

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ACÚSTICA

Dominique dos Santos Melo

**MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO EM CÂMARAS  
REVERBERANTES EM ESCALA REDUZIDA E ESCALA REAL**

Santa Maria, RS  
2023

Dominique dos Santos Melo

**MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO EM CÂMARAS  
REVERBERANTES EM ESCALA REDUZIDA E ESCALA REAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao de Graduação em Engenharia Acústica, Área de Concentração em , da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Acústica**. Defesa realizada por videoconferência.

Orientador: Prof. Christian dos Santos

Santa Maria, RS  
2023



**Dominique dos Santos Melo**

**MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO EM CÂMARAS  
REVERBERANTES EM ESCALA REDUZIDA E ESCALA REAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao de Graduação em Engenharia Acústica, Área de Concentração em , da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Acústica**.

**Aprovado em 8 de agosto de 2023:**

---

**Christian dos Santos, Prof. Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)**

---

**Giovanna Pisicchio Zanoni, Profa. Dra. (UFSM)**

---

**Guilherme Deboni, Prof. Msc. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2023

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me proporcionar a vida e por me permitir superar os desafios encontrados ao longo dessa jornada acadêmica.

Aos meus pais, Monique e Jeferson, sou imensamente grata pelo constante incentivo e apoio durante toda a graduação. À minha tia Carla, pelas palavras de sabedoria e pelo suporte nos momentos mais difíceis. E a todos os meus familiares que estiveram ao meu lado, compreendendo minha ausência durante a graduação e durante minha dedicação a este trabalho.

Um agradecimento especial ao Lucas, que foi meu companheiro e embarcou nessa jornada acadêmica ao meu lado desde o início sendo um dos meus maiores incentivadores. Compartilhamos momentos felizes e desafiadores antes de ingressarmos na UFSM e durante esse período, e agora saímos juntos para dar início à mais uma jornada, como profissionais de acústica.

Agradeço ao Professor Christian, meu orientador, por ter desempenhado tal função com dedicação e amizade ao longo de todo o processo de elaboração deste trabalho e me auxiliando sempre que precisei. Ao Professor Guilherme Deboni que sempre se mostrou disponível e me auxiliou em várias etapas de elaboração desse trabalho, além das ótimas aulas e pela amizade e carinho que teve pela turma nesses anos.

Aos professores do curso de Engenharia Acústica, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso, pelas oportunidades em projetos extra curriculares, por todos os conselhos, pela ajuda e pela paciência com a qual guiaram o meu aprendizado.

Aos meus colegas de turma, por compartilharem comigo tantos momentos de descobertas e aprendizado e por todo o companheirismo e troca de experiências ao longo deste percurso.

À empresa Acústica Jr., meu agradecimento por iniciar o projeto voltado para medições de coeficiente de espalhamento. A oportunidade de ser gerente nesse projeto impulsionou meus estudos sobre o tema, além do apoio financeiro e contribuição significativa de seus membros para o desenvolvimento prático das medições presentes neste trabalho.

Novamente, a todos que contribuíram, meu sincero agradecimento por fazerem parte desta conquista.

“É perigoso sair porta afora. Você pisa na Estrada, e, se não controlar seus pés, não há como saber até onde você pode ser levado.”

(Bilbo Baggins – O Senhor dos Anéis)

## RESUMO

### MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO EM CÂMARAS REVERBERANTES EM ESCALA REDUZIDA E ESCALA REAL

AUTORA: Dominique dos Santos Melo

Orientador: Christian dos Santos

O estudo da difusão e do espalhamento sonoro é relativamente novo no campo da acústica. Os difusores foram propostos como tratamento acústico pela primeira vez no final dos anos 1970, e só ganharam ampla popularidade no mercado cerca de dez anos depois. Tendo em vista a importância de parâmetros como o coeficiente de espalhamento para uma melhor caracterização acústica em simulações e o escasso banco de dados existente sobre o assunto, pode-se vislumbrar uma longa caminhada de estudo e pesquisa ainda na área de difusão em acústica. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar experimentalmente os efeitos das reflexões difusas e sua relação com o coeficiente de espalhamento, por meio de medições normatizadas pela ISO 17497-1 que dá diretrizes para o ensaio em câmara reverberante. O estudo abrange diversos aspectos fundamentais, incluindo a parte técnica e prática dos ensaios e uma análise detalhada da construção dos aparatos necessários para as medições que foram realizadas em escala reduzida (1:5) e escala real. Para viabilização do ensaio em escala real, foi necessário projetar uma mesa giratória para colocação das amostras além da montagem da cadeia de medição para os dois ensaios, em escala reduzida e real. Dessa forma, neste trabalho é discutido a respeito do coeficiente de espalhamento, o ensaio experimental e seus desafios além de resultados obtidos para as amostras testadas. Para a escala reduzida, as adequações alcançaram os objetivos esperados. Entretanto, na medição em tamanho real, foi identificada a necessidade de aperfeiçoar o projeto e reduzir a absorção da mesa giratória em baixas frequências, em especial na banda de 800 Hz. Outras melhorias, como a motorização no método de rotação da mesa, foram sugeridas para obter resultados mais precisos e ensaios mais curtos. Essas considerações ressaltam a importância de melhorias contínuas no sistema de medição para aumentar a precisão e confiabilidade dos resultados em ambas as escalas, permitindo futuros estudos mais embasados. Diante disso, este trabalho forneceu um aparato para análise do coeficiente de espalhamento em medições em escala real, abrindo caminho para novos estudos sobre o tema de espalhamento, além de aprimorar a câmara em escala reduzida, proporcionando continuidade nas pesquisas em espalhamento sonoro no curso de Engenharia Acústica.

**Palavras-chave:** Coeficiente de espalhamento. Reflexão. Difusor.

## ABSTRACT

### MEASUREMENT OF SCATTERING COEFFICIENT IN SMALL-SCALE AND FULL-SCALE REVERBERATION CHAMBERS

AUTHOR: Dominique dos Santos Melo

ADVISOR: Christian dos Santos

The study of diffusion and sound scattering is relatively new in acoustics. Diffusers were first proposed as acoustic treatment in the late 1970s and only gained widespread popularity in the market about ten years later. Considering the importance of parameters such as the scattering coefficient for a better acoustic characterization in simulations and the limited existing database on the subject, a long journey of study and research in the area of acoustic diffusion can be envisaged.

Thus, the present work aimed to experimentally evaluate the effects of diffuse reflections and their relationship with the scattering coefficient, through measurements standardized by ISO 17497-1, which provides guidelines for testing in a reverberation chamber. The study covers fundamental aspects, including the technical and practical aspects of the tests and a detailed analysis of the construction of the necessary apparatus for the measurements conducted in physical scale model (1:5) and full scale. To enable the full scale testing, it was necessary to design a rotating table for sample placement, as well as to set up the measurement chain for both model and full scale tests.

Therefore, this work discusses the scattering coefficient, the experimental testing, its challenges, and the results obtained for the tested samples. For the model, the adaptations achieved the expected objectives. However, in the full scale measurement, the need to improve the design and reduce the absorption of the rotating table at low frequencies, especially in the 800 Hz band, was identified. Other improvements, such as motorization in the table rotation method, were suggested to obtain more accurate results and shorter tests. These considerations emphasize the importance of continuous improvements in the measurement system to enhance precision and reliability of results in both scales, enabling future more well-founded studies. Accordingly, this work provided a setup for analyzing the scattering coefficient in full scale measurements, paving the way for further studies on the topic of sound scattering, and also enhancing the scale model chamber, providing continuity in the research on sound scattering in the Acoustic Engineering course.

**Keywords:** Scattering coefficient. Reflection. Diffuser.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características temporais e espaciais de absorção, reflexão especular e reflexão em superfícies difusoras .....	20
Figura 2 – Diagrama de medição de resposta impulsiva com excitação por varredura de senos ( <i>sweep</i> ) .....	22
Figura 3 – Sistema Linear e Invariante no Tempo (SLIT) com resposta ao impulso representando o processo matemático de uma sala excitada com o sinal $x(t)$ , sua resposta impulsiva $h(t)$ e a obtenção da resposta da sala $y(t)$ . .....	23
Figura 4 – Reflexões a partir de uma superfície irregular .....	24
Figura 5 – Comparação entre uma resposta impulsiva para uma orientação da amostra e para a soma das respostas para várias orientações .....	25
Figura 6 – Respostas impulsivas obtidas para diferentes orientações da amostra .....	26
Figura 7 – À esquerda, ilustração da face da porta e, à direita, ilustração da face traseira da minicâmara .....	31
Figura 8 – Base giratória da câmara em escala .....	32
Figura 9 – Câmara reverberante em escala construída .....	32
Figura 10 – Semisferas de gesso. ....	33
Figura 11 – Fonte sonora cúbica .....	34
Figura 12 – Amplificador de potência B&K 2718 .....	35
Figura 13 – Interface de áudio Roland Rubix 22 .....	36
Figura 14 – Sonômetro 2270 Brüel & Kjær com microfone acoplado .....	37
Figura 15 – Módulo de entrada <i>National Instruments</i> 9234 .....	37
Figura 16 – Adaptador de três vias do tipo BNC .....	38
Figura 17 – Câmara reverberante em escala da UFSM .....	40
Figura 18 – Refletores no teto da câmara reverberante em escala .....	40
Figura 19 – Medição sem adequações da câmara .....	41
Figura 20 – Medição com 20 amostras após as adequações .....	42
Figura 21 – Câmara Reverberante do Laboratório de Acústica da UFSM .....	43
Figura 22 – Definição da profundidade da estrutura para amostras difusoras .....	44
Figura 23 – Mesa giratória utilizada como inspiração para o projeto da mesa aplicado no presente trabalho .....	45
Figura 24 – Projeto 3D da estrutura da mesa giratória com a fixação chapa metálica, rolamento central e rodízios de apoio .....	45
Figura 25 – Modelagem 3D da mesa giratória completa - Vista lateral .....	46
Figura 26 – Modelagem 3D da mesa giratória completa - Vista inferior .....	46
Figura 27 – Dimensões da mesa giratória .....	47
Figura 28 – Mesa giratória projetada e utilizada nos ensaios .....	48

Figura 29 – Desenho 3D das vistas lateral e superior de uma célula da amostra difusora ensaiada na etapa de medição de coeficiente de espalhamento em câmara reverberante em tamanho real .....	49
Figura 30 – Desenho 3D das vistas lateral e superior de uma célula da amostra difusora ensaiada na etapa de medição de coeficiente de espalhamento em câmara reverberante em tamanho real .....	49
Figura 31 – Amostra difusora ensaiada na etapa de medição de coeficiente de espalhamento em câmara reverberante em tamanho real .....	50
Figura 32 – Módulos de geração e aquisição da marca National Instruments utilizados nos ensaios de coeficiente de espalhamento em escala real .....	51
Figura 33 – Módulos de geração e aquisição montados no Chassi da National Instruments .....	51
Figura 34 – Fonte Sonora Ominidirecional Dodecaédrica .....	52
Figura 35 – Ensaio de coeficiente de espalhamento em câmara reverberante da mesa giratória sem amostras .....	53
Figura 36 – Sistema de marcação dos incrementos de 5° a cada passo .....	54
Figura 37 – Planta com os pontos de fonte e receptores na câmara reverberante .....	54
Figura 38 – Ensaio de coeficiente de espalhamento em câmara reverberante da mesa giratória com amostras .....	56
Figura 39 – Comparação entre os coeficientes de espalhamento com 20 e 40 amostras e valores de referência obtido por Vorländer (VORLÄNDER; MOMMERTZ, 2000) .....	58
Figura 40 – Comparação entre os tempos de reverberação antes e depois das adequações .....	59
Figura 41 – Comparação entre os coeficientes de espalhamento antes e depois das adequações e desvios .....	60
Figura 42 – Comparação do Tempo de Reverberação para as diferentes situações da mesa e com a câmara vazia .....	62
Figura 43 – Comparação dos Tempos de Reverberação com da mesa giratória parada e girando .....	63
Figura 44 – Coeficiente de espalhamento da mesa giratória .....	64
Figura 45 – Comparação do coeficiente de absorção obtido nas situações com as amostras coladas e descoladas .....	66
Figura 46 – Comparação do coeficiente de espalhamento obtido nas situações com as amostras coladas e descoladas .....	67
Figura 47 – Comparação do coeficiente de espalhamento obtido nas situações com as amostras coladas e descoladas limitados de 0 a 1 .....	68
Figura 48 – Coeficientes de espalhamento e de absorção obtidos nas situações com as amostras coladas .....	70

Figura 49 – Coeficiente de espalhamento obtido na situação com as amostras coladas 71

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Situações para medição dos diferentes tempos de reverberação .....	27
TABELA 2 – Especificações dos alto-falantes utilizados na fonte sonora cúbica .....	34
TABELA 3 – Especificações do amplificador de potência da B&K 2718 .....	35
TABELA 4 – Especificações Interface de áudio Roland Rubix 22 .....	36
TABELA 5 – Especificações técnicas dos microfones da Brüel & Kjær .....	38
TABELA 6 – Adequações realizadas na câmara e na cadeia de medição .....	40
TABELA 7 – Especificações da fonte sonora omnidirecional da B&K 4292-L .....	52
TABELA 8 – Especificações técnicas dos microfones da Brüel & Kjær utilizados nos ensaios em câmara em escala real .....	52
TABELA 9 – Coordenadas dos pontos de medição .....	55

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $A$  Absorção sonora total [-];
- $c$  Velocidade do som [m/s];
- $d$  Diâmetro da mesa giratória [m];
- $E_d$  Energia refletida de modo difuso [-];
- $E_r$  Energia total refletida [-];
- $E_i$  Energia incidente [-];
- $E_{\text{esp}}$  Energia refletida de modo especular [-];
- $\mathcal{F}^{-1}$  Transformada inversa de Fourier;
- $f$  Frequência [Hz];
- $h$  Altura máxima das amostras [cm];
- $m_i$  Coeficiente de atenuação do ar [ $\text{m}^{-1}$ ];
- $N$  Fator de escala [-];
- $s$  Coeficiente de espalhamento [-];
- $s_{\text{base}}$  Coeficiente de espalhamento sonoro da mesa giratória [-];
- $S_i$  Área da superfície "i" [ $\text{m}^2$ ];
- $S$  Área da amostra [ $\text{m}^2$ ];
- $t$  Tempo [s];
- $T_{60}$  Tempo de reverberação, analisando o decaimento de 60 [dB];
- $\bar{T}$  Tempo de reverberação médio [s];
- $V$  Volume [ $\text{m}^3$ ];
- $\alpha$  Coeficiente de absorção sonora [-];
- $\alpha_i$  Coeficiente de absorção sonora da superfície "i" [-];
- $\alpha_s$  Coeficiente de absorção sonora com incidência aleatória [-];
- $\alpha_{\text{spec}}$  Coeficiente de absorção sonora com incidência especular [-];

$\delta$  Desvio padrão;

$\delta_{\alpha_s}$  Desvio padrão do resultado de  $\alpha_s[-]$ ;

$\delta_{\alpha_{\text{spec}}}$  Desvio padrão do resultado de  $\alpha_{\text{spec}}[-]$ ;

$\delta_s$  Desvio padrão do resultado de  $s[-]$  ;

$\omega$  Frequência angular.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	OBJETIVO .....	17
1.2	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO .....	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>19</b>
2.1	DIFUSÃO E SUPERFÍCIES DIFUSORAS .....	19
2.2	CAMPO DIFUSO E CÂMARA REVERBERANTE .....	20
2.3	TEMPO DE REVERBERAÇÃO E RESPOSTA IMPULSIVA .....	20
2.4	O COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO ( <i>SCATTERING</i> ) .....	23
2.5	ISO 17497-1 .....	26
<b>2.5.1</b>	<b>Faixa de frequência</b> .....	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>30</b>
3.1	MEDIÇÃO EM ESCALA 1:5 .....	30
<b>3.1.1</b>	<b>Câmara reverberante em escala</b> .....	<b>31</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Amostras - Semiesferas</b> .....	<b>32</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Instrumentação</b> .....	<b>33</b>
3.1.3.1	Fonte sonora e amplificador .....	33
3.1.3.2	Interface de áudio Roland Rubix 22 .....	35
3.1.3.3	Condicionador de sinais .....	36
3.1.3.4	Microfones .....	38
<b>3.1.4</b>	<b>Programas utilizados</b> .....	<b>39</b>
<b>3.1.5</b>	<b>Medições</b> .....	<b>39</b>
3.1.5.1	Adequações .....	39
3.1.5.2	Primeira Medição .....	41
3.1.5.3	Segunda Medição .....	41
3.2	MEDIÇÃO EM ESCALA 1:1 (TAMANHO REAL) .....	42
<b>3.2.1</b>	<b>Câmara reverberante</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Mesa giratória</b> .....	<b>43</b>
3.2.2.1	O Projeto .....	44
3.2.2.1.1	<i>Dimensões do Projeto</i> .....	46
<b>3.2.3</b>	<b>Amostras - Material Difusor</b> .....	<b>48</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Instrumentação</b> .....	<b>50</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Medições</b> .....	<b>53</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>57</b>
4.1	RESULTADOS - MEDIÇÃO EM ESCALA 1:5 .....	57
4.2	RESULTADOS - MEDIÇÃO EM ESCALA 1:1 (TAMANHO REAL) .....	61
<b>4.2.1</b>	<b>Avaliação da mesa giratória</b> .....	<b>61</b>

4.2.2	<b>Avaliação da colagem das amostras .....</b>	<b>65</b>
4.2.3	<b>Avaliação resultados com as amostras coladas .....</b>	<b>69</b>
5	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>73</b>
5.1	<b>TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>76</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O estudo da difusão e do espalhamento sonoro é relativamente novo no campo da acústica. O conhecimento sobre absorção sonora tem cerca de 120 anos e, como resultado, é um tema que foi amplamente desenvolvido, com um vasto banco de dados relacionado à absorção de diferentes materiais e dispositivos. Em contraste, os conceitos de difusão sonora foram explorados e desenvolvidos mais recentemente (COX; D'ANTONIO, 2004). Os difusores foram propostos como tratamento acústico pela primeira vez no final dos anos 1970, e só ganharam ampla popularidade no mercado cerca de dez anos depois.

Como apontado por Brandão (BRANDÃO, 2016), “ Nós estamos, de fato, testemunhando a criação dos parâmetros de quantificação.” se referindo aos coeficientes criados para quantificação da difusão e espalhamento.

Outro ponto que colaborou com o desenvolvimento destes coeficientes foi o desenvolvimento de softwares utilizados para a modelagem computacional. O desenvolvimento de modelos computacionais tem sido um aliado fundamental para o estudo da acústica nos últimos anos, especialmente no campo da difusão sonora. Com o crescente uso de informações de reflexão difusa em superfícies modeladas computacionalmente, surgiram novas abordagens para quantificar esse efeito acústico. Entre elas, destacam-se os gráficos polares e os coeficientes de difusão e espalhamento, que foram propostos por Vorlander e Mommertz Vorländer e Mommertz (2000) no final dos anos 1990 e início dos anos 2000.

Em termos simples, o coeficiente de difusão ( $\Gamma$ ) contém informações sobre a direção da energia refletida de forma difusa para cada frequência, o que mede a uniformidade do som refletido. Por outro lado, o coeficiente de espalhamento ( $s$ ) foi criado para representar a parte da energia que é refletida fora da direção especular, tornando-se uma solução mais prática e com menor custo computacional para considerar o fenômeno da difusão em superfícies, como necessitam os algoritmos dos programas de modelagem de salas. É importante ressaltar que o foco do presente estudo está no último parâmetro mencionado.

Ambos os coeficientes são simplificações do comportamento real de reflexão, mas buscam representar a reflexão através de um único parâmetro, o que é vantajoso em comparação aos gráficos polares (COX; D'ANTONIO, 2004), pois maximiza a informação transmitida por um único número. Isso facilita a análise e utilização desses coeficientes em estudos acústicos e em projetos de ambientes.

Além disso, os gráficos polares contêm informações que são incompatíveis, até o momento, com as aplicações das teorias geométricas e estatísticas usadas nos programas de simulação acústica de salas devido ao seu alto custo computacional. Embora os padrões polares forneçam informações valiosas sobre a natureza qualitativa dos difusores, eles não servem como parâmetros adequados para softwares de acústica geométrica nem são consistentes com as equações de previsão baseadas na teoria da acústica estatística.

Para realizar modelagens em acústica estatística e geométrica, os parâmetros de entrada tanto para os softwares quanto para as equações utilizadas devem expressar grandezas energéticas. No entanto, o coeficiente de difusão não fornece diretamente essas grandezas, ao contrário do coeficiente de espalhamento, que é mais adequado para essa finalidade.

Portanto, é essencial adotar os coeficientes de espalhamento em aplicações de acústica estatística e geométrica, permitindo uma abordagem mais precisa e compatível com as teorias utilizadas, facilitando assim o processo de simulação e a obtenção de resultados consistentes.

Tendo em vista a importância de parâmetros como o coeficiente de espalhamento para uma melhor caracterização acústica em simulações e o escasso banco de dados existente sobre o assunto, pode-se vislumbrar uma longa caminhada de estudo e pesquisa ainda na área de difusão em acústica. Com o advento da computação nas últimas décadas, o processo pela busca da melhor solução possível tornou-se mais factível e, com isso, pode-se reduzir os custos na produção de um produto ou melhorar sua eficiência, por exemplo, por meio do ajuste de suas características e parâmetros para obtenção de uma possível solução ótima. Os métodos de otimização são um dos meios responsáveis para alcançar tais soluções ótimas. Alguns exemplos de otimização de superfícies difusoras podem ser encontrados nos trabalhos *Design and optimization of sound diffusers using RBF-Based shapes and genetic algorithms*. (GODINHO et al., 2017) e *Optimization of a diffuser geometry using parametric modeling tools and finite-difference time-domain simulations*. (MEYER; LOKKI, 2018).

Assim, o presente trabalho teve como objetivo investigar os efeitos das reflexões difusas e sua relação com o coeficiente de espalhamento, por meio de medições normalizadas para obtenção desse parâmetro. Inicialmente, o foco era não apenas a caracterização de materiais difusores, mas também a otimização de geometrias para alcançar um melhor desempenho no espalhamento sonoro. O ciclo ideal e planejado originalmente para este estudo envolvia a obtenção de uma superfície otimizada, através da qual seria ensaiada em uma câmara em escala primeiramente, pela facilidade de projeto do difusor, e validada em uma câmara reverberante de tamanho real. Contudo, devido a limitações de tempo no projeto, essa ideia das superfícies otimizadas será deixada para futuras etapas do trabalho.

Portanto, nesta pesquisa, foi realizado um estudo específico sobre o ensaio descrito na norma 17497-1 (ISO, 2004), pois demonstrou-se mais útil em termos de aplicação prática em modelos de simulação acústica, quando comparado ao coeficiente de difusão. Este estudo abrange diversos aspectos fundamentais, incluindo tanto a parte técnica e prática dos ensaios, quanto uma análise detalhada da construção dos aparatos necessários para as medições.

## 1.1 OBJETIVO

Pelos motivos citados, o presente estudo tem como objetivo geral realizar ensaios normatizados de acordo com a norma ISO 17497-1 em câmaras reverberantes em escala reduzida e real, buscando obter os coeficientes de espalhamento experimentalmente. Além disso, pretende-se investigar os efeitos relacionados a esses coeficientes, por meio da análise das medições e das melhorias práticas possíveis.

Para possibilitar a obtenção do coeficiente de espalhamento em superfícies difusoras, foi necessário projetar uma mesa giratória que atendesse aos requisitos da norma mencionada. Buscou-se que os efeitos de difusão sonora causados pela mesa não interferissem negativamente na caracterização do material ensaiado. Assim, este estudo apresentará a elaboração, aplicação das medições e os equipamentos necessários para realizar ensaios de materiais difusores de forma confiável.

Nesse contexto, os objetivos específicos do estudo são:

- Desenvolver os aparatos e ferramentas necessários para os ensaios dos coeficientes de espalhamento em câmaras reverberantes em escala reduzida e real, conforme a norma ISO 17497-1.
- Verificar e validar a mesa giratória para ensaios em escala real (1:1).
- Validar as medições para amostras em escala reduzida (1:5).
- Realizar medições dos coeficientes de espalhamento de amostras de um material difusor em escala real (1:1).
- Verificar os desvios obtidos para os resultados segundo ISO 17497.
- Avaliar dos pontos de melhoria dos ensaios elaborados e discutir aspectos importantes da normativa utilizada.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O trabalho se inicia com uma fundamentação teórica dos principais aspectos relevantes para o desenvolvimento do projeto, incluindo equações básicas e conceitos imprescindíveis para a compreensão das ideias abordadas. Além disso, são apresentadas informações sobre as técnicas utilizadas.

No Capítulo 3, é abordada a metodologia empregada, com ênfase nas diretrizes da norma ISO 17497-1 que serviram como base para este trabalho. Também são detalhados

os aparatos e a cadeia de medição desenvolvida para a realização das medições em duas escalas: 1:5 e 1:1 (tamanho real).

No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos para cada uma das medições realizadas. São analisados os dados coletados, destacando suas implicações e relevância para o projeto.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas a partir do conteúdo exposto. São discutidas as principais descobertas e são apresentadas ideias para o aprofundamento da pesquisa, abrindo caminho para futuros estudos e desenvolvimentos na área.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fim de proporcionar um desenvolvimento e compreensão adequados deste trabalho, torna-se essencial a apresentação de conceitos fundamentais que serão utilizados e discutidos ao longo do documento. Para atender a essa finalidade, este capítulo será dedicado a esse propósito específico.

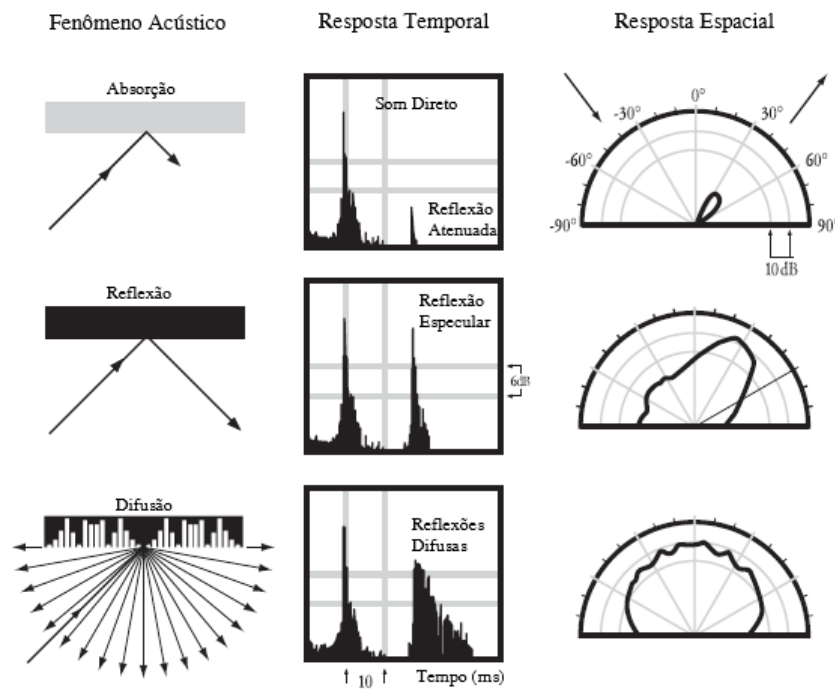
### 2.1 DIFUSÃO E SUPERFÍCIES DIFUSORAS

A onda sonora, quando incidente sobre uma superfície, pode sofrer três diferentes fenômenos acústicos. Parte de sua energia poderá ser transmitida para ambientes adjacentes, outra parte poderá ser absorvida e dissipada, e a outra parte é refletida. Quantitativamente, essas parcelas dependerão das propriedades acústicas da superfície. Pensando na reflexão da energia sonora, esta pode ocorrer na direção especular, ou fora desta direção, de forma difusa.

A difusão sonora é um tema que tem como base a reflexão difusa das ondas sonoras em superfícies finitas. Segundo Brandão (2016), toda superfície finita, lisa ou irregular, irá refletir as ondas sonoras incidentes sobre ela e espalhar o som em maior ou menor grau. A reflexão difusa ocorre quando parte significativa da onda refletida é espalhada e dispersa espacial e temporalmente. Nesse sentido, os dispositivos difusores são superfícies irregulares que promovem a difusão ou espalhamento sonoro, com o objetivo de evitar a concentração de energia refletida na região especular e fazer com que o som seja refletido de maneira mais uniforme. A avaliação do desempenho e da qualidade de espalhamento do difusor pode ser realizada por meio de gráficos polares e coeficientes de espalhamento e difusão criados para essa finalidade. A Figura 1 ilustra as características espaciais e temporais de superfícies absorventes, com reflexão especular e difusa.

Antes do conhecimento sobre difusão ter se ampliado, eram usadas superfícies e geometrias altamente irregulares, ornamentos como estátuas, por exemplo, que supriam a necessidade de difusão em salas (BRANDÃO, 2016). Atualmente, algumas formas de difusores são mais comumente utilizadas, existindo diversas maneiras de modelagem, e o comportamento sonoro diante dessas superfícies pode ser mais facilmente previsto e calculados dependendo do comprimento de onda incidente sobre o elemento. Em acústica de salas, pode-se dividir os elementos para difusão em: difusores geométricos, de Schroeder e os difusores de superfície otimizada.

Figura 1 – Características temporais e espaciais de absorção, reflexão especular e reflexão em superfícies difusoras



Fonte: Adaptado de Cox e D'Antonio (2004).

## 2.2 CAMPO DIFUSO E CÂMARA REVERBERANTE

O conceito de campo difuso é determinado por uma região com densidade de energia estatisticamente uniforme (IEC, 1994), ou seja, é necessário ter uma distribuição da pressão sonora considerada uniforme em toda a sala. Esse campo é formado a partir da sobreposição da energia sonora, direta e refletida dentro de um dado ambiente. Sendo assim, para a medição do espalhamento em campo difuso, faz-se necessário a utilização de um ambiente controlado cujo campo seja considerado difuso. A câmara reverberante, por sua vez, é o ambiente controlado que proporciona tal campo, cujas superfícies são projetadas visando a maior reflexão sonora (BISTAFA, 2018). A Figura 21 mostra a câmara reverberante da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) que será melhor detalhada mais adiante no trabalho. Como visto na imagem, além da preocupação com as superfícies da sala serem lisas e rígidas, utilizam-se elementos refletores espalhados pelo teto que contribuem para a criação do campo difuso.

## 2.3 TEMPO DE REVERBERAÇÃO E RESPOSTA IMPULSIVA

Em um ambiente, as ondas sonoras refletidas pelas superfícies acabam se sobrepondo às ondas recebidas de forma direta. Assim, o campo sonoro resultante, até a extin-

ção completa do som, adquire uma característica reverberante. Este fenômeno traz uma sensação de continuidade do som, ainda que a fonte cesse sua emissão.

Relacionado às reverberações em uma sala, tem-se o tempo de reverberação (TR), o parâmetro objetivo mais conhecido e antigo em acústica de salas, proposto por Sabine. Segundo Sabine (1922), TR é o tempo em que a densidade de energia leva para decair um milionésimo da densidade de energia de estado estacionário, o que corrobora com a definição apresentada pela norma ABNT NBR 16313 para o mesmo parâmetro, como sendo o tempo decorrido para que o nível de pressão sonora em um ambiente interno decaia 60 dB quando interrompida a geração de energia sonora realizado por uma fonte (ABNT, 2014), por isso também é comumente chamado de  $T_{60}$ . O primeiro cálculo apresentado para obtenção do  $T_{60}$  foi proposto por Sabine e considera o volume do espaço e a absorção das superfícies da sala, descrito por:

$$T_{60} = \frac{55,3V}{cA}, \quad (2.1)$$

em que  $V$  é o volume da sala em  $m^3$ ,  $c$  é a velocidade de propagação do som em m/s e  $A$  é a absorção sonora total das superfícies internas da sala, calculada por meio de

$$A = \sum_{i=1}^n S_i \alpha_i, \quad (2.2)$$

sendo  $S_i$  a área de cada superfície da sala em  $m^2$  e  $\alpha_i$  o coeficiente de absorção para cada superfície  $S_i$ .

Alguns anos depois, Schroeder (1965) propôs um novo método, agora para obtenção experimental do tempo de reverberação, utilizando impulsos como forma de excitar um ambiente, possibilitando a obtenção mais facilmente de tempos de reverberação e com maior precisão em comparação com o método proposto por Sabine. O uso desses impulsos é uma das maneiras de obter a resposta em frequência e a resposta ao impulso da sala. Ao conhecermos o sinal de entrada e obtermos o sinal de saída, podemos determinar a resposta ao impulso desse sistema por meio da relação entre eles.

Assim, para obter parâmetros objetivos importantes de uma sala e caracterizá-la acusticamente, é fundamental medir a resposta impulsiva do sistema. Esse processo envolve observar a evolução temporal do nível de pressão sonora na sala após a excitação com um impulso. Tradicionalmente, o método direto era utilizado, gerando sons impulsivos a partir de fontes como estouros de balões ou tiros de festim. No entanto, essas fontes apresentavam baixa reprodutibilidade e não conseguiam excitar a sala com energia suficiente nas bandas de frequência necessárias para análise.

A ideia inicial por trás do uso desse tipo de fonte era a proximidade com a função delta de Dirac, que representa matematicamente um impulso perfeito e contém uma quantidade infinita de energia em um tempo que tende a zero. No entanto, devido às li-

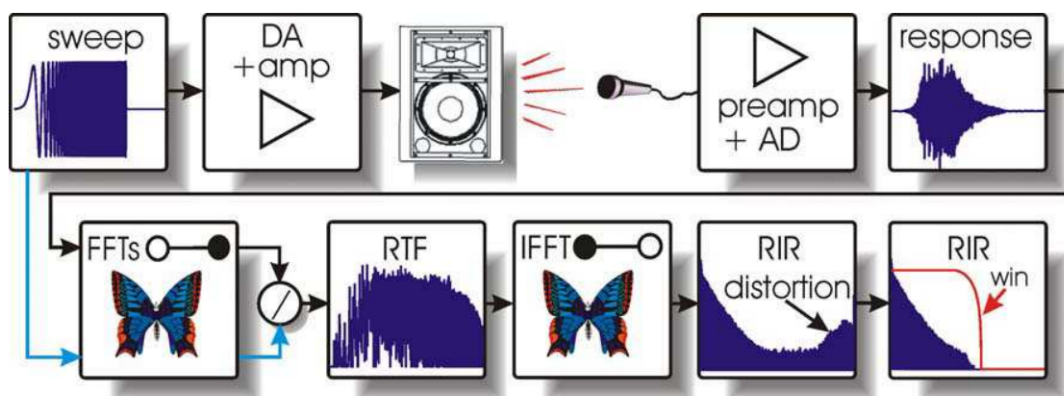
mitações das fontes utilizadas, tornou-se necessário buscar alternativas mais precisas e reproduzíveis para a medição da resposta impulsiva da sala (FAHY, 2001).

Por essas razões e devido ao avanço tecnológico dos últimos anos, o processamento de sinais se tornou uma ferramenta crucial para implementar e desenvolver métodos indiretos de medição de respostas impulsivas. Dois métodos comuns são o uso de sinais MLS (*maximum length sequence*) e o método da varredura de senos exponencial (*exponential sine sweep*). Este último consiste na aplicação de uma varredura exponencial na faixa de frequência de interesse utilizando tons puros (BISTAFA, 2018). Com o auxílio desses métodos, é possível obter medições mais precisas e reproduzíveis da resposta impulsiva da sala, superando as limitações das fontes de excitação utilizadas anteriormente.

De forma conceitual, a resposta ao impulso pode ser expressa em um gráfico de pressão pelo tempo e que representa a resposta entre um posicionamento de fonte-receptor na sala (COX; D'ANTONIO, 2004).

Em relação ao sinal utilizado para excitar a sala, a técnica de medição da resposta impulsiva com varredura de senos, segundo Müller e Massarani (2001), apresenta muitas vantagens em relação à técnica de MLS. O uso do sinal de varredura de senos proporciona uma melhor isolamento dos componentes de distorção harmônica, os quais são alocados no final da resposta impulsiva e podem ser eliminados por meio de janelamento. O tempo de reprodução do sinal de excitação precisa ser suficientemente longo apenas para capturar os valores de interesse e as possíveis distorções. O diagrama de medição da resposta impulsiva com excitação a partir do *sweep* é apresentado na Figura 2, mostrando todas as etapas, desde a geração do sinal de excitação até o pós-processamento, incluindo a eliminação de artefatos provenientes da distorção do sinal no final da resposta impulsiva. Esse processo resulta no decaimento da energia sonora na sala ao final da medição.

Figura 2 – Diagrama de medição de resposta impulsiva com excitação por varredura de senos (*sweep*)



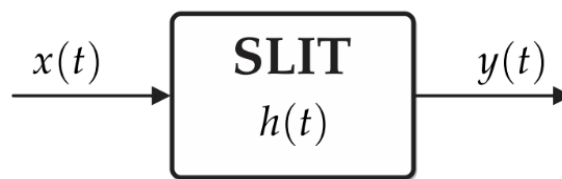
Fonte: Müller e Massarani (2001).

O *sweep*, principalmente o *sweep* exponencial, é amplamente utilizado em medições acústicas, especialmente em acústica de salas. Matematicamente, para obter a res-



posta impulsiva, consideramos que  $x(t)$  é o *sweep* exponencial no tempo. O sistema, representado pela resposta impulsiva no tempo  $h(t)$ , corresponde à sala que está sendo medida. Essa configuração de sala-fonte-receptor é um Sistema Linear Invariante no Tempo (SLIT), desde que as características da sala, como as propriedades do ar e geometria, permaneçam inalteradas ao longo do tempo, assim como a fonte e microfones. Dessa forma, o sinal gravado na sala, é chamado, nesse caso, de resposta ao *sweep*, e é denotado por  $y(t)$ . Esse processo é esquematizado na Figura 3.

Figura 3 – Sistema Linear e Invariante no Tempo (SLIT) com resposta ao impulso representando o processo matemático de uma sala excitada com o sinal  $x(t)$ , sua resposta impulsiva  $h(t)$  e a obtenção da resposta da sala  $y(t)$ .



Fonte: Brandão (2016).

Dessa forma, temos que o sinal  $y(t)$  é a convolução do sinal de excitação  $x(t)$  com a Resposta Impulsiva (RI) da sala  $h(t)$  de acordo com a equação a seguir.

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (2.3)$$

Considerando os espectros, os sinais no domínio da frequência, respectivos a  $x(t)$ ,  $y(t)$  e  $h(t)$  como sendo  $X(j\omega)$ ,  $Y(j\omega)$  e  $H(j\omega)$ , pode-se expressar o mesmo processo por meio do teorema da convolução conforme apresentado na Equação 2.4 em que a convolução no domínio do tempo é transformada em um produto na frequência.

$$Y(j\omega) = X(j\omega) \times H(j\omega) \quad (2.4)$$

Então, o espectro da RI da sala é obtido por  $Y(j\omega)/X(j\omega)$ , ou seja, a determinação da RI da sala é alcançada aplicando a transformada inversa de Fourier a  $H(j\omega)$ , conforme a Equação 2.5.

$$RI_{\text{sala}} = h(t) = \mathcal{F}^{-1}\{H(j\omega)\}. \quad (2.5)$$

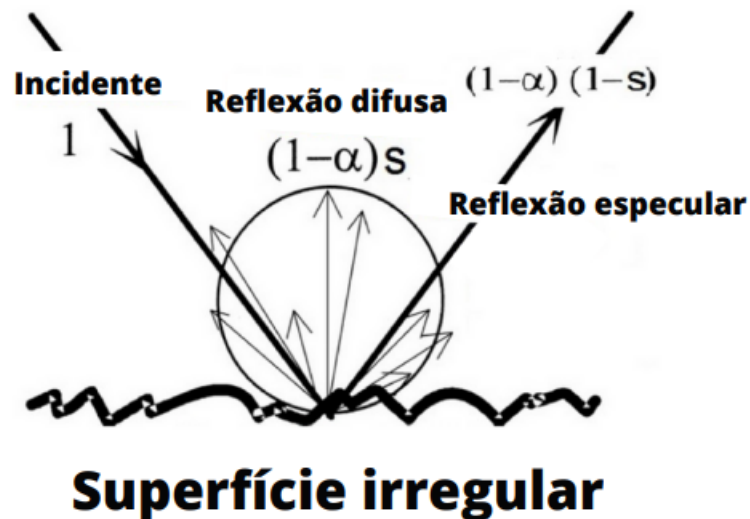
## 2.4 O COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO (*SCATTERING*)

O coeficiente de espalhamento, do inglês *scattering coefficient*, representado por  $s$ , segundo Vorländer e Mommertz (2000), é a razão entre a energia espalhada de modo

difuso ( $E_d$ ) e a energia total refletida pela amostra ( $E_r$ ), ou seja,  $s = E_d/E_r$ . Nesse sentido, ele não leva em conta a qualidade do espalhamento, ou seja, como o som é espalhado, mas oferece uma medida quantitativa do espalhamento em uma determinada superfície, que é dependente da rugosidade do elemento difusor e do comprimento de onda incidente.

Suponha uma superfície com coeficiente de absorção  $\alpha$  e coeficiente de espalhamento  $s$ , sujeita a uma onda sonora com energia de incidência inicial  $E_i$ , como ilustrado na Figura 4.

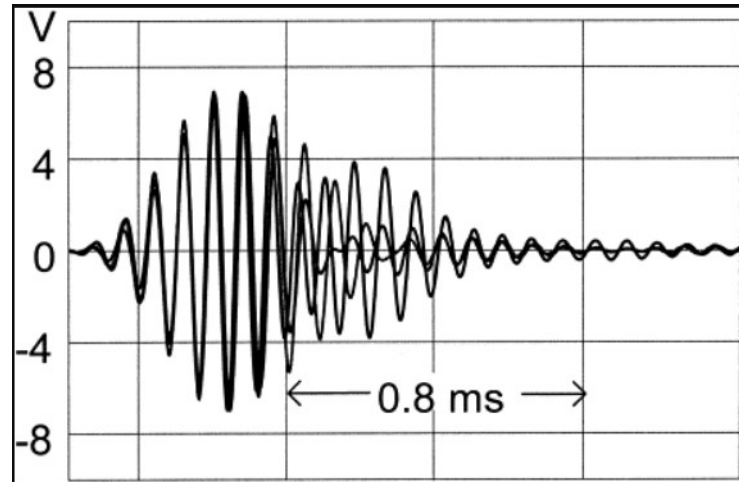
Figura 4 – Reflexões a partir de uma superfície irregular



Fonte: Adaptado de Vorländer e Mommertz (2000).

O gráfico da Figura 5 compara as respostas impulsivas resultantes das reflexões de energia de uma amostra com diferentes orientações. Segundo Vorländer e Mommertz (2000) e conforme visto na figura, observa-se uma alta correlação entre os impulsos em suas partes iniciais. No entanto, na cauda reverberante, a situação é diferente, com cada impulso variando de forma particular. O momento inicial representa as reflexões especulares para cada caso, enquanto a região da “cauda” das respostas impulsivas, onde elas se distinguem, representa as reflexões difusas para cada orientação da mesa rotativa.

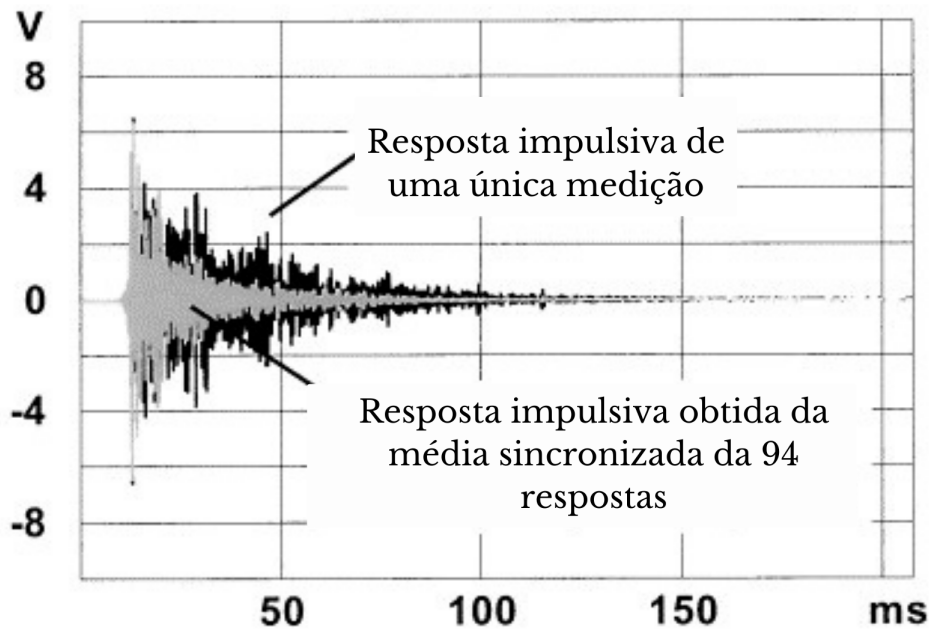
Figura 5 – Comparação entre uma resposta impulsiva para uma orientação da amostra e para a soma das respostas para várias orientações



Fonte: Vorländer e Mommertz (2000).

Ainda, de acordo com Vorländer e Mommertz (2000), quando somamos as respostas impulsivas medidas em várias orientações, obtemos apenas a energia especular refletida pela superfície, conforme visto na Figura 6. Esse processo visa separar as reflexões especulares de toda a energia refletida. Para isso, realiza-se uma soma com as fases sincronizadas das respostas impulsivas obtidas para diferentes orientações da mesa circular. Enquanto as reflexões especulares de cada orientação ficam em fase, as reflexões difusas não seguem esse padrão, fazendo com que elas criem uma relação destrutiva entre si. Assim, essa soma resulta em uma resposta impulsiva contendo somente a energia especular.

Figura 6 – Respostas impulsivas obtidas para diferentes orientações da amostra



Fonte: Adaptado de Vorländer e Mommertz (2000).

A energia total refletida  $E_r$  é dada por

$$E_r = (1 - \alpha)E_i \quad (2.6)$$

e, com isso, a energia refletida de modo difuso será

$$E_d = (1 - \alpha)sE_i \quad (2.7)$$

e a energia refletida de forma especular

$$E_{\text{esp}} = (1 - \alpha)(1 - s)E_i. \quad (2.8)$$

Para determinação experimental desse coeficiente, como apresentado no trabalho de Vorländer e Mommertz (2000), existem dois métodos de medição, o de campo livre e o em campo difuso, em câmara reverberante, que será o método utilizado neste estudo e descrito mais detalhadamente na Seção 2.5.

## 2.5 ISO 17497-1

O trabalho teve como base para o desenvolvimento das medições dos coeficientes de espalhamento a norma ISO 17497-1:2004, *Acoustics - Sound-scattering properties*

of surfaces - Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room (ISO, 2004). De forma semelhante à absorção sonora, o espalhamento faz-se importante e útil no cálculo, simulação e predição do comportamento sonoro de um espaço em acústica de salas. Assim, a norma ISO 17497-1 apresenta o método para medição de tal coeficiente em câmara reverberante, ou seja, em campo difuso, quantificando as propriedades de espalhamento das superfícies.

O método para medição em campo difuso descrito pela norma consiste na medição de quatro tempos de reverberação em quatro situações diferentes para o experimento segundo a Tabela 1, dois deles apenas com a mesa giratória, parada e girando, e os outros dois com a amostra posicionada sobre a mesa, também parada e girando. A norma especifica também no mínimo duas posições de fonte e três de receptor, totalizando seis pontos de medição.

Tabela 1 – Situações para medição dos diferentes tempos de reverberação

Tempo de Reverberação	Amostra de teste	Mesa giratória
$T_1$	Não presente	Parada
$T_2$	Presente	Parada
$T_3$	Não presente	Girando
$T_4$	Presente	Girando

Fonte: Autor.

Sendo o método de cálculo para o coeficiente de espalhamento uma relação entre as absorções especular e difusa, primeiramente é necessário obter os coeficientes de absorção também com o método em câmara reverberante conforme a norma ISO 354 (ISO, 2003).

O coeficiente de absorção para incidência difusa ( $\alpha_s$ ) da amostra pode ser obtida primeiramente medindo o tempo de decaimento da energia sonora na sala, com e sem a amostra mantendo a mesa parada em ambas as situações, o que equivale aos  $T_1$  e  $T_2$ . Para que esses valores sejam comparados entre si e se obtenha a capacidade da amostra em absorver o som,  $\alpha_s$  é encontrado através da equação:

$$\alpha_s = 55,3 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_2 - m_1), \quad (2.9)$$

em que  $V$  é o volume da câmara reverberante,  $S$  a área total da amostra,  $c_1$  e  $c_2$  as velocidades do som no ar e,  $m_1$  e  $m_2$ , os coeficientes de absorção do ar calculados a partir das condições climáticas (temperatura e umidade) durante as medições de  $T_1$  e  $T_2$  respectivamente.

Já o coeficiente de absorção especular ( $\alpha_{\text{spec}}$ ) pode ser calculado utilizando os dados de decaimento da energia sonora na sala para as situações em que a mesa se mantém girando com e sem a amostra, equivalente aos  $T_3$  e  $T_4$ . A equação que determina

$\alpha_{\text{spec}}$  é:

$$\alpha_{\text{spec}} = 55,3 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_4 T_4} - \frac{1}{c_3 T_3} \right) - \frac{4V}{S} (m_4 - m_3), \quad (2.10)$$

em que, analogamente à equação para  $\alpha_s$ ,  $V$  é o volume da câmara reverberante,  $S$  a área total da amostra,  $c_3$  e  $c_4$  as velocidades do som no ar e,  $m_3$  e  $m_4$ , os coeficientes de absorção do ar calculados a partir das condições climáticas (temperatura e umidade) durante as medições de  $T_3$  e  $T_4$  respectivamente.

Por fim, assim, é possível obter o coeficiente de espalhamento, dado por:

$$s = 1 - \frac{1 - \alpha_{\text{spec}}}{1 - \alpha_s} = \frac{\alpha_{\text{spec}} - \alpha_s}{1 - \alpha_s}. \quad (2.11)$$

Para analisar a precisão dos dados obtidos, a norma estabelece equações para o cálculo dos desvios de cada um dos parâmetros medidos nas medições do coeficiente de espalhamento em campo difuso. A seguir, serão apresentadas essas equações, que desempenham um papel fundamental na avaliação da qualidade e confiabilidade dos resultados obtidos.

Para cada um dos tempos de reverberação ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  e  $T_4$ ) tem-se os desvios padrão ( $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  e  $\delta_4$ ) e estes podem ser obtidos por

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(T_i - \bar{T})^2}{N(N-1)}}, \quad (2.12)$$

em que  $N$  é o número de medições do tempo de reverberação, e a média espacial da câmara de reverberação é dada por

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i. \quad (2.13)$$

As incertezas associadas aos coeficientes de absorção são descritas nas Equações 2.14 e 2.15.

$$\delta_{\alpha_s} = \frac{55,3V}{cS} \sqrt{\left(\frac{\delta_2}{T_2^2}\right)^2 + \left(\frac{\delta_1}{T_1^2}\right)^2} \quad (2.14)$$

$$\delta_{\alpha_{\text{spec}}} = \frac{55,3V}{cS} \sqrt{\left(\frac{\delta_4}{T_4^2}\right)^2 + \left(\frac{\delta_3}{T_3^2}\right)^2} \quad (2.15)$$

Com isso, obtém-se o desvio padrão no coeficiente de espalhamento, descrito na Equação 2.16.

$$\delta_s = \left| \frac{\alpha_{\text{spec}} - 1}{1 - \alpha_s} \right| \sqrt{\left(\frac{\delta_{\alpha_{\text{spec}}}}{\alpha_{\text{spec}} - 1}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\alpha_s}}{1 - \alpha_s}\right)^2} \quad (2.16)$$

Para avaliar a qualidade da mesa giratória projetada de acordo com a norma, esta estabelece valores de referência e apresenta o método de cálculo para obter o coeficiente de espalhamento da mesa sem amostras. Esse cálculo é descrito na Equação 2.17. Essas referências e cálculos fornecem uma base para avaliar a conformidade da mesa com os padrões estabelecidos e para determinar sua eficácia na realização das medições de coeficiente de espalhamento.

$$s_{\text{base}} = 55,3 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_3 T_3} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_3 - m_1) \quad (2.17)$$

Em condições ideais, os tempos de reverberação  $T_1$  e  $T_3$  deveriam ser iguais. No entanto, mesas assimétricas e reentrâncias podem alterar a forma de reflexão produzindo um baixo espalhamento que deve ser considerado no cálculo. Supõe-se que esse erro também ocorra na presença de uma amostra de teste.

### 2.5.1 Faixa de frequência

Em relação à faixa de frequência, a norma estabelece que as medições devem ser realizadas em bandas de terço de oitava, com frequências centrais abrangendo o intervalo de 100 Hz a 5.000 Hz para a escala real. No caso de medição em escala reduzida, onde um fator de escala 1:N é utilizado, as frequências centrais devem cobrir a faixa de  $N \times 100$  Hz a  $N \times 5000$  Hz.

No contexto deste trabalho, utilizando  $N=5$  como fator de escala, a faixa de frequência resultante seria de 500 Hz a 25000 Hz.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo é dedicado a apresentar detalhadamente as etapas envolvidas no desenvolvimento da parte experimental deste trabalho. Sendo assim, serão descritos os equipamentos e os software utilizados nas medições, bem como os métodos empregados nesses processos. Além disso, será apresentada a metodologia especificada pela Norma ISO 17497-1 para medição do coeficiente de espalhamento por incidência difusa. Também será mostrada a câmara reverberante em escala (com a base rotativa), onde foram realizadas algumas das medições, desenvolvida no trabalho de conclusão de curso em engenharia acústica do egresso Gabriel Souza (SOUZA, 2019), e o projeto da mesa giratório desenvolvido para as medições em câmara reverberante em escala real.

#### 3.1 MEDIÇÃO EM ESCALA 1:5

A etapa de medição na Câmara Reverberante em escala seguiu a metodologia conforme a normativa ISO 17497-1 e utilizou-se da câmara reverberante em escala reduzida desenvolvida em trabalhos anteriores e disponível no laboratório da UFSM. Para esse trabalho utilizou-se como base alguns trabalhos e conceitos de medição em escala, principalmente de coeficiente de espalhamento.

Modelagem de medições em escala reduzida é uma técnica bastante utilizada no contexto experimental. Para realização deste método, deve-se atentar para alguns pontos cruciais para obtenção de resultados confiáveis.

Um dos principais cuidados na realização de medições em modelos físicos em escala reduzida é a consideração dos comprimentos de onda relevantes para a análise. Por exemplo, ao construir um modelo na escala 1:10, é necessário que a faixa de frequência testada seja dez vezes maior do que a faixa de frequência de interesse no cenário real. No entanto, a análise em frequências muito elevadas apresenta desafios relacionados à crescente atenuação causada pela absorção sonora no ar. Isso significa que o modelo estará sujeito a uma atenuação sonora desproporcionalmente elevada nessa faixa de frequências.

Para lidar com esse problema, é comum operar o modelo em uma atmosfera de ar seco, mantendo uma umidade relativa em torno de 2% ou até mesmo utilizando outros gases, como o hidrogênio (BISTAFA, 2018).

Além disso, outro aspecto crítico para medições em modelos físicos é a utilização de instrumentação em escala adequada, incluindo fontes sonoras e microfones. Isso é essencial para minimizar as interferências no campo acústico interno do modelo e garantir que as medições sejam mais representativas em relação ao cenário real.

Alguns autores já se dedicaram a medições de coeficiente de espalhamento em

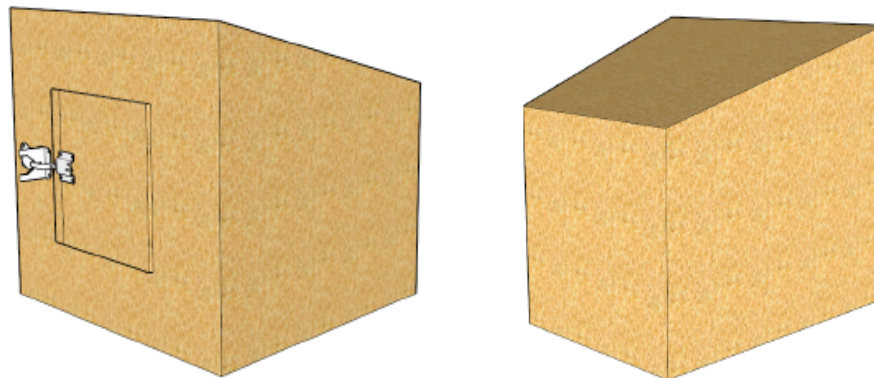


escala, incluindo Souza (2019), cujo trabalho proporcionou uma continuação nesse estudo. Além disso, as contribuições de autores como Santos (2011), Vorländer e Mommertz (2000), Cavalcante e Felchack (2016), Avelar et al. (2018), Pan, Zhao e Gao (2020) entre outros, serviram de base e possibilitaram comparações com algumas de suas pesquisas neste trabalho.

### 3.1.1 Câmara reverberante em escala

Alternativamente à câmara reverberante, o Laboratório de Acústica da UFSM dispõe de uma câmara reverberante em escala projetada e confeccionada durante o Trabalho de Conclusão de Curso do aluno Gabriel Souza (SOUZA, 2019), orientado pelo Prof. Dr. Eng. William D’Andrea Fonseca. A Figura 7 ilustra a minicâmara reverberante nas vistas frontal, lateral e traseira.

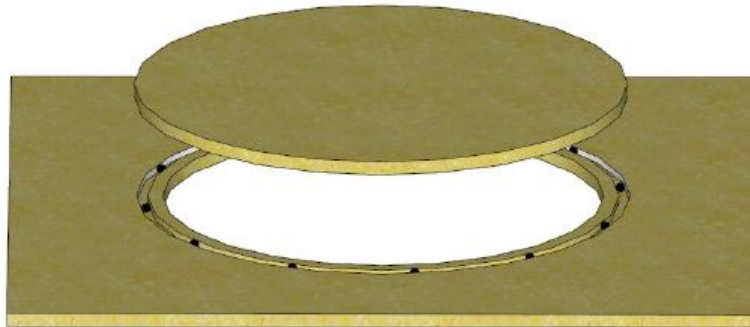
Figura 7 – À esquerda, ilustração da face da porta e, à direita, ilustração da face traseira da minicâmara



Fonte: Souza (2019).

Pelo fato de a ISO 17497-1 especificar o volume de uma câmara reverberante para medição do coeficiente de espalhamento como sendo  $V \geq 200 \times N^{-3} [m^3]$ , em que  $N$  é o fator de escala da câmara e o volume da câmara em escala projetada é de  $1,53 m^3$ , a escala da câmara utilizada foi de aproximadamente 1:5 e os resultados obtidos nela devem considerar a escala utilizada. O projeto conta também com uma base circular giratória com 66 cm de diâmetro para colocação das amostras embutido no chão da câmara em escala, segundo Figura 8. A base rotativa foi acoplada a um motor de passo através de uma peça metálica para ter sua rotação controlada por um microcontrolador Arduino. Para se obter um baixo atrito no apoio na mesa no chão da câmara, optou-se pela utilização de esferas de aço de 14 mm de diâmetro que funcionam como rolamento para o sistema da base giratória, como indicado também na figura. A Figura 9 mostra a câmara construída.

Figura 8 – Base giratória da câmara em escala



Fonte: Souza (2019).

Figura 9 – Câmara reverberante em escala construída



Fonte: Souza (2019).

Demais informações acerca do projeto e construção da câmara em escala, bem como simulações dos modos da mesma, podem ser encontrados no trabalho de Souza (2019).

### 3.1.2 Amostras - Semiesferas

Antes de detalhar a instrumentação geral com os equipamentos utilizados em ambos os experimentos, é importante mencionar que foram utilizadas amostras de semiesferas maciças de gesso. Essa escolha foi motivada pela praticidade e disponibilidade de uso, além da possibilidade de comparar os resultados obtidos com outros trabalhos semelhantes.

Além disso, vale ressaltar que as amostras semiesféricas oferecem a vantagem de gerar uma rugosidade na superfície de forma não arbitrária. Essa rugosidade pode ser modificada de maneira aleatória ou configurada em um arranjo periódico, conforme a necessidade do ensaio. Isso permite maior flexibilidade e adaptabilidade às diferentes condições experimentais.

As semiesferas possuem 45 mm de diâmetro, como mostrado na Figura 10, e foram confeccionadas no Trabalho de Conclusão de Curso do Gabriel Souza, já citado anteriormente.

Figura 10 – Semisferas de gesso.



Fonte: Souza (2019)

### 3.1.3 Instrumentação

As medições foram realizadas com configurações diferentes, que serão descritas mais detalhadamente a seguir. Assim, serão apresentados os instrumentos usados em ambos os experimentos, e as configurações específicas serão apontadas dentro das respectivas seções de cada instrumento.

#### 3.1.3.1 Fonte sonora e amplificador

A norma ISO 17497-1 indica as especificações de fonte e receptores de acordo com a ISO 354. Para medições em campo difuso, o ideal é que a fonte seja o mais próximo possível de uma fonte omnidirecional para ser capaz de excitar suficientemente a sala,

possibilitando uma irradiação de energia sonora mais homogênea em todas as direções. Porém, na realidade, obter uma fonte perfeitamente omnidirecional não é viável devido a diversos fatores, como a diretividade dos alto-falantes. É importante considerar que, à medida que a frequência aumenta, o comprimento de onda diminui e os alto-falantes tornam-se mais diretivos. Por essa razão, optou-se por utilizar uma fonte cúbica, mesmo que ela seja composta por alto-falantes direcionais em cada face. A Figura 11 mostra a fonte cúbica utilizada.

Figura 11 – Fonte sonora cúbica



Fonte: Autor.

Os alto-falantes utilizados para compor a fonte cúbica, são do tipo *Omnes Audio BB 2.01* e seu cone feito de alumínio. As especificações desse alto-falante são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações dos alto-falantes utilizados na fonte sonora cúbica

<b>Omnes Audio BB 2.01</b>	
Potência nominal	10 W
Impedância nominal	4 $\Omega$
Faixa de frequência	200~20.000 Hz
NPS (1W/1m)	85 dB
Frequência de ressonância	190 Hz

Fonte: Autor.

Sabendo que os alto-falantes possuem sua máxima e mínima frequência de atuação limitadas pelo tamanho dos falantes, os alto-falantes menores tem uma dificuldade

maior em radiar ondas sonoras de baixa frequência, com isso, frequências menores que 200 Hz, executadas pela fonte sonora cúbica, não são significativas. Pelo fato de o experimento ter sido executado em uma câmara reverberante de escala 1:5, a frequência mínima a ser analisada nesse caso, segundo a norma, é  $N \times 100$  Hz, para  $N = 5$ . Assim, a frequência mínima de análise em escala é 500 Hz, concluindo que o tamanho da fonte não será um empecilho para a realização da medição.

A corrente necessária para alimentação e funcionamento da fonte sonora foi fornecida por um amplificador de potência da Brüel & Kjær de modelo 2718, visto na Figura 12. Pelo fato de a amplitude do sinal enviado para a fonte ser pequena, faz-se necessário o uso de tal equipamento.

Figura 12 – Amplificador de potência B&K 2718



Fonte: Brüel & Kjær

As especificações técnicas do amplificador usado são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações do amplificador de potência da B&K 2718

<b>Amplificador de potência Brüel &amp; Kjær Type 2718</b>	
Faixa de frequência	10~20.000 Hz
Limite de corrente	1~5 A
Potência fornecida	75 W a 3 $\Omega$
Número de canais	1

Fonte: Autor.

### 3.1.3.2 Interface de áudio Roland Rubix 22

Visto que na cadeia de medição utiliza-se instrumentação com princípios analógicos e digitais, é necessário a utilização de um conversor A/D. Esse papel é desempenhado pela interface de áudio da Roland, Rubix 22, vista na Figura 13. O uso da interface de áudio foi indispensável para reproduzir a varredura senoidal e capturar a resposta a esse sinal. Essa placa proporciona a capacidade de realizar medições em frequências superiores a 20kHz, o que é essencial para trabalhos em escala e abrange faixas de frequência mais amplas.

Figura 13 – Interface de áudio Roland Rubix 22



Fonte: Roland.

Tabela 4 – Especificações Interface de áudio Roland Rubix 22

<b>Interface de áudio Roland Rubix 22</b>	
Frequência de amostragem	44.1kHz, 48kHz, 96kHz, 192kHz
Resolução	24 bits / 194 kHz
Número de canais	2 de entrada e 2 de saída

Fonte: Autor.

### 3.1.3.3 Condicionador de sinais

Sabendo que os microfones de medição, utilizados nos experimentos e descritos na subseção 3.1.3.4, são pré-polarizados, estes necessitam de uma corrente de alimentação para que sejam capazes de captar os sinais que chegam, de forma mecânica, até eles. Para isso, pode-se utilizar alguns equipamentos que forneçam essa corrente necessária para alimentação dos mesmos apenas como um condicionador de sinais. No caso desse trabalho, foi preciso utilizar esse tipo de sistema para que os sinais entre os microfones e a placa de áudio fossem compatíveis. Sendo assim, os microfones eram responsáveis pela captação dos sinais e a placa de áudio responsável por enviar esses sinais para o notebook, para um posterior processamento.

No primeiro experimento, o condicionador de sinal utilizado foi o sonômetro 2270 da Brüel & Kjær disponível no laboratório de Acústica e Vibrações da UFSM. Além disso aproveitou-se o microfone, detalhado na subseção 3.1.3.4, do próprio sonômetro para medição dentro da câmara reverberante em escala. Este foi colocado dentro da câmara e conectado ao sonômetro por meio de um fio extensor do próprio kit do sonômetro. Não é

interessante, nesse caso, se aprofundar nas especificações técnicas deste equipamento, já que este não foi usado como gerador ou gravador dos sinais, apenas aproveitado para fins de condicionamento do sinal. O sonômetro pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 – Sonômetro 2270 Brüel & Kjær com microfone acoplado



Fonte: Brüel & Kjær.

Pelo fato de termos a conexão de entrada do sonômetro limitada, no primeiro experimento, utilizou-se um microfone apenas, em que variou-se 6 vezes a posição dentro da câmara em escala.

No segundo experimento, foi utilizado o módulo de aquisição de 9234 da *National Instruments* (NI), também disponível no laboratório de Acústica e Vibrações da UFSM. Este pode ser visto na Figura 15. Esse módulo possui 4 entradas que podem trabalhar simultaneamente, facilitando o uso de mais de um microfone ao mesmo tempo. Com o aumento das posições medidas, reduz-se a quantidade de abertura da porta da câmara para mudança das posições, interferindo menos nas características atmosféricas dentro da câmara e, assim, melhorando a confiabilidade dos resultados.

Figura 15 – Módulo de entrada *National Instruments* 9234



Fonte: NI 9234

Da mesma maneira que o sonômetro, não é necessário descrever as especifica-

ções técnicas deste equipamento, já que estas características não serão utilizadas para a realização dos experimentos. Para conexão entre os microfones com a placa de áudio da Roland através do módulo da NI, acoplou-se entre eles um adaptador de três vias, em T, com conector do tipo BNC, como visto na Figura 16.

Figura 16 – Adaptador de três vias do tipo BNC



#### 3.1.3.4 Microfones

Em uma câmara reverberante, existe a predominância do campo difuso, como elucidado anteriormente. Pensando nisso, o ideal seria utilizar um microfone projetado para este tipo de campo. No laboratório de Acústica e Vibrações da UFSM, no período de realização dos experimentos, não havia a disponibilidade de muitos microfones. Diante disso, para o segundo experimento, optou-se por utilizar os microfones encontrados a disposição, com 1/2" da marca Brüel & Kjær, sendo eles, dois de campo difuso da série 4942 e dois de campo livre da série 4189, já que o foco era usar o maior número de microfones possível simultaneamente. No primeiro experimento, como já pontuado, utilizou-se o microfone do sonômetro da B&K 2270, que por sua vez também é um microfone de campo livre da série 4189. As especificações técnicas dos microfones utilizados, podem ser vistas na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações técnicas dos microfones da Brüel & Kjær

<b>Microfone Brüel &amp; Kjær de 1/2" utilizados nos experimentos</b>					
<b>N° do microfone</b>	1	2	3	4	Sonômetro
<b>N° de serial</b>	2689638	2647516	2689645	2647440	2689369
<b>Sensibilidade</b>	46,6 mV/Pa	48,1 mV/Pa	43,4 mV/Pa	51,4 mV/Pa	51,1 mV/Pa
<b>Faixa de frequência</b>	6 – 20.000 Hz	6,3 – 16.000 Hz	6 – 20.000 Hz	6,3 – 16.000 Hz	6 – 20.000 Hz
<b>Modo de operação</b>	Campo livre	Campo difuso	Campo livre	Campo difuso	Campo difuso

Fonte: Autor.



### 3.1.4 Programas utilizados

A seguir, serão descritos os programas utilizados durante os ensaios para a geração e aquisição dos dados, bem como para a etapa de pós-processamento.

- **Dirac**: este software de medição acústica é utilizado para realizar medições e análises das respostas ao impulso, visando a obtenção de diferentes parâmetros na acústica de salas. Neste trabalho, ele foi utilizado principalmente para obter as respostas impulsivas e os tempos de reverberação.
- **Matlab**: este software matemático foi utilizado para a geração e aquisição dos sinais medidos. Além disso, ele desempenhou um papel importante no pós-processamento e na geração dos gráficos dos resultados obtidos.
- **Excel**: empregado principalmente para o tratamento dos dados e para efetuar os cálculos dos resultados obtidos.

### 3.1.5 Medições

Foram realizados dois ensaios com o intuito de fazer comparações entre diferentes parâmetros importantes para medição de coeficiente de espalhamento, como a quantidade de amostras, absorção da câmara reverberante, quantidade de refletores e a dispersão dos dados medidos. Assim, estes serão descritos e divididos em primeiro e segundo experimento, nas Seções 3.1.5.2 e 3.1.5.3, respectivamente.

#### 3.1.5.1 Adequações

A câmara passou por algumas adequações que foram escolhidas tomando como base a literatura e trabalhos semelhantes. Os objetivos principais de tais adequações foi:

- Reduzir a absorção sonora das paredes de MDF da câmara;
- Melhorar o campo difuso dentro da câmara;
- Diminuir as incertezas e dispersões nos dados.

A partir da definição das características que careciam de adequação, foram escolhidas as formas pelas quais se dariam as melhorias e estas podem ser vistas na Tabela 6 bem como a relação do que tinha-se antes das adequações.

Tabela 6 – Adequações realizadas na câmara e na cadeia de medição

Antes	Depois
Madeira crua	Madeira envernizada
6 pares fonte-receptor	8 pares fonte-receptor
2 posições de fonte e 3 posições de receptor	2 posições de fonte e 4 posições de receptor
3 refletores de teto	6 refletores de teto

Fonte: Autor.

Sendo assim, a aplicação do verniz na câmara objetivou o aumento no tempo de reverberação diminuindo a absorção, o aumento da quantidade de refletores objetivou a melhora do campo difuso e aumento da homogeneidade da pressão sonora ao longo da câmara, e, o aumento na quantidade dos receptores objetivou a menor dispersão dos dados medidos. As Figuras 17 e 18 ilustram a câmara antes e depois das adequações.

Figura 17 – Câmara reverberante em escala da UFSM

(a) Câmara sem verniz



(b) Câmara envernizada



Fonte: Autor.

Figura 18 – Refletores no teto da câmara reverberante em escala

(a) Refletores antes das adequações



(b) Refletores depois das adequações

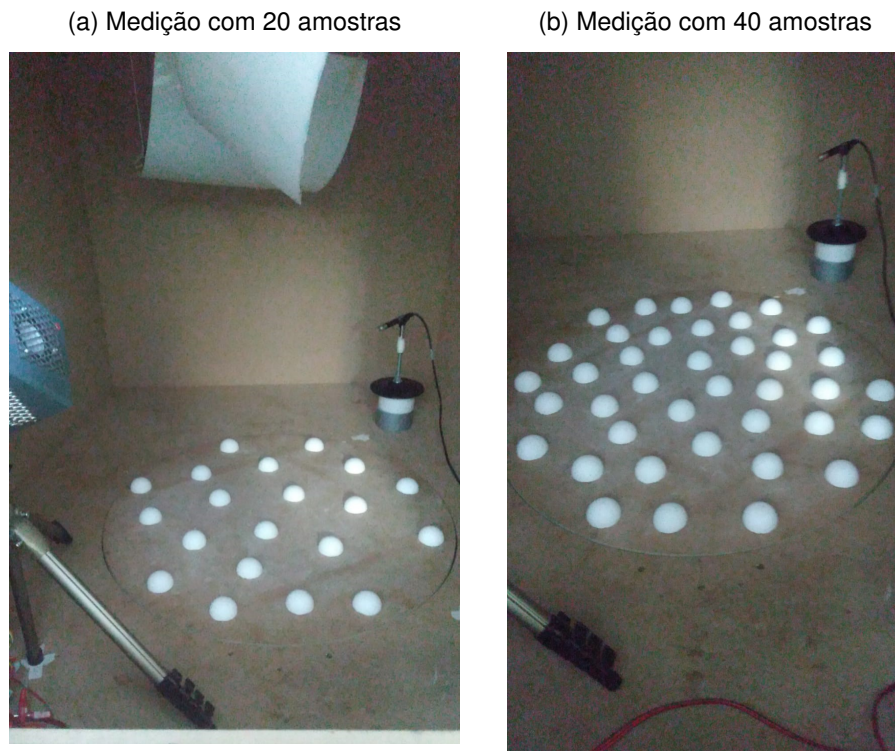


Fonte: Autor.

### 3.1.5.2 Primeira Medição

A primeira medição consistiu na colocação de 20 e após 40 semiesferas de gesso distribuídas de forma aleatória sobre a mesa giratória. Foram utilizadas três posições de microfones e duas fonte, totalizando seis pares fonte-receptor. A Figura 19 mostra a primeira medição feita, com uma posição de receptor e uma de fonte, já que cada uma das posições foi medida separadamente, com apenas um microfone.

Figura 19 – Medição sem adequações da câmara

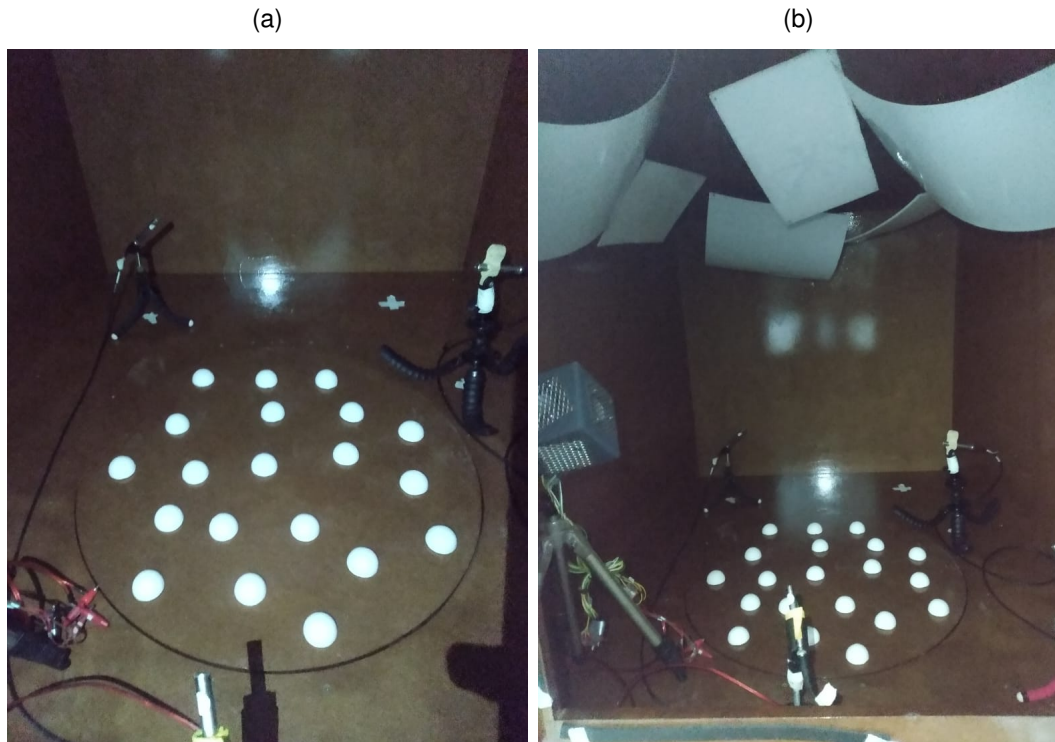


Fonte: Autor

### 3.1.5.3 Segunda Medição

A segunda medição consistiu na utilização de 20 amostras, também distribuídas de forma aleatória sobre a mesa giratória. Esta medição foi feita depois da aplicação do verniz em toda a câmara, colocação de mais refletores no teto e, ainda, foram utilizadas quatro posições de microfones, simultâneas, e duas fonte, totalizando oito pares fonte-receptor. A Figura 20 mostra a câmara com as alterações feitas, tanto com o verniz, quanto com uma maior quantidade de refletores pendurados e os quatro posicionamentos simultâneos de microfones.

Figura 20 – Medição com 20 amostras após as adequações



Fonte: Autor

### 3.2 MEDIÇÃO EM ESCALA 1:1 (TAMANHO REAL)

A etapa de medição na Câmara Reverberante em tamanho real seguiu a mesma metodologia previamente descrita, conforme a normativa ISO 17497-1. No entanto, diferentemente da medição em escala, onde já dispúnhamos de uma câmara em escala com uma mesa giratória fabricada para trabalhos anteriores, na medição em tamanho real foi necessário desenvolver um projeto e fabricar uma mesa giratória que atendesse às exigências descritas na norma mencionada. A câmara utilizada para essa medição foi a câmara disponibilizada no Laboratório de Acústica que faz partes do complexo de laboratórios do LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil) da UFSM.

#### 3.2.1 Câmara reverberante

A câmara reverberante da UFSM atende, além de outros cursos, o curso de Engenharia Acústica. Esta será usada nesse trabalho. A câmara possui volume de  $207 \text{ m}^3$  o que atende ao critério delimitado, em que especifica um mínimo volume de  $200 \text{ m}^3$  para

câmaras reverberantes.

Figura 21 – Câmara Reverberante do Laboratório de Acústica da UFSM



Fonte: Brandão (2016).

O método de medição do coeficiente de absorção em câmara reverberante, necessário para o cálculo do coeficiente de espalhamento, descrito anteriormente, é baseado na teoria estatística de acústica de salas e esse método detalhado é encontrado e descrito na norma ISO 354 - *Measurement of sound absorption in a reverberation room* (ISO, 2003).

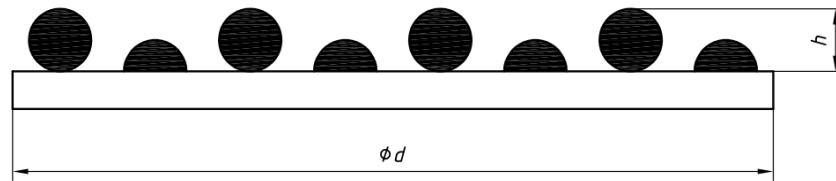
### 3.2.2 Mesa giratória

Como descrito na norma 17497-1, para medições realizadas em câmara em escala real, uma mesa giratória com dimensões adequadas será necessária para realizar o movimento de rotação da amostra durante a medição. Seguindo as medidas e exigências requeridas pela norma ISO 17497-1. O formato quadrado alternativo apresentado pela norma foi definido como a melhor para solucionar o problema do tamanho circular da amostra precisar ser superior a 3,75 m, cobrindo assim toda a extensão da mesa, também circular. Assim, conforme descrito na seção 6.3.1 da norma, a mesa deve seguir as seguintes dimensões:

- Diâmetro  $\geq 3,75$  m.
- Lado da amostra de teste quadrada  $\geq 2,65$  m.

Ainda, de acordo com a ISO 17497-1, os resultados apenas serão considerados caso a profundidade da amostra testada for suficientemente pequena em relação ao diâmetro total da mesa giratória, de acordo com o apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Definição da profundidade da estrutura para amostras difusoras



Fonte: ISO (2004).

Para evitar o chamado "efeito de borda", esse cuidado com as alturas das amostras é tomado. Efeitos de borda podem ocorrer devido a variações na altura da amostra ao longo das bordas do teste. Isso pode resultar em coeficientes de espalhamento muito elevados em comparação com uma superfície infinitamente extensa com a mesma estrutura da amostra de teste. O efeito de borda ocasionalmente pode resultar em coeficientes de espalhamento superiores a 1.

Dessa forma, a profundidade da mesa deve ser  $h \leq d/16$ . Sendo  $d$  o diâmetro da mesa com 3,75 m, a profundidade máxima das amostras medidas deve ser de aproximadamente 23 cm. Em relação à posição que a mesa giratória deve ocupar na câmara, esta deve distar das paredes e outras superfícies em, no mínimo, um metro.

No desenvolvimento do projeto da mesa giratória, além de seguir as diretrizes indicadas pela ISO 17497-1, foi levado em consideração a dinâmica do laboratório de Acústica onde ela seria montada e fixada. Esse laboratório é utilizado por alunos de diversos cursos de graduação e pós-graduação, sendo amplamente utilizado pelos alunos do curso de Engenharia Acústica durante as aulas.

Portanto, concluiu-se que a mesa não poderia permanecer montada o tempo todo dentro da câmara, já que isso poderia prejudicar o uso regular do espaço. Além disso, devido ao diâmetro mínimo indicado pela normativa, a mesa excederia a altura para passagem pela porta do laboratório e da câmara. Para resolver essas questões, a mesa foi projetada com peças separáveis e mecanismos de fixação simples, permitindo que alunos e professores pudessem montá-la e desmontá-la facilmente. Além disso, as peças foram pensadas para serem relativamente leves para facilitar a locomoção e o armazenamento dentro do laboratório.

Levando em consideração todos os aspectos mencionados, o projeto final executado será descrito com mais detalhes a seguir.

### 3.2.2.1 O Projeto

A etapa da estrutura do projeto foi inspirado em uma mesa giratória utilizada em um estudo no Politécnico de Torino na Itália (SHTREPI et al., 2016), conforme estrutura mon-

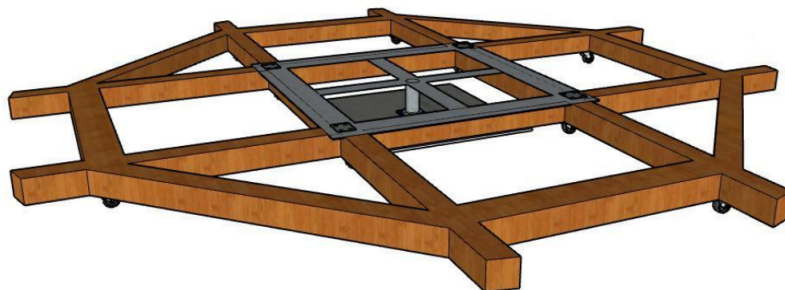
tada vista na Figura 23. Assim, a base giratória produzida para o presente estudo possui uma fixação central no piso com uma chapa metálica e um rolamento central que permite o giro da mesa em torno desse eixo, conforme mostrado na Figura 24, e as estacadas que também compõe a estrutura possuem, cada uma pela menos dois rodízios de apoio.

Figura 23 – Mesa giratória utilizada como inspiração para o projeto da mesa aplicado no presente trabalho



Fonte: Shtrepi et al. (2016).

Figura 24 – Projeto 3D da estrutura da mesa giratória com a fixação chapa metálica, rolamento central e rodízios de apoio

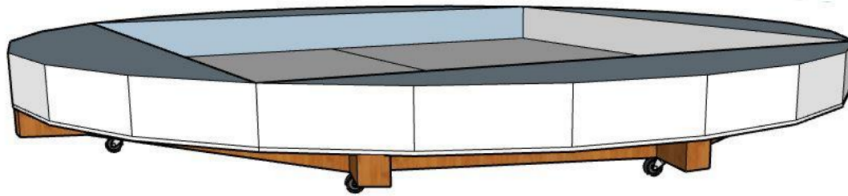


Fonte: Autor.

A parte superior da mesa, ou seja, as peças adjacentes que seriam encaixadas entre si e montadas sobre a estrutura foram projetadas de acordo com o esquema a seguir. Em que foi feito uma base no centro, e peças em formato de meia lua pela metade, essas

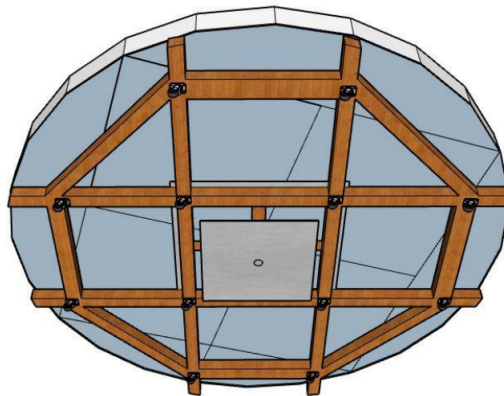
peças são apoiadas na estrutura e fixadas com parafusos. Assim, como vista geral, tem-se a modelagem do projeto final da mesa giratória em 3D, feita no software SketchUp e vista nas Figuras 25 e 26.

Figura 25 – Modelagem 3D da mesa giratória completa - Vista lateral



Fonte: Autor.

Figura 26 – Modelagem 3D da mesa giratória completa - Vista inferior



Fonte: Autor.

Para acomodar diferentes alturas de amostras, foram adicionados suportes ajustáveis, permitindo o ajuste da altura da tampa conforme necessário para cada amostra com o intuito de evitar o efeito de borda e atender à exigência da norma nesse sentido. Essa medida foi tomada considerando a possibilidade de amostras futuras com alturas distintas, garantindo a adaptabilidade do sistema. Dessa forma, permitindo uma altura máxima das amostras de 20 cm.

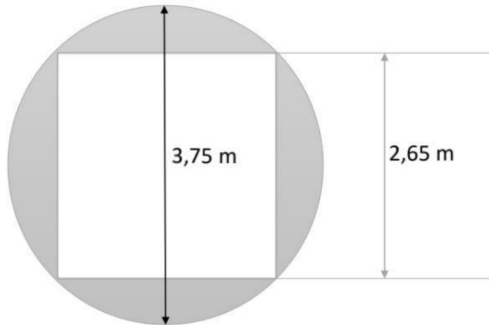
### 3.2.2.1.1 Dimensões do Projeto

As dimensões de todas as peças e da estrutura da mesa serão apresentadas a seguir para fins de melhor compreensão do projeto e possível reprodução e ajustes futuros.

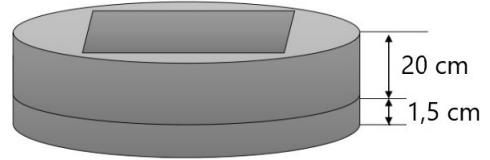


Figura 27 – Dimensões da mesa giratória

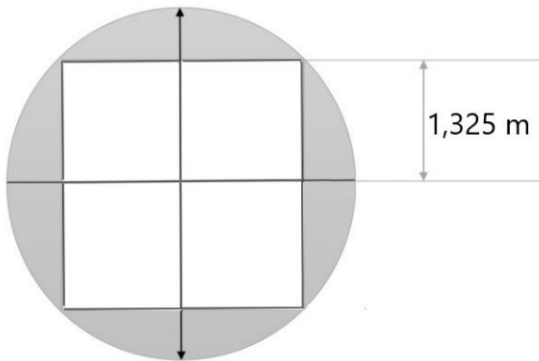
(a) Vista superior da mesa com as respectivas dimensões



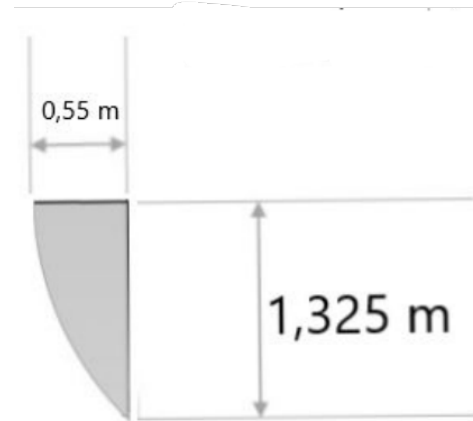
(b) Vista lateral da mesa com as respectivas dimensões



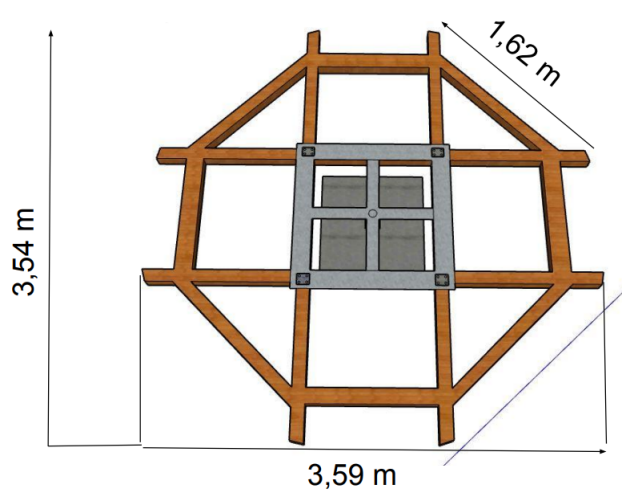
(c) Dimensão das peças centrais



(d) Dimensão das peças laterais (meias luas cortadas)



(e) Dimensões da estrutura da mesa giratória



Fonte: Autor.

Por fim, na Figura 28, é possível observar tanto a mesa giratória montada em sua totalidade, como também a estrutura de base após o processo de fabricação e montagem. Essa visualização proporciona uma compreensão mais clara dos elementos reais

em questão.

Figura 28 – Mesa giratória projetada e utilizada nos ensaios

(a) Mesa giratória montada



(b) Estrutura da mesa giratória

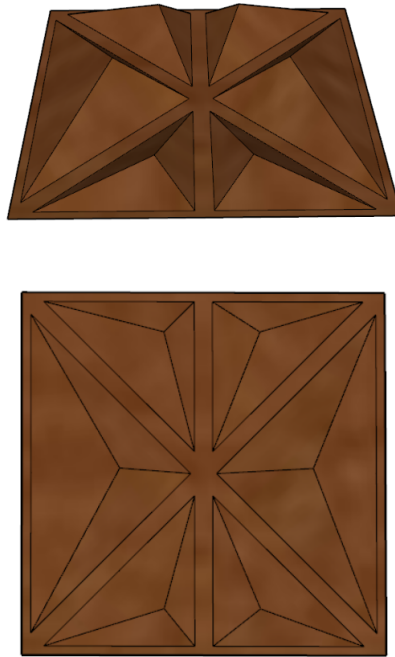


Fonte: Autor.

### 3.2.3 Amostras - Material Difusor

As amostras ensaiadas foram fornecidas por uma instituição parceira e apresentam uma geometria não convencional, com a combinação de pirâmides de duas dimensões distintas na superfície, conforme ilustrado na Figura 29. O desenho em 3D representa uma célula do arranjo difusor, que foi elaborado com proporções equivalentes às dimensões reais. Essas amostras foram fabricadas a partir de materiais reciclados provenientes da indústria de calçados, tornando-as leves e de fácil manuseio. O material utilizado em sua fabricação pode ser caracterizado como um polímero que imita a aparência da madeira na face superior, que fica exposta após a instalação do difusor. Já na face inferior, que é colada na superfície desejada durante a instalação, o material é semelhante a um feltro, ou seja, menos rígido e liso em comparação com a face superior.

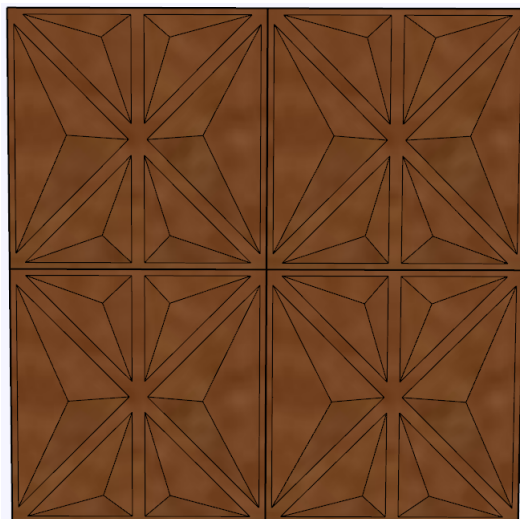
Figura 29 – Desenho 3D das vistas lateral e superior de uma célula da amostra difusora ensaiada na etapa de medição de coeficiente de espalhamento em câmara reverberante em tamanho real



Fonte: Autor.

As amostras foram fornecidas em painéis de 40 cm x 40 cm com quatro células unidas de acordo com o visto na Figura 30.

Figura 30 – Desenho 3D das vistas lateral e superior de uma célula da amostra difusora ensaiada na etapa de medição de coeficiente de espalhamento em câmara reverberante em tamanho real

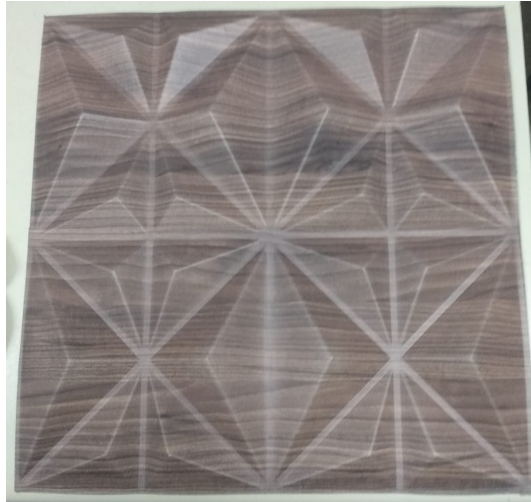


Fonte: Autor.

Como mencionado anteriormente, o difusor possui uma característica distintiva de ser leve, o que permite uma aplicação fácil e remoção simplificada utilizando uma fita dupla face. Essa abordagem torna possível fixar o difusor em qualquer superfície desejada de

forma conveniente. A Figura 31 abaixo apresenta o difusor real.

Figura 31 – Amostra difusora ensaiada na etapa de medição de coeficiente de espalhamento em câmara reverberante em tamanho real



Fonte: Autor.

Para a instalação das amostras na mesa giratória, foi necessário utilizar a tampa ajustável para evitar que as amostras ficassem com uma altura significativamente menor ou maior em comparação com as bordas da mesa, objetivando deixá-las o mais alinhadas possível com o as bordas da mesa.

### 3.2.4 Instrumentação

Semelhantemente ao elencado na seção anterior que descreve os equipamentos utilizados para a medição em câmara reverberante em escala, serão descritos também aqui a instrumentação utilizada para a medição em tamanho real.

De forma geral e genérica, para realização de um ensaio de espalhamento, faz-se necessário, além do aparato para colocação das amostras, o uso um sistema de geração de sinais, um amplificador, uma fonte sonora, os receptores e o sistema de aquisição de sinais.

O notebook é responsável, por meio de um código em Matlab utilizando a *Toolbox* desenvolvida pelo ITA (DIETRICH et al., 2010), pela geração do sinal de varredura em frequência, o *sweep*. O sinal é direcionado pra o amplificador por meio do Módulo de geração NI9263, visto na Figura 32a, de sinais da National Instruments e, assim, levado para ser emitido pelas fontes sonoras dodecaédricas. O sinal emitido pelas fontes sonoras é captado pelos microfones que estão conectados ao Módulo de aquisição de sinais NI 9234, visto na Figura 32b. Por fim, esses sinais são salvos pelo código em Matlab em

formato de pressões sonoras para posterior processamento e cálculo dos parâmetros e coeficientes de absorção e espalhamento desejados.

Figura 32 – Módulos de geração e aquisição da marca National Instruments utilizados nos ensaios de coeficiente de espalhamento em escala real

(a) Módulo de geração - Bloco terminal de parafuso



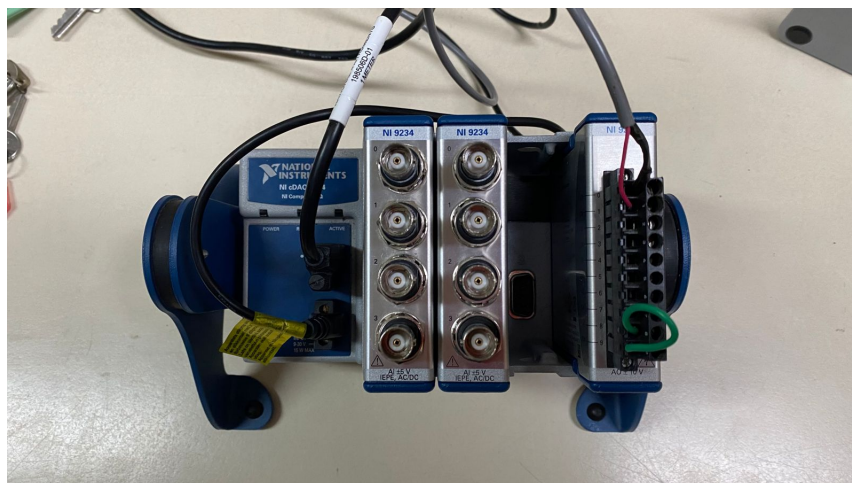
(b) Módulo de aquisição - Conexão BNC



Fonte: National Instruments.

Pelo fato de serem utilizados 6 microfones para aquisição simultânea em 6 canais, foi necessário a utilização de dois módulos de aquisição, um utilizando todos os quatro canais disponíveis e mais um utilizando dois canais extras, conforme visto na Figura 33 que mostra o arranjo de módulos usado montados no chassi.

Figura 33 – Módulos de geração e aquisição montados no Chassi da National Instruments



Fonte: Autor.

As fontes sonoras utilizadas neste estudo foram as dodecaédricas omnidirecionais, conforme representado na Figura 34. Essas fontes pertencem à marca Brüel & Kjær e são do modelo 4292-L. As especificações detalhadas dessas fontes estão descritas na Tabela 7 a seguir.

Figura 34 – Fonte Sonora Ominidirecional Dodecaédrica



Fonte: Brüel & Kjaer.

Tabela 7 – Especificações da fonte sonora omnidirecional da B&amp;K 4292-L

<b>Fonte sonora omnidirecional Brüel &amp; Kjær Type 4292-L</b>	
Faixa de frequência de operação	50~5.000 Hz
Impedância nominal	6 $\Omega$
Conexão	SpeakON
Número de alto-falantes	12

Fonte: Autor.

Em relação aos microfones usados, foram no total 6 do tipo 4942-A-021 da Brüel & Kjær, cujas especificações podem ser verificadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Especificações técnicas dos microfones da Brüel &amp; Kjær utilizados nos ensaios em câmara em escala real

<b>Microfone Brüel &amp; Kjær de 1/2" utilizados nos ensaios</b>						
<b>Nº do microfone</b>	1	2	3	4	5	6
<b>Nº de serial</b>	2679226	2679227	2679229	2679230	2679231	2679232
<b>Sensibilidade</b>	49,4 mV/Pa	52,8 mV/Pa	45,4 mV/Pa	50,1 mV/Pa	48,9 mV/Pa	43,9 mV/Pa
<b>Faixa de frequência</b>	6,3 – 16.000 Hz	6,3 – 16.000 Hz	6,3 – 16.000 Hz	6,3 – 16.000 Hz	6,3 – 16.000 Hz	6,3 – 16.000 Hz
<b>Modo de operação</b>	Campo difuso	Campo difuso	Campo difuso	Campo difuso	Campo difuso	Campo difuso

Fonte: Autor.

Em relação a cabeamento utilizado, foi configurado da seguinte forma:

- Aquisição dos sinais (microfones para módulo de aquisição da NI): BNC-BNC;
- Geração dos sinais (módulo de geração da NI para amplificador): Terminal em parafuso-BNC;
- Geração dos sinais (amplificador para fonte sonora): SpeakOn - SpeakOn;
- Chassi com módulos da NI com notebook: USB.

### 3.2.5 Medições

Inicialmente, foi realizado um ensaio na mesa vazia, ou seja, sem amostras, com o objetivo de verificar sua adequação de acordo com as exigências normativas. Esse ensaio pode ser visualizado na Figura 35, na qual é observado que a tampa de ajuste de altura das amostras foi posicionada no nível mais alto para garantir que a mesa estivesse o mais plana possível. É importante destacar que foram tomados cuidados específicos em relação à cavidade formada dentro da mesa após a colocação da tampa, pois essa cavidade poderia funcionar como um absorvedor para baixas frequências, gerando ressonâncias dentro dela, o que não era desejado. Para evitar esse problema, a cavidade foi completamente preenchida com lã de PET.

Figura 35 – Ensaio de coeficiente de espalhamento em câmara reverberante da mesa giratória sem amostras



Fonte: Autor.

O método utilizado para rotacionar a mesa foi passo a passo com incrementos de 5° manualmente. Para garantir um posicionamento preciso para cada passo, foram feitas marcações na lateral da mesa, dividindo-a em partições de 5° necessárias para o giro em cada passo. Além disso, um tripé foi posicionado para indicar onde cada marcação deveria ser alinhada, proporcionando um guia visual preciso, conforme visto na Figura 36.

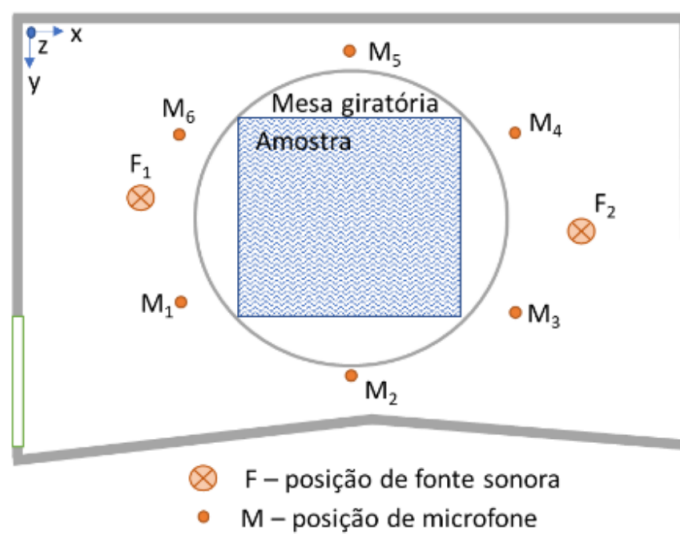
Figura 36 – Sistema de marcação dos incrementos de 5° a cada passo



Fonte: Autor.

A mesa giratória foi posicionada na câmara reverberante de forma a garantir uma distância de pelo menos 1 metro das superfícies refletoras, conforme estipulado pela norma. Os pontos de medição, as fontes e os receptores, bem como a disposição da mesa e das amostras dentro da câmara, podem ser observados na planta representada na Figura 37 e a Tabela 9 mostra as coordenadas de cada ponto de fonte e receptor.

Figura 37 – Planta com os pontos de fonte e receptores na câmara reverberante



Fonte: Autor.



Tabela 9 – Coordenadas dos pontos de medição

<b>Ponto</b>	M1	M2	M3	M4	M5	M6	F1	F2
<b>X</b>	2,00	4,10	6,60	6,70	4,10	1,56	1,60	6,72
<b>Y</b>	3,08	4,12	3,48	1,15	1,12	1,08	2,38	2,55
<b>Z</b>	1,30	1,85	1,21	1,22	1,84	1,23	1,80	1,80

Fonte: Autor.

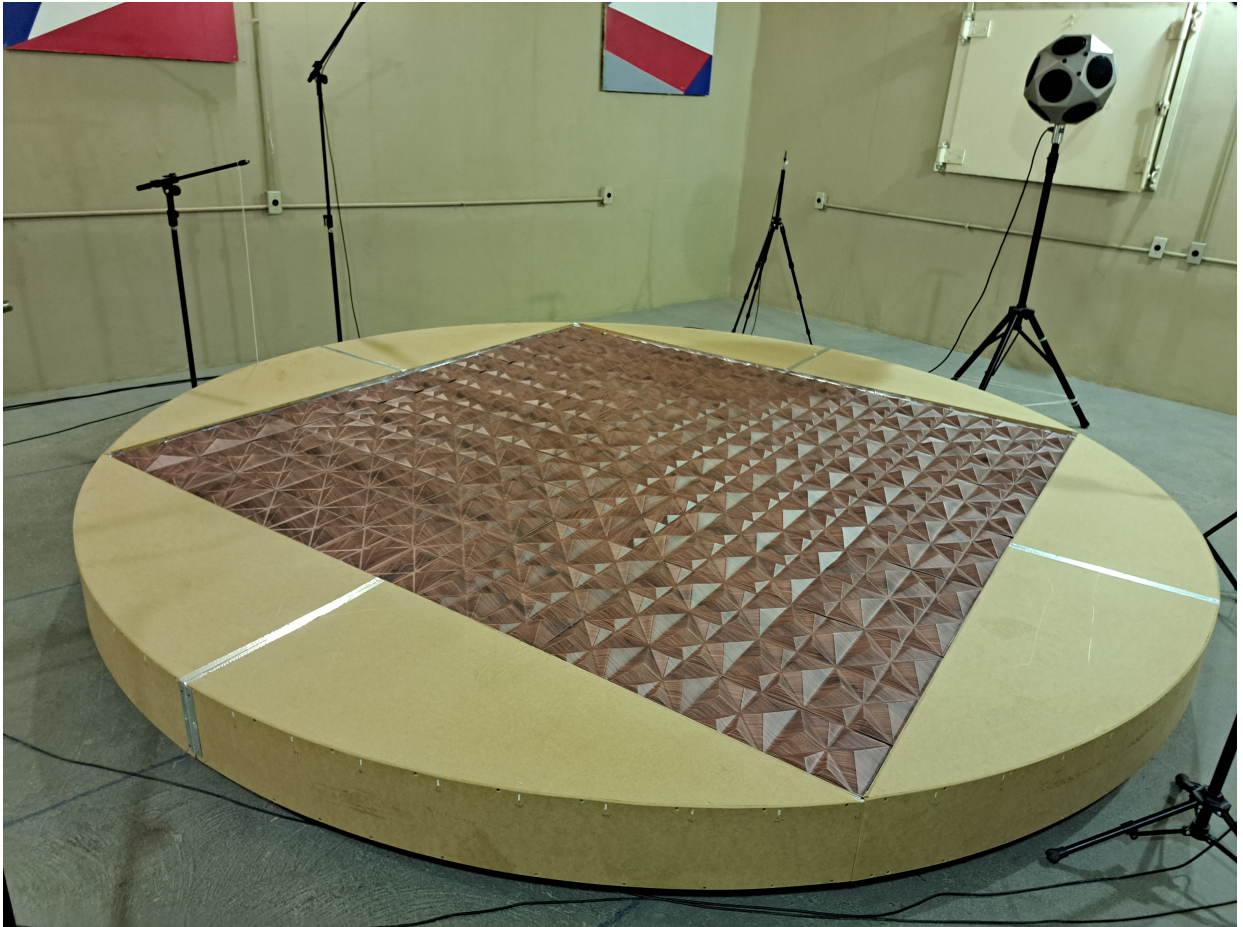
Após fechar a porta da sala de reverberação, foi respeitado um tempo de espera, conforme recomendado na norma para medições em escala real, a fim de evitar variações nas condições ambientais durante as medições. Com isso, durante os ensaios, foram registrados, por meio de um termo-higrômetro, os valores de umidade e temperatura no início e no final de cada teste, sendo considerados os valores médios para obtenção das velocidades de propagação do som no ar ( $c$ ) e absorção sonora do ar ( $m$ ) em cada medição.

Um ensaio, considerando apenas as medições de tempo de reverberação sem as amostras, ou seja, com a mesa vazia parada e girando, teve duração de aproximadamente 2 horas.

No que se refere ao tempo de reverberação utilizado para o cálculo dos coeficientes, foi avaliado dentro da faixa de decaimento de 5 dB a 35 dB, ou seja,  $T_{30}$ . Após as medições, foram calculadas as respostas impulsivas e, a partir delas, os tempos de reverberação foram determinados para cada uma das medições e para cada posição da fonte e de receptor. Para a medição com a mesa parada, foram realizadas 3 medições para cada posição da fonte em 6 microfones, totalizando 36 medições. Com a mesa girando foram feitas 72 posições para 6 receptores e duas posições da fonte, totalizando 864. No total, foram gravados 900 sinais para a medição realizada antes da colocação das amostras.

Após as medições realizadas com a mesa sem amostras, procedeu-se à colocação das amostras, visto na Figura 38.

Figura 38 – Ensaio de coeficiente de espalhamento em câmara reverberante da mesa giratória com amostras



Fonte: Autor.

Com o objetivo de avaliar o impacto do modo de instalação das amostras difusoras, inicialmente o ensaio foi conduzido com as amostras simplesmente apoiadas, ou seja, sem que elas fossem fixadas diretamente à mesa. Nesse formato de ensaio, esperava-se que as amostras apresentassem maior absorção e um coeficiente de espalhamento inferior, devido à menor rigidez e maior área de absorção resultante das frestas e espaços entre a mesa e as amostras apoiadas.

Após isso, seguindo as recomendações de instalação do fabricante, as amostras foram ensaiadas coladas à mesa, com uma configuração mais rígida. Esperava-se que, em contraste com a medição anterior das amostras descoladas, elas apresentassem resultados melhores de espalhamento.

É importante destacar que se esperava obter resultados de espalhamento mais eficientes em altas frequências para ambas as configurações de instalação, uma vez que as dimensões dos sulcos dos difusores estão mais alinhadas com essas frequências do que com as baixas.

## 4 RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos a partir das medições realizadas em câmara reverberante, tanto em escala reduzida 1:5 quanto em tamanho real, conforme descrito na seção de metodologia. O objetivo de ambas as medições foi avaliar o parâmetro do coeficiente de espalhamento em campo difuso. No entanto, é importante ressaltar que foram consideradas amostras diferentes para cada caso, bem como houve diferenças em alguns aspectos da metodologia.

Embora ambas as medições tenham se baseado na norma 17497-1, foram testados números diferentes de microfones e aplicados métodos distintos de rotação da mesa. Além disso, para a medição em escala real, também buscou-se avaliar a qualidade do ensaio, uma vez que o aparato utilizado, a mesa giratória, foi construída especificamente para este trabalho e não havia sido previamente testada.

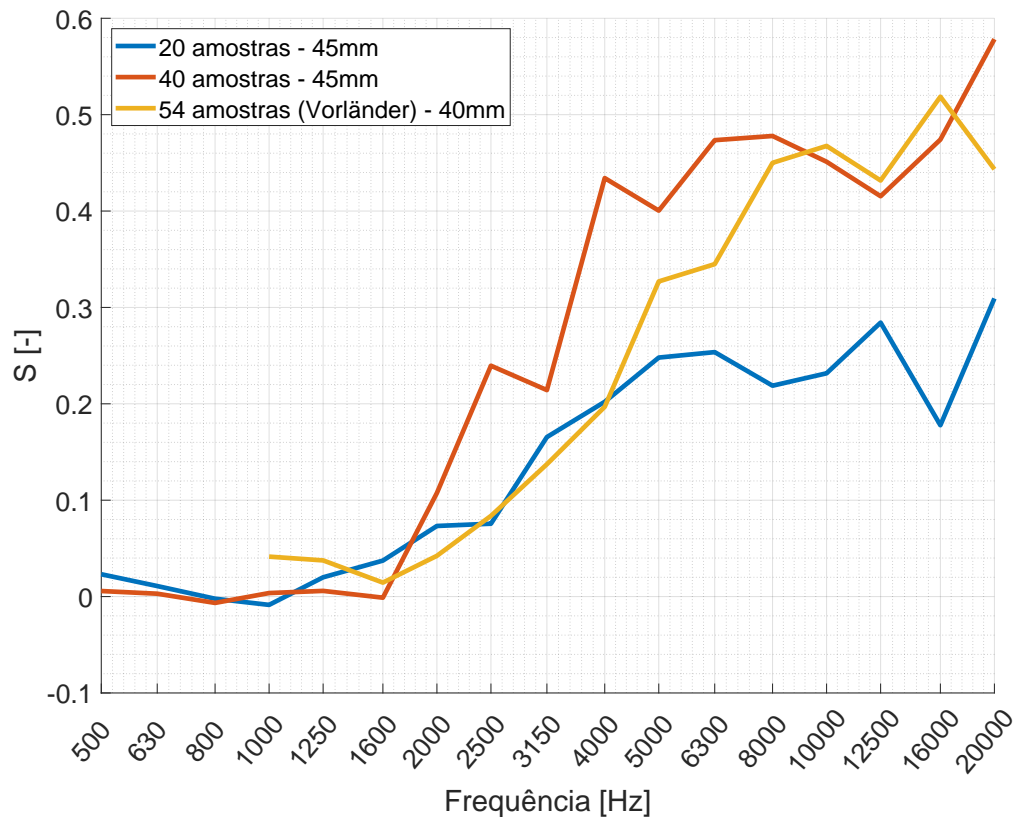
Dito isso, inicialmente serão apresentados e discutidos os resultados das medições realizadas em escala reduzida. Posteriormente, os resultados obtidos nas medições em escala real.

### 4.1 RESULTADOS - MEDIÇÃO EM ESCALA 1:5

Conforme dito anteriormente, foram realizados dois ensaios e os resultados obtidos serão apresentados em primeiro e segundo experimento, inicialmente, e após algumas análises e comparações entre eles. Algumas comparações serão feitas também entre os resultados do trabalho de Michael Vorländer e Eckard Mommertz (VORLÄNDER; MOMMERTZ, 2000) e o presente trabalho.

Primeiramente, foi feita uma análise da câmara como estava, para avaliar a coerência dos dados obtidos. A Figura 39 mostra as curvas medidas para o coeficiente de espalhamento com as amostras de 45 mm de diâmetro para a configuração com 20 e 40 amostras, em contraste com o obtido por Vorländer e Mommertz (VORLÄNDER; MOMMERTZ, 2000).

Figura 39 – Comparação entre os coeficientes de espalhamento com 20 e 40 amostras e valores de referência obtido por Vorländer (VORLÄNDER; MOMMERTZ, 2000)

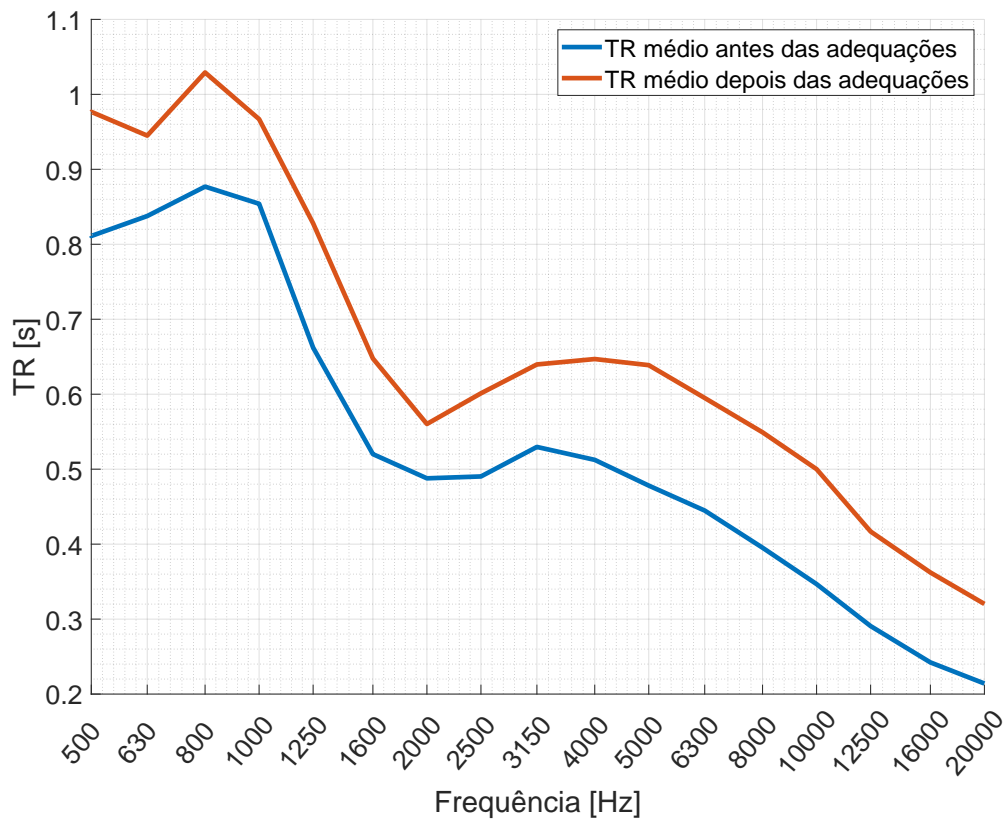


Fonte: Autor.

Para esse resultado, esperava-se que o espalhamento obtido para a medição com 40 amostras fosse superior em relação ao espalhamento medido para 20 amostras, o que pôde-se ser constatado através do gráfico da Figura 39. Além dessa análise, também pôde-se comparar com os valores obtidos por Vorländer, que, por sua vez, realizou a medição com 54 amostras semiesféricas de 40 mm de diâmetro. O resultado esperado nesse caso, era que o obtido para 54 amostras fosse superior ao medido para 40 e 20 amostras. Porém, pelo fato de as amostras possuírem um diâmetro menor, a tendência é que a curva seja deslocada para obter um coeficiente de espalhamento maior em mais altas frequências. Esse fenômeno pôde ser observado também nas curvas da Figura 39, mostrando que a câmara já apresentava uma respostas coerente antes das adequações.

Após às adequações, além dos coeficientes de espalhamento, analisou-se os tempos de reverberação médios para todas as posições medidas. A Figura 40 mostra os tempos de reverberação medidos antes e depois das adequações em terço de oitava. A adequação que tem maior influencia nesse parâmetro é o envernizamento da câmara, já que, com isso, as paredes internas tornam-se mais reflexivas, com menor absorção, aumentando o tempo de reverberação.

Figura 40 – Comparação entre os tempos de reverberação antes e depois das adequações



Fonte: Autor.

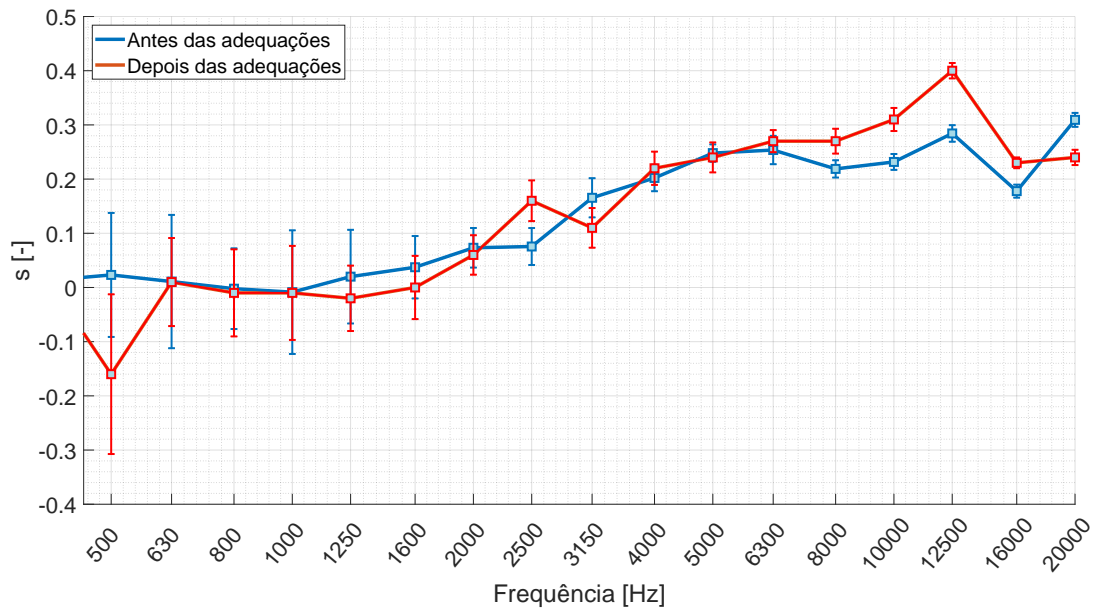
Conforme demonstrado nas curvas da Figura 40, a adequação do fechamento dos poros do MDF com verniz foi satisfatória e alcançou o objetivo de aumentar o tempo de reverberação. Observa-se também um comportamento semelhante entre as duas curvas ao analisar as frequências, indicando a coerência entre os ensaios.

No entanto, é importante notar uma queda no tempo de reverberação a partir de 1000 Hz até a frequência de 2000 Hz, seguida por um aumento na curva. Esse fenômeno pode ser resultado de algum vazamento na vedação da câmara em escala reduzida, permitindo a fuga de som nessas frequências. Esse é um aspecto relevante que deve ser considerado, pois não foi abordado nas melhorias da câmara.

O ponto mais provável de vazamento sonoro interno é a base giratória, que está acoplada ao chão da câmara e não possui uma vedação adequada. Enquanto a porta da câmara conta com uma vedação de borracha que é pressionada ao fechá-la, eliminando possíveis frestas.

Comparando, agora, os resultados obtidos para coeficiente de espalhamento antes e depois das adequações realizadas, nota-se, que as curvas apresentadas na Figura 41 possuem comportamentos semelhantes.

Figura 41 – Comparação entre os coeficientes de espalhamento antes e depois das adequações e desvios



Fonte: Autor.

Além das curvas, foram calculados e representados no gráfico os desvios para cada frequência das medições antes e depois das adequações. Esperava-se que os desvios calculados para as medições após as adequações fossem menores, visando melhorar a dispersão dos dados com o aumento dos pontos de medição. No entanto, ao analisar os desvios obtidos para as medições, os resultados ainda não foram conclusivos em relação à maior homogeneidade do campo e à menor dispersão dos dados.

A maioria das frequências não apresentou diferença significativa nos desvios após as adequações, embora tenham sido observados alguns pontos críticos em que o desvio para as medições após as adequações foi maior do que nas medições realizadas antes, como no caso de 500 Hz. Os motivos para esse resultado devem ser melhor investigados, uma vez que existem trabalhos embasando a eficiência das adequações propostas.

É comum observar desvios maiores em baixas frequências em medições realizadas em campos difusos, e isso também se repetiria em escala. Alguns possíveis fatores que contribuíram para os resultados obtidos podem ser a necessidade de aumentar o número de pontos de medição, melhorar a diretividade da fonte nessas frequências específicas ou até mesmo verificar a homogeneidade do campo difuso formado na câmara.

A homogeneidade pode ser percebida no gráfico acima de 2000 Hz. Isso pode ser atribuído à frequência de Schroeder da câmara em escala, que é de 1443 Hz. Acima dessa frequência, ocorre o fenômeno da sobreposição dos modos, resultando em uma maior homogeneidade do campo. No entanto, em frequências abaixo da frequência de Schroeder, o campo não pode ser considerado difuso, devido à baixa densidade modal.

Nesses casos, é possível identificar modos acústicos individuais e esparsos no espaço e na frequência, em vez de uma distribuição homogênea de energia.

## 4.2 RESULTADOS - MEDIÇÃO EM ESCALA 1:1 (TAMANHO REAL)

Para realizar as medições em escala real, foi necessário desenvolver o aparato específico para o ensaio, a mesa giratória. Portanto, é importante realizar uma avaliação inicial desse aparato antes de apresentar os resultados obtidos nas medições das amostras difusoras testadas.

Assim, primeiramente serão discutidos os resultados obtidos para a mesa giratória, uma vez que, um dos principais enfoques deste trabalho foi a montagem de um ensaio para medição de coeficiente de espalhamento em campo difuso em escala real. Após serão avaliados os resultados obtidos para as medições das amostras difusoras testadas.

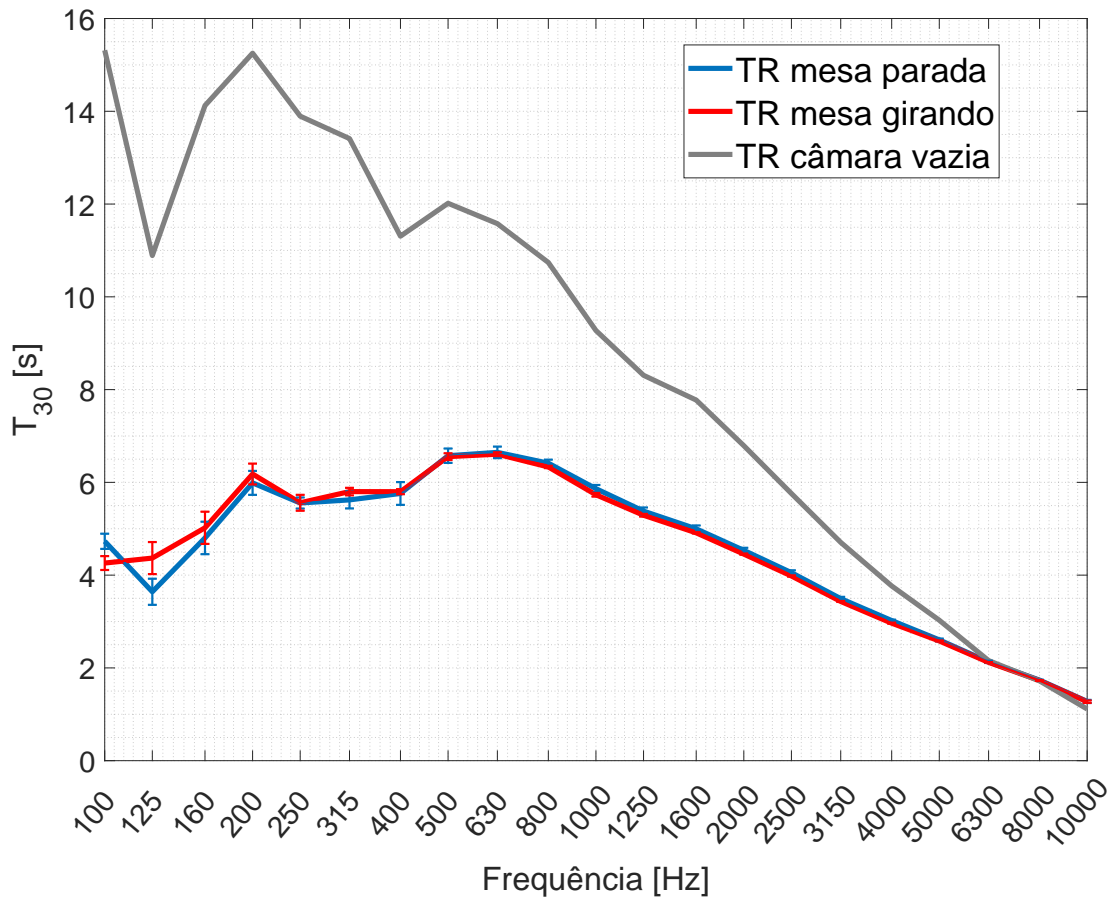
### 4.2.1 Avaliação da mesa giratória

Para iniciar essa avaliação, serão apresentados os resultados obtidos da mesa giratória, discutindo eventuais erros e possíveis melhorias atribuídas a ela. Além disso, faremos uma comparação desses resultados com as exigências estabelecidas pela norma para a aceitabilidade da mesa giratória, bem como com outros estudos similares.

Essa abordagem permitirá uma compreensão mais completa dos resultados, analisando tanto o desempenho do aparato experimental quanto a validade dos coeficientes de espalhamento obtidos. A comparação com a norma e outros trabalhos relacionados proporcionará uma base de referência para avaliar a qualidade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

O gráfico apresentado na Figura 42 ilustra os tempos de reverberação medidos antes e após a instalação da mesa giratória na câmara reverberante por meio da ISO 354. Além disso, foram comparados os tempos de reverberação nos casos em que a mesa estava girando e parada.

Figura 42 – Comparação do Tempo de Reverberação para as diferentes situações da mesa e com a câmara vazia



Fonte: Autor.

Observa-se que a montagem da mesa giratória resultou em uma considerável redução no tempo de reverberação da câmara, evidenciando a alta absorção sonora proporcionada pela mesa. No entanto, é relevante notar que os tempos de reverberação obtidos para a mesa girando e parada apresentam curvas bastante próximas, o que é desejado. Idealmente, os tempos de reverberação para a mesa girando e parada devem ser iguais. Assim, essa proximidade indica que, que a mesa possui poucas irregularidades e está relativamente bem nivelada, demonstrando a qualidade da mesa em termos de regularidade.

Ao analisar as frequências mais afetadas por essa absorção, nota-se uma maior atenuação nas baixas e médias frequências, enquanto há uma maior proximidade nos tempos de reverberação medidos nas altas frequências. A partir de 6300 Hz, observa-se uma convergência das três curvas, indicando a baixa absorção da mesa nessas frequências.

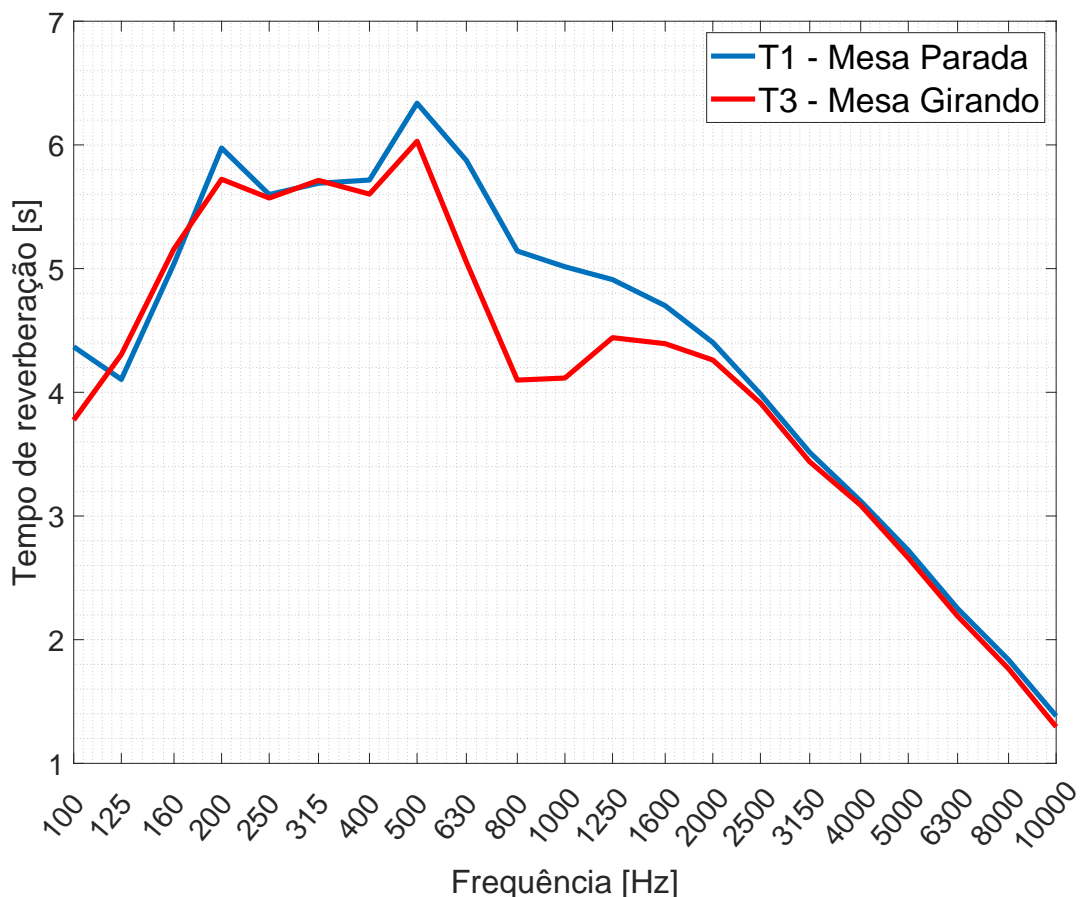
Além disso, é interessante observar que as curvas com a presença da mesa e a curva sem a mesa apresentam comportamentos semelhantes, porém com a mesa há uma atenuação mais pronunciada. Por exemplo, verifica-se uma queda em 125 Hz, enquanto um pico mais proeminente é observado em 200 Hz em todas as curvas. É importante res-



saltar que a norma não indica valores mínimos de coeficiente de absorção para a mesa giratória, mas especifica a necessidade de utilização de um material rígido, como a madeira, por exemplo.

Após obter os tempos de reverberação para cada caso, foi possível calcular o coeficiente de espalhamento da mesa giratória e compará-lo com os valores estabelecidos pela norma. É importante ressaltar que os cálculos para obtenção dos tempos de reverberação a partir de agora foram realizados com base no princípio descrito na Seção 2.4, especificado pela norma ISO 17497-1, que consiste em somar as respostas impulsivas para obter a parte da energia refletida de forma especular. Isso difere do cálculo utilizando a norma ISO 354, onde os tempos de reverberação foram obtidos por meio da média dos tempos de reverberação para cada resposta impulsiva. Dessa forma, os tempos de reverberação calculados para a mesa girando e parada podem ser vistos no gráfico da Figura 43.

Figura 43 – Comparação dos Tempos de Reverberação com da mesa giratória parada e girando



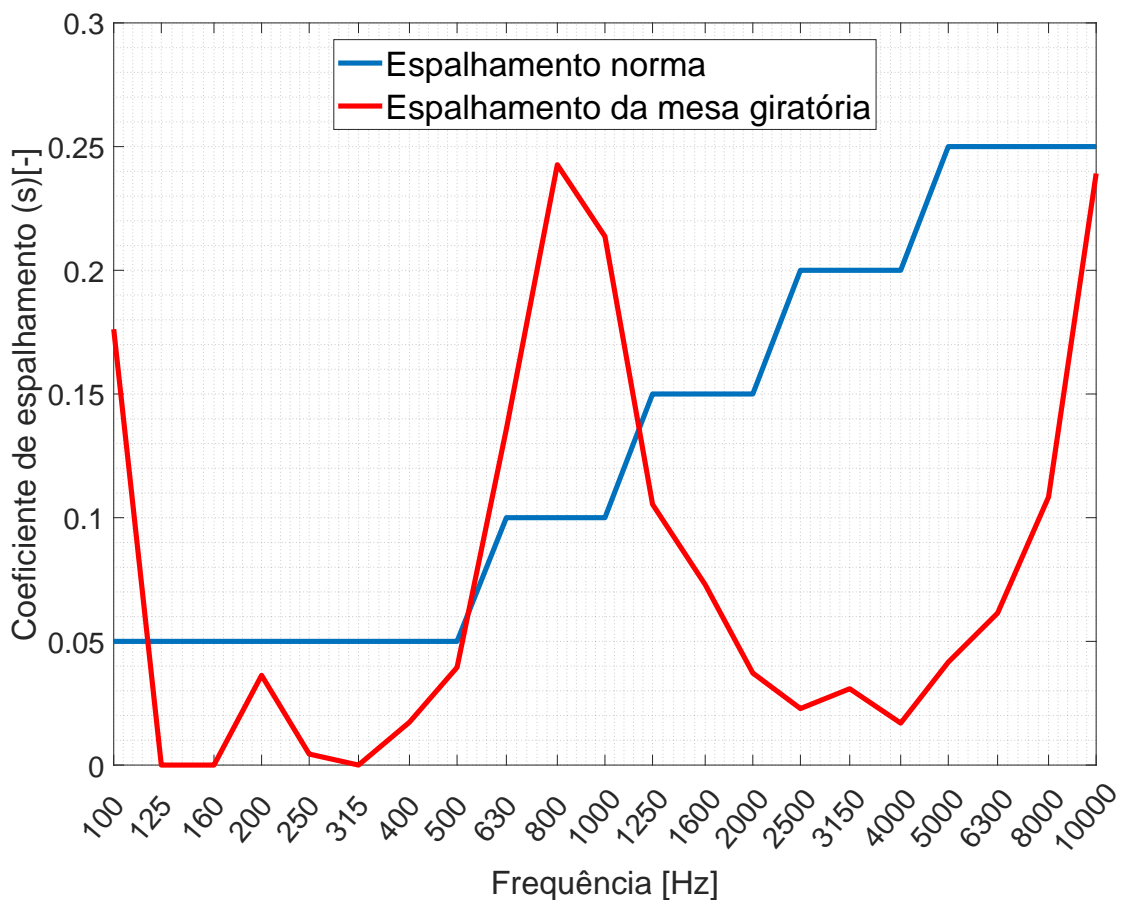
Fonte: Autor.

Conforme mencionado, idealmente  $T_1$  e  $T_3$  deveriam ser iguais. No entanto, como observado no gráfico, há discrepâncias entre eles em diversas bandas de frequência, especialmente nas faixas entre 500 Hz e 1600 Hz, e ainda mais acentuada na banda de

800 Hz. Segundo o cálculo do espalhamento para a mesa, quando  $T_1$  e  $T_3$  são iguais, o espalhamento é nulo. Por outro lado, quando  $T_3$  é menor que  $T_1$ , absorção com a mesa girando é maior que com a mesa parada, ocorrem espalhamentos mais altos, proporcionalmente à diferença entre eles. Em outras palavras, quanto maior a diferença, mais elevado será o espalhamento.

De acordo com a norma, espera-se que o coeficiente de espalhamento medido para a mesa, sem a presença de amostras, esteja abaixo dos valores indicados. Esses resultados podem ser observados no gráfico da Figura 44.

Figura 44 – Coeficiente de espalhamento da mesa giratória



Fonte: Autor.

Após analisar os valores do coeficiente de espalhamento obtidos para a mesa, observou-se que, em grande parte das bandas analisadas, eles estão abaixo dos valores indicados pela norma. No entanto, chama-se atenção para resultados acima do especificado nas frequências de 100 Hz e de 500 Hz a 1600 Hz. Essa discrepância pode ser atribuída à possível absorção sintonizada da mesa, provavelmente causada pela sua estrutura e pela formação de um colchão de ar na cavidade central projetada para comportar amostras de diferentes alturas, embora esta tenha sido preenchida com lã para evitar res-

sonâncias. Além disso, as peças ocas que compõem a mesa podem estar funcionando também como ressonadores em suas cavidades, contribuindo para o efeito observado. Nesse sentido, sugere-se que alterações construtivas na mesa sejam consideradas como forma de melhorar o resultado do espalhamento nessas frequências.

Como já discutido anteriormente, é crucial notar que a absorção significativa da mesa afeta diretamente o cálculo do coeficiente de espalhamento, uma vez que esse parâmetro é determinado com base nos tempos de reverberação medidos e, conseqüentemente, nas absorções com a mesa girando e parada, conforme a Equação 2.17 apresentada previamente.

A ausência de menção à absorção da mesa na norma revela uma limitação importante. Situações como essa ilustram a influência direta que a absorção da mesa pode ter no coeficiente de espalhamento. É relevante destacar que o melhor resultado de espalhamento é alcançado quando há uma diferença significativa entre os coeficientes de absorção especular e difusa.

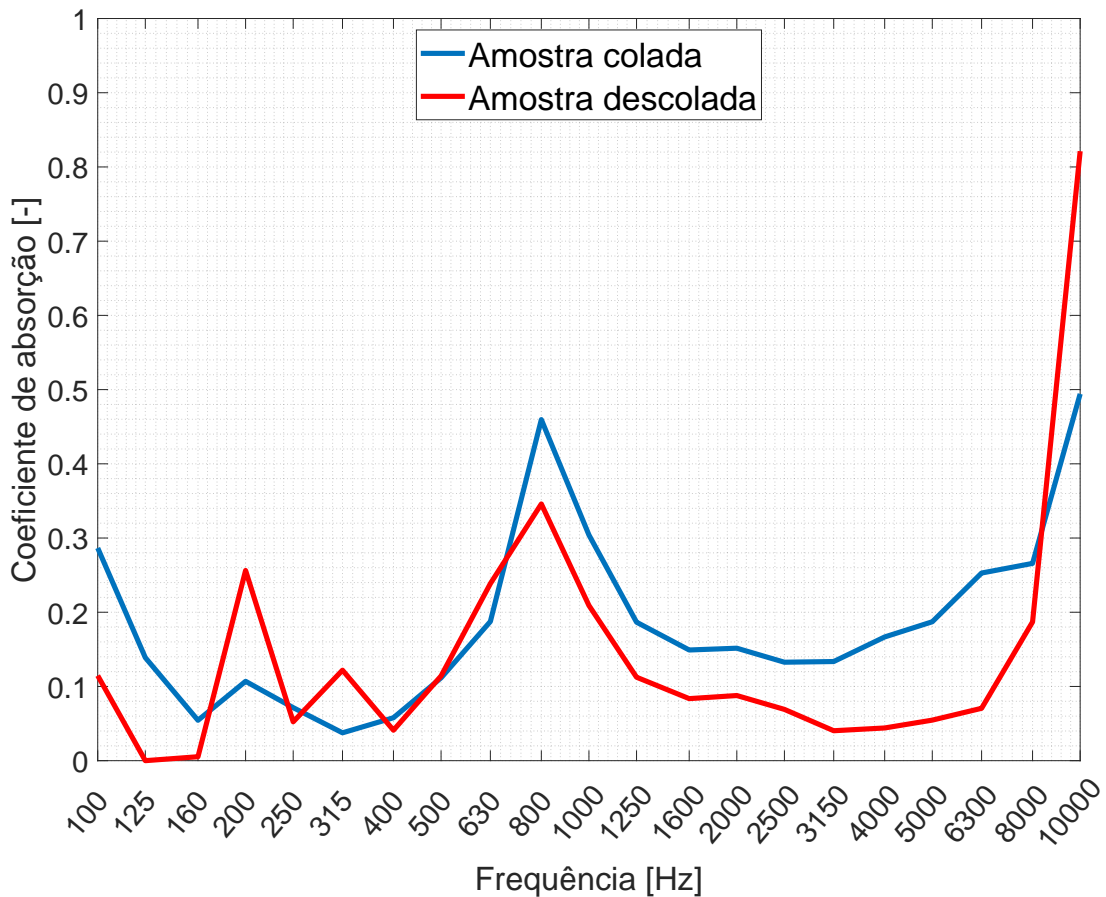
Essas considerações enfatizam a importância de levar em conta a absorção da mesa ao avaliar os resultados do coeficiente de espalhamento, reforçando a necessidade de aprimoramentos e orientações mais abrangentes na norma para abordar essa questão específica.

#### **4.2.2 Avaliação da colagem das amostras**

Após avaliar as características da mesa giratória, procedeu-se com a medição da amostra difusora detalhada na seção de metodologia. Com o objetivo de avaliar mais minuciosamente a amostra e sua forma de instalação, que é feita utilizando uma fita dupla face na superfície desejada, realizou-se a medição da amostra apenas apoiada sobre a mesa giratória e, em seguida, após a fixação da amostra na mesa com fita dupla face. Os resultados obtidos dessas medições serão discutidos a seguir.

Um aparato difusor ideal deve ser rígido e ter baixa absorção para refletir eficientemente as ondas sonoras. Portanto, foi avaliada a absorção desse material em ambas as situações. O gráfico da Figura 45 apresenta os resultados obtidos nessas condições.

Figura 45 – Comparação do coeficiente de absorção obtido nas situações com as amostras coladas e descoladas



Fonte: Autor.

Conforme observado, ambas as situações exibem comportamentos semelhantes nas curvas apresentadas em grande parte das bandas de frequência analisadas.

Um aspecto interessante a ser destacado é o pico em 800 Hz para ambos os casos, o que coincide com a faixa de espalhamento alto da mesa. Com a amostra colada, esse pico na absorção ocorre em uma frequência levemente superior à amostra não colada, como esperado, devido à fixação que evita efeitos de membrana vibrante.

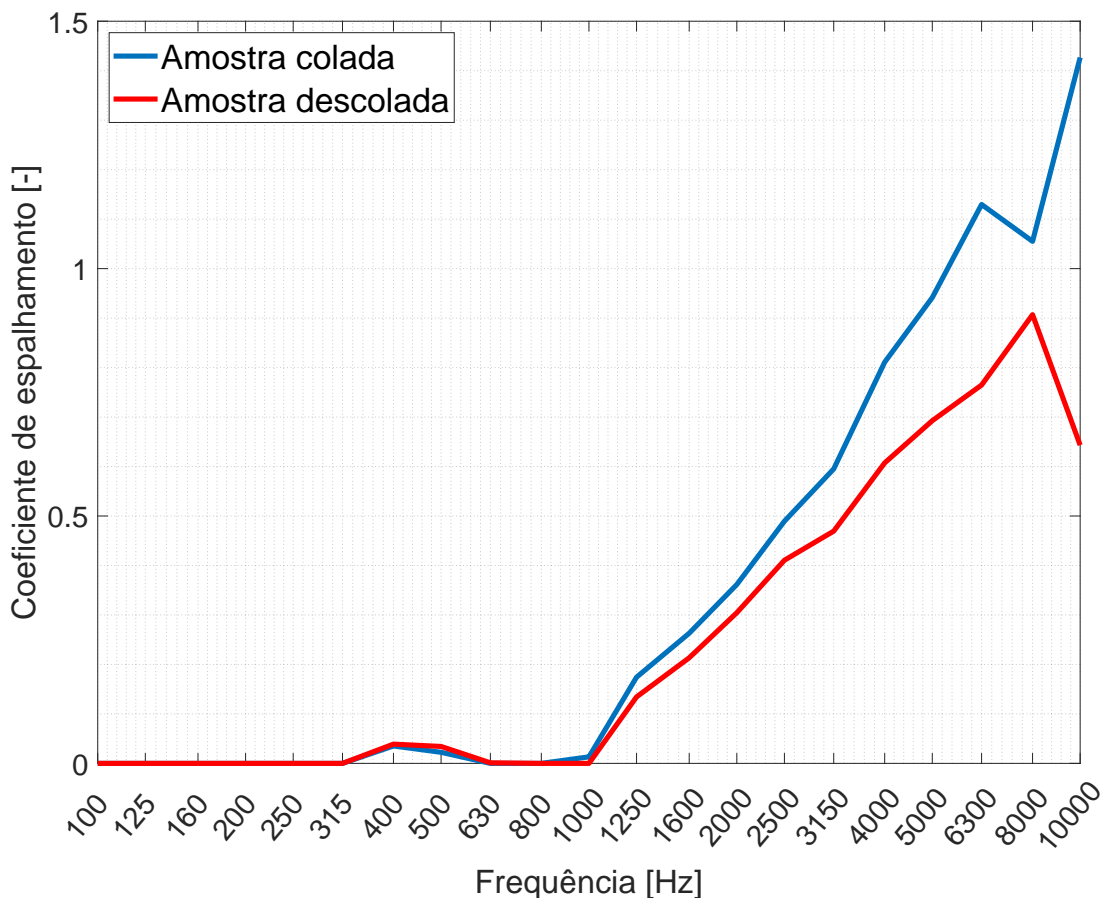
Novamente, é importante ressaltar que a norma não indica valores mínimos de coeficiente de absorção para a mesa giratória. No entanto, ela especifica que as amostras não devem ter um coeficiente de absorção maior que 0,5 e alerta que o método de medição não produzirá resultados confiáveis para amostras com alto coeficiente de absorção. Isso pode ser observado, uma vez que nenhum dos casos apresentou valores acima de 0,5, exceto para a frequência de 10000 Hz, onde ocorre uma maior absorção para a amostra não colada. Entretanto, é válido mencionar que a medição é considerada válida apenas até a frequência de 5000 Hz, conforme especificado pela norma, o que nos permite desconsiderar resultados acima dessa frequência.

Portanto, é relevante mencionar que os gráficos apresentados não refletem exclusivamente a absorção das amostras. Durante o ensaio de espalhamento, a absorção foi medida em conjunto com a mesa, ou seja, os valores consideram tanto a absorção das amostras quanto da mesa. Conseqüentemente, esses resultados não são exclusivos das amostras, pois incluem a influência da absorção da mesa, que foi previamente destacada por apresentar um alto índice de absorção quando colocada dentro da câmara.

É importante destacar também que, apesar da influência da mesa, é possível detectar os efeitos da absorção fora da direção especular, mesmo com uma mesa apresentando uma considerável absorção sonora.

Agora, ao avaliar o coeficiente de espalhamento nas situações de amostra colada e apenas apoiada, podemos observar as curvas apresentadas na Figura 47 a seguir. Assim como nas curvas de absorção, são observados valores negativos, principalmente em baixas frequências. Isso ocorre quando a absorção por incidência difusa, que considera a mesa parada, é maior do que a absorção especular, obtida com a mesa girando. Também é possível observar valores acima de 1 para a amostra colada.

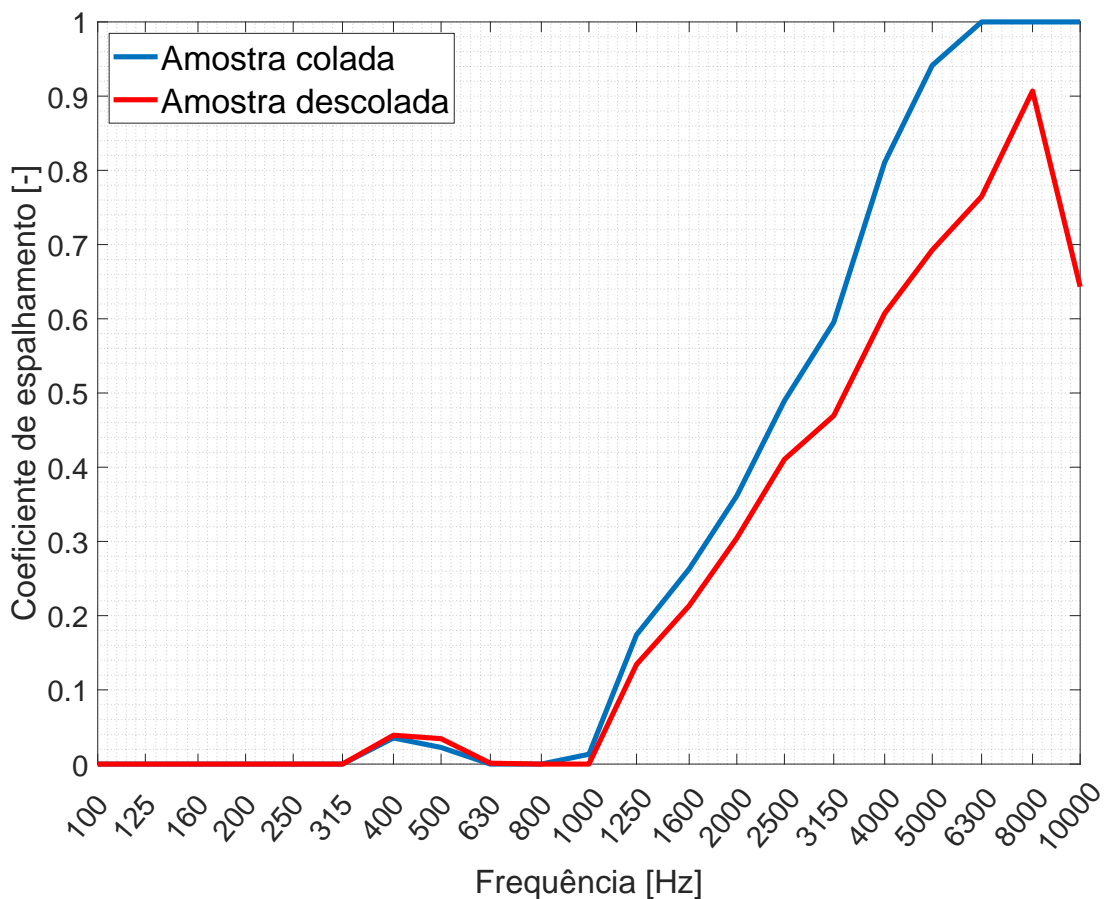
Figura 46 – Comparação do coeficiente de espalhamento obtido nas situações com as amostras coladas e descoladas



Conforme mencionado, observou-se uma ampla variação nos valores de espalhamento, incluindo muitos resultados negativos e outros significativamente acima de 1 para a amostra colada. Também é notável que a amostra colada apresentou valores mais elevados em comparação com a amostra descolada, possivelmente devido à fixação mais rígida, o que resulta em um melhor espalhamento sonoro, especialmente em frequências mais altas, a partir de 1000 Hz, enquanto praticamente não há espalhamento em baixas frequências.

De acordo com a norma, valores acima de 1 (assim como em ensaios de absorção sonora) devem ser representados limitados a 1, e valores negativos devem ser considerados como 0. Dessa forma, a Figura 47 mostra o gráfico limitado de 0 a 1 para os coeficientes de empalhamento.

Figura 47 – Comparação do coeficiente de espalhamento obtido nas situações com as amostras coladas e descoladas limitados de 0 a 1



Fonte: Autor.

Lembrando que o coeficiente de espalhamento é obtido pela relação entre os coeficientes de absorção especular e de absorção fora da região especular, para evitar discrepâncias, alguns autores sugerem o aumento de pontos de medição, entretanto, isso

poderia ser complicado para o presente trabalho devido ao espaço limitado na câmara e ao tempo necessário para os ensaios.

Ao analisar os resultados para frequências acima de 1000 Hz, é notável que a curva da amostra colada demonstra um crescimento mais acentuado em comparação com a curva da amostra descolada. Esse comportamento pode ser atribuído à maior rigidez da amostra colada, resultando em um aumento do coeficiente de espalhamento em frequências mais altas.

Além disso, era esperado que o difusor não apresentasse um bom desempenho em baixas frequências, levando em consideração a alta absorção da mesa, que poderia estar influenciando os resultados, bem como as dimensões dos sulcos das amostras, que se assemelham aos comprimentos de onda de médias e altas frequências.

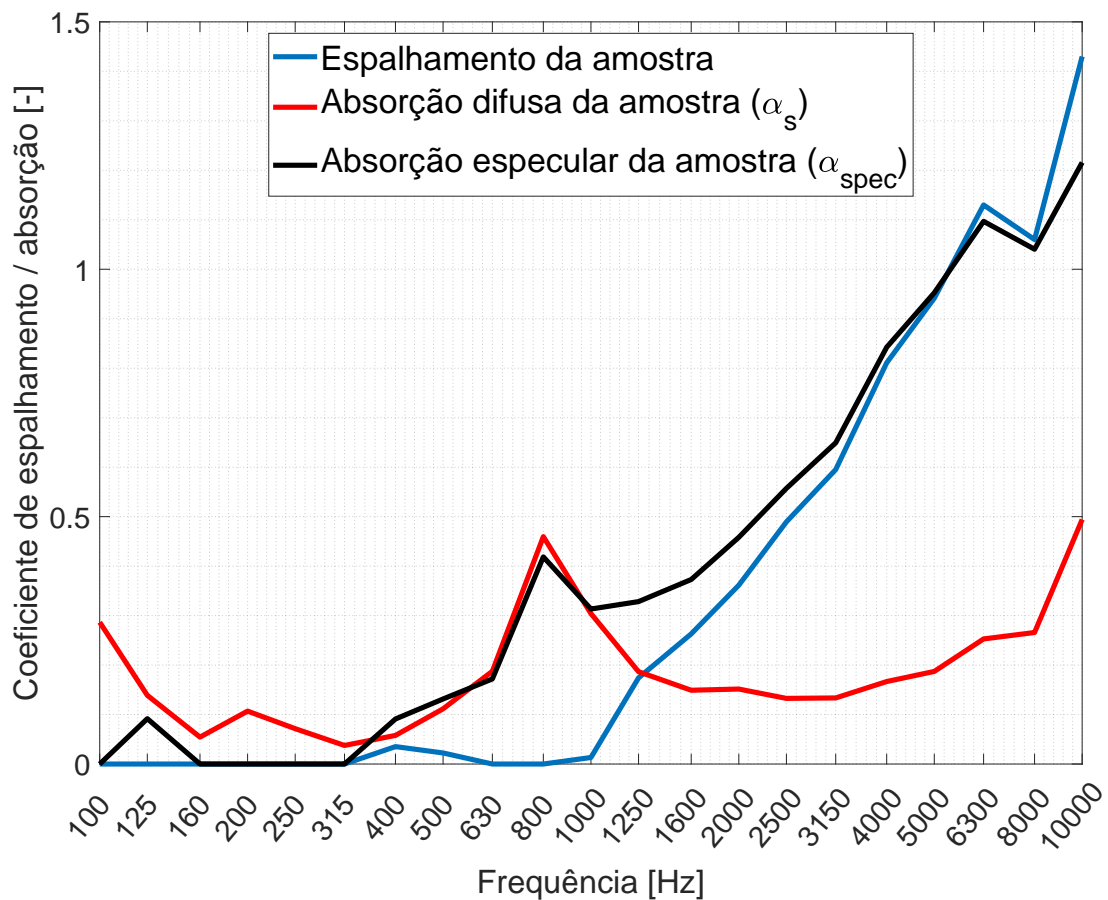
Com base na análise dos resultados obtidos, conclui-se que a amostra colada é mais adequada para avaliar o coeficiente de espalhamento. Além disso, ela apresentou um desempenho mais efetivo como difusor em altas frequências, o que é consistente com a forma de instalação recomendada pelo fabricante, ou seja, colada à mesa giratória.

Dessa forma, as medições e avaliações prosseguiram com a amostra instalada de forma colada à mesa giratória, assegurando uma melhor caracterização dos materiais difusores e uma representação mais precisa de seu comportamento acústico.

### **4.2.3 Avaliação resultados com as amostras coladas**

Por fim, foi realizada uma análise mais detalhada dos resultados referentes à amostra colada. Os valores obtidos para o coeficiente de absorção e espalhamento nessa situação estão apresentados na Figura 48.

Figura 48 – Coeficientes de espalhamento e de absorção obtidos nas situações com as amostras coladas



Fonte: Autor.

Primeiramente, é relevante notar no gráfico apresentado que tanto para a absorção difusa quanto para a absorção especular, foi observado um pico em 800 Hz, o que mais uma vez evidencia a influência da mesa nos resultados obtidos. Outro ponto interessante é que a análise das absorções e sua influência no resultado final de espalhamento é de grande importância. Quando há uma discrepância significativa entre os resultados das absorções, especialmente quando a absorção especular é consideravelmente maior que a difusa, resulta em valores mais elevados para o espalhamento, conforme descrito na Equação 2.11. Essa tendência pode ser percebida nas frequências a partir de 1000 Hz.

Por outro lado, quando ocorre uma inversão dos valores, ou seja, quando a absorção especular é maior que a difusa, resulta em valores de espalhamento negativos, como observado na frequência de 800 Hz. Quanto mais próximos esses valores estiverem, mais a curva de espalhamento tenderá a zero, indicando que não houve diferença nas reflexões para as situações com a amostra parada e girando.

Observando a curva de absorção difusa a partir de 1000 Hz, nota-se que os valores foram significativamente mais baixos em relação à curva de absorção especular, sugerindo que, ao girar a mesa, a amostra pode refletir de forma mais difusa as ondas incidentes em

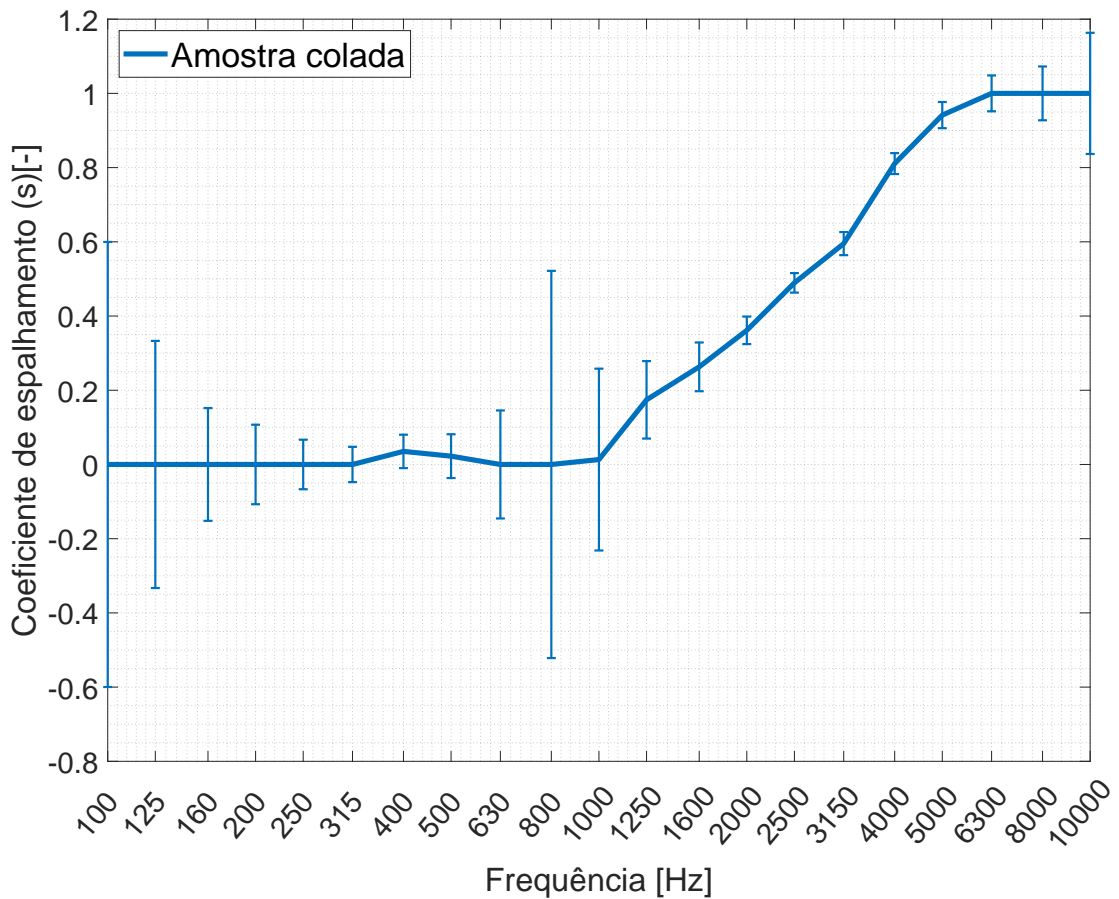


diferentes ângulos de incidência.

Essa análise ressalta a relevância de compreender a relação entre as absorções e o comportamento final de espalhamento. A partir dessas observações, podemos obter uma compreensão mais completa dos resultados e suas interpretações, permitindo uma melhor avaliação dos efeitos da mesa giratória nas medições de espalhamento.

Agora, ao analisar exclusivamente o coeficiente de espalhamento do difusor colado, calculando os desvios conforme indicado pela norma através da equação correspondente (Equação 2.16), foram obtidos os resultados representados no gráfico da Figura 49. O gráfico foi extrapolado para além de zero e um para melhor visualização da magnitude dos desvios obtidos.

Figura 49 – Coeficiente de espalhamento obtido na situação com as amostras coladas



Fonte: Autor.

O cálculo do desvio é realizado para avaliar a precisão dos dados obtidos. Observou-se que os desvios tendem a ser maiores nos resultados de baixas frequências. Isso indica uma variação mais significativa e possíveis incertezas na medição nessas faixas de frequência, que podem ser atribuídas principalmente ao campo não ser difuso para essas frequências. Considerando o tempo de reverberação médio de 4,51 segundos para a câmara com a mesa giratória, a frequência de Schroeder para essa câmara seria de apro-

ximadamente 295 Hz, indicando que abaixo dessa frequência temos uma baixa densidade modal, o que causa problemas para medições que necessitam de um campo difuso. Essa tendência pode ser observada no gráfico.

Em adição a isso, é importante destacar o altíssimo desvio em 800 Hz, o qual reforça a hipótese da influência da mesa nos resultados. Isso evidencia a necessidade de revisar e aprimorar o ensaio para reduzir essa influência nessa frequência de forma efetiva.

Já para os demais resultados, principalmente a partir de 1250 Hz, podemos considerar que foram satisfatórios em relação aos desvios e condizentes com todo o desenvolvimento da análise para as frequências mais altas até o momento.

Em conclusão, ao analisar os desvios obtidos, percebe-se que é fundamental estar ciente das limitações e incertezas presentes na medição do coeficiente de espalhamento. Essa consciência auxilia na interpretação adequada dos resultados e na tomada de decisões para melhorias no ensaio embasadas nos dados obtidos.

## 5 CONCLUSÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso abordou o fenômeno do coeficiente de espalhamento, incluindo a parte teórica e o processo experimental para sua medição. Para isso, foram utilizadas duas câmaras: uma em escala reduzida, fabricada anteriormente para outro trabalho, e outra em tamanho real, com uma mesa giratória projetada e construída para seguir as diretrizes da norma ISO 17491-7 e obter resultados confiáveis. Os ensaios na câmara em escala reduzida envolveram amostras de semiesferas de gesso em diversas configurações, buscando avaliar a câmara construída, propor melhorias para aumentar a difusividade do campo sonoro, o tempo de reverberação e a precisão dos resultados. Já na câmara em tamanho real, além da avaliação da mesa giratória, foram realizados ensaios com um material difusor para analisar seu comportamento em relação ao espalhamento e absorção, considerando as amostras coladas à mesa ou não.

A instrumentação para os ensaios em ambas as câmaras foi cuidadosamente montada, envolvendo microfones, fontes sonoras, placas para geração e aquisição dos sinais medidos, o cabeamento apropriado etc. Com o objetivo de avaliar a influência da quantidade de pontos de medição, foram utilizados de 4 a 6 canais simultâneos, dependendo da escala. A criação de códigos personalizados foi fundamental para a organização dos dados, especialmente na câmara em tamanho real, onde a quantidade de dados por ensaio era significativa e exigia maior pós-processamento.

O ensaio de espalhamento deve ser otimizado para minimizar o tempo de medição, evitando influências indesejadas, como variações de temperatura e umidade. Para a câmara em tamanho real, sugere-se a utilização de um sistema motorizado para rotação da mesa, garantindo precisão e consistência nas medições. O procedimento de medição envolveu respostas impulsivas para diferentes configurações, com a mesa giratória parada e em rotação.

A partir do decaimento em cada uma das quatro etapas, calculou-se o tempo de reverberação, e com as equações da norma ISO 17497-1, obteve-se os coeficientes de absorção sonora por incidência difusa e por incidência especular. A partir desses coeficientes, calculou-se o coeficiente de espalhamento, considerando os valores de temperatura e umidade para sua influência.

O coeficiente de espalhamento ainda é um campo de estudo relativamente novo, com apenas 23 anos de investigação, o que torna os experimentos a única forma de obtê-lo.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que as adequações relacionadas à absorção das paredes da câmara em escala reduzida alcançaram os objetivos esperados, resultando em um aumento satisfatório do tempo de reverberação. Também foi observado um maior desvio em baixas frequências, abaixo da frequência de Schroeder, onde o campo

não é difuso, o que impactou na precisão dos resultados de espalhamento e absorção medidos para essas frequências. No entanto, para frequências acima da frequência de Schroeder, os resultados obtidos tiveram desvios aceitáveis, considerando-os confiáveis.

Para a medição em tamanho real, foi identificada a necessidade de aperfeiçoar a absorção da mesa giratória. Sugere-se a vedação de frestas e uma investigação detalhada sobre a cavidade e suas ressonâncias, pois foram observados consideráveis resultados de absorção em baixa frequência da mesa e, em especial na banda de 800 Hz. Além da motorização no método de rotação da mesa para obtenção de resultados mais precisos e ensaios mais curtos.

Essas considerações apontam para a importância de melhorias contínuas no sistema de medição, visando aprimorar a precisão e a confiabilidade dos resultados tanto na câmara em escala reduzida quanto na câmara em tamanho real. Dessa forma, poderão ser realizados futuros estudos acústicos com maior embasamento e consistência.

Em suma, este trabalho proporcionou um aparato para análise do coeficiente de espalhamento em medições em escala real, dando abertura para novos estudos e melhorias no sistema. Também foram observados os comportamentos das curvas de espalhamento de algumas amostras pesquisadas e aprimorada a câmara em escala, proporcionando continuidade das pesquisas em espalhamento sonoro no curso de Engenharia Acústica.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Conforme mencionado, o ensaio em escala real ainda necessita de ajustes e mais avaliações quanto à influência da absorção sonora da mesa nos resultados de espalhamento obtidos. Sendo assim, é recomendado analisar as possíveis causas da absorção da mesa, como frestas e cavidade interna, a fim de melhorar o ensaio em si. Uma alternativa para aprimorar o sistema é utilizar um motor para a rotação da mesa, evitando o giro manual que, de acordo com outros trabalhos, pode resultar em menor reprodutibilidade e resultados menos confiáveis.

Além disso, outro objetivo inicial deste trabalho foi a utilização de algoritmos de otimização para projetar superfícies difusoras com base no coeficiente de espalhamento, que infelizmente não pode ser executado no tempo hábil. Esse avanço permitirá criar novos dispositivos difusores de maior qualidade no que diz respeito ao espalhamento sonoro. A calibração do modelo de otimização pode ser validada e comparada com os resultados obtidos nas medições do coeficiente de espalhamento em câmara reverberante, como descrito na seção de metodologia para medição. Essas novas medições podem ser realizadas tanto na câmara reverberante em escala reduzida quanto na câmara reverberante em tamanho real, utilizando a base giratória projetada para esse trabalho.

A seguir, são elencados os objetivos específicos para o desenvolvimento de traba-

lhos futuros:

- Avaliação e aprimoramento da mesa giratória projetada em tamanho real.
- Projeto de motorização para a rotação da mesa, evitando o giro manual.
- Determinação do método de simulação para obtenção dos coeficientes de espalhamento computacionalmente.
- Elaboração de algoritmos para otimização de superfícies difusoras.
- Realização de medições do coeficiente de espalhamento para validação de painéis difusores otimizados, em ambas as câmaras reverberantes, em escala reduzida e tamanho real.

Com essas etapas, será possível aprimorar o sistema de medição, tornando-o mais eficiente e confiável, além de permitir o desenvolvimento de dispositivos difusores com melhor desempenho acústico.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16313**: Acústica – Terminologia. Rio de Janeiro, 2014.
- AVELAR, M. et al. Construção e teste de uma câmara reverberante em escala reduzida para medição do coeficiente de espalhamento sonoro. 2018.
- BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle de ruído**. [S.l.]: Editora Edgard Blücher Ltda., 2018.
- BRANDÃO, E. **Acústica de salas: projeto e modelagem**. [S.l.]: Editora Edgard Blücher Ltda., 2016.
- CAVALCANTE, I. M.; FELCHACK, V. d. M. **Medição do coeficiente de espalhamento acústico de incidência aleatória em câmara reverberante em escala reduzida**. 2016. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.
- COX, T.; D'ANTONIO, P. **Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application**. [S.l.]: Spon Press., 2004.
- DIETRICH, P. et al. Matlab toolbox for the comprehension of acoustic measurement and signal processing. In: **Fortschritte der Akustik – DAGA**. [S.l.: s.n.], 2010.
- FAHY, F. **Foundations of Engineering Acoustics**. [S.l.]: Elsevier, 2001.
- GODINHO, L. et al. Design and optimization of sound diffusers using rbf-based shapes and genetic algorithms. **Tecniacústica 2017: 48º Congreso Español de Acústica**, p. 908–917, 2017.
- IEC. **Diffuse sound field - IEC - International Electrotechnical Commission (Part: 801 Acoustics and electroacoustics)**. [S.l.], 1994. Disponível em: <<https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=801-23-31>>.
- ISO. **ISO 354 - Acoustics. Measurement of sound absorption in a reverberation room**. [S.l.], 2003.
- \_\_\_\_\_. **ISO 17497-1 - Acoustics Sound-scattering properties of surfaces Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room**. [S.l.], 2004.
- MEYER, J.; LOKKI, T. Optimization of a diffuser geometry using parametric modeling tools and finite-difference time-domain simulations. In: INSTITUTE OF ACOUSTICS. **Auditorium Acoustics**. [S.l.], 2018. p. 638–645.
- MÜLLER, S.; MASSARANI, P. Transfer-function measurement with sweeps. **Journal of the Audio Engineering Society**, Audio Engineering Society, v. 49, n. 6, p. 443–471, 2001.
- PAN, L.; ZHAO, Y.; GAO, J. Factors influencing scattering coefficient measurement accuracy in scaled reverberation room. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 159, p. 107072, 2020.

SABINE, W. C. **Collected papers on acoustics**. [S.l.]: Cambridge: Harvard University press, 1922.

SANTOS, C. dos. **Influência do espalhamento acústico na percepção auditiva de espaços: métodos e desenvolvimentos**. 2011. Tese (Doutorado) — [sn], 2011.

SCHROEDER, M. New method of measuring reverberation time. **The Journal of Acoustical Society of America**, v. 37, p. 409, 1965.

SHTREPI, L. et al. Accuracy of the random-incidence scattering coefficient measurement. **Applied Acoustics**, v. 106, p. 23–35, 2016. ISSN 0003-682X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X15003758>>.

SOUZA, G. Análise do coeficiente de espalhamento em uma minicâmara reverberante. Santa Maria, 2019.

VORLÄNDER, M.; MOMMERTZ, E. Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. **Applied Acoustics**, v. 60, n. 2, p. 187–199, 2000. ISSN 0003-682X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X99000560>>.