *A*, *B*, *C* e *D*, foram calculados com o auxílio da ferramenta ITA *Toolbox* os STI (índices de transmissão de fala) para os diferentes assentos pelo método indireto. Foi mantido o método do *sweep* logarítmico por ser o método mais indicado pela norma ABNT NBR IEC 60268-16:2011 para a determinação do STI.

### 3.5.3 Medição de Respostas ao Impulso Biauriculares

Em seguida, utilizando uma cabeça artificial modelo KU 100 do fabricante Neumann, foram obtidas respostas ao impulso de modo biauricular para cada assento em cada configuração com painéis (assim como no cenário sem os painéis), mantendo-se os padrões utilizados nas medições das respostas aos impulsos das configurações professor-aluno. A Figura 52 mostra a cabeça posicionada à 1,20 metros de altura em relação ao piso, situada no assento *B*.

**Figura 52 – Cabeça artificial posicionada no assento B.**



Fonte: Autor (2020).

A resposta ao impulso biauricular foi então medida com a fonte sonora situada à 1,50 metros do piso, próxima à mesa do professor, como é verificado na Figura 53.

**Figura 53 – Medição de uma resposta ao impulso biauricular.**



Fonte: Autor (2020).

Além do STI obtido por meio das medições realizadas com o microfone de  $\frac{1}{2}$ " nas configurações professor-aluno para fonte e receptor, ele também foi determinado para as orelhas esquerda e direita da cabeça artificial.

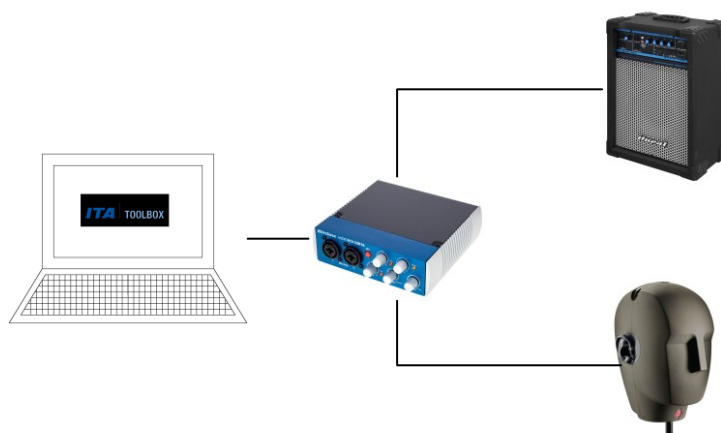
O método da cabeça artificial utiliza estímulos como o *sweep* exponencial para obtenção de uma função de transferência relacionada à cabeça (em inglês *Head Related Transfer Function* - HRTF). A utilização da cabeça artificial consiste em uma “cabeça média” do ser

humano. As gravações e medições realizadas com este equipamento não têm a mesma qualidade que gravações feitas nas entradas dos canais auditivos de ouvintes humanos (WERSÉNYI; IILÉNYI, 2005). Como as características geométricas da cabeça, ombros, tronco e orelhas diferem entre as pessoas, as HRTF são únicas para cada indivíduo (ROTBUCHER et al, 2009).

### 3.5.4 Gravação de Listas Foneticamente Balanceadas

Cinco listas de palavras e frases foneticamente balanceadas (compostas por monossílabos, dissílabos e frases sem sentido) adaptadas do trabalho de Barreto e Ortiz (2010) e organizadas por Scherwtz e De Conto (2019a), conforme constam no Anexo A, foram gravadas por um falante masculino (idade de 30 anos) em um estúdio de gravação profissional. Em seguida as listas foram reproduzidas por meio de um alto falante multiuso do fabricante Oneal e modelo OCM 308 posicionado na mesa do professor. O esquema de gravação para as listras de palavras reproduzidas na sala de aula é representado na Figura 54.

**Figura 54 – Esquema de gravação de palavras reproduzidas na sala.**



**Fonte: Oneal (2019); Neumann (2019).**

Foi estabelecido o nível de pressão sonora equivalente para a reprodução da lista 1 (sem ponderações, ou seja, linear ou *Z-weighted*) de, aproximadamente, 70 dB à 1,00 metro do alto-falante, conforme exhibe a Figura 55. Tal NPS definido conforme o trabalho de Amlani e Russo (2016), que identifica o valor como uma situação média em sala de aula para um professor falando normalmente.

**Figura 55 – Medição de NPS à 1,00m do alto falante.**



**Fonte: Autor (2020).**

Foram gravadas cinco listas por assento para cada configuração de sala de aula. O ruído de fundo foi avaliado, e notou-se que a principal fonte sonora era o ruído de tráfego. Devido à variação do ruído de fundo nas gravações, a sexta etapa da metodologia deste trabalho se fez necessária.

### 3.5.5 Gravação do Áudio *Arizona Travelogue Passage*

Assim como no trabalho de Amlani e Russo (2016) o áudio conhecido como *Arizona Travelogue Passage* foi gravado à 1,00 metro do alto falante (com um NPS médio de 70,0 dB) e em cada assento, com o objetivo de verificar a variação do nível de pressão sonora em cada assento em cada configuração de sala de aula. A Figura 56 mostra o analisador posicionado à 1,00 metro do alto-falante realizando a medição do áudio.

**Figura 56– Gravação do áudio ATP.**



**Fonte: Autor (2020).**



O áudio consiste no relato de uma viagem pelo estado do Arizona (EUA) por um falante masculino. Foi utilizado o primeiro minuto do áudio. O ruído da fonte sonora ligada, sem a execução do áudio, foi avaliado como desprezível.

### 3.5.6 Análise Estatística das Medições do STI

Foi realizada um teste de normalidade em cada assento – teste de Shapiro-Wilk - para os valores encontrados nas medições com microfone de 1/2”, com a orelha esquerda e com a orelha direita da cabeça artificial, ou seja, foi verificada se as três medições realizadas em pontos diferentes apresentavam uma distribuição normal de acordo com o teste de Shapiro-Wilk. Em seguida, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) entre os valores medidos nos assentos *A*, *B*, *C* e *D*, conforme exemplo na Tabela 5 que apresenta os valores da condição sem painel. A não verificação da normalidade amostral seria precedida de técnicas da estatística não-paramétrica.

Para todos os cálculos foi utilizado o *software* R (R CORE TEAM, 2019).

**Tabela 5 – Exemplo - valores calculados de STI para a condição sem painel.**

Assento	STI calculado	Tipo de medição	<i>p</i> -valor (Shapiro-Wilk)	<i>p</i> -valor ANOVA
A	0,6063	Microfone de 1/2"		
A	0,5829	Orelha esquerda	0,5957	
A	0,6169	Orelha direita		
B	0,5879	Microfone de 1/2"		
B	0,5851	Orelha esquerda	0,6109	
B	0,5938	Orelha direita		0,0587
C	0,5916	Microfone de 1/2"		
C	0,5912	Orelha esquerda	0,1091	
C	0,5860	Orelha direita		
D	0,5713	Microfone de 1/2"		
D	0,5837	Orelha esquerda	0,2034	
D	0,5697	Orelha direita		

**Fonte: Autor (2020).**

Na Tabela 5 verificou-se que os valores calculados de STI, mesmo com microfones e posições diferentes, possuem uma distribuição normal para cada assento (*p*-valor>0,05 no teste de Shapiro-Wilk), e que não existe diferença estatística entre as médias dos valores de STI entre os assentos (*p*-valor>0,05 na análise de variância). Este procedimento foi realizado para as 11 configurações da sala de aula (a sala sem condicionamento e suas 10 configurações com

tratamentos acústicos). O grau de confiança adotado foi de 95,0%, o que leva a um nível de significância de 5,00%.

Para as situações onde foi verificada diferença estatística entre os grupos ( $p$ -valor no teste de ANOVA  $< 5,00\%$ ), um teste de comparações múltiplas (teste de Tukey) foi realizado com o objetivo de verificar se os níveis de inteligibilidade variaram estatisticamente entre os assentos. O teste de Tukey foi escolhido por ser um teste adequado à estatística paramétrica (em distribuições normais). A não verificação da normalidade amostral levaria a outro tipo de teste, como os testes de Nemenyi ou de Dunn.

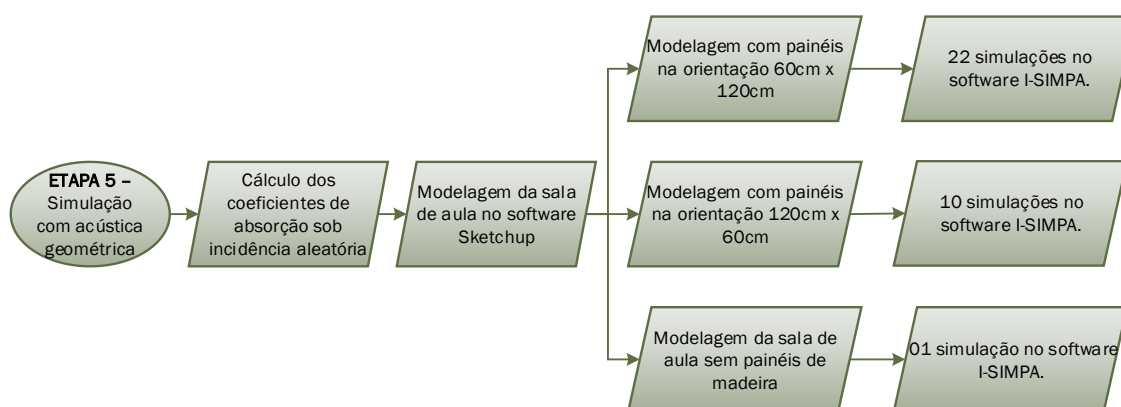
Uma outra análise foi realizada entre os diferentes tipos de receptores para cada cenário. Os valores medidos com os microfones de  $\frac{1}{2}$ " da orelha esquerda ( $\frac{1}{4}$ " e da orelha direita ( $\frac{1}{4}$ " foram relacionados para uma verificação de sua distribuição amostral (pelo teste de Shapiro-Wilk), seguida de uma análise de variância do tipo ANOVA, para estatística paramétrica, ou pelo teste de Kruskal-Wallis, para distribuição não normal ( $p$ -valor  $< 5,00\%$  no teste de normalidade).

### 3.6 QUINTA ETAPA: SIMULAÇÃO COM ACÚSTICA GEOMÉTRICA

A quinta etapa é definida pela simulação computacional da sala de aula, onde os resultados simulados foram comparados com os valores medidos. Nesta etapa também foram verificadas as diferenças no campo acústico com a alteração da orientação dos painéis nas vedações verticais por meio da simulação. Também foram realizadas simulações alternando os tipos de painéis de palha de madeira com cimento em um mesmo cenário.

O fluxograma desta etapa é apresentado na Figura 57.

**Figura 57 – Detalhamento da quinta etapa.**



Fonte: Autor (2020).

Os cálculos dos coeficientes de absorção sob incidência aleatória dos painéis foram realizados com a impedância específica resultante das medições do tubo de impedância, utilizando para tanto a Equação 12 (equação de Paris). O algoritmo para o cálculo da admissão acústica, bem como da separação das partes real e imaginária foi escrito em linguagem de programação *Python* e pode ser verificado no Apêndice C. As variáveis de entrada são as funções de transferência medidas no tubo de impedância com as diferentes combinações de posições de microfones do tubo.

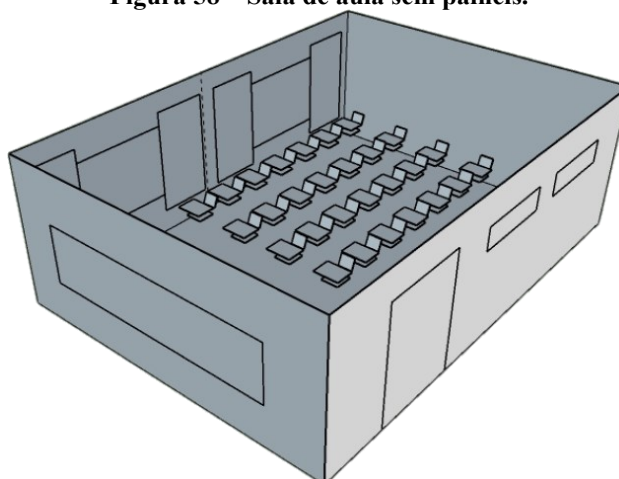
O procedimento estatístico das medições do coeficiente de absorção do tubo de impedância, demonstrado na seção 3.4.3, foi também adotado para os coeficientes de absorção resultantes da fórmula de Paris. O algoritmo para o cálculo destes coeficientes e sua análise estatística, feito no *software* R (R CORE TEAM, 2019), encontra-se no Apêndice D.

O próximo passo foi a criação do modelo. Um projeto arquitetônico, principalmente se for criado por meio da tecnologia *Building Information Modeling* (BIM), apresenta alta complexidade com vários detalhes. Do ponto de vista acústico, este modelo não é adequado devido à complexidade poligonal. A caracterização acústica das superfícies é baseada em coeficientes de absorção e de espalhamento. Os objetos cujas superfícies são muito pequenas (ou muito menores que os comprimentos de ondas) devem ser retirados do modelo e serem substituídos por superfícies planas com as informações acústicas adequadas. Entram nesta lista as lâmpadas, maçanetas, cadeiras etc. (VÖRLANDER, 2008).

As criações dos modelos foram realizadas no *software* Trimble Sketchup com formas geométricas básicas. Três modelos foram criados, sendo:

- Sala de aula sem condicionamento acústico, ou seja, sem painéis, representada na Figura 58.

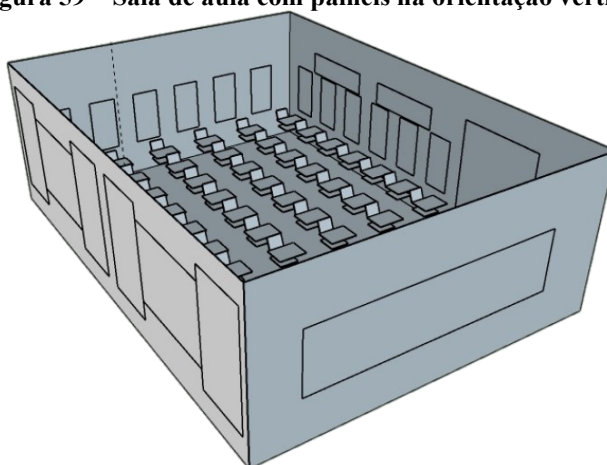
**Figura 58 – Sala de aula sem painéis.**



**Fonte: Autor (2020).**

- Sala de aula com painéis na orientação 60 cm x 120 cm, conforme a Figura 59. Por convenção esta orientação será chamada de orientação vertical.

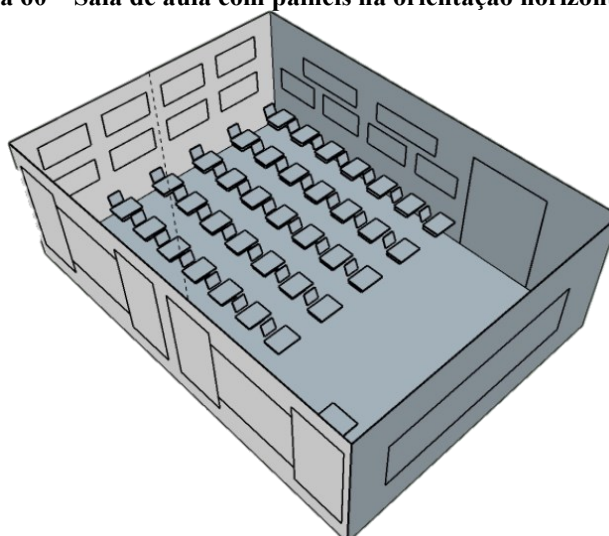
**Figura 59 – Sala de aula com painéis na orientação vertical.**



**Fonte: Autor (2020).**

- Sala de aula com painéis na orientação 120 cm x 60 cm, como na Figura 60. Por convenção esta orientação será chamada de orientação horizontal.

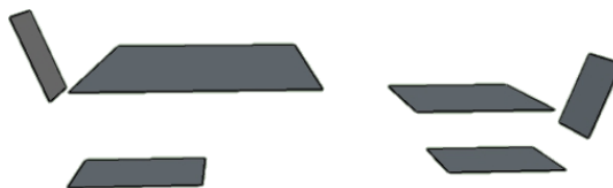
**Figura 60 – Sala de aula com painéis na orientação horizontal.**



**Fonte: Autor (2020).**

As mesas e cadeiras foram desenhadas como superfícies planas. Segundo Zeng et al. (2006) se a superfície de uma mesa fica próxima a um receptor, esta superfície pode produzir uma elevada reflexão no mesmo, e por esta razão as mesas e cadeiras foram incluídas no modelo, desenhadas conforme a Figura 61.

Figura 61 – Forma das mesas e cadeiras no modelo.

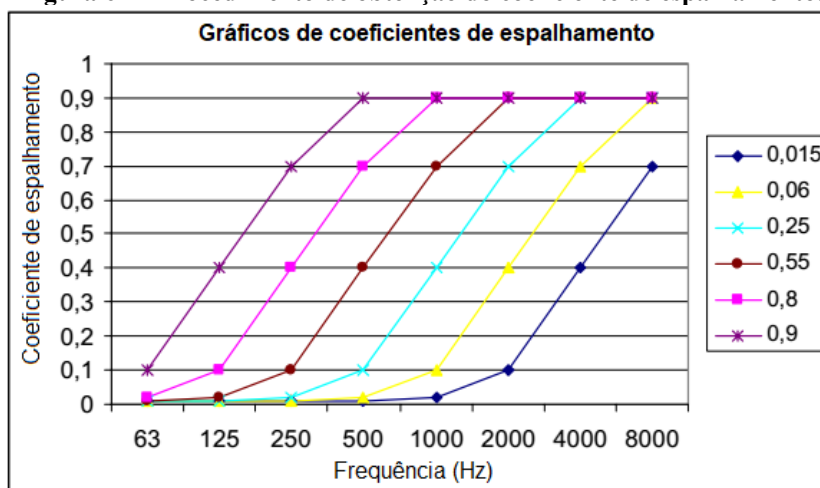


Fonte: Autor (2020).

O objetivo das simulações com diferentes orientações foi verificar se poderia haver diferença significativa nas variáveis de condicionamento acústico com a troca de orientação dos painéis. Os coeficientes de absorção sonora de incidência aleatória foram, após sua análise estatística, inseridos no *software* I-SIMPA. O *software* I-SIMPA consiste em uma interface gráfica de código aberto capaz de implementar o método de traçado de raios para soluções relacionadas à acústica de salas, ruídos ambiental e industrial (PICAUT; FORTIN, 2012).

Os coeficientes de absorção e espalhamento utilizados para a modelagem da sala de aula se encontram no Apêndice E. Para a definição do coeficiente de espalhamento foi adotada a metodologia descrita por Christensen e Rindel (2005), onde um valor à frequência de 707 Hz é escolhido em função do tipo da superfície e este valor é extrapolado conforme a Figura 62.

Figura 62 – Procedimento de obtenção do coeficiente de espalhamento.



Fonte: Autor (2020).

Esta metodologia é utilizada pelo *software* ODEON, e os coeficientes sugeridos para as diferentes superfícies podem ser verificados na Tabela 6 (ODEON, 2018).

**Tabela 6 – Valores sugeridos para o coeficiente de espalhamento.**

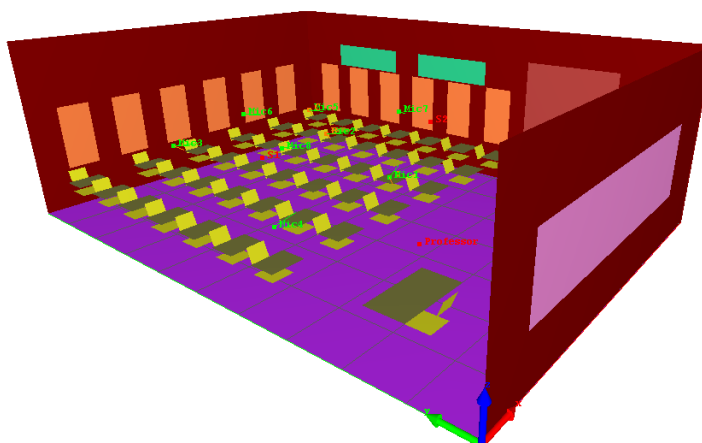
Material	Coefficiente de espalhamento à frequência de 707Hz
Área de audiência	0,6-0,7
Estruturas irregulares de edifícios, 0,3 a 0,5m de profundidade	0,4-0,5
Estante de livros, com alguns livros	0,3
Alvenaria com juntas aparentes	0,1-0,2
Alvenaria com juntas feitas, porém, sem revestimento argamassado	0,05-0,1
Superfícies lisas em geral	0,02-0,05
Concreto aparente pintado	0,005-0,02

Fonte: Odeon (2018).

Para todas as superfícies da sala, com exceção das cortinas, foi utilizado valor de 0,04, dentro do intervalo de “superfícies lisas em geral”. Para as cortinas fechadas até cerca de metade de seu comprimento foi adotado o valor de 0,80, próximo do valor de 0,90 adotado por Silva (2017) em uma situação semelhante.

O modelo então foi inserido no software I-SIMPA onde uma malha foi gerada. Uma malha consiste em uma superfície detalhada utilizando pontos e nuvens de pontos dos elementos inseridos no modelo. Uma malha pode ser triangular, retangular ou tetraédrica, por exemplo (VÖRLANDER, 2008). O modelo construído no software de simulações acústicas pode ser verificado na Figura 63.

**Figura 63 – Modelo com painéis de orientação vertical inserido no software I-SIMPA.**

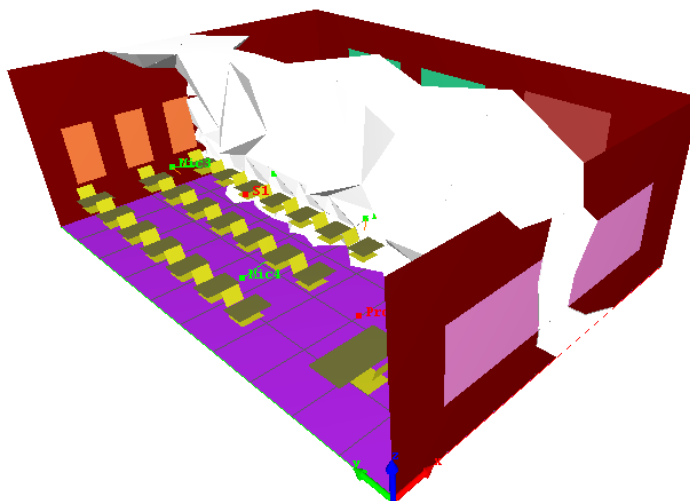


Fonte: Autor (2020).

Foram mantidas as posições de fonte e microfones da Figura 41, sendo os receptores pontuais as posições de *Mic1* a *Mic8* e os assentos *A* a *D*, todos inseridos à 1,20 metros do piso. As fontes sonoras *S1* e *S2* foram inseridas à 1,50 metros do piso, assim como uma fonte sonora chamada *Professor*, locada acima da mesa do professor no modelo. Os receptores pontuais *Mic1*, *Mic2*, *Mic3* e *Mic4* foram orientados para a fonte *S1* e os receptores *Mic5*, *Mic6*, *Mic7* e *Mic8* para a fonte *S2*. Os receptores referentes aos assentos *A*, *B*, *C* e *D* foram direcionados para

a fonte sonora *Professor*. Uma superfície receptora foi criada à altura de 1,20 metros para as análises das distribuições espaciais da Definição ( $D_{50}$ ), tempo de reverberação ( $T_{20}$ ) e tempo de decaimento inicial (EDT). A orientação de receptores foi a mesma utilizada nas medições, o que permitiu a analogia entre os valores medidos e simulados para a orientação vertical de cada painel. A malha gerada (na cor branca) pode ser visualizada na Figura 64.

**Figura 64 – Visualização da malha gerada no software I-SIMPA.**



**Fonte: Autor (2020).**

Para o cálculo foi adotado o método energético, onde a energia da partícula é ponderada conforme o coeficiente de absorção do material e do ambiente (com as variáveis de temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica devidamente inseridas). Foi adotada a quantidade de 150000 partículas por fonte sonora e um raio de recepção de 10,0 cm para os microfones. Foram escolhidas as frequências de 100 a 2000 Hz, que é a faixa utilizada para as amostras analisadas no tubo de impedância. O tempo de simulação foi de 600 segundos para cada posição de fonte sonora.

As fontes sonoras foram configuradas com um nível de pressão sonora de 100dB, e um ruído branco foi escolhido para as simulações. Dentre os parâmetros calculados pelo software foram utilizados o  $T_{20}$  e a  $D_{50}$  para as comparações entre valores simulados e medidos e o EDT para as comparações dentre os valores simulados para os diferentes tipos de condicionamento utilizando painéis de madeira mineralizada.

Uma análise dos modos acústicos da sala de aula foi realizada utilizando o software REW (MULCAHY, 2019) que tem código aberto, identificando assim as principais ressonâncias da sala e suas frequências naturais. A frequência limite estimada por meio da Equação 16 para a sala sem condicionamento acústico foi de 143 Hz, considerando um tempo de reverberação de 1,171 segundos (Tabela 17).

Apesar das frequências de interesse para o tempo de reverberação ficarem acima de 500 Hz (no que tange à acústica de salas de aula), foram apresentados os modos acústicos no espectro de baixa frequência para complementar a caracterização do ambiente. Russo e Ruggiero (2019) não realizaram tal análise pela justificativa apresentada.

Os valores de  $L_x$ ,  $L_y$  e  $L_z$  cálculos das frequências naturais foram de 9,80, 7,10 e 3,25 metros, respectivamente. A velocidade do som foi considerada igual à 346,0 m/s, referente à uma temperatura média de 25 °C, observada nos momentos das medições.

O *software* REW (MULCAHY, 2019) apresenta os modos calculados com a Equação 15 com as correspondências de cores demonstradas pelo Quadro 4.

**Quadro 4 – Legendas de cores dos modos naturais utilizada no *software* REW.**

Tipo de modo	Cor
Modo axial - $L_x$	Vermelho
Modo axial - $L_y$	Verde
Modo axial - $L_z$	Azul
Modo tangencial - $L_x$ e $L_y$	Laranja
Modo tangencial - $L_x$ e $L_z$	Magenta
Modo tangencial - $L_y$ e $L_z$	Ciano
Modo oblíquo	Cinza

Fonte: Autor (2020).

O *software* foi configurado para relacionar as ressonâncias que geraram tempos de reverberação maiores que 1,171 s.

Para o tempo de reverberação ( $T_{20}$ ) os valores medidos e simulados foram comparados nas frequências de 500,1000 e 2000 Hz, utilizando para isto uma análise de variância do tipo ANOVA para dados normalmente distribuídos. Para os dados sem distribuição normal foi realizada uma análise de variância pelo teste de Kruskal-Wallis.

Os valores foram agrupados conforme as posições de fontes sonoras utilizadas. Seis grupos com 4 valores cada foram estabelecidos para as comparações, sendo:

- Fonte na posição *S1* e receptores nas posições *Mic1*, *Mic2*, *Mic3* e *Mic4* para valores medidos e simulados;
- Fonte na posição *S2* e receptores nas posições *Mic5*, *Mic6*, *Mic7* e *Mic8* para valores medidos e simulados; e
- Fonte acima da mesa do professor e receptores nas posições *A*, *B*, *C* e *D* para valores medidos e simulados.

Após verificação da diferença estatística entre os grupos, seja pelo teste da ANOVA ou pelo teste de Kruskal-Wallis, foram realizadas comparações múltiplas com os testes de Tukey (distribuição normal em cada grupo) e Nemenyi (distribuição normal não verificada em cada grupo), com o objetivo de identificar as semelhanças estatísticas entre os valores simulados e

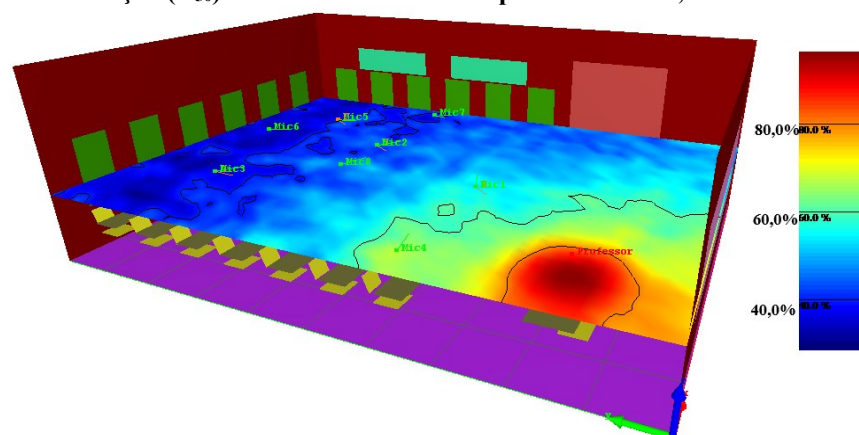


medidos quanto às posições de fontes sonoras. Para todas as análises foi utilizado o *software* R (R CORE TEAM, 2019).

Estas frequências foram escolhidas em função das limitações das técnicas de acústica geométrica para baixas frequências, como descrito nos capítulos iniciais deste trabalho, e devido a uma orientação da norma norte-americana ANSI/ASA S12.60 (2010) para que a avaliação do tempo reverberação em ambientes educacionais seja nestas frequências.

Para as comparações relacionadas à Definição foi utilizada apenas a posição de fonte sonora acima da mesa do professor, e os receptores nos assentos *A*, *B*, *C* e *D*, representando assim uma variação da inteligibilidade em um cenário frequente nas práticas de ensino e aprendizagem. Uma distribuição espacial da definição para a frequência de 1000 Hz na sala de aula tratada com painéis de palha de madeira com cimento (espessura de 50,0 mm) é mostrada na Figura 65.

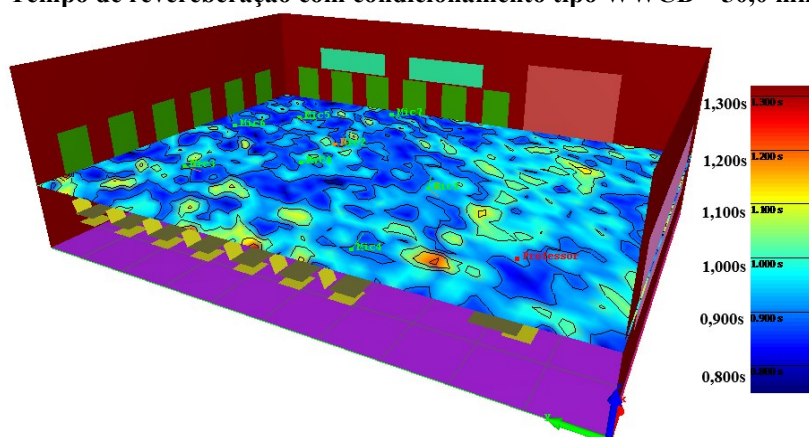
**Figura 65 – Definição ( $D_{50}$ ) com condicionamento tipo WWCB – 50,0 mm em 1000 Hz.**



**Fonte: Autor (2020).**

O nível de pressão sonora diminui com a distância em uma sala excitada por uma fonte omnidirecional, no entanto, este nível permanece constante após uma distância crítica pois a densidade da energia do campo reverberante irá prevalecer nesta região (KLEINER; TICHY, 2014). A Figura 66 exibe a disposição espacial do tempo de reverberação para o mesmo cenário e frequência da Figura 65.

Figura 66 – Tempo de reverberação com condicionamento tipo WWCB – 50,0 mm em 1000 Hz.



Fonte: Autor (2020).

Logo, como a Definição é um parâmetro sensível em relação à distância que se encontra um receptor da fonte sonora, faz-se necessária apenas a utilização da fonte sonora acima da mesa do professor para as avaliações deste parâmetro.

Quanto às simulações relacionadas à orientação horizontal dos painéis, foi utilizada a fonte sonora acima da mesa do professor junto às 8 posições de microfones apresentadas na Figura 41 (*Mic1* a *Mic8*). O parâmetro comparado entre as diferentes simulações foi a Definição, seguida da análise das Diferenças Mínimas Perceptíveis (em inglês *Just Noticeable Difference* - JND). A medição da Diferença Mínima Perceptível é um procedimento clássico da psicoacústica. Consiste na menor alteração em um estímulo que uma pessoa pode detectar (LONG, 2014).

Nestes testes pede-se a um indivíduo que compare dois sons e indique qual é o mais alto em intensidade ou em frequência, sendo que a Diferença Mínima Perceptível depende de ambos (LONG, 2014). Segundo a norma ABNT NBR ISO 3382-1:2017 a Diferença Mínima Perceptível é de 5,00% para a Definição, ou seja, uma percepção de alteração da Definição ocorre após uma variação de, no mínimo, 5,00% (em pontos percentuais). Para valores do tempo de decaimento inicial (EDT), as diferenças mínimas perceptíveis existem caso haja uma variação de 5,00% entre os valores comparados, como na Equação 57.

$$JND_{EDT} = \frac{EDT_{maior} - EDT_{menor}}{EDT_{menor}} \geq 5,00\% \quad (57)$$

Realizou-se uma análise por meio das Diferenças Mínimas Perceptíveis entre os valores simulados para as orientações vertical e horizontal. Estes cenários estão relacionados no Quadro 5.

**Quadro 5 – Cenários simulados de condicionamentos acústicos.**

Cenário	Orientação dos painéis	Tipo dos painéis na lateral	Tipo dos painéis ao fundo
A	Vertical	MDF - 9,00 mm	MDF - 9,00 mm
B	Vertical	MDF - 12,0 mm	MDF - 12,0 mm
C	Vertical	MDF - 15,0 mm	MDF - 15,0 mm
D	Vertical	OSB - 8,00 mm	OSB - 8,00 mm
E	Vertical	OSB - 12,0 mm	OSB - 12,0 mm
F	Vertical	OSB - 25,0 mm	OSB - 25,0 mm
G	Vertical	WWCB - 17,0 mm	WWCB - 17,0 mm
H	Vertical	WWCB - 25,0 mm SFS	WWCB - 25,0 mm SFS
I	Vertical	WWCB - 25,0 mm TKS	WWCB - 25,0 mm TKS
J	Vertical	WWCB - 50,0 mm	WWCB - 50,0 mm
A'	Horizontal	MDF - 9,00 mm	MDF - 9,00 mm
B'	Horizontal	MDF - 12,0 mm	MDF - 12,0 mm
C'	Horizontal	MDF - 15,0 mm	MDF - 15,0 mm
D'	Horizontal	OSB - 8,00mm	OSB - 8,00 mm
E'	Horizontal	OSB - 12,0 mm	OSB - 12,0 mm
F'	Horizontal	OSB - 25,0 mm	OSB - 25,0 mm
G'	Horizontal	WWCB - 17,0 mm	WWCB - 17,0 mm
H'	Horizontal	WWCB - 25,0 mm SFS	WWCB - 25,0 mm SFS
I'	Horizontal	WWCB - 25,0 mm TKS	WWCB - 25,0 mm TKS
J'	Horizontal	WWCB - 50,0 mm	WWCB - 50,0 mm

**Fonte: Autor (2020).**

Foram adotados os números únicos de Definição, que, segundo a norma ABNT NBR ISO 3382-1:2017 podem ser obtidos por meio da média dos valores em 500, 630, 800 e 1000 Hz. As comparações entre os valores simulados foram então realizadas com os números únicos. Outras simulações relacionando diferentes combinações de painéis de palha de madeira com cimento também foram realizadas conforme os cenários do Quadro 6.

**Quadro 6 – Cenários simulados de condicionamentos acústicos apenas com painéis do tipo WWCB.**

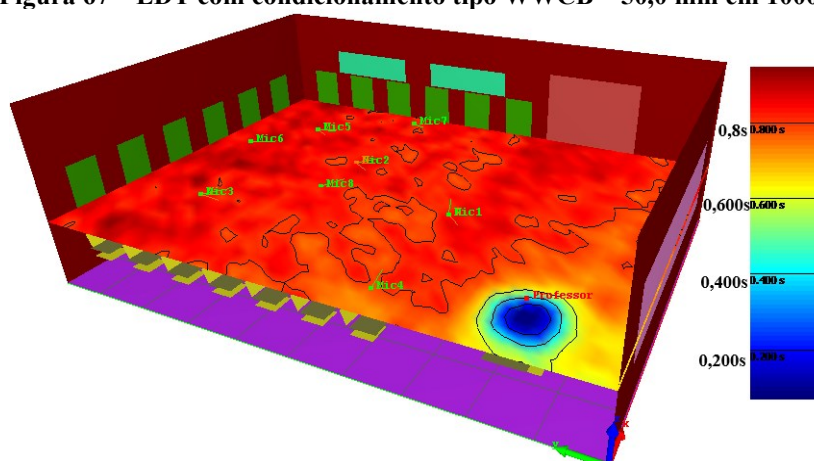
Cenário	Orientação dos painéis	Tipo dos painéis na lateral	Tipo dos painéis ao fundo
K	Vertical	WWCB - 25,0 mm SFS	WWCB - 50,0 mm
L	Vertical	WWCB - 50,0 mm	WWCB - 25,0 mm SFS
M	Vertical	WWCB - 25,0 mm TKS	WWCB - 50,0 mm
N	Vertical	WWCB - 50,0 mm	WWCB - 25,0 mm TKS
O	Vertical	WWCB - 50,0 mm	WWCB - 17,0 mm
P	Vertical	WWCB - 17,0 mm	WWCB - 50,0 mm
Q	Vertical	WWCB - 25,0 mm SFS	WWCB - 25,0 mm TKS
R	Vertical	WWCB - 25,0 mm TKS	WWCB - 25,0 mm SFS
S	Vertical	WWCB - 25,0 mm SFS	WWCB - 17,0 mm
T	Vertical	WWCB - 17,0 mm	WWCB - 25,0 mm SFS
U	Vertical	WWCB - 25,0 mm TKS	WWCB - 17,0 mm
V	Vertical	WWCB - 17,0 mm	WWCB - 25,0 mm TKS

**Fonte: Autor (2020).**

Este tipo de painel foi escolhido para uma segunda análise simulada em função dos resultados superiores de índices de transmissão de fala em relação aos outros tipos (MDF e OSB) nos condicionamentos acústicos realizados. Para complementar a análise entre os cenários do Quadro 6, foi realizada uma análise de variância por meio do teste de Kruskal-Wallis entre os valores de tempos de decaimentos iniciais (EDT) seguida de uma análise de múltiplas comparações pelo teste de Nemenyi, com o objetivo de verificar as diferenças significativas entre os cenários. O número único para o EDT segue a mesma lógica do número único para a Definição: a média entre os valores obtidos entre 500 a 1000 Hz em bandas de 1/3 de oitava. Em todas as análises foi utilizado o *software* R (R CORE TEAM, 2019).

O EDT foi escolhido para uma análise estatística pois sua variação espacial seguiu uma distribuição semelhante à distribuição do tempo de reverberação, conforme é mostrado na Figura 67, também por ser mais um parâmetro relacionado à percepção humana, estando também relacionado com a geometria da sala de aula (JORDAN, 1980).

Figura 67 – EDT com condicionamento tipo WWCB – 50,0 mm em 1000 Hz.



Fonte: Autor (2020).

Da mesma forma foram realizados os cálculos dos números únicos de Definição, seguido da análise por meio das Diferenças Mínimas Perceptíveis entre os cenários  $K$  a  $V$  do Quadro 6. A análise entre cada valor de Definição e do EDT foi realizada por meio de um algoritmo escrito no *software* R (R CORE TEAM, 2019), apresentado no Apêndice F.

O Quadro 7 resume a forma com que os dados medidos e simulados foram analisados.

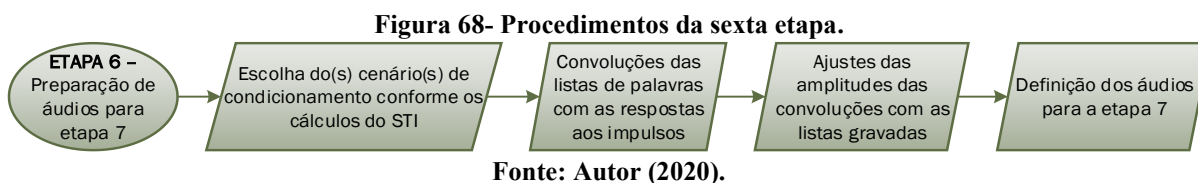
Quadro 7 – Resumo dos procedimentos de análise entre os valores medidos e simulados.

Situação	Variável comparada	Procedimento
Entre cenários vertical simulado e vertical medido.	$T_{20}$ (s)	Análise estatística: variância e comparação múltipla entre receptores de uma mesma fonte sonora.
Entre cenários vertical simulado e vertical medido.	$D_{50}$ (%)	Diferenças Mínimas Perceptíveis (JND).
Entre cenários vertical simulado e horizontal simulado.	$D_{50}$ (%)	Diferenças Mínimas Perceptíveis (JND).
Entre cenários verticais simulados para painéis do tipo WWCB.	$D_{50}$ (%)	Diferenças Mínimas Perceptíveis (JND).
Entre cenários verticais simulados para painéis do tipo WWCB.	EDT (s)	JND e Análise estatística (variância e comparação múltipla) entre cenários e entre receptores de uma mesma fonte sonora.

Fonte: Autor (2020).

### 3.7 SEXTA ETAPA: PREPARAÇÃO DOS ÁUDIOS PARA A SÉTIMA ETAPA

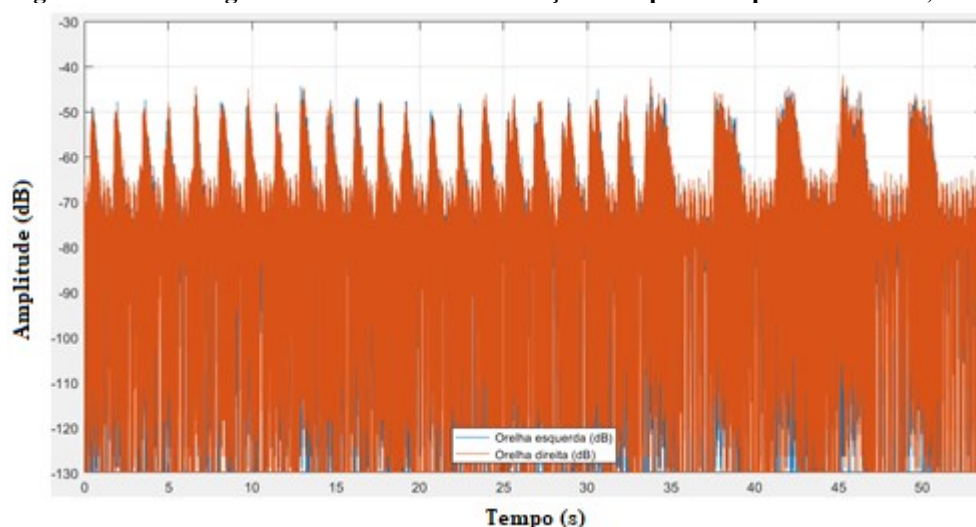
Nesta etapa foram criados os áudios para os testes subjetivos. A Figura 68 descreve os procedimentos realizados.



Após a determinação dos índices de transmissão de fala para os diferentes cenários, optou-se pela análise subjetiva apenas para cenário com painéis de palha grossa de madeira com cimento na espessura de 50,0 mm. O referido painel foi o único que mostrou diferença estatística com os de outros tipos (conforme resultados da seção 4.5.5), o que reforça sua exclusiva análise subjetiva.

Como a influência do ruído de fundo nas gravações de palavras foneticamente balanceadas foi verificada como pertinente, deu-se início a um processo de criação de um áudio muito semelhante ao áudio gravado pela cabeça artificial, porém sem o ruído de fundo. Para tanto, realizou-se a convolução da resposta ao impulso biauricular com o áudio original das listas. A Figura 69 mostra o áudio da lista de palavras gravada com a cabeça artificial para a Lista 1 (descrita no Anexo A) no assento C.

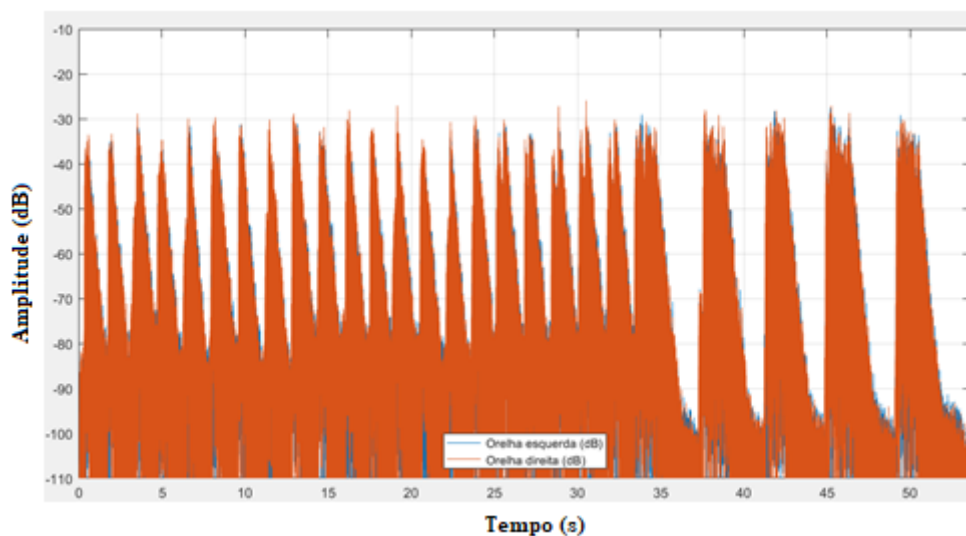
**Figura 69– Lista 1 gravada no assento C – situação com painéis tipo WWCB - 50,0 mm.**



**Fonte: Autor (2020).**

A Figura 70 exibe o resultado da convolução da resposta ao impulso com o arquivo de áudio da lista, considerando a mesma lista e o mesmo assento da situação de gravação da Figura 69.

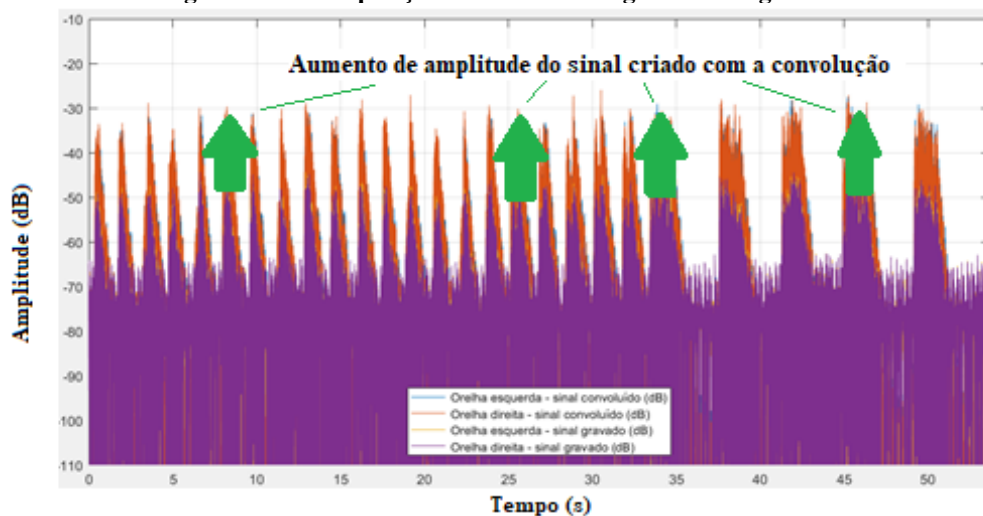
Figura 70– Convolução de sinais (lista 1 com RI do assento C) – situação com painéis tipo WWCB – 50,0 mm.



Fonte: Autor (2020).

A sobreposição dos arquivos é mostrada na Figura 71:

Figura 71– Sobreposição dos sinais da Figura 69 e Figura 70.



Fonte: Autor (2020).

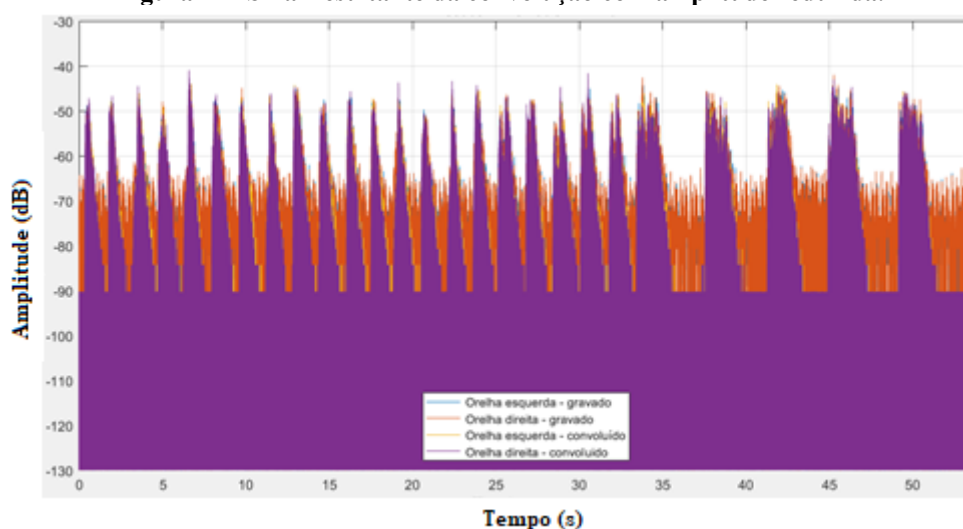
Percebeu-se, portanto, que o sinal produzido com a convolução apresentou uma amplitude maior que o sinal gravado. Logo, a reprodução do sinal pós convolução não retrataria uma real situação em sala de aula que foi obtida no sinal gravado.

Utilizando a ferramenta *Amplify* da *ITA Toolbox* uma redução nas amplitudes do sinal obtido posterior à convolução foi realizada. Cada palavra ou frase do sinal artificial foi comparada com sua respectiva palavra ou frase do sinal gravado, e a amplitude máxima do sinal produzido após a convolução foi reduzida da seguinte forma:

- Foi calculada a diferença entre os valores máximos de cada sinal para cada palavra ou frase;
- Foi realizada uma média logarítmica com os valores desta diferença;
- Tal valor foi utilizado para a redução da amplitude do sinal obtido com a convolução.

A Figura 72 apresenta o sinal resultante da convolução com a amplitude reduzida, por meio de algoritmo desenvolvido no *software* MatLab (MATHWORKS, 2018) disponível no Apêndice G, cuja operação utiliza a Lista 1 do Anexo A na situação da sala de aula condicionada com painéis do tipo WWCB – 50,0 mm.

**Figura 72– Sinal resultante da convolução com amplitude reduzida.**

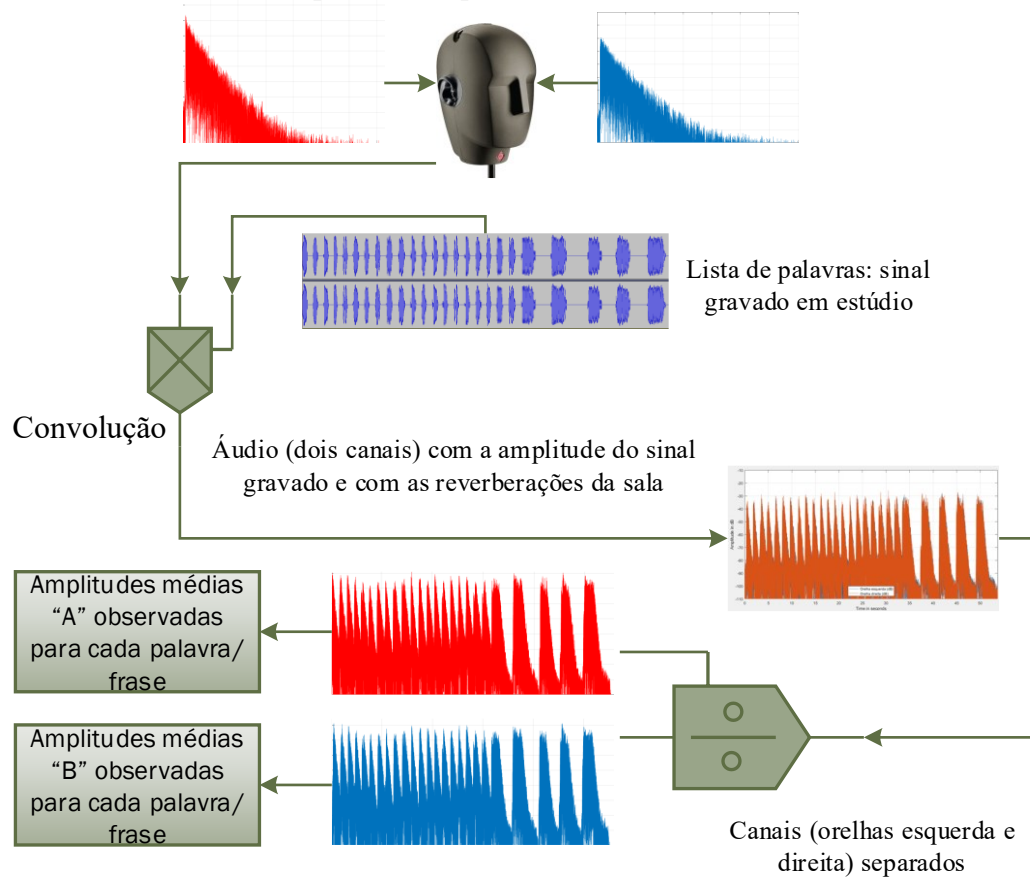


**Fonte: Autor (2020).**

A redução das amplitudes respeitou a diferença entre os canais, ou seja, os valores foram reduzidos conforme sua referência, sendo ela a orelha esquerda ou a orelha direita. O fluxograma da Figura 73 resume o processo de obtenção dos áudios por meio da convolução.



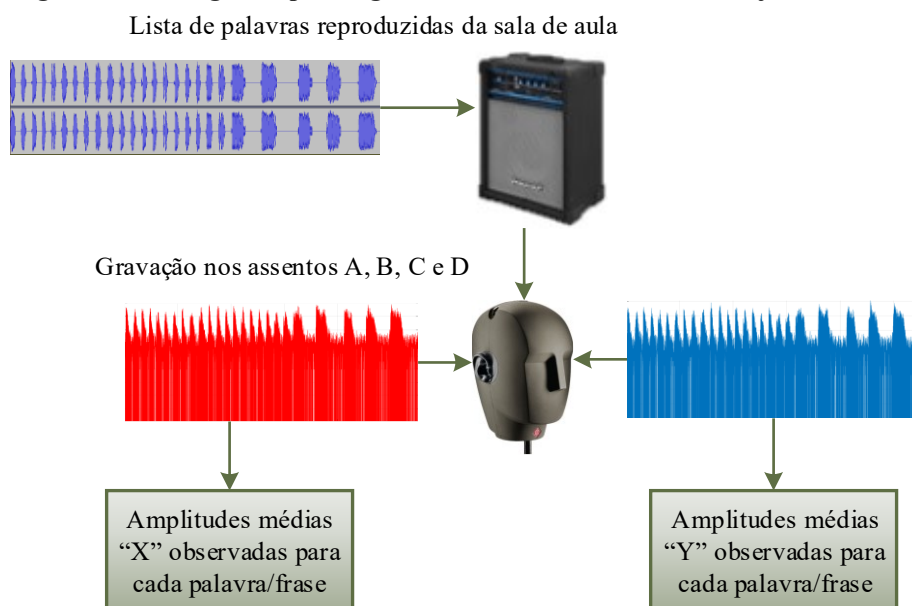
**Figura 73– Fluxograma para a convolução dos áudios dos testes subjetivos.**  
 Resposta ao impulso binaural



Fonte: Autor (2020).

Na Figura 74 outro fluxograma detalha o procedimento para a gravação das listas na sala de aula.

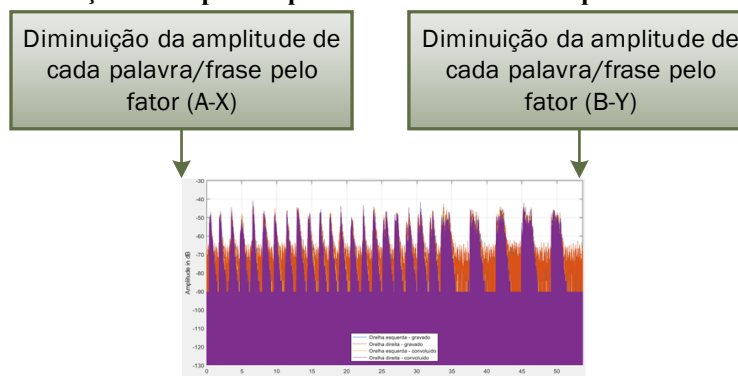
**Figura 74– Fluxograma para a gravação dos áudios dos testes subjetivos.**



Fonte: Autor (2020).

Por fim, o fluxograma para a obtenção do áudio final, em seus dois canais é ilustrado na Figura 75.

**Figura 75– Diminuição da amplitude para o áudio final a ser reproduzido nos testes.**



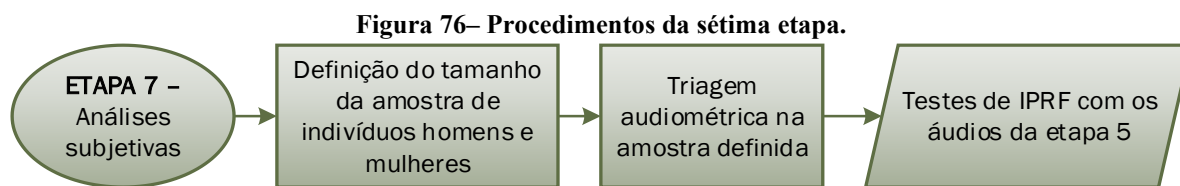
Áudio sem influência do ruído de fundo e com as mesmas amplitudes do sinal gravado na sala de aula

Fonte: Autor (2020).

Após a definição dos áudios, foi dada sequência para a sétima etapa.

### 3.8 SÉTIMA ETAPA: ANÁLISES SUBJETIVAS

Esta etapa foi realizada na Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO) na Clínica Escola de Fonoaudiologia. A Figura 76 exhibe os procedimentos desta etapa.



Fonte: Autor (2020).

Uma amostra definida por 11 homens e 7 mulheres, com idade superior a 18 anos e audição com limiares audiométricos dentro da normalidade nas frequências de 500 a 8000 Hz, participou voluntariamente da pesquisa. Os procedimentos referentes aos testes audiométricos se encontram no Anexo B, descritos por Schwertz e De Conto (2019b).

Após este procedimento, as listas de palavras preparadas na sexta etapa foram reproduzidas em uma cabine de audiometria por meio de uma interface USB modelo 96 do fabricante PreSonus e de um fone de ouvido tipo TDH-39, com o objetivo de calcular o Índice Percentual de Reconhecimento de Fala (IPRF). A interface de áudio foi configurada para não proporcionar ganhos adicionais em sua saída, de modo a reproduzir o áudio com sua amplitude original. A Figura 77 expõe a configuração da ligação dos equipamentos para o teste.

**Figura 77– Ligação de componentes para o teste de IPRF.**



Fonte: Autor (2020).

Segundo Carhart apud Boéchat (2015, p.71), o “índice percentual de reconhecimento de fala (IPRF) indica a porcentagem de acertos de um material de fala específico em uma intensidade que permita o melhor desempenho possível de determinado indivíduo”.

O resultado do índice é uma medida da “inteligibilidade da fala” em uma certa condição, embora seja de conhecimento que o índice não traduz o grau de dificuldade ou de restrição de participação de origem auditiva enfrentados pelo indivíduo em situações reais. No Brasil, o IPRF é dado em porcentagem (%) a uma determinada intensidade em dBNA – decibéis de nível de audição (BOÉCHAT, 2015). A intensidade utilizada foi de aproximadamente 40 dBNA.

O nível de audição (NA) indica o quanto um limiar auditivo difere, em decibéis, do limiar médio de ouvintes normais padronizado. O valor pode ser calculado pela Equação 58 (BOÉCHAT, 2015):

$$AVR(dBNA) = VAA(db\ NPS) - VR(db\ NPS\ RE) \quad (58)$$

Onde AVR é o afastamento do valor referencial; VAA é o valor apresentado pelo audiômetro e VR é o valor de referência para os tons puros, identificado na Tabela 7 para um fone tipo TDH-39.

**Tabela 7 – Valores de NPS RE para cálculo do dBNA.**

Frequência (Hz)	Limiares nível de pressão sonora referência-equivalentes (dB)
125	45,0
250	25,5
500	11,5
1000	7,00
1500	6,50
2000	9,00
3000	10,0
4000	9,50
6000	15,5
8000	13,0

Fonte: ISO 389-3 (2016)

Os fones utilizados para este teste são calibrados anualmente para atender os valores da Tabela 7. Conforme o Anexo B, o limiar de audição mínimo para a participação nos testes foi de 15 dBNA bilateralmente para os tons puros das frequências de 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 6000 e 8000 Hz.

O teste consistiu na repetição das palavras e sentenças do Anexo A, ouvidas pelo indivíduo através do fone de ouvido tipo TDH-39, gravadas conforme descrito na seção 3.6.4. A quantidade de acertos então foi calculada em porcentagem, e a relação subjetiva pôde ser realizada por meio do Quadro 8.

**Quadro 8 – Classificação da dificuldade de inteligibilidade da fala segundo a porcentagem de reconhecimento obtida no teste .**

Porcentagem de reconhecimento	Dificuldade no reconhecimento de fala
100 a 92%	Nenhuma dificuldade para compreender a fala
88 a 80%	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
76 a 60%	Moderada dificuldade para compreender a fala
56 a 52%	Acentuada dificuldade para acompanhar uma conversa
Abaixo de 50%	Provavelmente incapaz de acompanhar uma conversa

Fonte: Jerger et al. (1968) apud CFFA (2017).

As listas de palavras foram reproduzidas conforme o Quadro 9 e o Quadro 10, com as listas sendo alternadas entre os assentos para cada indivíduo que participou da pesquisa. Os

resultados de IPRF de cada indivíduo com as respectivas listas que ele escutou estão no Apêndice H.

**Quadro 9 – Organização das listas para o indivíduo 1.**

Indivíduo	Lista sem painéis	Assento	Lista com painéis	Assento
1	Lista 1	A	Lista 5	A
1	Lista 2	B	Lista 1	B
1	Lista 3	C	Lista 2	C
1	Lista 4	D	Lista 3	D

**Fonte: Autor (2020).**

**Quadro 10 – Organização das listas para o indivíduo 2.**

Indivíduo	Lista sem painéis	Assento	Lista com painéis	Assento
2	Lista 2	A	Lista 1	A
2	Lista 3	B	Lista 2	B
2	Lista 4	C	Lista 3	C
2	Lista 5	D	Lista 4	D

**Fonte: Autor (2020).**

Com os valores de IPRF para cada situação foi realizada uma análise de variância (ANOVA) entre os valores medidos para cada assento com e sem painéis nas situações de distribuição normal. Nas situações onde não foi verificada distribuição normal foi realizado um teste de Kruskal-Wallis.

Para verificar as diferenças entre os indivíduos, além das análises de variâncias (ANOVA ou Kruskal-Wallis) foram feitas comparações múltiplas pelos testes de Tukey e Dunn (com ajustes pelo método de Benjamini-Hochberg), para dados paramétricos e não-paramétricos, respectivamente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ENSAIO DE DENSIDADE

Os resultados de cada material são relacionados no Quadro 11. As tabelas com os resultados de cada tipo de painel podem ser encontradas no Apêndice I.

**Quadro 11 – Organização dos resultados do ensaio de densidade.**

Tipo de painel	Espessura (mm)	Densidade média (g/cm <sup>3</sup> )	Tabela no Apêndice I
MDF	9,00	0,6056	Tabela 27
MDF	12,0	0,5875	Tabela 28
MDF	15,0	0,6253	Tabela 29
OSB	8,00	0,6089	Tabela 30
OSB	12,0	0,6085	Tabela 31
OSB	25,0	0,5085	Tabela 32
WWCB com palha grossa	17,0	0,4693	Tabela 33
WWCB com palha grossa	25,0	0,4120	Tabela 34
WWCB com palha superfina	25,0	0,6765	Tabela 35
WWCB com palha grossa	50,0	0,3557	Tabela 36

Fonte: Autor (2020).

A hipótese inicial consistia no fato de que a densidade dos painéis era mesma para o mesmo tipo, independente da espessura. Tal hipótese foi feita devido ao fato de os painéis serem industrializados com diversos controles em seus processos produtivos. Para esta verificação, foi realizada uma análise de variância e um teste de Tukey entre as densidades das diferentes espessuras de um mesmo painel.

Excluiu-se da análise o painel de palha superfina de madeira com cimento na espessura de 25,0 mm devido a sua representatividade única, pois não foram testados painéis de outras espessuras compostos por palhas superfina. Para todas as análises foi utilizado o *software* R (R CORE TEAM, 2019).

#### 4.1.1 Painéis do Tipo MDF

Os *p-valores* encontrados por meio do teste de Shapiro-Wilk para cada espessura foram maiores que o nível de significância (5,00%), logo, as amostras de painel tipo MDF utilizadas compõem uma distribuição normal.

Verificou-se um  $p$ -valor de  $1,88 \times 10^{-7}$  para os valores do painel tipo *Medium Density Fiberboard* em suas espessuras de 9,00, 12,0 e 15,0 mm, conforme a Figura 78, que corresponde ao resultado obtido no *software* R (R CORE TEAM, 2019) exibido na Figura 78.

**Figura 78– Resultado da ANOVA entre as densidades de diferentes espessuras do painel MDF.**

```
Call:
lm(formula = DENSIDADE ~ PAINEL, data = x)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.0203082 -0.0076237 -0.0002682  0.0077348  0.0234841

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.588666   0.003275  179.722 < 2e-16 ***
PAINELMDF15  0.035277   0.004632   7.616 3.43e-08 ***
PAINELMDF9   0.018384   0.004632   3.969 0.000481 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01036 on 27 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6825,    Adjusted R-squared:  0.659
F-statistic: 29.02 on 2 and 27 DF,  p-value: 1.88e-07
```

Fonte: Autor (2020).

Como o resultado de  $p$ -valor ficou abaixo de 5,00% (significância), rejeita-se a hipótese que não existe diferença estatística entre os valores de densidade para diferentes espessuras. O resultado do teste de Tukey pode ser verificado na Figura 79.

**Figura 79– Resultado do teste de Tukey entre as densidades de diferentes espessuras do painel MDF.**

```
Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = DENSIDADE ~ PAINEL, data = x)

$PAINEL
          diff          lwr          upr          p adj
MDF15-MDF12  0.03527658  0.023791555  0.046761602  0.0000001
MDF9-MDF12   0.01838388  0.006898858  0.029868906  0.0013533
MDF9-MDF15  -0.01689270 -0.028377720 -0.005407672  0.0031055
```

Fonte: Autor (2020).

Em todas as comparações de espessuras (MDF9 para 9,00 mm; MDF12 para 12,0 mm e MDF15 para 15,0 mm) verificou-se valores de  $p$ -adj ( $p$ -valores após ajustes do teste de comparações múltiplas) inferiores à 5,00%, o que significa que as densidades dos painéis são estatisticamente diferentes para diferentes espessuras.

#### 4.1.2 Painéis do Tipo OSB

Os *p-valores* encontrados por meio do teste de Shapiro-Wilk para cada espessura foram maiores que o nível de significância (5,00%), logo, as amostras de painel tipo OSB utilizadas compõem uma distribuição normal. A análise de variância entre os valores de densidade para diferentes espessuras resultou em um *p-valor* igual à  $1,645 \times 10^{-7}$ , menor que o nível de significância de 5,00%, logo, existe diferença estatística entre as densidades para diferentes espessuras. O resultado da análise de variância pode ser verificado na Figura 80.

**Figura 80– Resultado da ANOVA entre as densidades de diferentes espessuras do painel OSB.**

```
Call:
lm(formula = DENSIDADE ~ PAINEL, data = x)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.075189 -0.021258 -0.002562  0.023644  0.070308

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.608112   0.010379  58.592 < 2e-16 ***
PAINEL0SB25 -0.093104   0.014678  -6.343 8.61e-07 ***
PAINEL0SB8  0.008324   0.014678   0.567  0.575
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.03282 on 27 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6856,    Adjusted R-squared:  0.6623
F-statistic: 29.44 on 2 and 27 DF,  p-value: 1.645e-07
```

Fonte: Autor (2020).

O teste de Tukey entre as espessuras pode ser verificado na Figura 81:

**Figura 81– Resultado do teste de Tukey entre as densidades de diferentes espessuras do painel OSB.**

```
Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = DENSIDADE ~ PAINEL, data = x)

$PAINEL
      diff      lwr      upr    p adj
OSB25-OSB12 -0.093104304 -0.12949658 -0.05671203 0.0000025
OSB8-OSB12  0.008323766 -0.02806851  0.04471604 0.8385933
OSB8-OSB25  0.101428070  0.06503580  0.13782034 0.0000006
```

Fonte: Autor (2020).

Verificou-se um valor de *p-adj* igual à 0,8386 entre as espessuras de 8,00 mm (OSB8) e 12,0 mm (OSB12), e pode ser dito que as densidades encontradas para estas espessuras não possuem diferenças estatísticas. O mesmo não pode ser dito entre os painéis de 25,0 mm (OSB25) e 12,00 mm; e 25,0 mm e 8,00 mm.



#### 4.1.3 Painéis do Tipo WWCB

Foi identificada distribuição normal em todos os grupos analisados dos painéis do tipo WWCB. Na análise de variância, o *p-valor* foi de, aproximadamente, 0,0002591, significando que existe diferença estatística entre as densidades para diferentes espessuras do painel com palhas grossas. O teste de Tukey entre as diferentes espessuras pode ser verificado na Figura 82.

**Figura 82– Resultado do teste de Tukey entre as densidades de diferentes espessuras do painel WWCB.**

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = DENSIDADE ~ PAINEL, data = X)

$PAINEL
              diff             lwr             upr             p adj
WWCB25-WWCB17 -0.05995289 -0.11198767 -0.007918105 0.0214878
WWCB50-WWCB17 -0.09946204 -0.15149683 -0.047427260 0.0001764
WWCB50-WWCB25 -0.03950916 -0.09154394  0.012525628 0.1630974

```

Fonte: Autor (2020).

Verificou-se, portanto, que existe diferença estatística entre as densidades dos painéis de 50,0 e 17,0 mm. Entre as densidades dos painéis de 25,0 e 17,0 mm de espessura não existe diferença estatística, nem entre os painéis de espessuras iguais à 50,0 e 25,0 mm.

#### 4.2 ENSAIO DE POROSIDADE E ESTIMATIVAS DE RESISTIVIDADE AO FLUXO

Os valores de porosidade para os diferentes painéis de palha de madeira com cimento são apresentados no Quadro 12. Os resultados detalhados com suas respectivas análises estatística podem ser encontrados no Apêndice J.

**Quadro 12 – Valores de porosidade para painéis do tipo WWCB.**

Tipo de painel	Espessura (mm)	Porosidade (%)	Tabela no Apêndice J
WWCB com palha grossa	17,0	52,82%	Tabela 37
WWCB com palha grossa	25,0	36,85%	Tabela 38
WWCB com palha grossa	50,0	40,58%	Tabela 40
WWCB com palha superfina	25,0	55,72%	Tabela 39

Fonte: Autor (2020).

Uma análise de variância entre os valores encontrados para a porosidade das dez amostras de cada tipo de painel resultou em um *p-valor* de  $1,25 \times 10^{-13}$ , com semelhança estatística apenas entre as amostras de palha grossa de madeira de espessuras iguais a 25,0 e 50,0 mm, conforme o teste de análises múltiplas apresentado na Figura 83.

**Figura 83– Resultado do teste de Tukey entre as porosidades de diferentes espessuras do painel WWCB.**

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = POROSIDADE ~ PAINEL, data = x)

$PAINEL
              diff          lwr          upr          p adj
WWCB25SFS-WWCB17  0.04555031 -0.0008036672  0.09190429 0.0556105
WWCB25TKS-WWCB17 -0.14969231 -0.1960462928 -0.10333833 0.0000000
WWCB50-WWCB17    -0.10761359 -0.1539675700 -0.06125961 0.0000019
WWCB25TKS-WWCB25SFS -0.19524263 -0.2415966061 -0.14888865 0.0000000
WWCB50-WWCB25SFS -0.15316390 -0.1995178833 -0.10680992 0.0000000
WWCB50-WWCB25TKS  0.04207872 -0.0042752577  0.08843270 0.0866032
  
```

Fonte: Autor (2020).

A mesma relação foi verificada para o ensaio de densidade. Confirma-se, portanto, que os painéis de 25,0 mm e 50,0 mm de palha grossa referem-se ao mesmo material, apenas com diferentes espessuras. O painel de 17,0 mm, mesmo sendo constituído de palha grossa, não pode ser classificado no mesmo contexto.

As porosidades encontradas para os painéis em estudo são consideradas altas para as densidades que possuem, que estão diretamente ligadas às suas absorções sonoras (DE LA GREÉ, 2014). Os valores de resistividade ao fluxo podem ser estimados por meio da Equação 38 resultando nos valores do Quadro 13.

**Quadro 13 – Estimativas de resistividade ao fluxo para painéis do tipo WWCB**

Tipo de painel	Espessura (mm)	Resistividade ao fluxo estimada (Ns/m <sup>4</sup> )
WWCB com palha grossa	17,0	2510,26
WWCB com palha grossa	25,0	2004,08
WWCB com palha grossa	50,0	1553,94
WWCB com palha superfina	25,0	4726,35

Fonte: Autor (2020).

Quanto maiores forem os valores da resistividade ao fluxo, menos permeabilidade ao ar haverá, logo, as ondas sonoras não conseguirão entrar no material e a absorção sonora é reduzida (LIU; CHEN, 2014). Para os compósitos do tipo WWCB analisados a absorção sonora está mais relacionada à baixa resistividade ao fluxo do que à porosidade. Na escolha de um absorvedor é possível compensar a porosidade com a resistividade ao fluxo, porém estes parâmetros não são independentes (COX; D'ANTONIO, 2017).

### 4.3 ENSAIO DE ABSORÇÃO SONORA

Os valores para o teste de normalidade, bem como os intervalos de confiança podem ser verificados por meio da Tabela 8. O algoritmo utilizado para a definição de intervalos de confiança, seja pelo teste de Student (distribuição normal), ou pelo teste de Wilcoxon (distribuição não-normal), escrito no *software* R (R CORE TEAM, 2019), pode ser verificado no Apêndice K.

**Tabela 8 – P-valores obtidos no teste de Shapiro-Wilk para absorção sonora.**

Freq. (Hz)	OSB 8mm	OSB 12mm	OSB 25mm	MDF 9mm	MDF1 2mm	MDF1 5mm	WWCB TKS 17mm	WWCB TKS 25mm	WWCB SFS 25mm	WWCB TKS 50mm
100	0,377	0,718	0,652	0,987	0,261	0,261	0,029	0,111	0,749	0,052
125	0,296	0,572	0,546	0,797	0,514	0,514	0,453	0,286	0,004	0,004
160	0,852	0,671	0,609	0,676	0,686	0,686	0,384	0,484	0,035	0,336
200	0,928	0,442	0,546	0,308	0,924	0,924	0,245	0,349	0,018	0,356
250	0,894	0,220	0,235	0,076	0,534	0,534	0,608	0,285	0,019	0,404
315	0,957	0,245	0,365	0,135	0,910	0,910	0,800	0,163	0,028	0,563
400	0,937	0,867	0,389	0,141	0,524	0,524	0,453	0,746	0,002	0,503
500	0,813	0,946	0,493	0,180	0,978	0,978	0,545	0,141	0,002	0,548
630	0,637	0,551	0,629	0,714	0,372	0,372	0,466	0,824	0,003	0,579
800	0,322	0,119	0,790	0,801	0,570	0,570	0,525	0,677	0,003	0,871
1000	0,241	0,375	0,001	0,193	0,980	0,980	0,710	0,907	0,003	0,926
1250	0,308	0,505	0,004	0,231	0,609	0,609	0,872	0,752	0,010	0,225
1600	0,644	0,095	0,731	0,107	0,826	0,826	0,736	0,008	0,185	0,156
2000	0,944	0,177	0,815	0,295	0,978	0,978	0,143	0,742	0,406	0,101

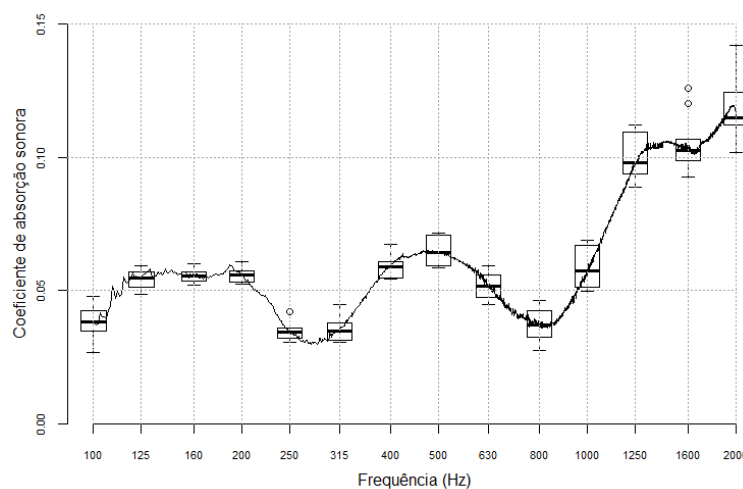
Fonte: Autor (2020).

Foi realizada a verificação para cada frequência, de 100 a 2000 Hz, e não apenas para as 14 frequências da Tabela 8. Os valores em vermelho indicam a não verificação de uma distribuição normal, e para estes valores, o intervalo de confiança foi definido pelo teste de Wilcoxon. O mesmo procedimento foi realizado para os valores calculados pela Equação 12, referentes a uma absorção sonora de incidência aleatória.

#### 4.3.1 Painéis do Tipo MDF

Os resultados encontrados para os painéis tipo MDF com espessura de 9,00 mm é exibido pela Figura 84.

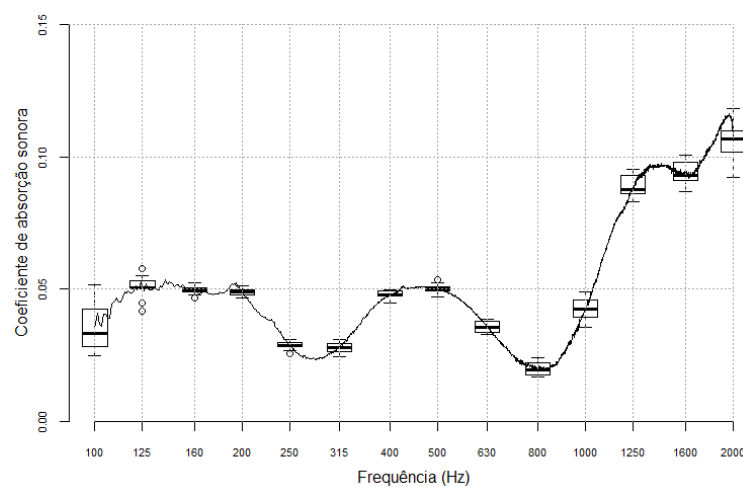
**Figura 84– Coeficientes de absorção para o painel tipo MDF – 9,00 mm.  
Medium Density Fiberboard (9mm)**



**Fonte: Autor (2020).**

Para os painéis de 12,0 mm de espessura, o comportamento quanto à absorção sonora é descrito pela Figura 85.

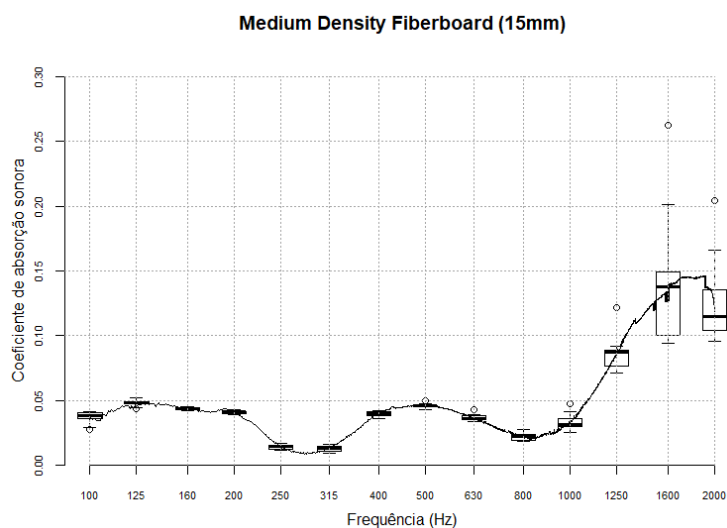
**Figura 85– Coeficientes de absorção para o painel tipo MDF – 12,0 mm.  
Medium Density Fiberboard (12mm)**



**Fonte: Autor (2020).**

Os painéis com 15,0 mm de espessura, feitos de MDF, apresentaram coeficientes de absorção conforme a Figura 86.

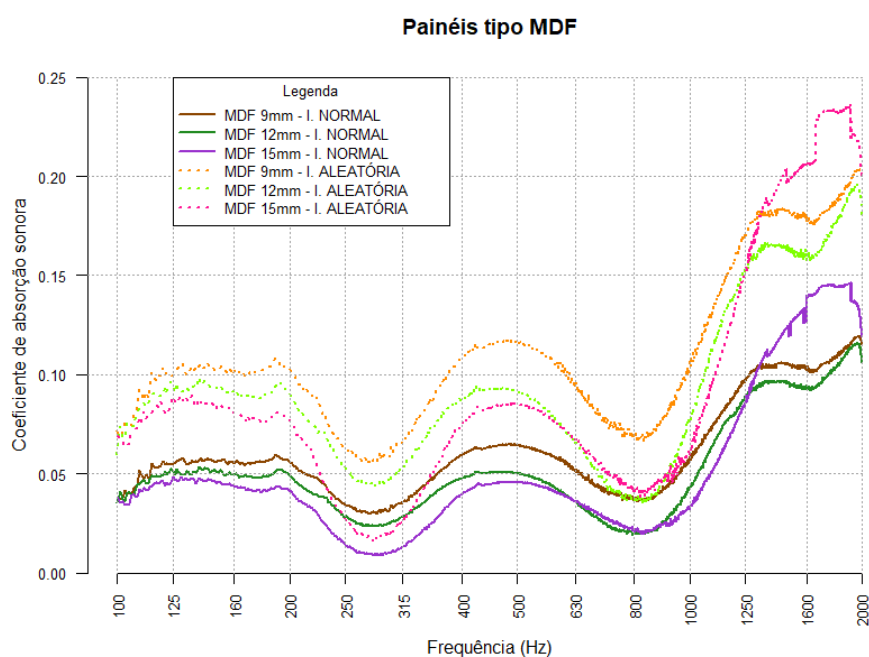
**Figura 86– Coeficientes de absorção para o painel tipo MDF – 15,0 mm.**



**Fonte: Autor (2020).**

Os valores encontrados se mostraram próximos aos valores publicados por Wassilieff (1996) para painéis do tipo MDF, sendo inferiores à 0,10 para as frequências de 100 a 1000 Hz, e próximos à 0,10 na frequência de 2000 Hz.

**Figura 87– Comparação dos coeficientes de absorção para o painel tipo MDF.**



**Fonte: Autor (2020).**

Na análise da Figura 87 é possível notar que o aumento da espessura não favorece o coeficiente de absorção sonora para o painel do tipo MDF. O painel com espessura de 9,00 mm apresenta melhores coeficientes de absorção sonora que o painel com 12,0 mm de espessura

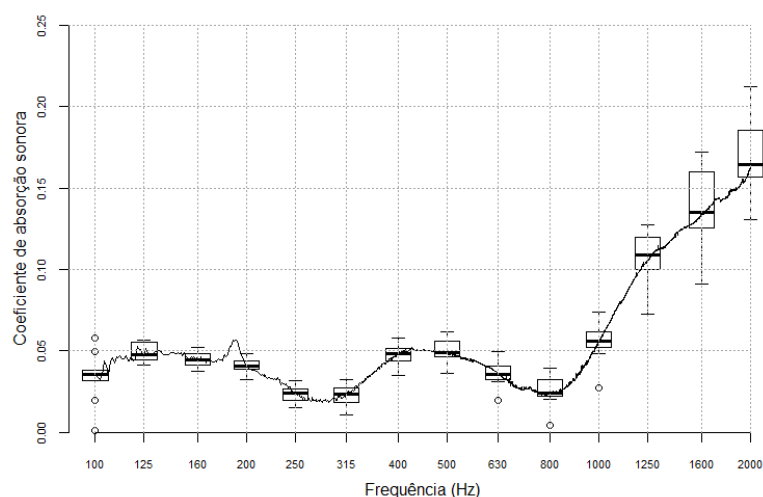
para todas as faixas de frequência analisadas. Quando comparado com o painel de 15,0 mm de espessura, só apresenta valores inferiores a partir da frequência de 1250 Hz, aproximadamente.

Para os painéis de 12,0 e 15,0 mm, considerando a faixa de erro descrita na Tabela 4, verifica-se que os coeficientes de absorção sonora sob incidência normal podem ser considerados nulos para frequências até 1250 Hz, aproximadamente. Os valores calculados para os coeficientes de absorção de incidência aleatória também são apresentados na Figura 87.

#### 4.3.2 Painéis do Tipo OSB

Os resultados encontrados para os painéis tipo OSB nas espessuras de 8,00 mm podem ser verificados na Figura 88.

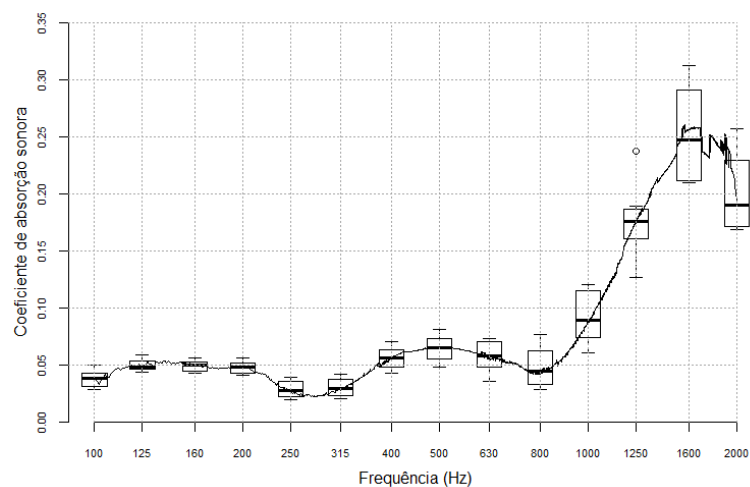
**Figura 88– Coeficientes de absorção para o painel tipo OSB – 8,00 mm.**  
Oriented Strand Board (8mm)



**Fonte: Autor (2020).**

O compósito de espessura igual à 12,0 mm tem sua absorção sonora descrita pela Figura 89.

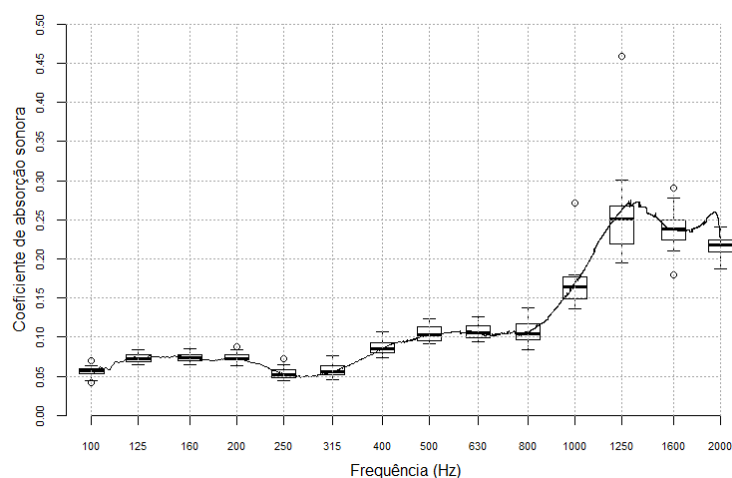
**Figura 89– Coeficientes de absorção para o painel tipo OSB – 12,0 mm.  
Oriented Strand Board (12mm)**



**Fonte: Autor (2020).**

A Figura 90 apresenta os valores de absorção sonora para o composto de OSB com 25,0 mm de espessura.

**Figura 90– Coeficientes de absorção para o painel tipo OSB – 25,0 mm.  
Oriented Strand Board (25mm)**



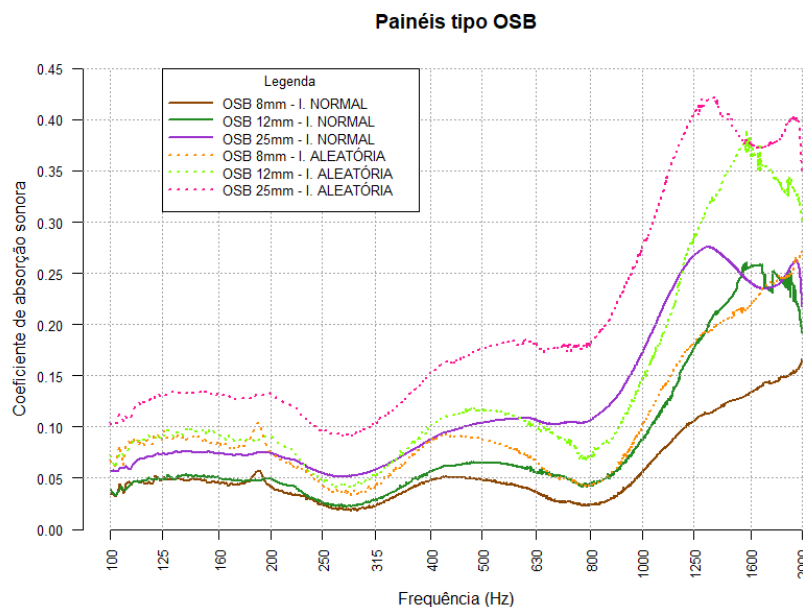
**Fonte: Autor (2020).**

Comparando os resultados encontrados com os valores de Smardzewski et al. (2015), verificou-se o mesmo comportamento em baixas frequências ( $\leq 500$  Hz) para os três tipos de painéis: coeficientes de absorção sonora de, no máximo, 0,10.

Ainda, pela análise da Figura 91, percebeu-se que o aumento da espessura, para este tipo de painel, levou a um aumento do coeficiente de absorção sonora de incidência normal. Em baixas frequências os painéis de 8,00 e 12,0 mm de espessuras apresentaram valores muito semelhantes de coeficientes de absorção, o que pode ser justificado pela densidade que é

estatisticamente a mesma para ambos ( $p\text{-valor}\approx 0,84$  no teste de Tukey) e pelo pequeno aumento na espessura (apenas 4,00 mm).

**Figura 91– Comparação dos coeficientes de absorção para o painel tipo OSB.**



**Fonte: Autoria própria, 2019**

Ao comparar o painel de 25,0 mm com os outros painéis, verificou-se um aumento no coeficiente de absorção sonora em quase todas as frequências, com exceção da frequência de 1600 Hz, onde o valor ficou inferior ao encontrado para o painel de 12,0 mm de espessura. Para justificar esta diferença pode-se citar o resultado do trabalho de Koizumi et al. (2002) com compósitos de madeira, descrito no início da tese, que descreve o aumento da densidade como diretamente proporcional ao coeficiente de absorção sonora em médias e altas frequências. O painel de 12,0 mm apresentou uma densidade superior ao de 25,0 mm, o que pode justificar o seu melhor desempenho em altas frequências, mesmo com a espessura menor.

Considerando a faixa de erro da Tabela 4, verifica-se que os compósitos de 8,00 e 12,0 mm podem apresentar valores nulos em baixas frequências quanto ao coeficiente de absorção sonora de incidência normal. Os valores calculados para uma incidência aleatória se demonstraram superiores aos valores obtidos para incidência normal, assim como observado para o painel do tipo MDF.

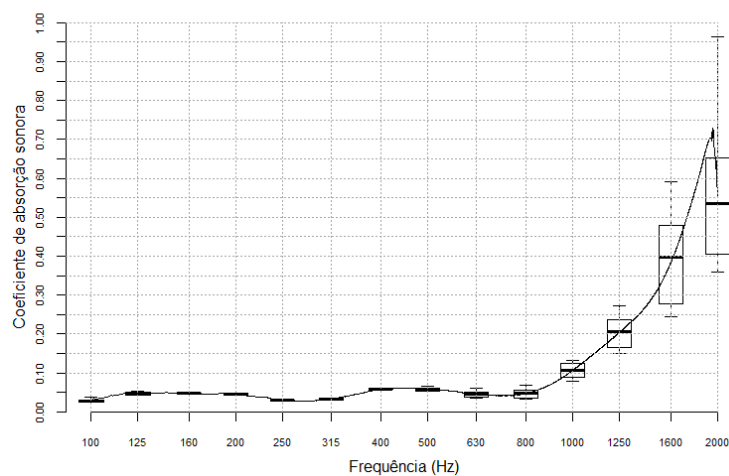
#### 4.3.3 Painéis do Tipo WWCB

Os resultados encontrados para os painéis de palha grossa de madeira com cimento na espessura de 17,0 mm quanto à absorção sonora são apresentados na Figura 92.



**Figura 92– Coeficientes de absorção para o painel tipo WWCB – 17,0 mm.**

Wood Wool Cement Board (palha grossa - 17mm)

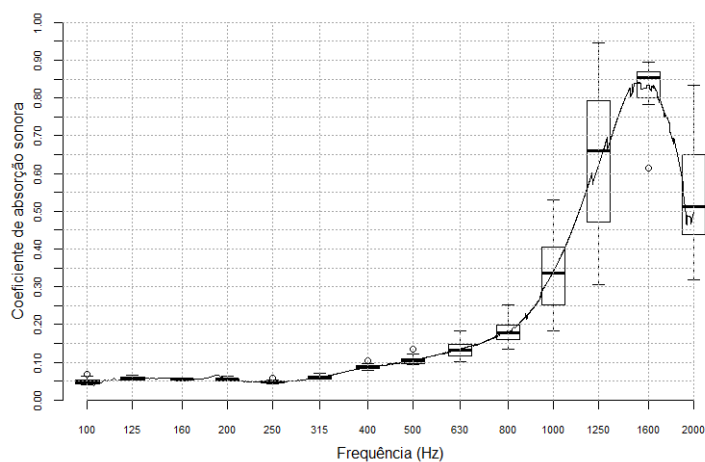


**Fonte: Autor (2020).**

Para o painel de madeira mineralizada com 25,0 mm de espessura, feito com palha grossa, a Figura 93 descreve o seu comportamento quanto à absorção sonora.

**Figura 93– Coeficientes de absorção para o painel tipo WWCB – 25,0 mm com palha grossa.**

Wood Wool Cement Board (palha grossa - 25mm)

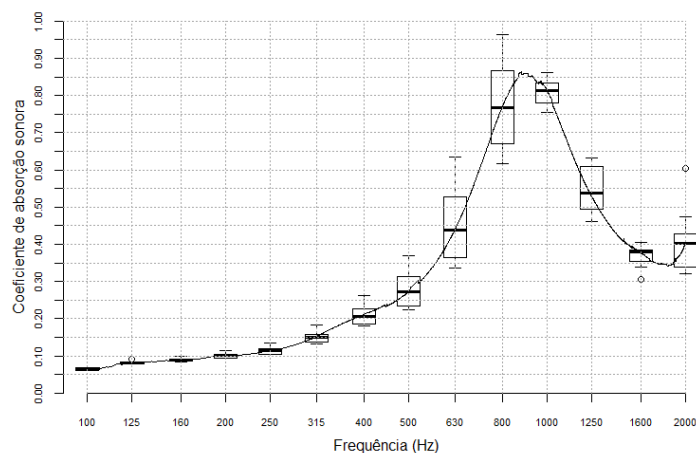


**Fonte: Autor (2020).**

O painel de palha grossa de madeira com cimento cuja espessura é igual à 50,0 mm tem sua propriedade de absorção sonora representada pela Figura 94.

**Figura 94– Coeficientes de absorção para o painel tipo WWCB – 50,0 mm.**

Wood Wool Cement Board (palha grossa - 50mm)

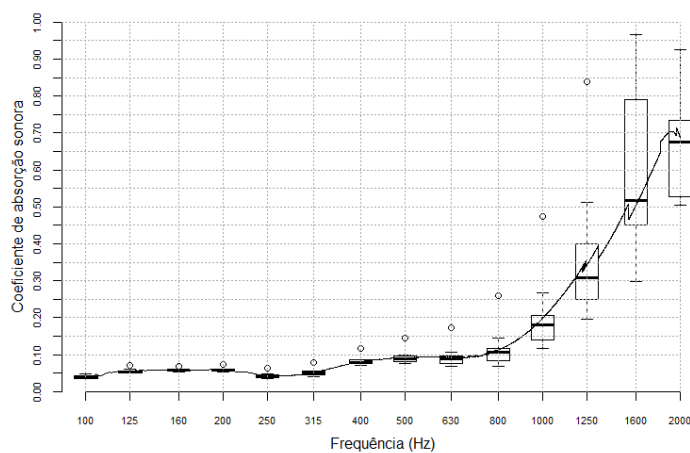


Fonte: Autor (2020).

Para o painel de palha de cimento com madeira na espessura de 25,0 mm feito com palha superfina, o resultado pode ser verificado na Figura 95.

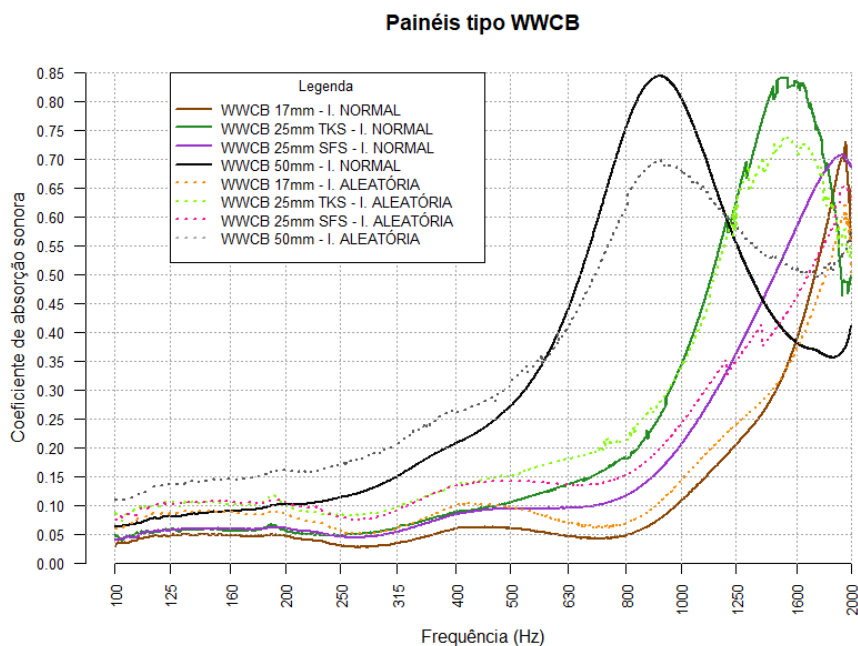
**Figura 95– Coeficientes de absorção para o painel tipo WWCB – 25,0 mm com palha superfina.**

Wood Wool Cement Board (palha superfina - 25mm)



Fonte: Autor (2020).

A Figura 96 mostra os resultados encontrados para cada tipo de painel de palha de madeira com cimento ensaiado.

**Figura 96– Comparação dos coeficientes de absorção para o painel tipo WWCB.**

Os painéis de palha de madeira com cimento apresentaram os melhores valores de absorção sonora quando comparados com os outros painéis, e podem ser recomendados para o tratamento acústico de ambientes com o objetivo de diminuir o tempo de reverberação. O painel com 50,0mm de espessura apresentou um  $\alpha_N$  de aproximadamente 0,80 à 1000 Hz. O painel de 25,0mm feito com palha grossa apresentou coeficientes maiores que o painel feito com palhas superfina para frequências superiores à 450Hz.

Comparando os valores encontrados para o painel de 25,0 com palha superfina com valores medidos por Botterman et al. (2018), mostrados na Figura 15, uma similaridade foi observada nos resultados. O painel de 17,0 mm de espessura pode apresentar valores nulos nas baixas frequências, conforme faixa de erro apresentada na Tabela 4. Os coeficientes de absorção com incidência aleatória resultaram em valores inferiores aos de incidência normal para frequências mais elevadas.

Os valores de NRC calculados para cada tipo de painel, com base na incidência normal, podem ser verificados na Tabela 9.

**Tabela 9 – Valores NRC para cada painel.**

Tipo	MDF 9mm	MDF 12mm	MDF 15mm	OSB 8mm	OSB 12mm	OSB 25mm	WWCB TKS 17mm	WWCB TKS 25mm	WWCB TKS 50mm	WWCB SFS 25mm
NRC	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15	0,20	0,25	0,45	0,30

**Fonte: Autor (2020).**

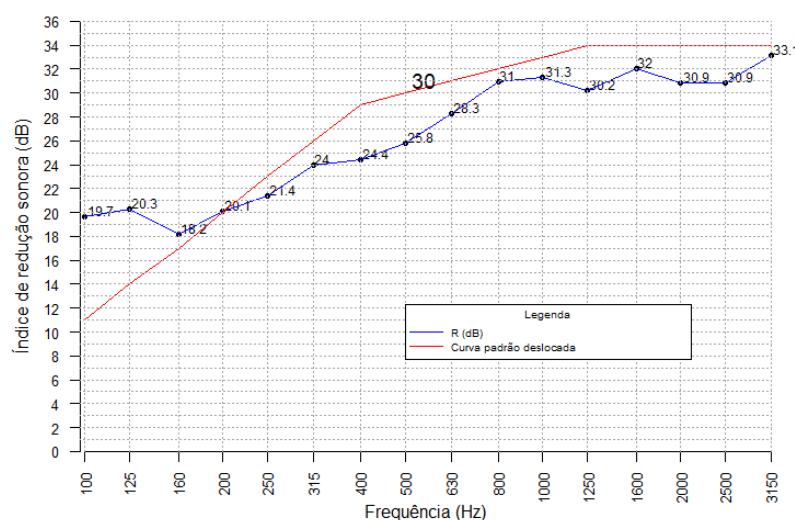
Comparando os resultados percebeu-se que os painéis de madeira em estudo apresentaram valor de NRC igual ou superior ao sistema mais comum de revestimento de alvenarias no Brasil, conforme os valores apresentados por Palomar et al. (2015).

#### 4.4 ENSAIO ISOLAÇÃO SONORA

##### 4.4.1 Blocos com RCD

Como descrito no trabalho de Sousa (2019), uma vedação vertical constituída por blocos de RCD com massa específica média de  $2,02 \text{ g/cm}^3$  e taxa de absorção de 14,49% foi testada na câmara reverberante, cujo índice de redução sonora pode ser verificado na Figura 97:

**Figura 97– Índice de redução sonora ponderado para os blocos com RCD.  
Somente blocos, feitos com RCD (Rw=30dB)**



**Fonte: Adaptado de Sousa (2019).**

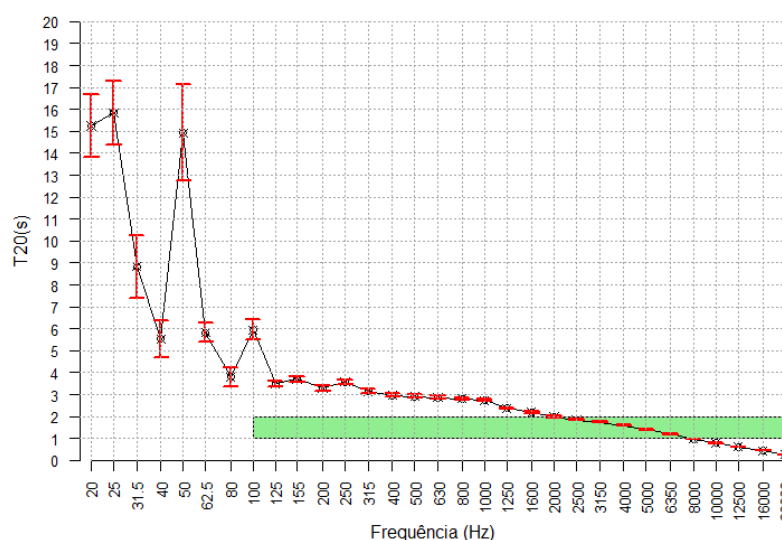
Para a vedação vertical de blocos de concreto os resultados das medições de isolamento revelaram a frequência crítica de 160 Hz. Nas altas frequências existe uma segunda queda, em 1250 Hz, referente à uma frequência de coincidência, que ocorre quando o comprimento da onda acústica no meio, projetada na estrutura, é igual ao comprimento da onda de flexão livre da estrutura (PAIXÃO, 2002). Este efeito ocorre devido à espessura da parede do bloco, como descrito por Friguellino e Smith (1999).

Um efeito “platô” também é verificado acima de 1000 Hz devido à espessura da parede. Em paredes finas, a velocidade de onda de flexão livre aumenta com a frequência, o que não ocorre em paredes espessas, como é o caso da alvenaria testada. Existe um limite imposto pela deformação ao cisalhamento e pelo momento de inércia da parede nas velocidades de

propagações das ondas, resultando em um valor comum de isolamento para as altas frequências, como relatado por Granzotto et al. (2020).

O tempo de reverberação e sua incerteza de medição (em vermelho) para os blocos podem ser verificados na Figura 98. A norma ISO 10140-5 (2010) estabelece que o tempo de reverberação deve ficar entre 1 e 2 segundos a partir da frequência de 100 Hz, o que não foi observado nas medições realizadas. Tal característica ocorre em função das características geométricas da câmara e da ausência de difusores nas medições.

**Figura 98– Tempo de reverberação e incerteza de medição para os blocos com RCD.**  
**Blocos com RCD - Tempo de reverberação e incerteza**

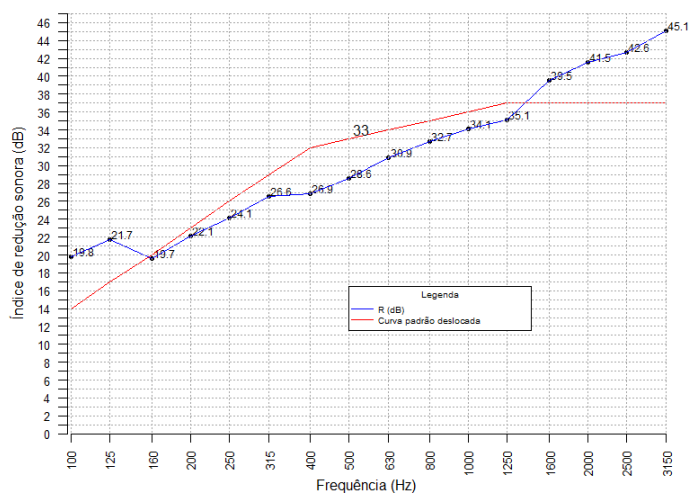


**Fonte: Autor (2020).**

#### 4.4.2 Painéis do Tipo OSB

Na figura 99 é possível verificar a isolamento observada para um painel do tipo OSB com 8,00 mm de espessura quando colocados sobre a vedação vertical de blocos com RCD por meio de pregos.

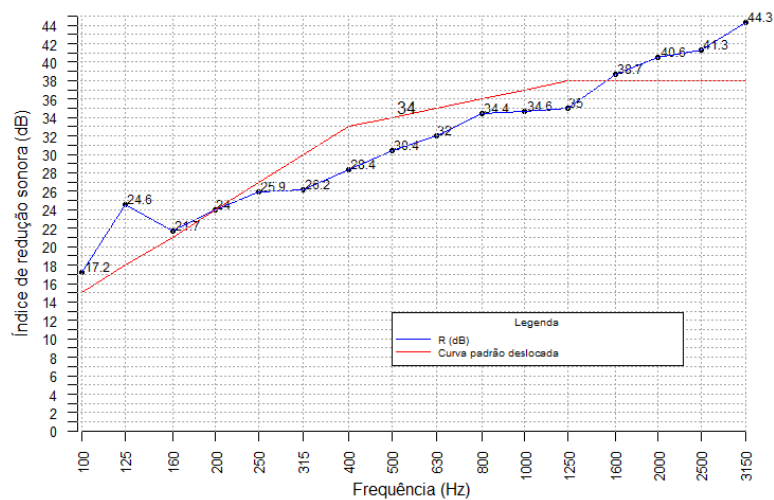
**Figura 99– Índice de redução sonora ponderado para os blocos com painéis de OSB de 8,00 mm.**  
**Blocos com painéis OSB 8mm (Rw=33dB)**



Fonte: Autor (2020).

Na Figura 100 são mostrados os valores obtidos para o painel de 12,0 mm de espessura.

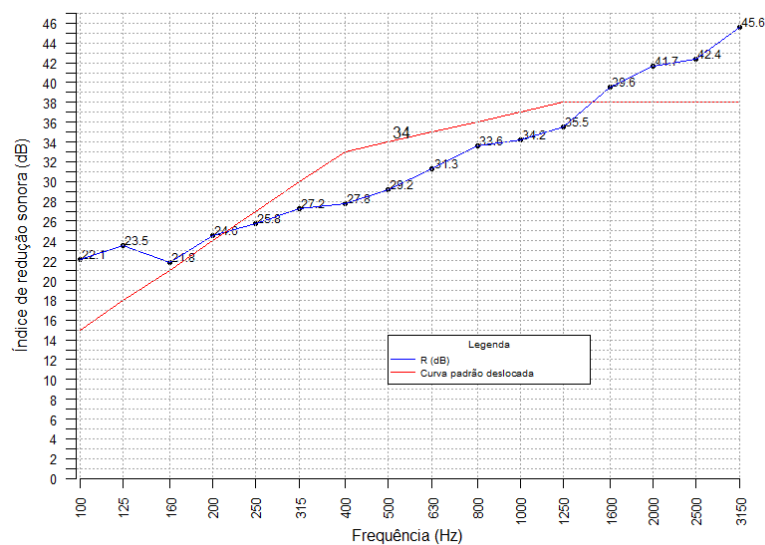
**Figura 100– Índice de redução sonora ponderado para os blocos com painéis de OSB de 12,0 mm.**  
**Blocos com OSB - 12mm (Rw=34dB)**



Fonte: Autor (2020).

Para o painel com 25,0 mm de espessura os resultados podem ser observados na Figura 101.

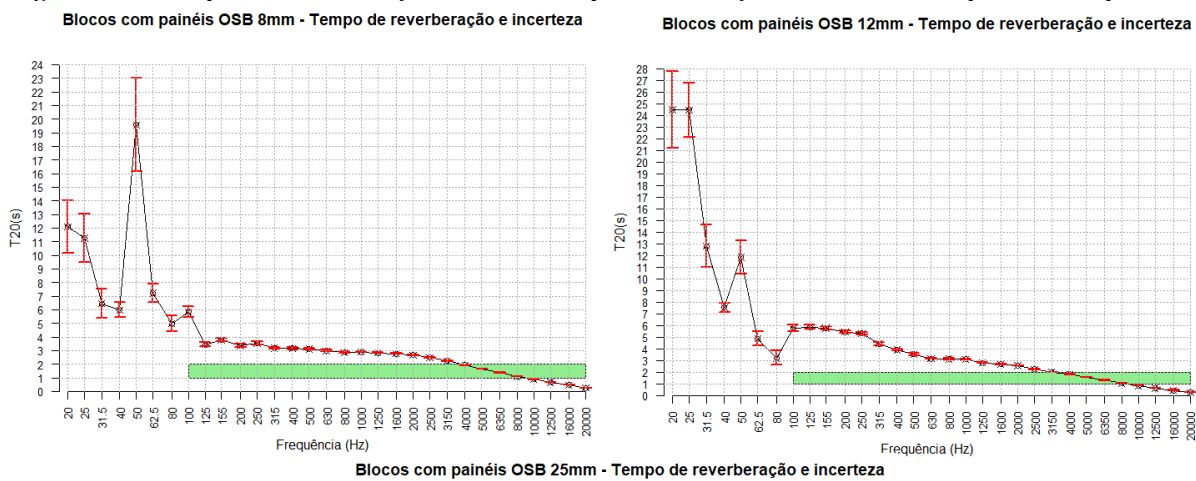
**Figura 101– Índice de redução sonora ponderado para os blocos com painéis de OSB de 25,0 mm.  
Blocos com painéis OSB 25mm (Rw=34dB)**



Fonte: Autor (2020).

Os tempos de reverberações e as incertezas das medições para as situações de vedações verticais revestidas com painéis tipo OSB podem ser verificadas na Figura 102.

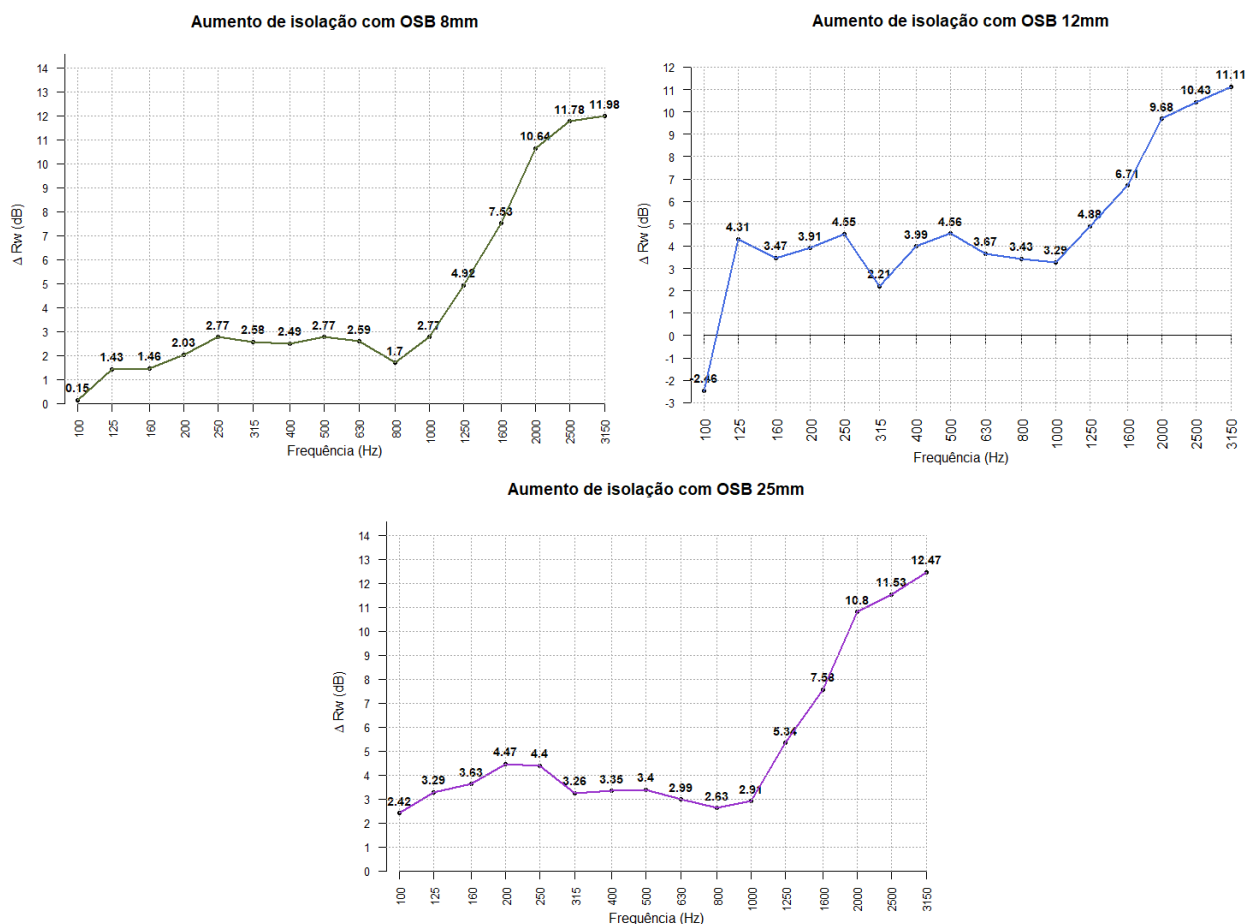
**Figura 102– Tempos de reverberações e incertezas para as medições realizadas com painéis do tipo OSB.**



Fonte: Autor (2020).

O aumento de isolamento na alvenaria pode ser verificado na Figura 103 para as diferentes espessuras utilizadas para o painel do tipo OSB.

**Figura 103– Aumento de isolamento com painéis tipo OSB com diferentes espessuras.**



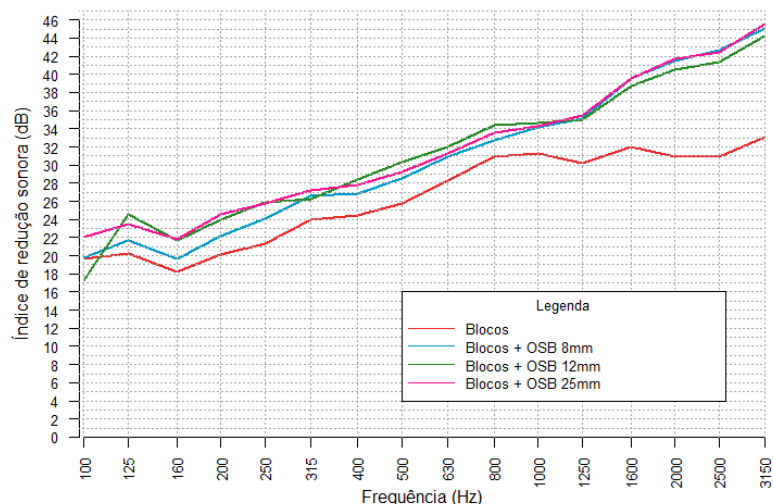
Fonte: Autor (2020).

Comparando os valores de isolamento obtidos com os diferentes sistemas de vedações, pode-se verificar na Figura 104 que a utilização de um painel com 25,0 mm de espessura proporcionou os melhores valores de índices de reduções sonoras. Em altas frequências o painel com espessura de 8,00 mm apresentou valores muito próximos aos valores do painel mais espesso, e nas baixas frequências não foi verificado aumento significativo, tendo diminuído, inclusive, com o painel com 12,0 mm de espessura na frequência de 100 Hz.

As inserções dos painéis de 12,0 e 25,0 mm de espessura em uma alvenaria aumentaram o valor do índice de redução sonora ponderado em 4dB para ambas as situações, sendo 1dB abaixo do acréscimo identificado por Friedrich (2010) – apresentado na seção 2.1.12 – com a aplicação de revestimento argamassado em ambas as faces de uma alvenaria estrutural com blocos cerâmicos.



**Figura 104– Comparação dos aumentos de isolamento com painéis OSB.**  
**Comparação de sistemas de isolamento (OSB)**



**Fonte: Autor (2020).**

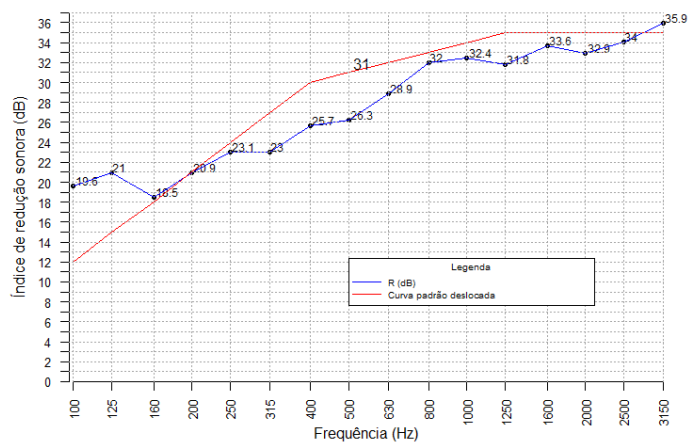
O efeito “platô” foi minimizado com a inserção dos compósitos de OSB. Acima de 1250 Hz o aumento na isolamento saltou de 5 para 8 dB por oitava, aproximadamente, devido ao acréscimo dado na rigidez à flexão da alvenaria com fixações dos diferentes painéis. O índice de redução sonora ponderado ( $R_w$ ) saltou de 30 dB para a vedação vertical com blocos de concreto para 33 dB quando revestida com painéis de OSB com 8,00 mm de espessura e para 34 dB com painéis de 12,0 e 25,0 mm de espessura.

#### 4.4.3 Painéis do Tipo WWCB

O valor medido para o painel de palha grossa de madeira com cimento na espessura de 17,0 mm colocado sobre a vedação vertical de blocos com RCD, por meio de pregos, pode ser observado na Figura 105.

**Figura 105– Índice de redução sonora ponderado para os blocos com painéis tipo WWCB de 17,0 mm.**

**Blocos com painéis de palha grossa de madeira com cimento - 17mm (Rw=31dB)**

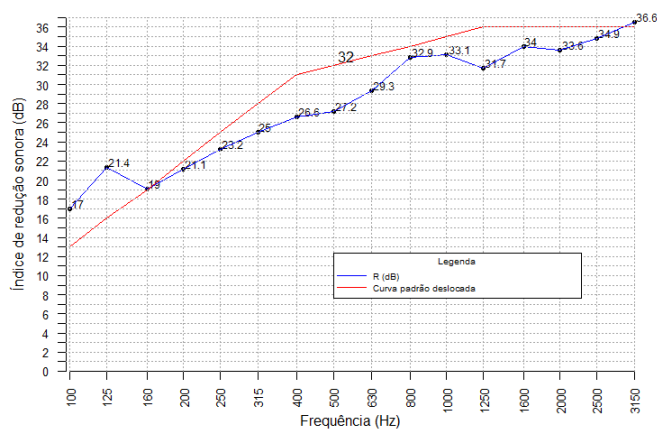


**Fonte: Autor (2020).**

Na Figura 106 encontra-se a medição realizada para o painel de 25,0 mm feito com palha grossa de madeira.

**Figura 106– Índice de redução sonora ponderado para os blocos com painéis tipo WWCB de 25,0 mm (palha grossa).**

**Blocos com painéis de palha grossa de madeira com cimento - 25mm (Rw=32dB)**

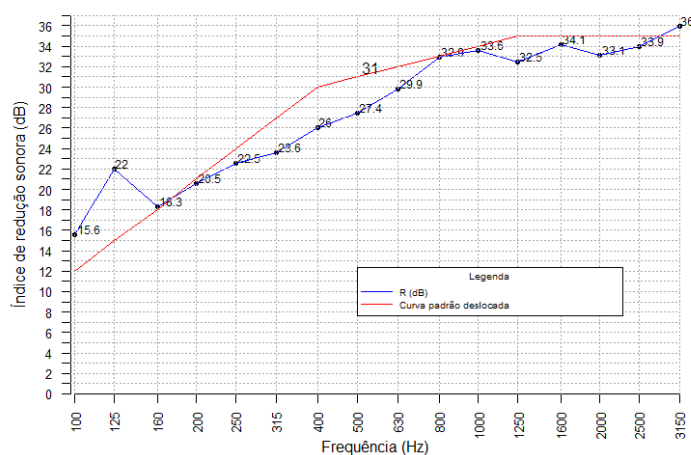


**Fonte: Autor (2020).**

O painel de mesma espessura, porém feito com palha superfina, tem seus valores ilustrados na Figura 107.

**Figura 107– Índice de redução sonora ponderado para os blocos com painéis tipo WWCB de 25,0 mm (palha superfina).**

**Blocos com painéis de palha superfina de madeira com cimento - 25mm (Rw=31dB)**

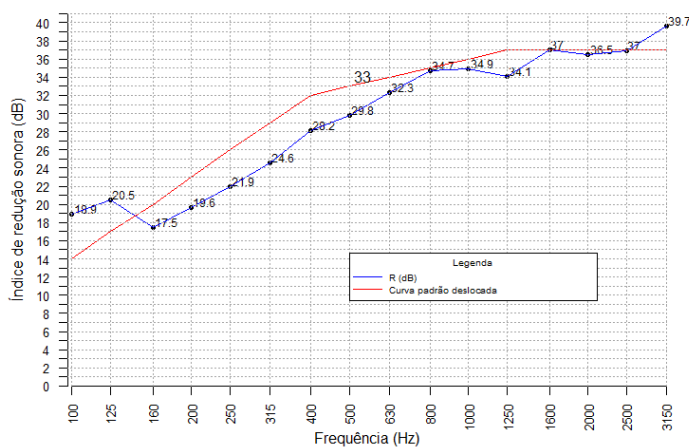


**Fonte: Autor (2020).**

Na Figura 108 podem ser verificados os valores das medições de isolamento para o painel com a maior espessura (50,0 mm) sobre a alvenaria feita com RCD. Este painel foi confeccionado com palha grossa de madeira.

**Figura 108– Índice de redução sonora ponderado para os blocos com painéis tipo WWCB de 50,0 mm.**

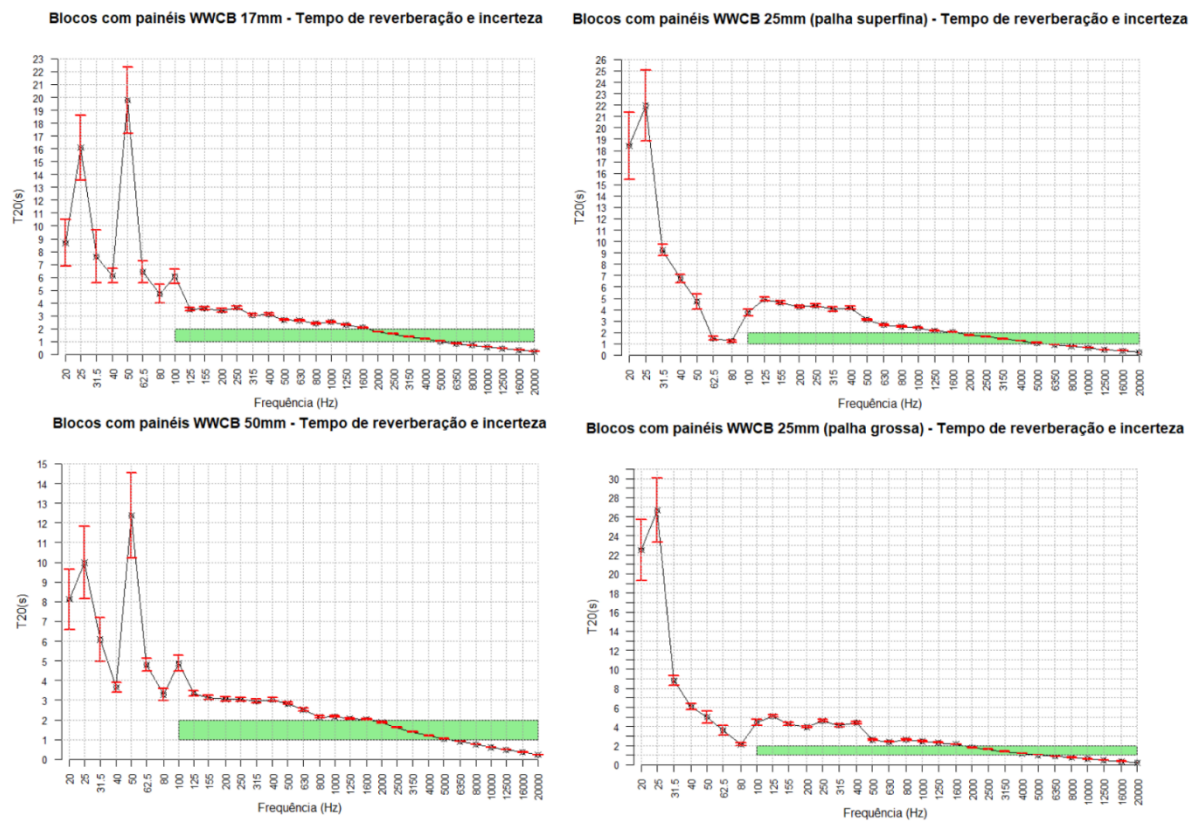
**Blocos com painéis de palha grossa de madeira com cimento - 50mm (Rw=33dB)**



**Fonte: Autor (2020).**

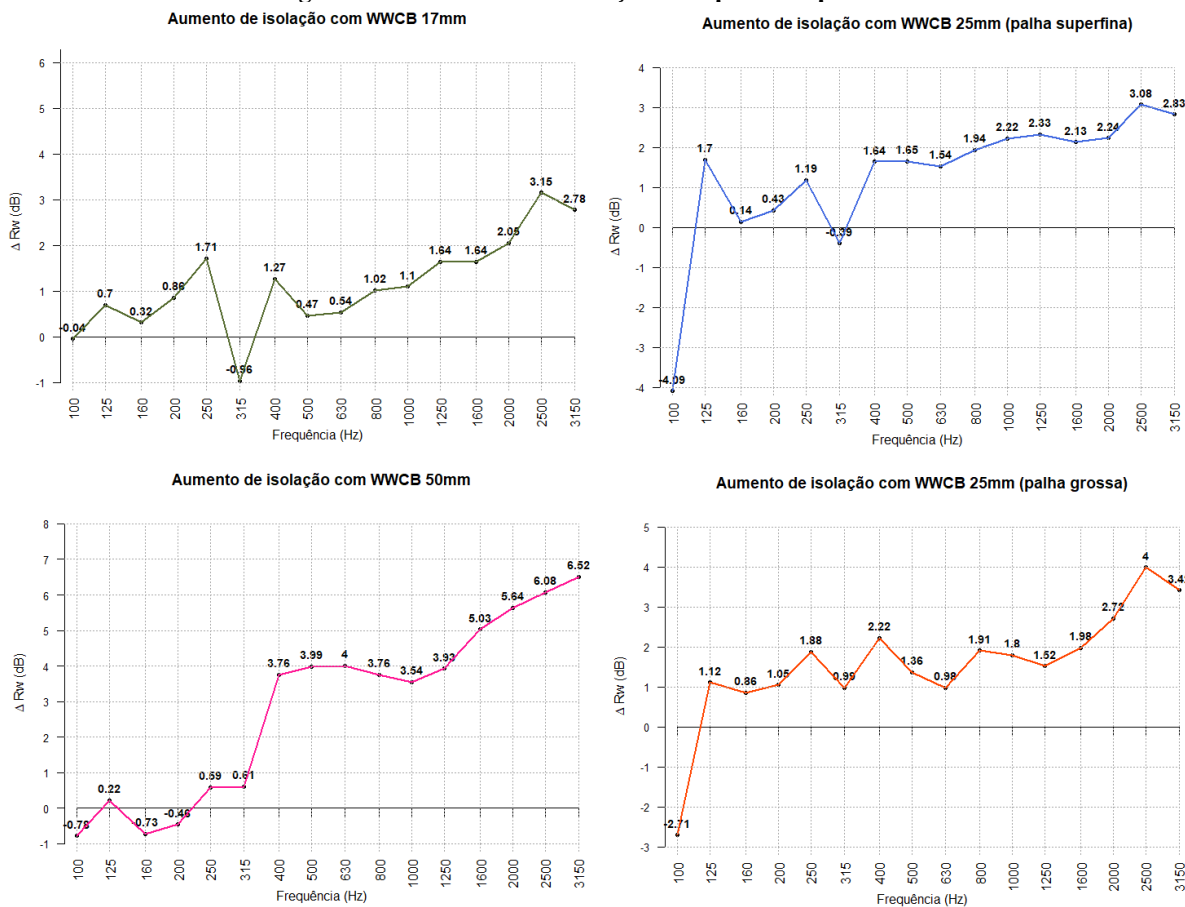
A Figura 109 apresenta os valores calculados dos tempos de reverberações para as diferentes situações de revestimentos da vedação vertical, junto às suas incertezas de medições.

**Figura 109– Tempos de reverberações e incertezas para as medições realizadas com painéis do tipo WWCB.**



Fonte: Autor (2020).

O aumento de isolamento para os diferentes tipos de painéis de palha de madeira com cimento pode ser verificado na Figura 110.

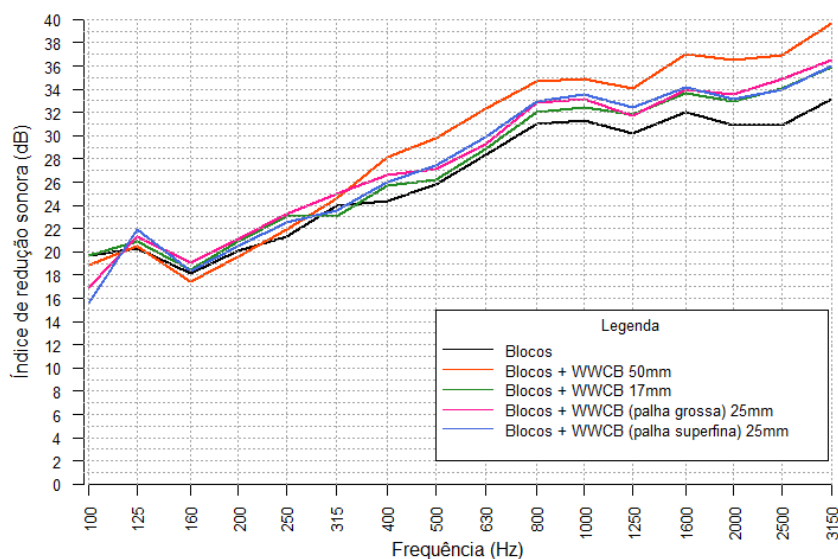
**Figura 110– Aumento de isolamento com painéis tipo WWCB**

Fonte: Autor (2020).

Notou-se que a isolamento piorou em algumas frequências baixas (100 e 315 Hz) para os diferentes tipos de painéis. Considerando as similaridades na absorção sonora entre os valores obtidos e valores encontrados por Heng (1988) para painéis de gesso acartonado, pode-se dizer que as conclusões dadas por Warnock (1991) – apresentadas na seção 2.1.12 - para a diminuição de isolamento com a adição de um painel de gesso podem justificar o mesmo feito pela adição de painéis de palha grossa de cimento com madeira em uma vedação de blocos de concreto, que é o fato de uma camada de ar continuar existindo mesmo a fixação do painel, o que induz um sistema massa-mola-massa.

Outro fator que pode influenciar na criação destas ressonâncias é a porosidade elevada do material em relação a outros compósitos prensados à quente, como o OSB. Para os diferentes sistemas de vedações analisados utilizando painéis de cimento-madeira, a Figura 111 consolida os resultados.

**Figura 111– Comparação dos aumentos de isolamento com painéis WWCB.**  
**Comparação de sistemas de isolamento (WWCB)**



Fonte: Autor (2020).

Percebeu-se que para as baixas frequências não houve melhora significativa, e para algumas frequências houve piora, conforme as explicações do trabalho de Warnock (1990) apresentadas na seção 2.1.12. Pode-se, também, relacionar o baixo aumento à frequência de ressonância do conjunto (Equação 35).

A inserção de um painel com 50,0 mm de espessura elevou o índice de redução sonora ponderado ( $R_w$ ) de 30 dB para 33 dB, e a inserção de um painel com 17,0 mm de espessura, elevou de 30 dB para 31 dB. Os painéis de 25,0 mm constituídos por palha grossa e palha superfina apresentaram índices  $R_w$  de 32 dB e 31 dB, respectivamente.

A resumo os resultados encontrados, com os espectros de correções para ruído rosa ( $C$ ) e para ruído de tráfego ( $C_{tr}$ ), conforme a norma ISO 717-1 (2013).

**Tabela 10 – Valores de isolamento com correções espectrais.**

Amostra	$R_w$ (dB)	$C$ (dB)	$C_{tr}$ (dB)
Alvenaria de blocos com RCD	30	-1	-3
Alvenaria com blocos OSB - 8,00 mm fixados	33	-1	-4
Alvenaria com blocos OSB - 12,0 mm fixados	34	-1	-4
Alvenaria com blocos OSB - 25,0 mm fixados	34	-2	-3
Alvenaria com blocos WWCB - 17,0 mm TKS fixados	31	-1	-3
Alvenaria com blocos WWCB - 25,0 mm TKS fixados	32	-1	-4
Alvenaria com blocos WWCB - 25,0 mm SFS fixados	32	-1	-3
Alvenaria com blocos WWCB - 50,0 mm TKS fixados	33	-1	-5

Fonte: Autor (2020).

## 4.5 ENSAIOS QUANTITATIVOS DE INTELIGIBILIDADE DE FALA

### 4.5.1 Ensaios na Sala de Aula sem Condicionamento Acústico

A sala de aula, sem condicionamento acústico feito por compósitos de madeira, apresentou os valores descritos no Quadro 14 para os de índices de transmissão de fala (STI) em cada assento.

**Quadro 14 – Resultados para a situação sem painéis.**

Condicionamento: Sem painéis	Assento				<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	<i>p</i> -valor ANOVA
	A	B	C	D		
STI com Mic. 1/2"	0,6063	0,5879	0,5916	0,5714	0,9108	0,8420
STI: Orelha esquerda	0,5830	0,5851	0,5912	0,5837	0,1464	
STI: Orelha direita	0,6169	0,5938	0,5860	0,5697	0,9286	
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	0,5957	0,6109	0,1091	0,2034		
<i>p</i> -valor ANOVA	0,0587					

Fonte: Autor (2020).

Mesmo com um *p*-valor superior à 5,00% na análise de variância, realizou-se um teste de Tukey, descrito na Figura 112, onde foi verificado que existe diferença estatística entre os valores de STI calculados para os assentos A e D (*p*-adj < 0,05).

**Figura 112– Teste de Tukey para diferentes assentos na sala sem painéis.**

```

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = STI ~ SEAT, data = x)

$SEAT
      diff      lwr      upr    p adj
B-A -0.0131275370 -0.03894771  0.012692633 0.4163919
C-A -0.0124334913 -0.03825366  0.013386679 0.4586035
D-A -0.0271369257 -0.05295710 -0.001316755 0.0397623
C-B  0.0006940457 -0.02512612  0.026514216 0.9997511
D-B -0.0140093887 -0.03982956  0.011810782 0.3663497
D-C -0.0147034343 -0.04052360  0.011116736 0.3299925

```

Fonte: Autor (2020).

Logo, verificou-se que a inteligibilidade não é estatisticamente a mesma para todos os assentos. O assento “D” apresenta um índice de transmissão de fala estatisticamente diferente do assento mais próximo do docente. O *p*-valor da análise de variância (ANOVA) para as medições realizadas com diferentes microfones resultou em valor superior à 5,00% para todas as combinações de condicionamento acústico, não apenas para a situação da sala de aula sem painéis. Isto significa que não foi verificada diferença estatística entre as médias das medições, mesmo tendo sido realizadas com diferentes microfones.

#### 4.5.2 Ensaio na Sala de Aula com Painéis Tipo MDF

A sala de aula condicionada acusticamente por meio de painéis tipo MDF com espessuras de 9,00 mm apresentou os valores descritos pelo Quadro 15 para o STI em cada assento.

**Quadro 15 – Resultados para a situação com painéis MDF com espessura de 9,00 mm.**

Condicionamento: MDF 9,00mm	Assento				<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	<i>p</i> -valor Kruskal-Wallis
	A	B	C	D		
STI com Mic. 1/2"	0,6091	0,5837	0,6043	0,5718	0,5262	0,6939
STI: Orelha esquerda	0,5872	0,5918	0,5981	0,5836	0,8909	
STI: Orelha direita	0,6276	0,5807	0,5786	0,5754	0,0162	
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	0,9077	0,5091	0,4417	0,5703		
<i>p</i> -valor ANOVA	0,0850					

Fonte: Autor (2020).

O Quadro 16 mostra os valores de STI para o condicionamento realizado com compósitos do tipo MDF com espessuras iguais à 12,0 mm.

**Quadro 16 – Resultados para a situação com painéis MDF com espessura de 12,0 mm.**

Condicionamento: MDF 12,0mm	Assento				<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	<i>p</i> -valor ANOVA
	A	B	C	D		
STI com Mic. 1/2"	0,6136	0,5912	0,5835	0,5792	0,3515	0,7110
STI: Orelha esquerda	0,5796	0,5985	0,5863	0,5933	0,9230	
STI: Orelha direita	0,6334	0,5997	0,5805	0,5835	0,2736	
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	0,7113	0,2437	0,9708	0,5835		
<i>p</i> -valor ANOVA	0,1920					

Fonte: Autor (2020).

Para o condicionamento realizado com o compósito de MDF de maior espessura (15,0 mm), os valores são apresentados pelo Quadro 17.

**Quadro 17 – Resultados para a situação com painéis MDF com espessura de 15,0 mm.**

Condicionamento: MDF 15,0mm	Assento				<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	<i>p</i> -valor ANOVA
	A	B	C	D		
STI com Mic. 1/2"	0,5942	0,5825	0,5859	0,5748	0,9847	0,6540
STI: Orelha esquerda	0,5771	0,5815	0,5770	0,5811	0,0695	
STI: Orelha direita	0,6251	0,5903	0,5739	0,5687	0,3633	
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	0,7113	0,2437	0,9708	0,5835		
<i>p</i> -valor ANOVA	0,2089					

Fonte: Autor (2020).

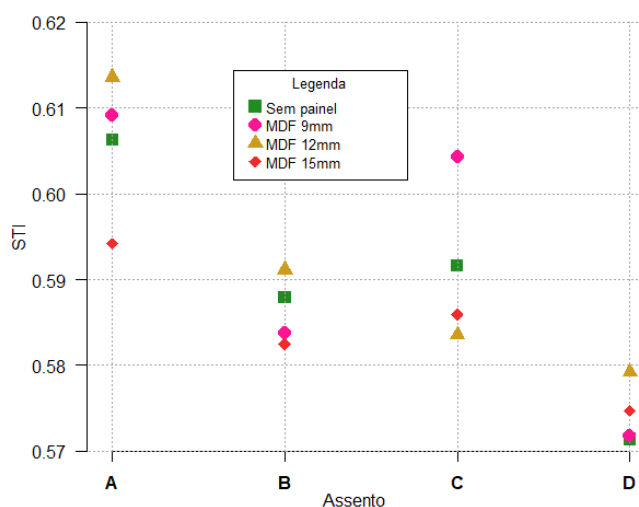
Por meio dos resultados dos testes de ANOVA, foi identificado que não existe diferença estatística entre os índices de transmissão de fala para os diferentes assentos nas três configurações de condicionamento utilizando painéis do tipo MDF (9,00, 12,0 e 15,0 mm de



espessura), ou seja, os índices de inteligibilidade de fala seriam estatisticamente iguais para os assentos A, B, C e D. Os valores medidos por diferentes microfones em um mesmo assento também se mostraram estatisticamente semelhantes, conforme os testes de ANOVA ou Kruskal-Wallis.

A Figura 113 mostra os valores de STI encontrados para a situação de condicionamento acústico com painéis tipo MDF, baseada nos valores medidos pelo microfone de 1/2”.

**Figura 113– Valores de STI para painéis tipo MDF.**  
Índice de transmissão de fala (STI)



Fonte: Autor (2020).

O Quadro 18 apresenta o efeito dos diferentes condicionamentos no índice de transmissão de fala em cada assento.

**Quadro 18 – Efeito dos painéis tipo MDF na inteligibilidade de fala.**

Tipo de painel	Assento			
	A	B	C	D
MDF 9,00mm	Melhorou	Piorou	Melhorou	Melhorou
MDF 12,0mm	Melhorou	Melhorou	Piorou	Melhorou
MDF 15,0mm	Piorou	Piorou	Piorou	Melhorou

Fonte: Autor (2020).

O painel de 15,0 mm levou a uma piora do índice de transmissão de fala nos assentos A, B e C, enquanto os outros dois com espessura menor melhoraram as condições de inteligibilidade, diferindo para os assentos B e C.

#### 4.5.3 Ensaio na Sala de Aula com Painéis Tipo OSB

Para os condicionamentos acústicos realizados com compósitos do tipo OSB, as medições resultaram nos valores descritos no Quadro 19 para os de índices de transmissão de fala (STI) em cada assento, correspondentes à espessura de 8,00 mm.

**Quadro 19 – Resultados para a situação com painéis OSB de espessura 8,00 mm.**

Condicionamento: OSB 8,00mm	Assento				<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	<i>p</i> -valor ANOVA
	A	B	C	D		
STI com Mic. 1/2"	0,6292	0,5934	0,5944	0,5597	0,7225	0,8930
STI: Orelha esquerda	0,5757	0,5842	0,6037	0,5877	0,7406	
STI: Orelha direita	0,6395	0,5888	0,5897	0,5659	0,3868	
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	0,2888	0,9931	0,6442	0,4051		
<i>p</i> -valor ANOVA	0,1171					

Fonte: Autor (2020).

O condicionamento realizado com compósitos de 12,0 mm do tipo OSB resultou nos valores de STI do Quadro 20.

**Quadro 20 – Resultados para a situação com painéis OSB de espessura 12,0 mm.**

Condicionamento: OSB 12,0mm	Assento				<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	<i>p</i> -valor ANOVA
	A	B	C	D		
STI com Mic. 1/2"	0,6338	0,5896	0,5781	0,5606	0,6118	0,9730
STI: Orelha esquerda	0,6010	0,5860	0,5909	0,5950	0,9881	
STI: Orelha direita	0,6535	0,5881	0,5812	0,5689	0,1336	
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	0,7277	0,8424	0,4526	0,4465		
<i>p</i> -valor ANOVA	0,0147					

Fonte: Autor (2020).

O condicionamento realizado com compósitos de 25,0 mm do tipo OSB proporcionou índices de transmissão de fala conforme o Quadro 21.

**Quadro 21 – Resultados para a situação com painéis OSB de espessura 25,0 mm.**

Condicionamento: OSB 25,0mm	Assento				<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	<i>p</i> -valor ANOVA
	A	B	C	D		
STI com Mic. 1/2"	0,6321	0,5928	0,5909	0,5791	0,2122	0,8190
STI: Orelha esquerda	0,5883	0,5929	0,5990	0,5796	0,9669	
STI: Orelha direita	0,6274	0,5910	0,5786	0,5780	0,1060	
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	0,1896	0,0837	0,7780	0,5682		
<i>p</i> -valor ANOVA	0,0447					

Fonte: Autor (2020).

Foram identificadas variações do STI entre os assentos para os condicionamentos realizados com os compósitos de 12,0 mm e 25,0 mm de espessura. O teste de Tukey para o condicionamento feito com painéis de 12,0 mm de espessura é mostrado na Figura 114.

Figura 114– Teste de Tukey para diferentes assentos na sala com painel OSB de 12,0 mm.

```

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = STI ~ SEAT, data = x)

$SEAT
      diff      lwr      upr    p adj
B-A -0.041554553 -0.08435266  0.001243555 0.0570033
C-A -0.046049448 -0.08884756 -0.003251340 0.0355634
D-A -0.054615869 -0.09741398 -0.011817762 0.0148337
C-B -0.004494895 -0.04729300  0.038303213 0.9859331
D-B -0.013061316 -0.05585942  0.029736791 0.7658402
D-C -0.008566422 -0.05136453  0.034231686 0.9157685

```

Fonte: Autor (2020).

A Figura 115 mostra as comparações múltiplas feitas para o cenário com compósitos de 25,0 mm de espessura.

Figura 115– Teste de Tukey para diferentes assentos na sala com painel OSB de 25,0 mm.

```

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = STI ~ SEAT, data = x)

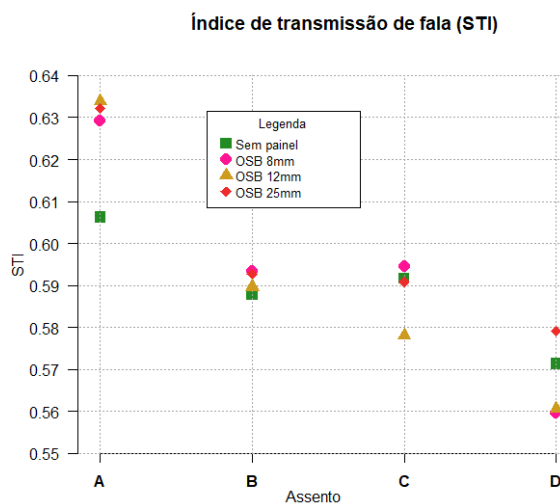
$SEAT
      diff      lwr      upr    p adj
B-A -0.023731645 -0.05798149  0.010518203 0.1976855
C-A -0.026430371 -0.06068022  0.007819478 0.1399001
D-A -0.037043911 -0.07129376 -0.002794063 0.0346850
C-B -0.002698725 -0.03694857  0.031551123 0.9939092
D-B -0.013312266 -0.04756211  0.020937582 0.6185894
D-C -0.010613541 -0.04486339  0.023636308 0.7578965

```

Fonte: Autor (2020).

A análise dos testes de Tukey permitiu verificar que o condicionamento acústico da sala de aula com os painéis OSB com 12,0 mm de espessura levaram a uma inteligibilidade de fala estatisticamente diferente entre os assentos *A* e *C*, e *A* e *D*. O condicionamento acústico com o painel de 25,0mm de espessura fez o mesmo com os assentos *A* e *D*. Os *p-valores* nas análises de variância nas situações que envolvem os painéis de 12,0 mm e 25,0 mm mostraram que existe diferença estatística entre as médias dos índices de transmissão de fala de cada assento, ou seja, nestas configurações a inteligibilidade de fala não foi estatisticamente a mesma para todos os assentos.

A Figura 116 mostra os valores de STI encontrados para a situação de condicionamento acústico com compósitos do tipo OSB, baseada nos valores medidos pelo microfone de ½”.

**Figura 116– Valores de STI para painéis tipo OSB.**

**Fonte: Autor (2020).**

O Quadro 22 resume os efeitos dos painéis na inteligibilidade de fala para cada assento no cenário de condicionamento acústico com compósitos do tipo OSB.

**Quadro 22 – Efeito dos painéis tipo OSB na inteligibilidade de fala.**

Tipo de painel	Assento			
	A	B	C	D
OSB 8,00mm	Melhorou	Melhorou	Melhorou	Piorou
OSB 12,0mm	Melhorou	Melhorou	Piorou	Piorou
OSB 25,0mm	Melhorou	Melhorou	Piorou	Melhorou

**Fonte: Autor (2020).**

O painel de 12,0 mm reduziu o STI nos assentos *C* e *D*, enquanto o painel de 8,00 mm apenas reduziu o valor no assento *D*, mesmo tendo menor espessura. A única configuração que apresentou melhora no STI foi a que utilizou painéis com 25,0 mm de espessura.

#### 4.5.4 Ensaios na Sala de Aula com Painéis Tipo WWCB

A sala de aula condicionada acusticamente por meio de painéis tipo WWCB com espessura igual à 17,0 mm apresentou os valores descritos no Quadro 23 para os de índices de transmissão de fala (STI) em cada assento.

**Quadro 23 – Resultados para a situação com painéis WWCB de espessura 17,0 mm (palha grossa).**

Condicionamento: WWCB 17,0mm - palha grossa	Assento				<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	<i>p</i> -valor Kruskal-Wallis
	A	B	C	D		
STI com Mic. 1/2"	0,6280	0,6049	0,6112	0,6177	0,9303	0,5950
STI: Orelha esquerda	0,6064	0,6057	0,6219	0,5921	0,7375	
STI: Orelha direita	0,6576	0,6024	0,6058	0,6027	0,0058	
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	0,8282	0,4295	0,6451	0,8102		
<i>p</i> -valor ANOVA	0,1810					

Fonte: Autor (2020).

O Quadro 24 exibe os valores calculados para o cenário de condicionamento com os compósitos do tipo WWCB cuja espessura é de 25,0 mm, feitos com palha grossa.

**Quadro 24 – Resultados para a situação com painéis WWCB de espessura 25,0 mm (palha grossa).**

Condicionamento: WWCB 25,0mm - palha grossa	Assento				<i>p</i> -valor Shapiro- Wilk	<i>p</i> -valor ANOVA
	A	B	C	D		
STI com Mic. 1/2"	0,6417	0,6077	0,6314	0,5986	0,5972	0,9070
STI: Orelha esquerda	0,6340	0,6289	0,6202	0,6181	0,5218	
STI: Orelha direita	0,6620	0,6219	0,6060	0,6096	0,1705	
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	0,5164	0,6337	0,8736	0,8618		
<i>p</i> -valor ANOVA	0,0285					

Fonte: Autor (2020).

Os valores de STI para o condicionamento feito com painéis do tipo WWCB com 50,0 mm de espessura são mostrados no Quadro 25.

**Quadro 25 – Resultados para a situação com painéis WWCB de espessura 50,0 mm (palha grossa).**

Condicionamento: WWCB 50,0mm - palha grossa	Assento				<i>p</i> -valor Shapiro- Wilk	<i>p</i> -valor ANOVA
	A	B	C	D		
STI com Mic. 1/2"	0,6496	0,6401	0,6269	0,6198	0,8145	0,3660
STI: Orelha esquerda	0,6259	0,6087	0,6300	0,6159	0,7263	
STI: Orelha direita	0,6657	0,6252	0,6190	0,6282	0,0897	
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	0,7931	0,9403	0,5273	0,5963		
<i>p</i> -valor ANOVA	0,1526					

Fonte: Autor (2020).

O Quadro 26 apresenta os valores calculados de STI para o cenário com painéis do tipo WWCB com espessura igual à 25,0 mm.

**Quadro 26 – Resultados para a situação com painéis WWCB de espessura 25,0 mm (palha superfina).**

Condicionamento: WWCB 25,0mm - palha superfina	Assento				<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	<i>p</i> -valor ANOVA
	A	B	C	D		
STI com Mic. 1/2"	0,6301	0,6056	0,6045	0,5998	0,0864	0,4850
STI: Orelha esquerda	0,5943	0,6067	0,6192	0,5942	0,2830	
STI: Orelha direita	0,6559	0,6207	0,6109	0,5924	0,7805	
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	0,8200	0,1271	0,8576	0,4398		
<i>p</i> -valor ANOVA	0,2274					

Fonte: Autor (2020).

Foi verificada semelhança estatística entre os valores medidos por diferentes microfones no mesmo assento para todas as situações. O único cenário que apresentou diferenças estatísticas entre assentos quanto ao STI foi o cenário descrito pelo Quadro 24. O teste de Tukey para o cenário de condicionamento acústico com painéis do tipo WWCB de 25,0 mm de espessura e palha grossa é exibido na Figura 117.

**Figura 117– Teste de Tukey para diferentes assentos na sala com painel WWCB de 25,0 mm (palha grossa).**

```

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = STI ~ SEAT, data = X)

$SEAT
      diff      lwr      upr    p adj
B-A -0.026430896 -0.05809028  0.005228488 0.1054421
C-A -0.026726129 -0.05838551  0.004933255 0.1011047
D-A -0.037151642 -0.06881103 -0.005492257 0.0231124
C-B -0.000295233 -0.03195462  0.031364152 0.9999896
D-B -0.010720745 -0.04238013  0.020938639 0.7080580
D-C -0.010425512 -0.04208490  0.021233872 0.7244332

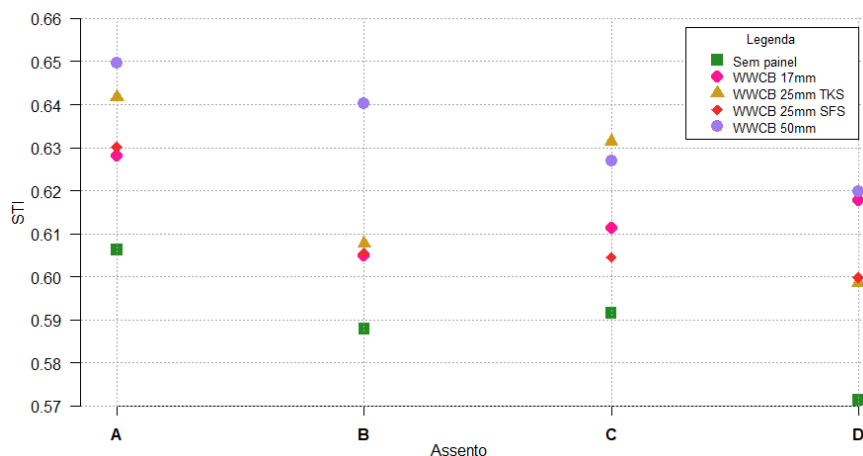
```

Fonte: Autor (2020).

Por meio das análises de variâncias, junto ao teste de comparações múltiplas para o cenário com diferenças estatísticas, pode-se afirmar que os painéis tipo WWCB proporcionaram níveis de inteligibilidade de fala estatisticamente semelhantes para os quatro assentos, com uma única exceção para a configuração com painéis de 25,0mm de espessura feitos com palha grossa e entre os assentos *A* e *D*.

A Figura 118 resume os valores de STI encontrados para a situação de condicionamento acústico com painéis tipo WWCB, baseada nos valores medidos pelo microfone de 1/2”.

**Figura 118– Valores de STI para painéis tipo WWCB.**  
Índice de transmissão de fala (STI)



Fonte: Autor (2020).

O índice de transmissão de fala melhorou para todos os assentos em todas as condições de painéis. O painel de 50,0 mm feito com palha grossa apresentou os melhores resultados para os assentos *A*, *B* e *D*, e o painel de 25,0 mm feito com palha superfina foi o que resultou no melhor índice para o assento *C*.

O painel de 50,0 mm de espessura apresentou médias de STI estatisticamente semelhantes para os quatro assentos, e o melhor desempenho para quase todos os assentos, ficando atrás apenas da configuração com o painel de palha superfina para o assento *C*.

#### 4.5.5 Comparação dos Valores de STI entre os Diferentes Painéis

Utilizando as soluções cujas médias dos valores entre os assentos se mostrou como estatisticamente semelhante ( $p\text{-valor} > 0,05$  na análise de variância), realizou-se um teste de Tukey para identificar quais condicionamentos são estatisticamente diferentes um do outro. Utilizou-se os valores medidos com o microfone de ½”, cujos valores de STI para os assentos *A*, *B*, *C* e *D* permaneceram dentro de uma distribuição normal para todos os cenários, o que permite a análise com estatística paramétrica.

Foram excluídos desta análise os condicionamentos com painéis do tipo OSB nas espessuras de 12,0 e 25,0 mm e o condicionamento com o painel do tipo WWCB, de palha grossa, na espessura de 25,0 mm, por terem apresentado  $p\text{-valor}$  inferior à 0,05 na análise de variância entre os assentos. Os resultados do teste podem ser observados na Figura 119.

Figura 119– Teste de Tukey entre os painéis.

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = STI ~ TIPO, data = x)

$TIPO
      diff      lwr      upr    p adj
MDF15-MDF12 -0.007524076 -0.045124397 0.03007624 0.9939925
MDF9-MDF12  0.000363067 -0.037237254 0.03796339 1.0000000
OSB8-MDF12  0.002317905 -0.035282416 0.03991823 0.9999930
WWCB17-MDF12 0.023622338 -0.013977983 0.06122266 0.4194357
WWCB25SFS-MDF12 0.018164708 -0.019435613 0.05576503 0.7012452
WWCB50-MDF12 0.042247003  0.004646682 0.07984732 0.0212213
MDF9-MDF15  0.007887143 -0.029713178 0.04548746 0.9922830
OSB8-MDF15  0.009841981 -0.027758340 0.04744230 0.9760503
WWCB17-MDF15 0.031146414 -0.006453907 0.06874673 0.1489761
WWCB25SFS-MDF15 0.025688784 -0.011911537 0.06328911 0.3262100
WWCB50-MDF15 0.049771079  0.012170758 0.08737140 0.0049509
OSB8-MDF9   0.001954838 -0.035645483 0.03955516 0.9999975
WWCB17-MDF9 0.023259271 -0.014341050 0.06085959 0.4370686
WWCB25SFS-MDF9 0.017801641 -0.019798680 0.05540196 0.7195256
WWCB50-MDF9 0.041883936  0.004283615 0.07948426 0.0227252
WWCB17-OSB8 0.021304433 -0.016295888 0.05890475 0.5366608
WWCB25SFS-OSB8 0.015846803 -0.021753518 0.05344712 0.8110131
WWCB50-OSB8 0.039929098  0.002328777 0.07752942 0.0327235
WWCB25SFS-WWCB17 -0.005457629 -0.043057950 0.03214269 0.9989754
WWCB50-WWCB17 0.018624665 -0.018975656 0.05622499 0.6776857
WWCB50-WWCB25SFS 0.024082294 -0.013518026 0.06168262 0.3975913

```

Fonte: Autor (2020).

Percebeu-se que as médias dos valores de STI entre os condicionamentos feitos por painéis do tipo WWCB com 50,0 mm de espessura e os painéis do tipo MDF (em suas três espessuras) são estatisticamente diferentes. O mesmo aconteceu com o painel do tipo OSB na espessura de 8,00 mm.

Para as demais comparações o teste demonstrou que não existe diferença estatística entre as médias, portanto, para os testes subjetivos, foi adotado o cenário com os compósitos do tipo WWCB na espessura de 50,0 mm, por ter sido verificada sua diferença estatística quando comparado aos outros compósitos (MDF e OSB).

#### 4.5.6 Diminuição do Nível de Pressão Sonora entre os Assentos.

A gravação do primeiro minuto do áudio *Arizona Travelogue Passage* apresentou os níveis de pressões sonoras para os diferentes assentos e condicionamentos conforme a Tabela 11.

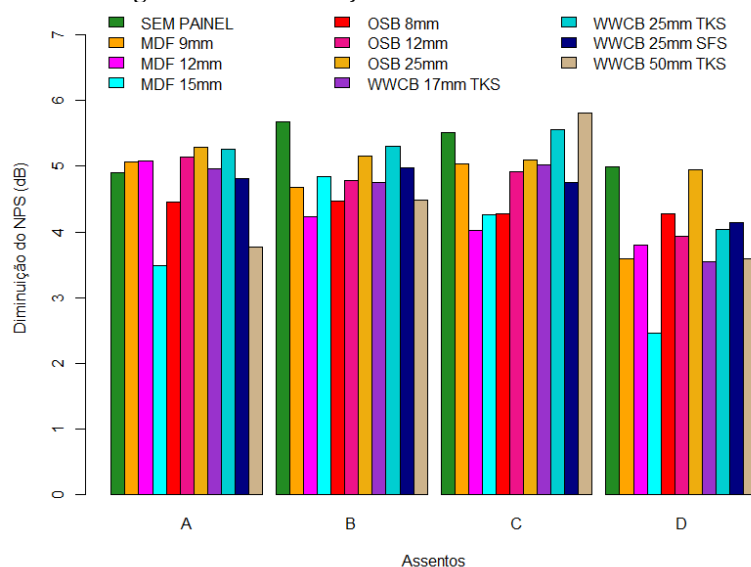


**Tabela 11 – Diminuição no NPS entre os assentos.**

-	NPS (dB)	Diferença de NPS (dB) por assento			
Condicionamento	1,00m	A	B	C	D
Sem painéis	69,71	4,91	5,68	5,51	4,99
MDF - 9,00 mm	69,47	5,06	4,68	5,03	3,59
MDF - 12,0 mm	69,27	5,08	4,24	4,03	3,80
MDF - 15,0 mm	70,10	3,49	4,84	4,27	2,47
OSB - 8,00 mm	69,37	4,45	4,47	4,28	4,28
OSB - 12,0 mm	73,25	5,14	4,79	4,92	3,94
OSB - 25,0 mm	69,70	5,29	5,15	5,10	4,95
WWCB - 17,0 mm TKS	72,49	4,97	4,76	5,02	3,55
WWCB - 25,0 mm TKS	71,13	5,26	5,30	5,56	4,04
WWCB - 25,0 mm SFS	70,59	4,82	4,98	4,76	4,14
WWCB - 50,0 mm TKS	69,84	3,77	4,49	5,81	3,59

Fonte: Autor (2020).

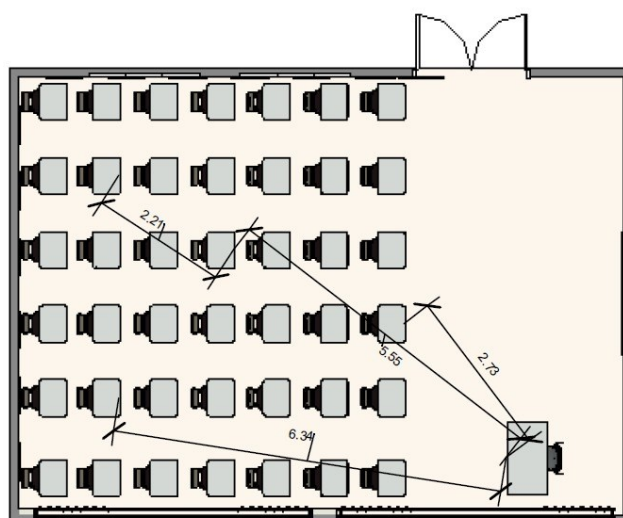
A diferença de níveis de pressões sonoras em função do condicionamento e do tipo de assento podem ser também visualizadas na Figura 120.

**Figura 120– Diminuição do NPS em cada assento.**

Fonte: Autor (2020).

As distâncias entre os assentos e a fonte sonora são elencadas na Figura 121.

Figura 121– Distâncias de cada assento em relação à mesa do professor.



Fonte: Autor (2020).

A distância crítica (CD), conforme definido por Peutz (1971), é o ponto onde as intensidades do som direto e das reflexões são equivalentes quanto à inteligibilidade, dada pela Equação 59.

$$CD = 0,20 \cdot \sqrt{\frac{V}{TR}} \quad (59)$$

onde:

$V$  é o volume da sala,  $m^3$ ;

$TR$  é o tempo de reverberação da sala, neste caso sendo igual à média aritmética dos valores encontrados para as frequências de 500, 1000 e 2000 Hz, segundos.

A Tabela 12 apresenta as distâncias críticas para cada assento e tipo de condicionamento acústico, onde o tempo de reverberação adotado é a média dos valores medidos para as frequências de 500, 1000 e 2000Hz, cuja medição está descrita na seção 4.6.2.

**Tabela 12 – Distância crítica para diferentes condicionamentos.**

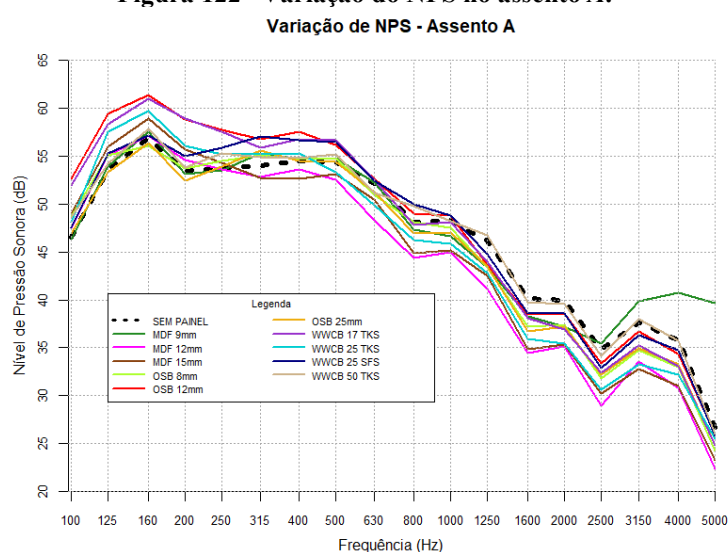
Situação	Tempo de reverberação (s)	CD (m)
Sem painéis	1,171	2,78
MDF - 9,00 mm	1,098	2,87
MDF - 12,0 mm	1,130	2,83
MDF - 15,0 mm	1,114	2,85
OSB - 8,00 mm	1,131	2,83
OSB - 12,0 mm	1,127	2,83
OSB - 25,0 mm	1,123	2,84
WWCB - 17,0 mm TKS	1,070	2,91
WWCB - 25,0 mm TKS	0,989	3,02
WWCB - 25,0 mm SFS	1,065	2,91
WWCB - 50,0 mm TKS	0,932	3,11

Fonte: Autor (2020).

Em todas as situações o assento A ficou posicionado a frente da distância crítica, recebe a maior parte de sua energia sonora diretamente da fonte sonora. Os demais assentos ficaram atrás da distância crítica, para todos os condicionamentos, recebendo mais energias devido à reverberação do que do som direto.

Para o assento C, o mais afastado em relação à fonte sonora, percebeu-se que a adição de um painel de 50,0 mm de espessura feito com palha grossa de madeira com cimento levou à maior redução do NPS devido ao seu melhor desempenho para a absorção sonora, consequentemente maior redução do tempo de reverberação.

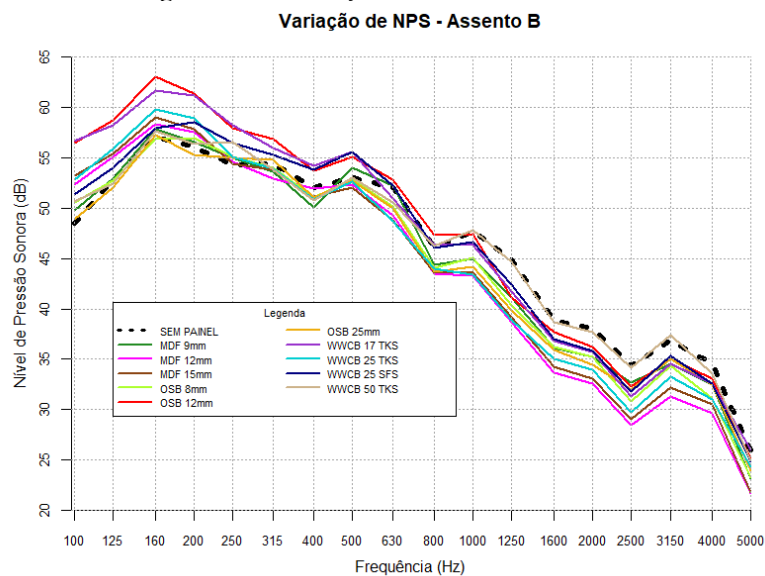
A distribuição espectral do NPS no assento A é exibida na Figura 122.

**Figura 122– Variação do NPS no assento A.**

Fonte: Autor (2020).

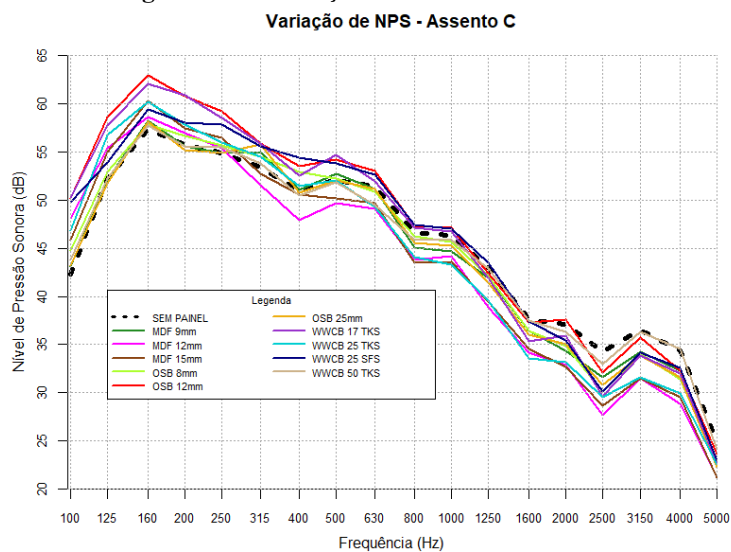
Para o assento *B* a variação do NPS em função da frequência é ilustrada na Figura 123.

**Figura 123– Variação do NPS no assento *B*.**

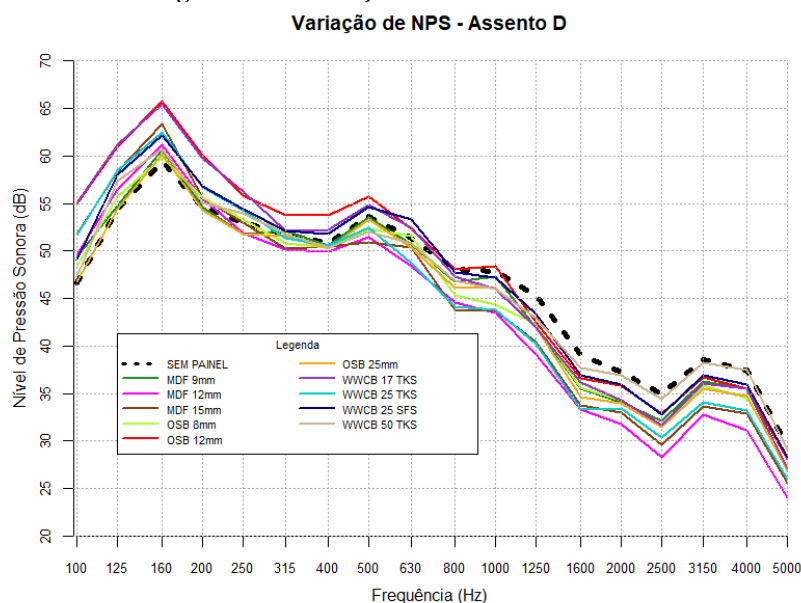


O assento *C* possui sua variação de NPS conforme descreve a Figura 124.

**Figura 124– Variação do NPS no assento *C*.**



No assento *D* a variação espectral do NPS é detalhada pela Figura 125.

**Figura 125– Variação do NPS no assento D.**

**Fonte: Autor (2020).**

Percebeu-se que quase a totalidade dos painéis diminui o NPS para as frequências superiores à 1000 Hz, com exceção do painel de 50,0 mm de espessura feito de palha grossa de madeira com cimento (WWCB – 50,0 mm TKS), que apresentou valores muito próximos aos valores da sala sem painéis para as frequências mais altas. Uma exceção também foi observada no assento A com a utilização do painel tipo MDF com espessura de 9,00 mm: o NPS foi superior ao valor medido com a sala vazia para o assento nas altas frequências. A absorção excessiva da energia sonora em altas frequências pode prejudicar a inteligibilidade de fala, conforme descrito por Amlani e Russo (2016).

#### 4.6 RESULTADOS MEDIDOS E SIMULADOS: TEMPO DE REVERBERAÇÃO E DEFINIÇÃO

##### 4.6.1 Análise dos Modos Acústicos nas Respostas aos Impulsos Medidas

Os resultados são referentes à sala de aula sem condicionamento acústico. Para o assento A, a resposta ao impulso é representada pela Figura 126.

**Figura 126– Resposta ao impulso no assento A na sala de aula sem condicionamento.**



Fonte: Autor (2020).

A análise realizada por meio do software REW (MULCAHY, 2017) é apresentada na Tabela 13.

**Tabela 13 – Cálculo dos modos acústicos para o assento A.**

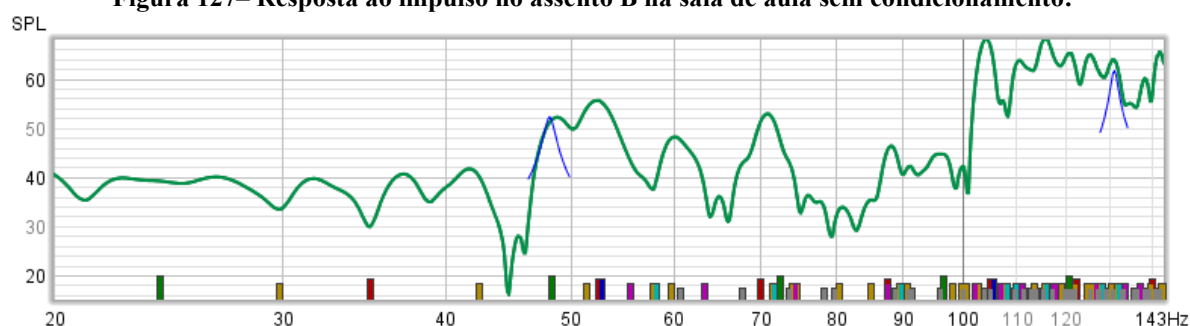
Valores observados na resposta ao impulso			Modos acústicos (Equação 15)			Frequência calculada (Equação 15)
Frequência (Hz)	Pico (dB)	$T_{60}$ (s)	"p"	"q"	"r"	
26,69	38,95	2,342	0	1	0	24,37
38,97	30,68	1,405	2	0	0	35,31
43,12	41,23	2,301	2	1	0	42,90
48,48	50,58	2,325	0	2	0	48,73
59,00	48,36	2,845	0	1	1	58,54
70,79	47,56	1,835	4	0	0	70,61
104,55	63,72	1,374	6	0	0	105,92
111,62	53,52	1,457	2	0	2	112,16
140,15	61,70	1,787	3	3	2	139,58

Fonte: Autor (2020).

Os valores  $p$ ,  $q$  e  $r$  foram estimados como os respectivos modos dos picos medidos na resposta ao impulso com o auxílio do software REW (MULCAHY, 2017).

Para o assento B foram identificados os modos exibidos na Figura 127.

**Figura 127– Resposta ao impulso no assento B na sala de aula sem condicionamento.**



Fonte: Autor (2020).

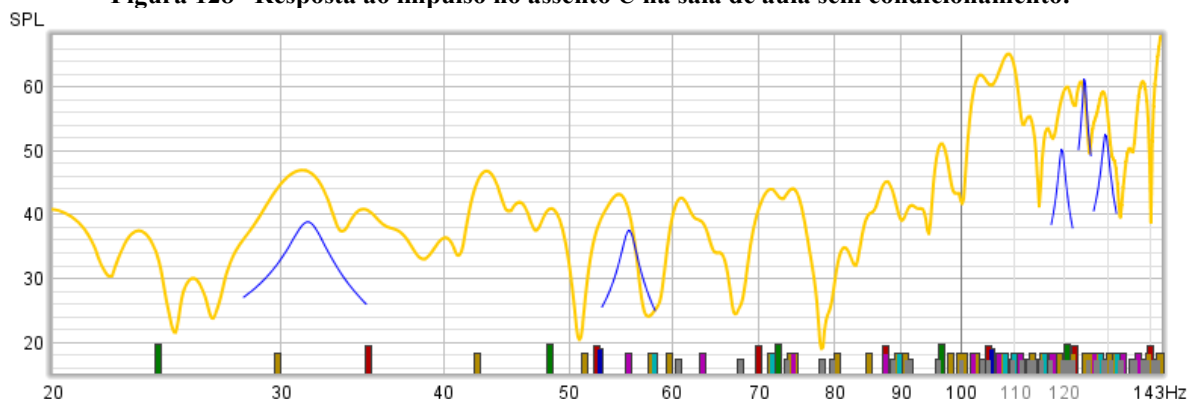
As frequências que resultaram em valores de tempo de reverberação superiores à 1,171 segundos são mostradas na Tabela 14.

**Tabela 14 – Cálculo dos modos acústicos para o assento B.**

Frequência (Hz)	Pico (dB)	T <sub>60</sub> (s)	Modos acústicos (Equação 15)			Frequência calculada (Equação 15)
			"p"	"q"	"r"	
48,17	52,24	2,447	0	2	0	48,73
130,99	61,66	1,284	1	3	2	130,34

Fonte: Autor (2020).

A Figura 128 exibe a resposta ao impulso obtida para o assento C.

**Figura 128– Resposta ao impulso no assento C na sala de aula sem condicionamento.**

Fonte: Autor (2020).

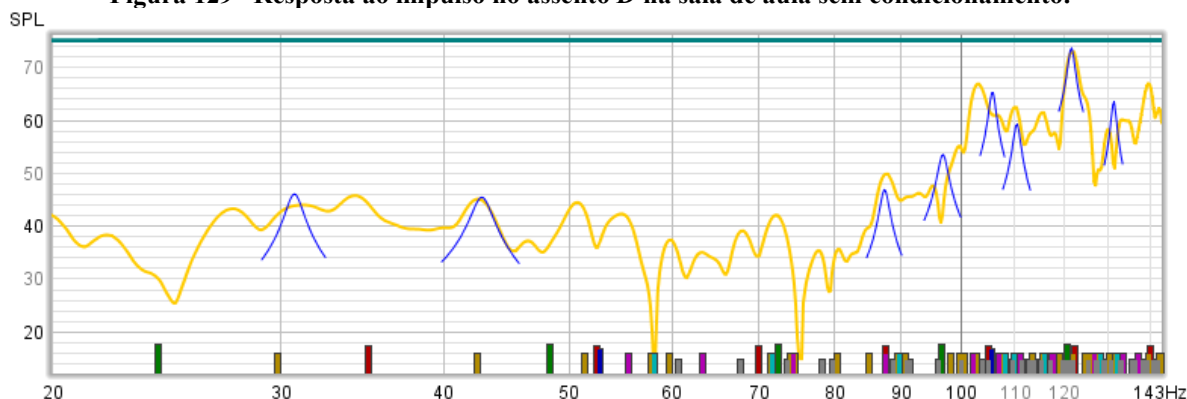
As ressonâncias com T<sub>60</sub> superior à 1,171 segundos constam na Tabela 15.

**Tabela 15 – Cálculo dos modos acústicos para o assento C.**

Frequência (Hz)	Pico (dB)	T <sub>60</sub> (s)	Modos acústicos (Equação 15)			Frequência calculada (Equação 15)
			"p"	"q"	"r"	
31,51	38,74	1,279	1	1	0	30,09
55,65	37,43	1,632	0	1	1	58,54
119,79	50,27	1,798	0	5	0	121,83
124,70	61,48	2,769	7	0	0	123,57
129,47	52,55	1,573	3	2	2	128,51

Fonte: Autor (2020).

Para o Assento D as ressonâncias podem ser observadas na Figura 129.

**Figura 129– Resposta ao impulso no assento D na sala de aula sem condicionamento.**

Fonte: Autor (2020).

A estimativa dos modos naturais é apresentada na Tabela 30.

**Tabela 16 – Cálculo dos modos acústicos para o assento D**

Valores observados na resposta ao impulso			Modos acústicos (Equação 15)			Frequência calculada
Frequência (Hz)	Pico (dB)	T <sub>60</sub> (s)	"p"	"q"	"r"	(Equação 15)
30,75	45,94	2,443	1	1	0	30,09
42,87	45,33	1,478	2	1	0	42,90
87,51	46,78	1,619	5	0	0	88,27
97,03	53,40	1,320	0	4	0	97,46
105,93	65,28	1,787	6	0	0	105,92
110,63	59,17	1,580	0	1	2	109,21
121,85	73,56	1,525	0	5	0	121,83
131,34	63,49	1,846	5	4	0	131,49

Fonte: Autor (2020).

As estimativas dos modos naturais revelaram que os modos axiais foram os que resultaram nos maiores valores de tempo de reverberação para os assentos *B* e *D*. Para os assentos *C* e *D* os maiores valores de T<sub>60</sub> foram identificados em modos tangenciais.

#### 4.6.2 Valores Obtidos para o Tempo de Reverberação

A Tabela 17 apresenta os valores medidos para o tempo de reverberação (T<sub>20</sub>) em cada condicionamento acústico realizado para algumas frequências. Os valores são referentes às médias espaciais das medições, ou seja, a média aritmética entre os valores obtidos para a 12 posições de microfone com a fonte nas posições *S1*, *S2* e *Professor*.

**Tabela 17 – Valores medidos do tempo de reverberação na sala de aula.**

Situação	Tempo de reverberação T <sub>20</sub> (s) por frequência						
	100 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Sem painéis	1,801	1,580	1,868	1,320	1,145	1,048	0,948
MDF - 9,00 mm	1,698	1,654	1,836	1,244	1,045	1,005	0,914
MDF - 12,0 mm	1,850	1,652	1,849	1,279	1,105	1,006	0,931
MDF - 15,0 mm	1,746	1,701	1,834	1,262	1,075	1,006	0,913
OSB - 8,00 mm	1,817	1,739	1,918	1,329	1,057	1,006	0,939
OSB - 12,0 mm	1,665	1,588	1,907	1,289	1,093	0,999	0,905
OSB - 25,0 mm	1,754	1,686	1,799	1,288	1,093	0,987	0,911
WWCB - 17,0 mm TKS	1,688	1,611	1,740	1,261	1,080	0,870	0,831
WWCB - 25,0 mm TKS	1,893	1,589	1,763	1,175	0,914	0,877	0,803
WWCB - 25,0 mm SFS	1,661	1,670	1,737	1,298	1,020	0,878	0,821
WWCB - 50,0 mm TKS	1,787	1,537	1,560	1,099	0,838	0,861	0,780

Fonte: Autor (2020).

As incertezas das medições estão representadas na Tabela 18.



**Tabela 18 – Incertezas de medições do TR.**

Situação	Incerteza de medição por frequência (Hz)						
	100 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Sem painéis	0,0980	0,0821	0,0631	0,0375	0,0247	0,0167	0,0112
MDF - 9,00 mm	0,0951	0,0840	0,0626	0,0364	0,0236	0,0164	0,0110
MDF - 12,0 mm	0,0993	0,0839	0,0628	0,0369	0,0243	0,0164	0,0111
MDF - 15,0 mm	0,0965	0,0852	0,0625	0,0367	0,0239	0,0164	0,0110
OSB - 8,00 mm	0,0984	0,0861	0,0640	0,0376	0,0237	0,0164	0,0112
OSB - 12,0 mm	0,0885	0,0804	0,0628	0,0358	0,0234	0,0158	0,0106
OSB - 25,0 mm	0,0917	0,0832	0,0603	0,0360	0,0234	0,0157	0,0107
WWCB - 17,0 mm TKS	0,0948	0,0829	0,0609	0,0367	0,0240	0,0152	0,0105
WWCB - 25,0 mm TKS	0,1005	0,0823	0,0613	0,0354	0,0221	0,0153	0,0103
WWCB - 25,0 mm SFS	0,0941	0,0844	0,0609	0,0372	0,0233	0,0153	0,0105
WWCB - 50,0 mm TKS	0,0976	0,0810	0,0577	0,0342	0,0211	0,0152	0,0102

Fonte: Autor (2020).

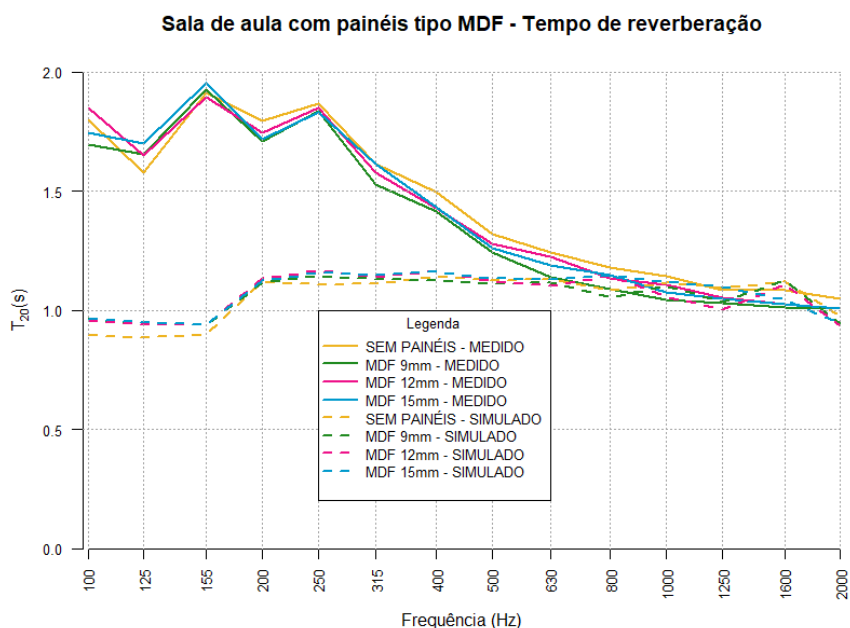
Para as mesmas configurações de receptores e fontes, os valores simulados podem ser encontrados na Tabela 19. A frequência máxima utilizada foi de 2000 Hz devido às limitações do tubo de impedância quanto aos comprimentos das ondas sonoras medidas. Conforme descrito na seção 3.4.2, os coeficientes de absorção adotados para as simulações foram calculados a partir das impedâncias medidas no tubo em questão.

**Tabela 19 – Valores simulados do tempo de reverberação na sala de aula.**

Situação	Tempo de reverberação $T_{20}$ (s)						
	100 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	1600 Hz	2000 Hz
Sem painéis	0,895	0,885	1,108	1,124	1,115	1,119	0,975
MDF - 9,00 mm	0,966	0,939	1,144	1,113	1,100	1,124	0,945
MDF - 12,0 mm	0,953	0,941	1,166	1,120	1,058	1,108	0,935
MDF - 15,0 mm	0,964	0,949	1,156	1,132	1,120	1,045	0,945
OSB - 8,00 mm	0,947	0,940	1,139	1,116	1,082	1,044	0,937
OSB - 12,0 mm	0,943	0,945	1,141	1,122	1,053	0,998	0,922
OSB - 25,0 mm	0,933	0,924	1,133	1,108	1,014	0,992	0,909
WWCB - 17,0 mm TKS	1,006	0,947	1,166	1,114	1,103	0,986	0,882
WWCB - 25,0 mm TKS	0,937	0,932	1,141	1,115	0,961	0,982	0,845
WWCB - 25,0 mm SFS	0,945	0,941	1,140	1,141	1,008	0,882	0,850
WWCB - 50,0 mm TKS	0,942	0,927	1,089	1,047	0,892	0,961	0,871

Fonte: Autor (2020).

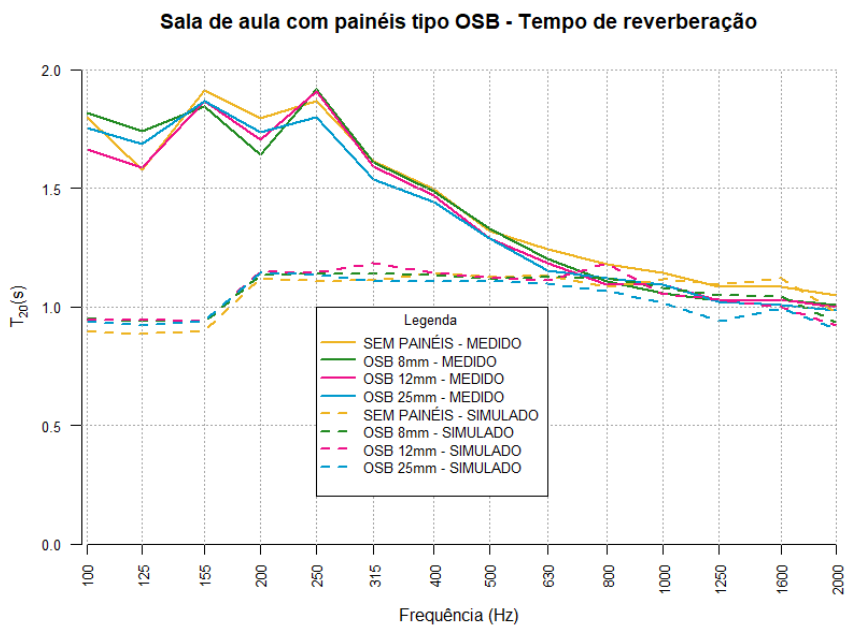
A Figura 130 mostra a comparação da sala de aula sem condicionamento acústico e condicionada com diferentes painéis do tipo MDF, com os valores medidos e simulados.

**Figura 130– Tempo de reverberação em cenários com MDF.**

**Fonte: Autor (2020).**

O tempo de reverberação (medido) não sofreu alterações significativa com a adição dos painéis do tipo MDF. Para as frequências de 100 a 200 Hz percebeu-se que a adição dos painéis, em suas 3 espessuras, piorou o tempo de reverberação.

As comparações referentes ao painel do tipo OSB são mostradas na Figura 131.

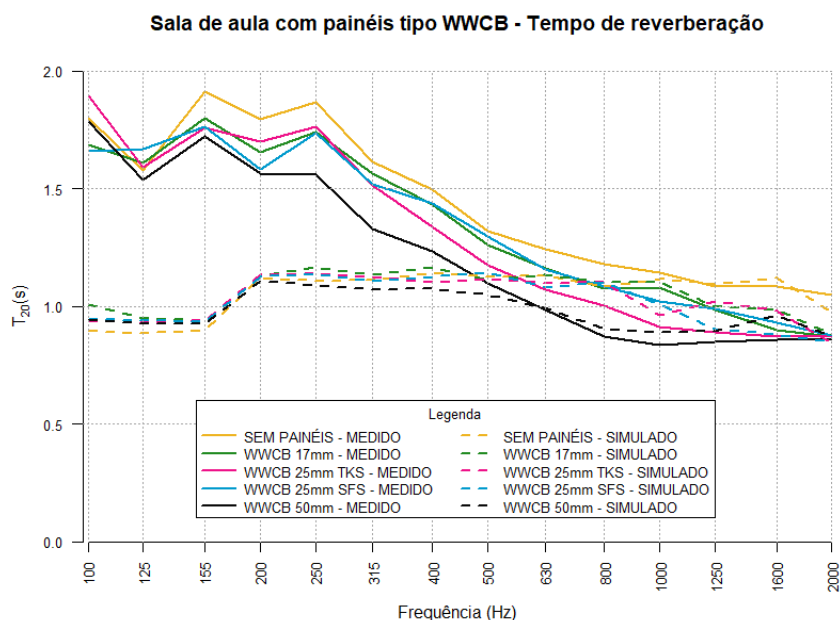
**Figura 131– Tempo de reverberação em cenários com OSB**

**Fonte: Autor (2020).**

Nas frequências de 125 a 500 Hz o condicionamento feito com o painel de 25,0 mm de espessura reduziu levemente o tempo de reverberação medido da sala de aula, tendo sido

aumentado pelos outros 2 painéis na frequência de 250 Hz. A partir de 500 Hz a inserção dos painéis, independentemente de suas espessuras, reduziu o tempo de reverberação da sala. A Figura 132 exibe as comparações entre os condicionamentos realizados com painéis do tipo WWCB.

**Figura 132– Tempo de reverberação em cenários com WWCB.**



**Fonte: Autor (2020).**

Os painéis de palha de cimento com madeira reduziram o tempo de reverberação medido da sala em quase todas as frequências, apresentando oscilações nas frequências até 140Hz, aproximadamente. O painel feito com palha grossa e espessura de 50,0mm apresentou o melhor desempenho na redução do tempo de reverberação da sala de aula.

A norma norte-americana ANSI/ASA S12.60 estabelece que para salas de aula cujo volume seja igual ou inferior à 283,0 m<sup>3</sup>, o tempo de reverberação deve ser inferior à 0,60 segundos nas frequências de 500, 1000 e 5000 Hz. Percebeu-se que a sala de aula em análise não atingiu aos requisitos na norma norte-americana, mesmo com os condicionamentos acústicos feitos pelos diferentes painéis de madeira.

As diferenças em baixas frequências também se devem ao fato da presunção da reação local dos painéis inseridos. Isto foi realizado no momento que os coeficientes de absorção inseridos no modelo foram calculados a partir das medições do tubo de impedância. Na prática, superfícies com reação local são mais a exceção do que a regra. Elas são encontradas em situações onde o material atrás da superfície que recebe a onda sonora não consegue propagar esta onda em uma direção paralela à superfície (KUTTRUFF, 2017), por exemplo em

condicionamentos feitos com painel do tipo colméia ou paredes massivas de concreto (COX e D'ANTONIO, 2017).

#### 4.6.3 Análise Estatística entre Valores Medidos e Simulados para o Tempo de Reverberação

As comparações estatísticas entre os valores medidos e simulados para os tempos de reverberações entre os condicionamentos acústicos realizados com painéis na vertical podem se verificadas no Apêndice L. Para estas comparações, além das posições de fontes sonoras *S1* e *S2* e suas respectivas posições de microfones, foi considerada a fonte sonora posicionada acima da mesa do professor e receptores nos assentos *A*, *B*, *C* e *D*, totalizando 4 receptores para 3 posições de fontes sonoras.

Os valores medidos e simulados para a frequência de 500 Hz se mostraram estatisticamente diferentes entre as três posições de fontes sonoras, conforme o Quadro 27. Apenas os condicionamentos realizados com os painéis de palha grossa de madeira com cimento, nas espessuras de 17,0 e 50,0 mm, mostraram similaridade estatística entre os valores medidos e simulados para as diferentes posições de fontes sonoras. Os valores encontrados para a fonte sonora posicionada acima da mesa do professor divergiram em 5 das 10 diferentes soluções de condicionamento acústico. Para as fontes *S1* e *S2* as divergências foram encontradas em 4 e 3 cenários, respectivamente

**Quadro 27 – Semelhança entre valores medidos e simulados quanto ao  $T_{20}$  em 500 Hz.**

Condicionamento acústico	Posição de fonte sonora
Sem painéis	Sem diferenças
MDF - 9,00 mm	Professor e S2
MDF - 12,0 mm	S1
MDF - 15,0 mm	Professor
OSB - 8,00 mm	Professor e S1
OSB - 12,0 mm	Professor e S2
OSB - 25,0 mm	S1 e S2
WWCB - 17,0 mm TKS	Sem diferenças
WWCB - 25,0 mm TKS	S1
WWCB - 25,0 mm SFS	Professor
WWCB - 50,0 mm TKS	Sem diferenças

**Fonte: Autor (2020).**

Para a frequência de 1000 Hz foi verificada similaridade estatística entre os valores obtidos para quase todas as situações de condicionamento, tendo como exceção os condicionamentos realizados com painéis do tipo MDF nas espessuras de 9,00 e 15,0 mm, que

destoaram quanto aos valores resultantes da fonte sonora posicionada acima da mesa do professor, como mostra o Quadro 28.

**Quadro 28 – Semelhança entre valores medidos e simulados quanto ao  $T_{20}$  em 1000 Hz.**

Condicionamento acústico	Posição de fonte sonora
Sem painéis	Sem diferenças
MDF - 9,00 mm	Professor
MDF - 12,0 mm	Sem diferenças
MDF - 15,0 mm	Professor
OSB - 8,00 mm	Sem diferenças
OSB - 12,0 mm	Sem diferenças
OSB - 25,0 mm	Sem diferenças
WWCB - 17,0 mm TKS	Sem diferenças
WWCB - 25,0 mm TKS	Sem diferenças
WWCB - 25,0 mm SFS	Sem diferenças
WWCB - 50,0 mm TKS	Sem diferenças

Fonte: Autor (2020).

Na frequência de 2000 Hz foram observadas 5 diferenças estatísticas para os valores obtidos com a fonte sonora posicionada acima da mesa do professor; 1 diferença para a fonte *S1* e 2 diferenças para a fonte *S2*. As divergências são elencadas no Quadro 29.

**Quadro 29 – Semelhança entre valores medidos e simulados quanto ao  $T_{20}$  em 2000 Hz.**

Condicionamento acústico	Posição de fonte sonora
Sem painéis	Sem diferenças
MDF - 9,00 mm	Professor e S2
MDF - 12,0 mm	Sem diferenças
MDF - 15,0 mm	Professor
OSB - 8,00 mm	Professor e S2
OSB - 12,0 mm	S1
OSB - 25,0 mm	Professor
WWCB - 17,0 mm TKS	Sem diferenças
WWCB - 25,0 mm TKS	Professor
WWCB - 25,0 mm SFS	Sem diferenças
WWCB - 50,0 mm TKS	Sem diferenças

Fonte: Autor (2020).

Nota-se, com um grau de confiança de 95,0%, que os valores de  $T_{20}$  simulados e medidos para os condicionamentos acústicos realizados com os compósitos de 17,0 mm e 50,0 mm (palha de madeira com cimento) possuem semelhança estatística para as frequências de 500, 1000 e 2000 Hz. Os outros cenários apresentaram diferenças estatísticas entre os valores medidos e simulados para um, duas ou todas as frequências analisadas.

Nenhuma situação de condicionamento acústico apresentou diferença estatística para as três posições de fonte ao mesmo tempo no que tange a comparação entre os resultados medidos e simulados. Logo, assumiu-se que o modelo utilizado para a simulação computacional pode ser utilizado para predição de valores de tempo de reverberação. O tempo de reverberação em ambiente fechados não é tão variável com a distância quanto os parâmetros que medem a inteligibilidade, como a definição ou o STI. A distância do receptor em relação à fonte sonora é determinante para a Definição, conforme a Equação 27.

#### 4.6.4 Valores Obtidos para a Definição

Segundo a norma ABNT NBR ISO 3382-1:2017 a determinação de um número único para a Definição consiste na média aritmética dos valores obtidos para as frequências de 500 a 1000 Hz em bandas de 1/3 de oitava. A Tabela 20 apresenta os valores obtidos nas medições para cada cenário de condicionamento acústico realizado.

**Tabela 20 – Valores medidos para Definição em diferentes cenários.**

Tipo de condicionamento	Assentos - valores medidos para $D_{50}$ (%)			
	A	B	C	D
Sem painéis	51,63	32,75	42,57	40,19
MDF - 9,00 mm	52,49	39,38	46,83	38,96
MDF - 12,0 mm	43,55	40,68	48,11	39,72
MDF - 15,0 mm	47,36	37,37	35,50	43,55
OSB - 8,00 mm	47,00	44,16	48,45	31,40
OSB - 12,0 mm	51,99	32,88	45,14	38,24
OSB - 25,0 mm	53,77	35,88	47,67	41,78
WWCB - 17,0 mm TKS	51,67	45,66	39,45	49,26
WWCB - 25,0 mm TKS	51,52	38,87	58,68	44,09
WWCB - 25,0 mm SFS	53,84	47,04	42,87	37,99
WWCB - 50,0 mm TKS	59,69	57,27	43,37	55,39

Fonte: Autor (2020).

Para a Definição ( $D_{50}$ ) a norma ABNT NBR ISO 3382-1:2017 traz como referência o valor de 5,00% para a Diferença Mínima Perceptível, em pontos percentuais. Os valores medidos para os diferentes cenários quando comparados com o cenário sem condicionamento acústico apresentaram as Diferenças Mínimas Perceptíveis do Quadro 30.

**Quadro 30 – Alterações observadas entre diferentes cenários quanto à Definição considerando JND.**

Tipo de condicionamento	Assentos - Diferenças Mínimas Perceptíveis em relação ao cenário sem condicionamento – Definição			
	A	B	C	D
MDF - 9,00 mm	Sem alteração	Melhora	Sem alteração	Sem alteração
MDF - 12,0 mm	Piora	Melhora	Melhora	Sem alteração
MDF - 15,0 mm	Sem alteração	Sem alteração	Piora	Sem alteração
OSB - 8,00 mm	Sem alteração	Melhora	Melhora	Piora
OSB - 12,0 mm	Sem alteração	Sem alteração	Sem alteração	Sem alteração
OSB - 25,0 mm	Sem alteração	Sem alteração	Melhora	Sem alteração
WWCB - 17,0 mm TKS	Sem alteração	Melhora	Sem alteração	Melhora
WWCB - 25,0 mm TKS	Sem alteração	Melhora	Melhora	Sem alteração
WWCB - 25,0 mm SFS	Sem alteração	Melhora	Sem alteração	Sem alteração
WWCB - 50,0 mm TKS	Melhora	Melhora	Sem alteração	Melhora

Fonte: Autor (2020).

Os dados para os valores simulados constam na Tabela 21.

**Tabela 21 – Valores simulados para Definição em diferentes cenários**

Tipo de condicionamento	Assentos - valores simulados para $D_{50}$ (%)			
	A	B	C	D
Sem painéis	50,08	42,65	38,08	36,43
MDF - 9,00 mm	49,08	42,59	40,26	35,38
MDF - 12,0 mm	48,40	42,97	36,42	35,86
MDF - 15,0 mm	50,73	41,60	38,77	37,71
OSB - 8,00 mm	50,45	43,81	39,51	37,15
OSB - 12,0 mm	50,38	45,17	38,90	35,33
OSB - 25,0 mm	50,18	43,83	40,11	38,90
WWCB - 17,0 mm TKS	49,75	43,49	39,74	37,54
WWCB - 25,0 mm TKS	49,80	44,40	39,40	37,04
WWCB - 25,0 mm SFS	50,70	46,33	41,38	37,85
WWCB - 50,0 mm TKS	50,68	45,78	43,62	39,60

Fonte: Autor (2020).

Para valores simulados em relação à situação sem condicionamento acústico, o único cenário que apresentou uma diferença perceptível foi cenário com painéis de palha grossa de madeira com cimento na espessura de 50,0 mm no assento C. O valor observado se trata de uma melhora perceptível. O desvios-padrões entre os valores medidos e simulados se encontram na Tabela 22.

**Tabela 22 – Desvios-padrões entre valores medidos e simulados**

Tipo de condicionamento	Desvio padrão entre valores medidos e simulados por assento			
	A	B	C	D
Sem painéis	1,10	7,00	3,18	2,66
MDF - 9,00 mm	2,41	2,27	4,64	2,54
MDF - 12,0 mm	3,43	1,62	8,26	2,73
MDF - 15,0 mm	2,38	2,99	2,31	4,13
OSB - 8,00 mm	2,44	0,25	6,32	4,06
OSB - 12,0 mm	1,14	8,69	4,41	2,06
OSB - 25,0 mm	2,54	5,62	5,35	2,03
WWCB - 17,0 mm TKS	1,36	1,53	0,20	8,29
WWCB - 25,0 mm TKS	1,22	3,91	13,63	4,98
WWCB - 25,0 mm SFS	2,22	0,50	1,05	0,10
WWCB - 50,0 mm TKS	6,37	8,12	0,17	11,16

Fonte: Autor (2020).

#### 4.6.5 Análises entre os Valores Medidos e Simulados pelas Diferenças Mínimas Perceptíveis

As análises das semelhanças entre os valores medidos e simulados considerando a Diferença Mínima Perceptível (diferença entre os valores de  $\pm 5,00\%$ ) são apresentadas no Quadro 31.

**Quadro 31 – Semelhança entre valores medidos e simulados de Definição considerando JND.**

Tipo de condicionamento	Assentos – Similaridade entre valores medidos e simulados considerando JND			
	A	B	C	D
Sem painéis	Semelhante	Diferente	Semelhante	Semelhante
MDF - 9,00 mm	Semelhante	Semelhante	Diferente	Semelhante
MDF - 12,0 mm	Semelhante	Semelhante	Diferente	Semelhante
MDF - 15,0 mm	Semelhante	Semelhante	Semelhante	Diferente
OSB - 8,00 mm	Semelhante	Semelhante	Diferente	Diferente
OSB - 12,0 mm	Semelhante	Diferente	Diferente	Semelhante
OSB - 25,0 mm	Semelhante	Diferente	Diferente	Semelhante
WWCB - 17,0 mm TKS	Semelhante	Semelhante	Semelhante	Diferente
WWCB - 25,0 mm TKS	Semelhante	Diferente	Diferente	Diferente
WWCB - 25,0 mm SFS	Semelhante	Semelhante	Semelhante	Semelhante
WWCB - 50,0 mm TKS	Diferente	Diferente	Semelhante	Diferente

Fonte: Autor (2020).

A simulação computacional apresentou valores semelhantes aos medidos em 27 dos 44 pontos analisados. Para os 17 pontos onde houve diferença perceptível, observou-se o seguinte:

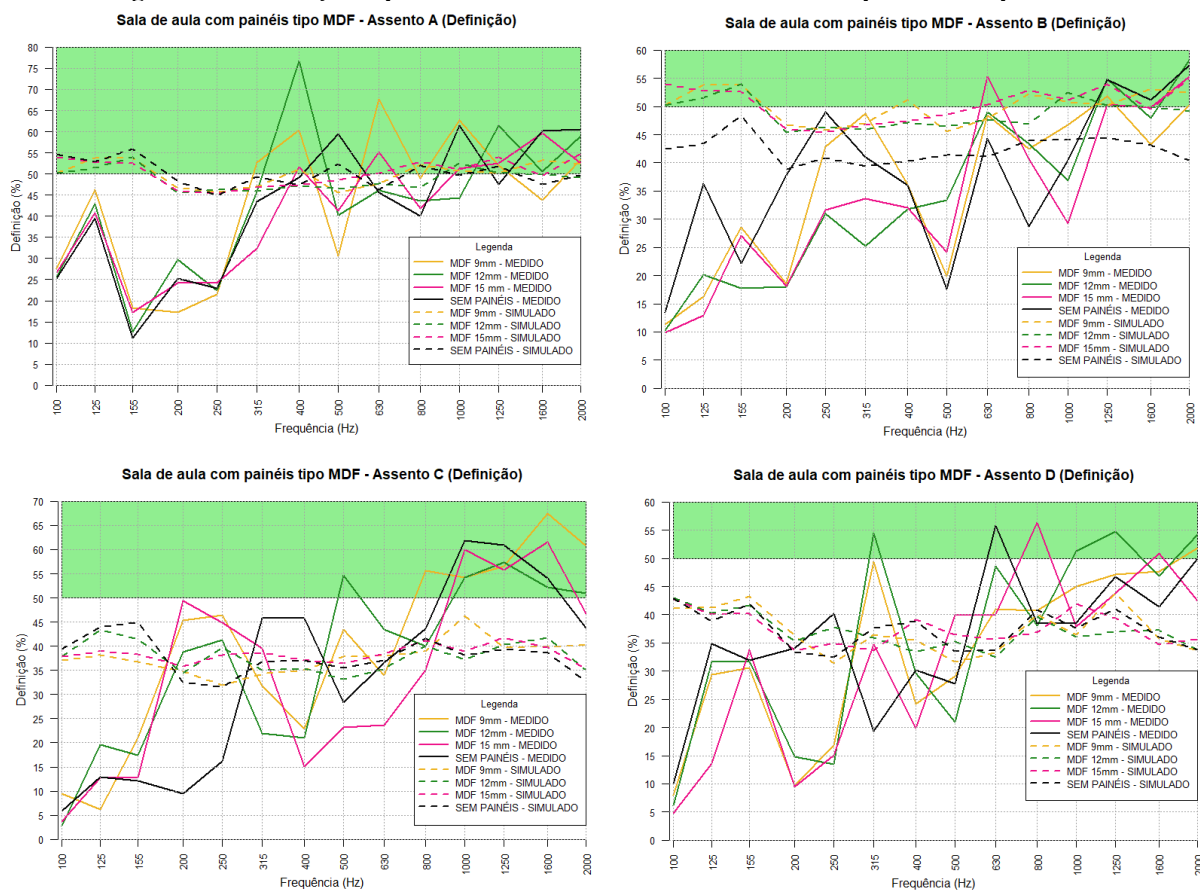
- Nas diferenças encontradas para o assento *B*, observou-se que os valores simulados se mostraram superestimados, ou seja, acima dos valores medidos de modo perceptível. Uma exceção ocorreu para o condicionamento com painéis do tipo WWCB – 50 mm, onde o valor simulado subestimou o valor medido;
- Na diferença perceptível do assento *D* para o condicionamento realizado com painéis de 8,00mm o valor simulado foi superestimado; e



- Todas as outras diferenças perceptíveis entre os valores medidos e simulados são referentes à submestimação dos valores simulados em relação aos medidos.

Considerando os tratamentos com painéis do tipo MDF, nas espessuras de 9,00, 12,0 e 15,0 mm, os comportamentos por frequências da Definição podem ser observados na Figura 133.

**Figura 133– Variação espectral em cada assento nos cenários com painéis do tipo MDF.**



Fonte: Autor (2020).

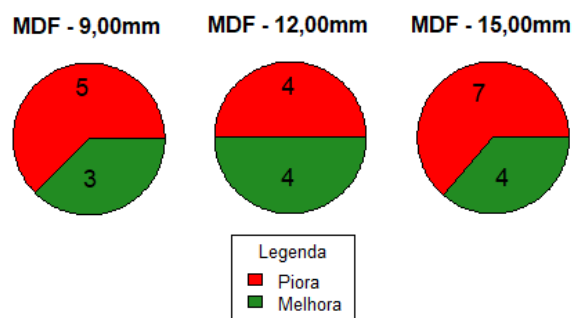
Para o assento *D*, comparando os cenários sem condicionamento e condicionado com painéis do tipo MDF para valores medidos de Definição é possível verificar melhoras perceptíveis com valores acima de 50% nas seguintes frequências:

- 800 e 1600 Hz para o condicionamento realizado painéis de 15,0 mm;
- 315, 1000 e 1250 Hz para o condicionamento com painéis de 12,0 mm; e
- não foi verificada melhora perceptível com o painel de 9,00 mm.

As quantidades totais de diferenças perceptíveis, incluindo as piores (redução maior ou igual à 5,00% da Definição sem condicionamento acústico), são apresentadas na Figura 134

**Figura 134– Diferenças mínimas perceptíveis no assento D para cenários com MDF.**

**Diferenças perceptíveis com painéis do tipo MDF - Assento D**



Fonte: Autor (2020).

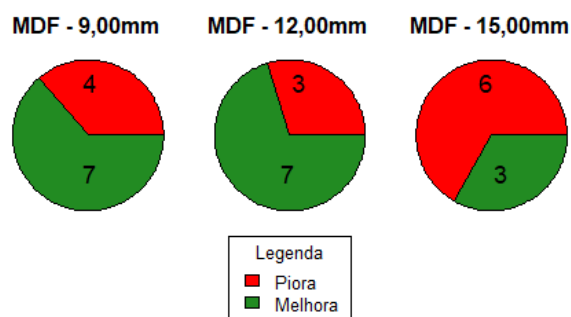
Para o assento C, as melhoras perceptíveis com valores superiores à 50% foram verificadas nas frequências de:

- 1600 Hz para o condicionamento realizado com painéis de 15,0 mm;
- 2000 Hz para o condicionamento com painéis de 12,0 mm; e
- 800, 1600 e 2000 Hz no condicionamento realizado com painéis de 9,00 mm.

As diferenças perceptíveis totalizadas são apresentadas na Figura 135 para o assento C:

**Figura 135– Diferenças mínimas perceptíveis no assento C para cenários com MDF**

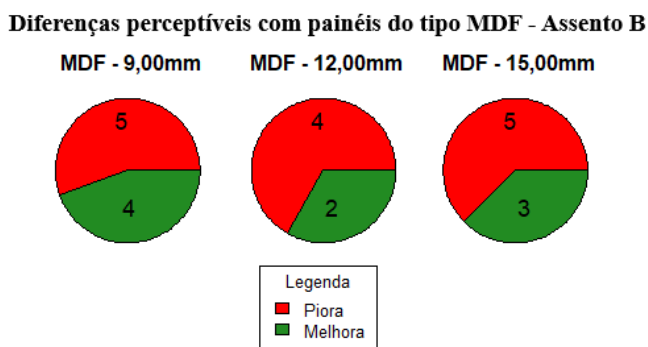
**Diferenças perceptíveis com painéis do tipo MDF - Assento C**



Fonte: Autor (2020).

Uma melhora perceptível com valor superior à 50% para no assento B foi identificada em 630 Hz com os painéis de 15,0 mm de espessura. As quantidades totais de diferenças perceptíveis para o assento B são apresentadas na Figura 136 considerando o condicionamento com painéis do tipo MDF.

**Figura 136– Diferenças mínimas perceptíveis no assento B para cenários com MDF.**



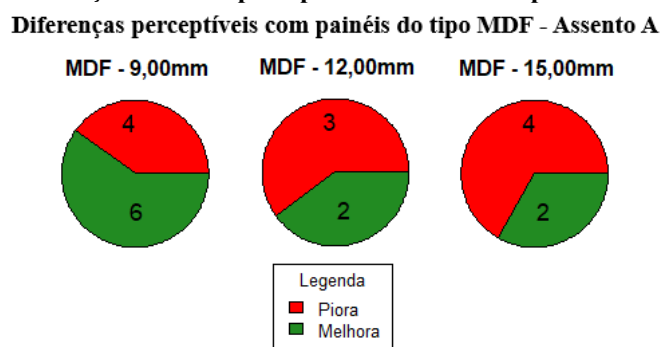
**Fonte: Autor (2020).**

O assento *A*, localizado antes da distância crítica para as três situações de condicionamento com painéis do tipo MDF, apresentou os seguintes valores de definição com melhoras perceptíveis para a faixa acima de 50%:

- Na frequência de 630 Hz com os painéis de 15,0 mm de espessura;
- Nas frequências de 400 e 1250 Hz com os painéis de 12,0 mm de espessura; e
- Nas frequências de 400 e 630 Hz com os painéis de 9,00 mm de espessura.

A quantidade total de diferenças perceptíveis para o assento *A* com os condicionamentos realizados por painéis do tipo MDF são exibidas na Figura 137.

**Figura 137– Diferenças mínimas perceptíveis no assento A para cenários com MDF.**



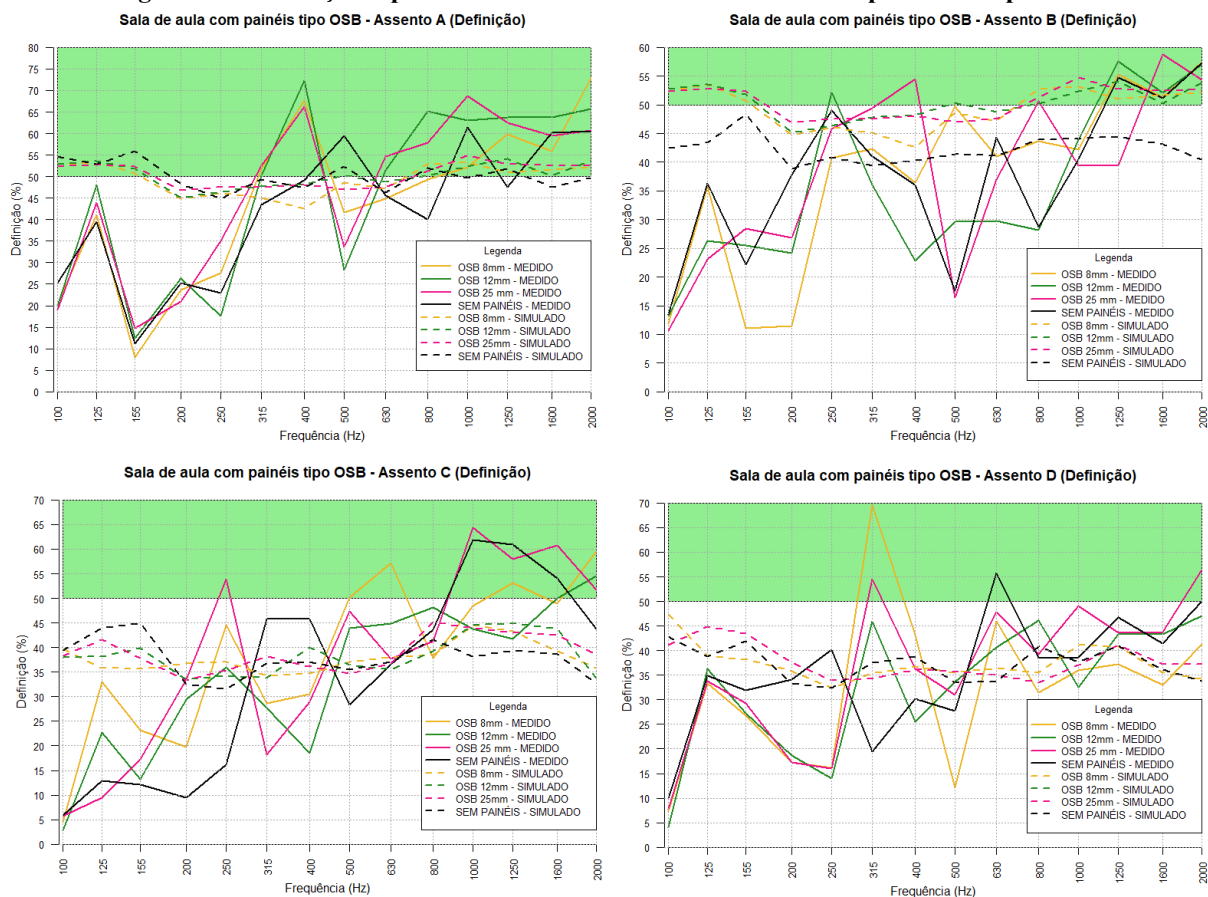
**Fonte: Autor (2020).**

O condicionamento acústico realizado com os painéis de 15,0 mm totalizou 18 pioras perceptíveis da Definição nos assentos *B*, *C* e *D*, enquanto os painéis de 12,0 mm levaram à 11 pioras. Os painéis de 9,00 mm conduziram à 14 pioras perceptíveis.

Quanto às melhoras perceptíveis, os valores observados foram em 10, 13 e 14 situações para os painéis de 15,0, 12,0 e 9,00 mm de espessura, respectivamente. Percebe-se, portanto, que o painel de maior espessura foi que apresentou a maior quantidade de pioras perceptíveis e a menor quantidade de melhoras perceptíveis quanto à Definição.

As variações espectrais dos valores de Definição para os cenários de condicionamentos realizados com painéis do tipo OSB são apresentadas na Figura 138.

**Figura 138– Variação espectral em cada assento nos cenários com painéis do tipo OSB.**



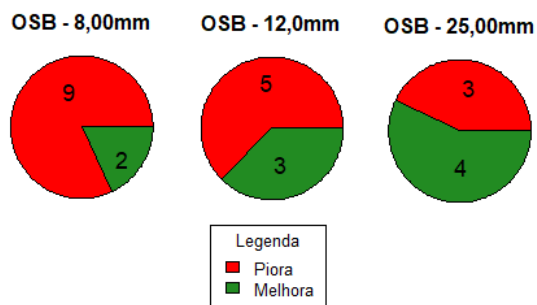
Fonte: Autor (2020).

Comparando os cenários sem condicionamento e condicionado com painéis do tipo OSB para o assento *D*, verificaram-se melhoras perceptíveis com valores acima de 50% nas seguintes frequências:

- 315 e 2000 Hz para o condicionamento realizado com painéis de espessura igual à 25,0 mm;
- Sem melhoras para o condicionamento com painéis de 12,0 mm; e
- 315 Hz no condicionamento realizado com painéis de 8,00 mm.

As piores e melhoras perceptíveis totais são apresentadas na Figura 139.

**Figura 139– Diferenças mínimas perceptíveis no assento D para cenários com OSB.**  
**Diferenças perceptíveis com painéis do tipo OSB - Assento D**



Fonte: Autor (2020).

Para o assento *C*, as melhoras perceptíveis com valores superiores à 50% obtidas com as inserções dos painéis do tipo OSB foram verificadas nas frequências de:

- 250, 1600 e 2000 Hz com a inserção de painéis com 25,0 mm de espessura;
- 2000 Hz com painéis de 12,0mm de espessura; e
- 500, 630 e 2000 Hz com painéis de 8,0 0mm.

As quantidades totais de diferenças perceptíveis são apresentadas na Figura 140.

**Figura 140– Diferenças mínimas perceptíveis no assento C para cenários com OSB.**  
**Diferenças perceptíveis com painéis do tipo OSB - Assento C**

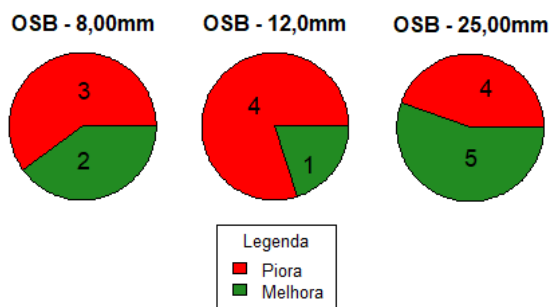


Fonte: Autor (2020).

No assento *B* apenas foram verificadas melhoras perceptíveis acima de 50% com a inserção de painéis com 25,0mm de espessura, sendo estas à 400 e 800 Hz. A Figura 141 mostra as quantidades totais de diferenças perceptíveis para o cenário com painéis o tipo OSB no assento *B*.

**Figura 141– Diferenças mínimas perceptíveis no assento B para cenários com OSB.**

**Diferenças perceptíveis com painéis do tipo OSB Assento B**



Fonte: Autor (2020).

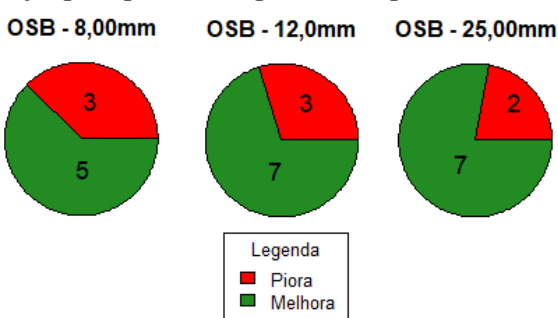
Localizado antes da distância crítica para as três situações de condicionamento com painéis do tipo OSB, o assento A apresentou valores de definição com melhoras perceptíveis na faixa acima de 50% para as seguintes frequências:

- 315, 400, 630, 800, 1000 e 1250 Hz para o condicionamento com painéis de 25,0 mm de espessura;
- 315, 400, 630, 800, 1250 e 2000 Hz para o condicionamento com painéis de 12,0 mm; e
- 315, 400, 1250 e 2000 Hz para o condicionamento com painéis de 8,00 mm.

As diferenças perceptíveis para o assento A são quantificadas na Figura 142.

**Figura 142– Diferenças mínimas perceptíveis no assento A para cenários com OSB.**

**Diferenças perceptíveis com painéis do tipo OSB - Assento A**



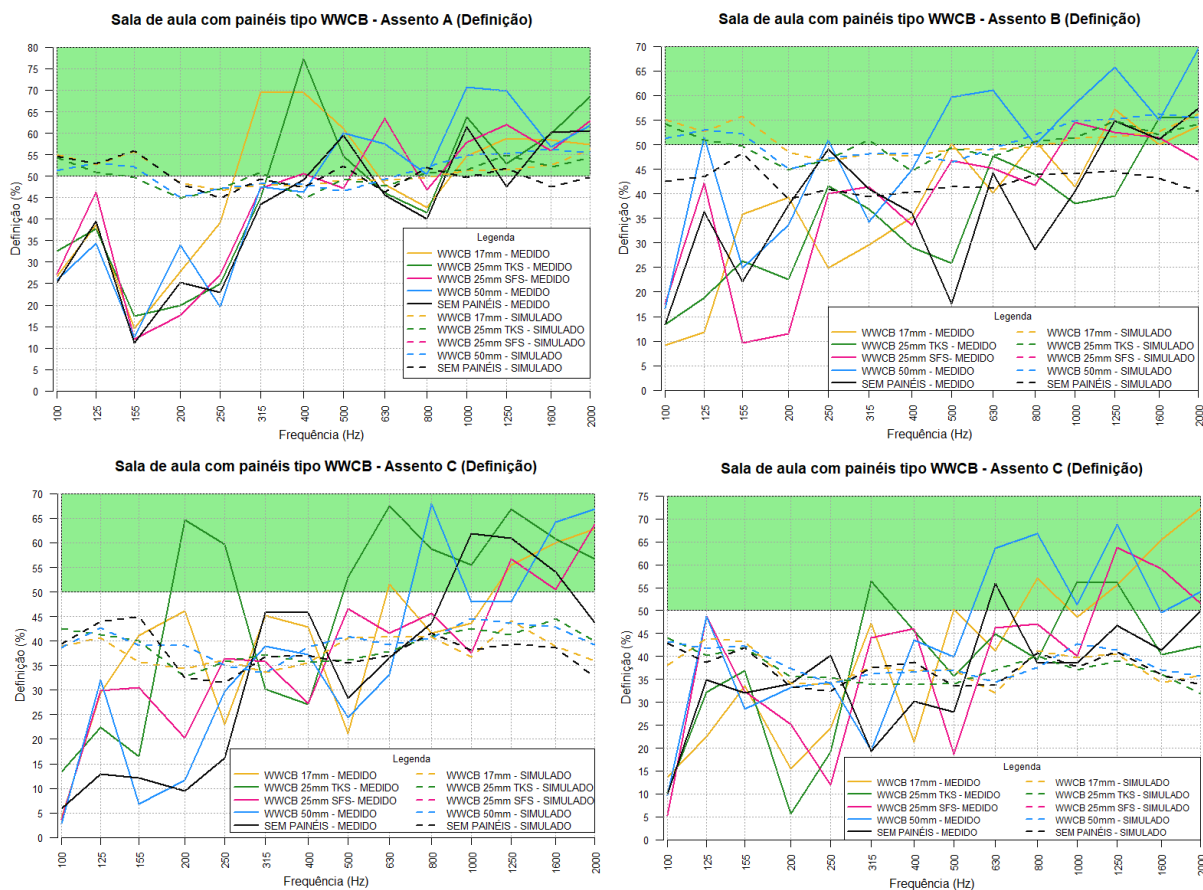
Fonte: Autor (2020).

Para os assentos *B*, *C* e *D*, os condicionamentos acústicos realizados com painéis do tipo OSB levaram à 15, 10 e 11 melhoras perceptíveis em ordem decrescente de espessuras utilizadas (25,0, 12,0 e 9,00 mm). Em termos de pioras perceptíveis os valores foram de 9, 13 e 18, na mesma ordem de espessuras.

Diferentemente dos condicionamentos realizados com painéis do tipo MDF, os condicionamentos acústicos feitos com painéis do tipo OSB revelaram a maior quantidade de melhoras e a menor quantidades de pioras perceptíveis para o painel de maior espessura do

grupo (25,0mm). O painel de 8,00m de espessura levou a uma quantidade de pioras perceptíveis superior aos outros, principalmente no assento *D*. Para o grupo de painéis de palha de madeira com cimento, as distribuições espectrais dos valores de Definição podem ser verificadas na Figura 143.

**Figura 143– Variação espectral em cada assento nos cenários com painéis do tipo WWCB.**



Fonte: Autor (2020).

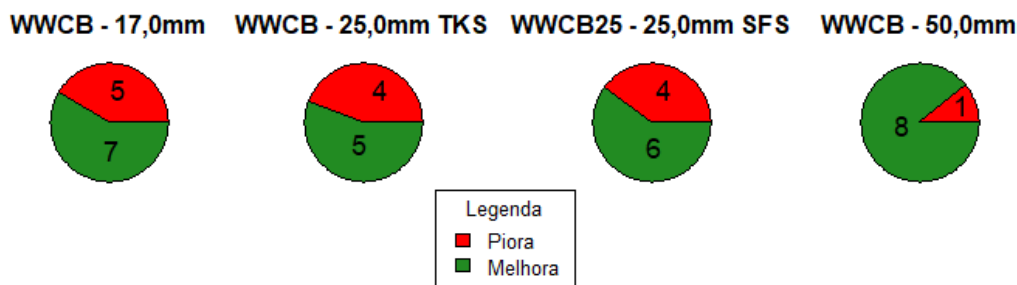
No assento *D* as melhoras perceptíveis com valores superiores à 50% obtidas com as inserções dos painéis do tipo WWCB foram identificadas nas frequências de:

- 630, 800, 1000, 1250 Hz para o condicionamento realizado com painéis de palha grossa de madeira, com espessura de 50,0 mm (WWCB – 50,0 mm);
- 1250 e 1600 Hz com a inserção de painéis de palha superfina de madeira com cimento na espessura de 25,0mm (WWCB – 25,0 mm SFS);
- 315, 1000 e 1250Hz com painéis de palha grossa de madeira com cimento, espessura de 25,0mm (WWCB – 25,0 mm TKS);
- 500, 800, 1250, 1600 e 2000 Hz para o condicionamento realizado com painéis de 17,0 mm de espessura feitos de palha grossa de madeira com cimento (WWCB – 17,0 mm).

As quantidades de diferenças perceptíveis para o assento *D* constam na Figura 144.

**Figura 144– Diferenças mínimas perceptíveis no assento *D* para cenários com WWCB.**

**Diferenças perceptíveis com painéis do tipo WWCB - Assento *D***



Fonte: Autor (2020).

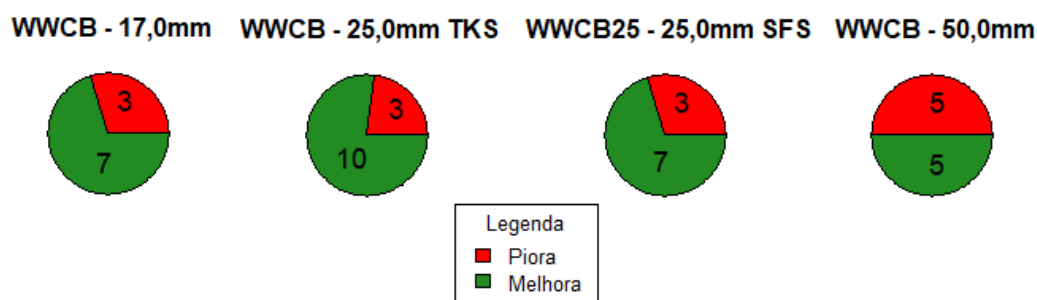
Para o assento *C* as melhoras perceptíveis com valores superiores à 50% obtidas com as inserções dos painéis do tipo WWCB foram verificadas nas frequências de:

- 800, 1600 e 2000 Hz com a inserção de painéis de palha grossa de madeira, com espessura de 50,0 mm (WWCB – 50,0 mm);
- 2000Hz no condicionamento acústico realizado com painéis de palha superfina de madeira com cimento na espessura de 25,0 mm (WWCB – 25,0 mm SFS);
- 200, 250, 500, 630, 800, 1250 e 1600 Hz com painéis de palha grossa de madeira com cimento, espessura de 25,0 mm (WWCB – 25,0 mm TKS);
- 630, 1600 e 2000 Hz para o condicionamento realizado com painéis de 17,0mm de espessura feitos de palha grossa de madeira com cimento (WWCB – 17,0 mm).

A apresentação das quantidades totais de diferenças perceptíveis para o assento *C* é feita pela Figura 145.

**Figura 145– Diferenças mínimas perceptíveis no assento *C* para cenários com WWCB.**

**Diferenças perceptíveis com painéis do tipo WWCB - Assento *C***



Fonte: Autor (2020).

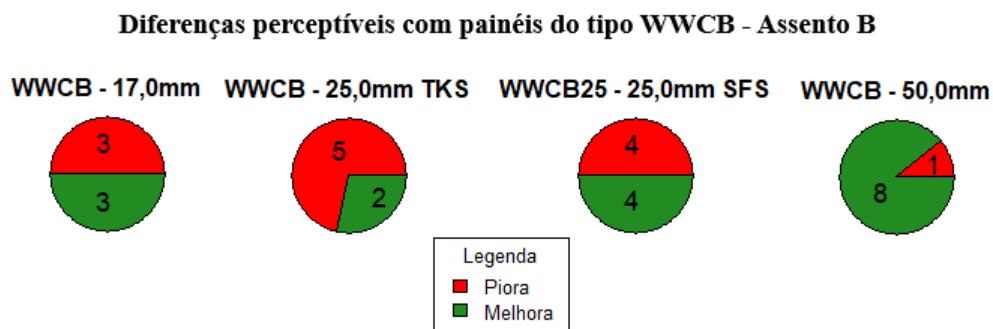
As melhoras perceptíveis para o assento *B* com valores superiores à 50% obtidas com as inserções dos painéis do tipo WWCB existem nas seguintes frequências:



- 125, 500, 630, 1000, 1250 e 2000 Hz no condicionamento acústico realizado com painéis de palha grossa de madeira, com espessura de 50,0 mm (WWCB – 50,0 mm);
- 1000 Hz com painéis de palha superfina de madeira com cimento na espessura de 25,0 mm (WWCB – 25,0 mm SFS);
- Não foram observadas melhoras perceptíveis (com valor maior ou igual à 50%) no condicionamento por painéis de palha grossa de madeira com cimento, espessura de 25,0mm (WWCB – 25,0 mm TKS); e
- 500 e 800 Hz para o condicionamento realizado com painéis de 17,0mm de espessura feitos de palha grossa de madeira com cimento (WWCB – 17,0 mm).

As diferenças perceptíveis encontram-se totalizadas na Figura 146.

**Figura 146– Diferenças mínimas perceptíveis no assento B para cenários com WWCB.**



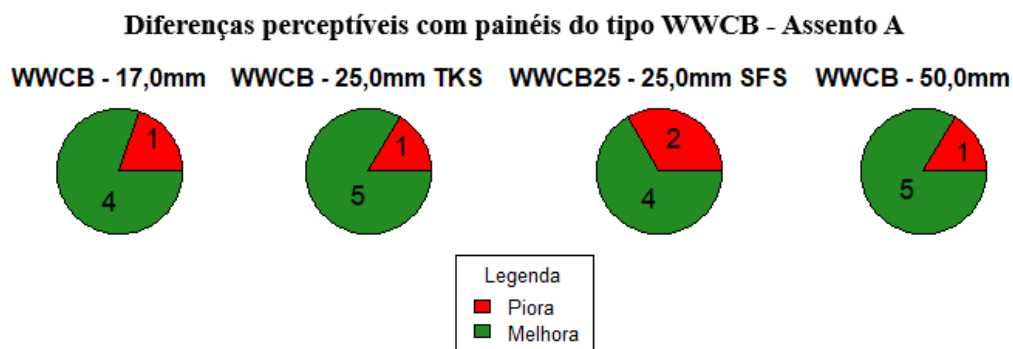
**Fonte: Autor (2020).**

As melhoras perceptíveis para o assento *A*, considerando a faixa de valores de Definição superior à 50,0%, apresentaram-se nas seguintes frequências:

- 630, 800, 1000 e 1250 Hz com a inserção de painéis de palha grossa de madeira, com espessura de 50,0 mm (WWCB – 50,0 mm);
- 630 e 1250 Hz no condicionamento acústico realizado com painéis de palha superfina de madeira com cimento na espessura de 25,0 mm (WWCB – 25,0 mm SFS);
- 400, 1250 e 2000 Hz com painéis de palha grossa de madeira com cimento, espessura de 25,0 mm (WWCB – 25,0 mm TKS); e
- 315, 400 e 1250 Hz para o condicionamento realizado com painéis de 17,0 mm de espessura feitos de palha grossa de madeira com cimento (WWCB – 17,0 mm).

A assento *A* se manteve localizado antes da distância crítica para todos os cenários de condicionamento com painéis do tipo WWCB. As quantidades de diferenças perceptíveis são mostradas na Figura 147.

**Figura 147– Diferenças mínimas perceptíveis no assento A para cenários com WWCB.**



**Fonte: Autor (2020).**

Percebeu-se, portanto, que o cenário que apresentou mais quantidades de melhoras perceptíveis na definição foi o cenário de condicionamento com painéis do tipo WWCB – 50,0 mm.

#### 4.7 RESULTADOS SIMULADOS COM DIFERENTES CENÁRIOS

Após a verificação de semelhança estatística entre os valores medidos e simulados para as frequências de 500, 1000 e 2000 Hz para o tempo de reverberação, foram realizadas simulações com diferentes cenários de disposições de painéis, como descrito na seção 3.7.

Os valores resultantes das simulações para cada comparação de cenários, conforme o Quadro 5 apresentado na seção 3.7 encontram-se no Apêndice M. A Tabela 23 apresenta os valores das diferenças entre os números únicos de Definição obtidos das simulações dos cenários vertical e horizontal para cada tipo de painel.

**Tabela 23 – Diferenças entre os valores de Definição simulados para diferentes orientações dos compósitos.**

Cenário	Diferenças entre D <sub>50</sub> (%) - valores de cenários com painéis verticais e horizontais por receptor							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
A-A'	1,33	1,25	3,29	0,72	0,71	0,27	0,59	0,89
B-B'	1,54	0,68	0,60	0,67	2,78	1,21	1,33	1,77
C-C'	2,29	0,70	0,10	1,57	0,79	0,88	3,47	0,30
D-D'	0,48	0,06	1,21	0,15	1,40	1,54	0,64	0,10
E-E'	0,20	0,55	0,96	1,79	0,96	0,28	0,07	0,73
F-F'	0,08	2,74	3,00	1,11	1,53	1,35	3,35	1,26
G-G'	1,06	1,58	1,19	0,51	0,35	0,57	1,47	1,12
H-H'	0,71	1,11	0,01	0,38	1,35	2,02	1,89	2,54
I-I'	1,02	0,67	2,05	2,18	0,88	0,26	0,90	0,89
J-J'	4,00	1,70	1,00	1,48	0,30	2,07	1,58	0,37

Fonte: Autor (2020).

Não foi verificada, portanto, variação superior à 5,00% nos valores de Definição para diferentes orientações dos painéis nas vedações verticais.

Quanto aos cenários com diferentes combinações de painéis de palha de madeira com cimento, conforme o Quadro 6, os valores de definição constam na Tabela 24 em escala de cores.

**Tabela 24 – Valores de Definição simulados para diferentes combinações de painéis WWCB.**

Cenário	D <sub>50</sub> (%) - valores simulados entre cenários com painéis do tipo WWCB							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
G	49,74	43,49	37,54	61,60	39,74	38,43	39,02	43,67
H	50,71	46,33	37,85	64,18	41,38	37,94	41,16	45,63
I	49,80	44,40	37,04	63,84	39,40	39,40	38,05	45,34
J	50,68	45,78	39,60	65,32	43,62	40,16	42,10	48,27
K	52,03	48,95	35,73	65,89	43,26	39,35	41,53	45,60
L	52,88	46,45	40,55	63,73	41,32	40,85	38,17	46,78
M	53,66	43,63	37,04	64,42	41,08	40,24	40,85	44,48
N	52,18	44,63	37,60	64,22	40,43	40,17	38,38	45,38
O	51,15	47,03	38,18	64,91	41,97	40,93	37,27	43,53
P	51,84	49,06	37,22	65,51	43,01	39,71	40,72	43,56
Q	51,21	45,06	37,13	63,71	41,32	38,20	38,42	45,14
R	48,80	44,52	36,33	63,42	42,45	40,53	39,75	44,32
S	51,09	45,22	35,79	61,40	39,40	41,41	40,25	41,18
T	50,85	44,16	38,08	61,26	40,00	40,37	40,13	43,05
U	48,44	44,00	35,95	61,83	40,23	39,65	39,24	44,82
V	50,23	44,39	38,78	63,20	39,50	38,12	39,67	42,78

Fonte: Autor (2020).

As Diferenças Mínimas Perceptíveis foram encontradas entre os seguintes cenários e posições de receptores:

- Receptor em *Mic1*: M e U;
- Receptor em *Mic2*: G e K; G e P; K e M; M e P; P e U; e

- Receptor em *Mic8*: *J e S*; *J e T*; *J e V*; *L e V*.

Os valores do tempo de decaimento inicial para os diferentes cenários simulados com painéis do tipo WWCB são apresentados na Tabela 25.

**Tabela 25 – Valores de EDT simulados para diferentes combinações de painéis WWCB.**

Cenário	EDT (s) - valores simulados entre cenários com painéis do tipo WWCB								<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	Teste de Kruskal-Wallis
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>		
G	0,967	1,009	1,037	0,942	1,010	1,008	0,994	0,995	0,5417	
H	0,952	0,968	1,001	0,933	1,004	0,997	0,940	0,995	0,1278	
I	0,952	0,978	1,006	0,918	1,035	1,000	1,011	0,979	0,8279	
J	0,878	0,913	0,932	0,862	0,931	0,936	0,927	0,899	0,1540	
K	0,919	0,933	0,951	0,873	0,916	0,969	0,943	0,951	0,4834	
L	0,913	0,956	0,976	0,910	0,977	0,991	0,962	0,924	0,2676	
M	0,911	0,914	0,956	0,875	0,948	0,983	0,926	0,948	0,9211	
N	0,933	0,978	0,957	0,919	0,961	0,991	0,981	0,957	0,6532	<i>p</i> -valor = 1,10E-06
O	0,960	0,989	0,995	0,863	0,960	0,981	0,991	0,982	0,0014	
P	0,923	0,913	0,938	0,899	0,964	0,979	0,947	0,967	0,8002	
Q	0,939	0,987	0,975	0,930	0,977	1,010	0,974	1,003	0,4636	
R	0,983	0,946	1,008	0,915	0,980	1,014	0,995	1,006	0,1504	
S	0,929	0,981	1,019	0,980	0,989	1,026	1,011	1,033	0,3148	
T	0,977	0,984	0,990	0,923	0,986	1,010	0,982	0,990	0,0155	
U	0,957	1,019	1,014	0,929	1,017	1,011	1,010	1,007	0,0032	
V	0,983	1,006	1,009	0,939	1,033	1,016	0,993	0,977	0,7528	

Fonte: Autor (2020).

Considerando as oito posições de receptores para cada cenário em um mesmo grupo, tem-se 16 grupos com 8 amostras cada. A análise múltipla realizada pelo teste de Nemenyi representada na Figura 148 identifica diferenças significativas entre os seguintes cenários: *G e J*; *I e J*; *U e J*; *V e J*; *U e K*; *U e M*.

**Figura 148– Teste de Nemenyi para o EDT entre diferentes cenários com compósitos do tipo WWCB.**

Pairwise comparisons using Tukey and Kramer (Nemenyi) test with Tukey-Dist approximation for independent samples														
data: EDT by CENARIO														
	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	U
H	0.9991	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I	1.0000	1.0000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J	0.0048	0.1993	0.0452	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K	0.0826	0.7505	0.3644	1.0000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L	0.4461	0.9916	0.8668	0.9784	1.0000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M	0.0911	0.7724	0.3878	1.0000	1.0000	1.0000	-	-	-	-	-	-	-	-
N	0.8095	1.0000	0.9903	0.8015	0.9977	1.0000	0.9983	-	-	-	-	-	-	-
O	0.9927	1.0000	1.0000	0.3329	0.8823	0.9989	0.8966	1.0000	-	-	-	-	-	-
P	0.1837	0.9072	0.5842	0.9994	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	0.9704	-	-	-	-	-
Q	0.9971	1.0000	1.0000	0.2627	0.8249	0.9968	0.8431	1.0000	1.0000	0.9460	-	-	-	-
R	1.0000	1.0000	1.0000	0.0560	0.4117	0.8966	0.4362	0.9941	1.0000	0.6353	1.0000	-	-	-
S	1.0000	0.9984	1.0000	0.0038	0.0704	0.4069	0.0778	0.7767	0.9893	0.1606	0.9955	1.0000	-	-
T	1.0000	1.0000	1.0000	0.0860	0.5171	0.9442	0.5429	0.9982	1.0000	0.7369	1.0000	1.0000	1.0000	-
U	1.0000	0.9938	1.0000	0.0019	0.0423	0.2987	0.0472	0.6653	0.9704	0.1042	0.9852	1.0000	1.0000	0.9997
V	1.0000	0.9992	1.0000	0.0051	0.0860	0.4561	0.0947	0.8172	0.9934	0.1898	0.9974	1.0000	1.0000	1.0000

Fonte: Autor (2020).

Entre os diferentes receptores, as quantidades de Diferenças Mínimas Perceptíveis para valores de EDT são apresentadas na Tabela 26.

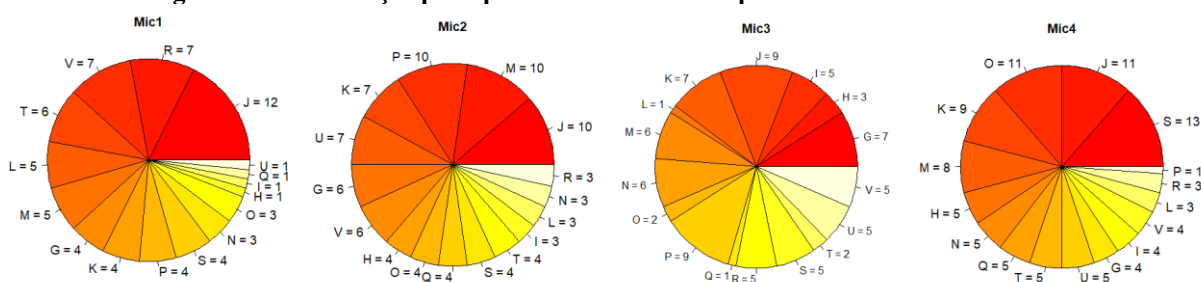
**Tabela 26 – Quantidade de diferenças mínimas perceptíveis por receptor.**

Receptor	Quantidade de diferenças perceptíveis verificadas
<i>Mic1</i>	34
<i>Mic2</i>	44
<i>Mic3</i>	39
<i>Mic4</i>	48
<i>Mic5</i>	42
<i>Mic6</i>	13
<i>Mic7</i>	40
<i>Mic8</i>	39

Fonte: Autor (2020).

A Figura 149 mostra as quantidades que um cenário é diferente de outro, para os receptores *Mic1*, *Mic2*, *Mic3* e *Mic4*.

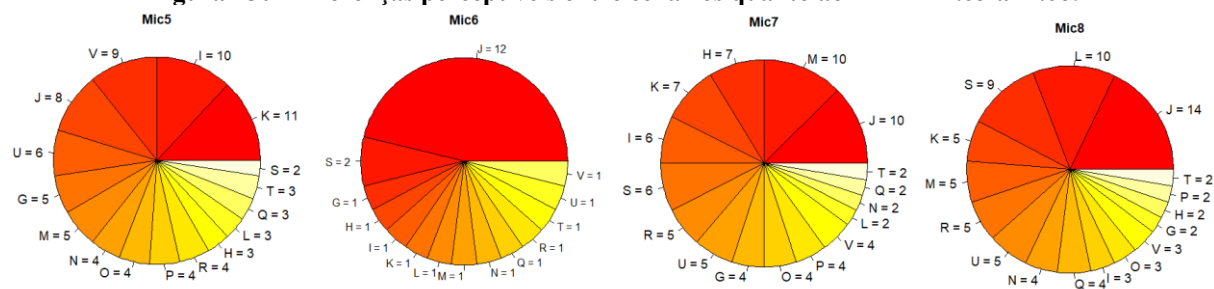
**Figura 149– Diferenças perceptíveis entre cenários quanto ao EDT – *Mic1* a *Mic4*.**



Fonte: Autor (2020).

Da mesma forma a Figura 150 elenca quais são estas quantidades para os receptores *Mic5*, *Mic6*, *Mic7* e *Mic8*.

**Figura 150– Diferenças perceptíveis entre cenários quanto ao EDT – *Mic5* a *Mic8*.**



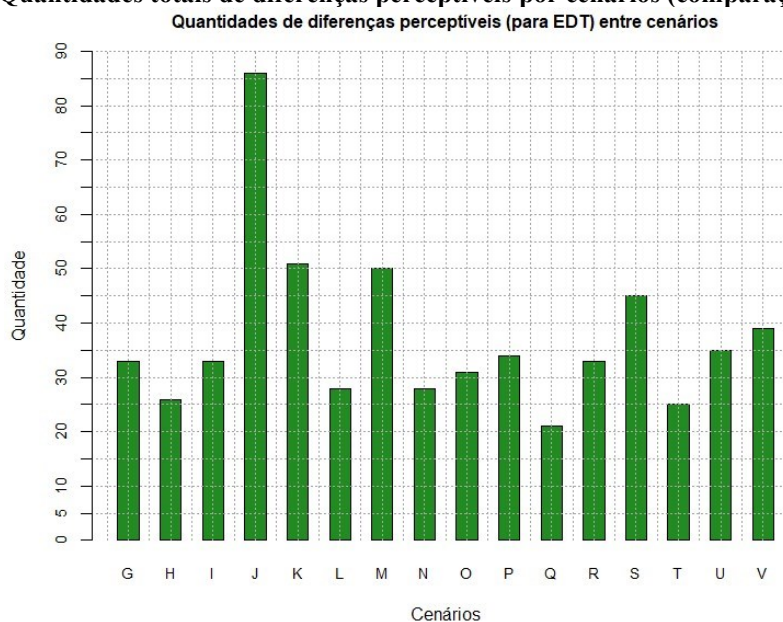
Fonte: Autor (2020).

Percebe-se que ao cenário *J*, definido por painéis com 50,0 mm nas laterais e ao fundo, foi o que mais apresentou diferenças perceptíveis relacionadas ao tempo de decaimento inicial quanto comparado com outros em quase todos os receptores, excetuando apenas os receptores

*Mic4* e *Mic5*, que tiverem os cenários *S* e *K* como os que mais apresentaram diferenças perceptíveis, respectivamente.

Em quantidades totais, para todos os receptores, as diferenças perceptíveis identificadas para um cenário quando comparado com outro são mostradas na Figura 151.

**Figura 151– Quantidades totais de diferenças perceptíveis por cenários (comparações por pares).**



**Fonte: Autor (2020).**

Com a análise múltipla realizada e as diferenças perceptíveis verificou-se que o cenário *J* é significativamente diferente dos demais, cujos valores analisados de EDT e  $D_{50}$  remetem ao melhor desempenho acústico entre as situações de condicionamento acústico que utilizaram painéis do tipo WWCB. Tal evidência foi também verificada quanto ao índice de transmissão de fala.

## 4.8 ENSAIOS SUBJETIVOS DE INTELIGIBILIDADE DE FALA

Os resultados encontrados, bem como as listas utilizadas em cada situação, podem ser verificados no Apêndice H.

### 4.8.1 Sala de Aula sem Painéis

Os resultados de IPRF obtidos são apresentados pelo Quadro 32.

**Quadro 32 – Resultados de IPRF para cada assento na sala sem condicionamento acústico.**

Sem painéis	Assento			
Indivíduo	A	B	C	D
1	80%	96%	80%	<b>72%</b>
2	88%	92%	<b>68%</b>	84%
3	88%	80%	<b>72%</b>	84%
4	88%	80%	<b>68%</b>	80%
5	96%	88%	96%	84%
6	84%	<b>68%</b>	<b>72%</b>	76%
7	80%	76%	80%	80%
8	84%	<b>72%</b>	<b>72%</b>	92%
9	80%	84%	96%	76%
10	76%	80%	76%	80%
11	76%	68%	76%	80%
12	<b>72%</b>	76%	80%	84%
13	80%	76%	<b>64%</b>	84%
14	76%	<b>72%</b>	<b>72%</b>	84%
15	80%	88%	84%	72%
16	<b>72%</b>	<b>76%</b>	<b>72%</b>	<b>52%</b>
17	<b>72%</b>	<b>64%</b>	<b>68%</b>	<b>76%</b>
18	80%	76%	80%	<b>72%</b>
<i>p-valor</i> Shapiro Wilk	0,1619	0,6326	0,0306	0,0042
Média	81%	78%	76%	78%
Teste de Kruskal-Wallis	<i>p-valor</i> =0,2336			

Fonte: Autor (2020).

Apesar das médias dos valores ser igual à 76% para o assento C (o mais afastado), os prejuízos são evidentes devido ao afastamento em relação à fonte sonora. O Quadro 33 descreve a análise de variância entre os indivíduos.

**Quadro 33 – Teste de Kruskal-Wallis entre os indivíduos na sala sem condicionamento (continua)**

Sem painéis	IPRF - Indivíduos								
Assento	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	80%	88%	88%	88%	96%	84%	80%	84%	80%
B	96%	92%	80%	80%	88%	68%	76%	72%	84%
C	80%	68%	72%	68%	96%	72%	80%	72%	96%
D	72%	84%	84%	80%	84%	76%	80%	92%	76%
<i>p-valor</i> Shapiro Wilk	0,4064	0,3690	0,8500	0,5719	0,2242	0,8500	0,0012	0,2616	0,5774
Teste de Kruskal-Wallis	<i>p-valor</i> =0,09183								

Fonte: Autor (2020).

**Quadro 33 - Teste de Kruskal-Wallis entre os indivíduos na sala sem condicionamento (conclusão).**

Sem painéis	IPRF - Indivíduos								
Assento	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A	76%	76%	72%	80%	76%	80%	72%	72%	80%
B	80%	68%	76%	76%	72%	88%	76%	64%	76%
C	76%	76%	80%	64%	72%	84%	72%	68%	80%
D	80%	80%	84%	84%	84%	72%	52%	76%	72%
<i>p-valor</i> Shapiro Wilk	0,0239	0,4064	0,9719	0,5774	0,1612	0,8500	0,0618	0,9719	0,2725
Teste de Kruskal-Wallis	<i>p-valor</i> =0,09183								

Fonte: Autor (2020).

Na interpretação do Quadro 32, percebeu-se que para quase todos os assentos houve uma distribuição normal dos valores de IPRF, com exceção do assento *C* que apresentou *p-valor* < 0,05, indicando que os valores calculados não se encontram em uma distribuição normal. Logo, foi verificada a variância entre os grupos pelo teste de Kruskal-Wallis, que apresentou um *p-valor* de 0,2336, indicando que não existe diferença estatística entre os valores de IPRF de cada assentos, considerando os 18 indivíduos.

Da mesma forma, uma análise de variância (pelo teste de Kruskal-Wallis) entre os indivíduos, apresentada no Quadro 33, mostrou que não existe diferença estatística entre os valores obtidos de IPRF de cada indivíduo (*p-valor*>0,05). Assumiu-se, portanto, que os resultados de IPRF dos 18 participantes são semelhantes, e que a inteligibilidade de fala é estatisticamente semelhante entre os quatro assentos na situação da sala de aula sem condicionamento acústico.

#### 4.8.2 Sala de Aula com Painéis de Palha Grossa de Madeira com Cimento (Espessura de 50,0 mm)

Utilizando a mesma amostra, os valores de IPRF para a sala com condicionamento acústico são exibidos pelo Quadro 34.

**Quadro 34 – Resultados de IPRF para cada assento na sala com condicionamento acústico.**

Com painéis	Assento			
Indivíduo	A	B	C	D
1	84%	84%	96%	84%
2	92%	92%	96%	92%
3	88%	88%	84%	76%
4	76%	92%	76%	84%
5	92%	96%	96%	92%
6	84%	100%	80%	<b>72%</b>
7	76%	84%	88%	80%
8	80%	76%	76%	84%
9	80%	80%	80%	100%
10	76%	84%	96%	88%
11	80%	80%	76%	80%
12	96%	80%	88%	84%
13	84%	80%	84%	76%
14	88%	88%	68%	80%
15	<b>68%</b>	76%	84%	84%
16	<b>64%</b>	76%	80%	<b>68%</b>
17	84%	76%	76%	76%
18	80%	84%	80%	88%
<i>p-valor</i> Shapiro Wilk	0,6554	0,0961	0,0914	0,8591
Média	82%	84%	84%	83%
ANOVA	<i>p-valor</i> =0,8140			

Fonte: Autor (2020).



Houve uma melhora nos valores de IPRF com a adição dos compósitos. O Quadro 35 mostra a análise de variância entre os indivíduos.

**Quadro 35 – Teste de Kruskal-Wallis entre os indivíduos na sala com condicionamento (continua)**

Com painéis	IPRF - Indivíduos								
Assento	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	84%	92%	88%	76%	92%	84%	76%	80%	80%
B	84%	92%	88%	92%	96%	100%	84%	76%	80%
C	96%	96%	84%	76%	96%	80%	88%	76%	80%
D	84%	92%	76%	84%	92%	72%	80%	84%	100%
<i>p</i> -valor Shapiro Wilk	0,0012	0,0012	0,1612	0,2725	0,0239	0,7335	0,9719	0,2725	0,0012
Teste de Kruskal-Wallis	<i>p</i> -valor=0,0195								

Fonte: Autor (2020).

**Quadro 35 - Teste de Kruskal-Wallis entre os indivíduos na sala com condicionamento (conclusão).**

Com painéis	IPRF - Indivíduos								
Assento	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A	76%	80%	96%	84%	88%	68%	64%	84%	80%
B	84%	80%	80%	80%	88%	76%	76%	76%	84%
C	96%	76%	88%	84%	68%	84%	80%	76%	80%
D	88%	80%	84%	76%	80%	84%	68%	76%	88%
<i>p</i> -valor Shapiro Wilk	0,9951	0,0012	0,8500	0,2498	0,2200	0,2725	0,7143	0,0012	0,2725
Teste de Kruskal-Wallis	<i>p</i> -valor=0,0195								

Fonte: Autor (2020).

Não foi verificada diferença estatística quanto ao IPRF entre os diferentes assentos, pois a análise de variância resultou em um *p*-valor de 0,8140. Entre os diferentes indivíduos, o teste de Kruskal-Wallis revelou diferença estatística com um *p*-valor de 0,0195 ( $< 0,05$ ), o que significa que resultados são estatisticamente diferentes entre os indivíduos.

Realizando um teste de comparações múltipla pelo método de Dunn com ajustes propostos por Benjamini-Hochberg, foi verificada diferença estatística entre os indivíduos 2 e 16; 5 e 16. A Figura 152 mostra o teste de Dunn realizado para os diferentes indivíduos na sala de aula condicionada acusticamente com painéis do tipo WWCB – 50,0 mm.

**Figura 152– Teste de Dunn (com ajustes tipo Benjamini-Hochberg) entre indivíduos.**

	Ind1	Ind10	Ind11	Ind12	Ind13	Ind14	Ind15	Ind16	Ind17	Ind18	Ind2	Ind3	Ind4	Ind5	Ind6	Ind7	Ind8
Ind10	0.907	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ind11	0.388	0.510	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ind12	0.978	0.910	0.388	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ind13	0.564	0.679	0.878	0.578	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ind14	0.687	0.781	0.741	0.696	0.878	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ind15	0.400	0.570	0.950	0.416	0.907	0.779	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ind16	0.134	0.231	0.696	0.143	0.578	0.399	0.679	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ind17	0.339	0.388	0.910	0.343	0.781	0.679	0.895	0.783	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ind18	0.759	0.874	0.679	0.770	0.786	0.927	0.696	0.364	0.594	-	-	-	-	-	-	-	-
Ind2	0.679	0.578	0.121	0.679	0.231	0.343	0.134	0.028	0.121	0.388	-	-	-	-	-	-	-
Ind3	0.828	0.927	0.625	0.847	0.740	0.875	0.670	0.320	0.499	0.928	0.457	-	-	-	-	-	-
Ind4	0.647	0.722	0.786	0.670	0.929	0.937	0.847	0.494	0.722	0.878	0.315	0.786	-	-	-	-	-
Ind5	0.670	0.516	0.121	0.647	0.189	0.324	0.121	0.028	0.117	0.373	0.950	0.400	0.259	-	-	-	-
Ind6	0.722	0.829	0.696	0.740	0.846	0.950	0.740	0.388	0.647	0.950	0.373	0.907	0.907	0.343	-	-	-
Ind7	0.679	0.770	0.760	0.687	0.904	0.979	0.782	0.404	0.679	0.910	0.339	0.856	0.950	0.320	0.938	-	-
Ind8	0.388	0.510	1.000	0.388	0.878	0.741	0.950	0.696	0.910	0.679	0.121	0.625	0.786	0.121	0.696	0.760	-
Ind9	0.769	0.878	0.679	0.781	0.782	0.911	0.696	0.350	0.578	0.979	0.388	0.937	0.874	0.381	0.950	0.907	0.679

Fonte: Autor (2020).

O indivíduo 16 teve o desempenho médio (IPRF de 72%) mais baixo dentre os 18 indivíduos, e os indivíduos 2 e 5 apresentaram os melhores desempenhos médios no grupo (93 e 95,0%, respectivamente).

A retirada do indivíduo 16 do Quadro 34 e do Quadro 35 altera os *p-valores* de ANOVA e do teste de Kruskal-Wallis para 0,9150 e 0,0505, respectivamente. As distribuições permaneceram normais no Quadro 34. Logo, a exclusão do indivíduo 16 levaria a uma situação de semelhança estatística entre os indivíduos para os testes realizados no cenário com condicionamento acústico.

A exclusão não foi realizada, pois os intervalos para análise do IPRF, apresentados pelo Quadro 8, permitiram a caracterização subjetiva da melhora ou piora no índice em cada indivíduo, o que é apresentado seção 4.8.3. Logo, devido ao objeto da análise ser a variação do desempenho individual no teste, o indivíduo 16 foi mantido.

Verificou-se, portanto, que a inteligibilidade de fala é estatisticamente semelhante entre os quatro assentos, e que existe uma diferença estatística entre os indivíduos quando há a inclusão do indivíduo 16 na amostra.

#### 4.8.3 Comparação das Situações em Cada Assento

Utilizando os intervalos estabelecidos pelo Quadro 8, realizou-se a interpretações dos resultados, descrita pelo Quadro 36 para o assento *A*.

**Quadro 36 – Comparação de IPRF para o assento A.**

IPRF para o Assento A				
Indivíduo	Sem painéis	Com painéis	Situação	Dificuldade - com os painéis
1	80%	84%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
2	88%	92%	Melhorou	Nenhuma dificuldade para compreender a fala
3	88%	88%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
4	88%	76%	Piorou	Moderada dificuldade para compreender a fala
5	96%	92%	Sem alterações	Nenhuma dificuldade para compreender a fala
6	84%	84%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
7	80%	76%	Piorou	Moderada dificuldade para compreender a fala
8	84%	80%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
9	80%	80%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
10	76%	76%	Sem alterações	Moderada dificuldade para compreender a fala
11	76%	80%	Melhorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
12	72%	96%	Melhorou	Nenhuma dificuldade para compreender a fala
13	80%	84%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
14	76%	88%	Melhorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
15	80%	68%	Piorou	Moderada dificuldade para compreender a fala
16	72%	64%	Sem alterações	Moderada dificuldade para compreender a fala
17	72%	84%	Melhorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
18	80%	80%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala

Fonte: Autor (2020).

Para 3 dos 18 indivíduos o painel piorou a inteligibilidade de fala, tendo melhorado para 5 dos 18. Para 10 participantes o painel não mudou o valor de IPRF. O Quadro 37 mostra os resultados para o assento B.

**Quadro 37 – Comparação de IPRF para o assento B.**

IPRF para o Assento B				
Indivíduo	Sem painéis	Com painéis	Situação	Dificuldade - com os painéis
1	96%	84%	Piorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
2	92%	92%	Sem alterações	Nenhuma dificuldade para compreender a fala
3	80%	88%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
4	80%	92%	Melhorou	Nenhuma dificuldade para compreender a fala
5	88%	96%	Melhorou	Nenhuma dificuldade para compreender a fala
6	68%	100%	Melhorou	Nenhuma dificuldade para compreender a fala
7	76%	84%	Melhorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
8	72%	76%	Sem alterações	Moderada dificuldade para compreender a fala
9	84%	80%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
10	80%	84%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
11	68%	80%	Melhorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
12	76%	80%	Melhorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
13	76%	80%	Melhorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
14	72%	88%	Melhorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
15	88%	76%	Piorou	Moderada dificuldade para compreender a fala
16	76%	76%	Sem alterações	Moderada dificuldade para compreender a fala
17	64%	76%	Sem alterações	Moderada dificuldade para compreender a fala
18	76%	84%	Melhorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala

Fonte: Autor (2020).

No assento *B*, 9 indivíduos melhoraram seu desempenho no teste de IPRF com as listas de palavras características da sala de aula condicionada com painéis. Apenas 2 indivíduos tiveram uma piora nos seus testes, e 7 participantes não tiveram alterações nos resultados.

Os valores para o assento *C* são mostrados no Quadro 38.

**Quadro 38 – Comparação de IPRF para o assento C.**

IPRF para o Assento C				
Indivíduo	Sem painéis	Com painéis	Situação	Dificuldade - com os painéis
1	80%	96%	Melhorou	Nenhuma dificuldade para compreender a fala
2	68%	96%	Melhorou	Nenhuma dificuldade para compreender a fala
3	72%	84%	Melhorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
4	68%	76%	Sem alterações	Moderada dificuldade para compreender a fala
5	96%	96%	Sem alterações	Nenhuma dificuldade para compreender a fala
6	72%	80%	Melhorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
7	80%	88%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
8	72%	76%	Sem alterações	Moderada dificuldade para compreender a fala
9	96%	80%	Piorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
10	76%	96%	Melhorou	Nenhuma dificuldade para compreender a fala
11	76%	76%	Sem alterações	Moderada dificuldade para compreender a fala
12	80%	88%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
13	64%	84%	Melhorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
14	72%	68%	Sem alterações	Moderada dificuldade para compreender a fala
15	84%	84%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
16	72%	80%	Melhorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
17	68%	76%	Sem alterações	Moderada dificuldade para compreender a fala
18	80%	80%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala

Fonte: Autor (2020).

Para o assento mais afastado em relação à mesa do professor, 7 indivíduos melhoraram seus testes de IPRF com os áudios construídos com base nas respostas aos impulsos da sala de aula com os painéis. Para apenas 1 participante houve piora no índice. E como no assento *B*, o IPRF não foi alterado para 10 participantes.

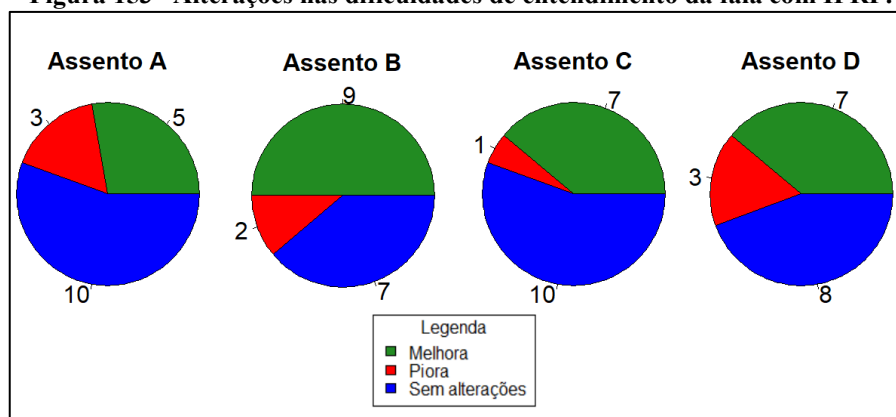
Os valores de IPRF para o assento *D* são exibidos no Quadro 39.

**Quadro 39 – Comparação de IPRF para o assento D.**

IPRF para o Assento D				
Indivíduo	Sem painéis	Com painéis	Situação	Dificuldade - com os painéis
1	72%	84%	Melhorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
2	84%	92%	Melhorou	Nenhuma dificuldade para compreender a fala
3	84%	76%	Piorou	Moderada dificuldade para compreender a fala
4	80%	84%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
5	84%	92%	Melhorou	Nenhuma dificuldade para compreender a fala
6	76%	72%	Sem alterações	Moderada dificuldade para compreender a fala
7	80%	80%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
8	92%	84%	Piorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
9	76%	100%	Melhorou	Nenhuma dificuldade para compreender a fala
10	80%	88%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
11	80%	80%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
12	84%	84%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
13	84%	76%	Piorou	Moderada dificuldade para compreender a fala
14	84%	80%	Sem alterações	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
15	72%	84%	Melhorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala
16	52%	68%	Melhorou	Moderada dificuldade para compreender a fala
17	76%	76%	Sem alterações	Moderada dificuldade para compreender a fala
18	72%	88%	Melhorou	Ligeira/discreta dificuldade para compreender a fala

Fonte: Autor (2020).

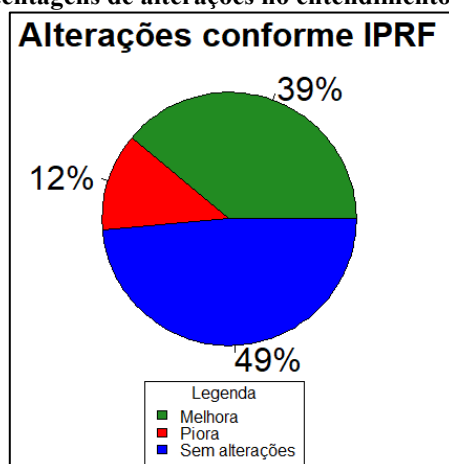
No assento *D* houve melhora nos valores de IPRF para 7 indivíduos, e piora para 3. Para 8 indivíduos não houve alteração na dificuldade para entender o fala. As quantidades totais de alterações da inteligibilidade avaliada por meio dos testes de IPRF são apresentadas na Figura 153.

**Figura 153– Alterações nas dificuldades de entendimento da fala com IPRF.**

Fonte: Autor (2020).

Em porcentagem, as alterações podem ser sintetizadas pela Figura 154.

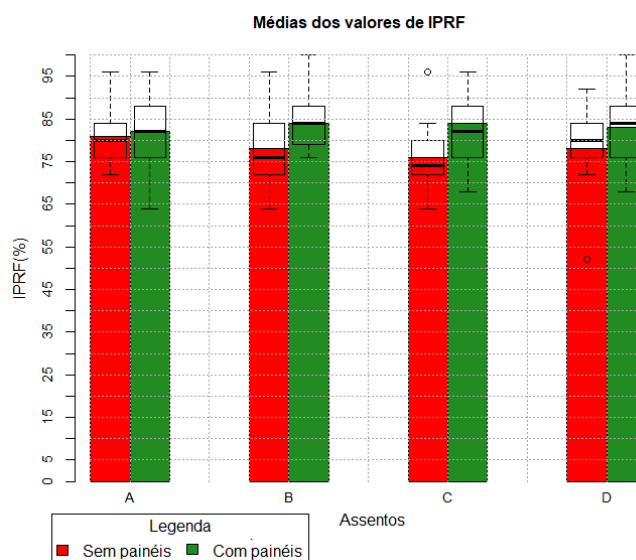
Figura 154– Porcentagens de alterações no entendimento da fala com IPRF.



Fonte: Autor (2020).

Uma análise das médias dos valores por assento é apresentada na Figura 155.

Figura 155– Média dos valores de IPRF por assento



Fonte: Autor (2020).

Diferentemente da pesquisa de Amlani e Russo (2016) que mostrou uma piora em testes de IPRF em uma sala de aula condicionada com painéis de poliéster (nas médias dos assentos), a inserção dos compósitos do tipo WWCB – 50,0 mm melhorou estes índices.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o condicionamento acústico de uma sala de aula tratada acusticamente por meio de compósitos de madeira fixados nas vedações verticais existentes de uma sala de aula, e conclui-se que a melhor opção analisada foi o cenário composto por painéis do tipo WWCB com 50,0 mm de espessura, feitos de palha grossa.

A sala de aula estudada apresentou uma redução do seu tempo de reverberação quando condicionada com os diferentes materiais compósitos, em todos os cenários. Mesmo com as inserções de painéis a sala de aula não se mostrou adequada conforme a norma norte-americana ANSI ASA S12.60/2010, o que significa que mais materiais absorventes seriam necessários no ambiente de ensino para deixá-la em conformidade com a referida norma.

As análises dos parâmetros acústicos Definição ( $D_{50}$ ) e Índice de Transmissão de Fala (STI) revelaram que não houve melhora direta na inteligibilidade de fala para alguns dos assentos nos cenários estudados, mesmo tendo diminuído o tempo de reverberação.

Para os assentos mais afastados em relação a mesa do professor, os compósitos de 25,0 mm e 50,0 mm do tipo WWCB, feitos com palha grossa, foram os únicos que permitiram valores acima de 50,0% nos valores medidos da Definição. Isto significa que, nestes cenários de condicionamento acústico, a inteligibilidade de fala não foi afetada pela reverberação.

Quanto ao STI, as inserções dos painéis do tipo WWCB melhoraram os índices em todos os assentos e para todas as espessuras e composições utilizadas, o que não ocorreu com as inserções dos compósitos do tipo MDF e OSB, que em algumas situações pioraram o STI. Em uma análise estatística dos valores de STI, o painel do tipo WWCB com 50,0 mm de espessura (feito de palha grossa) se mostrou diferente dos demais.

Quanto ao nível de pressão sonora (NPS), e com base no assento mais distante (assento C), verificou-se que os painéis do tipo OSB e MDF reduziram os NPS emitidos na mesa do professor (fonte sonora) em menor intensidade que os painéis do tipo WWCB. Os painéis do tipo WWCB absorveram mais energia sonora do que os outros, devido a suas propriedades de absorção sonora superiores às propriedades dos outros tipos de painéis. Na análise espectral, percebeu-se que quase todos os painéis absorveram energias nas médias e altas frequências (a partir de, aproximadamente, 500 Hz), com exceção do painel do tipo WWCB com 50,0 mm de espessura, que manteve a variação espectral do NPS muito próxima da situação sem condicionamento acústico.

Quanto à utilização dos compósitos como componentes de um sistema de vedação vertical, com a finalidade do aumento da isolamento ao ruído aéreo, observou-se que a inserção

de painéis do tipo OSB, com 12,0 e 25,0 mm de espessura, em uma vedação de blocos de concreto por meios de pregos levaram aos melhores aumentos nos índices de reduções sonoras e no índice de redução sonora ponderado. Os painéis do tipo OSB podem, portanto, ser utilizados para o aumento da isolamento sonora de vedações verticais de blocos de concreto sem revestimentos.

O painel do tipo WWCB, por sua vez, levou a uma piora da isolamento em baixas frequências, o que pode ser explicado pelos parâmetros da porosidade e da resistividade ao fluxo do material, que permitiram uma camada de ar entre o painel e a vedação, mesmo com ele pregado, o que levou a algumas ressonâncias no conjunto.

As absorções sonoras dos compósitos, identificadas por meio de ensaios no tubo de impedância, mostraram-se similares aos resultados encontrados na literatura. O painel do tipo WWCB apresentou valores superiores à 0,80 em altas frequências. O compósito pode ser utilizado como material absorvente em várias soluções construtivas. Os três tipos de painéis, em suas diferentes espessuras, mostraram-se melhores que os sistemas de revestimentos mais comuns na construção civil brasileira.

A simulação computacional do ambiente estudado foi validada por meio dos valores medidos do tempo de reverberação, porém não apresentou a mesma convergência entre os valores medidos e simulados de Definição, cujos valores simulados subestimaram os valores medidos em sua maior parte.

As diferenças entre os valores medidos e simulados se devem, por exemplo, à escolha dos coeficientes de absorção sonora e espalhamento, que não necessariamente condizem com o material que de fato existe no ambiente; à anisotropia da madeira, que dificulta os cálculos exatos dos coeficientes de absorções sonoras utilizados nos modelos computacionais; à falta de dados adequados na literatura sobre os coeficientes de espalhamento dos materiais; ao método geométrico utilizado, que possui limitações em baixas frequências e aos detalhes arquitetônicos realizados no modelo.

A troca na orientação dos painéis quanto à sua fixação não gerou diferenças perceptíveis (JND) nas simulações computacionais realizadas. Diferentes cenários contendo variações dos compósitos do tipo WWCB também foram simulados, e observou-se que a melhor estratégia de condicionamento acústico continuou sendo a de compósitos de 50,0 mm de espessuras nas paredes lateral e de fundo.

Os testes subjetivos, quantificados por meio dos Índices Percentuais de Inteligibilidade de Fala, revelaram que a inserção dos painéis do tipo WWCB com espessura 50,0 mm melhorou a inteligibilidade de fala em todos os assentos estudados, e comprovou que não houve absorção



sonora excessiva em altas frequências. O assento *A*, com a maior proximidade em relação à fonte sonora dentre os quatro assentos analisados, apresentou a menor variação quanto aos valores de IPRF calculados sem e com condicionamentos. Isso se deve ao fato do referido assento estar antes da distância crítica, sendo a energia do som direto a responsável pela inteligibilidade nesta posição.

Conclui-se, portanto, que os painéis do tipo WWCB com 50,0 mm de espessura, feitos com palha grossa, podem ser utilizados no condicionamento acústico de sala de aula, onde irão proporcionar melhor inteligibilidade de fala, conforme testes objetivos e subjetivos da pesquisa.

A solução proposta para ambientes já existentes é de fácil execução quando comparada com a colocação de forros de materiais absorventes, que muitas vezes envolve alterações na infraestrutura elétrica do ambiente, e pode levar a uma absorção sonora excessiva. A sustentabilidade do compósito, junto às outras características que permitem sua utilização como elemento construtivo, surgem como alternativa aos materiais existentes no mercado para condicionamento acústico, que, em sua maior parte, não são sustentáveis.

Mesmo com a inserção destes painéis foi verificada uma demanda por mais área absorvente. Ainda assim, a adição de doze painéis de 0,60 x 1,20 metros nas paredes lateral e do fundo se mostrou como uma solução eficaz para o tratamento acústico da sala de aula.

## 5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Adicionar maior área absorvente na sala de aula, conforme simulação computacional para o cenário ótimo, baixando o tempo de reverberação para o valor recomendado pela norma norte-americana. Após isso, repetir as medições objetivas e subjetivas;
- Investigar os valores de coeficientes de absorção de incidência aleatória calculados por meio da equação de Paris a partir das funções de transferências do tubo de impedância;
- Realizar gravação das listas por uma falante feminina, seguida da convolução com as respostas aos impulsos da sala de aula e realizar novamente os testes subjetivos, verificando se a alteração de gênero implica em uma mudança nos testes de IPRF;
- Realizar as medições do STI pelo método direto para verificar se existe diferença com os valores obtidos com o método indireto;
- Analisar os erros encontrados nos testes de IPRF e relacioná-los com as frequências naturais dos diferentes tipos de vogais e consoantes, identificando assim a possibilidade de absorção excessiva de uma determinada frequência no ambiente condicionado;
- Avaliar a frequência ressonante do conjunto alvenaria e compósito, quando do interesse pelas propriedades de isolamento, para sejam obtidos os parâmetros físicos que levem aos melhores índices de reduções sonoras;
- Realizar a análise do ciclo de vida do compósito do tipo WWCB conforme a realidade brasileira.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR IEC 60268:2011. **Equipamentos de sistemas de som. Parte 16: Avaliação objetiva da inteligibilidade da fala pelo índice de transmissão da fala.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575-4:2013. **Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14040:2014. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14044:2014. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10152:2017. – **Acústica: níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 3382:2017. **Acústica - Medição de parâmetros de acústica de salas. Parte 1: Salas de espetáculos.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 3382:2018. **Acústica - Medição de parâmetros de acústica de salas. Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15316-2:2019. **Painéis de fibras de média densidade. Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

AMADASI, G.; MILANI, S. *Inside SCS9020B – Impedance Tube. An application note.* Vibro-Acoustic: Itália. 2015. Disponível em: <<http://www.vibro-acoustic.com/res/pdf/AN9020B-2015x.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2020.

AMARILLA, Rosemara Santos Deniz. **Estudo de barreira acústica no controle de ruído em um campus universitário.** Orientador: Rodrigo Eduardo Catai. 193 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UTFPR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2019.

ANSI/ASA S12.60, *American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools.* Estados Unidos da América: *Acoustical Society of America (ASA)*, 2010.

AKGÜL, Mehmet et al. *Potential utilization of burned wood in manufacture of medium density fiberboard.* **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 15, n. 2, p. 195-201, 2013.

AMLANI, Aryn M; RUSSO, Timothy A. *Negative effect of acoustic panels on listening effort in a classroom environment.* **Journal of the American Academy of Audiology**, v. 27, n. 10, p. 805–815, 2016.

ARAÚJO, Tânia Maria de; REIS, Eduardo José Farias Borges dos; CARVALHO, Fernando Martins; *et al.* Fatores associados a alterações vocais em professoras. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 24, p. 1229–1238, 2008.

ARWEILER, Iris; BUCHHOLZ, Jörg M. *The influence of spectral characteristics of early reflections on speech intelligibility*. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 130, n. 2, p. 996–1005, 2011.

ASDRUBALI, Francesco; SCHIAVONI, Samuel; HOROSHENKOV, K. V. *A review of sustainable materials for acoustic applications*. **Building Acoustics**, v. 19, n. 4, p. 283-311, 2012.

ASDRUBALI, Francesco; BALDASSARRI, Catia; FTHENAKIS, Vasilis. *Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings*. **Energy and Buildings**, v. 64, p. 73–89, 2013.

ASHA Leader. *Classroom acoustics standard available*. **ASHA Leader**, v. 10, n. 12, p. 3, 2005. Disponível em: <<https://go.gale.com/ps/i.do?p=AONE&u=capes&id=GALE|A136163155&v=2.1&it=r&sid=AONE&asid=ad265a64>>. Acesso em: 04 nov. 2019

ASTM C423-17 *Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method*. ASTM International. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1520/C0423-17>>. Acesso em: 05 nov. 2019.

ASTM E1050-19. *Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System*. ASTM International. 2019. Disponível em <https://doi.org/10.1520/E1050-19>. Acesso em: 01 jun. 2020.

AVELAR, Márcio; PRESTES, Pedro; SARDA, Alexandre; *et al.* *Measuring sound insulation from partition through a deconvolution technique*. In: **22nd International Congress on Acoustics ICA 2016 : Proceedings**. Buenos Aires - Argentina: Frederico Miyara, Ernesto Accolti, Vivian Pasch, Nilda Vechiatti, 2016, p. 350. Disponível em: <<http://ica2016.org.ar/website/proceedings/>>. Acesso em: 18 out. 2019.

AVELAR, Marcio; BONIFACIO, Paulo; SANT'ANA, Luis; *et al.* *Evaluation of the crossover frequency based on the analysis of room transfer functions through statistical estimators*. **Applied Acoustics**, v. 164, p. 107247, 2020.

AUDACITY TEAM. **AUDACITY**. Versão 2.3.0. [Boston]: AUDACITY TEAM, 2019

AZEVEDO, Janderson; FONSECA, Juliana; GRAGA, Louise; HOLANDA, Luana et al. Avaliação da inteligibilidade em salas de aula sem e com condicionamento acústico com diferentes soluções acústicas. In: **XXVIII ENCONTRO DA SOBRAC, 2018**, Porto Alegre. Anais eletrônicos... Campinas, GALOÁ, 2018. Disponível em: <<https://proceedings.science/sobrac/papers/avaliacao-da-inteligibilidade-em-salas-de-aula-sem-e-com-condicionamento-acustico-com-diferentes-solucoes-acusticas>>. Acesso em: 18 out. 2019.

BASTOS, Eliomar Ferreira. **Caracterização física e mecânica de painel de OSB do tipo FORM**. Orientador: Mauro Augusto Demarzo. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Civil) – Unicamp, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2009.

BARRETO, Simone dos Santos; ORTIZ, Karin Zazo. Inteligibilidade: efeitos da análise de transcrição e do estímulo de fala. **Pró-Fono R. Atual. Cient.**, Barueri, v. 22, n. 2, p. 125-130, June 2010. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-56872010000200010&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-56872010000200010&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 04 jun. 2019.

BENJAMINI, Yoav; HOCHBERG, Yosef. *Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing*. **Journal of the Royal statistical society: series B (Methodological)**, v. 57, n. 1, p. 289-300, 1995.

BERANEK, Leo L. *Revised criteria for noise in buildings*. **Noise control**, v. 3, n. 1, p. 19-27, 1957.

BERARDI, Umberto; IANNACE, Gino. *Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications*. **Building and Environment**, v. 94, p. 840-852, 2015.

BERARDI, Umberto; RAMAKRISHNAN, Ramani. *Comparison of the acoustic behaviour of porous materials in compressed and uncompressed conditions*. In: **PROCEEDINGS of the 22nd International Congress on Acoustics**. Buenos Aires - Argentina: [s.n.], 2016.

BERG, Frederick S.; BLAIR, James C.; BENSON, Peggy V. *Classroom acoustics: The problem, impact, and solution*. **Language, Speech, and Hearing Services in Schools**, v. 27, n. 1, p. 16-20, 1996.

BERGMAN, Richard; PUETTMANN, Maureen; TAYLOR, Adam; *et al.* *The Carbon Impacts of Wood Products*. **Forest Products Journal**, v. 64, n. 7-8, p. 220-231, 2014.

BERNARDES, M.; GARCIA LUPI VERGARA, L.; SALLES MARTINS, M. A. ARQUITETURA DA SALA DE AULA SOB A ÓTICA DOS USUÁRIOS. **Revista Projetar - Projeto e Percepção do Ambiente**, v. 5, n. 1, p. 49-61, 23 jan. 2020.

BERZBORN, Marco; BOMHARDT, Ramona; KLEIN, Johannes; *et al.* *The ITA-Toolbox: An Open Source MATLAB Toolbox for Acoustic Measurements and Signal Processing*. In: [s.l.]: **43th Annual German Congress on Acoustics**, Kiel (Germany), 6 Mar 2017 - 9 Mar 2017, 2017. Disponível em: <<http://publications.rwth-aachen.de/record/687308>>.

BISTAFA, Sylvio R.; BRADLEY, John S. *Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics*. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 107, n. 2, p. 861-875, 2000.

BKSV. **Analizador de frequência modelo 2250 Light com calibrador**. 1 fotografia. Disponível em: <https://www.bksv.com/pt-BR/products/sound-and-vibration-meters/sound-level-meters-and-vibration-meters/2250-series/Type-2250-L>. Acesso em: 05 nov. 2019

BOBRAN, Hans W.; BOBRAN-WITTFHOHT, Ingrid. **Handbuch der Bauphysik: Schallschutz-Raumakustik-Wärmeschutz-Feuchteschutz**. Leipzig, Alemanha: B.G. Teubner, 2014

BOÉCHAT, E. M. **Tratado de audiologia**. [s. l.], 2015. Disponível em: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsmib&AN=edsmib.000007419&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>>. Acesso em: 19 out. 2019.

BOTTERMAN, B.; GRÉE, G. C. H. Doudart de la; HORNIKX, M. C. J.; *et al.* *Modelling and optimization of the sound absorption of wood-wool cement boards*. **Applied Acoustics**, v. 129, p. 144–154, 2018.

BRANDÃO, Eric; LENZI, Arcanjo; PAUL, Stephan. *A review of the in situ impedance and sound absorption measurement techniques*. **Acta Acustica united with Acustica**, v. 101, n. 3, p. 443-463, 2015.

BRANDÃO, Eric. **Acústica de salas: projeto e modelagem**. São Paulo: Blucher, 2016.

BUCUR, Voichita. *The Acoustics of Wood*. 2 ed. Berlim, Alemanha: Springer, 2006.

CABEZA, Luisa F.; RINCÓN, Lidia; VILARIÑO, Virginia; *et al.* *Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 394–416, 2014.

CABRAL, Marina C. **Modelagem paramétrica de uma sala de aula**. 2019. 10 desenhos técnicos, color.

CANTELMO, Narjara Fonseca; FERREIRA, Daniel Furtado. Desempenho de testes de normalidade multivariados avaliado por simulação Monte Carlo. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1630-1636, Dez. 2007. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-70542007000600005&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542007000600005&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 02 jun. 2020.

CARO, Dario. *Carbon Footprint*. In: FATH, Brian (Org.). **Encyclopedia of Ecology (Second Edition)**. 2ª Edição. Oxford: Elsevier, 2019, p. 252–257. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095489107523>>. Acesso em 17 mar. 2020.

CARVALLO, R. M. M. **Fonoaudiologia informação para a formação: Procedimentos em Audiologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 2003. cap. 1, p. 2-6.

CFFA - CONSELHO FEDERAL DE FONOAUDIOLOGIA. **Guia de Orientações na Avaliação Audiológica Básica**. 2017. Disponível em: <<https://www.fonoaudiologia.org.br/cffa/wp-content/uploads/2013/07/Manual-de-Audiologia.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2020.

CHRISTENSEN, Claus Lyngge; RINDEL, Jens Holger. *A new scattering method that combines roughness and diffraction effects*. In: **Forum Acousticum, Budapest, Hungary**. 2005. p. 344-352.

COX, Trevor J.; D'ANTONIO, Peter. **Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application**. 3 ed. Boca Raton (EUA): CRC Press, 2017.

COWAN, James P. **The effects of sound on people**. [s.l.]: John Wiley & Sons, 2016.

CRIPPA, Julianna; BOEING, Leticia Cavassin; CAPARELLI, Ana Paula Angonese; *et al.* *A BIM–LCA integration technique to embodied carbon estimation applied on wall systems in Brazil*. **Built Environment Project and Asset Management**, v. 8, n. 5, p. 491–503, 2018.

DAVIS, Don; PATRONIS JR., Eugene; BROWN, Pat. **Sound System Engineering**. 4. ed. Burlington (EUA): Focal Press, 2013.

DE CONTO, Juliana. **Inteligibilidade de fala de usuários de protetores auriculares**. Orientador: Samir Nagi Yousri Gerges. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – UFSC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis, 2003.

DE LA GRÉE, GCH Doudart; YU, QL; BROUWERS, HJH. *Wood-wool cement board: potential and challenges*. In: **Int. Inorganic-Bonded Fiber Compos. Conf.** [s.l.: s.n.], 2014, p. 154–164.

DESARNAULDS, Victor; COSTANZO, Ezilda; CARVALHO, António; *et al.* *Sustainability of acoustic materials and acoustic characterization of sustainable materials*. In: **Proceedings of the 12th International Congress on Sound and Vibration**. [s.l.: s.n.], 2005.

DOLGUN, Anil; DEMIRHAN, Haydar. *Performance of nonparametric multiple comparison tests under heteroscedasticity, dependency, and skewed error distribution*. **Communications in Statistics - Simulation and Computation**, v. 46, n. 7, p. 5166–5183, 2017.

EN 300: *Oriented Strand Boards (OSB) - definitions, classification and specifications*. **European Committee for Standardization**. Bruxelas: 2006.

EN 323: *Wood-based panels – Determination of density*. **European Committee for Standardization**. Bruxelas: 1993.

EN 326: *Wood-based panels – Sampling, cutting and inspection*. **European Committee for Standardization**. Bruxelas: 1994.

ESTOKOVA, Adriana; VILCEKOVA, Silvia; PORHINCAK, Milan. *Analyzing Embodied Energy, Global Warming and Acidification Potentials of Materials in Residential Buildings*. **Procedia Engineering**, v. 180, p. 1675–1683, 2017.

EVANGELISTA, Patricia P. A.; KIPERSTOK, Asher; TORRES, Ednildo A.; *et al.* *Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA)*. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 748–761, 2018.

EVANS, Philip D. *Weathering of wood and wood composites*. In: ROWELL, ROGER M. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. 2. ed. Boca Raton (EUA): CRC Press, 2013.

EVEREST, F Alton. **Master handbook of acoustics**. Estados Unidos da América: McGraw-Hill, 2001.

FASOLD, Wolfgang; WINKLER, Hans **Bauphysikalische Entwurfslehre, Band 5: Raumakustik**. Berlim, Alemanha: VEB, 1976.

FERRO, Fabiane Salles; SILVA, Diogo Aparecido Lopes; LAHR, Francisco Antonio Rocco; *et al.* *Environmental aspects of oriented strand boards production. A Brazilian case study.* **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 710–719, 2018.

FRINGUELLINO, M.; SMITH, R. S. *Sound Transmission through Hollow Brick Walls.* **Building Acoustics**, v. 6, n. 3, p. 211–224, 1999.

FRIEDRICH, Adriana F. **Avaliação da contribuição do revestimento na isolamento sonora de paredes de alvenaria.** Orientadora: Dinara Xavier da Paixão. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSM, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Sata Maria, 2010.

FUCHS, Helmet. *Applied Acoustics: Concepts, Absorbers, and Silencers for Acoustical Comfort and Noise Control.* 1. ed. Berlim, Alemanha: Springer, 2013.

GALBRUN, Laurent; KITAPCI, Kivanc. *Speech intelligibility of English, Polish, Arabic and Mandarin under different room acoustic conditions.* **Applied Acoustics**, v. 114, p. 79–91, 2016.

GELFAND, Stanley A. *Essentials of Audiology.* 4ª edição. Nova Iorque: Thieme, 2016.

GRANZOTTO, Nicola; BELLA, Antonino Di; PIANA, Edoardo Alessio. *Prediction of the sound reduction index of clay hollow brick walls.* **Building Acoustics**, v. 27, n. 2, p. 155–168, 2020.

GRAS. **Condicionador de sinais modelo 12AL.** 1 fotografia. Disponível em: <https://www.gras.dk/products/power-module/constant-current-power-ccp/product/222-12al>. Acesso em: 05 nov. 2019.

GRAS. **Microfone modelo 46 AE.** 1 fotografia. Disponível em: <https://www.gras.dk/products/measurement-microphone-sets/product/140-46ae>. Acesso em: 05 nov. 2019.

GROM. **Dodecaedro.** 1 fotografia. Disponível em: <https://www.grom.com.br/app/webroot/files/3f57eda16fabde3bde839cf44f81414c>. Acesso em: 05 nov. 2019.

HAMMOND, Joe; WHITE, Paul: *Signals and systems.* In: HAVELOCK, David; KUWANO, Sonoko; VORLÄNDER, Michael (Ed.). *Handbook of signal processing in acoustics.* Springer Science & Business Media, 2008.

HARRIS, Cyril M. *Handbook of acoustical measurements and noise control.* Nova Iorque: McGraw-Hill, 1991.

HENG, R. B. W. *Acoustic absorption properties of materials.* **Construction and Building Materials**, v. 2, n. 2, p. 85–91, 1988.

HINES, W.; GOLDSMAN, David M.; BORROR, Connie M.; MONTGOMERY Douglas C. Tradução Vera Regina Lima de Faria e Flores. Revisão técnica Ana Maria Lima de Farias. **Probabilidade e estatística na engenharia.** 4. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2011.



HOLLANDER, Myles; WOLFE, Douglas A.; CHICKEN, Eric. *Nonparametric Statistical Methods*. 3. ed. Hoboken, EUA: John Wiley & Sons, 2014. (*Probability and Statistics*).

HOPKINS, Carl. *Sound insulation*. Oxford, Reino Unido: Elsevier, 2007.

HOSSAIN, Md Uzzal; POON, Chi Sun. *Global warming potential and energy consumption of temporary works in building construction: A case study in Hong Kong*. **Building and Environment**, v. 142, p. 171–179, 2018.

HOUTGAST, T; STEENEKEN, H JMi. *The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility*. **Acta Acustica United with Acustica**, v. 28, n. 1, p. 66–73, 1973.

HUANG, Lizhen; KRIGSVOLL, Guri; JOHANSEN, Fred; *et al.* *Carbon emission of global construction sector*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1906–1916, 2018.

ISO 10534-1. *Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 1: Method using standing wave ratio*. International Organization for Standardization, 1996.

ISO 10534-2. *Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method*. International Organization for Standardization, 1998.

ISO 354. *Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room*. International Organization for Standardization, 2003.

ISO 10140 - 2. *Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 2: Measurement of airborne sound insulation*. International Organization for Standardization, 2010.

ISO 10140 - 4. *Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 4: Measurement procedures and requirements*. International Organization for Standardization, 2010.

ISO 3741. *Acoustics -- Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure -- Precision methods for reverberation test rooms*. International Organization for Standardization, 2010.

ISO 717-1. *Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation*. International Organization for Standardization, 2013

ISO 10140-5. *Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 5: Requirements for test facilities and equipment*. International Organization for Standardization. 2014.

ISO 389-3. *Acoustics — Reference zero for the calibration of audiometric equipment — Part 3: Reference equivalent threshold vibratory force levels for pure tones and bone vibrators*. International Organization for Standardization. 2016

ISO 12354-1. *Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms*. International Organization for Standardization. 2017.

JORDAN, V. L. *Acoustical Design of Concert Halls and Theatres*. Londres: **Applied Sciences**, 1980.

KINSLER, Lawrence E; FREY, Austin R; COPPENS, Alan B; *et al.* **Fundamentals of acoustics**. 4ª edição. 560 p. ISBN 0-471-84789-5. Wiley-VCH, Dezembro 1999.

KLATTE, Maria; LACHMANN, Thomas; MEIS, Markus; *et al.* *Effects of noise and reverberation on speech perception and listening comprehension of children and adults in a classroom-like setting*. **Noise and Health**, v. 12, n. 49, p. 270, 2010.

KLEINER, Mendel; TICHY, Jiri. *Acoustics of Small Rooms*. 1. ed. Boca Raton (EUA): CRC Press, 2014.

KNECHT, Heather A.; NELSON, Peggy B.; WHITELAW, Gail M.; *et al.* *Background Noise Levels and Reverberation Times in Unoccupied Classrooms*. **American Journal of Audiology**, v. 11, n. 2, p. 65–71, 2002.

KOIZUMI, Tsujiuchi; TSUJIUCHI, N; ADACHI, A. *The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers*. **WIT Transactions on The Built Environment**, v. 59, 2002.

KUTTRUFF, Heinrich. **Room Acoustics**. 6. ed. Boca Raton (EUA): CRC Press, 2017.

LATHI, Bhagwandas Pannalal. **Sinais e Sistemas Lineares-2**. [s.l.]: Bookman, 2006.

LEOTTI, Vanessa Bielefeldt; BIRCK, Alan Rodrigues; RIBOLDI, João. Comparação dos Testes de Aderência à Normalidade Kolmogorov-smirnov, Anderson-Darling, Cramer-Von Mises e Shapiro-Wilk por Simulação. **Anais do 11º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agrônômica**, 2005.

LIDE, David R. (Ed.). **CRC handbook of chemistry and physics**. Nova Iorque: CRC press, 2004.

LIU, P. S.; CHEN, G. F. Chapter Three - Application of Porous Metals. *In*: LIU, P. S.; CHEN, G. F. (Orgs.). **Porous Materials**. Boston: Butterworth-Heinemann, 2014, p. 113–188. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124077881000034>>. Acesso em 18 abr. 2020.

LOESCH, C. **Probabilidade e estatística**. Rio de Janeiro: LTC, 2012. ISBN 978-85-216-2172-0. Disponível em: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsmib&AN=edsmib.000002729&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>>. Acesso em: 2 jun. 2020.

LONG, Marshall. **Architectural acoustics**. 2ª edição. [s.l.]: Elsevier, 2014.

MADERUELO-SANZ, Rubén; BARRIGÓN MORILLAS, Juan Miguel; MARTÍN-CASTIZO, Manuel; *et al.* *Acoustical performance of porous absorber made from recycled*

*rubber and polyurethane resin. Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 10, n. 3, p. 585–600, 2013.

MAEKAWA, Z.; RINDEL, J. H.; LORD, P. *Environmental and Architectural Acoustics*. 2. ed. Nova Iorque: Spon press, 2011.

MARTINS, Regina Helena Garcia; TAVARES, Elaine Lara Mendes; LIMA NETO, Arlindo C; *et al.* Surdez ocupacional em professores: um diagnóstico provável. *Rev Bras Otorrinolaringol*, v. 73, n. 2, p. 239–44, 2007.

MATHWORKS. **MATLAB**. Versão 9.4.0.813654. [Natick]: The MathWorks Inc, 2018.

MAXWELL, Lorraine E.; EVANS, Gary W. *The effects of noise on pre-school children's pre-reading skills. Journal of Environmental Psychology*, v. 20, n. 1, p. 91–97, 2000.

MECHEL, F. P. *Formulas of Acoustics*. 2. ed. Berlim, Alemanha: Springer, 2008.

MILLER, George A; HEISE, George A; LICHTEN, William. *The intelligibility of speech as a function of the context of the test materials. Journal of experimental psychology*, v. 41, n. 5, p. 329, 1951.

MOMMERTZ, Eckard. *Angle-dependent in-situ measurements of reflection coefficients using a subtraction technique. Applied Acoustics*, v. 46, n. 3, p. 251-263, 1995.

MULCAHY, John. **REW: Room acoustic software**. Versão 5.20. [s. 1.], 2019.

MÜLLER, Swen: *Measuring Transfer-Functions and Impulse Responses*. In: HAVELOCK, David; KUWANO, Sonoko; VORLÄNDER, Michael (Ed.). *Handbook of signal processing in acoustics*. Springer Science & Business Media, 2008.

NEUMANN. **Cabeça artificial modelo KU-100**. 1 fotografia. Disponível em: <<https://ende.neumann.com/ku-100>>. Acesso em: 05 nov. 2019.

NOGUEIRA, J. R. da S.; CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C. Desempenho de painel de vedação vertical externa em *Light Steel Framing* composto por placas de madeira mineralizada. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 289-307, jul./set. 2018.

NOH, MS Md et al. *Axial compression behaviour of reinforced wallethes fabricated using wood-wool cement panel*. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2018. p. 012154.

NORTHERN, J.L.; DOWNS, M.P. *Hearing in Children*. 4th ed. Baltimore, The Williams & Wilkins Co., 1991.

NOWOŚWIAT, Artur; OLECHOWSKA, Marcelina. *Investigation Studies on the Application of Reverberation Time. Archives of acoustics*, v. 41, n. 1, p. 15–26, 2016.

ODEON. **Odeon - manual do usuário**. 15ª versão. 2018. Disponível em: <<https://odeon.dk/download/Version15/OdeonManual.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2020.

ONEAL. **Caixa de som multi-uso**. 1 fotografia. Disponível em: <<http://www.oneal.com.br/produtos/detalhe/803>> . Acesso em: 05 nov. 2019.

PAIXÃO, Dinara Xavier da. **Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria, utilizando análise estatística de energia (SEA)**. Orientador: Samir Nagi Yousri Gerges. 182f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – UFSC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2002.

PALOMAR, I.; BARLUENGA, G.; PUENTES, J. *Lime–cement mortars for coating with improved thermal and acoustic performance*. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 306–314, 2015.

PARIS, E. T. L. *On the coefficient of sound-absorption measured by the reverberation method*. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 5, n. 29, p. 489-497, 1928.

PEKKARINEN, Eeva; VILJANEN, Vesa. *Acoustic conditions for speech communication in classrooms*. **Scandinavian audiology**, v. 20, n. 4, p. 257-263, 1991.

PEUTZ, V. M. A. *Articulation Loss of Consonants as a Criterion for Speech Transmission in a Room*. **J. Audio Eng. Soc**, v. 19, n. 11, p. 915–919, 1971.

PFRETZCHNER, Jaime; ALVES, Rosa M. Rodríguez. *Acoustical Absorption and Critical Thickness*. In: **Proceedings of the 17th International Congress on Acoustics, Architectural Acoustics**. Roma, Itália: [s.n.], 2001. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10261/5634>>. Acesso em: 23 abr. 2020.

PICAUT, J.; FORTIN, N. *I-Simpa, a graphical user interface devoted to host 3D sound propagation numerical codes*. In: **Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference**. [s.l.: s.n.], 2012. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00810893/document>>. Acesso em: 16 mar. 2020.

PIEKARSKI, Cassiano Moro; FRANCISCO, Antonio Carlos de; LUZ, Leila Mendes da; *et al.* *Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil*. **Science of The Total Environment**, v. 575, p. 103–111, 2017.

POHLERT, Thorsten. *The Pairwise Multiple Comparison of Mean Ranks Package (PMCMR)*. [s.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=PMCMR>>. Acesso em: 3 jun. 2020.

PRESONUS. **PreSonus Audiobox USB 96**. 1 fotografia. Disponível em: <https://www.presonus.com/products/AudioBox-USB-96/media>. Acesso em: 05 nov. 2019.

PULKKI, Ville; KARJALAINEN, Matti. *Communication acoustics: an introduction to speech, audio and psychoacoustics*. [s.l.]: John Wiley & Sons, 2015.

R CORE TEAM. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2019. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

RABELO, Alessandra Terra Vasconcelos; SANTOS, Juliana Nunes; OLIVEIRA, Rafaella Cristina; *et al.* *Effect of classroom acoustics on the speech intelligibility of students*. **CoDAS**, v. 26, p. 360–366, 2014.

REINTEN, Jikke; BRAAT-EGGEN, P Ella; HORNIKX, Maarten; *et al.* *The indoor sound environment and human task performance: A literature review on the role of room acoustics.* **Building and Environment**, v. 123, p. 315–332, 2017.

RENNIES, Jan; SCHEPKER, Henning; HOLUBE, Inga; *et al.* *Listening effort and speech intelligibility in listening situations affected by noise and reverberation.* **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 136, n. 5, p. 2642–2653, 2014.

RIBAS, C.Y.; DE M. PINTOS, F.; BEPLER, F.R.; *et al.* *Noise analysis of classrooms: Case study in Florianopolis/Brazil.* In: **Proceedings of the 6th Forum Acusticum**. Aalborg, Dinamarca: [s.n.], 2011, p. 2721–2724. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84866020600&partnerID=40&md5=01257c43f5b9a3da0d12883ee971d065>>. Acesso em: 4 jun. 2020.

ROSELL, Antoni Torras. *Methods of Measuring Impulse Responses in Architectural Acoustics*. Dissertação de Mestrado, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2099.1/8348>>. Acesso em: 18 out. 2019.

ROTHBUCHER, Martin; SHEN, Hao; DIEPOLD, Klaus. *Dimensionality Reduction in HRTF by Using Multiway Array Analysis.* In: RITTER, Helge; SAGERER, Gerhard; DILLMANN, Rüdiger; *et al.* (Orgs.). **Human Centered Robot Systems: Cognition, Interaction, Technology**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, p. 103–110. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-642-10403-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10403-9_11)>.

ROY, Kenneth P. *Global case studies of acoustics in classrooms.* In: **22nd International Congress on Acoustics ICA 2016 : Proceedings**. Buenos Aires - Argentina: Frederico Miyara, Ernesto Accolti, Vivian Pasch, Nilda Vechiatti, 2016, p. 350. Disponível em: <<http://ica2016.org.ar/website/proceedings/>>. Acesso em: 18 out. 2019.

ROYSTON, Patrick. *Approximating the Shapiro-Wilk W-test for non-normality.* **Statistics and computing**, v. 2, n. 3, p. 117-119, 1992.

RUSSO, Domenico; RUGGIERO, Alessandro. *Choice of the optimal acoustic design of a school classroom and experimental verification.* **Applied Acoustics**, v. 146, p. 280–287, 2019.

SABINE, Wallace Clement. *Collected papers on acoustics*. [s.l.]: Harvard University Press Cambridge, MA, 1927.

SALKIND, Neil J. *Encyclopedia of Measurement and Statistics*. 1. ed. Thousand Oaks, EUA: SAGE Publications, 2007.

SALA, Eeva; VILJANEN, Vesa. *Improvement of acoustic conditions for speech communication in classrooms.* **Applied Acoustics**, v. 45, n. 1, p. 81-91, 1995.

SANDANAYAKE, Malindu; LUO, Wenkai; ZHANG, Guomin. *Direct and indirect impact assessment in off-site construction—A case study in China.* **Sustainable Cities and Society**, v. 48, p. 101520, 2019.

SAVIOJA, Lauri; SVENSSON, U. Peter. *Overview of geometrical room acoustic modeling techniques.* **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 138, n. 2, p. 708–730, 2015.

SCHWERTZ, Bruno; DE CONTO, Juliana. **Listas de palavras foneticamente balanceadas**. 2019. Relatório técnico (Curso de Fonoaudiologia) – Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná, Irati, 2019.

SCHWERTZ, Bruno; DE CONTO, Juliana. **Relatório de coleta de dados**. 2019. Relatório técnico (Curso de Fonoaudiologia) – Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná, Irati, 2019.

SELTZ, Anne E. *Let the Word Be Heard: Be an Advocate for Good Classroom Acoustics*. **The ASHA Leader**, v. 6, n. 10, p. 4–20, 2001.

SEYBERT, A.; ROSS, D. *Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique*. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 61, n. 5, p. 1362–1370, 1977.

SHAPIRO, Samuel Sanford; WILK, Martin B. *An analysis of variance test for normality (complete samples)*. **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 1965.

SHIELD, Bridget M.; DOCKRELL, Julie E. *The effects of environmental and classroom noise on the academic attainments of primary school children*. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 123 1, p. 133–44, 2008.

SHIMIZU, Takafumi; ONAGA, Hiroshi. *Study on acoustic improvements by sound-absorbing panels and acoustical quality assessment of teleconference systems*. **Applied Acoustics**, v. 139, p. 101–112, 2018.

SILVA, Gabriel Mello. **Simulação computacional acústica de teatro de múltiplo uso com diferentes configurações de concha orquestral**. Orientadora: Stellamaris Rolla Bertolli. 217 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) – Unicamp, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2017.

SMARDZEWSKI, Jerzy; KAMISIŃSKI, Tadeusz; DZIURKA, Dorota; *et al.* *Sound absorption of wood-based materials*. **Holzforschung**, v. 69, n. 4, p. 431–439, 2015.

SOBOTOVA, L.; JURKOVICOVA, J.; AGHOVA, L.; VOLEKOVA, J. *Risks of road traffic noise interference with various activities in two noise annoyance surveys*. **Epidemiology**, v. 11, p. 59-63, 2000.

SORIANO, Florence P. *et al.* *Application of Wood-wool-Cement boards for Shop-fabricated Emergency Shelters in the Philippines*. In: **ACIAR PROCEEDINGS**. ACIAR; 1998, 2002. p. 153-165.

SOUSA, R. P. **Sustentabilidade e análise acústica: produção de blocos de concreto com utilização de resíduos da construção civil**. Orientador: Rodrigo Eduardo Catai. 99 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) – UTFPR, Curitiba, 2019.

STAN, Guy-Bart; EMBRECHTS, Jean-Jacques; ARCHAMBEAU, Dominique. *Comparison of different impulse response measurement techniques*. **Journal of the Audio Engineering Society**, v. 50, n. 4, p. 249–262, 2002.

TERASHIMA, F. J. H. **Caracterização das propriedades acústicas de materiais absorventes de pequenas espessuras com três métodos de avaliação**. Orientador: Key

Fonseca de Lima. Mestrado (Mestre em Engenharia Mecânica). Departamento de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2016.

THINKSTEP, Université de Liège. *Environmental Product Declaration according to ISO 14025 and EN 15804*. Disponível em: <[https://www.heraklith.com/sites/hera\\_com/files/2018-09/heraklith\\_homogeneous\\_board\\_R.pdf](https://www.heraklith.com/sites/hera_com/files/2018-09/heraklith_homogeneous_board_R.pdf)>. Acesso em: 28 maio 2019.

THOEMEN, Heiko. *Wood-based panels: an introduction for specialists*. [s.l.]: Brunel University Press, 2010.

TIESLER, Gerhart; MACHNER, Rainer; BROKMANN, Holger. *Classroom Acoustics and Impact on Health and Social Behaviour*. **6th International Building Physics Conference, IBPC 2015**, v. 78, p. 3108–3113, 2015.

TREMATERRA, Amelia; ANTONIO, Mezzero; IANNACE, Gino. *Use of green material for acoustic correction inside rooms*. **Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering**, v. 3, n. 4, p. 33-38, 2013.

VAN ECK, Nees; WALTMAN, Ludo. *Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping*. **Scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523–538, 2009.

VAŠINA, Martin; HUGHES, D. C.; HOROSHENKOV, K. V.; *et al.* *The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates*. **Applied Acoustics**, v. 67, n. 8, p. 787–796, 2006.

VÉR, Instan L.; BERANEK, Leo L. *Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications*. 2. ed. Hoboken, EUA: John Wiley & Sons, 2006.

VÖRLANDER, Michael. *Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm*. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 86, n. 1, p. 172–178, 1989.

VÖRLANDER, Michael. *Auralization: Fundamentals of acoustic, Modeling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. 1. ed. Berlim, Alemanha: Springer, 2008.

VÖRLANDER, Michael. *Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties*. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 133, n. 3, p. 1203–1213, 2013.

WANG, Chao-Nan; TORNG, Jiunn-Hwan. *Experimental study of the absorption characteristics of some porous fibrous materials*. **Applied Acoustics**, v. 62, n. 4, p. 447–459, 2001.

WARNOCK, A. C. C. *Sound transmission through concrete blocks with attached drywall*. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 90, n. 3, p. 1454-1463, 1991.

WASSILIEFF, Con. *Sound absorption of wood-based materials*. **Applied Acoustics**, v. 48, n. 4, p. 339–356, 1996.

WHEATER, Philip C.; COOK, Penny A. *Using Statistics to Understand the Environment*. 1. ed. Londres, Reino Unido: Routledge, 2000.

WERSÉNYI, György; ILLÉNYI, András. *Differences in dummy-head HRTFs caused by the acoustical environment near the head*. **Electronic Journal of Technical Acoustics**, v. 1, p. 1-15, 2005.

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

ZANNIN, Paulo Henrique Trombetta; FERREIRA, Andressa Maria Coelho. *Field measurements of acoustic quality in university classrooms*. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 68, p. 1053–1057, 2009.

ZANNIN, Paulo Henrique Trombetta; ZWIRTES, Daniele Petri Zanardo. *Evaluation of the acoustic performance of classrooms in public schools*. **Applied Acoustics**, v. 70, n. 4, p. 626–635, 2009.

ZENG, Xiangyang; CHRISTENSEN, Claus Lynge; RINDEL, Jens Holger. *Practical methods to define scattering coefficients in a room acoustics computer model*. **Applied Acoustics**, v. 67, n. 8, p. 771–786, 2006.

ZULKIFLI, Rozli; NOR, MJ Mohd; TAHIR, MF Mat; *et al.* *Acoustic properties of multi-layer coir fibres sound absorption panel*. **Journal of Applied Sciences**, v. 8, n. 20, p. 3709–3714, 2008.



**APÊNDICE A – ALGORITMO PARA CÁLCULO DO TEMPO DO COEFICIENTE  
DE REFLEXÃO NO TUBO DE IMPEDÂNCIA**

Algoritmo adaptado do trabalho de Terashima (2016).

```

close all
clear all
clc
%Leitura das funções de transferências
load H15.txt
H(:,1)=H15(:,3)+i*H15(:,4);
load H12.txt
H(:,2)=H12(:,3)+i*H12(:,4);
load H23.txt
H(:,3)=H23(:,3)+i*H23(:,4);
load H34.txt
H(:,4)=H34(:,3)+i*H34(:,4);
load H45.txt
H(:,5)=H45(:,3)+i*H45(:,4);
%Parâmetros
ros
sizeH=size(H);
qamos=sizeH(1,2);
Temp=20; %temperatura do ar [°C]
c=20.047*sqrt(273.15+Temp); %velocidade do som [m/s]
n=3201; %número de pontos
s(1,1)=4*0.05; %distancia entre microfones baixa frequência
l(1,1)=1*0.05; %distancia microfone 2 baixa frequência
s(1,2)=1*0.05; %distancia entre microfones alta frequência
l(1,2)=4*0.05; %distancia microfone 2 alta frequência
s(1,3)=1*0.05; %distancia entre microfones alta frequência
l(1,3)=3*0.05; %distancia microfone 2 alta frequência
s(1,4)=1*0.05; %distancia entre microfones alta frequência
l(1,4)=2*0.05; %distancia microfone 2 alta frequência
s(1,5)=1*0.05; %distancia entre microfones alta frequência
l(1,5)=1*0.05; %distancia microfone 2 alta frequência

%Coeficiente de reflexão -
for y=1:qamos;
    for x=1:n
        freq(x,y)=(x-1); %faixa de frequência
        k(x,y)=(2*pi*freq(x,y))/c;%número de onda
        R1(x,y)=exp(i*2*k(x,y)*(l(1,y)+s(1,y)));
        R2(x,y)=H(x,y)-exp(-i*k(x,y)*s(1,y));
        R3(x,y)=exp(i*k(x,y)*s(1,y))-H(x,y);
        R(x,y)=R1(x,y)*R2(x,y)/R3(x,y);
        ABSR(x,y)=abs(R(x,y));
        alfa(x,y)=1- ABSR(x,y)^2;
    end
end

alfa1(:,1)=freq(:,1);
alfa1(:,2)=[alfa(1:232,1);alfa(233:3201,3)];

save('A1.txt','alfa1','-ascii')

```

**APÊNDICE B – ALGORITMO PARA CÁLCULO DO TEMPO DE  
REVERBERAÇÃO NA CÂMARA REVERBERANTE**

```

% Elaborado por Luis Henrique Sant'Ana e Rodrigo Scoczynski Ribeiro
pathback = './';
% prefixo para as medições de interesse;
measurements = 'S';
% analisar antes a RI para delimitar os segundos valores de tcrop
tcrop = [nan 2.5]; %para medições na sala de aula
%tcrop = [nan 1.4]; %para medições na câmara reverberante
% taxa de amostragem
samplingRate = 48000;
% dimensão da figura (em cm)
res = [31 19];
% aquisição de RIs
run get_RI;
n = length(RI);
for j = 1 : n
% determinar primeiro valor de tcrop a partir do valor máximo
    [~,i] = max(abs(RI(j).time));
% determinar primeiro valor de tcrop a partir de amplitude 1e-5
%    [~,i] = min(abs(RI(j).time(1:i)-1e-5));
tcrop(1) = i/samplingRate;
% time crop
RI_crop(j) = ita_time_crop(RI(j),tcrop);
% filtro em bandas de 1/3 oitava
RI_oct(j) = ita_fractional_octavebands(RI_crop(j),'bandsperoctave',3);
% TR
TR_momentaneo = ita_roomacoustics(RI_crop(j),'T20','edcMethod',...
    'noCut','startThreshold',5,...
    'bandsPerOctave',3);

TR(:,j) = TR_momentaneo.T20.data;
end
% resultados
TR_mean = nanmean(TR,2);
% implementação da ISO 3741
% TR_std = sqrt((2.42*TR_mean./TR_momentaneo.T20.freqVector)...
%    +(nanstd(TR,0,2).^2/n));
% implementação da ISO 3382
%TR_std= 0.88.*TR_mean.*sqrt((1.90./(12*0.23.*TR_momentaneo.T20.freqVector.*TR_mean)));
% graficos
run plots;
save([measurements '.mat'],TR_mean,TR_std);
% .txt file
results = horzcat(octaves,TR_mean);
results2 = horzcat(octaves,TR_std);
dlmwrite([measurements '.txt'],results);
dlmwrite(['INCERTEZA.txt'],results2);

get_RI:
% aquisição das RIs
arquivosITA = dir([path measurements '*.ita']);
% arquivosITA = dir([path measurements 'pos1.ita']);
filenames = {};
for i = 1 : size(arquivosITA, 1)
    filenames = horzcat(filenames,arquivosITA(i).name);
end
cd(path);
RI = ita_read(filenames);
cd(pathback);

```

**APÊNDICE C – ALGORITMO PARA CÁLCULO DAS PARTES REAL E  
IMAGINÁRIA DA IMPEDÂNCIA NORMALIZADA AO AR**

```

import numpy as np
import cmath
import math as mt
#####
#load H15.txt
H15='H15.txt'
f=open(H15,"r")
lines=f.readlines()
H1=[]
H2=[]
H3=[]
H4=[]
H15={}
for x in lines:
    H1.append(x.split('\t')[0]) #columna 1
    H2.append(x.split('\t')[1]) #columna 2
    H3.append(x.split('\t')[2]) #columna 3
    H4.append(x.split('\t')[3]) #columna 4
f.close()

for i in range(0, len(H1)):
    H15[i,0]=float(H1[i])
    H15[i,1]=float(H2[i])
    H15[i,2]=float(H3[i])
    H15[i,3]=float(H4[i])

#load H12.txt
H12='H12.txt'
f=open(H12,"r")
lines=f.readlines()
H1=[]
H2=[]
H3=[]
H4=[]

H12={}
for x in lines:
    H1.append(x.split('\t')[0]) #columna 1
    H2.append(x.split('\t')[1]) #columna 2
    H3.append(x.split('\t')[2]) #columna 3
    H4.append(x.split('\t')[3]) #columna 4
f.close()

for i in range(0, len(H1)):
    H23[i,0]=float(H1[i])
    H23[i,1]=float(H2[i])
    H23[i,2]=float(H3[i])
    H23[i,3]=float(H4[i])

#load H34.txt

```

```

H34='H34.txt'
f=open(H34,"r")
lines=f.readlines()
H1=[]
H2=[]
H3=[]
H4=[]
H34={}
for x in lines:
    H1.append(x.split('\t')[0]) #coluna 1
    H2.append(x.split('\t')[1]) #coluna 2
    H3.append(x.split('\t')[2]) #coluna 3
    H4.append(x.split('\t')[3]) #coluna 4
f.close()
for i in range(0, len(H1)):
    H34[i,0]=float(H1[i])
    H34[i,1]=float(H2[i])
    H34[i,2]=float(H3[i])
    H34[i,3]=float(H4[i])
#load H45.txt
H45='H45.txt'
f=open(H45,"r")
lines=f.readlines()
H1=[]
H2=[]
H3=[]
H4=[]
H45={}
for x in lines:
    H1.append(x.split('\t')[0]) #coluna 1
    H2.append(x.split('\t')[1]) #coluna 2
    H3.append(x.split('\t')[2]) #coluna 3
    H4.append(x.split('\t')[3]) #coluna 4
f.close()
for i in range(0, len(H1)):
    H45[i,0]=float(H1[i])
    H45[i,1]=float(H2[i])
    H45[i,2]=float(H3[i])
    H45[i,3]=float(H4[i])
##### CONSTRUINDO A MATRIZ
#####
H=np.array(np.zeros((len(H1),5)), dtype =
complex)
for j in range(0, len(H1)):
    H[j,0]=complex(H15[j,2],H15[j,3])
    H[j,1]=complex(H12[j,2],H12[j,3])
    H[j,2]=complex(H23[j,2],H23[j,3])
    H[j,3]=complex(H34[j,2],H34[j,3])
    H[j,4]=complex(H45[j,2],H45[j,3])
##### PARAMETROS #####
uno=complex(1)
sizeH=np.size(H,1) #num de colunas
qamos=sizeH #[0,1]
Temp=20 #temperatura do ar [°C]
c=20.047*mt.sqrt(273.15+Temp) #velocidade do
som [m/s]
n=3201 #número de pontos
s={}
l={}
s[0,0]=4*0.05 #distancia entre microfones baixa
l[0,0]=1*0.05 #distancia microfone 2 baixa
s[0,1]=1*0.05 #distancia entre microfones alta
l[0,1]=4*0.05 #distancia microfone 2 alta
s[0,2]=1*0.05 #distancia entre microfones alta
l[0,2]=3*0.05 #distancia microfone 2 alta
s[0,3]=1*0.05 #distancia entre microfones alta
l[0,3]=2*0.05 #distancia microfone 2 alta
s[0,4]=1*0.05 #distancia entre microfones alta

```

```

l[0,4]=1*0.05 #distancia microfone 2 alta

#Coeficiente de reflexão
freq={}
k={}
R1={}
R2={}
R3={}
R={}
z={}
Zreal={}
Zimag={}
for y in range (0,qamos):
    for x in range (0,n):
        freq[x,y]=x #[x-1]; #faixa de frequência
        k[x,y]=(2*mt.pi*freq[x,y])/c #número de onda

R1[x,y]=np.exp(complex(0,2*k[x,y]*(l[0,y]+s[0,y])
))
R2[x,y]=H[x,y]-np.exp(complex(0,-
1*k[x,y]*s[0,y]))

```

```

R3[x,y]=np.exp(complex(0,k[x,y]*s[0,y]))-
H[x,y]
R[x,y]=R1[x,y]*R2[x,y]/R3[x,y]
z[x,y]=uno/((uno+R[x,y])/(uno-R[x,y]))
#acceptance=1/impedance

Zz=np.array(np.zeros((n,3)), dtype = float)
for i in range(0,n):
    Zz[i,0]=freq[i,0]
    for t in range(0,248):
        Zreal[t]=z[t,0].real
        Zimag[t]=z[t,0].imag
    for t in range(248,3201):
        Zreal[t]=z[t,2].real
        Zimag[t]=z[t,2].imag

    Zz[i,1]=Zreal[i]
    Zz[i,2]=Zimag[i]
np.savetxt('test.txt', Zz, newline='\n')

```



**APÊNDICE D – ALGORITMO PARA CÁLCULO DO ÍNDICE DE ABSORÇÃO  
SONORA COM INCIDÊNCIA ALEATÓRIA E SUA ANÁLISE ESTATÍSTICA**

```

A1<-
read.table(file='PAINELAMOSTRA1.txt',sep="
",header=FALSE)
A2<-read.table(file=' PAINELAMOSTRA
2.txt',sep=" ",header=FALSE)
A3<-read.table(file=' PAINELAMOSTRA
3.txt',sep=" ",header=FALSE)
A4<-read.table(file=' PAINELAMOSTRA
4.txt',sep=" ",header=FALSE)
A5<-read.table(file=' PAINELAMOSTRA
5.txt',sep=" ",header=FALSE)
A6<-read.table(file=' PAINELAMOSTRA
6.txt',sep=" ",header=FALSE)
A7<-read.table(file=' PAINELAMOSTRA
7.txt',sep=" ",header=FALSE)
A8<-read.table(file=' PAINELAMOSTRA
8.txt',sep=" ",header=FALSE)
A9<-read.table(file=' PAINELAMOSTRA
9.txt',sep=" ",header=FALSE)
A10<-read.table(file=' PAINELAMOSTRA
10.txt',sep=" ",header=FALSE)

B1<-as.matrix(A1)
B2<-as.matrix(A2)
B3<-as.matrix(A3)
B4<-as.matrix(A4)
B5<-as.matrix(A5)
B6<-as.matrix(A6)
B7<-as.matrix(A7)
B8<-as.matrix(A8)
B9<-as.matrix(A9)
B10<-as.matrix(A10)

Freq<-B1[101:2001,1]

Re1<-B1[101:2001,2]
Re2<-B2[101:2001,2]
Re3<-B3[101:2001,2]
Re4<-B4[101:2001,2]
Re5<-B5[101:2001,2]
Re6<-B6[101:2001,2]
Re7<-B7[101:2001,2]
Re8<-B8[101:2001,2]
Re9<-B9[101:2001,2]
Re10<-B10[101:2001,2]

Im1<-B1[101:2001,3]
Im2<-B2[101:2001,3]
Im3<-B3[101:2001,3]
Im4<-B4[101:2001,3]
Im5<-B5[101:2001,3]
Im6<-B6[101:2001,3]
Im7<-B7[101:2001,3]
Im8<-B8[101:2001,3]
Im9<-B9[101:2001,3]
Im10<-B10[101:2001,3]

Alfa1<-vector(mode="logical",length = 1901)
Alfa2<-vector(mode="logical",length=1901)
Alfa3<-vector(mode="logical",length=1901)
Alfa4<-vector(mode="logical",length=1901)
Alfa5<-vector(mode="logical",length=1901)
Alfa6<-vector(mode="logical",length=1901)
Alfa7<-vector(mode="logical",length=1901)
Alfa8<-vector(mode="logical",length=1901)
Alfa9<-vector(mode="logical",length=1901)
Alfa10<-vector(mode="logical",length=1901)

for (x in 1:1901){
  Alfa1[x]<-8*Re1[x]*(1+((Re1[x]^2-
Im1[x]^2)/Im1[x])*atan((Im1[x]/(Re1[x]^2+Im1[x]
^2+Re1[x])))-
Re1[x]*log(((Re1[x]+1)^2+Im1[x]^2)/(Re1[x]^2+I
m1[x]^2)))
  Alfa2[x]<-8*Re2[x]*(1+((Re2[x]^2-
Im2[x]^2)/Im2[x])*atan((Im2[x]/(Re2[x]^2+Im2[x]
^2+Re2[x])))-
Re2[x]*log(((Re2[x]+1)^2+Im2[x]^2)/(Re2[x]^2+I
m2[x]^2)))
  Alfa3[x]<-8*Re3[x]*(1+((Re3[x]^2-
Im3[x]^2)/Im3[x])*atan((Im3[x]/(Re3[x]^2+Im3[x]
^2+Re3[x])))-
Re3[x]*log(((Re3[x]+1)^2+Im3[x]^2)/(Re3[x]^2+I
m3[x]^2)))
  Alfa4[x]<-8*Re4[x]*(1+((Re4[x]^2-
Im4[x]^2)/Im4[x])*atan((Im4[x]/(Re4[x]^2+Im4[x]
^2+Re4[x])))-
Re4[x]*log(((Re4[x]+1)^2+Im4[x]^2)/(Re4[x]^2+I
m4[x]^2)))
  Alfa5[x]<-8*Re5[x]*(1+((Re5[x]^2-
Im5[x]^2)/Im5[x])*atan((Im5[x]/(Re5[x]^2+Im5[x]
^2+Re5[x])))-
Re5[x]*log(((Re5[x]+1)^2+Im5[x]^2)/(Re5[x]^2+I
m5[x]^2)))
  Alfa6[x]<-8*Re6[x]*(1+((Re6[x]^2-
Im6[x]^2)/Im6[x])*atan((Im6[x]/(Re6[x]^2+Im6[x]
^2+Re6[x])))-
Re6[x]*log(((Re6[x]+1)^2+Im6[x]^2)/(Re6[x]^2+I
m6[x]^2)))
  Alfa7[x]<-8*Re7[x]*(1+((Re7[x]^2-
Im7[x]^2)/Im7[x])*atan((Im7[x]/(Re7[x]^2+Im7[x]
^2+Re7[x])))-
Re7[x]*log(((Re7[x]+1)^2+Im7[x]^2)/(Re7[x]^2+I
m7[x]^2)))
  Alfa8[x]<-8*Re8[x]*(1+((Re8[x]^2-
Im8[x]^2)/Im8[x])*atan((Im8[x]/(Re8[x]^2+Im8[x]
^2+Re8[x])))-
Re8[x]*log(((Re8[x]+1)^2+Im8[x]^2)/(Re8[x]^2+I
m8[x]^2)))
  Alfa9[x]<-8*Re9[x]*(1+((Re9[x]^2-
Im9[x]^2)/Im9[x])*atan((Im9[x]/(Re9[x]^2+Im9[x]
^2+Re9[x])))-
Re9[x]*log(((Re9[x]+1)^2+Im9[x]^2)/(Re9[x]^2+I
m9[x]^2)))
  Alfa10[x]<-8*Re10[x]*(1+((Re10[x]^2-
Im10[x]^2)/Im10[x])*atan((Im10[x]/(Re10[x]^2+I
m10[x]^2+Re10[x])))-
Re10[x]*log(((Re10[x]+1)^2+Im10[x]^2)/(Re10[x]
^2+Im10[x]^2)))
}

```

```

}
M=matrix(nrow=1901,ncol=11)
M[,1]<-Freq
M[,2]<-Alfa1
M[,3]<-Alfa2
M[,4]<-Alfa3
M[,5]<-Alfa4
M[,6]<-Alfa5
M[,7]<-Alfa6
M[,8]<-Alfa7
M[,9]<-Alfa8
M[,10]<-Alfa9
M[,11]<-Alfa10
write.table(M,file="MDF12dif.txt",sep =
";",col.names = FALSE,row.names = FALSE)

#INTERVALO DE CONFIANÇA
B <- M

J=matrix(nrow=1901,ncol=14)
for (i in 1:1901){
  C <- c(B[i, 2:11])
  D<-shapiro.test(C)
  E<-D$p.value
  if (E>=0.05){
    F<-t.test(C)
    G<-as.matrix(F$conf.int)
    H<-G[1,1]
    I<-G[2,1]
  } else {
    F<-wilcox.test(C,conf.int = TRUE,conf.level =
0.95)
    G<-as.matrix(F$conf.int)
    H<-G[1,1]
    I<-G[2,1]
  }
  J[i,1]<-E
  J[i,2]<-H
  J[i,3]<-I
  for (z in 2:11){
    if ((B[i,z]>=J[i,2])&(B[i,z]<=J[i,3])){
      J[i,z+2]=(B[i,z])
    } else {
      J[i,z+2]=NA
    }
  }
  J[i,14]=mean(c(J[i,4:13]),na.rm = TRUE)
}

write.table(J,file="CONFPAINEL.txt",sep =
";",col.names = FALSE,row.names = FALSE)
}

U=matrix(nrow=1901,ncol=2)
U[,1]<-Freq
U[,2]<-J[,14]
write.table(U,file="PAINELVALUES.txt",sep =
";",col.names = FALSE,row.names = FALSE)

```

**APÊNDICE E – COEFICIENTES DE ABSORÇÃO E ESPALHAMENTO  
ADOTADOS NA MODELAGEM DE ACÚSTICA GEOMÉTRICA**

Quadro 40 – Coeficientes de absorção utilizados na modelagem acústica (continua)

Material	Aplicação	Fonte	Coeficientes de absorção por frequência (Hz)													
			100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
<i>Empty chairs, upholstered with cloth cover</i>	Assentos e encostos das cadeiras	VORLANDER, 2007	0,44	0,44	0,44	0,60	0,60	0,60	0,77	0,77	0,77	0,89	0,89	0,89	0,82	0,82
<i>Curtains, cotton cloth (0,33 kg/m<sup>2</sup>) folded to 1/2 area</i>	Cortinas	DALENBÄCK, 2000 apud COX; D'ANTONIO, 2017	0,07	0,07	0,07	0,31	0,31	0,31	0,49	0,49	0,49	0,81	0,81	0,81	0,66	0,66
<i>Plasterboard on frame, 9,5 mm boards, 100 mm cavity filled with mineral wool</i>	Vedação vertical em gesso acartonado	FASOLD e WINKLER, 1976	0,28	0,28	0,28	0,14	0,14	0,14	0,09	0,09	0,09	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05
<i>Glass, ordinary window glass</i>	Janelas	HARRIS, 1991	0,35	0,35	0,35	0,25	0,25	0,25	0,18	0,18	0,18	0,12	0,12	0,12	0,07	0,07
<i>Lime cement plaster</i>	Vedação vertical em alvenaria e teto	BOBRAN; BOBRAN, 2014	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05
<i>Plywood paneling, 1 cm thick</i>	Mesas dos alunos e do professor	HARRIS, 1991	0,28	0,28	0,28	0,22	0,22	0,22	0,17	0,17	0,17	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10
<i>Linoleum or vinyl stuck to concrete</i>	Piso	PETERSEN, 1973 apud COX; D'ANTONIO, 2017	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
<i>Solid wooden door</i>	Porta de entrada	BOBRAN; BOBRAN, 2014	0,14	0,14	0,14	0,10	0,10	0,10	0,06	0,06	0,06	0,08	0,08	0,08	0,10	0,10
<i>Smooth unpainted concrete</i>	Quadro-negro	BOBRAN; BOBRAN, 2014	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
<i>Wood-Wool Cement Board, espessura de 50mm (palha grossa)</i>	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,11	0,14	0,14	0,16	0,17	0,21	0,26	0,32	0,41	0,62	0,68	0,58	0,51	0,58
<i>Wood-Wool Cement Board, espessura de 25mm (palha grossa)</i>	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,08	0,10	0,10	0,11	0,08	0,09	0,13	0,14	0,14	0,15	0,24	0,35	0,46	0,63
<i>Wood-Wool Cement Board, espessura de 17mm (palha grossa)</i>	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,06	0,09	0,09	0,08	0,06	0,06	0,10	0,10	0,07	0,07	0,14	0,24	0,37	0,50
<i>Wood-Wool Cement Board, espessura de 25mm (palha superfina)</i>	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,09	0,11	0,10	0,10	0,08	0,10	0,13	0,15	0,18	0,21	0,34	0,58	0,72	0,54
<i>Oriented Strand Board, espessura de 8mm</i>	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,07	0,09	0,08	0,08	0,04	0,04	0,09	0,09	0,07	0,04	0,10	0,18	0,22	0,27

**Quadro 40 – Coeficientes de absorção utilizados na modelagem acústica (conclusão).**

Material	Aplicação	Fonte	Coeficientes de absorção por frequência (Hz)													
			100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
<i>Oriented Strand Board</i> , espessura de 12mm	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,07	0,09	0,09	0,09	0,05	0,05	0,10	0,12	0,10	0,07	0,15	0,28	0,38	0,30
<i>Oriented Strand Board</i> , espessura de 25mm	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,10	0,13	0,13	0,13	0,10	0,10	0,15	0,18	0,18	0,18	0,28	0,41	0,38	0,35
<i>Medium Density Fiberboard</i> , espessura de 9mm	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,07	0,10	0,10	0,10	0,06	0,07	0,11	0,12	0,09	0,07	0,10	0,17	0,18	0,20
<i>Medium Density Fiberboard</i> , espessura de 12mm	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,06	0,09	0,09	0,09	0,05	0,05	0,09	0,09	0,07	0,04	0,08	0,15	0,16	0,18
<i>Medium Density Fiberboard</i> , espessura de 15mm	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,07	0,09	0,08	0,08	0,03	0,03	0,08	0,08	0,07	0,04	0,06	0,15	0,21	0,20

Fonte: Autor (2020).

**Quadro 41 – Coeficientes de espalhamento utilizados na modelagem acústica (continua)**

Material	Aplicação	Fonte	Coeficientes de espalhamento por frequência (Hz)													
			100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
<i>Empty chairs, upholstered with cloth cover</i>	Assentos e encostos das cadeiras	VORLANDER, 2007	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25
<i>Curtains, cotton cloth (0,33 kg/m<sup>2</sup>) folded to 1/2 area</i>	Cortinas	DALENBÄCK, 2000 apud COX; D'ANTONIO, 2017	0,08	0,10	0,15	0,25	0,40	0,50	0,55	0,70	0,80	0,85	0,90	0,90	0,90	0,90
<i>Plasterboard on frame, 9,5 mm boards, 100 mm cavity filled with mineral wool</i>	Vedação vertical em gesso acartonado	FASOLD e WINKLER, 1976	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25
<i>Glass, ordinary window glass</i>	Janelas	HARRIS, 1991	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25
<i>Lime cement plaster</i>	Vedação vertical em alvenaria e teto	BOBRAN; BOBRAN, 2014	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25
<i>Plywood paneling, 1 cm thick</i>	Mesas dos alunos e do professor	HARRIS, 1991	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25
<i>Linoleum or vinyl stuck to concrete</i>	Piso	PETERSEN, 1973 apud COX; D'ANTONIO, 2017	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25

**Quadro 41 - Coeficientes de espalhamento utilizados na modelagem acústica (conclusão).**

Material	Aplicação	Fonte	Coeficientes de espalhamento por frequência (Hz)														
			100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	
<i>Solid wooden door</i>	Porta de entrada	BOBRAN; BOBRAN, 2014	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25
<i>Smooth unpainted concrete</i>	Quadro-negro	BOBRAN; BOBRAN, 2014	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25
Wood-Wool Cement Board, espessura de 50mm (palha grossa)	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25
Wood-Wool Cement Board, espessura de 25mm (palha grossa)	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25
Wood-Wool Cement Board, espessura de 17mm (palha grossa)	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25
Wood-Wool Cement Board, espessura de 25mm (palha superfina)	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25
Oriented Strand Board, espessura de 8mm	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25
Oriented Strand Board, espessura de 12mm	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25
Oriented Strand Board, espessura de 25mm	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25
Medium Density Fiberboard, espessura de 9mm	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25
Medium Density Fiberboard, espessura de 12mm	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25
Medium Density Fiberboard, espessura de 15mm	Condicionamento acústico	AUTOR, 2020	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,25

Fonte: Autor (2020).

**APÊNDICE F – ALGORITMO PARA ANÁLISE DAS DIFERENÇAS MÍNIMAS  
PERCEPTÍVEIS ENTRE OS VALORES DE DEFINIÇÃO ( $D_{50}$ ) E EDT**



```

#Leitura dos arquivos com os valores para cada posição de receptor
A<-read.table(file='EDT.txt',sep="\t",header=FALSE)
#A<-read.table(file='DEFINICAO.txt',sep="\t",header=FALSE)
Mic1<-A[,1]
Mic2<-A[,2]
Mic3<-A[,3]
Mic4<-A[,4]
Mic5<-A[,5]
Mic6<-A[,6]
Mic7<-A[,7]
Mic8<-A[,8]

#Definição
# for (i in 1:15){
#   for (j in (i+1):16){
#     if (abs(Mic8[i]-Mic8[j])>=5){
#       print(paste(LETTERS[i+6],LETTERS[j+6],Mic8[i],Mic8[j],(Mic8[i]-Mic8[j]),sep=";"))
#     }
#   }
#   else {
#     print("ok")
#   }
# }

#EDT
for (i in 1:15){
  for (j in (i+1):16){
    if (Mic8[i]>Mic8[j]&((Mic8[i]-Mic8[j])/Mic8[j])>=0.05){
      print(paste(LETTERS[i+6],LETTERS[j+6],Mic8[i],Mic8[j],((Mic8[i]-Mic8[j])/Mic8[j]),sep=";"))
    }

    else if (Mic8[i]<Mic8[j]&((Mic8[j]-Mic8[i])/Mic8[i])>=0.05){
      print(paste(LETTERS[i+6],LETTERS[j+6],Mic8[i],Mic8[j],((Mic8[j]-Mic8[i])/Mic8[i]),sep=";"))
    }
    else{
      print("ok")
    }
  }
}

```

**APÊNDICE G – ALGORITMO PARA REDUÇÃO DA AMPLITUDE DO ÁUDIO  
RESULTANTE DA CONVOLUÇÃO PARA A AMPLITUDE MEDIDA DO  
ÁUDIO GRAVADO**

```
%Exemplo para o painel tipo WWCB50 com a
Lista nº 1
%Desenvolvido por Rodrigo Scoczynski Ribeiro
```

```
RI={'A','B','C','D'};%configuração das RI
```

```
A=ita_read('Lista1.wav')
for j=1:size(RI,2)
B=ita_read(strcat('RIseat',char(RI(j)),'WWCB50.ita'
))
C=ita_read(strcat('Lista1seat',char(RI(j)),'WWCB5
0.ita')) %lista gravada
X = (round(C.trackLength,5)-0.00001)
X1 = ita_time_crop(C, [0 X])
y = ita_convolve(B,A)
conv1 = ita_time_crop(y, [0 X]) %convolução da
RI com o arquivo original da lista 1
```

```
%O intervalo de tempo corresponde ao momento
```

```
que a palavra ou frase existe no áudio
A1=ita_time_crop(conv1,[0 0.7786])
A2=ita_time_crop(conv1,[1.5 2.218])
A3=ita_time_crop(conv1,[3.004 3.805])
A4=ita_time_crop(conv1,[4.501 5.184])
A5=ita_time_crop(conv1,[5.991 6.873])
A6=ita_time_crop(conv1,[7.762 8.569])
A7=ita_time_crop(conv1,[9.364 10.17])
A8=ita_time_crop(conv1,[11 11.88])
A9=ita_time_crop(conv1,[12.75 13.4])
A10=ita_time_crop(conv1,[14.16 15.03])
A11=ita_time_crop(conv1,[15.78 16.53])
A12=ita_time_crop(conv1,[17.2 17.96])
A13=ita_time_crop(conv1,[18.72 19.53])
A14=ita_time_crop(conv1,[20.21 21.05])
A15=ita_time_crop(conv1,[21.86 22.74])
A16=ita_time_crop(conv1,[23.33 24.17])
A17=ita_time_crop(conv1,[24.98 25.72])
A18=ita_time_crop(conv1,[26.61 27.47])
A19=ita_time_crop(conv1,[28.18 29.08])
A20=ita_time_crop(conv1,[29.91 30.78])
A21=ita_time_crop(conv1,[31.58 32.38])
A22=ita_time_crop(conv1,[33.36 35.13])
A23=ita_time_crop(conv1,[37.27 38.94])
A24=ita_time_crop(conv1,[41.19 42.65])
A25=ita_time_crop(conv1,[44.82 46.7])
A26=ita_time_crop(conv1,[49.08 51.1])
```

```
[B11 B12]=ita_split(A1,[1],[2])
B1A=ita_levelovertime(B11)
B1B=ita_levelovertime(B12)
```

```
[B21 B22]=ita_split(A2,[1],[2])
B2A=ita_levelovertime(B21)
B2B=ita_levelovertime(B22)
```

```
[B31 B32]=ita_split(A3,[1],[2])
B3A=ita_levelovertime(B31)
B3B=ita_levelovertime(B32)
```

```
[B41 B42]=ita_split(A4,[1],[2])
```

```
B4A=ita_levelovertime(B41)
B4B=ita_levelovertime(B42)
```

```
[B51 B52]=ita_split(A5,[1],[2])
B5A=ita_levelovertime(B51)
B5B=ita_levelovertime(B52)
```

```
[B61 B62]=ita_split(A6,[1],[2])
B6A=ita_levelovertime(B61)
B6B=ita_levelovertime(B62)
```

```
[B71 B72]=ita_split(A7,[1],[2])
B7A=ita_levelovertime(B71)
B7B=ita_levelovertime(B72)
```

```
[B81 B82]=ita_split(A8,[1],[2])
B8A=ita_levelovertime(B81)
B8B=ita_levelovertime(B82)
```

```
[B91 B92]=ita_split(A9,[1],[2])
B9A=ita_levelovertime(B91)
B9B=ita_levelovertime(B92)
```

```
[B101 B102]=ita_split(A10,[1],[2])
B10A=ita_levelovertime(B101)
B10B=ita_levelovertime(B102)
```

```
[B111 B112]=ita_split(A11,[1],[2])
B11A=ita_levelovertime(B111)
B11B=ita_levelovertime(B112)
```

```
[B121 B122]=ita_split(A12,[1],[2])
B12A=ita_levelovertime(B121)
B12B=ita_levelovertime(B122)
```

```
[B131 B132]=ita_split(A13,[1],[2])
B13A=ita_levelovertime(B131)
B13B=ita_levelovertime(B132)
```

```
[B141 B142]=ita_split(A14,[1],[2])
B14A=ita_levelovertime(B141)
B14B=ita_levelovertime(B142)
```

```
[B151 B152]=ita_split(A15,[1],[2])
B15A=ita_levelovertime(B151)
B15B=ita_levelovertime(B152)
```

```
[B161 B162]=ita_split(A16,[1],[2])
B16A=ita_levelovertime(B161)
B16B=ita_levelovertime(B162)
```

```
[B171 B172]=ita_split(A17,[1],[2])
B17A=ita_levelovertime(B171)
B17B=ita_levelovertime(B172)
```

```
[B181 B182]=ita_split(A18,[1],[2])
B18A=ita_levelovertime(B181)
B18B=ita_levelovertime(B182)
```

[B191 B192]=ita\_split(A19,[1],[2])  
 B19A=ita\_levelovertime(B191)  
 B19B=ita\_levelovertime(B192)

[D11 D12]=ita\_split(C1,[1],[2])  
 D1C=ita\_levelovertime(D11)  
 D1D=ita\_levelovertime(D12)

[B201 B202]=ita\_split(A20,[1],[2])  
 B20A=ita\_levelovertime(B201)  
 B20B=ita\_levelovertime(B202)

[D21 D22]=ita\_split(C2,[1],[2])  
 D2C=ita\_levelovertime(D21)  
 D2D=ita\_levelovertime(D22)

[B211 B212]=ita\_split(A21,[1],[2])  
 B21A=ita\_levelovertime(B211)  
 B21B=ita\_levelovertime(B212)

[D31 D32]=ita\_split(C3,[1],[2])  
 D3C=ita\_levelovertime(D31)  
 D3D=ita\_levelovertime(D32)

[B221 B222]=ita\_split(A22,[1],[2])  
 B22A=ita\_levelovertime(B221)  
 B22B=ita\_levelovertime(B222)

[D41 D42]=ita\_split(C4,[1],[2])  
 D4C=ita\_levelovertime(D41)  
 D4D=ita\_levelovertime(D42)

[B231 B232]=ita\_split(A23,[1],[2])  
 B23A=ita\_levelovertime(B231)  
 B23B=ita\_levelovertime(B232)

[D51 D52]=ita\_split(C5,[1],[2])  
 D5C=ita\_levelovertime(D51)  
 D5D=ita\_levelovertime(D52)

[B241 B242]=ita\_split(A24,[1],[2])  
 B24A=ita\_levelovertime(B241)  
 B24B=ita\_levelovertime(B242)

[D61 D62]=ita\_split(C6,[1],[2])  
 D6C=ita\_levelovertime(D61)  
 D6D=ita\_levelovertime(D62)

[B251 B252]=ita\_split(A25,[1],[2])  
 B25A=ita\_levelovertime(B251)  
 B25B=ita\_levelovertime(B252)

[D71 D72]=ita\_split(C7,[1],[2])  
 D7C=ita\_levelovertime(D71)  
 D7D=ita\_levelovertime(D72)

[B261 B262]=ita\_split(A26,[1],[2])  
 B26A=ita\_levelovertime(B261)  
 B26B=ita\_levelovertime(B262)

[D81 D82]=ita\_split(C8,[1],[2])  
 D8C=ita\_levelovertime(D81)  
 D8D=ita\_levelovertime(D82)

C1=ita\_time\_crop(X1,[0 0.7786])  
 C2=ita\_time\_crop(X1,[1.5 2.218])  
 C3=ita\_time\_crop(X1,[3.004 3.805])  
 C4=ita\_time\_crop(X1,[4.501 5.184])  
 C5=ita\_time\_crop(X1,[5.991 6.873])  
 C6=ita\_time\_crop(X1,[7.762 8.569])  
 C7=ita\_time\_crop(X1,[9.364 10.17])  
 C8=ita\_time\_crop(X1,[11 11.88])  
 C9=ita\_time\_crop(X1,[12.75 13.4])  
 C10=ita\_time\_crop(X1,[14.16 15.03])  
 C11=ita\_time\_crop(X1,[15.78 16.53])  
 C12=ita\_time\_crop(X1,[17.2 17.96])  
 C13=ita\_time\_crop(X1,[18.72 19.53])  
 C14=ita\_time\_crop(X1,[20.21 21.05])  
 C15=ita\_time\_crop(X1,[21.86 22.74])  
 C16=ita\_time\_crop(X1,[23.33 24.17])  
 C17=ita\_time\_crop(X1,[24.98 25.72])  
 C18=ita\_time\_crop(X1,[26.61 27.47])  
 C19=ita\_time\_crop(X1,[28.18 29.08])  
 C20=ita\_time\_crop(X1,[29.91 30.78])  
 C21=ita\_time\_crop(X1,[31.58 32.38])  
 C22=ita\_time\_crop(X1,[33.36 35.13])  
 C23=ita\_time\_crop(X1,[37.27 38.94])  
 C24=ita\_time\_crop(X1,[41.19 42.65])  
 C25=ita\_time\_crop(X1,[44.82 46.7])  
 C26=ita\_time\_crop(X1,[49.08 51.1])

[D91 D92]=ita\_split(C9,[1],[2])  
 D9C=ita\_levelovertime(D91)  
 D9D=ita\_levelovertime(D92)

[D101 D102]=ita\_split(C10,[1],[2])  
 D10C=ita\_levelovertime(D101)  
 D10D=ita\_levelovertime(D102)

[D111 D112]=ita\_split(C11,[1],[2])  
 D11C=ita\_levelovertime(D111)  
 D11D=ita\_levelovertime(D112)

[D121 D122]=ita\_split(C12,[1],[2])  
 D12C=ita\_levelovertime(D121)  
 D12D=ita\_levelovertime(D122)

[D131 D132]=ita\_split(C13,[1],[2])  
 D13C=ita\_levelovertime(D131)  
 D13D=ita\_levelovertime(D132)

[D141 D142]=ita\_split(C14,[1],[2])  
 D14C=ita\_levelovertime(D141)  
 D14D=ita\_levelovertime(D142)

[D151 D152]=ita\_split(C15,[1],[2])  
 D15C=ita\_levelovertime(D151)  
 D15D=ita\_levelovertime(D152)

```
[D161 D162]=ita_split(C16,[1],[2])
D16C=ita_levelovertime(D161)
D16D=ita_levelovertime(D162)
```

```
[D171 D172]=ita_split(C17,[1],[2])
D17C=ita_levelovertime(D171)
D17D=ita_levelovertime(D172)
```

```
[D181 D182]=ita_split(C18,[1],[2])
D18C=ita_levelovertime(D181)
D18D=ita_levelovertime(D182)
```

```
[D191 D192]=ita_split(C19,[1],[2])
D19C=ita_levelovertime(D191)
D19D=ita_levelovertime(D192)
```

```
[D201 D202]=ita_split(C20,[1],[2])
D20C=ita_levelovertime(D201)
D20D=ita_levelovertime(D202)
```

```
[D211 D212]=ita_split(C21,[1],[2])
D21C=ita_levelovertime(D211)
D21D=ita_levelovertime(D212)
```

```
[D221 D222]=ita_split(C22,[1],[2])
D22C=ita_levelovertime(D221)
D22D=ita_levelovertime(D222)
```

```
[D231 D232]=ita_split(C23,[1],[2])
D23C=ita_levelovertime(D231)
D23D=ita_levelovertime(D232)
```

```
[D241 D242]=ita_split(C24,[1],[2])
D24C=ita_levelovertime(D241)
D24D=ita_levelovertime(D242)
```

```
[D251 D252]=ita_split(C25,[1],[2])
D25C=ita_levelovertime(D251)
D25D=ita_levelovertime(D252)
```

```
[D261 D262]=ita_split(C26,[1],[2])
D26C=ita_levelovertime(D261)
D26D=ita_levelovertime(D262)
```

```
E1A=B1A-D1C
E2A=B2A-D2C
E3A=B3A-D3C
E4A=B4A-D4C
E5A=B5A-D5C
E6A=B6A-D6C
E7A=B7A-D7C
E8A=B8A-D8C
E9A=B9A-D9C
E10A=B10A-D10C
E11A=B11A-D11C
E12A=B12A-D12C
E13A=B13A-D13C
E14A=B14A-D14C
```

```
E15A=B15A-D15C
E16A=B16A-D16C
E17A=B17A-D17C
E18A=B18A-D18C
E19A=B19A-D19C
E20A=B20A-D20C
E21A=B21A-D21C
E22A=B22A-D22C
E23A=B23A-D23C
E24A=B24A-D24C
E25A=B25A-D25C
E26A=B26A-D26C
```

```
E1B=B1B-D1D
E2B=B2B-D2D
E3B=B3B-D3D
E4B=B4B-D4D
E5B=B5B-D5D
E6B=B6B-D6D
E7B=B7B-D7D
E8B=B8B-D8D
E9B=B9B-D9D
E10B=B10B-D10D
E11B=B11B-D11D
E12B=B12B-D12D
E13B=B13B-D13D
E14B=B14B-D14D
E15B=B15B-D15D
E16B=B16B-D16D
E17B=B17B-D17D
E18B=B18B-D18D
E19B=B19B-D19D
E20B=B20B-D20D
E21B=B21B-D21D
E22B=B22B-D22D
E23B=B23B-D23D
E24B=B24B-D24D
E25B=B25B-D25D
E26B=B26B-D26D
```

```
for y=1:E1A.nSamples
    F1(y)=(E1A.timeData(y))/10
    F1A(y)=10^F1(y)
end
F1B=sum(F1A)
F1C=F1B/(E1A.nSamples)
F1D=10*log10(F1C)
```

```
for y=1:E2A.nSamples
    F2(y)=(E2A.timeData(y))/10
    F2A(y)=10^F2(y)
end
F2B=sum(F2A)
F2C=F2B/(E2A.nSamples)
F2D=10*log10(F2C)
```

```
for y=1:E3A.nSamples
    F3(y)=(E3A.timeData(y))/10
    F3A(y)=10^F3(y)
end
```

```

F3B=sum(F3A)
F3C=F3B/(E3A.nSamples)
F3D=10*log10(F3C)

for y=1:E4A.nSamples
    F4(y)=(E4A.timeData(y))/10
    F4A(y)=10^F4(y)
end
F4B=sum(F4A)
F4C=F4B/(E4A.nSamples)
F4D=10*log10(F4C)

for y=1:E5A.nSamples
    F5(y)=(E5A.timeData(y))/10
    F5A(y)=10^F5(y)
end
F5B=sum(F5A)
F5C=F5B/(E5A.nSamples)
F5D=10*log10(F5C)

for y=1:E6A.nSamples
    F6(y)=(E6A.timeData(y))/10
    F6A(y)=10^F6(y)
end
F6B=sum(F6A)
F6C=F6B/(E6A.nSamples)
F6D=10*log10(F6C)

for y=1:E7A.nSamples
    F7(y)=(E7A.timeData(y))/10
    F7A(y)=10^F7(y)
end
F7B=sum(F7A)
F7C=F7B/(E7A.nSamples)
F7D=10*log10(F7C)

for y=1:E8A.nSamples
    F8(y)=(E8A.timeData(y))/10
    F8A(y)=10^F8(y)
end
F8B=sum(F8A)
F8C=F8B/(E8A.nSamples)
F8D=10*log10(F8C)

for y=1:E9A.nSamples
    F9(y)=(E9A.timeData(y))/10
    F9A(y)=10^F9(y)
end
F9B=sum(F9A)
F9C=F9B/(E9A.nSamples)
F9D=10*log10(F9C)

for y=1:E10A.nSamples
    F10(y)=(E10A.timeData(y))/10
    F10A(y)=10^F10(y)
end
F10B=sum(F10A)
F10C=F10B/(E10A.nSamples)
F10D=10*log10(F10C)

for y=1:E11A.nSamples
    F11(y)=(E11A.timeData(y))/10
    F11A(y)=10^F11(y)
end
F11B=sum(F11A)
F11C=F11B/(E11A.nSamples)
F11D=10*log10(F11C)

for y=1:E12A.nSamples
    F12(y)=(E12A.timeData(y))/10
    F12A(y)=10^F12(y)
end
F12B=sum(F12A)
F12C=F12B/(E12A.nSamples)
F12D=10*log10(F12C)

for y=1:E13A.nSamples
    F13(y)=(E13A.timeData(y))/10
    F13A(y)=10^F13(y)
end
F13B=sum(F13A)
F13C=F13B/(E13A.nSamples)
F13D=10*log10(F13C)

for y=1:E14A.nSamples
    F14(y)=(E14A.timeData(y))/10
    F14A(y)=10^F14(y)
end
F14B=sum(F14A)
F14C=F14B/(E14A.nSamples)
F14D=10*log10(F14C)

for y=1:E15A.nSamples
    F15(y)=(E15A.timeData(y))/10
    F15A(y)=10^F15(y)
end
F15B=sum(F15A)
F15C=F15B/(E15A.nSamples)
F15D=10*log10(F15C)

for y=1:E16A.nSamples
    F16(y)=(E16A.timeData(y))/10
    F16A(y)=10^F16(y)
end
F16B=sum(F16A)
F16C=F16B/(E16A.nSamples)
F16D=10*log10(F16C)

for y=1:E17A.nSamples
    F17(y)=(E17A.timeData(y))/10
    F17A(y)=10^F17(y)
end
F17B=sum(F17A)
F17C=F17B/(E17A.nSamples)
F17D=10*log10(F17C)

for y=1:E18A.nSamples
    F18(y)=(E18A.timeData(y))/10

```

```

    F18A(y)=10^F18(y)
end
F18B=sum(F18A)
F18C=F18B/(E18A.nSamples)
F18D=10*log10(F18C)

for y=1:E19A.nSamples
    F19(y)=(E19A.timeData(y))/10
    F19A(y)=10^F19(y)
end
F19B=sum(F19A)
F19C=F19B/(E19A.nSamples)
F19D=10*log10(F19C)

for y=1:E20A.nSamples
    F20(y)=(E20A.timeData(y))/10
    F20A(y)=10^F20(y)
end
F20B=sum(F20A)
F20C=F20B/(E20A.nSamples)
F20D=10*log10(F20C)

for y=1:E21A.nSamples
    F21(y)=(E21A.timeData(y))/10
    F21A(y)=10^F21(y)
end
F21B=sum(F21A)
F21C=F21B/(E21A.nSamples)
F21D=10*log10(F21C)

for y=1:E22A.nSamples
    F22(y)=(E22A.timeData(y))/10
    F22A(y)=10^F22(y)
end
F22B=sum(F22A)
F22C=F22B/(E22A.nSamples)
F22D=10*log10(F22C)

for y=1:E23A.nSamples
    F23(y)=(E23A.timeData(y))/10
    F23A(y)=10^F23(y)
end
F23B=sum(F23A)
F23C=F23B/(E23A.nSamples)
F23D=10*log10(F23C)

for y=1:E24A.nSamples
    F24(y)=(E24A.timeData(y))/10
    F24A(y)=10^F24(y)
end
F24B=sum(F24A)
F24C=F24B/(E24A.nSamples)
F24D=10*log10(F24C)

for y=1:E25A.nSamples
    F25(y)=(E25A.timeData(y))/10
    F25A(y)=10^F25(y)

```

```

end
F25B=sum(F25A)
F25C=F25B/(E25A.nSamples)
F25D=10*log10(F25C)

for y=1:E26A.nSamples
    F26(y)=(E26A.timeData(y))/10
    F26A(y)=10^F26(y)
end
F26B=sum(F26A)
F26C=F26B/(E26A.nSamples)
F26D=10*log10(F26C)

for y=1:E1B.nSamples
    VF1(y)=(E1B.timeData(y))/10
    VF1A(y)=10^VF1(y)
end
VF1B=sum(VF1A)
VF1C=VF1B/(E1B.nSamples)
VF1D=10*log10(VF1C)

for y=1:E2B.nSamples
    VF2(y)=(E2B.timeData(y))/10
    VF2A(y)=10^VF2(y)
end
VF2B=sum(VF2A)
VF2C=VF2B/(E2B.nSamples)
VF2D=10*log10(VF2C)

for y=1:E3B.nSamples
    VF3(y)=(E3B.timeData(y))/10
    VF3A(y)=10^VF3(y)
end
VF3B=sum(VF3A)
VF3C=VF3B/(E3B.nSamples)
VF3D=10*log10(VF3C)

for y=1:E4B.nSamples
    VF4(y)=(E4B.timeData(y))/10
    VF4A(y)=10^VF4(y)
end
VF4B=sum(VF4A)
VF4C=VF4B/(E4B.nSamples)
VF4D=10*log10(VF4C)

for y=1:E5B.nSamples
    VF5(y)=(E5B.timeData(y))/10
    VF5A(y)=10^VF5(y)
end
VF5B=sum(VF5A)
VF5C=VF5B/(E5B.nSamples)
VF5D=10*log10(VF5C)

for y=1:E6B.nSamples
    VF6(y)=(E6B.timeData(y))/10
    VF6A(y)=10^VF6(y)
end

```

```

VF6B=sum(VF6A)
VF6C=VF6B/(E6B.nSamples)
VF6D=10*log10(VF6C)

for y=1:E7B.nSamples
    VF7(y)=(E7B.timeData(y))/10
    VF7A(y)=10^VF7(y)
end
VF7B=sum(VF7A)
VF7C=VF7B/(E7B.nSamples)
VF7D=10*log10(VF7C)

for y=1:E8B.nSamples
    VF8(y)=(E8B.timeData(y))/10
    VF8A(y)=10^VF8(y)
end
VF8B=sum(VF8A)
VF8C=VF8B/(E8B.nSamples)
VF8D=10*log10(VF8C)

for y=1:E9B.nSamples
    VF9(y)=(E9B.timeData(y))/10
    VF9A(y)=10^VF9(y)
end
VF9B=sum(VF9A)
VF9C=VF9B/(E9B.nSamples)
VF9D=10*log10(VF9C)

for y=1:E10B.nSamples
    VF10(y)=(E10B.timeData(y))/10
    VF10A(y)=10^VF10(y)
end
VF10B=sum(VF10A)
VF10C=VF10B/(E10B.nSamples)
VF10D=10*log10(VF10C)

for y=1:E11B.nSamples
    VF11(y)=(E11B.timeData(y))/10
    VF11A(y)=10^VF11(y)
end
VF11B=sum(VF11A)
VF11C=VF11B/(E11B.nSamples)
VF11D=10*log10(VF11C)

for y=1:E12B.nSamples
    VF12(y)=(E12B.timeData(y))/10
    VF12A(y)=10^VF12(y)
end
VF12B=sum(VF12A)
VF12C=VF12B/(E12B.nSamples)
VF12D=10*log10(VF12C)

for y=1:E13B.nSamples
    VF13(y)=(E13B.timeData(y))/10
    VF13A(y)=10^VF13(y)
end
VF13B=sum(VF13A)
VF13C=VF13B/(E13B.nSamples)
VF13D=10*log10(VF13C)

for y=1:E14B.nSamples
    VF14(y)=(E14B.timeData(y))/10
    VF14A(y)=10^VF14(y)
end
VF14B=sum(VF14A)
VF14C=VF14B/(E14B.nSamples)
VF14D=10*log10(VF14C)

for y=1:E15B.nSamples
    VF15(y)=(E15B.timeData(y))/10
    VF15A(y)=10^VF15(y)
end
VF15B=sum(VF15A)
VF15C=VF15B/(E15B.nSamples)
VF15D=10*log10(VF15C)

for y=1:E16B.nSamples
    VF16(y)=(E16B.timeData(y))/10
    VF16A(y)=10^VF16(y)
end
VF16B=sum(VF16A)
VF16C=VF16B/(E16B.nSamples)
VF16D=10*log10(VF16C)

for y=1:E17B.nSamples
    VF17(y)=(E17B.timeData(y))/10
    VF17A(y)=10^VF17(y)
end
VF17B=sum(VF17A)
VF17C=VF17B/(E17B.nSamples)
VF17D=10*log10(VF17C)

for y=1:E18B.nSamples
    VF18(y)=(E18B.timeData(y))/10
    VF18A(y)=10^VF18(y)
end
VF18B=sum(VF18A)
VF18C=VF18B/(E18B.nSamples)
VF18D=10*log10(VF18C)

for y=1:E19B.nSamples
    VF19(y)=(E19B.timeData(y))/10
    VF19A(y)=10^VF19(y)
end
VF19B=sum(VF19A)
VF19C=VF19B/(E19B.nSamples)
VF19D=10*log10(VF19C)

for y=1:E20B.nSamples
    VF20(y)=(E20B.timeData(y))/10
    VF20A(y)=10^VF20(y)
end
VF20B=sum(VF20A)
VF20C=VF20B/(E20B.nSamples)
VF20D=10*log10(VF20C)

for y=1:E21B.nSamples
    VF21(y)=(E21B.timeData(y))/10

```



```

VF21A(y)=10^VF21(y)
end
VF21B=sum(VF21A)
VF21C=VF21B/(E21B.nSamples)
VF21D=10*log10(VF21C)

for y=1:E22B.nSamples
VF22(y)=(E22B.timeData(y))/10
VF22A(y)=10^VF22(y)
end
VF22B=sum(VF22A)
VF22C=VF22B/(E22B.nSamples)
VF22D=10*log10(VF22C)

for y=1:E23B.nSamples
VF23(y)=(E23B.timeData(y))/10
VF23A(y)=10^VF23(y)
end
VF23B=sum(VF23A)
VF23C=VF23B/(E23B.nSamples)
VF23D=10*log10(VF23C)

for y=1:E24B.nSamples
VF24(y)=(E24B.timeData(y))/10
VF24A(y)=10^VF24(y)
end
VF24B=sum(VF24A)
VF24C=VF24B/(E24B.nSamples)
VF24D=10*log10(VF24C)

for y=1:E25B.nSamples
VF25(y)=(E25B.timeData(y))/10
VF25A(y)=10^VF25(y)
end
VF25B=sum(VF25A)
VF25C=VF25B/(E25B.nSamples)
VF25D=10*log10(VF25C)

for y=1:E26B.nSamples
VF26(y)=(E26B.timeData(y))/10
VF26A(y)=10^VF26(y)
end
VF26B=sum(VF26A)
VF26C=VF26B/(E26B.nSamples)
VF26D=10*log10(VF26C)

G1=ita_time_crop(conv1,[0 0.7786])
H1=ita_amplify(G1,[-abs(F1D) -abs(VF1D)],'dB')
ita_write_wav(H1,strcat('Parte1L1seat',char(RI(j))),'wav')

G2=ita_time_crop(conv1,[0.7786 2.218])
H2=ita_amplify(G2,[-abs(F2D) -abs(VF2D)],'dB')
ita_write_wav(H2,strcat('Parte2L1seat',char(RI(j))),'wav')

G3=ita_time_crop(conv1,[2.218 3.805])
H3=ita_amplify(G3,[-abs(F3D) -abs(VF3D)],'dB')
ita_write_wav(H3,strcat('Parte3L1seat',char(RI(j))),'wav')

G4=ita_time_crop(conv1,[3.805 5.184])
H4=ita_amplify(G4,[-abs(F4D) -abs(VF4D)],'dB')
ita_write_wav(H4,strcat('Parte4L1seat',char(RI(j))),'wav')

G5=ita_time_crop(conv1,[5.184 6.873])
H5=ita_amplify(G5,[-abs(F5D) -abs(VF5D)],'dB')
ita_write_wav(H5,strcat('Parte5L1seat',char(RI(j))),'wav')

G6=ita_time_crop(conv1,[6.873 8.569])
H6=ita_amplify(G6,[-abs(F6D) -abs(VF6D)],'dB')
ita_write_wav(H6,strcat('Parte6L1seat',char(RI(j))),'wav')

G7=ita_time_crop(conv1,[8.569 10.17])
H7=ita_amplify(G7,[-abs(F7D) -abs(VF7D)],'dB')
ita_write_wav(H7,strcat('Parte7L1seat',char(RI(j))),'wav')

G8=ita_time_crop(conv1,[10.17 11.88])
H8=ita_amplify(G8,[-abs(F8D) -abs(VF8D)],'dB')
ita_write_wav(H8,strcat('Parte8L1seat',char(RI(j))),'wav')

G9=ita_time_crop(conv1,[11.88 13.4])
H9=ita_amplify(G9,[-abs(F9D) -abs(VF9D)],'dB')
ita_write_wav(H9,strcat('Parte9L1seat',char(RI(j))),'wav')

G10=ita_time_crop(conv1,[13.4 15.03])
H10=ita_amplify(G10,[-abs(F10D) -abs(VF10D)],'dB')
ita_write_wav(H10,strcat('Parte10L1seat',char(RI(j))),'wav')

G11=ita_time_crop(conv1,[15.03 16.53])
H11=ita_amplify(G11,[-abs(F11D) -abs(VF11D)],'dB')
ita_write_wav(H11,strcat('Parte11L1seat',char(RI(j))),'wav')

G12=ita_time_crop(conv1,[16.53 17.96])
H12=ita_amplify(G12,[-abs(F12D) -abs(VF12D)],'dB')
ita_write_wav(H12,strcat('Parte12L1seat',char(RI(j))),'wav')

```

```

G13=ita_time_crop(conv1,[17.96 19.53])
H13=ita_amplify(G13,[-abs(F13D) -
abs(VF13D)],'dB')
ita_write_wav(H13,strcat('Parte13L1seat',char(RI(j)
),'.wav'))

G14=ita_time_crop(conv1,[19.53 21.05])
H14=ita_amplify(G14,[-abs(F14D) -
abs(VF14D)],'dB')
ita_write_wav(H14,strcat('Parte14L1seat',char(RI(j)
),'.wav'))

G15=ita_time_crop(conv1,[21.05 22.74])
H15=ita_amplify(G15,[-abs(F15D) -
abs(VF15D)],'dB')
ita_write_wav(H15,strcat('Parte15L1seat',char(RI(j)
),'.wav'))

G16=ita_time_crop(conv1,[22.74 24.17])
H16=ita_amplify(G16,[-abs(F16D) -
abs(VF16D)],'dB')
ita_write_wav(H16,strcat('Parte16L1seat',char(RI(j)
),'.wav'))

G17=ita_time_crop(conv1,[24.17 25.72])
H17=ita_amplify(G17,[-abs(F17D) -
abs(VF17D)],'dB')
ita_write_wav(H17,strcat('Parte17L1seat',char(RI(j)
),'.wav'))

G18=ita_time_crop(conv1,[25.72 27.47])
H18=ita_amplify(G18,[-abs(F18D) -
abs(VF18D)],'dB')
ita_write_wav(H18,strcat('Parte18L1seat',char(RI(j)
),'.wav'))

G19=ita_time_crop(conv1,[27.47 29.08])
H19=ita_amplify(G19,[-abs(F19D) -
abs(VF19D)],'dB')
ita_write_wav(H19,strcat('Parte19L1seat',char(RI(j)
),'.wav'))

G20=ita_time_crop(conv1,[29.08 30.78])
H20=ita_amplify(G20,[-abs(F20D) -
abs(VF20D)],'dB')
ita_write_wav(H20,strcat('Parte20L1seat',char(RI(j)
),'.wav'))

G21=ita_time_crop(conv1,[30.78 32.38])
H21=ita_amplify(G21,[-abs(F21D) -
abs(VF21D)],'dB')
ita_write_wav(H21,strcat('Parte21L1seat',char(RI(j)
),'.wav'))

G22=ita_time_crop(conv1,[32.38 35.13])
H22=ita_amplify(G22,[-abs(F22D) -
abs(VF22D)],'dB')
ita_write_wav(H22,strcat('Parte22L1seat',char(RI(j)
),'.wav'))

G23=ita_time_crop(conv1,[35.13 38.94])
H23=ita_amplify(G23,[-abs(F23D) -
abs(VF23D)],'dB')
ita_write_wav(H23,strcat('Parte23L1seat',char(RI(j)
),'.wav'))

G24=ita_time_crop(conv1,[38.94 42.65])
H24=ita_amplify(G24,[-abs(F24D) -
abs(VF24D)],'dB')
ita_write_wav(H24,strcat('Parte24L1seat',char(RI(j)
),'.wav'))

G25=ita_time_crop(conv1,[42.65 46.7])
H25=ita_amplify(G25,[-abs(F25D) -
abs(VF25D)],'dB')
ita_write_wav(H25,strcat('Parte25L1seat',char(RI(j)
),'.wav'))

G26=ita_time_crop(conv1,[46.7 X])
H26=ita_amplify(G26,[-abs(F26D) -
abs(VF26D)],'dB')
ita_write_wav(H26,strcat('Parte26L1seat',char(RI(j)
),'.wav'))

S1=ita_read(strcat('Parte1L1seat',char(RI(j)),'.wav')
)
S2=ita_read(strcat('Parte2L1seat',char(RI(j)),'.wav')
)
S3=ita_read(strcat('Parte3L1seat',char(RI(j)),'.wav')
)
S4=ita_read(strcat('Parte4L1seat',char(RI(j)),'.wav')
)
S5=ita_read(strcat('Parte5L1seat',char(RI(j)),'.wav')
)
S6=ita_read(strcat('Parte6L1seat',char(RI(j)),'.wav')
)
S7=ita_read(strcat('Parte7L1seat',char(RI(j)),'.wav')
)
S8=ita_read(strcat('Parte8L1seat',char(RI(j)),'.wav')
)
S9=ita_read(strcat('Parte9L1seat',char(RI(j)),'.wav')
)
S10=ita_read(strcat('Parte10L1seat',char(RI(j)),'.wa
v'))
S11=ita_read(strcat('Parte11L1seat',char(RI(j)),'.wa
v'))

```

```

S12=ita_read(strcat('Parte12L1seat',char(RI(j)),'.wav'))
S13=ita_read(strcat('Parte13L1seat',char(RI(j)),'.wav'))
S14=ita_read(strcat('Parte14L1seat',char(RI(j)),'.wav'))
S15=ita_read(strcat('Parte15L1seat',char(RI(j)),'.wav'))
S16=ita_read(strcat('Parte16L1seat',char(RI(j)),'.wav'))
S17=ita_read(strcat('Parte17L1seat',char(RI(j)),'.wav'))
S18=ita_read(strcat('Parte18L1seat',char(RI(j)),'.wav'))
S19=ita_read(strcat('Parte19L1seat',char(RI(j)),'.wav'))
S20=ita_read(strcat('Parte20L1seat',char(RI(j)),'.wav'))
S21=ita_read(strcat('Parte21L1seat',char(RI(j)),'.wav'))
S22=ita_read(strcat('Parte22L1seat',char(RI(j)),'.wav'))
S23=ita_read(strcat('Parte23L1seat',char(RI(j)),'.wav'))
S24=ita_read(strcat('Parte24L1seat',char(RI(j)),'.wav'))
S25=ita_read(strcat('Parte25L1seat',char(RI(j)),'.wav'))
S26=ita_read(strcat('Parte26L1seat',char(RI(j)),'.wav'))

T1=ita_append(S1,S2)
T2=ita_append(T1,S3)
T3=ita_append(T2,S4)
T4=ita_append(T3,S5)
T5=ita_append(T4,S6)
T6=ita_append(T5,S7)
T7=ita_append(T6,S8)
T8=ita_append(T7,S9)
T9=ita_append(T8,S10)
T10=ita_append(T9,S11)
T11=ita_append(T10,S12)
T12=ita_append(T11,S13)
T13=ita_append(T12,S14)
T14=ita_append(T13,S15)

T15=ita_append(T14,S16)
T16=ita_append(T15,S17)
T17=ita_append(T16,S18)
T18=ita_append(T17,S19)
T19=ita_append(T18,S20)
T20=ita_append(T19,S21)
T21=ita_append(T20,S22)
T22=ita_append(T21,S23)
T23=ita_append(T22,S24)
T24=ita_append(T23,S25)
T25=ita_append(T24,S26)

ita_write_wav(T25,strcat('L1seat',char(RI(j)),'WW
CB50.wav'))
end

```

**APÊNDICE H – RESULTADOS DOS TESTES DE IPRF**

**Quadro 42 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 1.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
1	L1	A	20	5	Se, Pêras, Che, Ne, Tivra	L5	A	21	4	Che, Gue, Fão, Avérta
1	L2	B	24	1	Cares	L1	B	21	4	Se, Livre, Pêras, Tivra
1	L3	C	20	5	Vom, Fão, Terro, Suidem, Quarna	L2	C	24	1	Cares
1	L4	D	18	7	Faca, Tós, Peis, Dezo, Benha, Asselha, Afirda	L3	D	21	4	Bim, Vom, Fão, Suidem

Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).

**Quadro 43 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 2.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
2	L2	A	22	3	Cares, Sunto, Lequei	L1	A	23	2	Se, Pêras
2	L3	B	23	2	Vim, Fão	L2	B	23	2	Cares, Lequei
2	L4	C	17	8	Tós, Peis, Éda, Pema, Dezo, Benha, Asselha, Afirda	L3	C	24	1	Fão
2	L5	D	21	4	Só, Fão, Fopa, Avérta	L4	D	23	2	Peis, Asselha

Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).

**Quadro 44 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 3.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
3	L3	A	22	3	Fão, Tou, Terro	L2	A	22	3	Tombo, Peguei, Pestar
3	L4	B	20	5	Tós, Peis, Pema, Dezo, Asselha	L3	B	22	3	Vim, Fão, Terro
3	L5	C	18	7	Só, Piada, Fão, Fopa, Saór, Avérta, Míaços	L4	C	21	4	Peis, Pema, Dezo, Asselha
3	L1	D	21	4	Pêras, Tivra, Mosseu, Preciso ir ao médico	L5	D	19	6	Piada, Fão, Fopa, Saór, Avérta, Míaços

Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).

**Quadro 45 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 4.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
4	L4	A	22	3	Pema, Dezo, Benha	L3	A	19	6	Morro, Quartos, Bim, Vom, Fão, Conge
4	L5	B	20	5	Che, Fão, Fopa, Esto, Míãos	L4	B	23	2	Pema, Dezo
4	L1	C	17	8	Se, No, Pêras, Er, Che, Ne, Tivra, Ompar	L5	C	19	6	Acerta, Fão, Fopa, Esto, Avérta, Míãos
4	L2	D	20	5	Te, Tombo, Cares, Lequei, Pestar	L1	D	21	4	Se, No, Pêras, Che

Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).

**Quadro 46 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 5.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
5	L5	A	24	1	Avérta	L4	A	23	2	Tós, Peis
5	L1	B	22	3	Se, Pêras, Che	L5	B	24	1	Fão
5	L2	C	24	1	Cares	L1	C	24	1	No
5	L3	D	21	4	Será, Vom, Fão, Lai	L2	D	23	2	Cares, Pestar

Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).

**Quadro 47 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 6.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
6	L1	A	21	4	Lu, Ne, Tivra, Ompar	L5	A	21	4	Fão, Fopa, Esto, Avérta
6	L2	B	17	8	Te, Tombo, Gue, Qui, Neços, Cares, Lequei, Pestar	L1	B	25	0	
6	L3	C	18	7	Deu, Bim, Vom, Fão, Terro, Suidem, Quarna	L2	C	20	5	Mundo, Tombo, Gue, Cares, Pestar
6	L4	D	19	6	Dal, Peis, Pema, Dezo, Benha, Afirda	L3	D	18	7	Quartos, Bim, Vom, Fão, Terro, Quarna, Choveu muito nesse fim de semana

Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).

**Quadro 48 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 7.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
7	L2	A	20	5	Gue, Neços, Cares, Sunto, Pestar	L1	A	19	6	Se, No, Er, Ne, Tivra, Ompar
7	L3	B	19	6	Bim, Vom, Fão, Terro, Suidem, Quarna	L2	B	21	4	Vi, Cares, Sunto, Pestar
7	L4	C	20	5	Tós, Peis, Pema, Dezo, Benha	L3	C	22	3	Bim, Vom, Fão
7	L5	D	20	5	Só, Fão, Fopa, Esto, Avérta	L4	D	20	5	Tós, Peis, Dezo, Benha, Asselha

Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).

**Quadro 49 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 8.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
8	L3	A	21	4	Vom, Fão, Terro, Quarna	L2	A	20	5	Te, Tombo, Gue, Qui, Cares
8	L4	B	18	7	Tós, Peis, Pema, Dezo, Benha, Asselha, Afirda	L3	B	19	6	Bim, Vom, Fão, Conge, Terro, Suidem
8	L5	C	18	7	Vim, Gue, Su, Fão, Fopa, Esto, Avérta	L4	C	19	6	Tós, Peis, Pema, Dezo, Benha, Asselha
8	L1	D	23	2	Comeu, Tivra	L5	D	21	4	Gue, Fão, Fopa, Avérta

Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).

**Quadro 50 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 9.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
9	L4	A	20	5	Tós, Peis, Dezo, Benha, Afirda	L3	A	20	5	Vim, Bim, Vom, Fão, Conge
9	L5	B	21	4	Vim, Fão, Avérta, Miaços	L4	B	20	5	Peis, Pema, Dezo, Benha, Afirda
9	L1	C	24	1	Ne	L5	C	20	5	Vim, Fão, Fopa, Avérta, Miaços
9	L2	D	19	6	Mundo, Gue, Qui, Neços, Cares, Sunto	L1	D	25	0	

Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).

**Quadro 51 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 10.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
10	L5	A	19	6	Ar, Gue, Fão, Fopa, Esto, Avérta	L4	A	19	6	Peis, Pema, Dezo, Benha, Asselha, Afirda
10	L1	B	22	3	Pêras, Er, Matir	L5	B	21	4	Fão, Fopa, Esto, Avérta
10	L2	C	19	6	Vi, Fé, Cares, Sunto, Lequei, Pestar	L1	C	24	1	Pêras
10	L3	D	20	5	Quartos, Bim, Vom, Fão, Suidem	L2	D	22	3	Gue, Cares, Sunto

Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).

**Quadro 52 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 11.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
11	L1	A	19	6	Ai, No, Pêras, Tivra, Ompar, Matir	L5	A	20	5	Vim, Su, Fão, Tou, Esto
11	L2	B	17	8	Fé, Gostou, Gue, Neços, Cares, Lequei, Pestar, Depois liga para mim	L1	B	20	5	No, Pêras, Tivra, Ompar, Matir
11	L3	C	19	6	Vim, Morro, Bim, Vom, Fão, Suidem	L2	C	19	6	Fé, Gue, Qui, Cares, Lequei, Pestar
11	L4	D	20	5	Pema, Dezo, Benha, Asselha, Afirda	L3	D	20	5	Vim, Vai, Bim, Fão, Quarna

Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).



**Quadro 53 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 12.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
12	L2	A	18	7	Tombo, Gue, Su, Neços, Cares, Sunto, Lequei	L1	A	24	1	Pêras
12	L3	B	19	6	Bim, Vom, Fão, Terro, Suidem, Quarna	L2	B	20	5	Tombo, Neços, Cares, Lequei, Pestar
12	L4	C	20	5	Peis, Pema, Dezo, Benha, Afirda	L3	C	22	3	Bim, Vom, Fão
12	L5	D	21	4	Fão, Fopa, Esto, Avérta	L4	D	21	4	Peis, Pema, Dezo, Afirda

Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).

**Quadro 54 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 13.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
13	L3	A	20	5	Bim, Vom, Fão, Terro, Quarna	L2	A	21	4	Te, Tombo, Lequei, Pestar
13	L4	B	19	6	Peis, Éda, Pema, Dezo, Benha, Guardei o livro na primeira gaveta.	L3	B	20	5	Quartos, Bim, Vom, Fão, Terro
13	L5	C	16	9	Só, Che, Gue, Su, Fão, Tou, Fopa, Avérta, Miaços	L4	C	21	4	Peis, Éda, Dezo, Benha
13	L1	D	21	4	Pêras, Tivra, Ompar, Matir	L5	D	19	6	Só, Gue, Fão, Fopa, Avérta, Miaços

Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).

**Quadro 55 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 14.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
14	L4	A	19	6	Era, Errada, Dezo, Benha, Afirda, Sua mãe acabou de sair de carro	L3	A	22	3	Deu, Vom, Fão
14	L5	B	18	7	Fez, Este, Fão, Fopa, Saór, Esto, Avérta	L4	B	22	3	Dezo, Benha, Afirda
14	L1	C	18	7	Se, No, Livre, Er, Ne, Tivra, Matir	L5	C	17	8	Só, Fez, Acerta, Fão, Fopa, Saór, Esto, Míaços
14	L2	D	21	4	Pá, Tombo, Cares, Sunto	L1	D	20	5	No, Ne, Tivra, Ompar, Matir

Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).

**Quadro 56 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 15.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
15	L5	A	20	5	Este, Fão, Fopa, Esto, Avérta	L4	A	17	8	Nasce, Tós, Peis, Pema, Dezo, Benha, Asselha, Afirda
15	L1	B	22	3	Pêras, Comeu, Tivra	L5	B	19	6	Este, Su, Fão, Fopa, Esto, Avérta
15	L2	C	21	4	Gue, Cares, Lequei, Pestar	L1	C	21	4	Pêras, Comeu, Er, Tivra
15	L3	D	18	7	Bim, Vom, Fão, Conge, Suidem, Quarna, Olhe bem ao atravessar a rua	L2	D	21	4	Te, Tombo, Lequei, Pestar

Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).

**Quadro 57 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 16.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
16	L1	A	18	7	Livre, Pêras, Comeu, Lu, Ne, Tivra, Ompar	L5	A	16	9	Vim, Fez, Piada, Su, Fão, Tou, Fopa, Esto, Avérta
16	L2	B	19	6	Fé, Tombo, Gue, Neços, Cares, Pestar	L1	B	19	6	Livre, Comeu, Lu, Tivra, Ompar, Arção
16	L3	C	18	7	Vim, Bim, Vom, Fão, Lai, Terro, Quarna	L2	C	20	5	Gue, Qui, Cares, Lequei, Pestar
16	L4	D	13	12	Mil, Linha, Faca, Errada, Tós, Dal, Peis, Pema, Dezo, Benha, Asselha, Afirda	L3	D	17	8	Vai, Bim, Vom, Fão, Tou, Lai, Terro, Quarna

Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).

**Quadro 58 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 17.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
17	L2	A	18	7	Tombo, Gue, Neços, Cares, Sunto, Lequei, Pestar	L1	A	21	4	Pêras, Ne, Tivra, Ompar
17	L3	B	16	9	Pena, Bim, Vom, Fão, Lai, Conge, Terro, Suidem, Quarna	L2	B	19	6	Gue, Su, Neços, Cares, Lequei, Pestar
17	L4	C	17	8	Tós, Éda, Ipé, Pema, Dezo, Benha, Asselha, Afirda	L3	C	19	6	Bim, Vom, Fão, Conge, Suidem, Quarna
17	L5	D	19	6	Gue, Fão, Fopa, Esto, Avérta, Miaços	L4	D	19	6	Peis, Ipé, Pema, Dezo, Benha, Asselha

Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).

**Quadro 59 – Resultados do teste de IPRF para o indivíduo 18.**

Indivíduo	Listas sem painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros	Listas com painéis	Assento	Acertos	Erros	Quais erros
18	L3	A	20	5	Vom, Fão, Terro, Suidem, Quarna	L2	A	20	5	Te, Tombo, Gue, Su, Cares
18	L4	B	19	6	Tós, Ipé, Pema, Dezo, Asselha, Afirda	L3	B	21	4	Será, Vom, Fão, Suidem
18	L5	C	20	5	Fão, Fopa, Esto, Avérta, Miaços	L4	C	20	5	Peis, Dezo, Benha, Afirda, Sua mãe acabou de sair de carro
18	L1	D	18	7	Se, Pêras, Lu, Er, Che, Tivra, Mosseu	L5	D	22	3	Fão, Fopa, Avérta

**Fonte: Scherwtz e De Conto (2019b).**

**APÊNDICE I – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DENSIDADE**

**Tabela 27 – Densidade das amostras de painel tipo MDF – 9,00 mm.**

Painel tipo <i>Medium Density Fiberboard</i> - 9,00 mm										
Amostra	Massa (g)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Espessura média (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	<i>p</i> -valor (teste de Shapiro-Wilk)	I.C. teste t (95,0%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade média (g/cm <sup>3</sup> )
1	14,108	50,750	50,125	9,288	23,6259	0,5971			-	
2	14,481	50,750	50,050	9,300	23,6223	0,6130			-	
3	14,608	50,850	50,050	9,288	23,6371	0,6180			-	
4	14,472	50,050	50,700	9,300	23,5991	0,6132			-	
5	14,118	50,175	50,875	9,288	23,7078	0,5955			-	
6	14,421	50,225	50,875	9,288	23,7314	0,6077	0,6700	0,6015 ≤ μ ≤ 0,6126	0,6077	0,6056
7	14,296	50,825	50,300	9,300	23,7754	0,6013			-	
8	14,258	50,100	50,800	9,288	23,6374	0,6032			0,6032	
9	14,546	50,750	50,075	9,300	23,6341	0,6155			-	
10	14,286	50,700	50,000	9,300	23,5755	0,6060			0,6060	

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 28 – Densidade das amostras de painel tipo MDF – 12,0 mm.**

Painel tipo <i>Medium Density Fiberboard</i> - 12,0 mm										
Amostra	Massa (g)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Espessura média (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	<i>p</i> -valor (teste de Shapiro-Wilk)	I.C. teste t (95,0%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade média (g/cm <sup>3</sup> )
1	18,341	50,000	50,350	12,213	30,7450	0,5965			0,5965	
2	18,290	49,850	50,000	12,275	30,5954	0,5978			-	
3	16,830	47,200	50,200	12,238	28,9960	0,5804			0,5804	
4	17,530	49,950	50,100	12,275	30,7181	0,5707			-	
5	17,410	49,900	47,500	12,213	28,9467	0,6015			-	
6	17,990	49,250	50,000	12,213	30,0733	0,5982	0,1177	0,6164 ≤ μ ≤ 0,6315	-	0,5875
7	18,100	52,100	50,000	12,225	31,8461	0,5684			-	
8	17,950	49,875	50,000	12,225	30,4861	0,5888			0,5888	
9	18,130	50,000	50,750	12,225	31,0209	0,5844			0,5844	
10	17,970	49,000	50,000	12,225	29,9513	0,6000			-	

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 29 – Densidade das amostras de painel tipo MDF – 15,0 mm.**

Painel tipo <i>Medium Density Fiberboard</i> - 15,0 mm										
Amostra	Massa (g)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Espessura média (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	<i>p</i> -valor (teste de Shapiro-Wilk)	I.C. teste t (95,0%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade média (g/cm <sup>3</sup> )
1	24,576	50,000	50,600	15,388	38,9304	0,6313			0,6313	
2	24,090	50,325	50,250	15,313	38,7227	0,6221			0,6221	
3	25,048	50,425	50,025	15,338	38,6890	0,6474			-	
4	24,409	50,000	50,975	15,313	39,0277	0,6254			0,6254	
5	24,611	50,050	50,725	15,388	39,0656	0,6300			0,6300	
6	23,903	50,700	50,150	15,350	39,0290	0,6124	0,2507	0,6164 ≤ μ ≤ 0,6315	-	0,6253
7	24,067	50,000	50,700	15,325	38,8489	0,6195			0,6195	
8	24,317	50,700	50,050	15,375	39,0146	0,6233			0,6233	
9	23,964	50,600	50,150	15,350	38,9520	0,6152			-	
10	23,811	50,050	50,700	15,313	38,8560	0,6128			-	

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 30 – Densidade das amostras de painel tipo OSB – 8,00 mm.**

Painel tipo <i>Oriented Strand Board</i> - 8,00 mm										
Amostra	Massa (g)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Espessura média (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	<i>p</i> -valor (teste de Shapiro-Wilk)	I.C. teste t (95,0%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade média (g/cm <sup>3</sup> )
1	14,791	50,150	50,750	8,463	21,5380	0,6867			-	
2	12,117	50,550	50,050	8,288	20,9676	0,5779			-	
3	14,106	50,800	50,000	8,475	21,5265	0,6553			-	
4	13,594	50,100	50,850	8,400	21,3997	0,6352			0,6352	
5	13,890	50,725	50,000	8,400	21,3045	0,6520			-	
6	12,154	50,050	50,450	8,225	20,7683	0,5852	0,6470	0,5829 ≤ μ ≤ 0,6500	0,5852	0,6089
7	11,417	50,000	50,750	8,313	21,0930	0,5412			-	
8	13,911	50,850	50,100	8,350	21,2723	0,6540			-	
9	12,745	50,800	50,075	8,263	21,0182	0,6064			0,6064	
10	11,954	50,050	50,750	8,250	20,9553	0,5704			-	

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 31 – Densidade das amostras de painel tipo OSB – 12,0 mm.**

Painel tipo <i>Oriented Strand Board</i> - 12,0 mm										
Amostra	Massa (g)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Espessura média (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	<i>p</i> -valor (teste de Shapiro-Wilk)	I.C. teste t (95,0%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade média (g/cm <sup>3</sup> )
1	18,759	50,150	50,400	12,325	31,1522	0,6022			0,6022	
2	17,506	50,775	50,100	12,350	31,4163	0,5572			-	
3	18,550	50,725	50,075	12,088	30,7029	0,6042			0,6042	
4	19,439	50,000	50,775	11,975	30,4015	0,6394			-	
5	17,872	50,000	50,700	12,088	30,6418	0,5833			-	
6	18,790	50,850	49,975	12,038	30,5900	0,6142	0,5250	0,5908 ≤ μ ≤ 0,6254	0,6142	0,6085
7	18,776	50,000	50,875	12,000	30,5250	0,6151			0,6151	
8	19,185	49,975	50,775	12,075	30,6401	0,6261			-	
9	19,287	50,175	50,750	11,975	30,4929	0,6325			-	
10	18,496	50,150	50,800	11,963	30,4759	0,6069			0,6069	

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 32 – Densidade das amostras de painel tipo OSB – 25,0 mm.**

Painel tipo <i>Oriented Strand Board</i> - 25,0 mm										
Amostra	Massa (g)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Espessura média (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	<i>p</i> -valor (teste de Shapiro-Wilk)	I.C. teste t (95,0%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade média (g/cm <sup>3</sup> )
1	34,508	50,050	50,700	25,988	65,9442	0,5233			0,5233	
2	32,258	50,575	50,150	25,975	65,8813	0,4896			-	
3	32,372	50,775	50,050	25,950	65,9464	0,4909			-	
4	36,178	50,150	50,750	26,075	66,3638	0,5452			-	
5	33,442	50,750	50,100	25,925	65,9163	0,5073			0,5073	
6	33,199	50,000	50,700	25,888	65,6248	0,5059	0,1516	0,4999 ≤ μ ≤ 0,5302	0,5059	0,5085
7	36,142	50,150	50,750	26,025	66,2366	0,5457			-	
8	33,018	50,000	50,850	25,850	65,7236	0,5024			0,5024	
9	33,283	50,100	50,750	26,000	66,1070	0,5035			0,5035	
10	35,480	50,900	50,150	25,913	66,1452	0,5364			-	

Fonte: Autor (2020).



**Tabela 33 – Densidade das amostras de painel tipo WWCB – 17,0 mm com palha grossa.**

Painel de palha de cimento com madeira - 17,0 mm com palha grossa										
Amostra	Massa (g)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Espessura média (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	<i>p</i> -valor (teste de Shapiro-Wilk)	I.C. teste t (95,0%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade média (g/cm <sup>3</sup> )
1	21,510	50,175	49,575	16,450	40,9182	0,5257			-	
2	16,595	50,600	49,550	16,925	42,4349	0,3911			-	
3	17,432	49,500	50,600	16,875	42,2668	0,4124			-	
4	18,277	50,000	50,500	16,875	42,6094	0,4289			0,4289	
5	16,620	49,500	50,500	16,425	41,0584	0,4048			-	
6	20,629	50,075	49,900	16,775	41,9164	0,4922	0,4401	0,4250 ≤ μ ≤ 0,4895	-	0,4693
7	19,275	49,800	50,075	16,775	41,8324	0,4608			0,4608	
8	20,388	49,700	49,800	16,875	41,7666	0,4881			0,4881	
9	20,515	49,800	50,550	16,650	41,9145	0,4895			0,4895	
10	19,929	50,575	49,850	16,500	41,5992	0,4791			0,4791	

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 34 – Densidade das amostras de painel tipo WWCB – 25,0 mm com palha grossa.**

Painel de palha de cimento com madeira – 25,0 mm com palha grossa										
Amostra	Massa (g)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Espessura média (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	<i>p</i> -valor (teste de Shapiro-Wilk)	I.C. teste t (95,0%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade média (g/cm <sup>3</sup> )
1	22,931	49,400	50,400	24,625	61,3103	0,3740			0,3740	
2	28,675	49,100	50,000	24,575	60,3316	0,4753			-	
3	18,457	49,250	50,300	24,750	61,3126	0,3010			-	
4	20,494	49,725	49,350	24,025	58,9556	0,3476			-	
5	26,028	49,375	49,850	24,600	60,5491	0,4299			0,4299	
6	27,066	50,150	49,250	24,550	60,6357	0,4464	0,2964	0,3499 ≤ μ ≤ 0,4447	-	0,4120
7	17,424	49,400	50,200	24,200	60,0131	0,2903			-	
8	23,697	49,600	49,200	23,975	58,5067	0,4050			0,4050	
9	27,813	49,200	50,150	24,275	59,8956	0,4644			-	
10	26,964	49,350	50,125	24,825	61,4088	0,4391			0,4391	

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 35 – Densidade das amostras de painel tipo WWCB – 25,0 mm com palha superfina.**

Painel de palha de cimento com madeira - 25mm com palha super fina										
Amostra	Massa (g)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Espessura média (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	<i>p</i> -valor (teste de Shapiro-Wilk)	I.C. teste t (95,0%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade média (g/cm <sup>3</sup> )
1	40,153	49,750	50,450	25,525	64,0649	0,6268			0,6268	
2	30,398	50,450	49,750	24,850	62,3707	0,4874			-	
3	47,089	49,500	50,500	24,500	61,2439	0,7689			-	
4	45,910	49,900	51,050	25,125	64,0033	0,7173			0,7173	
5	39,523	50,500	49,900	24,925	62,8098	0,6292			0,6292	
6	45,836	49,850	50,500	25,000	62,9356	0,7283	0,1559	0,5830 ≤ μ ≤ 0,7315	0,7283	0,6765
7	29,942	49,700	50,650	24,625	61,9886	0,4830			-	
8	39,972	50,550	49,750	23,888	60,0738	0,6654			0,6654	
9	46,566	50,600	49,900	23,825	60,1567	0,7741			-	
10	42,294	49,650	50,550	24,350	61,1138	0,6921			0,6921	

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 36 – Densidade das amostras de painel tipo WWCB – 50,0 mm com palha grossa**

Painel de palha de cimento com madeira – 50,0 mm com palha grossa										
Amostra	Massa (g)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Espessura média (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	<i>p</i> -valor (teste de Shapiro-Wilk)	I.C. teste t (95,0%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade média (g/cm <sup>3</sup> )
1	41,017	50,375	49,950	46,100	115,9983	0,3536			0,3536	
2	41,861	50,400	50,100	47,175	119,1188	0,3514			0,3514	
3	44,021	49,650	50,800	46,550	117,4093	0,3749			-	
4	41,199	49,650	50,800	45,625	115,0763	0,3580			0,3580	
5	40,848	50,250	49,600	45,313	112,9369	0,3617			0,3617	
6	40,365	49,650	50,450	45,425	113,7825	0,3548	0,4348	0,3484 ≤ μ ≤ 0,3672	0,3548	0,3557
7	39,141	50,550	49,700	46,825	117,6401	0,3327			-	
8	43,132	49,800	50,200	45,325	113,3107	0,3807			-	
9	41,547	49,350	50,550	47,375	118,1837	0,3515			0,3515	
10	40,432	50,750	49,650	44,750	112,7583	0,3586			0,3586	

Fonte: Autor (2020).

**APÊNDICE J – DETERMINAÇÃO DAS POROSIDADES DOS PAINÉIS DE PALHA  
DE MADEIRA COM CIMENTO**

**Tabela 37 – Porosidade das amostras de painel tipo WWCB – 17,0 mm com palha grossa.**

Painel de palha de cimento com madeira – 17,0 mm com palha grossa									
Amostra	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Volume seco (cm <sup>3</sup> )	Volume úmido (cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)	<i>p</i> -valor (teste de Shapiro-Wilk)	I.C. teste t (95,0%)	Porosidade (%)	Porosidade média (%)
1	19,96	42,60	40,92	22,71	55,50%			-	
2	15,40	35,31	42,43	19,97	47,06%			-	
3	16,15	36,57	42,27	20,48	48,46%			-	
4	17,01	37,60	42,61	20,65	48,47%			-	
5	15,41	34,28	41,06	18,93	46,10%			-	
6	19,31	41,55	41,92	22,31	53,22%	0,2086	48.71%≤μ≤53.23%	53,22%	52,82%
7	17,97	40,16	41,83	22,26	53,20%			53,20%	
8	19,13	41,16	41,77	22,10	52,90%			52,90%	
9	19,28	41,20	41,91	21,99	52,45%			52,45%	
10	18,70	40,40	41,60	21,77	52,32%			52,32%	

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 38 – Porosidade das amostras de painel tipo WWCB – 25,0mm com palha grossa.**

Painel de palha de cimento com madeira – 25,0 mm com palha grossa									
Amostra	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Volume seco (cm <sup>3</sup> )	Volume úmido (cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)	<i>p</i> -valor (teste de Shapiro-Wilk)	I.C. teste t (95,0%)	Porosidade (%)	Porosidade média (%)
1	21,45	44,07	61,31	22,69	37,01%			37,01%	
2	26,65	52,68	60,33	26,11	43,27%			-	
3	17,03	34,14	61,31	17,16	27,99%			-	
4	19,45	37,92	58,96	18,53	31,42%			-	
5	24,47	47,61	60,55	23,21	38,33%			38,33%	
6	25,42	51,64	60,64	26,30	43,37%	0,5015	31.49%≤μ≤40.51%	-	36,85%
7	16,47	31,39	60,01	14,96	24,94%			-	
8	22,34	42,46	58,51	20,18	34,49%			34,49%	
9	26,28	51,12	59,90	24,91	41,60%			-	
10	25,33	48,33	61,41	23,07	37,57%			37,57%	

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 39 – Porosidade das amostras de painel tipo WWCB – 25,0mm com palha superfina.**

Painel de palha de cimento com madeira - 25mm com palha superfina									
Amostra	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Volume seco (cm <sup>3</sup> )	Volume úmido (cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)	<i>p</i> -valor (teste de Shapiro-Wilk)	I.C. teste t (95,0%)	Porosidade (%)	Porosidade média (%)
1	37,85	72,22	64,06	34,47	53,81%			-	
2	28,75	62,07	62,37	33,42	53,58%			-	
3	44,59	78,36	61,24	33,87	55,31%			55,31%	
4	43,46	78,39	64,00	35,04	54,74%			54,74%	
5	37,52	73,16	62,81	35,75	56,91%			-	
6	43,43	79,75	62,94	36,43	57,88%	0,8390	54,53% ≤ μ ≤ 56,52%	-	55,72%
7	28,57	63,24	61,99	34,77	56,10%			56,10%	
8	37,98	71,60	60,07	33,72	56,13%			56,13%	
9	44,20	76,86	60,16	32,76	54,45%			-	
10	40,15	74,46	61,11	34,41	56,31%			56,31%	

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 40 – Porosidade das amostras de painel tipo WWCB –50,0mm com palha grossa.**

Painel de palha de cimento com madeira - 50mm com palha grossa									
Amostra	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Volume seco (cm <sup>3</sup> )	Volume úmido (cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)	<i>p</i> -valor (teste de Shapiro-Wilk)	I.C. teste t (95,0%)	Porosidade (%)	Porosidade média (%)
1	37,10	88,06	116,00	51,11	44,06%			-	
2	38,65	80,24	119,12	41,72	35,02%			-	
3	40,59	86,13	117,41	45,68	38,90%			38,90%	
4	37,77	84,13	115,08	46,50	40,41%			40,41%	
5	38,23	85,22	112,94	47,13	41,73%			41,73%	
6	36,47	84,03	113,78	47,70	41,92%	0,7409	38,23% ≤ μ ≤ 42,18%	41,92%	40,58%
7	37,43	83,27	117,64	45,98	39,08%			39,08%	
8	40,63	88,80	113,31	48,31	42,64%			-	
9	38,45	81,88	118,18	43,56	36,86%			-	
10	37,72	84,30	112,76	46,72	41,43%			41,43%	

Fonte: Autor (2020).

**APÊNDICE K – ALGORITMO PARA DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE  
CONFIANÇA (POR FREQUÊNCIA) PARA OS ENSAIOS DE ABSORÇÃO  
SONORA COM INCIDÊNCIA NORMAL**

```
A <- read.table(file="medicoes.csv", sep = ";") #arquivo com valores medidos para as 10 amostras, nas
frequências de 100Hz à 2000Hz (uma a uma).
```

```
B <- as.matrix(A)
```

```
J=matrix(nrow=1901,ncol=14)
```

```
for (i in 1:1901){
C <- c(B[i, 2:11])
D<-shapiro.test(C)
E<-D$p.value
if (E>=0.05){ #verifica se existe distribuição normal conforme teste de Shapiro-Wilk
F<-t.test(C)
G<-as.matrix(F$conf.int)
H<-G[1,1]
I<-G[2,1]
} else { #caso não seja uma distribuição normal, é realizado um teste de estatística não paramétrica
F<-wilcox.test(C,conf.int = TRUE,conf.level = 0.95)
G<-as.matrix(F$conf.int)
H<-G[1,1]
I<-G[2,1]
}
J[i,1]<-E
J[i,2]<-H
J[i,3]<-I

for (z in 2:11){
if ((B[i,z]>=J[i,2])&(B[i,z]<=J[i,3])){
J[i,z+2]=(B[i,z])
} else {
J[i,z+2]=NA
}
}
J[i,14]=mean(c(J[i,4:13]),na.rm = TRUE)
}

write.table(J,file="medicoestratadas.txt",sep = ";",col.names = FALSE,row.names = FALSE)
}
```

**APÊNDICE L – ANÁLISE ESTATÍSTICA ENTRE VALORES MEDIDOS E  
SIMULADOS PARA O TEMPO DE REVERBERAÇÃO ( $T_{20}$ )**



**Tabela 41 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário sem painéis em 500 Hz.**

Cenário: Sem painéis			Frequência: 500 Hz					Teste de Kruskal- Wallis
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	Mic1	1,341			1,131			
	Mic2	1,263	1,350	0,064	1,201	1,151	0,071	
	Mic3	1,406			1,212			
	Mic4	1,389			1,060			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,527			0,447			
S2	Mic5	1,252			1,038			
	Mic6	1,267	1,243	0,044	1,066	1,061	0,045	0,002
	Mic7	1,274			1,017			
	Mic8	1,178			1,121			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,100			0,739			
Mesa do professor	A	1,245			1,142			
	B	1,297	1,367	0,184	1,172	1,162	0,020	
	C	1,641			1,185			
	D	1,285			1,148			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,031			0,566			

Fonte: Autor (2020).

**Figura 156– Teste de Nemenyi entre os grupos da Tabela 41.**

```

Pairwise comparisons using Tukey and Kramer (Nemenyi) test
with Tukey-Dist approximation for independent samples

data: X$VALOR and X$SITUACAO

      MEDPROF MEDS1  MEDS2  SIMPROF SIMS1
MEDS1  0.9999  -      -      -      -
MEDS2  0.9580  0.8816 -      -      -
SIMPROF 0.2871  0.1743 0.8120 -      -
SIMS1  0.2617  0.1561 0.7852 1.0000 -
SIMS2  0.0147  0.0062 0.1561 0.8603 0.8816

P value adjustment method: none

```

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 42 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário sem painéis em 1000 Hz.**

Cenário: Sem painéis			Frequência: 1000 Hz					ANOVA
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	<i>Mic1</i>	1,147	1,124	0,071	1,068	1,065	0,104	
	<i>Mic2</i>	1,112			1,200			
	<i>Mic3</i>	1,203			0,947			
	<i>Mic4</i>	1,033			1,044			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,962			0,840			
S2	<i>Mic5</i>	1,214	1,152	0,057	1,143	1,134	0,050	0,581
	<i>Mic6</i>	1,183			1,189			
	<i>Mic7</i>	1,118			1,135			
	<i>Mic8</i>	1,091			1,067			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,632			0,735			
Mesa do professor	A	1,016	1,160	0,105	1,234	1,148	0,067	
	B	1,171			1,151			
	C	1,185			1,071			
	D	1,267			1,134			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,584			0,878			

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 43 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário sem painéis em 2000 Hz.**

Cenário: Sem painéis			Frequência: 2000 Hz					Teste de Kruskal-Wallis
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	<i>Mic1</i>	1,129	1,059	0,050	1,004	0,975	0,020	
	<i>Mic2</i>	1,050			0,968			
	<i>Mic3</i>	1,010			0,965			
	<i>Mic4</i>	1,046			0,963			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,438			0,021			
S2	<i>Mic5</i>	1,032	1,034	0,011	1,012	0,995	0,019	0,005
	<i>Mic6</i>	1,040			0,996			
	<i>Mic7</i>	1,020			1,004			
	<i>Mic8</i>	1,046			0,970			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,898			0,540			
Mesa do professor	A	1,015	1,051	0,050	0,894	0,954	0,048	
	B	1,114			0,962			
	C	1,008			0,951			
	D	1,069			1,011			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,432			0,884			

Fonte: Autor (2020).

Figura 157– Teste de Nemenyi entre os grupos da Tabela 43.

```

Pairwise comparisons using Tukey and Kramer (Nemenyi) test
with Tukey-Dist approximation for independent samples

data: X$VALOR and X$SITUACAO

      MEDPROF MEDS1 MEDS2 SIMPROF SIMS1
MEDS1  1.000   -     -     -     -
MEDS2  1.000  1.000   -     -     -
SIMPROF 0.097  0.050 0.097   -     -
SIMS1  0.174  0.097 0.174 1.000   -
SIMS2  0.599  0.433 0.599 0.918  0.976

```

Fonte: Autor (2020).

Tabela 44 – Valores medidos e simulados para  $T_{20}$  (s) no cenário com MDF - 9,00 mm em 500 Hz.

Cenário: MDF - 9,00 mm			Frequência: 500 Hz					ANOVA
Fonte	Microfones	$T_{20}$ medido	Média espacial	Desvio padrão	$T_{20}$ simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	<i>Mic1</i>	1,202			1,206			
	<i>Mic2</i>	1,132	1,221	0,079	1,131	1,136	0,050	
	<i>Mic3</i>	1,227			1,118			
	<i>Mic4</i>	1,322			1,090			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk	0,908	0,482						
S2	<i>Mic5</i>	1,260			1,082			
	<i>Mic6</i>	1,238	1,239	0,058	1,145	1,103	0,029	0,002
	<i>Mic7</i>	1,298			1,085			
	<i>Mic8</i>	1,160			1,100			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk	0,754	0,153						
Mesa do professor	A	1,241			1,082			
	B	1,361	1,274	0,070	1,193	1,100	0,063	
	C	1,294			1,058			
	D	1,199			1,066			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk	0,924	0,054						

Fonte: Autor (2020).

Figura 158– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 44.

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = VALOR ~ SITUACAO, data = X)

$SITUACAO
              diff          lwr          upr          p adj
MEDS1-MEDPROF -0.05280000 -0.1879629  0.0823629486  0.8111890
MEDS2-MEDPROF -0.03485000 -0.1700129  0.1003129486  0.9600536
SIMPROF-MEDPROF -0.17392225 -0.3090852 -0.0387593014  0.0076408
SIMS1-MEDPROF  -0.13757300 -0.2727359 -0.0024100514  0.0446839
SIMS2-MEDPROF  -0.17100800 -0.3061709 -0.0358450514  0.0088298
MEDS2-MEDS1     0.01795000 -0.1172129  0.1531129486  0.9979896
SIMPROF-MEDS1  -0.12112225 -0.2562852  0.0140406986  0.0943804
SIMS1-MEDS1    -0.08477300 -0.2199359  0.0503899486  0.3833023
SIMS2-MEDS1    -0.11820800 -0.2533709  0.0169549486  0.1071504
SIMPROF-MEDS2  -0.13907225 -0.2742352 -0.0039093014  0.0416485
SIMS1-MEDS2    -0.10272300 -0.2378859  0.0324399486  0.2026415
SIMS2-MEDS2    -0.13615800 -0.2713209 -0.0009950514  0.0477374
SIMS1-SIMPROF   0.03634925 -0.0988137  0.1715121986  0.9525116
SIMS2-SIMPROF   0.00291425 -0.1322487  0.1380771986  0.9999997
SIMS2-SIMS1    -0.03343500 -0.1685979  0.1017279486  0.9663957

```

Fonte: Autor (2020).

Tabela 45 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário com MDF - 9,00 mm em 1000 Hz.

Cenário: MDF - 9,00 mm			Frequência: 1000 Hz					ANOVA
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	Mic1	1,030			1,043			
	Mic2	1,019	1,052	0,033	1,058	1,048	0,010	
	Mic3	1,071			1,038			
	Mic4	1,089			1,055			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,477			0,537			
S2	Mic5	1,069			1,018			
	Mic6	0,981	1,046	0,053	1,132	1,034	0,075	0,0004
	Mic7	1,105			0,952			
	Mic8	1,030			1,035			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,957			0,807			
Mesa do professor	A	1,035			1,194			
	B	1,095	1,038	0,049	1,295	1,218	0,055	
	C	0,975			1,168			
	D	1,045			1,216			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,866			0,531			

Fonte: Autor (2020).

Figura 159– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 45.

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = VALOR ~ SITUACAO, data = x)

$SITUACAO
              diff          lwr          upr          p adj
MEDS1-MEDPROF  0.014572500 -0.0979477  0.12709270  0.9982161
MEDS2-MEDPROF  0.008737500 -0.1037827  0.12125770  0.9998509
SIMPROF-MEDPROF 0.180786500  0.0682663  0.29330670  0.0008908
SIMS1-MEDPROF  0.010744750 -0.1017754  0.12326495  0.9995898
SIMS2-MEDPROF -0.003533775 -0.1160540  0.10898642  0.9999983
MEDS2-MEDS1    -0.005835000 -0.1183552  0.10668520  0.9999797
SIMPROF-MEDS1  0.166214000  0.0536938  0.27873420  0.0021200
SIMS1-MEDS1    -0.003827750 -0.1163479  0.10869245  0.9999975
SIMS2-MEDS1    -0.018106275 -0.1306265  0.09441392  0.9950411
SIMPROF-MEDS2  0.172049000  0.0595288  0.28456920  0.0014966
SIMS1-MEDS2    0.002007250 -0.1105129  0.11452745  0.9999999
SIMS2-MEDS2    -0.012271275 -0.1247915  0.10024892  0.9992184
SIMS1-SIMPROF -0.170041750 -0.2825619 -0.05752155  0.0016869
SIMS2-SIMPROF -0.184320275 -0.2968405 -0.07180008  0.0007229
SIMS2-SIMS1   -0.014278525 -0.1267987  0.09824167  0.9983814

```

Fonte: Autor (2020).

Tabela 46 – Valores medidos e simulados para  $T_{20}$  (s) no cenário com MDF - 9,00 mm em 2000 Hz.

Cenário: MDF - 9,00 mm			Frequência: 2000 Hz					ANOVA
Fonte	Microfones	$T_{20}$ medido	Média espacial	Desvio padrão	$T_{20}$ simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	<i>Mic1</i>	1,060	1,007	0,038	0,973	0,954	0,025	
	<i>Mic2</i>	0,976			0,959			
	<i>Mic3</i>	0,985			0,968			
	<i>Mic4</i>	1,006			0,917			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,354			0,164			
S2	<i>Mic5</i>	1,008	1,004	0,020	0,911	0,942	0,024	0,002
	<i>Mic6</i>	0,978			0,951			
	<i>Mic7</i>	1,001			0,969			
	<i>Mic8</i>	1,027			0,937			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,960			0,966			
Mesa do professor	A	0,973	1,006	0,023	0,914	0,940	0,027	
	B	1,008			0,975			
	C	1,023			0,946			
	D	1,020			0,925			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,198			0,723			

Fonte: Autor (2020).

Figura 160– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 46.

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = VALOR ~ SITUACAO, data = x)

$SITUACAO
              diff          lwr          upr          p adj
MEDS1-MEDPROF  0.000872500 -0.05948305  0.061228050 1.0000000
MEDS2-MEDPROF -0.002342500 -0.06269805  0.058013050 0.9999952
SIMPROF-MEDPROF -0.065861650 -0.12621720 -0.005506100 0.0279066
SIMS1-MEDPROF  -0.051652900 -0.11200845  0.008702650 0.1194574
SIMS2-MEDPROF  -0.063908975 -0.12426452 -0.003553425 0.0343922
MEDS2-MEDS1    -0.003215000 -0.06357055  0.057140550 0.9999768
SIMPROF-MEDS1  -0.066734150 -0.12708970 -0.006378600 0.0254022
SIMS1-MEDS1    -0.052525400 -0.11288095  0.007830150 0.1098664
SIMS2-MEDS1    -0.064781475 -0.12513702 -0.004425925 0.0313346
SIMPROF-MEDS2  -0.063519150 -0.12387470 -0.003163600 0.0358479
SIMS1-MEDS2    -0.049310400 -0.10966595  0.011045150 0.1488322
SIMS2-MEDS2    -0.061566475 -0.12192202 -0.001210925 0.0440568
SIMS1-SIMPROF  0.014208750 -0.04614680  0.074564300 0.9727550
SIMS2-SIMPROF  0.001952675 -0.05840287  0.062308225 0.9999981
SIMS2-SIMS1    -0.012256075 -0.07261162  0.048099475 0.9857031

```

Fonte: Autor (2020).

Tabela 47 – Valores medidos e simulados para  $T_{20}$  (s) no cenário com MDF - 12,0 mm em 500 Hz.

Cenário: MDF - 12,0 mm			Frequência: 500 Hz					ANOVA
Fonte	Microfones	$T_{20}$ medido	Média espacial	Desvio padrão	$T_{20}$ simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	<i>Mic1</i>	1,193	1,303	0,093	1,114	1,092	0,055	
	<i>Mic2</i>	1,419			1,013			
	<i>Mic3</i>	1,317			1,098			
	<i>Mic4</i>	1,284			1,141			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,961			0,419			
S2	<i>Mic5</i>	1,290	1,261	0,113	1,084	1,103	0,034	0,006
	<i>Mic6</i>	1,171			1,136			
	<i>Mic7</i>	1,173			1,065			
	<i>Mic8</i>	1,409			1,129			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,294			0,363			
Mesa do professor	A	1,187	1,274	0,113	1,083	1,165	0,064	
	B	1,426			1,237			
	C	1,294			1,178			
	D	1,189			1,161			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,261			0,876			

Fonte: Autor (2020).

Figura 161– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 47.

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = VALOR ~ SITUACAO, data = x)

$SITUACAO
              diff          lwr          upr          p adj
MEDS1-MEDPROF  0.02887500 -0.1605672  0.218317169  0.9961488
MEDS2-MEDPROF -0.01342500 -0.2028672  0.176017169  0.9999049
SIMPROF-MEDPROF -0.10937000 -0.2988122  0.080072169  0.4698440
SIMS1-MEDPROF  -0.18231050 -0.3717527  0.007131669  0.0632050
SIMS2-MEDPROF  -0.17056425 -0.3600064  0.018877919  0.0920393
MEDS2-MEDS1    -0.04230000 -0.2317422  0.147142169  0.9783040
SIMPROF-MEDS1  -0.13824500 -0.3276872  0.051197169  0.2368445
SIMS1-MEDS1    -0.21118550 -0.4006277 -0.021743331  0.0239390
SIMS2-MEDS1    -0.19943925 -0.3888814 -0.009997081  0.0357664
SIMPROF-MEDS2  -0.09594500 -0.2853872  0.093497169  0.6030470
SIMS1-MEDS2    -0.16888550 -0.3583277  0.020556669  0.0970044
SIMS2-MEDS2    -0.15713925 -0.3465814  0.032302919  0.1387807
SIMS1-SIMPROF  -0.07294050 -0.2623827  0.116501669  0.8199226
SIMS2-SIMPROF  -0.06119425 -0.2506364  0.128247919  0.9028614
SIMS2-SIMS1    0.01174625 -0.1776959  0.201188419  0.9999508

```

Fonte: Autor (2020).

Tabela 48 – Valores medidos e simulados para  $T_{20}$  (s) no cenário com MDF - 12,0 mm em 1000 Hz.

Cenário: MDF - 12,0 mm			Frequência: 1000 Hz					ANOVA
Fonte	Microfones	$T_{20}$ medido	Média espacial	Desvio padrão	$T_{20}$ simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	<i>Mic1</i>	1,158	1,119	0,063	0,994	1,016	0,044	
	<i>Mic2</i>	1,033			1,071			
	<i>Mic3</i>	1,173			1,029			
	<i>Mic4</i>	1,110			0,969			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,501			0,893			
S2	<i>Mic5</i>	1,042	1,079	0,043	1,078	1,090	0,118	
	<i>Mic6</i>	1,124			0,968			
	<i>Mic7</i>	1,108			1,061			
	<i>Mic8</i>	1,043			1,251			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,128			0,606			
Mesa do professor	A	1,043	1,117	0,063	1,006	1,069	0,162	
	B	1,193			1,280			
	C	1,133			1,093			
	D	1,098			0,896			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,998			0,909			

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 49 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário com MDF - 12,0 mm em 2000 Hz.**

Cenário: MDF - 12,0mm			Frequência: 2000 Hz					
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	Kruskall-Wallis
S1	<i>Mic1</i>	1,055	1,020	0,062	0,871	0,9376	0,0443	
	<i>Mic2</i>	0,976			0,956			
	<i>Mic3</i>	1,090			0,964			
	<i>Mic4</i>	0,961			0,960			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,415			0,011			
S2	<i>Mic5</i>	1,038	0,994	0,038	0,884	0,9420	0,0540	0,063
	<i>Mic6</i>	0,961			0,974			
	<i>Mic7</i>	1,015			0,909			
	<i>Mic8</i>	0,963			1,000			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,247			0,586			
Mesa do professor	A	1,030	1,004	0,028	0,879	0,9243	0,0526	
	B	0,982			0,888			
	C	1,026			0,993			
	D	0,978			0,937			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,100			0,456			

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 50 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário com MDF - 15,0 mm em 500 Hz.**

Cenário: MDF - 15,0mm			Frequência: 500 Hz					
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	ANOVA
S1	<i>Mic1</i>	1,202	1,221	0,079	1,206	1,136	0,050	
	<i>Mic2</i>	1,132			1,131			
	<i>Mic3</i>	1,227			1,118			
	<i>Mic4</i>	1,322			1,090			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,908			0,482			
S2	<i>Mic5</i>	1,260	1,239	0,058	1,082	1,103	0,029	0,002
	<i>Mic6</i>	1,238			1,145			
	<i>Mic7</i>	1,298			1,085			
	<i>Mic8</i>	1,160			1,100			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,754			0,153			
Mesa do professor	A	1,241	1,274	0,070	1,082	1,100	0,063	
	B	1,361			1,193			
	C	1,294			1,058			
	D	1,199			1,066			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,924			0,054			

Fonte: Autor (2020).



Figura 162– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 50.

```

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = VALOR ~ SITUACAO, data = x)

$SITUACAO
              diff          lwr          upr          p adj
MEDS1-MEDPROF -0.05280000 -0.1879629  0.0823629486 0.8111890
MEDS2-MEDPROF -0.03485000 -0.1700129  0.1003129486 0.9600536
SIMPROF-MEDPROF -0.17392225 -0.3090852 -0.0387593014 0.0076408
SIMS1-MEDPROF  -0.13757300 -0.2727359 -0.0024100514 0.0446839
SIMS2-MEDPROF  -0.17100800 -0.3061709 -0.0358450514 0.0088298
MEDS2-MEDS1     0.01795000 -0.1172129  0.1531129486 0.9979896
SIMPROF-MEDS1  -0.12112225 -0.2562852  0.0140406986 0.0943804
SIMS1-MEDS1    -0.08477300 -0.2199359  0.0503899486 0.3833023
SIMS2-MEDS1    -0.11820800 -0.2533709  0.0169549486 0.1071504
SIMPROF-MEDS2  -0.13907225 -0.2742352 -0.0039093014 0.0416485
SIMS1-MEDS2    -0.10272300 -0.2378859  0.0324399486 0.2026415
SIMS2-MEDS2    -0.13615800 -0.2713209 -0.0009950514 0.0477374
SIMS1-SIMPROF   0.03634925 -0.0988137  0.1715121986 0.9525116
SIMS2-SIMPROF   0.00291425 -0.1322487  0.1380771986 0.9999997
SIMS2-SIMS1    -0.03343500 -0.1685979  0.1017279486 0.9663957

```

Fonte: Autor (2020).

Tabela 51 – Valores medidos e simulados para  $T_{20}$  (s) no cenário com MDF - 15,0 mm em 1000 Hz.

Cenário: MDF - 15,0 mm			Frequência: 1000 Hz					ANOVA
Fonte	Microfones	$T_{20}$ medido	Média espacial	Desvio padrão	$T_{20}$ simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	<i>Mic1</i>	1,030			1,043			
	<i>Mic2</i>	1,019	1,052	0,033	1,058	1,048	0,010	
	<i>Mic3</i>	1,071			1,038			
	<i>Mic4</i>	1,089			1,055			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,477			0,537			
S2	<i>Mic5</i>	1,069			1,018			
	<i>Mic6</i>	0,981	1,046	0,053	1,132	1,034	0,075	0,0004
	<i>Mic7</i>	1,105			0,952			
	<i>Mic8</i>	1,030			1,035			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,957			0,807			
Mesa do professor	A	1,035			1,194			
	B	1,095	1,038	0,049	1,295	1,218	0,055	
	C	0,975			1,168			
	D	1,045			1,216			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,866			0,531			

Fonte: Autor (2020).

Figura 163– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 51.

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = VALOR ~ SITUACAO, data = x)

$SITUACAO
              diff          lwr          upr          p adj
MEDS1-MEDPROF  0.014572500 -0.0979477  0.12709270 0.9982161
MEDS2-MEDPROF  0.008737500 -0.1037827  0.12125770 0.9998509
SIMPROF-MEDPROF 0.180786500  0.0682663  0.29330670 0.0008908
SIMS1-MEDPROF  0.010744750 -0.1017754  0.12326495 0.9995898
SIMS2-MEDPROF -0.003533775 -0.1160540  0.10898642 0.9999983
MEDS2-MEDS1    -0.005835000 -0.1183552  0.10668520 0.9999797
SIMPROF-MEDS1  0.166214000  0.0536938  0.27873420 0.0021200
SIMS1-MEDS1    -0.003827750 -0.1163479  0.10869245 0.9999975
SIMS2-MEDS1    -0.018106275 -0.1306265  0.09441392 0.9950411
SIMPROF-MEDS2  0.172049000  0.0595288  0.28456920 0.0014966
SIMS1-MEDS2    0.002007250 -0.1105129  0.11452745 0.9999999
SIMS2-MEDS2   -0.012271275 -0.1247915  0.10024892 0.9992184
SIMS1-SIMPROF -0.170041750 -0.2825619 -0.05752155 0.0016869
SIMS2-SIMPROF -0.184320275 -0.2968405 -0.07180008 0.0007229
SIMS2-SIMS1    -0.014278525 -0.1267987  0.09824167 0.9983814

```

Fonte: Autor (2020).

Tabela 52 – Valores medidos e simulados para  $T_{20}$  (s) no cenário com MDF - 15,0 mm em 2000 Hz.

Cenário: MDF - 15,0 mm			Frequência: 2000 Hz					ANOVA
Fonte	Microfones	$T_{20}$ medido	Média espacial	Desvio padrão	$T_{20}$ simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	<i>Mic1</i>	1,060			0,973			
	<i>Mic2</i>	0,976	1,007	0,038	0,959	0,954	0,025	
	<i>Mic3</i>	0,985			0,968			
	<i>Mic4</i>	1,006			0,917			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,354			0,164			
S2	<i>Mic5</i>	1,008			0,911			
	<i>Mic6</i>	0,978	1,004	0,020	0,951	0,942	0,024	0,002
	<i>Mic7</i>	1,001			0,969			
	<i>Mic8</i>	1,027			0,937			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,960			0,966			
Mesa do professor	A	0,973			0,914			
	B	1,008	1,006	0,023	0,975	0,940	0,027	
	C	1,023			0,946			
	D	1,020			0,925			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,198			0,723			

Fonte: Autor (2020).

Figura 164– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 52.

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = VALOR ~ SITUACAO, data = X)

$SITUACAO
              diff          lwr          upr          p adj
MEDS1-MEDPROF  0.000872500 -0.05948305  0.061228050 1.0000000
MEDS2-MEDPROF -0.002342500 -0.06269805  0.058013050 0.9999952
SIMPROF-MEDPROF -0.065861650 -0.12621720 -0.005506100 0.0279066
SIMS1-MEDPROF  -0.051652900 -0.11200845  0.008702650 0.1194574
SIMS2-MEDPROF  -0.063908975 -0.12426452 -0.003553425 0.0343922
MEDS2-MEDS1   -0.003215000 -0.06357055  0.057140550 0.9999768
SIMPROF-MEDS1 -0.066734150 -0.12708970 -0.006378600 0.0254022
SIMS1-MEDS1   -0.052525400 -0.11288095  0.007830150 0.1098664
SIMS2-MEDS1   -0.064781475 -0.12513702 -0.004425925 0.0313346
SIMPROF-MEDS2 -0.063519150 -0.12387470 -0.003163600 0.0358479
SIMS1-MEDS2   -0.049310400 -0.10966595  0.011045150 0.1488322
SIMS2-MEDS2   -0.061566475 -0.12192202 -0.001210925 0.0440568
SIMS1-SIMPROF  0.014208750 -0.04614680  0.074564300 0.9727550
SIMS2-SIMPROF  0.001952675 -0.05840287  0.062308225 0.9999981
SIMS2-SIMS1   -0.012256075 -0.07261162  0.048099475 0.9857031

```

Fonte: Autor (2020).

Tabela 53 – Valores medidos e simulados para  $T_{20}$  (s) no cenário com OSB - 8,00 mm em 500 Hz.

Cenário: OSB - 8,00 mm		Frequência: 500 Hz						ANOVA
Fonte	Microfones	$T_{20}$ medido	Média espacial	Desvio padrão	$T_{20}$ simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	<i>Mic1</i>	1,397			1,157			
	<i>Mic2</i>	1,316	1,343	0,075	1,012	1,086	0,060	
	<i>Mic3</i>	1,248			1,100			
	<i>Mic4</i>	1,409			1,074			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,468			0,988			
S2	<i>Mic5</i>	1,310			1,148			
	<i>Mic6</i>	1,324	1,279	0,045	1,151	1,122	0,037	5,43E-05
	<i>Mic7</i>	1,253			1,117			
	<i>Mic8</i>	1,229			1,071			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,477			0,318			
Mesa do professor	A	1,561			1,125			
	B	1,330	1,366	0,138	1,143	1,141	0,018	
	C	1,333			1,129			
	D	1,239			1,165			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,294			0,463			

Fonte: Autor (2020).

Figura 165– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 53.

```

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = VALOR ~ SITUACAO, data = x)

$SITUACAO
              diff          lwr          upr          p adj
MEDS1-MEDPROF -0.0229750 -0.1868383  0.140888332  0.9973999
MEDS2-MEDPROF -0.0867500 -0.2506133  0.077113332  0.5592343
SIMPROF-MEDPROF -0.2249340 -0.3887973 -0.061070668  0.0042855
SIMS1-MEDPROF  -0.2799220 -0.4437853 -0.116058668  0.0004548
SIMS2-MEDPROF  -0.2439125 -0.4077758 -0.080049168  0.0019647
MEDS2-MEDS1    -0.0637750 -0.2276383  0.100088332  0.8134525
SIMPROF-MEDS1 -0.2019590 -0.3658223 -0.038095668  0.0109902
SIMS1-MEDS1    -0.2569470 -0.4208103 -0.093083668  0.0011527
SIMS2-MEDS1    -0.2209375 -0.3848008 -0.057074168  0.0050508
SIMPROF-MEDS2 -0.1381840 -0.3020473  0.025679332  0.1283406
SIMS1-MEDS2   -0.1931720 -0.3570353 -0.029308668  0.0157014
SIMS2-MEDS2   -0.1571625 -0.3210258  0.006700832  0.0644826
SIMS1-SIMPROF -0.0549880 -0.2188513  0.108875332  0.8882368
SIMS2-SIMPROF -0.0189785 -0.1828418  0.144884832  0.9989554
SIMS2-SIMS1    0.0360095 -0.1278538  0.199872832  0.9797579

```

Fonte: Autor (2020).

Tabela 54 – Valores medidos e simulados para  $T_{20}$  (s) no cenário com OSB - 8,00 mm em 1000 Hz.

Cenário: OSB - 8,00 mm			Frequência: 1000 Hz					Teste de Kruskal- Wallis
Fonte	Microfones	$T_{20}$ medido	Média espacial	Desvio padrão	$T_{20}$ simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	<i>Mic1</i>	1,152			1,055			
	<i>Mic2</i>	0,954	1,036	0,096	0,884	0,977	0,075	
	<i>Mic3</i>	0,959			1,017			
	<i>Mic4</i>	1,079			0,950			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,305			0,835			
S2	<i>Mic5</i>	1,054			1,065			
	<i>Mic6</i>	1,014	1,026	0,030	0,998	1,042	0,091	0,046
	<i>Mic7</i>	1,046			0,947			
	<i>Mic8</i>	0,990			1,159			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,601			0,888			
Mesa do professor	A	1,105			1,077			
	B	1,104	1,110	0,014	1,323	1,226	0,153	
	C	1,101			1,388			
	D	1,131			1,116			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,032			0,337			

Fonte: Autor (2020).

Figura 166– Teste de Nemenyi entre os grupos da Tabela 54.

```

Pairwise comparisons using Tukey and Kramer (Nemenyi) test
with Tukey-Dist approximation for independent samples

data: X$VALOR and X$SITUACAO

      MEDPROF MEDS1 MEDS2 SIMPROF SIMS1
MEDS1  0.785  -    -    -    -
MEDS2  0.466  0.996 -    -    -
SIMPROF 0.998  0.498 0.215 -    -
SIMS1  0.194  0.918 0.996 0.066 -
SIMS2  0.757  1.000 0.998 0.466  0.933

P value adjustment method: none

```

Fonte: Autor (2020).

Tabela 55 – Valores medidos e simulados para  $T_{20}$  (s) no cenário com OSB - 8,00 mm em 2000 Hz.

Cenário: OSB - 8,00 mm			Frequência: 2000 Hz					
Fonte	Microfones	$T_{20}$ medido	Média espacial	Desvio padrão	$T_{20}$ simulado	Média espacial	Desvio padrão	ANOVA
S1	<i>Mic1</i>	1,039			0,960			
	<i>Mic2</i>	1,008	1,025	0,018	0,979	0,946	0,034	
	<i>Mic3</i>	1,010			0,945			
	<i>Mic4</i>	1,041			0,898			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,062			0,663			
S2	<i>Mic5</i>	0,983			0,959			
	<i>Mic6</i>	1,048	0,990	0,055	0,922	0,939	0,025	0,004
	<i>Mic7</i>	0,918			0,961			
	<i>Mic8</i>	1,010			0,914			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,891			0,162			
Mesa do professor	A	1,006			0,959			
	B	1,036	1,005	0,024	0,927	0,925	0,040	
	C	1,000			0,868			
	D	0,977			0,947			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,888			0,385			

Fonte: Autor (2020).

Figura 167– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 55.

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = VALOR ~ SITUACAO, data = X)

$SITUACAO
              diff          lwr          upr          p adj
MEDS1-MEDPROF  0.01992000 -0.05860781  0.0984478051 0.9626677
MEDS2-MEDPROF -0.01518500 -0.09371281  0.0633428051 0.9885110
SIMPROF-MEDPROF -0.07944663 -0.15797443 -0.0009188199 0.0464490
SIMS1-MEDPROF  -0.05919870 -0.13772651  0.0193291051 0.2092536
SIMS2-MEDPROF  -0.06562810 -0.14415591  0.0128997051 0.1339704
MEDS2-MEDS1    -0.03510500 -0.11363281  0.0434228051 0.7148207
SIMPROF-MEDS1  -0.09936663 -0.17789443 -0.0208388199 0.0088197
SIMS1-MEDS1    -0.07911870 -0.15764651 -0.0005908949 0.0476885
SIMS2-MEDS1    -0.08554810 -0.16407591 -0.0070202949 0.0282398
SIMPROF-MEDS2  -0.06426163 -0.14278943  0.0142661801 0.1477325
SIMS1-MEDS2    -0.04401370 -0.12254151  0.0345141051 0.5007471
SIMS2-MEDS2    -0.05044310 -0.12897091  0.0280847051 0.3587720
SIMS1-SIMPROF  0.02024793 -0.05827988  0.0987757301 0.9600491
SIMS2-SIMPROF  0.01381853 -0.06470928  0.0923463301 0.9925100
SIMS2-SIMS1    -0.00642940 -0.08495721  0.0720984051 0.9998066

```

Fonte: Autor (2020).

Tabela 56 – Valores medidos e simulados para  $T_{20}$  (s) no cenário com OSB - 12,0 mm em 500 Hz.

Cenário: OSB - 12,0 mm			Frequência: 500 Hz					ANOVA
Fonte	Microfones	$T_{20}$ medido	Média espacial	Desvio padrão	$T_{20}$ simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	<i>Mic1</i>	1,097			1,057			
	<i>Mic2</i>	1,274	1,246	0,103	1,089	1,107	0,070	
	<i>Mic3</i>	1,277			1,210			
	<i>Mic4</i>	1,335			1,070			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,214			0,088			
S2	<i>Mic5</i>	1,318			1,158			
	<i>Mic6</i>	1,255	1,316	0,072	1,053	1,134	0,065	0,004
	<i>Mic7</i>	1,274			1,117			
	<i>Mic8</i>	1,417			1,207			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,416			0,984			
Mesa do professor	A	1,253			1,118			
	B	1,390	1,305	0,059	1,151	1,126	0,054	
	C	1,295			1,054			
	D	1,282			1,180			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,339			0,816			

Fonte: Autor (2020).

Figura 168– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 56.

```

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = VALOR ~ SITUACAO, data = x)

$SITUACAO
              diff          lwr          upr          p adj
MEDS1-MEDPROF -0.05925000 -0.22212771  0.103627706 0.8512761
MEDS2-MEDPROF  0.01137500 -0.15150271  0.174252706 0.9999115
SIMPROF-MEDPROF -0.17900075 -0.34187846 -0.016123044 0.0265341
SIMS1-MEDPROF  -0.19815125 -0.36102896 -0.035273544 0.0122216
SIMS2-MEDPROF  -0.17100450 -0.33388221 -0.008126794 0.0364318
MEDS2-MEDS1    0.07062500 -0.09225271  0.233502706 0.7389758
SIMPROF-MEDS1 -0.11975075 -0.28262846  0.043126956 0.2303552
SIMS1-MEDS1    -0.13890125 -0.30177896  0.023976456 0.1215468
SIMS2-MEDS1    -0.11175450 -0.27463221  0.051123206 0.2934406
SIMPROF-MEDS2 -0.19037575 -0.35325346 -0.027498044 0.0167795
SIMS1-MEDS2    -0.20952625 -0.37240396 -0.046648544 0.0076591
SIMS2-MEDS2    -0.18237950 -0.34525721 -0.019501794 0.0231757
SIMS1-SIMPROF  -0.01915050 -0.18202821  0.143727206 0.9988769
SIMS2-SIMPROF  0.00799625 -0.15488146  0.170873956 0.9999845
SIMS2-SIMS1    0.02714675 -0.13573096  0.190024456 0.9941649

```

Fonte: Autor (2020).

Tabela 57 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário com OSB - 12,0 mm em 1000 Hz.

Cenário: OSB - 12,0 mm		Frequência: 1000 Hz						
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	Teste de Kruskal-Wallis
S1	Mic1	1,171			1,121			
	Mic2	1,015			1,133			
	Mic3	1,154	1,097	0,077	1,067	1,111	0,030	
	Mic4	1,049			1,124			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,326			0,083			
S2	Mic5	1,153			1,009			
	Mic6	0,990			1,056			
	Mic7	1,082	1,094	0,077	0,996	1,044	0,053	0,112
	Mic8	1,152			1,114			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,260			0,551			
Mesa do professor	A	1,096			0,986			
	B	1,109			1,074			
	C	1,062	1,088	0,020	0,972	1,004	0,047	
	D	1,087			0,983			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,816			0,032			

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 58 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário com OSB - 12,0 mm em 2000 Hz.**

Cenário: OSB - 12,0 mm			Frequência: 2000 Hz					
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	ANOVA
S1	Mic1	0,981			1,003			
	Mic2	0,999	1,010	0,026	0,876	0,925	0,054	
	Mic3	1,041			0,910			
	Mic4	1,021			0,910			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,943			0,235			
S2	Mic5	0,993			0,906			
	Mic6	0,973	0,984	0,010	0,955	0,912	0,035	0,003
	Mic7	0,993			0,915			
	Mic8	0,978			0,870			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,186			0,901			
Mesa do professor	A	1,032			0,896			
	B	1,001	1,002	0,025	0,953	0,929	0,050	
	C	0,972			0,880			
	D	1,005			0,988			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,841			0,590			

Fonte: Autor (2020).

**Figura 169– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 58.**

```

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = VALOR ~ SITUACAO, data = x)

$SITUACAO
              diff          lwr          upr          p adj
MEDS1-MEDPROF  0.00803000 -0.07451039  0.090570387  0.9995509
MEDS2-MEDPROF -0.01801500 -0.10055539  0.064525387  0.9803523
SIMPROF-MEDPROF -0.07295158 -0.15549196  0.009588812  0.1014852
SIMS1-MEDPROF  -0.07744993 -0.15999031  0.005090462  0.0732320
SIMS2-MEDPROF  -0.09074388 -0.17328426 -0.008203488  0.0264653
MEDS2-MEDS1    -0.02604500 -0.10858539  0.056495387  0.9110264
SIMPROF-MEDS1  -0.08098158 -0.16352196  0.001558812  0.0562677
SIMS1-MEDS1    -0.08547993 -0.16802031 -0.002939538  0.0399124
SIMS2-MEDS1    -0.09877388 -0.18131426 -0.016233488  0.0139513
SIMPROF-MEDS2  -0.05493658 -0.13747696  0.027603812  0.3230818
SIMS1-MEDS2    -0.05943493 -0.14197531  0.023105462  0.2486538
SIMS2-MEDS2    -0.07272888 -0.15526926  0.009811512  0.1031064
SIMS1-SIMPROF  -0.00449835 -0.08703874  0.078042037  0.9999741
SIMS2-SIMPROF  -0.01779230 -0.10033269  0.064748087  0.9813925
SIMS2-SIMS1    -0.01329395 -0.09583434  0.069246437  0.9950204

```

Fonte: Autor (2020).



**Tabela 59 – Valores medidos e simulados para  $T_{20}$  (s) no cenário com OSB - 25,0 mm em 500 Hz.**

Cenário: OSB - 25,0 mm			Frequência: 500 Hz					
Fonte	Microfones	$T_{20}$ medido	Média espacial	Desvio padrão	$T_{20}$ simulado	Média espacial	Desvio padrão	ANOVA
S1	Mic1	1,382			1,035			
	Mic2	1,267	1,274	0,086	1,078	1,077	0,035	
	Mic3	1,277			1,120			
	Mic4	1,172			1,075			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	0,796	0,760						
S2	Mic5	1,305			1,146			
	Mic6	1,313	1,310	0,008	1,124	1,112	0,046	0,001
	Mic7	1,302			1,132			
	Mic8	1,320			1,044			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	0,653	0,111						
Mesa do professor	A	1,458			1,140			
	B	1,148	1,280	0,142	1,037	1,135	0,079	
	C	1,328			1,230			
	D	1,186			1,133			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	0,593	0,781						

Fonte: Autor (2020).

**Figura 170– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 59.**

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = VALOR ~ SITUACAO, data = x)

$SITUACAO
              diff          lwr          upr          p adj
MEDS1-MEDPROF -0.0057000 -0.1824282  0.171028184 0.9999981
MEDS2-MEDPROF  0.0298750 -0.1468532  0.206603184 0.9937712
SIMPROF-MEDPROF -0.1447820 -0.3215102  0.031946184 0.1469878
SIMS1-MEDPROF -0.2029515 -0.3796797 -0.026223316 0.0192029
SIMS2-MEDPROF -0.1683830 -0.3451112  0.008345184 0.0670402
MEDS2-MEDS1    0.0355750 -0.1411532  0.212303184 0.9862484
SIMPROF-MEDS1 -0.1390820 -0.3158102  0.037646184 0.1754910
SIMS1-MEDS1    -0.1972515 -0.3739797 -0.020523316 0.0237282
SIMS2-MEDS1    -0.1626830 -0.3394112  0.014045184 0.0815683
SIMPROF-MEDS2 -0.1746570 -0.3513852  0.002071184 0.0538085
SIMS1-MEDS2    -0.2328265 -0.4095547 -0.056098316 0.0062176
SIMS2-MEDS2    -0.1982580 -0.3749862 -0.021529816 0.0228607
SIMS1-SIMPROF -0.0581695 -0.2348977  0.118558684 0.8958696
SIMS2-SIMPROF -0.0236010 -0.2003292  0.153127184 0.9979357
SIMS2-SIMS1    0.0345685 -0.1421597  0.211296684 0.9879038

```

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 60 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário com OSB - 25,0 mm em 1000 Hz.**

Cenário: OSB - 25,0 mm			Frequência: 1000 Hz					
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	Teste de Kruskal-Wallis
S1	<i>Mic1</i>	1,021			0,931			
	<i>Mic2</i>	1,135	1,089	0,051	1,039	1,008	0,052	
	<i>Mic3</i>	1,080			1,035			
	<i>Mic4</i>	1,121			1,028			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk	0,543	0,014						
S2	<i>Mic5</i>	1,088			0,999			
	<i>Mic6</i>	1,100	1,098	0,033	0,981	1,019	0,045	0,082
	<i>Mic7</i>	1,062			1,015			
	<i>Mic8</i>	1,141			1,083			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk	0,885	0,365						
Mesa do professor	A	1,123			1,001			
	B	1,160	1,091	0,060	0,900	1,016	0,088	
	C	1,046			1,056			
	D	1,036			1,106			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk	0,374	0,850						

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 61 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário com OSB - 25,0 mm em 2000 Hz.**

Cenário: OSB - 25,0 mm			Frequência: 2000 Hz					
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	ANOVA
S1	<i>Mic1</i>	0,976			0,901			
	<i>Mic2</i>	0,964	0,966	0,012	0,871	0,908	0,029	
	<i>Mic3</i>	0,974			0,937			
	<i>Mic4</i>	0,949			0,921			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk	0,357	0,888						
S2	<i>Mic5</i>	1,027			0,890			
	<i>Mic6</i>	0,980	0,994	0,031	0,941	0,913	0,041	0,011
	<i>Mic7</i>	0,958			0,954			
	<i>Mic8</i>	1,012			0,867			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk	0,772	0,487						
Mesa do professor	A	0,900			0,882			
	B	0,991	1,001	0,078	0,957	0,907	0,039	
	C	1,087			0,872			
	D	1,026			0,918			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk	0,928	0,576						

Fonte: Autor (2020).

Figura 171– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 61.

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = VALOR ~ SITUACAO, data = X)

$SITUACAO
              diff          lwr          upr          p adj
MEDS1-MEDPROF -0.035127500 -0.13246928 0.062214281 0.8553323
MEDS2-MEDPROF -0.006940000 -0.10428178 0.090401781 0.9999021
SIMPROF-MEDPROF -0.093610150 -0.19095193 0.003731631 0.0634744
SIMS1-MEDPROF  -0.093410275 -0.19075206 0.003931506 0.0642827
SIMS2-MEDPROF  -0.087851025 -0.18519281 0.009490756 0.0908688
MEDS2-MEDS1     0.028187500 -0.06915428 0.125529281 0.9361255
SIMPROF-MEDS1  -0.058482650 -0.15582443 0.038859131 0.4280748
SIMS1-MEDS1     -0.058282775 -0.15562456 0.039059006 0.4316606
SIMS2-MEDS1     -0.052723525 -0.15006531 0.044618256 0.5360490
SIMPROF-MEDS2  -0.086670150 -0.18401193 0.010671631 0.0976479
SIMS1-MEDS2     -0.086470275 -0.18381206 0.010871506 0.0988386
SIMS2-MEDS2     -0.080911025 -0.17825281 0.016430756 0.1374407
SIMS1-SIMPROF   0.000199875  -0.09714191 0.097541656 1.0000000
SIMS2-SIMPROF   0.005759125  -0.09158266 0.103100906 0.9999610
SIMS2-SIMS1     0.005559250  -0.09178253 0.102901031 0.9999673

```

Fonte: Autor (2020).

Tabela 62 – Valores medidos e simulados para  $T_{20}$  (s) no cenário com WWCB - 17,0 mm em 500 Hz.

Cenário:		Frequência: 500 Hz						
WWCB - 17,0 mm TKS								
Fonte	Microfones	$T_{20}$ medido	Média espacial	Desvio padrão	$T_{20}$ simulado	Média espacial	Desvio padrão	Teste de Kruskal-Wallis
S1	<i>Mic1</i>	1,262			1,135			
	<i>Mic2</i>	1,105	1,258	0,115	1,204	1,132	0,054	
	<i>Mic3</i>	1,281			1,111			
	<i>Mic4</i>	1,383			1,078			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,736			0,778			
S2	<i>Mic5</i>	1,345			1,213			
	<i>Mic6</i>	1,304	1,279	0,066	1,157	1,134	0,078	0,016
	<i>Mic7</i>	1,277			1,026			
	<i>Mic8</i>	1,190			1,138			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,746			0,652			
Mesa do professor	A	1,170			1,109			
	B	1,273	1,246	0,069	1,095	1,076	0,048	
	C	1,329			1,095			
	D	1,214			1,004			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,931			0,036			

Fonte: Autor (2020).

Figura 172– Teste de Nemenyi entre os grupos da Tabela 62.

```

Pairwise comparisons using Tukey and Kramer (Nemenyi) test
with Tukey-Dist approximation for independent samples

data: X$VALOR and X$SITUACAO

      MEDPROF MEDS1 MEDS2 SIMPROF SIMS1
MEDS1  1.000   -     -     -     -
MEDS2  0.999  0.998 -     -     -
SIMPROF 0.110  0.124 0.037 -     -
SIMS1  0.532  0.565 0.287 0.958 -
SIMS2  0.664  0.696 0.402 0.901 1.000

P value adjustment method: none

```

Fonte: Autor (2020).

Tabela 63 – Valores medidos e simulados para  $T_{20}$  (s) no cenário com WWCB - 17,0 mm em 1000 Hz.

Cenário:		Frequência: 1000 Hz						
WWCB - 17,0 mm TKS								
Fonte	Microfones	$T_{20}$ medido	Média espacial	Desvio padrão	$T_{20}$ simulado	Média espacial	Desvio padrão	ANOVA
S1	<i>Mic1</i>	1,061			0,981			
	<i>Mic2</i>	1,110	1,075	0,027	1,127	1,089	0,086	
	<i>Mic3</i>	1,081			1,182			
	<i>Mic4</i>	1,049			1,067			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk	0,787	0,939						
S2	<i>Mic5</i>	1,160			1,139			
	<i>Mic6</i>	1,073	1,096	0,061	1,087	1,107	0,032	0,928
	<i>Mic7</i>	1,128			1,072			
	<i>Mic8</i>	1,022			1,128			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk	0,854	0,439						
Mesa do professor	A	1,101			0,943			
	B	1,108	1,067	0,052	1,211	1,114	0,117	
	C	0,996			1,149			
	D	1,065			1,153			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk	0,317	0,155						

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 64 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário com WWCB - 17,0 mm em 2000 Hz.**

Cenário: WWCB - 17,0 mm TKS		Frequência: 2000 Hz						ANOVA
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	Mic1	0,838	0,847	0,037	0,905	0,882	0,020	
	Mic2	0,802			0,880			
	Mic3	0,891			0,885			
	Mic4	0,857			0,857			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,997			0,918			
S2	Mic5	0,837	0,872	0,036	0,892	0,883	0,020	0,285
	Mic6	0,909			0,854			
	Mic7	0,847			0,885			
	Mic8	0,895			0,901			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,352			0,413			
Mesa do professor	A	0,911	0,892	0,023	0,855	0,882	0,019	
	B	0,859			0,885			
	C	0,905			0,896			
	D	0,892			0,893			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,375			0,205			

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 65 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário com WWCB - 25,0 mm TKS em 500 Hz.**

Cenário: WWCB - 25,0mm TKS		Frequência: 500 Hz						ANOVA
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	Mic1	1,137	1,182	0,086	1,050	1,047	0,012	
	Mic2	1,091			1,064			
	Mic3	1,213			1,041			
	Mic4	1,287			1,036			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,865			0,667			
S2	Mic5	1,120	1,160	0,036	1,164	1,143	0,016	0,041
	Mic6	1,139			1,145			
	Mic7	1,181			1,130			
	Mic8	1,198			1,132			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,659			0,394			
Mesa do professor	A	1,091	1,183	0,073	1,066	1,154	0,079	
	B	1,180			1,109			
	C	1,268			1,227			
	D	1,195			1,215			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,862			0,310			

Fonte: Autor (2020).

Figura 173– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 65.

```

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = VALOR ~ SITUACAO, data = X)

$SITUACAO
              diff          lwr          upr          p adj
MEDS1-MEDPROF -0.00150000 -0.13345339  0.130453394 1.0000000
MEDS2-MEDPROF -0.02380000 -0.15575339  0.108153394 0.9916163
SIMPROF-MEDPROF -0.02901400 -0.16096739  0.102939394 0.9797067
SIMS1-MEDPROF  -0.13588850 -0.26784189 -0.003935106 0.0414112
SIMS2-MEDPROF  -0.04054525 -0.17249864  0.091408144 0.9195697
MEDS2-MEDS1    -0.02230000 -0.15425339  0.109653394 0.9937790
SIMPROF-MEDS1  -0.02751400 -0.15946739  0.104439394 0.9839232
SIMS1-MEDS1    -0.13438850 -0.26634189 -0.002435106 0.0445079
SIMS2-MEDS1    -0.03904525 -0.17099864  0.092908144 0.9304730
SIMPROF-MEDS2  -0.00521400 -0.13716739  0.126739394 0.9999947
SIMS1-MEDS2    -0.11208850 -0.24404189  0.019864894 0.1238974
SIMS2-MEDS2    -0.01674525 -0.14869864  0.115208144 0.9983810
SIMS1-SIMPROF  -0.10687450 -0.23882789  0.025078894 0.1547779
SIMS2-SIMPROF  -0.01153125 -0.14348464  0.120422144 0.9997339
SIMS2-SIMS1    0.09534325  -0.03661014  0.227296644 0.2455849

```

Fonte: Autor (2020).

Tabela 66 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário com WWCB - 25,0 mm TKS em 1000 Hz.

Cenário:		Frequência: 1000 Hz						ANOVA
WWCB - 25,0mm TKS		T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	Mic1	0,882			0,994			
	Mic2	0,839	0,886	0,035	0,934	0,937	0,040	
	Mic3	0,914			0,914			
	Mic4	0,910			0,905			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,349			0,265			
S2	Mic5	0,997			0,979			
	Mic6	0,945	0,935	0,059	0,923	0,959	0,031	0,119
	Mic7	0,855			0,945			
	Mic8	0,944			0,990			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,515			0,641			
Mesa do professor	A	0,895			0,928			
	B	1,000	0,921	0,055	1,032	0,987	0,058	
	C	0,913			0,946			
	D	0,875			1,040			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,297			0,178			

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 67 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário com WWCB - 25,0 mm TKS em 2000 Hz.**

Cenário: WWCB - 25,0 mm TKS		Frequência: 2000 Hz						
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	ANOVA
S1	Mic1	0,832			0,864			
	Mic2	0,892	0,860	0,026	0,864	0,860	0,005	
	Mic3	0,870			0,858			
	Mic4	0,847			0,853			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,893			0,290			
S2	Mic5	0,879			0,858			
	Mic6	0,839	0,877	0,029	0,891	0,856	0,030	0,023
	Mic7	0,878			0,859			
	Mic8	0,910			0,818			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,680			0,699			
Mesa do professor	A	0,910			0,867			
	B	0,906	0,894	0,017	0,792	0,820	0,039	
	C	0,873			0,837			
	D	0,888			0,783			
<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk		0,508			0,490			

Fonte: Autor (2020).

**Figura 174– Teste de Tukey entre os grupos da Tabela 67.**

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = VALOR ~ SITUACAO, data = x)

$SITUACAO
              diff          lwr          upr          p adj
MEDS1-MEDPROF -0.034360000 -0.09450182  0.025781819 0.4807933
MEDS2-MEDPROF -0.017735000 -0.07787682  0.042406819 0.9314000
SIMPROF-MEDPROF -0.074730075 -0.13487189 -0.014588256 0.0102743
SIMS1-MEDPROF  -0.034787675 -0.09492949  0.025354144 0.4678490
SIMS2-MEDPROF  -0.037944800 -0.09808662  0.022197019 0.3771836
MEDS2-MEDS1    0.016625000 -0.04351682  0.076766819 0.9469166
SIMPROF-MEDS1 -0.040370075 -0.10051189  0.019771744 0.3147087
SIMS1-MEDS1    -0.000427675 -0.06056949  0.059714144 1.0000000
SIMS2-MEDS1    -0.003584800 -0.06372662  0.056557019 0.9999596
SIMPROF-MEDS2 -0.056995075 -0.11713689  0.003146744 0.0691693
SIMS1-MEDS2   -0.017052675 -0.07719449  0.043089144 0.9412354
SIMS2-MEDS2   -0.020209800 -0.08035162  0.039932019 0.8876747
SIMS1-SIMPROF  0.039942400 -0.02019942  0.100084219 0.3252213
SIMS2-SIMPROF  0.036785275 -0.02335654  0.096927094 0.4093735
SIMS2-SIMS1   -0.003157125 -0.06329894  0.056984694 0.9999785

```

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 68 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário com WWCB - 25,0 mm SFS em 500 Hz.**

Cenário: WWCB - 25,0 mm SFS		Frequência: 500 Hz						Teste de Kruskal- Wallis
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	Mic1	1,444			1,081			
	Mic2	1,259	1,308	0,091	1,210	1,116	0,065	
	Mic3	1,282			1,106			
	Mic4	1,249			1,066			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk	<b>0,045</b>	0,198						
S2	Mic5	1,247			1,094			
	Mic6	1,372	1,271	0,070	1,264	1,181	0,073	<b>0,007</b>
	Mic7	1,209			1,155			
	Mic8	1,258			1,212			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk	0,322	0,964						
Mesa do professor	A	1,269			1,049			
	B	1,310	1,314	0,074	1,071	1,127	0,078	
	C	1,259			1,202			
	D	1,420			1,186			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk	0,222	0,208						

Fonte: Autor (2020).

**Figura 175– Teste de Nemenyi entre os grupos da Tabela 68.**

```

Pairwise comparisons using Tukey and Kramer (Nemenyi) test
with Tukey-Dist approximation for independent samples

data: X$VALOR and X$SITUACAO

      MEDPROF MEDS1 MEDS2 SIMPROF SIMS1
MEDS1  1.000   -     -     -     -
MEDS2  0.933  0.976   -     -     -
SIMPROF 0.043  0.075 0.372   -     -
SIMS1  0.057  0.097 0.433  1.000   -
SIMS2  0.433  0.565 0.947  0.901  0.933

```

Fonte: Autor (2020).



**Tabela 69 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário com WWCB - 25,0 mm SFS em 1000 Hz.**

Cenário: WWCB - 25,0 mm SFS		Frequência: 1000 Hz						
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	Kruskall- Wallis
S1	<i>Mic1</i>	1,063	1,030	0,043	0,941	1,006	0,112	
	<i>Mic2</i>	0,974			0,924			
	<i>Mic3</i>	1,020			1,168			
	<i>Mic4</i>	1,063			0,991			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,269			0,162			
S2	<i>Mic5</i>	1,040	0,987	0,036	0,935	0,975	0,034	0,185
	<i>Mic6</i>	0,965			0,999			
	<i>Mic7</i>	0,965			1,008			
	<i>Mic8</i>	0,978			0,959			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		<b>0,037</b>			0,521			
Mesa do professor	A	1,063	1,044	0,022	0,967	1,044	0,075	
	B	1,016			1,053			
	C	1,036			1,011			
	D	1,059			1,144			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,485			0,827			

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 70 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário com WWCB - 25,0 mm SFS em 2000 Hz.**

Cenário: WWCB - 25,0 mm SFS		Frequência: 2000 Hz						
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	ANOVA
S1	<i>Mic1</i>	0,835	0,879	0,035	0,850	0,843	0,022	
	<i>Mic2</i>	0,900			0,843			
	<i>Mic3</i>	0,868			0,864			
	<i>Mic4</i>	0,914			0,813			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,726			0,650			
S2	<i>Mic5</i>	0,886	0,893	0,016	0,868	0,839	0,060	0,383
	<i>Mic6</i>	0,878			0,809			
	<i>Mic7</i>	0,890			0,907			
	<i>Mic8</i>	0,916			0,772			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,373			0,846			
Mesa do professor	A	0,846	0,861	0,034	0,929	0,868	0,050	
	B	0,888			0,810			
	C	0,890			0,854			
	D	0,820			0,878			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,318			0,991			

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 71 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário com WWCB - 50,0 mm em 500 Hz.**

Cenário: WWCB - 50,0 mm		Frequência: 500 Hz						ANOVA
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	<i>Mic1</i>	1,000	1,073	0,064	1,102	1,037	0,045	
	<i>Mic2</i>	1,048			1,008			
	<i>Mic3</i>	1,150			1,005			
	<i>Mic4</i>	1,095			1,035			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,977			0,164			
S2	<i>Mic5</i>	1,009	1,069	0,085	0,985	1,028	0,040	0,151
	<i>Mic6</i>	1,180			1,077			
	<i>Mic7</i>	0,998			1,010			
	<i>Mic8</i>	1,091			1,041			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,410			0,941			
Mesa do professor	A	1,124	1,153	0,084	0,998	1,076	0,056	
	B	1,251			1,115			
	C	1,054			1,119			
	D	1,183			1,074			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,989			0,237			

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 72 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário com WWCB - 50,0 mm em 1000 Hz.**

Cenário: WWCB - 50,0 mm		Frequência: 1000 Hz						ANOVA
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	<i>Mic1</i>	0,879	0,834	0,066	0,828	0,837	0,012	
	<i>Mic2</i>	0,742			0,830			
	<i>Mic3</i>	0,833			0,835			
	<i>Mic4</i>	0,883			0,855			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,217			0,168			
S2	<i>Mic5</i>	0,948	0,829	0,111	0,919	0,899	0,063	0,125
	<i>Mic6</i>	0,703			0,827			
	<i>Mic7</i>	0,775			0,974			
	<i>Mic8</i>	0,891			0,875			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,768			0,986			
Mesa do professor	A	0,895	0,849	0,045	0,904	0,940	0,035	
	B	0,797			0,934			
	C	0,877			0,989			
	D	0,827			0,934			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,670			0,446			

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 73 – Valores medidos e simulados para T<sub>20</sub> (s) no cenário com WWCB - 50,0 mm em 2000 Hz.**

Cenário: WWCB - 50,0 mm		Frequência: 2000 Hz						ANOVA
Fonte	Microfones	T <sub>20</sub> medido	Média espacial	Desvio padrão	T <sub>20</sub> simulado	Média espacial	Desvio padrão	
S1	<i>Mic1</i>	0,843	0,863	0,040	0,907	0,870	0,033	
	<i>Mic2</i>	0,916			0,870			
	<i>Mic3</i>	0,869			0,828			
	<i>Mic4</i>	0,824			0,874			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,760			0,774			
S2	<i>Mic5</i>	0,911	0,887	0,046	0,916	0,869	0,052	0,566
	<i>Mic6</i>	0,941			0,907			
	<i>Mic7</i>	0,851			0,805			
	<i>Mic8</i>	0,845			0,849			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,344			0,464			
Mesa do professor	A	0,784	0,834	0,038	0,846	0,873	0,023	
	B	0,834			0,862			
	C	0,840			0,893			
	D	0,877			0,891			
<i>p-valor</i> Shapiro-Wilk		0,780			0,280			

Fonte: Autor (2020).

**APÊNDICE M – COMPARAÇÕES ENTRE OS VALORES SIMULADOS DE  
DEFINIÇÃO ( $D_{50}$ ) PARA CENÁRIOS COM DIFERENTES ORIENTAÇÕES DOS  
COMPÓSITOS NAS PAREDES**

Cenários A e A':

**Tabela 74 – Valores simulados de Definição para o cenário A.**

Cenário: A	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	45,60	41,48	31,56	59,47	37,83	35,69	36,69	37,47
630	47,85	39,55	33,28	59,02	38,02	36,06	42,46	45,44
800	52,23	45,28	40,14	64,19	38,90	40,01	37,94	42,66
1000	50,66	44,06	36,53	64,28	46,30	45,44	40,51	44,77
D <sub>50</sub>	49,08	42,59	35,38	61,74	40,26	39,30	39,40	42,58

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 75 – Valores simulados de Definição para o cenário A'.**

Cenário: A'	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	52,18	41,61	35,89	60,35	37,76	37,79	36,35	42,08
630	43,16	40,06	39,47	56,30	39,25	37,69	35,69	42,30
800	53,72	45,99	40,11	68,35	40,84	40,33	40,67	47,32
1000	52,60	47,70	39,19	64,83	46,05	42,46	42,53	42,21
D <sub>50</sub>	50,41	43,84	38,67	62,46	40,97	39,57	38,81	43,48
Diferença  A-A'	1,33	1,25	3,29	0,72	0,71	0,27	0,59	0,89

Fonte: Autor (2020).

Cenários B e B':

**Tabela 76 – Valores simulados de Definição para o cenário B.**

Cenário: B	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	46,49	43,74	35,21	61,99	33,12	37,39	39,68	40,49
630	47,67	38,99	32,48	62,41	35,27	39,39	37,58	38,16
800	46,89	44,09	39,67	62,81	39,97	41,57	36,39	45,30
1000	52,46	45,04	36,09	67,28	37,34	40,25	38,25	47,84
D <sub>50</sub>	48,38	42,97	35,86	63,62	36,42	39,65	37,97	42,95

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 77 – Valores simulados de Definição para o cenário B'.**

Cenário: B'	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	46,66	42,12	34,71	60,95	38,55	40,44	39,58	45,16
630	48,01	42,12	34,51	61,07	38,31	36,98	36,98	42,14
800	53,36	47,07	37,65	63,19	40,84	42,42	40,11	46,57
1000	51,63	43,27	38,96	66,60	39,13	43,63	40,53	44,97
D <sub>50</sub>	49,92	43,65	36,46	62,95	39,21	40,87	39,30	44,71
Diferença  B-B'	1,54	0,68	0,60	0,67	2,78	1,21	1,33	1,77

Fonte: Autor (2020).

Cenários C e C':

**Tabela 78 – Valores simulados de Definição para o cenário C.**

Cenário: C	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	48,63	40,92	36,38	60,68	36,43	38,54	38,73	44,28
630	50,29	38,89	35,68	59,85	38,38	33,51	38,87	40,39
800	52,88	44,95	36,83	62,94	41,23	40,60	43,18	46,31
1000	51,11	41,62	41,93	65,91	39,02	37,91	41,89	40,51
D <sub>50</sub>	50,73	41,60	37,71	62,35	38,77	37,64	40,67	42,87

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 79 – Valores simulados de Definição para o cenário C'.**

Cenário: C'	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	44,41	40,17	38,06	59,99	35,41	38,00	38,40	42,76
630	48,27	40,68	37,14	56,54	40,08	35,18	35,11	42,58
800	50,28	42,18	42,34	63,89	38,97	38,62	37,26	44,69
1000	50,79	46,18	33,69	62,68	37,46	42,27	38,03	40,26
D <sub>50</sub>	48,44	42,30	37,81	60,77	37,98	38,52	37,20	42,57
Diferença  C-C'	2,29	0,70	0,10	1,57	0,79	0,88	3,47	0,30

Fonte: Autor (2020).

Cenários D e D':

**Tabela 80 – Valores simulados de Definição para o cenário D.**

Cenário: D	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	48,60	40,36	35,49	59,28	37,03	34,68	40,36	42,09
630	47,17	40,85	36,37	57,09	38,05	37,01	38,93	39,67
800	52,82	47,22	35,50	66,04	38,46	42,70	38,14	44,81
1000	53,19	46,82	41,23	63,91	44,51	38,95	38,86	45,72
D <sub>50</sub>	50,45	43,81	37,15	61,58	39,51	38,34	39,07	43,07

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 81 – Valores simulados de Definição para o cenário D'.**

Cenário: D'	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	48,74	43,96	32,81	59,77	37,82	37,66	37,94	42,71
630	46,76	43,10	38,84	58,46	38,93	35,76	37,50	42,33
800	50,38	44,26	36,68	64,40	43,36	44,42	43,20	44,10
1000	53,97	44,16	35,44	64,31	43,56	41,65	40,22	43,55
D <sub>50</sub>	49,96	43,87	35,94	61,73	40,91	39,87	39,71	43,17
Diferença  D-D'	0,48	0,06	1,21	0,15	1,40	1,54	0,64	0,10

Fonte: Autor (2020).

Cenários E e E':

**Tabela 82 – Valores simulados de Definição para o cenário E.**

Cenário: E	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	50,29	43,72	35,72	61,14	36,39	39,89	34,95	40,13
630	48,68	43,52	35,09	60,16	35,48	37,77	38,75	41,19
800	50,21	45,29	33,54	64,50	39,21	44,15	40,13	45,57
1000	52,29	48,15	36,96	64,15	44,54	41,80	42,95	45,47
D <sub>50</sub>	50,37	45,17	35,33	62,49	38,90	40,90	39,19	43,09

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 83 – Valores simulados de Definição para o cenário E'.**

Cenário: E'	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	47,53	43,96	34,73	59,79	39,69	38,39	36,26	39,07
630	50,51	43,85	36,26	59,47	39,17	37,45	36,63	39,29
800	50,32	46,97	36,65	61,56	36,49	44,11	42,08	44,19
1000	53,93	48,12	37,49	61,98	44,12	44,75	41,52	46,90
D <sub>50</sub>	50,57	45,72	36,28	60,70	39,87	41,18	39,12	42,36
Diferença  E-E'	0,20	0,55	0,96	1,79	0,96	0,28	0,07	0,73

Fonte: Autor (2020).

Cenários F e F':

**Tabela 84 – Valores simulados de Definição para o cenário F.**

Cenário: F	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	47,00	40,96	36,26	59,60	34,68	38,21	39,22	43,71
630	47,65	43,04	39,29	60,15	36,70	40,51	36,67	43,56
800	51,34	42,65	38,41	63,72	45,16	43,38	38,06	45,90
1000	54,78	48,66	41,65	66,68	43,89	42,96	40,64	47,38
D <sub>50</sub>	50,19	43,83	38,90	62,54	40,11	41,26	38,65	45,14

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 85 – Valores simulados de Definição para o cenário F'.**

Cenário: F'	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	46,56	44,40	35,21	60,92	40,83	38,00	40,12	38,67
630	50,14	39,59	36,95	61,83	41,25	37,18	41,48	44,08
800	51,07	52,63	34,50	64,16	42,32	45,76	43,64	45,76
1000	52,67	49,65	36,97	67,67	42,13	38,72	42,74	47,01
D <sub>50</sub>	50,11	46,57	35,91	63,64	41,63	39,92	42,00	43,88
Diferença  F-F'	0,08	2,74	3,00	1,11	1,53	1,35	3,35	1,26

Fonte: Autor (2020).

Cenários G e G':

**Tabela 86 – Valores simulados de Definição para o cenário G.**

Cenário: G	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	49,11	41,42	37,04	58,32	40,60	35,35	38,92	43,53
630	49,00	40,36	31,98	58,41	40,82	35,61	35,23	43,15
800	49,57	46,16	41,31	64,36	40,79	41,62	42,24	38,77
1000	51,28	46,02	39,84	65,31	36,75	41,15	39,69	49,24
D <sub>50</sub>	49,74	43,49	37,54	61,60	39,74	38,43	39,02	43,67

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 87 – Valores simulados de Definição para o cenário G'.**

Cenário: G'	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	50,35	40,76	38,13	57,07	39,29	36,60	35,39	43,09
630	47,97	37,08	37,28	60,30	38,44	36,92	34,98	41,30
800	53,10	42,58	36,00	63,71	39,86	42,47	38,73	41,70
1000	51,77	47,21	34,00	67,37	39,97	40,01	41,09	44,11
D <sub>50</sub>	50,80	41,91	36,35	62,11	39,39	39,00	37,55	42,55
Diferença  G-G'	1,06	1,58	1,19	0,51	0,35	0,57	1,47	1,12

Fonte: Autor (2020).

Cenários H e H':

**Tabela 88 – Valores simulados de Definição para o cenário H.**

Cenário: H	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	46,55	43,64	36,95	60,21	41,01	39,19	40,56	40,11
630	49,28	46,26	34,26	61,12	39,31	34,99	38,05	43,72
800	52,12	48,25	37,51	68,74	40,73	37,92	43,13	49,34
1000	54,90	47,15	42,69	66,64	44,45	39,66	42,88	49,36
D <sub>50</sub>	50,71	46,33	37,85	64,18	41,38	37,94	41,16	45,63

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 89 – Valores simulados de Definição para o cenário H'.**

Cenário: H'	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	45,52	40,47	38,06	61,70	38,37	37,95	34,30	42,14
630	48,09	44,51	33,31	58,93	38,71	40,38	38,72	39,90
800	54,41	46,40	38,00	67,47	41,20	39,98	44,26	43,54
1000	52,00	49,46	42,00	67,10	41,81	41,53	39,80	46,80
D <sub>50</sub>	50,00	45,21	37,84	63,80	40,02	39,96	39,27	43,09
Diferença  H-H'	0,71	1,11	0,01	0,38	1,35	2,02	1,89	2,54

Fonte: Autor (2020).



Cenários I e I':

**Tabela 90 – Valores simulados de Definição para o cenário I.**

Cenário: I	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	49,40	40,88	34,11	61,48	36,24	41,14	38,21	42,04
630	47,75	44,48	37,07	62,10	37,87	37,05	37,24	44,16
800	50,67	44,98	39,96	65,36	40,86	40,32	37,33	47,02
1000	51,37	47,28	37,02	66,43	42,63	39,11	39,40	48,15
D <sub>50</sub>	49,80	44,40	37,04	63,84	39,40	39,40	38,05	45,34

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 91 – Valores simulados de Definição para o cenário I'.**

Cenário: I'	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	48,87	42,81	41,37	60,82	34,87	39,03	36,42	41,68
630	48,12	45,64	38,09	60,51	42,85	37,98	37,69	42,82
800	53,40	45,08	36,07	62,25	41,56	38,96	40,44	46,52
1000	52,88	46,77	40,81	63,06	41,83	42,69	41,23	46,78
D <sub>50</sub>	50,82	45,08	39,08	61,66	40,28	39,66	38,94	44,45
Diferença  I-I'	1,02	0,67	2,05	2,18	0,88	0,26	0,90	0,89

Fonte: Autor (2020).

Cenários J e J':

**Tabela 92 – Valores simulados de Definição para o cenário J.**

Cenário: J	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	46,64	44,21	35,19	61,71	39,08	38,53	39,32	46,02
630	48,44	43,76	37,19	61,44	41,13	41,25	39,64	42,20
800	54,35	46,50	39,87	67,65	50,64	38,57	44,18	49,52
1000	53,31	48,67	46,14	70,48	43,62	42,31	45,27	55,33
D <sub>50</sub>	50,68	45,78	39,60	65,32	43,62	40,16	42,10	48,27

Fonte: Autor (2020).

**Tabela 93 – Valores simulados de Definição para o cenário J'.**

Cenário: J'	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
	<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
500	50,67	43,30	38,28	63,18	39,71	38,38	39,14	45,44
630	52,96	48,63	36,66	64,38	40,27	40,19	44,85	47,40
800	58,54	45,56	42,66	68,97	45,61	48,94	43,63	46,05
1000	56,57	52,44	44,79	70,67	47,69	41,43	47,10	52,68
D <sub>50</sub>	54,68	47,48	40,60	66,80	43,32	42,24	43,68	47,89
Diferença  J-J'	4,00	1,70	1,00	1,48	-0,30	2,07	1,58	-0,37

Fonte: Autor (2020).

Cenários K a R:

**Tabela 94 – Valores simulados de Definição para os cenários K a R.**

Cenário	Frequência (Hz)	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
		<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
K	500	50,35	44,64	33,06	62,92	37,12	36,44	40,01	40,78
	630	49,69	48,71	31,29	62,69	41,59	36,69	38,91	43,10
	800	52,49	51,98	42,39	69,10	46,38	39,99	46,93	49,89
	1000	55,57	50,46	36,16	68,85	47,93	44,29	40,28	48,61
	D <sub>50</sub>	52,03	48,95	35,73	65,89	43,26	39,35	41,53	45,60
L	500	50,24	42,53	38,06	60,58	35,64	38,80	33,13	44,81
	630	49,12	42,17	42,77	63,61	43,25	40,96	36,78	43,67
	800	56,40	49,73	41,31	64,34	44,83	42,97	41,05	50,57
	1000	55,77	51,34	40,07	66,39	41,57	40,69	41,72	48,07
	D <sub>50</sub>	52,88	46,45	40,55	63,73	41,32	40,85	38,17	46,78
M	500	53,31	43,37	39,81	61,27	39,32	37,14	35,61	38,82
	630	49,45	40,81	33,78	61,35	36,29	39,57	42,51	46,18
	800	55,74	45,32	37,25	65,17	43,42	43,74	41,55	46,91
	1000	56,14	45,04	37,30	69,89	45,29	40,50	43,74	46,02
	D <sub>50</sub>	53,66	43,63	37,04	64,42	41,08	40,24	40,85	44,48
N	500	52,58	44,11	35,96	59,85	38,43	37,23	36,70	42,99
	630	48,48	42,32	33,98	62,51	38,01	37,30	38,62	43,52
	800	52,97	43,32	36,91	67,32	41,87	44,36	40,02	46,04
	1000	54,69	48,76	43,56	67,20	43,41	41,78	38,19	48,97
	D <sub>50</sub>	52,18	44,63	37,60	64,22	40,43	40,17	38,38	45,38
O	500	48,36	45,13	35,38	64,06	39,70	37,67	36,68	40,41
	630	47,51	44,17	39,10	59,25	41,45	37,51	35,57	41,92
	800	53,25	48,82	40,43	69,49	42,21	46,04	38,40	45,75
	1000	55,47	50,02	37,80	66,85	44,53	42,50	38,45	46,02
	D <sub>50</sub>	51,15	47,03	38,18	64,91	41,97	40,93	37,27	43,53
P	500	49,55	47,16	34,08	61,43	40,37	35,87	37,43	43,11
	630	49,24	47,82	36,89	66,22	40,00	37,45	41,01	40,15
	800	55,69	53,82	39,76	66,96	46,05	40,89	43,72	44,06
	1000	52,90	47,43	38,16	67,43	45,61	44,61	40,74	46,92
	D <sub>50</sub>	51,84	49,06	37,22	65,51	43,01	39,71	40,72	43,56
Q	500	46,76	39,95	36,70	60,35	40,43	36,93	37,05	41,98
	630	51,60	41,03	33,55	63,55	39,19	35,43	35,91	42,09
	800	53,21	48,53	38,69	64,01	43,58	40,27	38,25	48,24
	1000	53,29	50,71	39,59	66,92	42,08	40,17	42,47	48,27
	D <sub>50</sub>	51,21	45,06	37,13	63,71	41,32	38,20	38,42	45,14
R	500	49,37	42,17	34,16	61,29	36,88	42,28	39,08	42,31
	630	47,64	45,28	32,74	60,14	43,07	39,07	38,60	41,68
	800	48,53	44,07	39,77	66,81	46,18	38,81	38,51	47,35
	1000	49,64	46,57	38,66	65,46	43,69	41,95	42,83	45,94
	D <sub>50</sub>	48,80	44,52	36,33	63,42	42,45	40,53	39,75	44,32

Fonte: Autor (2020).

Cenários S a V:

**Tabela 95 – Valores simulados de Definição para os cenários S a V.**

Cenário	Frequência (Hz)	Valores simulados de Definição (%) por receptores							
		<i>Mic1</i>	<i>Mic2</i>	<i>Mic3</i>	<i>Mic4</i>	<i>Mic5</i>	<i>Mic6</i>	<i>Mic7</i>	<i>Mic8</i>
S	500	46,73	41,53	30,45	56,90	34,21	40,39	40,37	38,13
	630	51,84	42,24	35,69	60,16	38,81	36,79	36,50	38,16
	800	52,73	47,62	38,02	63,26	44,92	44,84	43,66	42,98
	1000	53,06	49,48	39,02	65,28	39,68	43,60	40,47	45,47
	D <sub>50</sub>	51,09	45,22	35,79	61,40	39,40	41,41	40,25	41,18
T	500	48,78	39,87	34,33	58,84	39,27	38,74	39,60	38,99
	630	49,38	40,95	35,48	58,21	38,65	38,63	35,29	40,40
	800	54,47	45,64	41,92	65,12	38,73	40,52	42,21	47,17
	1000	50,75	50,18	40,59	62,88	43,34	43,60	43,43	45,63
	D <sub>50</sub>	50,85	44,16	38,08	61,26	40,00	40,37	40,13	43,05
U	500	45,71	44,99	34,51	61,91	39,24	35,79	37,38	44,12
	630	50,06	39,17	34,22	56,46	40,38	37,51	34,32	41,91
	800	50,52	43,73	39,05	63,07	36,89	43,81	44,04	48,62
	1000	47,49	48,09	36,00	65,86	44,40	41,48	41,22	44,63
	D <sub>50</sub>	48,44	44,00	35,95	61,83	40,23	39,65	39,24	44,82
V	500	48,35	45,09	38,35	59,87	39,65	35,55	38,76	39,45
	630	49,76	43,42	38,08	62,23	34,91	35,49	38,29	40,94
	800	51,32	44,11	34,46	67,79	38,09	40,76	38,30	44,98
	1000	51,50	44,93	44,25	62,90	45,34	40,67	43,33	45,75
	D <sub>50</sub>	50,23	44,39	38,78	63,20	39,50	38,12	39,67	42,78

**Fonte: Autor (2020).**

**ANEXO A - LISTAS DE PALAVRAS FONETICAMENTE BALANCEADAS**

**LISTA 1:**

- 1- Ai
- 2- Ar
- 3- Se
- 4- No
- 5- Só
- 6- Livre
- 7- Pêras
- 8- Secas
- 9- Irmão
- 10-Comeu
- 11-Iu
- 12-Er
- 13-Che
- 14-Ne
- 15-Sá
- 16-Tivra
- 17-Ompar
- 18-Matir
- 19-Arção
- 20-Mosseu
- 21-Não posso perder o ônibus.
- 22-Vamos tomar um cafezinho.
- 23-Preciso ir ao médico.
- 24-A porta da frente está aberta.
- 25-A comida tinha muito sal.

**LISTA 2:**

- 1- Já
- 2- Vi
- 3- Fé
- 4- Pá
- 5- Te
- 6- Mexer

- 7- Mundo
- 8- Tombo
- 9- Peguei
- 10-Gostou
- 11- Rá
- 12-Gue
- 13-Lé
- 14- Qui
- 15- Su
- 16- Neços
- 17- Cares
- 18- Sunto
- 19- Lequei
- 20- Pestar
- 21- Cheguei atrasado para a reunião.
- 22- Vamos conversar lá na sala.
- 23- Depois liga para mim.
- 24- Esqueci de pagar a conta.
- 25- Os preços subiram ontem.

**LISTA 3:**

- 1- Som
- 2- Vim
- 3- Cão
- 4- Deu
- 5- Vai
- 6- Será
- 7- Morro
- 8- Pena
- 9- Cuidar
- 10-Quartos
- 11-Bim
- 12-Vom
- 13-Fão

- 14- Tou
- 15- Lai
- 16- Conge
- 17- Sira
- 18- Terro
- 19- Suidem
- 20- Quarna
- 21- O jantar está na mesa.
- 22- As crianças estão brincando.
- 23- Choveu muito nesse fim de semana.
- 24- Estou morrendo de saudade.
- 25- Olhe bem ao atravessar a rua.

**LISTA 4:**

- 1- Fez
- 2- Mil
- 3- Pães
- 4- Era
- 5- Até
- 6- Nasce
- 7- Linha
- 8- Faca
- 9- Errada
- 10-Exame
- 11-Tós
- 12-Dal
- 13-Peis
- 14- Éda
- 15- Ipé
- 16- Pema
- 17- Dezo
- 18- Benha
- 19- Asselha
- 20- Afirda

- 21- Preciso pensar com calma.
- 22- Guardei o livro na primeira gaveta.
- 23- Hoje é meu dia de sorte.
- 24- O sol está muito quente.
- 25- Sua mãe acabou de sair de carro.

**LISTA 5:**

- 1- Ar
- 2- Só
- 3- Já
- 4- Vim
- 5- Fez
- 6- Suor
- 7- Este
- 8- Onze
- 9- Piada
- 10-Acerta
- 11-Che
- 12-Gue 13-Su
- 14- Fão
- 15- Tou
- 16- Fopa
- 17- Saór
- 18- Esto
- 19- Avérta
- 20- Miaços
- 21- Ela vai viajar nas férias.
- 22- Não quero perder o avião.
- 23- Eu não conheci sua filha.
- 24- Ela precisa esperar na fila.
- 25- O banco fechou sua conta.

Elaborado por: Bruno Schwertz e Juliana de Conto.

**ANEXO B – RELATÓRIO TÉCNICO SOBRE TRIAGEM AUDIOMÉTRICA**

## **Relatório de coleta parcial**

Elaborado por: Bruno Schwerz e Juliana de Conto

Nos dias 8, 9 e 10 de outubro foram realizados os procedimentos de coleta parcial que contemplam o seguinte estudo: “Percepção e a inteligibilidade de fala de estudantes do ensino superior expostos a atividades acadêmicas em ambiente ruidoso” no espaço da Clínica Escola de Fonoaudiologia da UNICENTRO. Os procedimentos realizados foram os seguintes:

### **1. METODOLOGIA**

#### **1.1 População e amostra:**

Foram avaliados 11 alunos do ensino superior, com idade superior a 18 anos, selecionados aleatoriamente, que assinaram e concordaram com o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE). O projeto foi aprovado pelo COMEP sob o parecer nº 3.622.185.

#### **1.2 Coleta de dados:**

A coleta de dados ocorreu na Clínica Escola de Fonoaudiologia.

Os critérios de inclusão foram: limiares audiométricos menores ou iguais a 15 dB bilateralmente para todas as frequências testadas (500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 3000 Hz, 4000 Hz, 6000 Hz e 8000 Hz); resultado normal da timpanometria, ou seja, curva timpanométrica do tipo A ou suas variações (Ar e Ad) e apresentar nenhuma obstrução no conduto durante a meatoscopia. Os critérios de exclusão foram: ter idade inferior a 18 anos e não ser estudante do ensino superior. Após a autorização pelo participante foram realizadas avaliações audiométricas e a aplicação de um questionário, são elas:

- Meatoscopia: o exame foi realizado a fim de excluir a possibilidade de existir algum fator de origem condutivo que interferira na compreensão e condução do som, como: cerúmen em excesso, perfuração timpânica, corpo estranho, entre outros. A avaliação foi realizada com um otoscópio da marca Mikatos

- Timpanometria: verificação da mobilidade da membrana timpânica, com objetivo de identificar se algum participante apresentava pouca ou nenhuma mobilidade do sistema tímpano-ossicular. Sugerindo assim, algum fator condutivo que prejudique ou impeça a reprodutibilidade do estudo. Foi utilizado um imitanciômetro da marca Interacoustics previamente calibrado. Carvallo (2003) conceitua timpanometria como o valor da variação da imitância quando um valor de pressão é introduzido no conduto auditivo, gerando uma mobilidade do sistema tímpano-ossicular. A autora ainda aponta que a mobilidade do sistema



será variada de acordo com a quantidade de pressão, gerando uma curva timpanométrica, essa curva fornece informações a respeito da mecânica da orelha média.

- Triagem Audiométrica: Northern & Downs (1984) conceituam triagem como um processo de aplicação de medidas rápidas e simples que visam a detecção de indivíduos com probabilidade de alterações. Russo e Santos (1994) acrescentam que a triagem não possui como fim diagnóstico e sim a identificação, nesse caso de indivíduos que se desconfie de algum problema auditivo. Para o estudo, a busca dos limiares através de varredura dos tons puros foi feita nas frequências 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 6000 e 8000 Hz. Foi adotado como critério a intensidade de 15 dBNA bilateralmente. Dessa maneira, os participantes que não responderam nessa intensidade foram excluídos da pesquisa. A triagem audiométrica foi realizada utilizando um audiômetro da marca Harp Inventis, calibrado em 22/11/2018, fones da marca TDH 39 em cabine audiométrica Vibrasom [...].