



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DA DIFUSÃO SONORA DE UMA CÂMARA REVERBERANTE
EM ESCALA REDUZIDA A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES
GEOMETRIAS E CONFIGURAÇÕES DE DIFUSORES SONOROS**

**KLEMILSON DE JESUS RIBEIRO DE CASTRO
WASHINGTON LUIS RAIOL DA FONSECA**

**TUCURUÍ
2019**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DA DIFUSÃO SONORA DE UMA CÂMARA REVERBERANTE EM
ESCALA REDUZIDA A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES
GEOMETRIAS E CONFIGURAÇÕES DE DIFUSORES SONOROS**

KLEMILSON DE JESUS RIBEIRO DE CASTRO

WASHINGTON LUIS RAIOL DA FONSECA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador:

Prof. Dr. Leopoldo Pacheco Bastos

TUCURUÍ

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C355a CASTRO, KLEMILSON DE JESUS RIBEIRO DE
AVALIAÇÃO DA DIFUSÃO SONORA DE UMA CÂMARA
REVERBERANTE EM ESCALA REDUZIDA A PARTIR DA
UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES GEOMETRIAS E
CONFIGURAÇÕES DE DIFUSORES SONOROS / KLEMILSON
DE JESUS RIBEIRO DE CASTRO, WASHINGTON LUIS
RAIOL DA FONSECA . — 2019.
37 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Leopoldo Pacheco Bastos
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de
Engenharia Mecânica, Campus Universitário de Tucuruí,
Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019.

1. Difusão Sonora. 2. Câmara Reverberante. 3. Campo
Sonoro Difuso. 4. Tempo de Reverberação. I. Título.

CDD 620.2



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DA DIFUSÃO SONORA DE UMA CÂMARA REVERBERANTE EM
ESCALA REDUZIDA A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES
GEOMETRIAS E CONFIGURAÇÕES DE DIFUSORES SONOROS**

KLEMILSON DE JESUS RIBEIRO DE CASTRO

WASHINGTON LUIS RAIOL DA FONSECA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

Leopoldo Pacheco Bastos

**Orientador: Prof. Dr. Leopoldo Pacheco Bastos
FEM/CAMTUC/UFPA**

Walter dos Santos Sousa

**Membro Interno: Prof. Me. Walter dos Santos Sousa
FEM/CAMTUC/UFPA**

Ayrton José Taveira de Souza

**Membro Interno: Prof. Eng. Ayrton José Taveira de Souza
FEM/CAMTUC/UFPA**

Conceito **B**

Tucuruí, 30 de outubro de 2019.

A minha mãe que sempre fez tudo que pôde para que eu chegasse até aqui, a meus filhos que me fazem feliz todos os dias e a Deus que me deu FÉ e o discernimento necessário para concluir esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

KLEMILSON DE JESUS RIBEIRO DE CASTRO

Primeiramente a Deus pelo dom da vida e por sempre me manter firme na fé com forças e saúde para chegar até o fim.

Agradeço a minha Mãe por tudo que fez por mim e meus irmãos, nos mostrando sempre qual melhor caminho a seguir.

Aos meus familiares e amigos que sempre me incentivaram e apoiaram para concluir mais essa etapa de minha vida. Em especial aos amigos e familiares de Tucuruí Jeremias, Rosa e José Claudio por sempre estarem presente comigo nessa trajetória. E também aos amigos de trabalho do Hospital Regional de Tucuruí.

Aos familiares e amigos que não estão mais presentes fisicamente neste mundo, mas que durante sua vida torceram pelo meu sucesso particularmente ao meu cunhado e amigo Vicente Coelho e minha tia Maria Aristolina.

Aos familiares de minha esposa, sobretudo a Rosangela e Nelma Carvalho, Antônio Maia e Daiane Leal, por cuidarem de meus filhos nos momentos que não pude estar junto a eles.

A todos os amigos que fiz durante a faculdade. Aos meus colegas de turma em especial aqueles que sempre faziam parte de meu círculo de estudo Fabricio Pinheiro, Naianny Matos e Valdir Santos agradeço pelo apoio, incentivo e colaboração.

A todos os professores que passaram por nós durante o curso e buscaram da melhor maneira possível dividir o conhecimento deles com nossa turma. Especificamente ao Prof. Dr. Douglas Garcia por me permitir fazer parte de sua equipe.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Leopoldo Bastos, por todo conhecimento transmitido nesse período, por sua dedicação, orientação, paciência e ajuda em nosso trabalho, pois sem ela não seria possível a conclusão do mesmo.

Ao meu grande amigo e colega de TCC Washington Fonseca, por toda ajuda, apoio e amizade durante esses anos de faculdade.

A minha esposa por me acompanhar e me apoiar durante todo esse período, e principalmente aos meus filhos que com suas existências me deram forças para chegar até aqui.

Obrigado meu Deus por cada uma dessas pessoas que o Senhor colocou em meu caminho.

A minha mãe Paula Raio Fonseca que é a pessoa mais especial para mim, que sempre me orientou e nunca deixou eu desistir do meu sonho, me estimulando e me deixando calmo mesmo com todas as dificuldades, me dando grande suporte para manter focado ao entrar nessa vida acadêmica.

AGRADECIMENTOS

WASHINGTON LUIS RAIOL DA FONSECA

Agradeço primeiramente a Deus por me permitir chegar até aqui e por deixar conhecer e conviver com todos que irei agradecer daqui para frente, para o resto da minha vida. Em especial minha família.

A Minha companheira e namorada SELMA MENDES, que não mediu esforços nesse tempo todo que abriu mão de várias coisas para me apoiar.

Dentro de sala de aula tive vários colegas, mas também fiz um grande amigo e não podia deixar de agradecer esse meu amigo (KLEMILSON CASTRO), grande parceiro dentro e fora de sala de aula e em TCC também.

Agradeço meus professores que me ajudaram em todo acúmulo de conhecimento até chegar aqui, em especial meu orientador e amigo (LEOPOLDO BASTOS), que me ajudou na compreensão de diversas matérias principalmente no aprofundamento do estudo em acústica e a todos os outros alunos orientados por ele que me ajudaram na produção deste TCC.

Por fim sou grato a todos que direta e indiretamente estiveram envolvidos, como zelador, segurança, bibliotecários, secretários, diretores, responsáveis pelos transportes, técnicos e os todos que não citei, mas que contribuíram com essa conquista.

A formação em engenharia sempre foi um sonho desde novo, quando percebi que a amava, comecei a descobrir quais os motivos dos defeitos das coisas e sempre procurava solucionar e reparar. Fez-me sentir os desejos de descobrir como foi feito e projetado e porque foi feito assim. Entendi que só estudando profundamente a engenharia mecânica das coisas, poderia explicar-me a fundo minhas dúvidas.

(Washington Luís Fonseca)

Nenhuma engenharia constrói caráter, mas com caráter se faz os melhores engenheiros.

(Jordan Lucas)

RESUMO

AVALIAÇÃO DA DIFUSÃO SONORA DE UMA CÂMARA REVERBERANTE EM ESCALA REDUZIDA A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES GEOMETRIAS E CONFIGURAÇÕES DE DIFUSORES SONOROS

RESUMO: A formação de campo sonoro suficientemente difuso é indispensável à determinação de importantes parâmetros acústicos em câmaras reverberantes, uma vez que tal condição representa uma das premissas fundamentais para validar a Equação de Sabine para o tempo de reverberação. Na prática, tal condição é alcançada normalmente com o emprego de difusores sonoros no interior das câmaras acústicas. Entretanto, determinar o grau de difusão sonora, devido à inserção dos difusores, é uma tarefa complicada pois há somente métodos indiretos para tal finalidade, isto é, a partir do cálculo de indicadores de difusão. Estudos recentes indicam que muitos dos indicadores comumente utilizados, mesmo aqueles recomendados por normas importantes, não fornecem resultados inequívocos. Adicionalmente, a difusão sonora depende de diversos fatores: (i) do ambiente (inclinação e material das paredes), (ii) dos difusores empregados (geometria, material, posição em relação à fonte, etc.), e (iii) da condição da onda sonora incidente, o que dificulta ainda mais o processo de avaliação da difusão sonora em ambientes reverberantes de forma acurada. O presente trabalho avalia a difusão sonora de diferentes tipos e geometrias de difusores (suspensos e volumétricos) sonoros, em configurações variadas, em uma câmara reverberante em escala reduzida através do indicador coeficiente de absorção sonora médio ($\alpha_{\text{méd}}$), definido conforme a norma ISO 354: 2003. O desempenho das diferentes configurações de difusores testadas é discutido em algum detalhe, no que é encontrado que o maior grau de difusão está diretamente relacionado com a maior área superficial relativa de difusores, devido ao maior espalhamento causado. Por fim, os difusores volumétricos apresentaram desempenho similar aos difusores suspensos, mas com área superficial relativa significativamente menor, indicado que este tipo de difusor é mais eficiente do que os difusores suspensos em aumentar a difusão sonora, mesmo em câmaras com pequenas dimensões.

Palavras-chave: Difusão Sonora, Câmara Reverberante, Campo Sonoro Difuso, Tempo de Reverberação.

ABSTRACT

SOUND DIFFUSION EVALUATION OF A SCALE MODEL REVERBERANT CHAMBER BY USING DIFFERENT GEOMETRIES AND CONFIGURATIONS OF SOUND DIFFUSERS

ABSTRACT: The formation of sufficiently diffuse sound field is indispensable for determination of important acoustic parameters in reverberation chambers, since such condition represents one of the paramount premises for validating the Sabine Equation for reverberation time. In practice such a condition is usually achieved by the use of sound diffusers inside the acoustic chambers. However, determining the degree of sound diffusion, due to the insertion of diffusers, is a complex task because there are only indirect methods for this purpose, i. e., from the calculation of diffusion indicators. Recent studies indicate that many of the commonly used indicators, even those ones recommended by important standards, do not provide unambiguous results. Additionally, the sound diffusion depends on several factors: (i) the environment (inclination and material of the walls), (ii) the diffusers employed (geometry, material, position relative to the source, etc.), and (iii) the condition incident sound wave, which makes the process of evaluating accurately sound diffusion in reverberant environments even more difficult. The present work evaluates the sound diffusion of different types and geometries of sound (suspended and volumetric) diffusers, in varied configurations, in a scale model reverberant chamber by means of sound absorption coefficient indicator ($\alpha_{méd}$), defined according to ISO 354: 2003. The performance of the different diffuser configurations tested is discussed in some detail, as it is found that the highest degree of diffusion is directly related to the largest relative surface area of diffusers, due to the greatest scattering. Finally, volumetric diffusers presented similar performance to hanging diffusers, but with significantly smaller relative surface area, indicating this type of diffuser is more efficient in increasing the sound diffusion than hanging ones, even in small cameras.

Keywords: Sound Diffusion, Reverberation Chamber, Diffuse Sound Field, Reverberation Time.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1. Desenho técnico dos difusores suspensos em forma de (a) seção circular e (b) onda.....**Erro! Indicador não definido.**2
- Figura 2. Desenho técnico dos difusores volumétricos tipo: (a) semicilíndrico e (b) piramidal**Erro! Indicador não definido.**2
- Figura 3. Câmara reverberante em escala reduzida do Laboratório de Acústica do CAMTUC**Erro! Indicador não definido.**3
- Figura 4. Amostra de referência (painéis de fibra de sisal) utilizada para a avaliar a difusão sonora promovida por diferentes configurações de difusores empregados na câmara reverberante do CAMTUC 24
- Figura 5. Equipamentos utilizados durante as medições na câmara reverberante do CAMTUC 24
- Figura 6. Esquema da disposição dos difusores (suspensos e volumétricos) no interior da câmara reverberante do Laboratório de Acústica do CAMTUC 27
- Figura 7. Imagem dos difusores durante os testes realizados..... 28
- Figura 8. Comparação dos tempos de reverberação com e sem difusores no interior da câmara 28
- Figura 9. Desempenho das diferentes configurações de difusores, em termos do coeficiente de absorção sonora médio, $\alpha_{méd}$ em função da área superficial relativa 30
- Figura 10. Comparação dos valores de α obtidos na câmara reverberante do CAMTUC, para diferentes configurações de difusores, e na câmara normatizada da UFSM para painéis de sisal 31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características das Configurações de Difusores Testadas	27
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição
A	Absorção Sonora (Sabines)
A_a	Absorção Sonora da Amostra (Sabines)
c	Velocidade do Som (m/s)
S_a	Área Superficial da Amostra (m ²)
\bar{t}_1	Tempo de Reverberação Médio da Câmara Sem Amostra (s)
\bar{t}_2	Tempo de Reverberação Médio da Câmara Com Amostra (s)
T	Temperatura (°C)
T_{60}	Tempo de Reverberação (s)
V	Volume (m ³)
α	Coefficiente de Absorção Sonora
$\alpha_{méd}$	Coefficiente de Absorção Sonora Médio
λ	Comprimento de Onda (m)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO	15
1.2. OBJETIVOS	15
1.2.1. Objetivos gerais	15
1.2.2. Objetivos específicos	15
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1. SELEÇÃO DOS DIFUSORES.....	21
4.2. CÂMARA REVERBERANTE EM ESCALA REDUZIDA DO CAMTUC	22
4.3. PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO	22
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	26
6. CONCLUSÕES E SUGESTOES	32
REFERÊNCIAS	33

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da absorção sonora de materiais de construção típicos é indispensável para todas as atividades relacionadas ao projeto acústico de ambientes, tais como: (i) para prever o tempo de reverberação, (ii) simular acusticamente ambientes virtuais, entre outras (KUTTRUF, 2006). O projeto acústico de um ambiente normalmente é elaborado com base nos dados de coeficiente de absorção sonora (α) das várias superfícies que o delimitam (TORRES, 2015). Estes dados são geralmente obtidos em câmara reverberante para incidência sonora aleatória, onde a condição da amostra sob teste, é a que mais se aproxima da condição real de uso do material em ambientes internos. Isto é, nestes ambientes as reflexões das superfícies (paredes, teto e piso) e objetos tendem a tornar aleatória, a incidência do som (ARAÚJO, 2002).

O método padronizado para obtenção do coeficiente de absorção sonora, α , considerando incidência sonora aleatória (ISO 354, 2003) baseia-se na Equação de Sabine¹ e está condicionado ao atendimento de algumas hipóteses simplificadoras, especialmente a de que o campo sonoro do ambiente de teste seja completamente difuso, o que é inalcançável na prática (COX; D'ANTONIO, 2017). Em vez disso, muitas câmaras reverberantes são ditas cumprirem satisfatoriamente com este requisito quando apresentam um campo sonoro suficientemente difuso, o que é alcançado com o uso de difusores sonoros (BRADLEY et al., 2013; LAUTENBACH, 2013). O atendimento deste requisito é de extrema importância para a obtenção de dados acurados pois quando não atendido leva a valores subestimados de coeficiente de absorção sonora e então, a projetos acústicos mal elaborados (TORRES, 2015).

Adicionalmente, quando o mesmo material é avaliado em diferentes laboratórios, as discrepâncias entre os resultados obtidos são creditadas grandemente aos diferentes graus de difusão sonora dos ambientes de teste (TORRES, 2015), indicando que estes devem apresentar difusão sonora tão grande quanto possível de modo a minimizar essas discrepâncias.

Devido à impossibilidade de avaliar a difusão de campos sonoros em câmaras reverberantes utilizando medições objetivas, frequentemente recorre-se a métodos indiretos para quantificar o grau de difusão destes campos sonoros (HASAN; HODGSON, 2016). Embora existam variados indicadores de difusão, tais como (i) uniformidade espacial dos tempos de reverberação, (ii) desvio padrão das curvas de decaimento, (iii) fator de difusão, (iv) α_{med} , entre outros (LAUTENBACH; VERCAMMEN, 2010; ISO 354, 2003;

¹ Equação que estabelece o tempo de reverberação de uma sala em função do seu volume e absorção sonora (em Sabines) de suas superfícies internas.

LAUTENBACH et al., 2013; HASAN; HODGSON, 2016), todos apresentam alguma limitação, o que dificulta a determinação do grau de difusão sonora de uma câmara reverberante de forma precisa (BRADLEY et al., 2014).

1.1. MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO

Alcançar um campo sonoro difuso em uma câmara reverberante é extremamente importante para a determinação de parâmetros acústicos tais como coeficiente de absorção sonora, coeficiente de espalhamento sonoro e nível de potência sonora (BRADLEY et al., 2013). Para isto, a instalação de elementos difusores no interior da câmara é essencial. Em contrapartida, determinar o grau de difusão sonora de uma câmara reverberante, em razão do uso de difusores, pode ser uma tarefa complexa devido à falta de bons indicadores de difusão. O presente trabalho considera avaliar a influência de diferentes geometrias de difusores (suspensos e volumétricos) sonoros, em configurações variadas, sobre a difusão sonora de uma câmara reverberante em escala reduzida através do qualificador normativo, coeficiente de absorção sonora médio ($\alpha_{méd}$), definido conforme a norma ISO 354:2003. Neste sentido, o desempenho de difusores suspensos e volumétricos será avaliado a partir de diferentes configurações, sendo mantida no interior da câmara para a realização de experimentos futuros, aquela configuração que proporcionar o maior grau de difusão sonora.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é avaliar a difusão sonora de uma câmara reverberante em escala reduzida através do uso de diferentes difusores em diversas configurações, com base no coeficiente de absorção sonora ($\alpha_{méd}$), definido pela ISO 354:2003.

1.2.2. Objetivos específicos

- Projetar os modelos de difusores a serem investigados com base na faixa de frequência de interesse;
- Avaliar a difusão sonora dos difusores fabricados em câmara reverberante em escala reduzida;
- Identificar as geometrias e configurações de difusores com maior desempenho;
- Comparar as propriedades de absorção sonora de uma amostra de referência obtidas a partir do emprego das configurações de difusores com maior desempenho.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, distribuídos da seguinte forma:

- No capítulo 1, o tema do presente trabalho é introduzido juntamente com a especificação do problema. Na sequência, a motivação para seu desenvolvimento é apresentada bem como os objetivos e estrutura do trabalho.
- O capítulo 2 fornece uma revisão da literatura a respeito de difusores sonoros e indicadores de difusão. Adicionalmente, é apresentada a fundamentação teórica relacionada à difusão sonora e as equações descrevendo os indicadores que serão abordados no presente trabalho.
- No capítulo 3, é apresentada a metodologia empregada para avaliar a difusão sonora da câmara bem como a instrumentação utilizada nos testes.
- No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos considerando diferentes combinações de difusores, utilizando-se aquela de mel. Uma discussão detalhada a respeito dos principais resultados obtidos encerra esta sessão.
- O capítulo 5 sumariza as considerações finais da pesquisa com base nos objetivos propostos e indica possibilidades para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Para alcançar um grau satisfatório de difusão sonora em câmaras reverberantes, algumas práticas podem ser adotadas, tais como a construção de câmaras com paredes não-paralelas e/ou não-planas, porém a mais comum envolve a utilização de difusores sonoros (LAUTENBACH et al., 2013). Complementarmente, a utilização de indicadores de difusão sonora é crucial para (i) garantir que o ambiente de teste seja apropriado à obtenção de dados de boa qualidade; (ii) minimizar os erros associados às medições; e (iii) melhorar a reprodutibilidade entre dados obtidos para o mesmo material em diferentes laboratórios

Em uma câmara reverberante sem difusores sonoros, especialmente em baixas frequências, modos de onda estacionária tornam a densidade de energia não uniforme. A utilização de difusores sonoros nas trajetórias de propagação modal cria modos adicionais, tornando o campo sonoro mais uniforme espacialmente e em frequência (COX; D'ANTONIO, 2017). Em médias frequências, problemas ocorrem em medições de absorção em razão da amostra ser colocada sobre o piso, enquanto que as paredes e teto são altamente refletoras. Sem difusores, há trajetórias de propagação horizontais que não interagem com a amostra sobre o piso e então o som decai mais lentamente, levando a valores subestimados do coeficiente de absorção sonora. A utilização de difusores suspensos e volumétricos defletem o som proveniente de trajetórias fortemente horizontais e verticais, resultando em um aumento significativo da difusão sonora, minimizando os erros associados à posição da amostra no interior da câmara (COX; D'ANTONIO, 2017).

Naturalmente, estes difusores devem cumprir com critérios normativos específicos, relacionados à geometria, dimensões, material, etc. para promoverem aumento expressivo na difusão sonora (ISO 354, 2003). Os difusores devem: (i) ser elementos delgados, levemente curvados e aleatoriamente instalados no interior da câmara; (ii) apresentar baixa absorção sonora; (iii) apresentar densidade superficial de massa de pelo menos 5 kg/m^2 ; (iv) apresentar área superficial entre $0,8 \text{ m}^2$ e 3 m^2 (em um dos lados, no caso de difusores fixos) (ISO 354, 2003; COX; D'ANTONIO, 2017).

Os procedimentos e critérios técnicos supracitados foram fundamentalmente estabelecidos ao longo de várias décadas de estudos experimentais investigando o campo sonoro de câmaras reverberantes. Em seu trabalho precursor, Sabine (1922) conduziu medições do tempo de reverberação em diferentes salas acústicas e percebeu anomalias relacionadas à formação de modos acústicos estacionários no interior das salas. Para eliminar

as anomalias, foi necessária a utilização de um grande número de elementos rotativos e altamente reflexivos.

No trabalho de Volkmann (1942), foi observado que difusores volumétricos semicilíndricos em um estúdio proporcionavam melhor difusão sonora do que difusores planos tanto devido ao espalhamento causado pela geometria convexa quanto pela sua atuação de ressonância que promovia radiação sonora.

Ebbing (1971) investigou a influência de um difusor rotativo sobre o campo de pressão sonora produzido por uma fonte monopolar em diferentes salas reverberantes, encontrando que o uso do difusor reduzia as incertezas associadas à localização da fonte, pois o difusor deslocava significativamente os padrões modais em frequência.

Empregando Sequências de Máximo Comprimento (*Maximum-Length Sequences*), Schroeder (1975) encontrou uma geometria de difusor plano otimizada com cavidades de diferentes profundidades. Estes padrões de cavidade podiam ser modificados, com base no comprimento de onda (λ) da onda incidente, para melhorar a difusão sonora em outras faixas de frequência.

De Jong e Den Berg (1980) propuseram equações matemáticas que, ao serem resolvidas numericamente, forneciam geometrias de difusores de Schroeder bidimensionais com difusão sonora otimizada. Entretanto, sua fabricação, na forma original, era complexa, e uma simplificação geométrica foi proposta de modo a manter elevado o compromisso entre fabricabilidade e desempenho.

Yokota et al. (2000) avaliou diferentes geometrias de difusores em diferentes geometrias de salas e encontrou que o desempenho do difusor sonoro depende significativamente de ambas geometrias e também da condição de incidência sonora sobre suas superfícies.

Mais recentemente, Bradley et al. (2014) avaliou a difusão sonora promovida por diferentes tipos e configurações de difusores em uma câmara reverberante em escala reduzida, sugerindo ao final que a utilização de difusores suspensos em combinação com difusores volumétricos poderia fornecer difusão sonora superior quando comparada àquela fornecido por esses tipos de difusores utilizados isoladamente. Por fim, os autores relatam que a falta de um indicador de difusão sonora inequívoco

Diante do exposto acima, o presente trabalho investigará a difusão sonora promovida por difusores geométricos suspensos e volumétricos de diferentes formas e tamanhos. Este procedimento será realizado calculando-se o valor médio dos coeficientes de absorção sonora

($\alpha_{méd}$) para a faixa de 500 Hz a 5000 Hz, conforme procedimento definido pela norma ISO 354, considerando uma amostra de referência.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em acústica de salas, a difusão sonora em um ambiente está relacionada com a eficiência em que este promove espalhamento da energia sonora de forma aproximadamente uniforme. Um campo sonoro completamente difuso é aquele em que importantes propriedades acústicas apresentam o mesmo valor em qualquer local deste campo sonoro (KUTTRUFF, 2006). A importância em atender satisfatoriamente esta condição reside no fato de que a Equação de Sabine para o tempo de reverberação, conforme descrita na Eq. 1, é válida para campos sonoros completamente difusos (KINSLER, 2000).

$$T_{60} = \frac{0,161 V}{A} \quad (1)$$

Onde V é o volume do ambiente (m^3) e A é a absorção sonora do ambiente (Sabines), definida como $A = S \cdot \alpha$, sendo S a área superficial total do ambiente (m^2) e α é a média do coeficiente de absorção sonora (adimensional) de suas paredes internas. Desta maneira, a absorção sonora de um material, pode ser calculada a partir da Eq. (2):

$$A_a = \frac{55,3V}{c} \left(\frac{1}{\bar{t}_2} - \frac{1}{\bar{t}_1} \right) \quad (2)$$

Em que \bar{t}_2 é o tempo de reverberação médio da câmara com amostra em seu interior, expresso em segundos; \bar{t}_1 o tempo de reverberação médio da câmara sem amostra em seu interior, também expresso em segundos; V o volume da câmara reverberante, expresso em metros cúbicos; e c a velocidade do som no meio, expressa em metros por segundo, determinada pela Eq. (3).

$$c = 331 + 0,6T \quad (3)$$

Em que T é a temperatura do meio, expressa em graus Celsius. O coeficiente de absorção sonora (α), parâmetro adimensional, é obtido utilizando-se a Eq. (3) na qual a absorção do material é fracionada pela área da amostra.

$$\alpha = \frac{A_a}{S} \quad (4)$$

Em que S é a área superficial da amostra.

A determinação da difusão sonora, promovida por elementos difusores, de forma direta somente é possível em ambientes que simulam um campo livre (por exemplo, câmaras anecóicas) e exigem um processo de medição criterioso e demorado (COX et al., 2006). Alternativamente, a norma ISO 354 (2003) descreve um procedimento simplificado para avaliar a difusão sonora em uma câmara reverberante através da adição gradual de difusores sonoros, de modo que o coeficiente de absorção sonora da amostra aumente, devido ao maior espalhamento sonoro causado pela área superficial aumentada dos difusores. Em certo ponto, normalmente quando a área preenchida pelos difusores é equivalente a, entre 15% e 25%, da área superficial da câmara, o coeficiente de absorção sonora apresenta valores constantes ou decrescentes, indicando que um valor máximo foi alcançado e que a adição de difusores sonoros já não proporciona melhorias na difusão sonora. Este foi o método empregado para avaliar a difusão sonora das configurações de difusores testadas no presente trabalho.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. SELEÇÃO DOS DIFUSORES

A seleção dos difusores a serem testados (suspensos e volumétricos) foi tomada com base na proposição de importantes trabalhos (LAUTENBACH; VERCAMMEN, 2010; BRADLEY et al., 2014; COX; D'ANTONIO, 2017), que indicavam a utilização de configurações combinando difusores suspensos e volumétricos para se obter elevados graus de difusão sonora, mesmo em uma câmara reverberante de pequenas dimensões.

Em relação às dimensões do difusor, é recomendado que sejam da ordem de meio comprimento de onda (λ), ou maior ($\geq \lambda/2$), da frequência de interesse, para promoverem efeito significativo no campo sonoro (COX; D'ANTONIO, 2017). Para a câmara reverberante utilizada (mais detalhes na Seção 4.2) nos testes aqui conduzidos, cuja frequência de corte² é de aproximadamente 400 Hz (GUERRA; ANDRADE JUNIOR, 2018), a exigência era de que os difusores apresentassem extensão de aproximadamente 0,4 m.

No que se refere ao material dos difusores, é crucial que este apresente elevada refletividade sonora (tais como materiais metálicos, vítreos, etc.), para que não represente um elemento de absorção localizado, inserindo dificuldades adicionais às medições (COX; D'ANTONIO, 2017).

Tendo estes requisitos em mente, todos os difusores foram construídos em material metálico (chapas de aço carbono SAE 1020), com 2 mm de espessura e elevada refletividade. As geometrias distintas, definidas para os difusores, foram selecionadas de modo a obter bom espalhamento e desempenho em banda larga. Superfícies convexas são preferidas, em detrimento das côncavas, por promoverem maior espalhamento sonoro. Além disso, deve-se evitar periodicidade nas estruturas para não restringir em frequência, a atuação dos difusores (COX; D'ANTONIO, 2017). Difusores com forma esférica ou fractal são ideais, porém, são complicados de fabricar e de custo considerável. Estes fatores motivaram a escolha das geometrias com forma (i) de seção circular e (ii) ondulada (ver Figura 1), para os difusores suspensos; e (iii) semicilíndrica e (iv) piramidal, para os difusores volumétricos (ver Figura 2).

² Frequência a partir da qual o comportamento modal da câmara é menos acentuado e a densidade de energia sonora é assumida ser aproximadamente linear.

Figura 1. Desenho técnico dos difusores suspensos em forma de (a) seção circular e (b) onda.

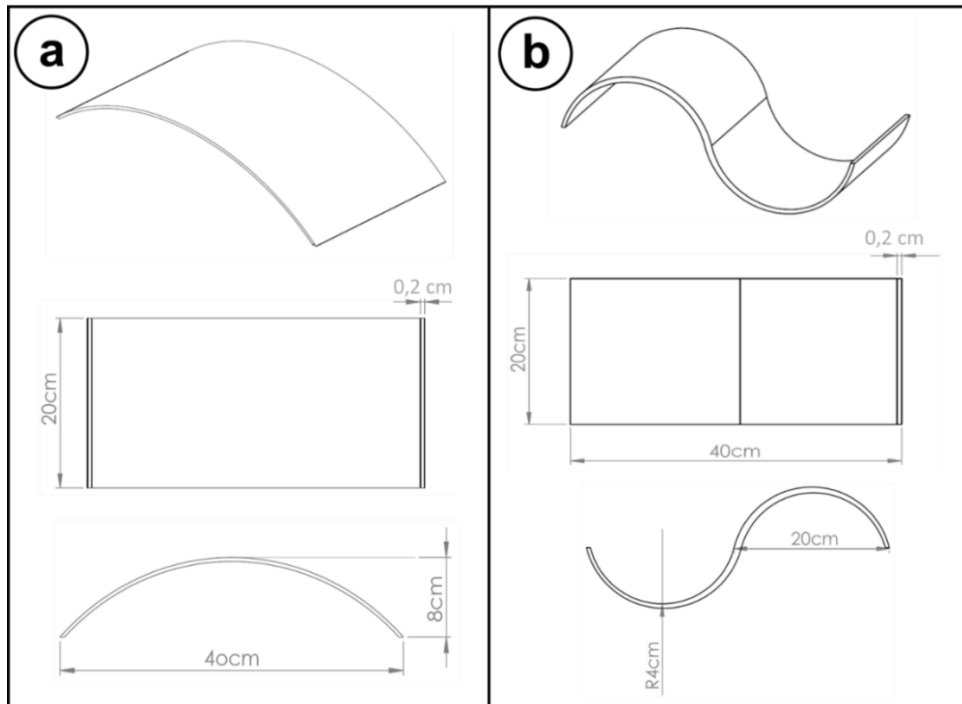
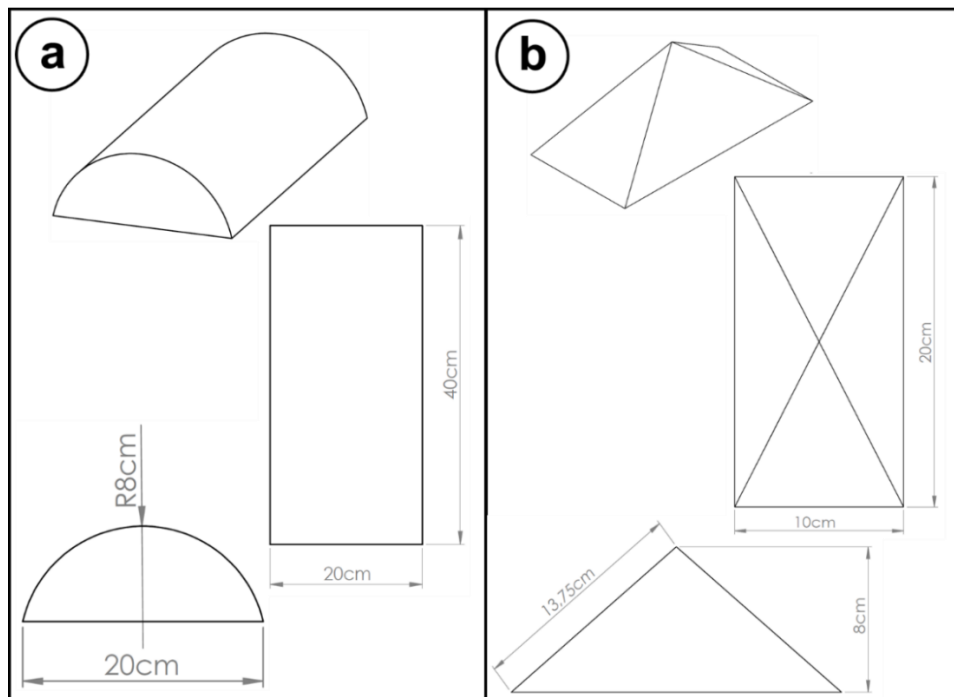


Figura 2. Desenho técnico dos difusores volumétricos tipo: (a) semicilíndrico e (b) piramidal.



4.2. CÂMARA REVERBERANTE EM ESCALA REDUZIDA DO CAMTUC

As medições realizadas no presente trabalho foram conduzidas na câmara reverberante em escala reduzida (ANDRADE JUNIOR; GUERRA, 2018) do Laboratório de Acústica do CAMTUC (ver Figura 3), cujas dimensões internas são de 1,60 m x 2,0 m x 2,50 m (Largura

x Profundidade x Altura), com 8 m³ de volume interno e 24,4 m² de área superficial interna total. A referida câmara é construída em concreto armado com paredes de 10 cm de espessura e uma porta de 10 mm de aço maciço (SAE 1020), o que garante as seguintes características para o ambiente de teste: (i) coeficiente de absorção sonora das superfícies internas da câmara (paredes, piso e teto) tão baixo quanto possível (2%, em média); e (ii) aproximadamente 30 dB de isolamento sonoro; e frequência de corte de aproximadamente 400 Hz (ANDRADE JUNIOR; GUERRA, 2018).

Figura 3. Câmara reverberante em escala reduzida do Laboratório de Acústica do CAMTUC.



4.3. PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

Para avaliar a difusão sonora promovida pelas configurações de difusores testadas, utilizou-se o Método da Interrupção do Ruído³, emitindo ruído rosa, através da fonte sonora à câmara reverberante, ao longo da faixa de frequência de 125 Hz a 8000 Hz. Ainda, utilizou-se como amostra de referência quatro painéis planos e retangulares de fibra de sisal (totalizando 1 m²) com aproximadamente 20 mm de espessura (Figura 4). Os equipamentos utilizados nas medições estão listados a seguir e são mostrados na Figura 5.

- Amplificador de sinal de potência da marca Bruel & Kjaer, tipo 2716;
- Analisador de sinais da fabricante Bruel & Kjaer PULSE, tipo 3160-B-042;

³ Método para obtenção de curvas de decaimento ao se registrar diretamente o decaimento do nível de pressão sonora após excitar o ambiente de teste com ruído de banda larga ou banda estreita.

- Fonte sonora dodecaédrica omnidirecional da marca Bruel & Kjaer, tipo 4296 *omnipower*, com tripé e suporte;
- Microfone de medição polarizado de ½ pol. de campo difuso, da fabricante Bruel & Kjaer, tipo 4942 com tripé e suporte;
- Calibrador sonoro tipo 1 modelo 4231, da fabricante Bruel & Kjaer, N° de série: 2671681;
- Notebook;

Figura 4. Amostra de referência (painéis de fibra de sisal) utilizada para a avaliar a difusão sonora promovida por diferentes configurações de difusores empregados na câmara reverberante do CAMTUC.

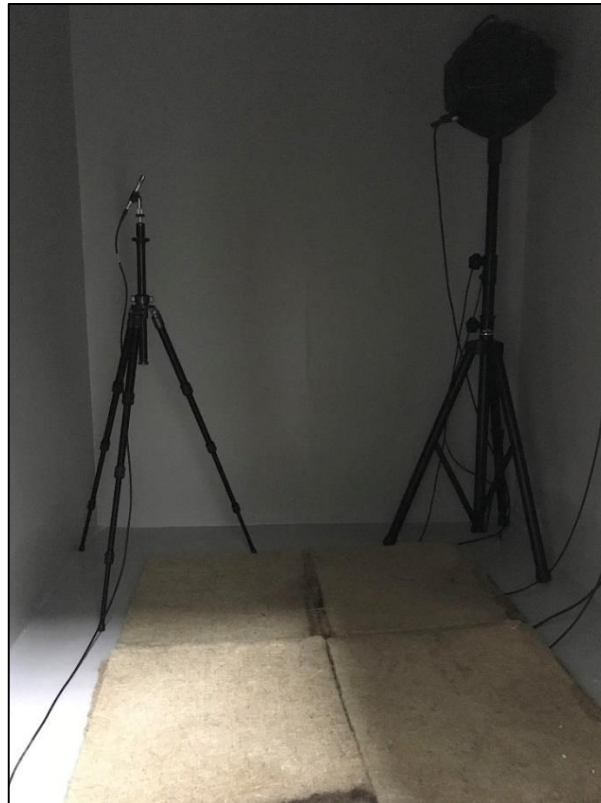


Figura 5. Equipamentos utilizados durante as medições na câmara reverberante do CAMTUC.



O coeficiente de absorção sonora (α) dos referidos painéis, em função da frequência, foi quantificado na referida câmara sem a presença de difusores sonoros por Andrade Júnior e Guerra (2018). Deste modo, as alterações promovidas na difusão sonora do ambiente serão avaliadas através das mudanças na curva de absorção sonora da amostra de referência. Para as medições, foram utilizadas duas (2) posições de fonte sonora e cinco (5) posições de microfone, sendo três (3) medições para cada posição de microfone, totalizando 30 medições para cada configuração de difusor testada.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O processo de medição para cada difusor foi iniciado com a câmara sem amostras e sem difusores. Para cada tipo de difusor uma quantidade variável de difusores era incrementada. Para os difusores suspensos, este incremento era feito de 2 em 2 unidades. Para os difusores volumétricos, iniciava-se com 2 unidades e conforme se reduzia a quantidade de difusores, este incremento passava a ser de 1 unidade. Um máximo de 14 difusores suspensos (DS) aleatoriamente orientados no teto da câmara foram utilizados, cada um com $0,16 \text{ m}^2$ (ambos os lados) de área superficial; enquanto que 9 difusores volumétricos (DV), 7 semicilíndricos e 2 piramidais, instalados nas paredes internas da câmara, foram utilizados, apresentando área superficial e volume de (i) $0,1256 \text{ m}^2$ e $0,00468 \text{ m}^3$, para os semicilíndricos; e (ii) $0,0384 \text{ m}^2$ e $0,00053 \text{ m}^3$, para os piramidais.

Ao todo, foram testadas 48 configurações diferentes no interior da câmara, a saber: (i) sem difusores; (ii) somente com difusores suspensos; (iii) somente com difusores volumétricos; e (iv) combinações de ambos os difusores. Para cada configuração testada, variou-se o número de difusores para um total de 14 difusores suspensos e 9 volumétricos. A Tabela 1 abaixo resume as características de cada configuração, destacando-se os valores de (i) coeficiente de absorção sonora médio (média dos valores entre 500 Hz e 5000 Hz), conforme definição da ISO 354 (2003); (ii) área superficial (m^2); (iii) área relativa, dada pela razão entre a área superficial dos difusores e a área superficial total da câmara; e (iv) a configuração correspondente.

Os difusores suspensos ondulados e tipo seção circular foram instalados no teto por cabos de aço, com distâncias variando entre 0,1 m e 0,4 m, em relação ao teto. Já os difusores volumétricos foram dispostos nas paredes internas da câmara, com alturas variadas e em orientações verticais e horizontais. Um esquema de todos os difusores (suspensos e volumétricos) testados é apresentado na Figura 6, enquanto que na Figura 7, é apresentada uma imagem do interior da câmara durante as medições.

Tabela 1. Características das configurações de difusores testadas.

Alfa médio	Configurações	Área Superficial	Área relativa	Alfa médio	Configurações	Área Superficial	Área relativa
0,659	0 DS + 0 DV	0	0,00%	0,7835	6 DS + 7 DV	1,665	6,82%
0,6766	1 DV	0,038	0,16%	0,758	8 DS + 1 DV	1,318	5,40%
0,6915	3 DV	0,202	0,83%	0,7484	8 DS + 3 DV	1,57	6,43%
0,7257	5 DV	0,454	1,86%	0,7433	8 DS + 5 DV	1,734	7,11%
0,7512	7 DV	0,705	2,89%	0,7958	8 DS + 7 DV	1,985	8,14%
0,7847	9 DV	0,956	3,92%	0,771	10 DS + 1 DV	1,638	6,71%
0,684	2 DS	0,32	1,31%	0,7755	10 DS + 3 DV	1,89	7,75%
0,712	4 DS	0,64	2,62%	0,7943	10 DS + 5 DV	2,054	8,42%
0,731	6 DS	0,96	3,93%	0,8039	10 DS + 7 DV	2,305	9,45%
0,748	8 DS	1,28	5,25%	0,766	12 DS + 1 DV	1,958	8,02%
0,742	10 DS	1,6	6,56%	0,7846	12 DS + 3 DV	2,122	8,70%
0,73	12 DS	1,92	7,87%	0,8075	12 DS + 5 DV	2,374	9,73%
0,794	14 DS	2,24	9,18%	0,7989	12 DS + 7 DV	2,625	10,76%
0,709	2 DS + 1 DV	0,358	1,47%	0,772	14 DS + 1 DV	2,278	9,34%
0,7177	2 DS + 3 DV	0,61	2,50%	0,7783	14 DS + 3 DV	2,442	10,01%
0,7378	2 DS + 5 DV	0,774	3,17%	0,8178	14 DS + 5 DV	2,694	11,04%
0,7255	2 DS + 7 DV	1,025	4,20%	0,8003	14 DS + 7 DV	2,945	12,07%
0,732	4 DS + 1 DV	0,678	2,78%	0,7978	2 DS + 9 DV	1,276	5,23%
0,7485	4 DS + 3 DV	0,93	3,81%	0,784	4 DS + 9 DV	1,596	6,54%
0,7465	4 DS + 5 DV	1,094	4,48%	0,8209	6 DS + 9 DV	1,916	7,85%
0,7704	4 DS + 7 DV	1,345	5,51%	0,8213	8 DS + 9 DV	2,236	9,16%
0,744	6 DS + 1 DV	0,998	4,09%	0,845	10 DS + 9 DV	2,556	10,48%
0,741	6 DS + 3 DV	1,25	5,12%	0,8508	12 DS + 9 DV	2,876	11,79%
0,7679	6 DS + 5 DV	1,414	5,80%	0,8353	14 DS + 9 DV	3,196	13,10%

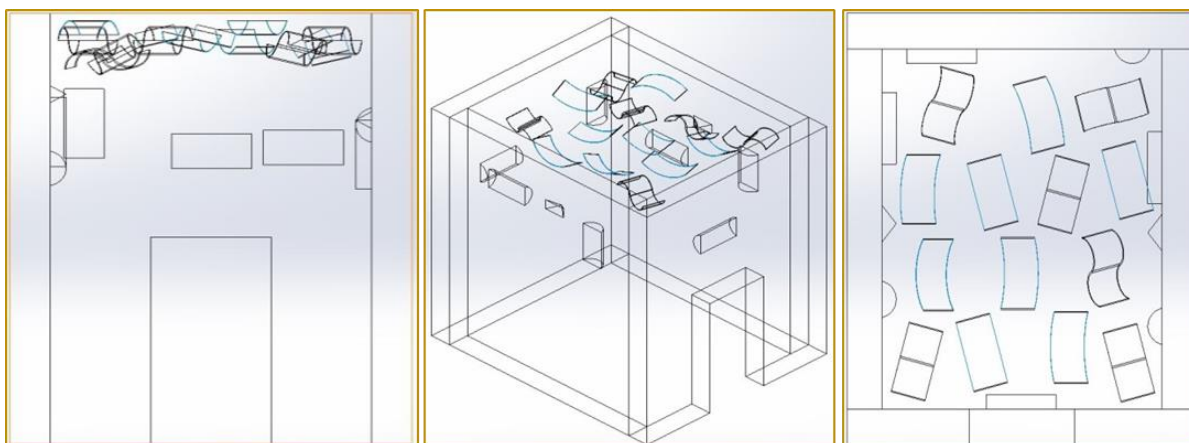
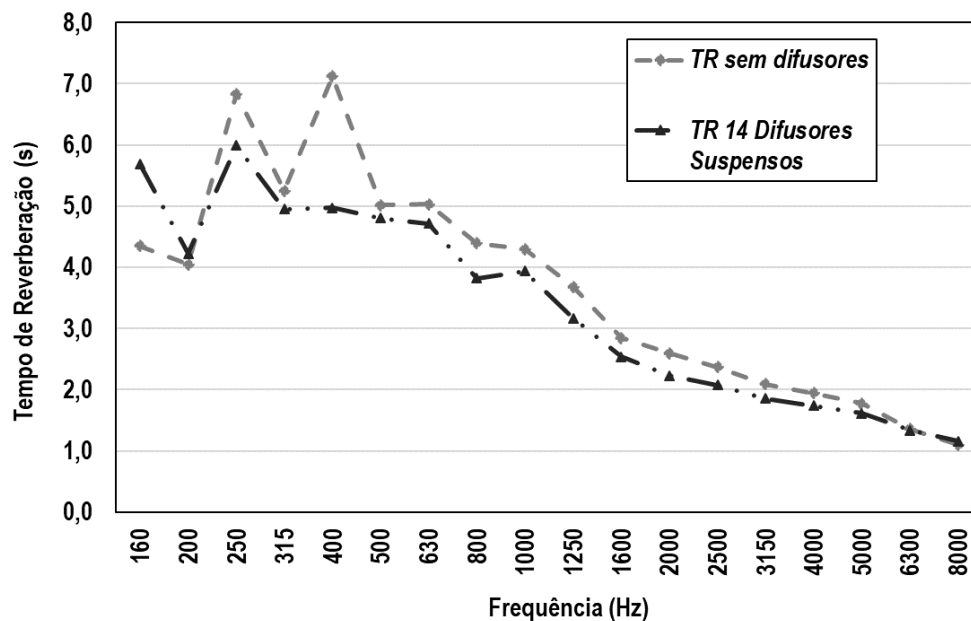
Figura 6. Esquema da disposição dos difusores (suspensos e volumétricos) no interior da câmara reverberante do Laboratório de Acústica do CAMTUC.

Figura 7. Imagem dos difusores durante os testes realizados.



Em tese, se todos os requisitos técnicos, relacionados aos difusores, forem atendidos conforme as exigências da ISO 354 (2003), a energia sonora total no interior da câmara não deve variar grandemente, pois não está havendo inserção de energia adicional no interior da câmara e sim uma redistribuição mais uniforme (VOLKMANN, 1942). Condição esta, que de acordo com a Figura 8, foi alcançada, pois não foram observadas grandes variações no tempo de reverberação da câmara, para a condição sem difusores e com 14 difusores suspensos. Adicionalmente, o pico de energia observado em 400 Hz para a condição sem difusores, é um modo acústico ressonante da câmara que, em razão da inserção dos silenciadores, foi dissipado.

Figura 8. Comparação dos tempos de reverberação com e sem difusores no interior da câmara.



Similarmente, um pico de energia é observado para a frequência de 250 Hz, para ambas as condições, com e sem difusores. Este pico de energia também é proveniente da característica modal da câmara na região de baixas frequências, porém, para que fosse dissipado seria necessária a utilização de difusores sonoros de maiores dimensões (~ 0,7 m em sua maior extensão).

De fato, a inserção dos difusores promoveu maior espalhamento sonoro, o que pode ser observado na Figura 9, a qual ilustra a média dos valores de coeficiente de absorção sonora ($\alpha_{méd}$) para a faixa de 500 Hz a 5000 Hz, conforme procedimento normativo (ISO 354, 2003), em função da área superficial relativa dos difusores para os painéis de sisal. É possível observar que o valor de $\alpha_{méd}$ aumenta conforme mais difusores são adicionados à câmara, comportamento este, previsto pela na norma ISO 354:2003.

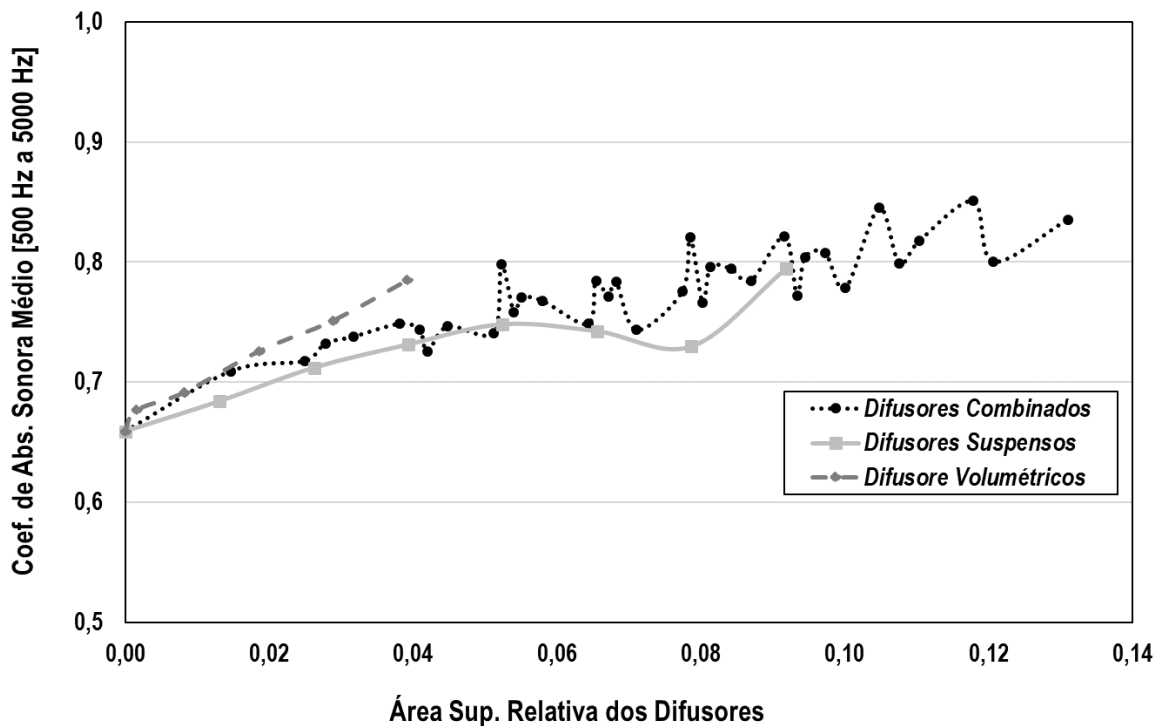
Em relação aos difusores sonoros suspensos, conforme a Figura 9, estes promovem um crescimento do valor de $\alpha_{méd}$ entre as configurações com nenhum e com 8 difusores (0% e 5,25% de área relativa, conforme Tabela 1), devido ao aumento da área de espalhamento dos difusores. Porém, uma oscilação é observada entre as configurações com 8 e 12 difusores (5,25% e 7,87% de área relativa, conforme Tabela 1), a qual pode estar relacionada ao posicionamento dos difusores e da fonte sonora, durante os testes, conforme descrito por Yokota (2000). Para a configuração de 14 difusores (9,18% de área relativa), uma tendência de crescimento novamente é observada, indicando que um valor máximo para $\alpha_{méd}$ não foi alcançado com a quantidade de difusores utilizada. Em outras palavras, é possível obter maiores graus de difusão sonora com realizando testes com um número maior de difusores suspensos, pois estatisticamente o valor máximo de $\alpha_{méd}$ é obtido quando a área relativa dos difusores é de 15% a 25% (ISO 354, 2003).

Já em relação às configurações empregando difusores volumétricos, de acordo com a Figura 9, estas também apresentaram valores crescentes para $\alpha_{méd}$, conforme mais difusores eram adicionados. Entretanto, observa-se que essas configurações não atingiram um valor máximo para $\alpha_{méd}$ seguido por valores constantes ou decrescentes, o que sugere que maior difusão sonora pode ser obtida com um número maior de difusores volumétricos. Este comportamento é consistente com os resultados de Bradley et al. (2014). Em vez disso, os dados para os difusores volumétricos mostram um aumento contínuo nos valores de $\alpha_{méd}$, indicando que difusores deste tipo apresentam elevado desempenho em termos de difusão sonora.

Em uma comparação direta, ainda conforme a Figura 9, a configuração com 9 difusores volumétricos (3,92% de área relativa) promove difusão sonora similar àquela promovida pela

configuração com 14 difusores suspensos (9,18% de área relativa), com área de espalhamento aproximadamente três vezes menor. Comportamento semelhante foi observado para as configurações combinando difusores suspensos e volumétricos, isto é, tendência de crescimento para o valor de $\alpha_{méd}$ com o aumento da área de espalhamento. O maior valor de $\alpha_{méd}$ (0,8353) foi obtido a partir da configuração de difusores combinados com maior área relativa (13,10%), porém estas configurações também não apresentaram um valor máximo definido. Investigações futuras devem ser conduzidas para determinar o máximo de difusão sonora que pode ser obtido na câmara reverberante do CAMTUC adotando-se o mesmo procedimento de análise.

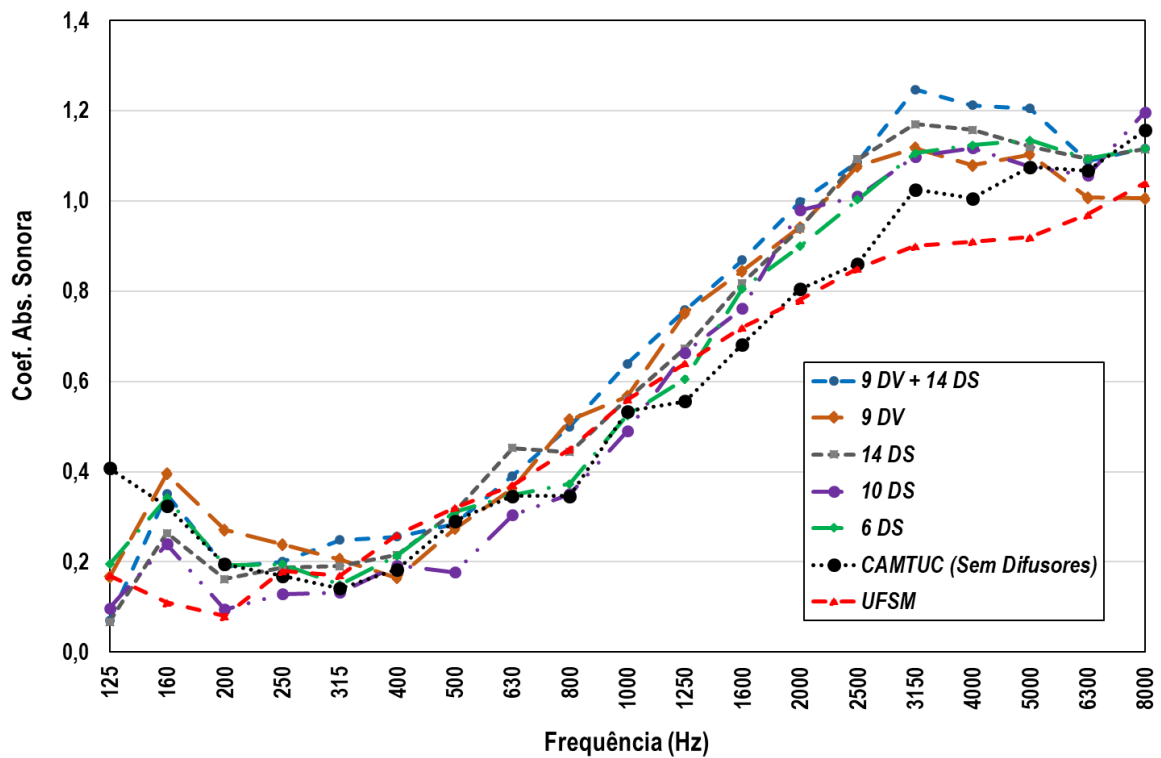
Figura 9. Desempenho das diferentes configurações de difusores, em termos do coeficiente de absorção sonora médio, $\alpha_{méd}$ em função da área superficial relativa.



Por fim, a Figura 10 apresenta os valores de coeficiente de absorção sonora, em função da frequência, obtidos para a amostra de referência (1 m² de painéis retangulares de sisal com 20 mm de espessura) considerando diferentes configurações de difusores no interior da câmara reverberante do CAMTUC. Estes resultados são comparados com dados obtidos na câmara acústica normatizada da Universidade Federal de Santa Maria – RS (BASTOS, 2009). Nota-se, com base na Figura 9, que as configurações de difusores empregadas promovem um aumento mais significativo nos valores de coeficiente de absorção sonora em médias e altas frequências, aproximadamente acima de 1000 Hz. Este aumento está diretamente relacionado

com as dimensões dos difusores empregados. Ainda, os dados obtidos na câmara normatizada comparam apresentam melhor concordância com os dados obtidos na câmara do CAMTUC sem a presença de difusores. Os possíveis fatores que explicam essas diferenças e uma melhor concordância entre os resultados são: (i) a instrumentação utilizada nas diferentes câmaras; (ii) área da amostra de teste; (iii) o grau de difusão sonora das câmaras; e (iv) os tipos de difusores empregados.

Figura 10. Comparação dos valores de α obtidos na câmara reverberante do CAMTUC, para diferentes configurações de difusores, e na câmara normatizada da UFSM para painéis de sisal.



6. CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou a difusão sonora promovida por diferentes tipos e configurações de difusores com base no parâmetro $\alpha_{méd}$ descrito pela ISO 354. As medições foram realizadas na câmara reverberante em escala reduzida do CAMTUC e as principais conclusões inferidas são:

- A inserção dos difusores sonoros (suspensos e volumétricos) de fato melhorou a distribuição de energia sonora no interior da câmara reverberante utilizada. Isto foi observado nos dados de tempo de reverberação para a câmara vazia, onde um pico de energia em 400 Hz foi dissipado após a instalação dos difusores;
- Os difusores sonoros promoveram aumentos crescentes no valor de $\alpha_{méd}$, conforme o aumento da área superficial relativa, comportamento este já esperado.
- Os difusores sonoros volumétricos promoveram difusão sonora similar àquela fornecida por difusores suspensos, com área superficial relativa aproximadamente três vezes menor.
- Por fim, a configuração combinando a maior quantidade de difusores (e, portanto, maior área relativa de espalhamento) promoveu o maior valor para $\alpha_{méd}$, e consequentemente, o maior grau de difusão sonora. Porém, não foram observados valores máximos bem definidos para $\alpha_{méd}$ quando analisando-se os tipos de difusores tanto separadamente quanto combinados. Isto indica, que maiores graus de difusão sonora podem ser obtidos com o aumento da quantidade de difusores.

6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na continuação da pesquisa nessa área, algumas sugestões de atividades podem ser indicadas, dentre elas:

- Conduzir experimentos com uma quantidade maior de difusores suspensos e volumétricos, até o limite de 25% sugerido pela ISO 354;
- Empregar difusores de maiores dimensões ou painéis vibrantes de modo a reduzir o comportamento modal da câmara para frequências abaixo de 400 Hz;
- Avaliar a difusão sonora promovida por difusores esféricos instalados em diversas regiões da câmara.

REFERÊNCIAS

ANDRADE JUNIOR, F. C. P.; GUERRA, W. H. L. Desenvolvimento e Validação de uma Câmara Reverberante em Escala para Determinação de Propriedades Acústicas de Materiais. Trabalho de Conclusão de Curso. 55 f., Universidade Federal do Pará – Campus Universitário de Tucuruí, Tucuruí, 2018.

ARAÚJO, Marco Antônio Nabuco de. *Investigation on the parameters involved in measuring sound absorption in reverberant chambers: critical review of the standard*. D.Sc. Thesis, Federal University of Rio de Janeiro. COPPE, 2002.

BRADLEY et al., D. T. *Comparison of hanging panels and boundary diffusers in a reverberation chamber*. In Proceedings of International Symposium on Room Acoustics, Canada, 2013.

BRADLEY et al., D. T. Effect of boundary diffusers in a reverberation chamber: Standardized diffuse field quantifiers. *J. Acoust. Soc. Am.* 135 (4), pp. 1898–1906, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1121/1.4866291>.

COX et al., T. J. A Tutorial on Scattering and Diffusion Coefficients for Room Acoustic Surfaces. *Acta Acustica United with Acustica*, Vol. 92, pp. 1 – 15, 2006.

COX, T. J.; D'ANTONIO, P. **Acoustic Absorbers and Diffusers – Theory, Design and Application, 3 ed.**, Taylor & Francis, 2017.

DE JONG, B. A.; VAN DEN BERG, P. M. Theoretical design of optimum planar sound diffusers. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 68, n. 1154, 1980. DOI: 10.1121/1.385000.

EBBING, C. E. Experimental Evaluation of Moving Sound Diffusers for Reverberant Rooms. *J. Sound Vib.*, Vol. 16, n. 1, pp. 99-118, 1971.

HASAN, M. M.; HODGSON, M. *Effectiveness of reverberation room design: Room size and shape and effect on measurement accuracy*. In Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics. Paper ICA2016-919, Buenos Aires, 2016.

ISO 354: 2003. Acoustics – *Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room*.

KINSLER et al., L. E. **Fundamentals of Acoustics**, 4 ed., John Willey and Sons, 2000.

KUTTRUFF, H. **Acoustics: An Introduction**. Taylor & Francis, 2006.

LAUTENBACH, M. R.; VERCAMMEN, M. L.S. *Volume Diffusers in the Reverberation Room*. Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010, 2010.

LAUTENBACH, M. R.; VERCAMMEN, M. L. Can we use the standard deviation of the reverberation time to describe diffusion in a reverberation chamber? In: Proceedings of Meetings on Acoustics, Vol. 19, 015054, International Congress on Acoustics, Sydney, 2013. DOI: 10.1121/1.4800319.

BASTOS, L. P. **Desenvolvimento e caracterização acústica de painéis multicamadas unifibra, multifibras e mesclados, fabricados a partir de fibras vegetais**. Dissertação de Mestrado, 156 f., Belém –PA, UFPA, 2009.

SABINE, W. C. Collected papers on acoustics, Cambridge (MA), Harvard University Press, pp. 279.
SCHROEDER, M. R. Diffuse Sound Reflection by Maximum-Length Sequences, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 57, n. 149, 1975. DOI: 10.1121/1.380425.

TORRES, A. A. G. **Effects of specimen mounting and diffuser configurations on the sound absorption measurements in reverberation chambers.** Dissertação de Mestrado. 57 f. Universidade do Porto, Portugal, 2015.

VOLKMANN, J. E. Polycylindrical Diffusers in Room Acoustic Design. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 13, n. 234, 1942. DOI: 10.1121/1.1916170.

YOKOTA et al., T. Difference in acoustic effect of sound diffusers due to room shapes. *J. Acoust. Soc. Jpn.*, Vol. 21, n. 5, pp. 283-285, 2000.