

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNO VICENTINI CAPELLI

**ANÁLISE DE PARÂMETROS RELACIONADOS À DIFUSÃO DE
CAMPO ACÚSTICO EM RECINTOS FECHADOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(TCC2)

CURITIBA

2019

BRUNO VICENTINI CAPELLI

**ANÁLISE DE PARÂMETROS RELACIONADOS À DIFUSÃO DE
CAMPO ACÚSTICO EM RECINTOS FECHADOS**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – TCC2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Henrique de Avelar Gomes

CURITIBA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa " ANÁLISE DE PARÂMETROS RELACIONADOS À DIFUSÃO DE CAMPO ACÚSTICO EM RECINTOS FECHADOS", realizado pelo aluno Bruno Vicentini Capelli, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Márcio Henrique de Avelar Gomes
DAMEC, UTFPR
Orientador

Prof. Dr. Nilson Barbieri
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Catai
DACOC, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 27 de junho de 2019.

RESUMO

CAPELLI, Bruno Vicentini. ANÁLISE DE PARÂMETROS RELACIONADOS À DIFUSÃO DE CAMPO ACÚSTICO EM RECINTOS FECHADOS. 51 f. Trabalho de conclusão de curso – TCC2, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

A atenuação de ruídos e o controle de emissões sonoras é uma atribuição importante dos engenheiros, pois podem causar poluição sonora e prejudicar a vida de diversas pessoas. A manipulação e tratamento acústico como forma de não apenas controlar sons, mas de distribuí-los da melhor maneira possível nos recintos é também um assunto de interesse. Para se realizarem estudos consistentes é também de grande importância que parâmetros acústicos de materiais sejam conhecidos e tenham boa confiabilidade, bem como alguns conceitos que envolvem essa área do conhecimento. Um dos assuntos que têm gerado uma recente discussão se refere ao chamado “campo acústico difuso”. Um campo difuso é necessário, por exemplo, para medições de coeficientes de absorção sonora, potência sonora e isolamento sonora, todos em câmara reverberante. Por conta da escassez de parâmetros adequados e de boa confiabilidade para descrever esta atribuição de um campo acústico, alguns autores vêm desenvolvendo metodologias mais adequadas do que aquelas atualmente utilizadas. O presente trabalho tem como objetivo verificar algumas dessas metodologias. Foram medidas e analisadas respostas ao impulso (funções de transferência) em uma câmara reverberante em escala real e em modelo reduzido, com e sem a utilização de difusores e amostras absorvedoras. Com os dados obtidos alguns indicadores, tais como desvio padrão de nível de pressão sonora, fator de Curtose e desvio da distribuição uniforme de fase de funções de transferência, foram calculados e usados para fins comparativos. É notado que o desvio padrão de níveis de pressão sonora apresenta relação com as métricas obtidas da função de transferência, e guarda uma relação com a homogeneidade do campo acústico. A Análise da Curtose sobre as respostas ao impulso no domínio do tempo apresenta relação com a homogeneidade e a isotropia do campo sonoro. Esta, ainda, indica que a adição de amortecedores (absorvedores) tende a piorar a difusão do campo acústico enquanto a adição de difusores tende a melhorar esta característica. A análise da distribuição de fase das funções de transferência demonstra estar relacionada com a frequência de transição, que pode ser identificada mais claramente pela curtose das funções de transferência, no domínio da frequência.

Palavras-chave: Campo acústico difuso. Curtose. Acústica de salas. Câmara reverberante. Resposta ao impulso.

ABSTRACT

CAPELLI, Bruno Vicentini. ANALYSIS OF PARAMETERS RELATED TO ACOUSTIC FIELD DIFFUSION IN CLOSED ENCLOSURES. 51 p. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering, Academic Mechanical Engineering Department, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Noise attenuation and control is an important attribution of engineers, because noise pollution may harm the lives of people or disturb the balance of biological systems. Handling and acoustic treatment as a way to not only control sounds, but to distribute them in the best possible way in the enclosures is also an issue targeted by acoustic designers. In order to carry out consistent studies it is also of great importance that acoustic parameters of materials be known and have good reliability, as well as some concepts that involve this area of knowledge. One of the issues that has generated a recent discussion concerns the so-called "diffuse acoustic field." A diffuse field is necessary, for example, for measurements of sound absorption coefficients, sound power and sound insulation, all in reverberant chambers. Due to the lack of good parameters to describe this assignment of an acoustic field, some authors have been developing more adequate methodologies than those currently used. The present work aims to verify some of these methodologies. Impulse responses (transfer functions) were measured and analyzed in a real-scale reverberant chamber and in a reduced model, with and without the use of diffusers and absorptive samples. With the data obtained some indicators, such as standard deviation of sound pressure level, kurtosis factor and deviation of uniform distribution of the phase of transfer functions, have been calculated and used for comparative purposes. It is noted that the standard deviation of sound pressure levels is related to the metrics obtained from the transfer function, and is related to the homogeneity of the sound field. The kurtosis analysis on impulse responses in the time domain is related to homogeneity and isotropy of the sound field. This metric also indicates that the addition of absorbers tends to worsen the diffusion of the acoustic field while the addition of diffusers tends to improve this characteristic. The analysis of the phase distribution of the transfer functions demonstrates to be related to the transition frequency, which can be more clearly identified with the kurtosis of the transfer functions, in the frequency domain.

Keywords: Diffuse sound field. Kurtosis. Room acoustics. Reverberation room. Impulse response.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Divisão do espectro audível em regiões	19
Figura 2 - Função resposta de frequência de um sistema sala-fonte-receptor mostrando a divisão do espectro audível em regiões	20
Figura 3 - Esquema da cadeia de sinais utilizada para medições em câmara reduzida	25
Figura 4 - Interface de áudio Hammerfall DSP Multiface II	25
Figura 5 - Amplificador de potência Alesis RA-100	26
Figura 6 - Fonte sonora	26
Figura 7 - Microfone G.R.A.S. Type 26CA	27
Figura 8 - Filtro condicionador de sinais G.R.A.S.....	27
Figura 9 - Câmara reduzida com 108 difusores tipo A e 2 difusores tipo S.....	29
Figura 10 - Esquema da cadeia de sinais utilizada para medições em câmara real .	30
Figura 11 - Interface de áudio Roland Quad Capture 2x2	30
Figura 12 - Amplificador de potências Hypex PSC2.400.....	31
Figura 13 - Fonte sonora DDC-100	31
Figura 14 - Câmara reverberante em escala real com 7 difusores.....	33
Figura 15 - Câmara reverberante em escala real com 7 difusores.....	33
Figura 16 - Gráfico de desvio padrão de NPS em bandas de 1/3 de oitava para respostas ao impulso em câmara reduzida	38
Figura 17 - Gráfico da curtose de respostas ao impulso no domínio da frequência (parte real) medidas em câmara reduzida.....	41
Figura 18 - Gráfico da curtose de respostas ao impulso no domínio da frequência (parte imaginária) medidas em câmara reduzida	41
Figura 19 - Gráfico de desvio padrão de NPS em bandas de 1/3 de oitava para respostas ao impulso em câmara real.....	43
Figura 20 - Gráfico da curtose de respostas ao impulso no domínio da frequência (parte real) medidas em câmara real	45
Figura 21 - Gráfico da curtose de respostas ao impulso no domínio da frequência (parte imaginária) medidas em câmara real.....	45
Figura 22 - Desvio da distribuição uniforme da fase da função de transferência para medições em câmara real	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distâncias delimitadoras de posição	32
Tabela 2 - Máximo desvio padrão permitido de NPS	34
Tabela 3 - Fator de curtose médio e desvio padrão para algumas configurações da câmara reduzida.....	39
Tabela 4 - Frequência de transição para algumas configurações da câmara reduzida	42
Tabela 5 - Fator de curtose médio e desvio padrão para algumas configurações da câmara real	44
Tabela 6 - Frequência de transição para algumas configurações da câmara real	46

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

NPS – Níveis de Pressão Sonora

RI – Resposta ao impulso

RMS – Root Mean Square (Valor Quadrático Médio)

NPS – Nível de Pressão Sonora

SLIT – Sistema Linear e Invariante no Tempo

TF – Transformada de Fourier

TIF – Transformada Inversa de Fourier

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ – Operador Laplaciano

p – Pressão Sonora

c – Velocidade do som em um fluido

t – Tempo

dB – decibel

L_p – NPS (Nível de Pressão Sonora)

p_{rms} – Pressão Sonora Eficaz,

ρ_E – Densidade de energia

ρ – Densidade do fluido

L_x – Comprimento hipotético de uma sala (como sua maior dimensão)

f_s – Frequência de Schroeder

T_{60} – Tempo de reverberação

V – Volume da sala

dB – decibel (pseudounidade em escala logarítmica)

c_0 – Velocidade do som no ar

S – Área dos absorvedores em uma sala

$\bar{\alpha}$ – Coeficiente de absorção médio em uma sala

$y(t)$ – Saída de um SLIT

$x(t)$ – Entrada de um SLIT

$h(t)$ – Função resposta ao impulso

ω – Frequência angular [Rad/s]

i – Constante imaginária

π – Pi (~3,1415...)

f – Frequência [Hz]

$Y(f)$ – Transformada de Fourier da saída de um SLIT

$X(f)$ – Transformada de Fourier da entrada de um SLIT

$H(f)$ – Função de transferência

e – Número de Euler (~2,7182...)

K – Fator de Curtose (em inglês, Kurtosis)

$E()$ – Valor esperado

μ_p – Média das pressões em um intervalo de tempo

σ_p – Desvio padrão das amostras de pressão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Contexto do Tema.....	12
1.2	Caracterização do Problema.....	13
1.3	Objetivos.....	14
1.3.1	Objetivos gerais.....	14
1.3.2	Objetivos específicos.....	14
1.4	Justificativas.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	Pressão sonora e equação da onda.....	16
2.2	Nível de pressão sonora.....	17
2.3	Energia Sonora.....	18
2.4	Acústica de salas.....	18
2.4.1	Modos acústicos (como se distribuem na frequência).....	19
2.4.2	Campo difuso.....	21
2.4.3	Abordagem sobre o ponto de vista de sistemas lineares.....	21
2.5	Curtose.....	22
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	24
3.1	Câmara em escala reduzida.....	24
3.1.1	A cadeia de sinais.....	25
3.1.2	Medições.....	28
3.1.3	Configurações fonte-receptor.....	28
3.2	Câmara em escala real.....	29
3.2.1	A cadeia de sinais.....	30
3.2.2	Medições.....	32
3.2.3	Configurações fonte-receptor.....	32
3.3	Processamento e análise das RI medidas.....	33
3.3.1	Determinação dos NPS e desvio padrão.....	34
3.3.2	Curtose de RIs (domínio do tempo).....	35
3.3.3	Curtose de funções de transferência (domínio da frequência).....	36
3.3.4	Desvio da distribuição uniforme dos valores de fase da função de transferência.....	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
4.1	Câmara reduzida.....	38
4.1.1	Desvio padrão de NPS.....	38
4.1.2	Curtose no domínio do tempo.....	39
4.1.3	Curtose no domínio da frequência.....	40
4.1.4	Distribuição dos valores de fase da função de transferência.....	42
4.2	Câmara em tamanho real.....	42
4.2.1	Desvio padrão de NPS.....	42
4.2.2	Curtose no domínio do tempo.....	43
4.2.3	Curtose no domínio da frequência.....	44
4.2.4	Distribuição dos valores de fase da função de transferência.....	46
4.3	Avaliação dos resultados.....	47
5	CONCLUSÕES.....	49
	REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Tema

A acústica como ciência é relativamente nova, e ainda há muitos assuntos e tópicos a serem explorados. Há pouco mais de um século começaram a se concretizar os primeiros estudos importantes de um dos pioneiros do conhecimento da acústica de salas, Wallace Clement Sabine. Através de seus estudos Sabine introduziu, por exemplo, os conceitos de tempo de reverberação e coeficiente de absorção sonora, essenciais para praticamente qualquer aplicação acústica (BRANDÃO, 2016).

O estudo dessa área tem crescido ao decorrer dos anos não somente em função da busca por melhor inteligibilidade de fala, qualidade acústica de salas musicais e conforto acústico em recintos, por exemplo, como também no controle de ruído.

Seja qual for o caso, inevitavelmente chegará um momento em que se necessita de propriedades e parâmetros acústicos dos objetos de estudo, como o coeficiente de absorção de um material ou a potência sonora gerada a partir de um motor, por exemplo. A medição desses parâmetros se dá normalmente em um ambiente especial, sendo ele uma câmara anecoica ou uma câmara reverberante.

A primeira simula uma situação de propagação sonora em campo livre, onde todo som emitido por uma fonte é absorvido pelas paredes da câmara. A câmara reverberante, por sua vez, possui uma construção que favorece grande reflexão das ondas sonoras, com o objetivo de se ter um campo acústico difuso em seu interior. É de interesse a esse artigo esta última, visto que a universidade dispõe de uma em tamanho real e um modelo em escala reduzida, o que possibilitou o estudo de algumas métricas aplicadas sobre a análise da difusão do campo acústico para ambas situações.

Segundo Jacobsen e Juhl (2013) um campo acústico difuso é um campo perfeitamente homogêneo e isotrópico, onde ondas chegam de maneira irrestrita de todas as direções, emitidas por fontes desconexas e que emitem ruídos aleatórios, de maneira tal que não ocorra interferência de sinais.

Algumas normas tentam definir métricas para que um campo acústico dentro de um ambiente possa ser considerado difuso. A ISO 3741, por exemplo, para realizar medições de potência sonora dentro de câmara reverberante analisa o desvio padrão dos Níveis de Pressão Sonora (NPS) medidos em vários pontos para classificar o campo como difuso. Já a norma ISO 10140 faz medições de isolamento sonora de modo iterativo variando o número de difusores dentro da câmara, de modo que o critério de difusividade do campo é quando o valor da isolamento converge, ou tem pouca variação. De maneira similar a norma ISO 354 utiliza de medições iterativas e busca pela convergência de valores até um coeficiente de absorção sonora máximo em câmara reverberante (apud BRADLEY et al., 2014).

Porém, segundo Bradley et al. (2014), o modo em que se abordam a situação de difusão em diferentes normas gera incongruência de resultados e algumas contradições. Dessa forma, algumas publicações têm sugerido novas metodologias para avaliar o quanto um campo acústico é difuso. Entre elas, destaca-se o uso da curtose para verificar a distribuição de valores de amplitude em trechos de respostas ao impulso, e a análise da distribuição de fase de funções de transferência, abordado por Avelar et al. (2018).

1.2 Caracterização do Problema

Para a obtenção de propriedades acústicas, tais como absorção, espalhamento ou potência sonora, é comum se considerar um campo difuso dentro da câmara reverberante de teste. Porém, qualquer diferença de uma câmara para outra, seja em quantidade ou tamanho dos difusores utilizados, diferença da geometria da câmara ou dos materiais absorvedores, pode fornecer diferença nas medidas obtidas (JEONG, 2016a).

Bradley et al. (2014) apontam que apesar de diversas normas definirem critérios de qualificação da câmara, ainda há dificuldade em se obter boa repetibilidade e reprodutibilidade das medições. Como exemplo, indica-se que há vários registros de medições diferentes de coeficiente de absorção sonora para uma mesma amostra, medida em câmaras diferentes.

Jeong (2016a) utiliza de um método de quantificação indireta para qualificar o grau de difusão de um campo acústico. Este método consiste em calcular a curtose, que mede a forma de uma distribuição normal, em um intervalo inicial de amostras de respostas ao impulso, medidas dentro de câmaras reverberantes. O fator de curtose é utilizado como indicativo do momento em que o campo acústico se torna densamente refletido (misturado), e esse último é considerado uma condição necessária (porém, não suficiente) para um campo acústico difuso.

A proposta de Avelar et al. (2018) tem como base a análise da fase de uma função de transferência, que deverá também ser investigada.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de novas métricas a partir de respostas ao impulso (RI) para qualificar o grau de difusão de um campo acústico.

1.3.2 Objetivos específicos

Com esse estudo, e a fim de atingir o objetivo principal, definem-se a seguir os objetivos específicos que conduziram o trabalho:

- Verificar o comportamento da métrica indicada pela norma ISO 3741 em diferentes configurações de câmaras reverberantes (em relação aos difusores e materiais para absorção sonora);
- Verificar o comportamento do fator de curtose, aplicado a RIs (domínio do tempo), como indicador de campo sonoro difuso, também para diferentes configurações de câmaras reverberantes;

- Verificar o comportamento do fator de curtose, aplicado a Funções de Transferência (domínio da frequência), nas diferentes situações mencionadas;
- Verificar o comportamento de uma métrica que leva em conta a fase da Função de Transferência, conforme descrito por Avelar et al. (2018);
- Fazer uma avaliação das métricas estudadas, quanto a seu uso como indicadores de grau de difusão de um campo sonoro;
- Na medida do possível, fazer um diagnóstico sobre as câmaras reverberantes estudadas, em relação ao quanto o campo é difuso.

1.4 Justificativas

O estudo da acústica não somente possui importância no contexto de se projetar salas com melhor inteligibilidade e conforto acústico como também no controle do ruído, aplicações medicinais e na indústria, por exemplo (BISTAFA, 2011).

Para que se desenvolva cada uma das áreas de aplicação dessa ciência é importante a obtenção de medidas e dados que forneçam uma base teórica confiável como referência. Visto que ainda há muitas contradições sobre o modo de caracterizar a qualidade de difusão de um campo acústico, um estudo que avalia a eficácia de métricas alternativas em fazê-lo pode contribuir com a compreensão desse termo e até mesmo incentivar mudanças na forma em que se abordam problemas relacionados ao mesmo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Som, segundo alguns autores, é a sensação provocada ao sistema auditivo quando há, de forma oscilatória, uma variação da pressão ambiente. Tal sensação ocorre quando a variação de pressão se dá a uma frequência entre 20hz e 20khz aproximadamente, conhecido como faixa de frequências audíveis. Para frequências abaixo e acima dessa faixa são atribuídos os nomes infrassom e ultrassom, respectivamente. Essa variação de pressão (cíclica) pode ser representada por uma função senoidal e/ou cossenoidal em termos do tempo, frequência e de um ângulo de fase. Esse ângulo representa a fase que separa níveis iguais de pressão em uma onda, ou seja, com ele sabe-se em que momento ou distância o nível de pressão se repete (BISTAFA, 2011).

Além da representação harmônica do som em funções trigonométricas pode-se, por meio da equação de Euler, representar o som na forma de uma função complexa (BRANDÃO, 2016).

Quanto à propagação das ondas sonoras, segundo Bistafa (2011), são específicos os casos em que se considera uma onda de propagação linear. Na prática, uma propagação de onda esférica representa uma aproximação razoável para a maioria dos casos.

2.1 Pressão sonora e equação da onda

Além de ocorrer de forma cíclica e com frequência dentro da faixa de frequências audíveis, para um som ser ouvido a variação da pressão ambiente deve possuir uma magnitude entre dois extremos, o limiar de audição (aproximadamente 2×10^{-5} Pa) e o limiar de dor (entre 20 e 200 Pa) (BISTAFA, 2011).

A pressão sonora captada em intervalos de tempo caracteriza o que se conhece como forma da onda. Em um tom puro os períodos e magnitudes são bem evidentes e constantes, porém, a maioria dos sons e ruídos presentes no cotidiano não possuem esse comportamento controlado e de representação evidente. Na tentativa de se obter

um número que, sozinho, caracterize uma onda nesses casos pode-se utilizar uma pressão média, pressão média absoluta, ou pressão eficaz por exemplo. Essa última, entretanto, é mais comumente utilizada por se relacionar com a variação da energia, e é obtida por um valor quadrático médio ou RMS (Root Mean Square) (BISTAFA, 2012).

Uma informação de caráter central no estudo de acústica é a equação da onda, representada pela Equação 1, que governa a propagação da onda em um fluido. Essa equação é dependente das condições de temperatura e densidade onde Δp é o Laplaciano da pressão p , e c é a velocidade do som no meio (JACOBSEN E JUHL, 2013).

$$\Delta p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

2.2 Nível de pressão sonora

Sons com variações drásticas de magnitude não são percebidos pelo ouvido humano que tende a atribuir um volume constante para o mesmo. Assim criou-se a grandeza Nível de Pressão Sonora (NPS), capaz de expressar esses níveis de magnitude em função de uma pressão de referência a 1000Hz e do valor de pressão eficaz em análise. O NPS expressa um resultado que, similar à percepção humana, varia de forma logarítmica fornecendo assim uma noção melhor de quão “alto” ou “baixo” é um som, uma vez que as pressões audíveis em si variam grandemente (JACOBSEN e JUHL, 2013).

A Equação 2 define o nível de pressão sonora, L_p , dado em dB (decibel), para uma pressão efetiva, p_{rms} , sendo que p_{ref} é a pressão de referência, igual a $20\mu Pa$ e o valor da pressão eficaz, ou quadrática média é dado pela Equação 3.

$$NPS = L_p = 10 \log \left(\frac{p_{rms}}{p_{ref}} \right)^2 \quad (2)$$

$$p_{rms} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^N p_i}{N}\right)^2} \quad (3)$$

2.3 Energia Sonora

Uma fonte com uma certa potência sonora, gera uma variação da energia sonora no tempo, que por sua vez altera os níveis de pressão sonora dentro de uma sala. A pressão em um determinado local, depende da distância entre a fonte e o sensor (microfone), bem como das propriedades absorvedoras e reflexivas da sala (BISTAFA, 2012).

Essa energia sonora é uma soma das energias cinética e potencial das partículas excitadas, e a densidade de energia é este mesmo valor pelo volume ocupado, dada pela Equação 4 (BRANDÃO, 2016).

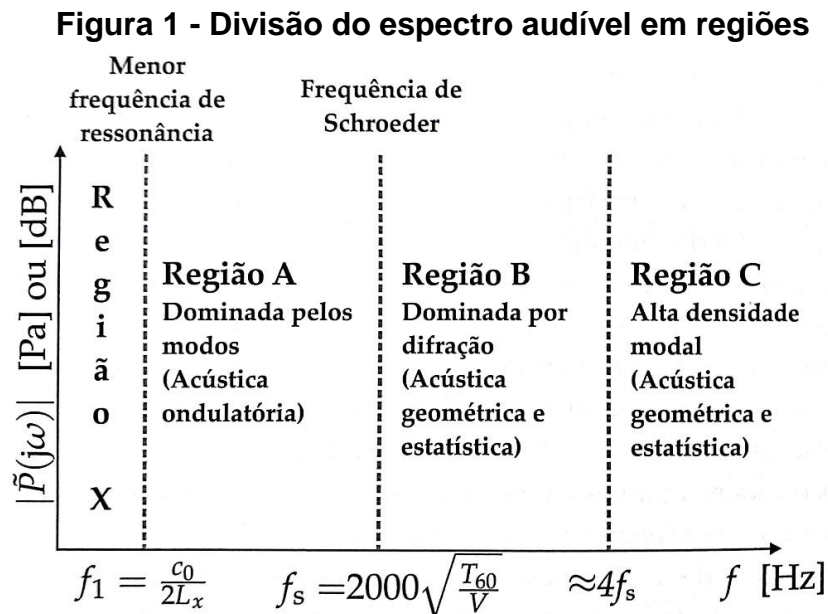
$$\rho_E(t) = \frac{p^2(t)}{\rho c^2} \quad (4)$$

2.4 Acústica de salas

Para determinar o campo acústico dentro de uma sala, à priori, bastaria calcular a equação da onda, através da Equação 1, em seu interior, obtendo-se assim uma solução analítica, porém esse problema não é tão simples de ser abordado. Isso se deve não pela complexidade de modelar a geometria do ambiente e tão pouco pela falta de informações acústicas dos materiais envolvidos no estudo, mas pela aplicação de condições de contorno. Essa complexidade acarreta muitas vezes em problemas custosos ou inviáveis de se resolver mesmo que computacionalmente. Isso somado ao fato de que as interações de comprimentos de ondas com as dimensões da sala faz com abordagens diferentes sejam feitas para diferentes frequências (BRANDÃO, 2016).

2.4.1 Modos acústicos (como se distribuem na frequência)

A Figura 1 mostra uma divisão do espectro de frequências com alguns valores característicos dividindo as 4 regiões. A região X é uma região com grandes comprimentos de onda e o valor de transição para a região A seria a primeira frequência de ressonância possível da sala (ou modo acústico), e está relacionada à sua maior dimensão, no caso o comprimento, L_x (BRANDÃO, 2016).



Fonte: Brandão, 2016.

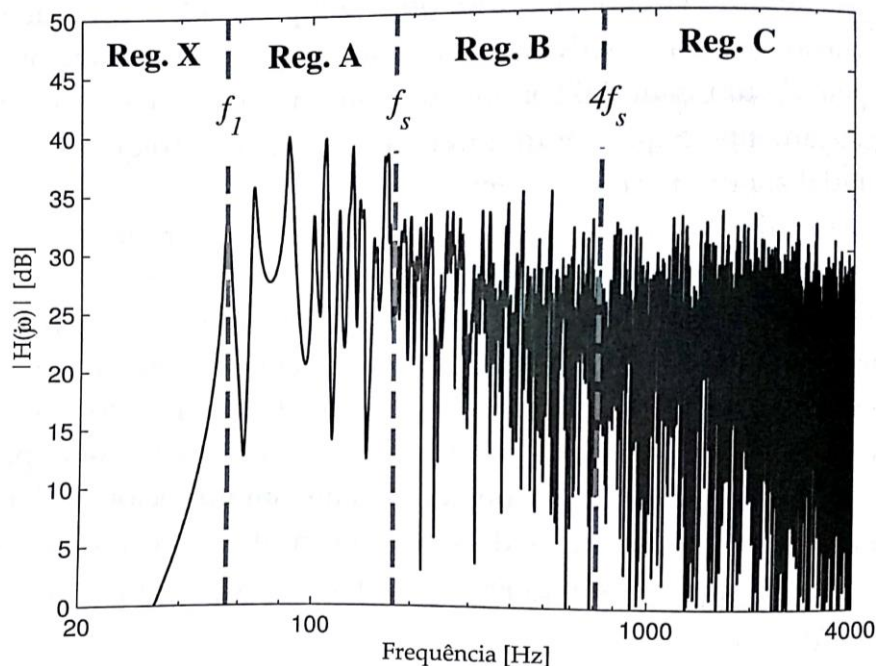
A região A possui ressonâncias em frequências individuais espaçadas, e a divisão para a região B ocorre quando as funções resposta de frequência dos modos começam a ficar indistinguíveis, caracterizado pela frequência de Schroeder, f_s (BRANDÃO, 2016). Esse valor foi obtido de forma empírica e é dado por:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (5)$$

Onde T_{60} é o tempo de reverberação e V , o volume da sala;

Quando a frequência é 4 vezes o valor da frequência de Schroeder comprimentos de onda, que eram comparáveis às dimensões da sala e seus objetos (região B), começam a ficar cada vez menores e por sua vez os modos cada vez mais densos. Essa situação é representada pela região C, e a aplicação de modelos computacionais baseados em soluções numéricas para a equação de onda se torna muito custosa, dando preferência a uma abordagem em função de probabilidades, que fornece bons resultados, mesmo que como resultado inicial para casos mais complexos (BRANDÃO, 2016). A Figura 2 permite visualizar a distribuição dos modos acústicos nas diferentes regiões do espectro audível mencionadas.

Figura 2 - Função resposta de frequência de um sistema sala-fonte-receptor mostrando a divisão do espectro audível em regiões



Fonte: Brandão, 2016.

Apesar de não estar diretamente ligada à questão da difusão de um campo sonoro, é necessário garantir que um campo sonoro próximo ao difuso ocorra em regiões amplas dentro das câmaras reverberantes. Tem-se cogitado que isso só terá chances de ocorrer quando a frequência for maior do que aquela idealizada por Schroeder e expressa através da Equação 5.

2.4.2 Campo difuso

De acordo com Jacobsen e Juhl (2013), um campo perfeitamente difuso teria ondas sonoras provenientes de fontes afastadas e não relacionadas, que emitem sinais aleatórios e totalmente independentes. Dessa maneira o efeito da interferência entre os sons poderia ser desprezado, o que levaria a uma condição de homogeneidade e isotropia do campo acústico.

Segundo Jeong (2016b), o campo difuso é definido como aquele onde a pressão sonora é a mesma em qualquer ponto de um ambiente fechado (condição de homogeneidade) e também que o fluxo de energia pode ocorrer com a mesma probabilidade em qualquer direção (condição de isotropia).

Idealmente ambas as condições deveriam ser cumpridas, mas em algumas situações, apenas uma delas necessita ser atendida. O desvio padrão de NPS, por exemplo, aponta a situação de homogeneidade do campo acústico mas não indica se o mesmo é isotrópico.

2.4.3 Abordagem sobre o ponto de vista de sistemas lineares

Como o sistema sala-fonte-receptor pode ser considerado um Sistema Linear e Invariante no Tempo (SLIT), a Resposta ao Impulso (RI) de uma dada configuração é capaz de representar inteiramente a alteração sofrida por um sinal de um ponto ao outro (KUTTRUFF, 2009).

A definição da resposta ao impulso é o sinal obtido na saída de um sistema linear, quando excitado por um impulso, matematicamente descrito através de uma delta de Dirac. Um sinal de saída em uma sala, $y(t)$, poderá ser obtido, como mostra a Equação 6, pela convolução da resposta ao impulso da sala $h(t)$ com o sinal $x(t)$ gerado pela excitação do alto falante (KUTTRUFF, 2009).

$$y(t) = x(t) * h(t) \tag{6}$$

Do mesmo modo a equação pode ser expressa em termos da frequência com as transformadas de Fourier dos valores da Equação 6, demonstrada na Equação 7, onde $H(f)$ agora é a função de transferência da sala. O valor de Resposta ao impulso pode ser obtido novamente fazendo a transformada inversa de Fourier da função de transferência (KUTTRUFF, 2009).

$$Y(f) = X(f)H(f) \quad (7)$$

A transformada de Fourier (TF) usada para passar um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência é dada pela Equação 8:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (8)$$

Onde i é a unidade imaginária, f é a frequência em Hz e $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular, dada em Rad/s.

A transformada inversa de Fourier (TIF) usada para passar um sinal no domínio da frequência para o domínio do tempo é dada pela Equação 9:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{i\omega t} d\omega \quad (9)$$

De forma sucinta, percebe-se da Equação 7 que é possível excitar um sistema linear com um sinal conhecido e obter sua resposta a esse estímulo. De posse de ambos os sinais, previamente transformados para o domínio da frequência, obtém-se a função de transferência $H(f)$, que pode ser novamente transformada para o domínio do tempo e resulta na resposta ao impulso $h(t)$.

2.5 Curtose

Para frequências acima da frequência de Schroeder, o número de modos presentes em uma sala é muito grande e a pressão se torna uma variável aleatória. Deste modo, e considerando a configuração sala-fonte-receptor como um SLIT, as

ondas podem ser consideradas raios sonoros e a sobreposição das mesmas pode ser calculada somando suas energias (BRANDÃO, 2016).

O fator de Curtose é um momento de quarta ordem que ajuda a definir o grau de normalização de uma distribuição estatística. Jeong (2016a) utiliza uma forma normalizada do fator de Curtose representado pela Equação 10, onde p é a pressão em um dado momento, μ_p é a média das pressões em um intervalo de tempo e σ_p é o desvio padrão das amostras. Deste modo, quando o valor do fator de Curtose é 0, indica que a distribuição é gaussiana.

$$K = \frac{E(p - \mu_p)^4}{\sigma_p^4} - 3 \quad (10)$$

Assim, ele pode e tem sido utilizado como um descritor do quanto um campo difuso é difuso (JEONG, 2016a).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para analisar o potencial de algumas métricas em qualificar a difusão de um campo acústico deve-se inicialmente realizar algumas medições de resposta ao impulso para as câmaras reverberantes, objetos de estudo deste trabalho. Os procedimentos de medição foram aplicados em uma câmara reverberante construída em escala reduzida, disponível no DAMEC/UTFPR, bem como na câmara emissora do conjunto de câmaras reverberantes existente no DACOC/UTFPR.

Como a RI varia para cada configuração sala-fonte-receptor foram realizadas, para os casos citados, medições em várias dessas configurações, ou seja, várias posições relativas de fonte e microfone. Medições com as câmaras vazias, com difusores e com amostras absorvedoras foram realizadas.

De posse das RIs, alguns procedimentos foram aplicados conforme descrito na seção 3.3, para avaliação da qualidade do campo sonoro em relação à difusão. Um dos procedimentos, que leva em conta o desvio padrão do Nível de Pressão Sonora, se refere apenas à condição de homogeneidade. Outro, o fator de curtose calculado em um trecho da RI (domínio do tempo) é correlacionado tanto à condição de homogeneidade quanto à de isotropia, segundo Jeong (2016a). E outros dois são relacionados ao quanto os modos se superpõem conforme descrito por Avelar et al. (2018).

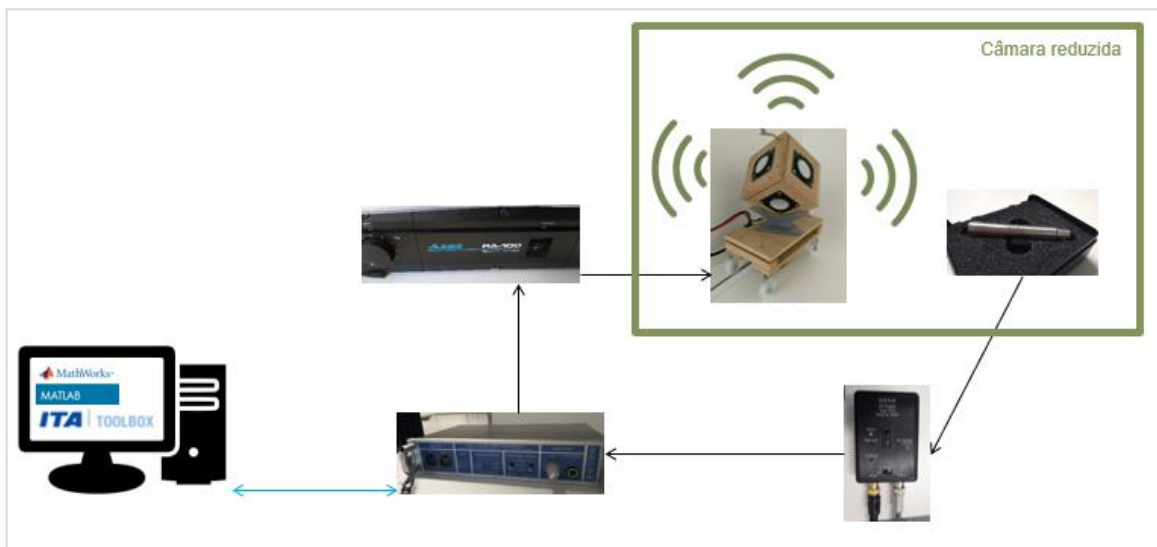
3.1 Câmara em escala reduzida

A câmara reverberante em escala reduzida foi construída no DAMEC/UTFPR como trabalho de conclusão de curso de Cavalcante e Felchack (2016), e conta com um sistema automatizado para movimento de fonte e microfone, realizado por outro trabalho de conclusão, de Sant'ana (2018), que serviu de grande ajuda para mudar as configurações emissor/receptor. Tal câmara foi construída de modo a ter duas paredes que não são paralelas, e um volume interno de $1,48 \text{ m}^3$, utilizando chapas de MDF de 18 milímetros de espessura, e massa acrílica em suas junções para vedação.

3.1.1 A cadeia de sinais

A cadeia de sinais é composta por alguns equipamentos específicos, citados na mesma sequência percorrida pelo sinal. Um esquema simplificado dos equipamentos utilizados para as medições é representado pela Figura 3. Primeiramente um sinal digital é gerado pelo computador cuja placa de som é a placa externa (também chamada de interface de áudio) da marca RME, modelo Hammerfall DSP multiface II, mostrada na Figura 4.

Figura 3 - Esquema da cadeia de sinais utilizada para medições em câmara reduzida



Fonte: Própria, 2018.

Figura 4 - Interface de áudio Hammerfall DSP Multiface II



Fonte: Própria, 2018.

Essa interface é responsável por transformar o sinal digital em um sinal analógico, que é então amplificado pelo amplificador de potência RA-100 (Figura 5), da marca Alesis, para que tenha energia suficiente para uma boa medição.

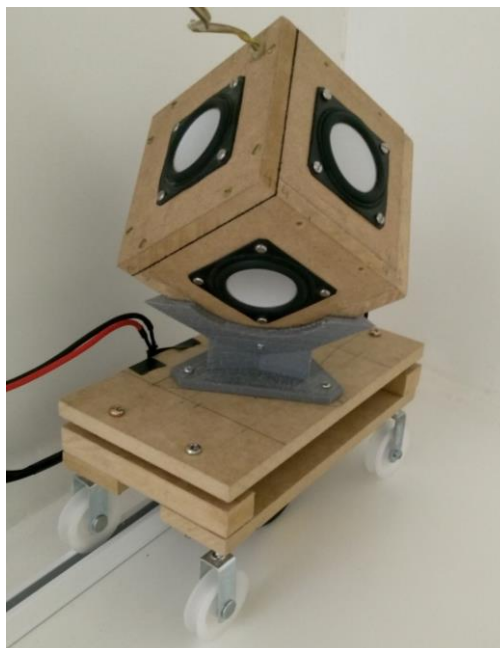
Figura 5 - Amplificador de potência Alesis RA-100



Fonte: Própria, 2018.

O sinal amplificado passa pelo conjunto de autofalantes (transdutores de pressão que transformam energia elétrica em energia mecânica sonora) aqui chamado de “fonte sonora”. A Figura 6 retrata a fonte sonora utilizada.

Figura 6 - Fonte sonora



Fonte: Própria, 2018.

Os sinais emitidos na câmara, após sofrerem modificações devido às características físicas da mesma, são captados por um outro transdutor de pressão, o microfone (nesse caso, a transformação é inversa: sinal mecânico se transformando em sinal elétrico).

Foi utilizado um microfone da marca G.R.A.S., tipo 26CA, conforme Figura 7, além de um filtro condicionador de sinais que o acompanha na sequência, mostrado na Figura 8. Esse sinal retorna à interface de áudio onde é transformado novamente em sinal digital e pode ser analisado pelo computador.

Figura 7 - Microfone G.R.A.S. Type 26CA



Fonte: Própria, 2018.

Figura 8 - Filtro condicionador de sinais G.R.A.S.



Fonte: Própria, 2018.

Para registrar as respostas ao impulso e processar os sinais, uma toolbox para MATLAB desenvolvida pelo “Institute of Technical Acoustics” da Universidade de Aquisgrana foi utilizada (ITA-Toolbox).

3.1.2 Medições

Para cada medição realizada na câmara reverberante em escala reduzida, isto é, cada configuração de difusores/absorvedores em seu interior, 12 posições relativas entre fonte e microfone foram utilizadas (combinação de 2 posições de fonte com 6 de microfone). Para cada uma dessas 12 posições, uma sequência de 10 sinais virtualmente idênticos foi emitida e as respostas, captadas. A média dessas 10 respostas foi automaticamente calculada e se traduz na resposta ao impulso para a dada posição. Isso é feito para melhorar a qualidade das medições pois, desse modo, os possíveis ruídos captados durante um sinal são “diluídos” diminuindo o impacto sobre o resultado final.

3.1.3 Configurações fonte-receptor

Um dos objetivos das medições é buscar uma correlação entre a presença de difusores na câmara e o grau de difusão da mesma, através das métricas abordadas nesse trabalho. Para tal, foram utilizados difusores de gesso em formato semiesférico, apelidados de difusores “A”, com diâmetro de 40 milímetros cada. Além destes, dois difusores suspensos (referidos nesse trabalho como difusores “S”), confeccionados em material termoplástico rígido por Cavalcante e Felchack (2016), foram utilizados em algumas configurações.

De acordo com Brandão (2016), a frequência que provavelmente será mais influenciada por um difusor semiesférico será aquela cujo comprimento de onda correspondente é 4 vezes o diâmetro do difusor. Deste modo, através da Equação 11, é possível averiguar que a frequência a partir da qual os hemisférios passam a criar reflexões difusas será:

$$f = c/4d \quad (11)$$

A Figura 9 mostra a câmara reduzida com 108 difusores tipo A e os dois difusores suspensos S.

Figura 9 - Câmara reduzida com 108 difusores tipo A e 2 difusores tipo S



Fonte: Própria, 2018.

3.2 Câmara em escala real

A câmara em escala real utilizada para o segundo conjunto de medições é a câmara emissora de um conjunto de salas emissora/receptora, pertencente ao DACOC/UTFPR, utilizada também para medições de isolamento acústica. A câmara possui 4,55 m de largura por 4,80 m de comprimento, por 2,70 m de altura.

3.2.1 A cadeia de sinais

A seqüência de equipamentos utilizada para essas medições é essencialmente a mesma da utilizada para a câmara reduzida, mudando basicamente o porte e modelos dos mesmos. Por exemplo, utilizando amplificador e fonte sonora mais potentes e mais adequados ao novo ambiente de medições. A Figura 10 representa o esquema utilizado para as medições em câmara real. Nesse caso a interface de áudio utilizada foi a apresentada na Figura 11, modelo Quad Capture 2x2, da marca Roland.

Figura 10 - Esquema da cadeia de sinais utilizada para medições em câmara real



Fonte: Própria, 2018.

Figura 11 - Interface de áudio Roland Quad Capture 2x2



Fonte: Própria, 2018.

O amplificador de potências Hypex PSC2.400 e a fonte sonora omnidirecional de banda larga DDC-100 (composto por alto-falantes dispostos em um dodecaedro) que fizeram parte dessa cadeia de sinais estão mostrados nas Figura 12 e Figura 13 na sequência.

Figura 12 - Amplificador de potências Hypex PSC2.400



Fonte: Própria, 2018.

Figura 13 - Fonte sonora DDC-100



Fonte: Própria, 2018.

O mesmo microfone utilizado para as medições na câmara reduzida foi utilizado nesse circuito.

3.2.2 Medições

Do mesmo modo – e pelo mesmo motivo – que as medições em câmara reduzida, foi emitida uma sequência de 10 sinais virtualmente idênticos para cada posição de medição, porém, nesse caso foram combinadas 3 posições de fonte com 4 de microfone, resultando também em 12 posições relativas entre estes, para a câmara vazia e com difusores.

3.2.3 Configurações fonte-receptor

Segundo a norma ISO 354 existe uma distância mínima entre uma posição de microfone e outra, assim como entre uma posição de fonte e outra. Do mesmo modo as distâncias entre o microfone e fonte, e entre microfone e qualquer outra superfície refletora devem ser maiores que um mínimo determinado. As distâncias utilizadas serviram de referência para o posicionamento da fonte e microfone, e são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Distâncias delimitadoras de posição

Distância entre posições de microfone	1,5m
Distância entre posições de fonte	3m
Distância entre microfone e fonte	2m
Distância entre microfone e superfícies	1m

Fonte: Adaptado de ISO 354, 2003.

As Figura 14 e Figura 15 mostram duas vistas opostas da câmara reverberante em escala real com 7 difusores em seu interior, bem como com a fonte sonora e o microfone.

Figura 14 - Câmara reverberante em escala real com 7 difusores



Fonte: Própria, 2018.

Figura 15 - Câmara reverberante em escala real com 7 difusores



Fonte: Própria, 2018.

3.3 Processamento e análise das RI medidas

Com as medidas de resposta ao impulso (RI) foi, então, de especial interesse aferir:

- Desvio Padrão de NPS
- Fator de Curtose no domínio do tempo
- Fator de Curtose no domínio da frequência
- Desvio da distribuição uniforme dos valores de fase da função de transferência

3.3.1 Determinação dos NPS e desvio padrão

A norma ISO 3741, que trata da medição de potência sonora em câmara reverberante, indica (no anexo C) que para que a câmara seja qualificada o desvio padrão do NPS deve estar abaixo dos valores descritos na Tabela 2, por banda de frequência. Tal condição seria relativa à homogeneidade.

Frequência central da banda de um terço de oitava [Hz]	Máximo desvio padrão permitido [dB]
100 a 160	1,5
200 a 630	1,0
800 a 2500	0,5
3150 a 10000	1,0

Fonte: Adaptado de ISO 3741, 2010.

Com as respostas ao impulso representadas num gráfico, também chamado de reflectograma, é possível determinar a energia sonora pelo cálculo da área abaixo do gráfico. Sendo que o NPS é proporcional à energia sonora, é possível então calcular esses valores de forma alternativa à Equação 2:

$$NPS = 10 \log \frac{1}{p_{ref}^2 T} \int_0^T h(t)^2 dt \quad (12)$$

Onde T é o tempo que a resposta ao impulso, $h(t)$, demora para atingir valores próximos a zero, e p_{ref} é a pressão de referência, igual a $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Desta forma determinou-se o desvio padrão desses níveis, por meio da Equação 13 aplicada à ferramenta computacional MATLAB, para fazer a correlação com o método e os limites descritos na norma ISO 3741. Onde μ é a média dos NPS.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (NPS_i - \mu)^2} \quad (13)$$

3.3.2 Curtose de RIs (domínio do tempo)

Na segunda métrica abordada foi utilizada a curtose normalizada para as amostras de RI, conforme a Equação 10, para aferir se o campo é difuso com base no estudo de Jeong (2016a). Segundo tal autor, há uma correlação entre a Curtose e o grau de difusão do campo sonoro. Pode-se interpretar que essa correlação atenderia à condição de homogeneidade e também a de isotropia.

Nesse caso, foram utilizadas janelas de 20 ms para calcular a Curtose por trechos de resposta ao impulso. Conforme indicado por Jeong (2016a), as respostas foram previamente filtradas entre 125 Hz e 4000 Hz, para a câmara em tamanho real. Para o modelo reduzido as respostas foram filtradas entre 300 Hz e 4000 Hz pois medições prévias mostram que a fonte sonora utilizada não responde bem abaixo de 300 Hz.

Conforme já mencionado, para filtrar os sinais, funções já programadas na ITA-Toolbox foram utilizadas. A rotina para obtenção do fator de curtose foi implementada, valendo-se da função “Kurtosis”, disponível no MATLAB.

3.3.3 Curtose de funções de transferência (domínio da frequência)

O método abordado por Jeong (2016a) analisa a curtose no domínio do tempo, porém, foi analisado também sobre o domínio da frequência neste trabalho, com o intuito de compará-la à próxima métrica, de análise de fase. Nos dois casos, espera-se encontrar uma frequência de transição (frequência de Schroeder), a partir da qual há forte sobreposição de modos acústicos. Segundo Kuttruff (2006), quando há uma forte superposição de modos, a distribuição de valores de amplitude das partes real e imaginária da função de transferência se dá conforme uma curva normal (gaussiana).

Como a curtose normalizada de uma população que se distribui de acordo com uma curva normal é igual a zero, este parâmetro é calculado para uma sequência de valores que se encontram em uma janela de observação. Tal janela deve ter, à princípio, 800 valores de amplitude. Uma vez computada a curtose, repete-se o cálculo deslocando-se a janela ao longo do eixo da frequência.

Quando o valor da curtose é menor do que 2, considera-se que a distribuição da população analisada é suficientemente próxima de uma curva normal, de acordo com George e Mallery (2016). Anota-se a frequência para a qual os valores de curtose são definitivamente menores do que essa referência. Tanto para a parte real, quanto para a parte imaginária. A maior dessas duas frequências é considerada a frequência de transição.

3.3.4 Desvio da distribuição uniforme dos valores de fase da função de transferência

Como quarto e último método de avaliação da difusão do campo acústico foi testada uma métrica que baseia-se na fase da Função de Transferência (que é a transformada de Fourier da RI). A Função de Transferência pode ser representada da seguinte maneira:

$$H = X + iY = Ae^{i\phi} \quad (14)$$

Onde X e Y representam as partes real e imaginária da Função de Transferência. Quando descrita na forma polar, A representa o módulo e ϕ representa a fase da Função de Transferência.

É possível mostrar, que quando há uma grande superposição de modos distribuídos ao longo da frequência, abre-se a possibilidade de abordar a propagação sonora em salas a partir de um ponto de vista estatístico. Essa situação também favorece a ocorrência de um campo difuso. Apesar de não determinante, seria outra condição necessária para que ele ocorra.

Segundo Kuttruff (2006), nessa situação os valores reais e imaginários de uma função de transferência assumem uma distribuição normal e a amplitude, em consequência, assume uma distribuição de Rayleigh. Outra consequência, não mencionada pelo referido autor, é de que a distribuição dos valores de fase será uniforme.

Assim, a análise da distribuição dos valores de fase foi feita a partir de uma janela de análise ao longo de diferentes bandas de 1/3 de oitava. Quanto mais o gráfico resultante se aproxima da uniformidade, maior a probabilidade de ocorrência do campo difuso.

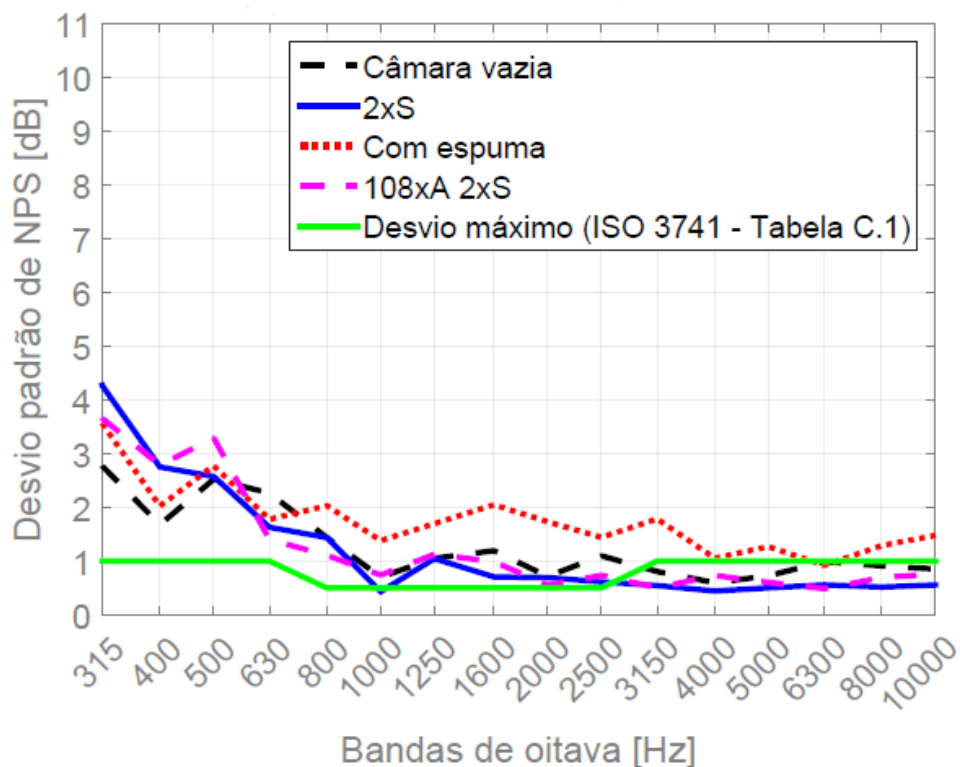
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Câmara reduzida

4.1.1 Desvio padrão de NPS

A norma ISO 3741 é uma norma utilizada para medições de potência sonora, que utiliza o desvio padrão dos níveis de pressão sonora para qualificar a câmara quanto à difusão do campo acústico. Esse parâmetro está relacionado à homogeneidade do campo - primeira condição de campo acústico abordada por Jacobsen e Juhl (2013) – mas não tem relação com a outra condição (isotropia).

Figura 16 - Gráfico de desvio padrão de NPS em bandas de 1/3 de oitava para respostas ao impulso em câmara reduzida



Fonte: Própria, 2018.

O gráfico mostrado na Figura 16 compara os níveis de pressão sonora de 4 configurações, câmara vazia, com 2 difusores suspensos, câmara com espuma, e um

conjunto de 108 difusores tipo A e 2 tipo S. Esses valores são comparados com a tabela C1 anexada à norma, que estabelece o valor máximo de desvio padrão de NPS por 1/3 de oitava, para que o campo acústico seja adequado.

Percebe-se que algumas das condições ficaram abaixo do que é dado como referência pelo anexo C da norma apenas para frequências maiores do que 2500 Hz. Na condição da câmara com espuma no piso, o campo sonoro não é nunca suficientemente homogêneo, de acordo com esse critério.

4.1.2 Curtose no domínio do tempo

Similar à Jeong (2016a), foi calculado o valor do fator de curtose normalizada para algumas configurações de sala. O que se espera averiguar é a influência dos difusores no fator de curtose das respostas ao impulso, no domínio do tempo, para assim, associa-lo ao campo difuso. Na rotina desenvolvida no MATLAB é localizado o valor máximo do sinal obtido e estabelecida uma janela de 100ms a partir deste máximo para a análise ao longo do tempo. Esses trechos de resposta ao impulso são utilizados para se calcular valores médios de fator de Curtose bem como seu desvio padrão, presentes na Tabela 3.

Tabela 3 - Fator de curtose médio e desvio padrão para algumas configurações da câmara reduzida

Configuração	Curtose (tempo)	Desvio padrão
Com espuma	0,4164	0,1300
Câmara vazia	0,2704	0,0908
108xA 2xS	0,2334	0,1347
2xS	0,2729	0,1444

Fonte: Própria, 2018.

É possível perceber que o valor da curtose não parece se alterar significativamente com a adição de 2 difusores S na câmara vazia. Por outro lado, o valor de curtose se tornou maior com a adição da espuma e menor com a adição de

108 difusores A e 2 S, quando comparados com a câmara desocupada, similar ao notado por Jeong (2016a).

Este parâmetro ainda não foi suficientemente estudado e ainda não possui valores de referência. A única coisa que se pode afirmar é que ele se comporta de maneira coerente com o esperado. Ou seja, o campo sonoro é menos difuso quando a espuma é colocada no piso da câmara e mais difuso quando os dois difusores S e os 108 do tipo A são adicionados.

4.1.3 Curtose no domínio da frequência

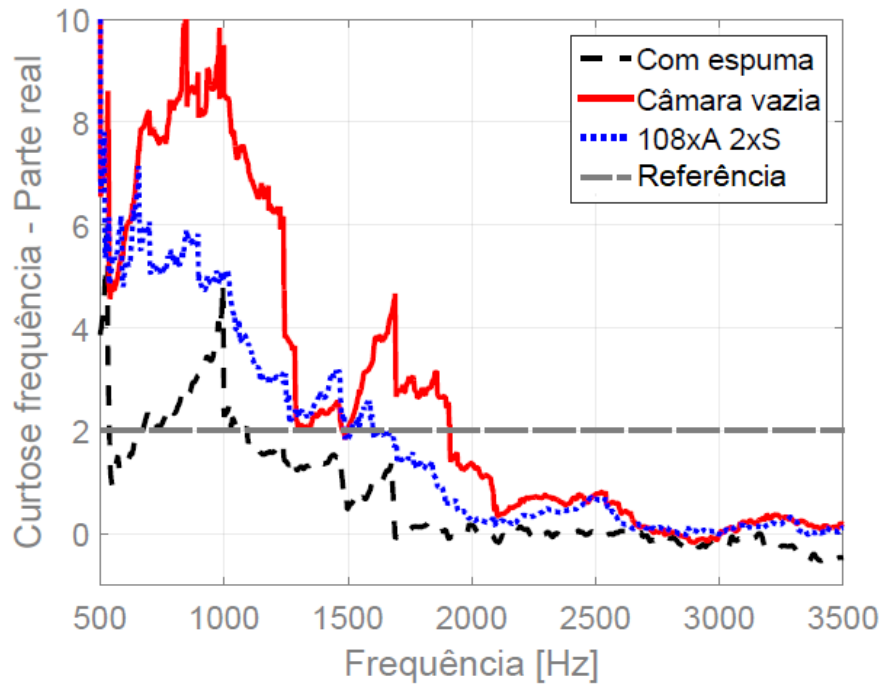
Além da abordagem no domínio do tempo, foram analisados os valores reais e imaginários do fator de curtose no domínio da frequência, para algumas configurações da câmara, utilizando um intervalo do sinal entre 0,014s e 1,5s.

Os gráficos da Figura 17 e da Figura 18 mostram os valores real e imaginário, respectivamente, da câmara vazia, com espuma e com difusores A e S.

Tomando nota da frequência para a qual a curtose cai abaixo de 2 em ambos os gráficos e adotando o maior desses valores como frequência de transição, foi feita uma comparação através da Tabela 4. Nessa, nota-se que ambas as situações, com espuma e difusores, moveram a frequência de transição para frequências mais graves, sendo que a com espuma (alta absorção), demonstrou maior influência.

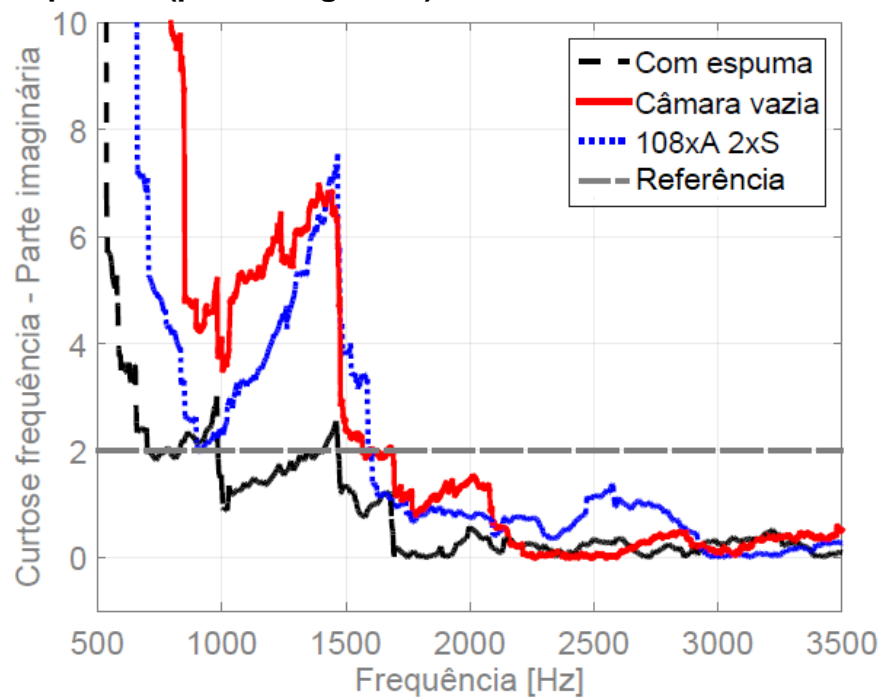
Ressalta-se aqui que a queda no valor de frequência de transição é esperada tanto com o aumento da absorção (amortecimento), quanto com alterações da geometria da câmara, no sentido de torná-la mais complexa através dos difusores. Não deve-se descartar a possibilidade de que os “difusores” também absorvam energia sonora.

Figura 17 - Gráfico da curtose de respostas ao impulso no domínio da frequência (parte real) medidas em câmara reduzida



Fonte: Própria, 2019.

Figura 18 - Gráfico da curtose de respostas ao impulso no domínio da frequência (parte imaginária) medidas em câmara reduzida



Fonte: Própria, 2019.

Tabela 4 - Frequência de transição para algumas configurações da câmara reduzida

Configuração	Frequência de transição (Hz)
Câmara vazia	1912
Com espuma	1469
108xA 2xS	1624

Fonte: Própria, 2019.

4.1.4 Distribuição dos valores de fase da função de transferência

A análise dos valores de fase se relaciona com o campo difuso, conforme o valor tende a ter uma distribuição uniforme. Além disso, a métrica possibilita determinar a frequência de transição. Para a câmara reduzida os resultados não demonstram variações relevantes entre uma configuração e outra e, portanto, optou-se por não apresentá-los nessa seção. Essa métrica é abordada e discutida mais amplamente para a câmara real.

4.2 Câmara em tamanho real

4.2.1 Desvio padrão de NPS

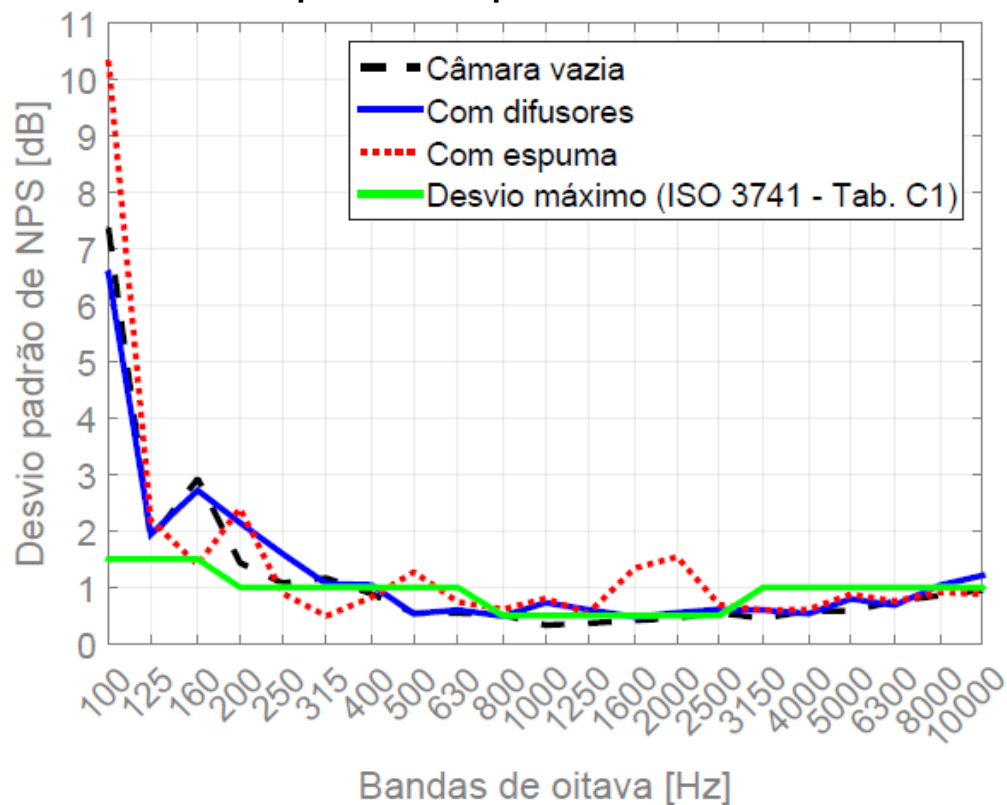
A Figura 19 mostra o desvio padrão para a câmara vazia, com espuma e com 7 difusores suspensos, mostrados em bandas de 1/3 de oitava, comparados aos valores do anexo C da norma ISO 3741, representados na Tabela 2.

Do mesmo modo em que na câmara reduzida, não houveram casos com desvios abaixo do parâmetro da norma para todas as bandas de frequência. Porém, de maneira geral, a câmara maior demonstrou resultados mais próximos de atingir o rigor estabelecido pela ISO 3741. Nota-se também uma grande redução a partir da banda de 125 Hz.

Tanto a câmara vazia, quanto a câmara com difusores apresenta-se quase qualificada em relação à homogeneidade a partir de 350 Hz. Chama a atenção o fato de que, através desse critério, os difusores não seriam necessários.

Quando a espuma é colocada dentro da câmara, o desvio padrão cresce consideravelmente nas bandas de frequência de 1600 Hz e 2000 Hz.

Figura 19 - Gráfico de desvio padrão de NPS em bandas de 1/3 de oitava para respostas ao impulso em câmara real



Fonte: Própria, 2018.

4.2.2 Curtose no domínio do tempo

Para as mesmas configurações da métrica anterior, foi aferida a curtose das respostas ao impulso no domínio do tempo, bem como seu desvio padrão, listados na Tabela 5. Nota-se que o valor de curtose para sala com espuma aumentou do valor

para a sala vazia, ao mesmo tempo que os difusores diminuíram este valor. Isso é coerente com o que é esperado por Jeong (2016a).

Tabela 5 - Fator de curtose médio e desvio padrão para algumas configurações da câmara real

Configuração	Curtose	Desvio padrão
Câmara vazia	0,1646	0,0700
Com difusores	0,1458	0,0748
Com espuma	0,2130	0,0827

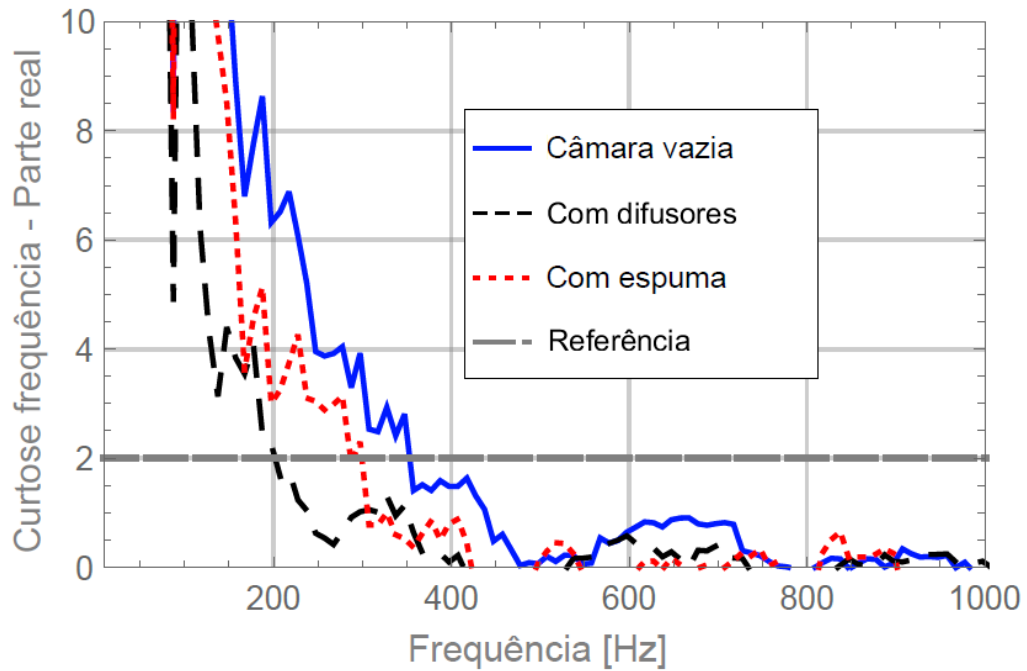
Fonte: Própria, 2018.

4.2.3 Curtose no domínio da frequência

Do mesmo modo que para a câmara reduzida, ambos os gráficos da parte real e imaginária foram analisados e os valores de frequência de transição anotados na Tabela 6. Neste caso, diferente da câmara reduzida, a configuração com difusores abaixou a frequência de transição mais do que a configuração com espuma.

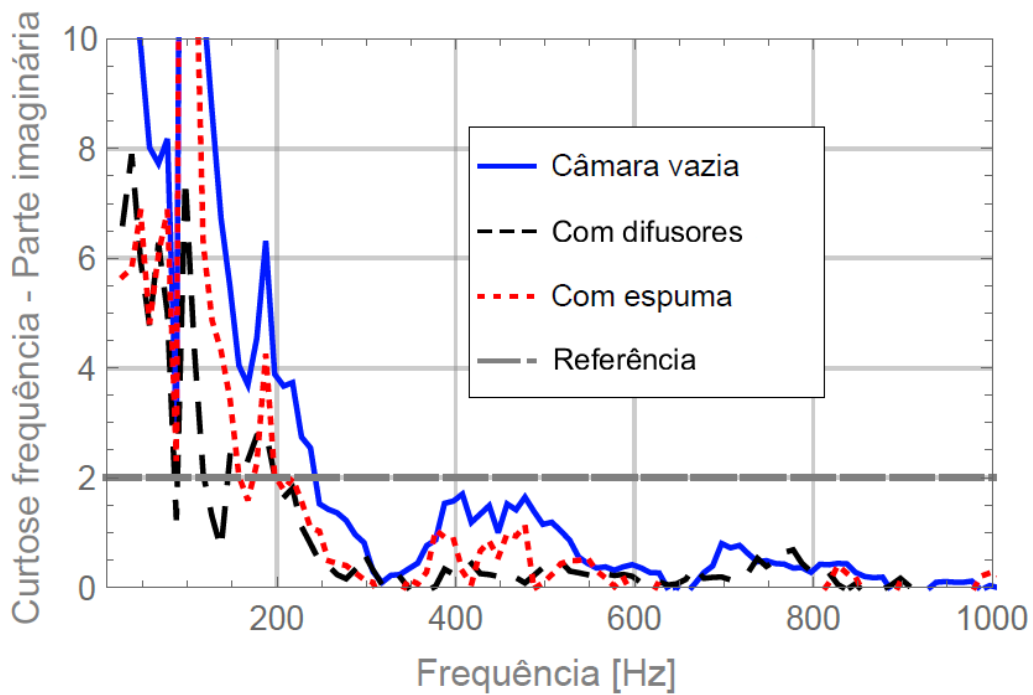
Cabe citar que a quantidade de espuma utilizada na câmara real é proporcionalmente bem inferior ao utilizado na câmara reduzida. Outro fato a se atentar é que praticamente todo objeto possui um certo grau de absorção em certas frequências, relacionado com sua frequência fundamental.

Figura 20 - Gráfico da curtose de respostas ao impulso no domínio da frequência (parte real) medidas em câmara real



Fonte: Própria, 2019.

Figura 21 - Gráfico da curtose de respostas ao impulso no domínio da frequência (parte imaginária) medidas em câmara real



Fonte: Própria, 2019.

Tabela 6 - Frequência de transição para algumas configurações da câmara real

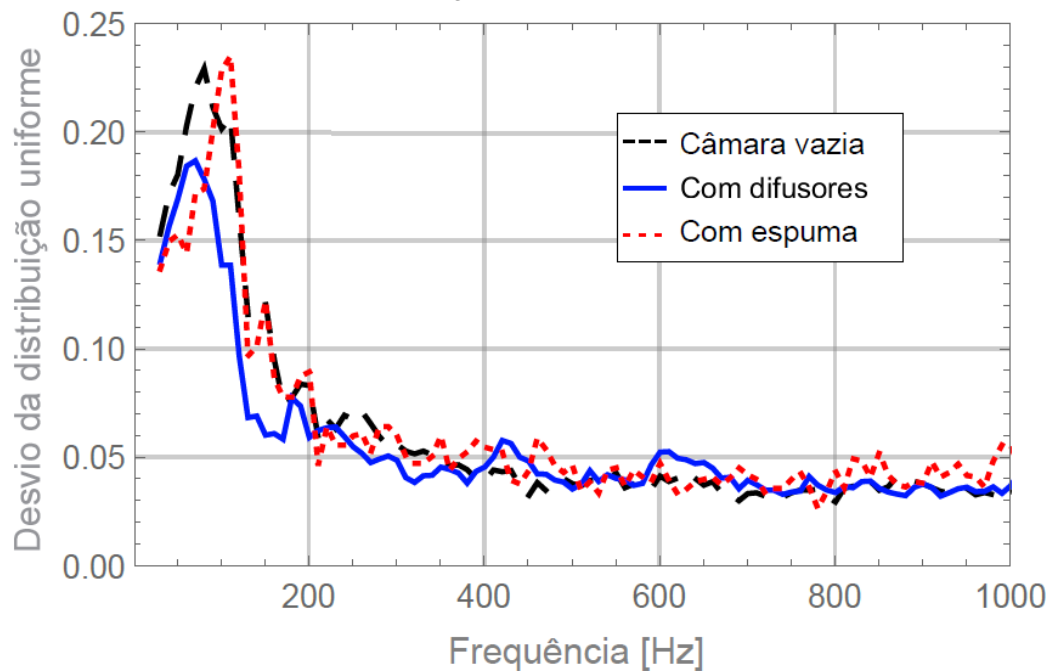
Configuração	Frequência de transição (Hz)
Câmara vazia	352
Com espuma	300
Com difusores	200

Fonte: Própria, 2019.

4.2.4 Distribuição dos valores de fase da função de transferência

Como métrica complementar às demais foi analisada a distribuição dos valores de fase da função de transferência. Quando essa distribuição é uniforme, conforme mencionado antes, uma condição necessária para o campo difuso é atingida. Para analisar esse fato foi calculado o desvio para a condição de uniformidade, de modo que quando o valor se aproxima de zero a distribuição se aproxima da uniforme.

Figura 22 - Desvio da distribuição uniforme da fase da função de transferência para medições em câmara real



Fonte: Própria, 2019.

É possível perceber, da Figura 22, que a distribuição dos valores de fase começa a tender a uma que é uniforme em frequências próximas, mas ligeiramente superiores à de transição, quando comparadas com aquelas obtidas com a curtose, apresentada na seção anterior. Uma dificuldade ainda de se lidar com essa grandeza é também a falta de valores de referência.

4.3 Avaliação dos resultados

Com os resultados obtidos pode-se analisar as métricas abordadas quanto à relação com a difusão do campo acústico. A norma ISO 3741, por exemplo, apresenta um parâmetro que está somente ligado ao aspecto de homogeneidade do campo, uma das duas condições de difusividade. Os gráficos fornecidos para tal parâmetro demonstram que alguns valores atendem o critério da norma apenas a partir de 2500 Hz para a câmara reduzida, e que para a câmara real os valores se aproximam do que seria necessário para qualificar a câmara, a partir de 350 Hz.

Valores de desvio padrão de NPS para as câmaras com espuma, no geral, sugerem que a absorção adicional age no sentido de piorar a difusão do campo acústico, quanto à homogeneidade, segundo esse critério. Principalmente conforme observado para a câmara reduzida. Atenta-se também ao fato de que valores para câmara vazia e com difusores não apresentaram muita diferença, apesar de a adição de difusores ser uma forma de, teoricamente, aumentar a difusão do campo. Uma observação anotada aqui é de que desvio padrão do NPS foi utilizado nos estudos conduzidos sobre frequência de transição, conforme descrito por Jacobsen e Juhl (2013).

A curtose de respostas ao impulso no domínio do tempo é um fator que, segundo Jeong (2016a), leva em consideração tanto a homogeneidade do campo acústico quanto sua isotropia. Sugere-se que a espuma (amortecedor) age contra a condição de difusão, tendo maiores valores para curtose, enquanto a adição de difusores age a favor, gerando curtose de menor valor. Observa-se que essa situação foi de encontro aos valores aferidos. Chama-se a atenção ao fato que esta é uma métrica recente, e não ter ainda muitos valores de referência. Ainda assim, os valores da

curtose média ao longo da janela de observação, tanto para câmara reduzida quanto para a real, demonstram coerência com o estudo de Jeong (2016a).

A análise da curtose na frequência, para as duas câmaras, possibilitou averiguar como diferentes configurações de difusores/absorvedores alteram a frequência de transição da câmara. Os resultados da câmara reduzida e da real demonstram que tanto para a câmara com difusores quanto com espuma a frequência de transição diminui. Para a câmara reduzida a redução foi maior na configuração com espuma, enquanto na real isso ocorreu na situação com difusores. Essa diferença pode estar ligada a alguns fatores como a diferente configuração geométrica das salas e a quantidade de espuma utilizada nos dois casos. Ainda é importante citar que os próprios difusores em si, podem absorver parte da energia sonora causando também diminuição na frequência de transição. Essa diminuição é bem notória principalmente na câmara real, onde houve uma queda maior do que com espuma.

As frequências de transição notadas na curtose na frequência demonstram uma certa relação com a métrica do desvio da distribuição uniforme de fase. A partir de frequências ligeiramente maiores que as de transição anotadas, os gráficos de desvio da distribuição de fase começam a tender a níveis mais uniformes. Até o momento, ela não apresenta uma grande vantagem em relação ao uso da curtose no domínio da frequência.

5 CONCLUSÕES

Conforme já mencionado, o desvio padrão de NPS parece ser altamente correlacionado às métricas aqui apresentadas, aferidas a partir das Funções de Transferência. Ou seja, ele guarda uma relação com a homogeneidade do campo sonoro, mas também com a condição de superposição modal. Entretanto, a métrica que usa a curtose no domínio da frequência parece ser mais clara para apontar a frequência de transição.

Com exceção da curtose calculada a partir da RI, não é possível, a partir dos resultados aqui apresentados, apontar uma correlação direta entre isotropia e as métricas estudadas. Esta métrica apresenta resultados coerentes com relação ao grau de difusão do campo acústico, indicando ainda que a adição de difusores tende a beneficiar a difusão e a adição de absorvedores, à piorá-la. Seu uso efetivo, no entanto, depende de estudos mais aprofundados visando uma sistematização do procedimento. Talvez seja possível, por exemplo, usá-la por bandas de frequências e não em uma banda larga (125 Hz a 4000 Hz), conforme originalmente sugerido.

Eventualmente, o procedimento sugerido por Jeong (2016a) pode ser usado em conjunto com o que usa a curtose no domínio da frequência em estudos futuros.

Em relação à câmara reverberante maior, a curtose aferida no domínio do tempo mostra que a instalação dos sete difusores parece beneficiar o campo sonoro em relação à condição de difusão. Por outro lado, eles parecem também funcionar como absorvedores de membrana. Sugere-se realizar um teste com acelerômetro e martelo de impacto para verificar as primeiras frequências naturais dos mesmos. Outra sugestão é a de provar a instalação de difusores de volume (nas paredes).

REFERÊNCIAS

AVELAR, Márcio; OLIVEIRA BONIFÁCIO, PAULO ROBERTO; BERTOTI, ELVIS; BRANDÃO, ERIC; CATAI, RODRIGO EDUARDO. **Determinação da faixa de frequência para a abordagem estatística em acústica de salas.** In: XXVIII ENCONTRO DA SOBRAC, 2018, Porto Alegre. XXVIII Encontro da SOBRAC, 2018.

BISTAFA, S. R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído.** São Paulo: Blucher, 2011.

BRADLEY, D. T.; MÜLLER-TRAPET, M.; ADELGREN, J.; VORLÄNDER, M. **Effect of boundary diffusers in a reverberation chamber: Standardized diffuse field quantifiers.** J. Acoust. Soc. Am. 135 (4), 2014.

BRANDÃO, E. **Acústica de Salas – Projeto e Modelagem.** São Paulo: Blucher, 2016.

CAVALCANTE, Ian Moreira; FELCHACK, Vinícius da Maia. **Medição do coeficiente de espalhamento acústico de incidência aleatória em câmara reverberante em escala reduzida.** 2016.

C.-H. JEONG. **Kurtosis of room impulse responses as a diffuseness measure for reverberation chambers.** J. Acoust. Soc. Am. 139, 2016a.

C.-H. JEONG. **Diffuse sound field: Challenges and misconceptions.** In: Internoise, 2016b, Hamburg.

GEORGE, D; MALLERY, P. **IBM SPSS Statistics 22 Step by Step: A Simple Guide and Reference.** Pearson, 2016.

ISO 354. **Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room.** 2003.

ISO 3741. **Acoustics - Determination of sound power levels using sound pressure - precision methods for reverberation test rooms.** 2010.

JACOBSEN, F; JUHL, PM. **Fundamentals of General Linear Acoustics.** Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2013.

KUTTRUFF, H. **Acoustics: An Introduction**. CRC Press, 2006.

KUTTRUFF, H. **Room Acoustics**. Oxon: Spon Press, 2009.

SANT'ANA, Luis Henrique. **Automação da movimentação de dispositivos de áudio em câmara reverberante em escala reduzida para medição do coeficiente de espalhamento sonoro de incidência aleatória**. 2018.