

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

NELSON LUIS MAURIOS LEGAT FILHO

**DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA ACÚSTICA E DO NÚMERO DE ONDA DE
PLACAS FINAS DE FIBRA DE COCO COM QUATRO MÉTODOS
EXPERIMENTAIS DE AVALIAÇÃO**

CURITIBA

2017

NELSON LUIS MAURIOS LEGAT FILHO

**DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA ACÚSTICA E DO NÚMERO DE ONDA
PLACAS FINAS DE FIBRA DE COCO COM QUATRO MÉTODOS
EXPERIMENTAIS DE AVALIAÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito à obtenção de Mestre em Engenharia Mecânica, Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Ciências exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Key Fonseca de Lima

CURITIBA

2017

NELSON LUIS MAURIOS LEGAT FILHO

**DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA ACÚSTICA E DO NÚMERO DE ONDA DE
PLACAS FINAS DE FIBRA DE COCO COM QUATRO MÉTODOS EXPERIMENTAIS
DE AVALIAÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito à obtenção
do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Curso
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
Departamento de Ciências Exatas e de Tecnologia,
Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Key Fonseca de Lima - Orientador
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Prof. Dr. Julio César de Almeida
Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr. Nilson Barbieri
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Prof. Dr. Renato Barbieri
Universidade do Estado de Santa Catarina

Curitiba, 22 de fevereiro de 2017.

À minha família que esteve presente em todos os meus momentos importantes e dificuldades.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Nelson e Rosângela que sempre me incentivaram e apoiaram nas minhas decisões.

Aos meus irmãos Lige e Gustavo pelo apoio e conversas de conforto nas horas difíceis.

À todas as pessoas que me orientaram e apoiaram para que este trabalho fosse feito.

Aos meus avôs e avós pelos ensinamentos de vida e pelo carinho.

Aos professores Key F. Lima e Nilson Barbieri pelos conhecimentos, paciência, conversas nas horas descontraídas e principalmente pela amizade.

À todos os amigos e amigas da pós-graduação da PUC-PR, pelos copos de café, almoço e conversas jogadas fora.

À CAPES pelo apoio financeiro.

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem-feita ou não faz”

Ayrton Senna

RESUMO

A poluição sonora vem se tornando um problema comum nas grandes metrópoles. O Brasil possui uma frota com mais de 40 milhões de veículos automotores circulando nos dias de hoje (ANFAVEA, 2016). Para tal problema, o ser humano está buscando alternativas de materiais absorventes para diminuir estes ruídos indesejáveis e prejudiciais à nossa saúde. A maior parte destes materiais são encontrados na natureza, pois os melhores dissipadores acústicos são fibras ou materiais que contenham poros, como exemplo, a fibra de coco, onde as fibras de sua casca são descartada pelos produtores. Paralelo a isto, a indústria automotiva vem pesquisando materiais alternativos para a substituição de materiais sintéticos, utilizados em forros de veículos, os quais não são viáveis para descarte. Portanto, o objetivo deste trabalho é determinar as propriedades acústicas de materiais absorventes, neste caso, da fibra de coco. O comportamento acústico das ondas sonoras dentro de materiais absorventes podem ser determinadas através da avaliação da impedância característica e do número de onda complexo. Essas duas grandezas foram obtidas com o Método das Duas Cavidades Modificado, Método das Duas Espessuras, Método da Matriz de Transferência (ASTM E2611-09, 2009) e através das equações empíricas de Delany e Bazley (1970), com posse da resistividade ao fluxo seguindo a norma ASTM C522-03 (2009). Para o primeiro método foi construído um tubo de impedância em alumínio de acordo com a norma (ASTM E2611-09, 2009) e para os demais métodos foi utilizado o tubo de impedância da EuroAcoustic, modelo SCS 9020B/K. Os resultados de impedância característica e número de onda tiveram boa concordância para os métodos das duas cavidades e método da matriz de transferência, comparados as equações empíricas de Delany e Bazley. Entretanto os resultados mostraram que uso do método da matriz de transferência e o método das duas espessuras mostram-se inadequados para caracterizar materiais de espessura fina.

Palavras-chave: impedância característica, número de onda, métodos experimentais, material absorvente, tubo de impedância, resistividade ao fluxo.

ABSTRACT

Noise pollution is becoming a common problem in the metropolis. Nowadays, Brazil have a fleet with more than 40 million automotive vehicles circulating (ANFAVEA, 2016). For such problem, the human being is searching alternatives of absorber materials to reduce those undesirable noises, also harmful to our health. The most part of these materials are find in nature, since the best acoustic dissipation are fibers or materials that have porous, for example, the producers discard the husk of the coconut fiber. Parallel to this, the automotive industry is researching alternative materials for the synthetic materials substitution, used in automotive roof trim, which those are not viable for discard. Hence, the objective of this work is determine acoustic properties of the absorbers materials, in this case, the coconut fibe. The acoustic behavior of plane waves inside of the absorbers materials can be determinate by the evaluation of the characteristic impedance and the complex wave number. Those two greatness was obtained with the Two Cavity Modified Method, the Two Thickness Method, the Transfer Matrix Method (ASTM E2611-09, 2009) and through the empiric equations of Delany and Bazley (1970), with resistivity flow following ASTM C522-03 (2009) norm. For the first method was built an impedance aluminum tube following the ASTM E2611-09 norm and for the other methods, the EuroAcoustic impedance tube, model SCS 9020B/K. The results of the characteristic impedance and the wave number had good agreement for the two-cavity method e transfer matrix method, compared to the Delany and Bazley equation. However, the results showed that the transfer matrix method and the two-thickness method appear inadequate to characterize thin materials.

Keywords: characteristic impedance, complex wave number, experimental methods, impedance tube, airflow resistivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Propagação da onda plana.....	33
Figura 2 – Formas de onda. (a) Tom puro, (b) ruído.....	35
Figura 3 - Representações de espectro linear (a) e (b) e contínuo (c) e (d).....	36
Figura 4 - Fonte sonora esférica	37
Figura 5 - Fonte sonora em coordenadas cilíndricas.....	38
Figura 6 - Fonte sonora plana.....	38
Figura 7 – Elemento infinitesimal de um fluido.....	40
Figura 8 – Posição inicial e deslocamento de um fluido de espessura infinitesimal.....	41
Figura 9 - Gráfico de uma onda plana ao longo do tempo	45
Figura 10 – Representação de um elemento de tubo circular com comprimento “ L ”	46
Figura 11 - Volume infinitesimal tridimensional	52
Figura 12 - Coeficiente de absorção para uma amostra de espuma comum com 42 e 84 mm de espessura.....	55
Figura 13 - Coeficiente de absorção para amostra com 42 mm pelo método da matriz de transferência.....	55
Figura 14 – Tubo de impedância – Função de transferência.....	60
Figura 15 - Esquematização do tubo de impedância para o método das duas cavidades modificado.	66
Figura 16 – Impedâncias superficiais de um material absorvente.....	67
Figura 17 - Tubo de impedância com amostras de 1 (a) e 2 (b) espessuras	70
Figura 18 – Esquema simplificado da bancada de resistividades ao fluxo	71
Figura 19 – Representação de um silenciador	72
Figura 20 – Esquematização do tubo de impedância com terminação anecóica.....	74
Figura 21 - Esquematização do tubo de impedância com terminação rígida	75

Figura 22 - Fluxograma dos procedimentos.....	80
Figura 23 - Fibra de coco desidratada	80
Figura 24 – Anéis para amostras de 5 e 10 mm de espessura respectivamente e tampas.	81
Figura 25 – Fibra de coco e cola pesadas.	81
Figura 26 – Mistura (fibra/coco) inserida e prensada no molde.....	82
Figura 27 – Retirada da amostra após 24 horas.....	82
Figura 28 – Estufa para secagem das amostras	83
Figura 29 – Terminação anecóica.....	85
Figura 30 – Terminação rígida (latão).....	86
Figura 31 - Coeficiente de absorção (α) das terminações anecóica e rígida.....	86
Figura 32 - Porta amostra de nylon entrelaçado com Parnell nó.....	87
Figura 33 - Posicionamento dos microfones nas buchas de nylon.....	88
Figura 34 - Bancada de medição montada, segundo a norma ASTM E2611-09.	88
Figura 35 - Tubo de impedância para o MFT, MDCM e MDE	89
Figura 36 - Tudo de impedância com dois microfones.	90
Figura 37 - Tubo de impedância com 4 microfones.....	90
Figura 38 - Brüel & Kjær Type 3160-A-042.....	91
Figura 39 - Brüel & Kjær Type 4935 de ¼” pré-polarizados.....	91
Figura 40 - Microfone ½” Brüel & Kjær Type 4189-A pré-polarizados	91
Figura 41 – Posicionamento dos microfones – (a) tubo de impedância de 2 microfones (b) tubo de impedância de 4 microfones.	93
Figura 42 - Bancada de resistividade ao fluxo.	95
Figura 43 - Válvula reguladora de pressão.....	95
Figura 44 - Rotâmetros.....	96
Figura 45 - Manômetro diferencial de pressão.....	96

Figura 46 - Fonte alimentadora	97
Figura 47 - Gráfico da resistividade ao fluxo da fibra de coco para amostras de 5 mm de espessura.	100
Figura 48 – Média da resistividade ao fluxo da fibra de coco para amostras de 5 mm de espessura.	100
Figura 49 - Gráfico da resistividade ao fluxo da fibra de coco para amostras de 10 mm de espessura.	101
Figura 50 - Média da resistividade ao fluxo da fibra de coco para amostras de 10 mm de espessura.	101
Figura 51 - Impedância característica normalizada da fibra de coco (5 e 10 mm de espessura) obtidas por Delany e Bazley.....	103
Figura 52 – Número de onda complexo normalizado da fibra de coco (5 e 10 mm de espessura) obtidas por Delany e Bazley.....	104
Figura 53 - Impedância característica da espuma obtida pelo MDC.....	105
Figura 54 - Número de onda complexo da espuma obtida pelo MDC.....	105
Figura 55 - Impedância característica normalizada da fibra de coco com 5 mm de espessura (MDC)	106
Figura 56 - Impedância característica normalizada da fibra de coco com 10 mm de espessura (MDC)	107
Figura 57 – Número de onda complexo normalizado da fibra de coco com 5 mm de espessura (MDC)	107
Figura 58 - Número de onda complexo normalizado da fibra de coco com 10 mm de espessura (MDC)	108
Figura 59 - Impedância característica normalizada média da fibra de coco com 5 mm de espessura (MDC)	109
Figura 60 - Número de onda complexo médio normalizado da fibra de coco com 5 mm de espessura (MDC)	109

Figura 61 - Impedância característica normalizada da fibra de coco com 10 mm de espessura (MDC)	110
Figura 62 - Número de onda complexo médio normalizado da fibra de coco com 10 mm de espessura (MDC)	110
Figura 63 - Impedância característica normalizada da fibra de coco com 5 mm de espessura (MDE)	112
Figura 64 - Impedância característica normalizada da fibra de coco com 10 mm de espessura (MDE).....	112
Figura 65 – Número de onda complexo normalizado da fibra de coco com 5 mm de espessura (MDE).....	113
Figura 66 - Número de onda complexo normalizado da fibra de coco com 10 mm de espessura (MDE).....	113
Figura 67 - Impedância característica média normalizada da fibra de coco com 5 mm de espessura (MDE).....	114
Figura 68 - Impedância característica média normalizada da fibra de coco com 10 mm de espessura (MDE).....	114
Figura 69 - Número de onda complexo médio normalizado da fibra de coco com 5 mm de espessura (MDE)	115
Figura 70 - Número de onda complexo médio normalizado da fibra de coco com 10 mm de espessura (MDE)	115
Figura 71 - Impedância característica normalizada para amostras de 5 mm (MMT)	117
Figura 72 - Impedância característica normalizada para amostras de 10 mm (MMT)	118
Figura 73 - Número de onda complexo normalizado para amostra de 5 mm (MMT)	118
Figura 74 - Número de onda complexo normalizado para amostra de 10 mm (MMT)	119
Figura 75 - Impedância característica normalizada média para amostras de 5 mm (MMT).....	119
Figura 76 - Número de onda complexo normalizado médio para amostra de 5 mm (MMT)	120
Figura 77 - Impedância característica normalizada para amostras de 10 mm (MMT)	120

Figura 78 - Número de onda complexo normalizado médio para amostra de 10 mm (MMT) ..	121
Figura 79 – Coerência dos microfones da amostra de fibra de coco para a terminação rígida ..	121
Figura 80 – Coerência dos microfones da amostra de fibra de coco para a terminação anecóica	122
Figura 81 - Comparação dos métodos da impedância característica das amostras de fibra de coco com 5 mm.	124
Figura 82 - Comparação dos métodos da impedância característica das amostras de fibra de coco com 10 mm.	124
Figura 83 - Comparação dos métodos do número de onda complexo das amostras de fibra de coco com 5 mm.	125
Figura 84 - Comparação dos métodos do número de onda complexo das amostras de fibra de coco com 10 mm.	125
Figura 85 - Comparação dos métodos, avaliação a impedância característica para espuma comum.	126
Figura 86 - Comparação dos métodos, avaliação do número de onda para espuma comum.	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Proporção fibra/cola.....	82
Tabela 2 - Amostras de fibra de coco de 5 mm de espessura e 100 mm de diâmetro.....	83
Tabela 3 - Amostras de fibra de coco de 10 mm de espessura e 100 mm de diâmetro.....	84
Tabela 4 - Microfones recomendados para frequências limites	87
Tabela 5 - Resumo dos resultados para fibra de coco e espuma comum	128

LISTA DE SÍMBOLOS

a: aceleração;

A: constante de propagação do material absorvente;

B: constante de atenuação do material absorvente;

c: velocidade do som local;

d: vetor velocidade da partícula;

f: frequência;

f_c : frequência de corte;

F_{liq} : força líquida;

f_{min} : frequência mínima;

f_{max} : frequência máxima;

$G_{11}(f)$: densidade de auto espectral ou o espectro de potência do microfone 1;

$G_{12}(f)$: densidade espectral cruzada ou o espectro cruzado de potência do microfone 2 em relação ao microfone 1;

$G_{22}(f)$: densidade de auto espectral ou o espectro de potência do microfone 2;

$G_{1s}(f)$: densidade espectral cruzada ou espectro de potência da fonte em relação ao microfone 1;

$G_{s2}(f)$: densidade de espectral cruzada ou espectro de potência do microfone 2 em relação a fonte;

$G_{ss}(f)$: densidade de auto espectral ou espectro de potência da fonte;

$H_{12}(f)$: função de transferência;

i: unidade imaginária;

I: intensidade sonora;

I_{ref} : intensidade de referência;

k: número de onda;

$\tilde{k}$: número de onda complexo do material absorvente;

k_0 : número de onda em propagação no ar;

L_p : nível de pressão sonora;

m : massa;

NI : nível de intensidade sonora;

NPS : nível de pressão sonora;

NWS : nível de potência sonora;

p : pressão sonora;

p_{ref} : pressão de referência sonora;

p_{rms} : pressão média quadrada;

p_e : pressão sonora de entrada

p_s : pressão sonora de saída

p_0 : máxima amplitude na pressão sonora instantânea;

p_{mic1} : pressão medida no microfone 1;

p_{mic2} : pressão medida no microfone 2;

p_{mic3} : pressão medida no microfone 3;

p_{mic4} : pressão medida no microfone 4;

r : resistência ao fluxo específico;

r : raio

r_0 : resistividade ao fluxo de ar;

$\bar{R}$: constante ideal dos gases;

$R(f)$: coeficiente de reflexão sonoro;

s : distância entre os microfones;

S : área de seção transversal;

$S(f)$: sinal da fonte sonora no domínio da frequência;

t : espessura da amostra;

T : temperatura;

$TL_n(f)$: perda de transmissão sonora para incidência normal;

u : componente do vetor velocidade da partícula unidimensional;

u_x : velocidade do ar na direção transversal a amostra em m/s;

v : componente do vetor velocidade da partícula na direção y ;

v_e :velocidade volumétrica de entrada;

v_s :volumétrica de saída;

V : velocidade volumétrica do escoamento incompressível;

V : volume final do elemento após a passagem da onda sonora;

V_0 : volume inicial do elemento;

w : componente do vetor velocidade da partícula na direção z ;

W : potência sonora;

W_0 : a potência sonora de referência;

x : posição na direção do eixo x ;

X : resistência característica do material absorvente;

Y : reatância característica do material absorvente;

$\tilde{z}$: impedância característica do material absorvente;

Z_0 : impedância característica do meio;

Z_s : impedância superficial;

$\alpha(f)$: coeficiente de absorção sonoro;

γ : taxa de calor específico;

γ_{12}^2 : função coerência;

Δp : diferença de pressão entre os dois lados da amostra;

ζ : componente do deslocamento da partícula na direção z ;

η : componente do deslocamento da partícula na direção y ;

λ : comprimento de onda

ξ : componente do deslocamento da partícula na direção x ;

ρ : densidade do fluido perturbado após a passagem da onda sonora;

ρ_0 : densidade do fluido não perturbado;

τ : coeficiente de transmissão sonoro;

ϕ : fase da função de transferência complexa;

ω : frequência angular;

∇ : operador divergente;

∇^2 : operador Laplaciano;

C: condensação;

*: conjugado complexo;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1. CONTEXTO	20
1.2. OBJETIVOS	21
1.2.1. Objetivos específicos	21
1.3. JUSTIFICATIVA.....	22
1.4. CORPO DA DISSERTAÇÃO.....	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1. INTRODUÇÃO	23
2.2. MATERIAIS ABSORVENTES	23
2.3. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS	26
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	32
3.1. INTRODUÇÃO	32
3.2. CONCEITOS BÁSICOS.....	32
3.3. EQUAÇÃO DA ONDA PLANA UNIDIMENSIONAL	40
3.4. EQUAÇÃO DA ONDA TRIDIMENSIONAL.....	51
3.5. COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA (α)	54
3.6. IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA COMPLEXA ($\tilde{z}$) E NÚMERO DE ONDA COMPLEXO ($\tilde{k}$) 56	
3.7. RESISTIVIDADE AO FLUXO (r_0)	57
4. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO	59
4.1. INTRODUÇÃO	59
4.2. MÉTODO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA.....	59
4.3. CALIBRAÇÃO DOS MICROFONES	63
4.4. MÉTODO DAS DUAS CAVIDADES MODIFICADO.....	65
4.5. MÉTODO DAS DUAS ESPESSURAS.....	68
4.6. MÉTODO DE RESISTIVIDADE AO FLUXO	70
4.7. MÉTODO DAS DUAS CARGAS.....	72
5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	79
5.1. INTRODUÇÃO	79
5.2. FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS	79
5.3. CONSTRUÇÃO DO TUBO DE IMPEDÂNCIA PARA ATENDER A NORMA ASTM E2611-09 (2009).....	84

5.4. BANCADAS DE MEDIÇÃO.....	89
5.5. APARATO DE RESISTIVIDADE AO FLUXO.....	94
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	98
6.1. INTRODUÇÃO	98
6.2. ANÁLISE 1	99
6.3. ANÁLISE 2	104
6.4. ANÁLISE 3	111
6.5. ANÁLISE 4	116
6.6. ANÁLISE 5	122
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	127
REFERÊNCIAS.....	129
APÊNDICES	136

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO

Com as atuais preocupações ambientais do planeta, o ser humano vem buscando e inovando na criação de materiais alternativos com a finalidade de diminuir ou eliminar aqueles prejudiciais ao meio ambiente. Nas metrópoles, além dos problemas ambientais, encontramos um outro fator prejudicial à saúde, a poluição sonora. As cidades estão crescendo e os bens de consumo são cada vez mais acessíveis à população e como consequência desta facilidade, vem causando um aumento dos veículos em nossas cidades. No anuário estatístico da ANFAVEA de 2016, o Brasil possui 41,7 milhões de veículos automotores circulando, o que contribui para o problema dos ruídos indesejáveis e consequentemente da poluição sonora. Devido a este fato, a aplicação do controle de ruído vem sido um fator comum e importante nas construções e em automóveis.

Interligando estes dois assuntos citados (meio ambiente e poluição sonora), o ramo da acústica vem abrindo novas fronteiras com objetivo de aperfeiçoar materiais e suas propriedades acústicas. Uma delas é a utilização de materiais absorventes alternativos e sustentáveis em filtros acústicos ou em isolamentos acústicos ou ainda, no tratamento de superfícies acústicas.

O Brasil é conhecido pela sua biodiversidade, mas também pela sua vasta área florestal, isto nos proporciona diversas possibilidades de utilização dos seus materiais naturais. Além de produtos de perfumaria, combustíveis, têxtil, etc., uma aplicação diferenciada está na acústica.

Materiais fibrosos e porosos são os tipos de materiais absorventes mais utilizados neste ramo, pois possuem boas propriedades acústicas. Com o objetivo de aumentar o desempenho de absorção dos materiais naturais, já que muitos destes materiais são sintéticos e utilizam compostos poluentes como por exemplo, o poliuretano (PU), largamente utilizado em espumas, tintas, plásticos, etc. e seu descarte é inviável e prejudicial ao ecossistema, a caracterização das propriedades acústicas como impedância acústica e número de onda são extremamente importantes para determinar

características como o coeficiente de reflexão e absorção, coeficiente de transmissão e perda de transmissão, entre outros.

A eficiência acústica dos materiais absorventes aplicados ao controle de ruído podem ser caracterizadas por duas grandezas, pela impedância acústica e pelo número de onda do material. Esta dissertação realizará estudos sobre impedância característica e número de onda de um material absorvente através da fabricação de um tubo de impedância para quatro microfones, o qual será construído e validado de acordo com a norma ASTM E2611-09, 2009 (*Standard test method for measurement of normal incidence sound transmission of acoustical materials based on the transfer matrix method*) e comparado a outros métodos: o método das duas cavidades, o método das duas espessuras e a partir da resistividade ao fluxo.

Artigos recentes exploram novas possibilidades, buscando alternativas e de preferência materiais naturais com baixo custo e encontrados em abundância na natureza, ou recicláveis. Nesta dissertação o material em estudo será a fibra natural de coco.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem o objetivo de caracterizar as propriedades acústicas de materiais absorventes em baixas frequências e com pequenas espessuras através da norma ASTM E2611-09 (2009) e comparar os resultados junto a outros métodos experimentais.

1.2.1. Objetivos específicos

Os objetivos específicos serão:

- a) Construção e validação da bancada de experimento com base na norma ASTM E2611-09 (2009).
- b) Determinar a resistividade ao fluxo da fibra de coco e espuma comum aplicando a norma ASTM-C522-03, 2010 (*Standard Test Method for Airflow Resistance of Acoustical Materials*).
- c) Determinar a impedância característica e número de onda complexos utilizando o método das duas cavidades, duas espessuras, matriz de transferência e a formulação empírica de Delany e Bazley (1970).

d) Comparar os resultados entre os métodos.

1.3. JUSTIFICATIVA

Em consequência do descarte das fibras na agricultura e, juntamente às com empresas automotivas as quais vem buscando alternativas de materiais para filtros acústicos, bancos automotivos e forros de tetos veiculares. Uma possível solução para estes problemas, é a aplicação de materiais naturais como a fibra de coco, confeccionadas em placas finas, com objetivo de substituir os materiais sintéticos, como o teto de forro veicular, geralmente fabricado com poliuretano (PU), onde são extremamente tóxicos quando queimados e inviáveis ao descarte.

1.4. CORPO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação será dividida nos seguintes capítulos:

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica – Neste capítulo será apresentado um breve histórico sobre assuntos relacionados a experimentos, métodos, formulações e fibras naturais, os quais servirão de base para esta dissertação;

Capítulo 3: Conceitos Básicos - Neste capítulo serão apresentados conceitos sobre acústica, normas e equações aplicadas para determinar as propriedades acústicas dos materiais e a construção do tubo de impedância;

Capítulo 4: Técnicas de Medição – Neste capítulo serão descritos os métodos experimentais aplicados para caracterizar materiais absorventes;

Capítulo 5: Procedimentos Metodológicos – Neste capítulo serão descritas todas as etapas realizadas dos materiais e construção do tubo de impedância para o processo de medição;

Capítulo 6: Análises e Resultados – Neste capítulo serão mostradas todas as propriedades acústicas dos materiais absorventes;

Capítulo 7: Considerações Finais – Neste capítulo serão mostradas as conclusões desta dissertação, discussões sobre os resultados e sugestões para projetos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será mostrada uma breve revisão bibliográfica dos assuntos tratados neste trabalho como: formulações empíricas, técnicas experimentais, materiais absorventes e fibra de coco. Por motivo das suas características de atenuação acústica significativas em altas frequências, materiais fibrosos estão sendo utilizados na absorção de som interior e silenciadores de maquinários que geram ruídos de alta frequência. Apesar das características acústicas, o uso de materiais tradicionais absorventes no interior de sistemas de exaustão de combustão interna estão deixando de ser usados, por consequência das preocupações com o ambiente, ruptura das fibras por consequência do escoamento e falhas mecânicas/químicas das fibras em altas temperaturas, (LEE, 2005).

Motores à combustão são um exemplo de fontes sonoras de baixa frequência e atualmente forros automotivos são usados para atenuação dos ruídos, porém são sintéticos. A determinação das propriedades acústicas de materiais absorventes tem por finalidade descobrir o comportamento destes materiais e verificar se o mesmo poderá exercer a mesma função do outro material com custos reduzidos.

2.2. MATERIAIS ABSORVENTES

Materiais absorventes são materiais onde parte da energia acústica é transformada em energia térmica através do atrito viscoso entre os interstícios dos materiais porosos e fibrosos, (GERGES, 2005).

Wassilieff (1996) iniciou um estudo para determinar propriedades acústicas utilizando de amostras de serragem prensada e MDF (*Medium Density Fiber*). Foram avaliadas propriedades

como: resistividade ao fluxo, tortuosidade (fator estrutural dos poros do material absorvente, ALLARD, 2009), porosidade e coeficiente de absorção das amostras. O autor comparou os resultados através da formulação empírica de Delany e Bazley (1970) e obteve bons resultados. Além disso, Wassilieff afirma que ocorreu uma boa concordância entre a teoria de Delany e Bazley e as medições para placas comerciais de madeira com valores altos de tortuosidade.

Nor *et al.*, (2004) realizou um estudo preliminar em fibras de coco com relação ao tempo de reverberação e perda de transmissão quando aplicados em ambientes fechados. Neste artigo, o autor realiza testes em baixas frequências e na busca de um coeficiente de absorção elevado, utilizou placas micro perfuradas e lacunas de ar entre as amostras de fibra de coco. Os resultados mostraram que o coeficiente de absorção é baixo para baixas frequências, pois seu comprimento de onda é muito maior que o diâmetro dos poros, como consequência, a dissipação da energia sonora em energia térmica será menor.

Posteriormente, Fouladi *et al.*, (2009) verificou que o coeficiente de absorção em baixas frequências era baixo, neste trabalho, adequou o experimento colocando uma placa perfurada antes e depois das amostras espaçadas por uma lacuna de ar em fibras de coco. O autor utilizou os modelos de Allard, Attala e Sgard e Beranek e Vér para verificação dos resultados. Esta aplicação de placas perfuradas juntamente à lacunas de ar teve um aumento significativo no coeficiente de absorção, para baixas frequências.

Ersoy e Küçük (2009) verificaram o uso de fibras de chá variando a espessura e adicionando materiais como poliéster e algodão formando placas sanduíches. Os autores constataram um aumento no coeficiente de absorção significativo com o uso desta placa.

Mahzan (2010) estudou a utilização de painéis contendo fibra de coco misturadas com borracha reciclada e poliuretano como resina. As amostras com diferentes porcentagens de cada elemento foram avaliadas. Neste trabalho, o autor concluiu que o melhor coeficiente de absorção foi obtido pela placa contendo 75% de fibra de coco e 25% de poliuretano.

Benkreira *et al.*, (2011) desenvolveu estudos com grânulos de pneus moído e pedaços de tapetes aglomerados com compostos químicos, comparando-os com materiais comerciais (espumas de poliuretano ou polímeros similares). Foram analisadas propriedades como: densidade, porosidade, resistividade ao fluxo, tortuosidade e rigidez. Além destas propriedades, houve um aumento significativo do coeficiente de absorção para médias e altas frequências e também como um material sustentável.

Novamente Fouladi *et al.*, (2011), analisaram o coeficiente de absorção em amostras de fibra de coco. Neste trabalho, dois tipos de fibra de coco foram avaliados: fibra de coco industrializada contendo cola e fibra de coco fresca. Testes de resistividade ao fluxo foram feitos e aplicados em modelos analíticos de Delany e Bazley (1970) e Biot-Allard (1993) sobre as amostras, acrescentando experimentos com tubo de impedância para comparar resultados. Os autores concluíram que a fibra natural tem coeficiente de absorção de 0.8 em frequências acima de 1360, 940 e 578 Hz para amostras de 20, 30 e 45 mm respectivamente. As amostras contendo a cola foram somente para união das fibras, porém teve uma redução do seu coeficiente de absorção, os picos na absorção que antes da cola estavam nas baixas frequências, passaram para as altas frequências. O autor sugere que a melhora do coeficiente de absorção é aplicação de placas perfuradas e lacunas de ar (cavidades) entre as amostras.

Asdrubali e Schiavoni *et al.*, (2012) determinaram o coeficiente de absorção e a eficiência acústica de fibras naturais como: quenafe, cânhamo, celulose, cana, sisal, bambu e comparadas com os materiais existentes no mercado (lã de rocha e lã de vidro), assim como o impacto ambiental causado pela fabricação dos mesmos. Os autores concluíram que o impacto causado por essas fibras são pequenos e que energia utilizada para confeccionar estes materiais também é baixa. Além disso, materiais naturais como bambu, quenafe, sisal e fibras de coco apresentaram bons desempenho de absorção, enquanto que cortiça ou borracha reciclada podem ser muito eficazes com isolamento acústico, assim como isolamento térmico.

Campos (2012) estudou o coeficiente de absorção da mistura das fibras de cana de açúcar com aveia. A autora produziu placas destas fibras e comparou a outros produtos comerciais como: lã de vidro, lã de rocha, SONIQUE, SONEEX e fibra de banana. A autora conclui que o valor do coeficiente de absorção da mistura das fibras cana/aveia obtiveram ainda valores próximos e que é possível utilizar esse material para competir no mercado. Observou que os coeficientes de absorção se encontraram dentro da norma ISO 11654, 1997 (*Acoustics Sound absorbers for use in buildings – Rating of sound absorption*) onde é aplicado para placas acústicas em construções.

Lacoste *et al.*, (2015) empregaram materiais como: espumas à base de baráúna e pinus com objetivo de determinar o coeficiente de absorção com amostras de diferentes espessuras em altas frequências e compará-las com fibra de vidro, lã de rocha e poliuretano utilizando um tubo de impedância. Como conclusão do trabalho, a espuma de baráúna acima de 30 mm de espessura obteve melhores resultados comparada a de fibra de vidro, vendida comercialmente.

Materiais porosos e fibrosos têm como característica serem ótimos isolantes acústicos. Isto se dá pelo fato da propagação das ondas sonoras, que quando incididas no material são dissipadas pelas vibrações das moléculas de ar contidas nos interstícios do interior do material, convertendo energia sonora em energia térmica devido ao atrito viscoso entre o ar e a fibra.

Estudos para determinar propriedades acústicas utilizam fibras como lã de rocha (fibra mineral de rocha vulcânica), fibras de vidro, lã de carneiro entre outras. Com o passar dos anos, a tecnologia desenvolveu materiais sintéticos e com propriedades acústicas relativamente melhores e com um custo reduzido, porém, algumas delas não são recicláveis ou descartáveis na natureza.

2.3. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS

Beranek (1942) foi um dos pioneiros a realizar estudos sobre a porosidade de materiais fibrosos. Neste artigo, ele baseia-se na Lei dos Gases ou Lei de Boyle, considerando o processo isotérmico. O experimento utilizado consistia em uma amostra dentro de um recipiente exposto a pressão atmosférica acoplado com um manômetro de coluna em “U”, a amostra é pressionada e o ar deslocado exerce pressão sobre o líquido do manômetro, mostrando a variação de volume de ar contida nos poros, assim foi possível calcular a porosidade através da vazão de ar expelida através do volume inicial e final.

Brown e Bolt (1942) foram um dos primeiros autores a determinar as propriedades acústicas como a impedância e absorção acústica através da resistividade ao fluxo do material. Os autores apresentaram uma fórmula empírica e diversos resultados com materiais absorventes. Um manômetro diferencial de pressão e a vazão volumétrica foram aplicados para determinar as propriedades acústicas. Neste trabalho os autores concluíram que variações de resistividade ao fluxo podem ser influenciadas pela turbulência decorrente das altas velocidades de escoamento durante as medições.

Scott (1946) determinou propriedades de fibras de lã de rocha como atenuação, ângulos de fase e impedância característica através de um aparato utilizando um microfone do tipo sonda. O autor determinou as partes reais e imaginárias da impedância característica a partir da impedância superficial do material absorvente.

A resistividade ao fluxo de um material é um fator extremamente importante para determinar o desempenho acústico de materiais absorventes e foi usado por Nichols em 1947 para avaliar

placas absorventes em aeronaves. Neste trabalho Nichols apresentou uma expressão empírica com objetivo de calcular a resistividade ao fluxo de um material com alta porosidade entre 0,9 e 1,0 considerando a sua espessura, a densidade de superfície e a transversal das fibras.

Scott (1946b), criou um aparato semelhante ao atual tubo de impedância, porém o tubo não possuía uma secção constante. Um amplificador foi utilizado para enviar sinais e para os mesmos serem captados pelos microfones. O equipamento era restrito na faixa de 100 a 5000 Hz. Neste artigo, Scott já sabia que para a onda se desenvolver completamente, o comprimento do tubo não podia exceder 0,58 da maior frequência de trabalho. Para medir a impedância acústica e número de onda, o autor aplicou lâ de rocha com uma polegada de espessura. Scott empregou o método da onda estacionária utilizando terminações rígidas e determinou valores de impedância acústica.

O método mais comum para determinar as propriedades acústicas de um material absorventes atualmente é o tubo de impedância, ou tubo de Kundt. Sua forma construtiva é relativamente simples e pode utilizar-se diversos tipos de materiais (bronze, alumínio, aço, PVC, etc). O tubo de impedância é um método eficaz, utilizado em diversos artigos, alguns citados anteriormente. Contudo, é preciso um lugar específico para realizar as medições, visto que tratam de microfones sensíveis a ruídos que poderão acarretar em erros de medição. Entretanto, algumas de suas técnicas são lentas, e para experimentos que necessitam avaliar baixas frequências, são necessários tubos de maior comprimento.

Ferrero e Sacerdote (1951) utilizaram o método da função de transferência em um tubo de impedância para determinar propriedades como a impedância característica complexa e o número de onda complexo. Nesta metodologia há a necessidade de determinar a impedância superficial de uma amostra e a impedância superficial de uma amostra semelhante e com o dobro da espessura. Mais tarde, esse método ficou conhecido como Método das Duas Espessuras (MDE).

Igarashi e Toyama (1958) calcularam a atenuação acústica através de métodos de equivalência elétrica, aplicados em filtros acústicos tais como: tubos com cavidade interna, cavidades com material absorvente, ressonadores, etc. Concluíram que cada um destes elementos é determinado por uma vizinhança a qual pode ser isolada e analisados separadamente.

Delany e Bazley. (1970) apresentaram de resultados das propriedades como a impedância característica e o coeficiente de propagação (número de onda complexo) em materiais fibrosos. Esses dados foram obtidos através de medições de resistividade ao fluxo de materiais absorventes

como fibra de vidro, algodão e fibra mineral. Ainda foram mostrados coeficientes de absorção, estimados por um valor aproximado da resistividade ao fluxo. A partir desses experimentos, propuseram uma fórmula empírica para determinar número de onda e impedância característica complexos. Atualmente, grande parte dos artigos sobre o desempenho de materiais absorventes aplicam esta formulação empírica, porém há limitações quanto aos equipamentos utilizados na época.

Mais tarde, Yaniv (1973) adotou a mesma técnica de medição utilizada por Delany e Bazley (1970) e comparou com os resultados de Scott (1946) e o método teórico de Beranek (1947). A metodologia de Yaniv hoje é conhecida como o Método das Duas Cavidades (MDC). Os resultados obtidos em relação ao Beranek obtiveram uma boa concordância. O método de Scott, comparado aos outros dois métodos, obteve uma boa concordância da propagação da onda apenas nas faixas de frequência 1200 e 1600 Hz.

Munjal *et al.*, (1975) aplica o método da matriz de transferência em silenciadores acústicos para determinar atenuação acústica a partir de condições de contorno de pressão e velocidade da partícula, na entrada e saída de silenciadores. Este método também é conhecido como Matriz de Quatro Polos ou Matriz dos Quatro Parâmetros.

Seybert e Ross (1977) apresentaram uma técnica experimental com objetivo de determinar as propriedades acústicas de materiais absorventes utilizando um tubo de impedância. A técnica consiste no uso de dois microfones estacionários localizados na parte superior do tubo e usando de funções de transferência, computadores e conversores digitais, os autores verificaram os resultados obtidos. Posteriormente, ASTM E1050-10 padronizou a técnica de medição com dois microfones e funções de transferência entre seus sinais com base neste artigo. O aparato utilizado por Scott (1946) era restritamente para medir a impedância acústica de materiais absorventes, já o tubo de Seybert e Ross permite também a determinação dos coeficientes de reflexão e perda de transmissão.

Chung e Blaser (1980) determinaram as propriedades acústicas como a impedância característica complexa, os coeficientes de reflexão e absorção e perda de transmissão através da pressão sonora localizada em duas posições do tubo de impedância. Neste caso, é decomposta a onda sonora nas parcelas incidente e refletida. Os autores obtiveram boa concordância nos resultados seguindo a norma ASTM C384-04, 2011 (*Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by Impedance Tube Method*).

Smith e Parrot (1983) compararam os métodos das duas cavidades, duas espessuras, método de Scott (1946) e a teoria de Beranek (1947), com objetivo de determinar o número de onda e impedância característica do Kevlar e de uma espuma comum de célula aberta. Os autores concluíram que o método das duas espessuras obteve o melhor resultado e que o método das duas cavidades está menos vulnerável a erros de medição com a montagem dos corpos de prova no tubo de impedância.

Fahy (1984) obteve a função de transferência utilizando apenas um único microfone, com isso comprovou que os erros sistemáticos são eliminados e que não há necessidade de calibração dos microfones. Os resultados obtidos deste trabalho foram comparados com a norma ASTM C384-04 (2011).

Allard e Champoux *et al.*, (1987) aplicaram o método de matriz de transferência a partir da teoria de Biot para determinar propriedades acústicas de materiais porosos e fibrosos. Neste trabalho, materiais absorventes em camadas foram avaliados com a finalidade de se obter seu coeficiente de absorção sonoro. Os autores concluíram que é possível determinar a impedância superficial do material com uma precisão razoável, utilizando um baixo número de parâmetros. As simulações numéricas propostas pelos autores neste artigo, mostraram eficientes para medir o desempenho acústico de materiais absorventes.

Utsuno *et al.*, (1989) modificaram o método das duas cavidades de Yaniv publicado em 1973. Os autores determinaram a impedância característica, o número de onda complexo e o coeficiente de absorção de amostras de lã de vidro e alumínio poroso através do método das duas cavidades, comparando seu resultados ao método da função de transferência. Os autores obtiveram bons resultados e verificaram que é possível caracterizar materiais absorventes por este método.

Champoux *et al.*, (1991) com base no método de Beranek (1942) determinou a porosidade de um material absorvente, importante propriedade acústica para caracterização. O método apresentou-se mais eficaz, pois utilizou sensores eletrônicos diferenciais de pressão, evitando os manômetros líquidos, onde demoravam para estabilizar, utilizados por Beranek. Os autores em seu experimento controlaram a temperatura e variação do volume da câmara da amostra de maneira precisa, favorecendo nos resultados obtidos.

Tarnow (1996) apresentou em seu manuscrito sobre a resistividade ao fluxo modificando a distribuição das fibras no material absorvente, assim como a direção do escoamento de ar sobre as amostras. As fibras foram distribuídas de duas maneiras: paralelas entre si e de maneira aleatória.

Quanto ao escoamento, o fluxo de ar era direcionado primeiramente de forma paralela as amostras e posteriormente de forma perpendicular às mesmas. Com esta simples modificação, Tarnow obteve resultados de que a resistividade ao fluxo das fibras paralelas junto ao escoamento possui melhor desempenho acústico quando comparadas a disposição com fibras transversais.

Song e Bolton (2000) utilizaram o da matriz de transferência para caracterizar materiais absorventes com boa precisão. Os autores, utilizaram quatro microfones para medir perda de transmissão. A ASTM padronizou a medição com a utilização de quatro microfones a partir do cálculo pela matriz de transferência através da norma ASTM E2611-09 (2009). Este método permite a obtenção do coeficiente de absorção, do coeficiente de reflexão, da perda de transmissão, da impedância característica e do número de onda de amostras de materiais absorventes.

Posteriormente, Tarnow (2002), realizou outro experimento com fibra de vidro e constatou que a resistividade ao fluxo de amostras com fibras perpendicular ao escoamento, possuem a resistividade ao fluxo com valores superiores aos comparados com fibras na direção paralela. Em 2003, a ASTM padronizou um método de medição de resistividade ao fluxo (ASTM -C522-03).

Gros e Panneton (2004) determinaram a porosidade através do princípio de Arquimedes em amostras, mas ao invés de submergir em água o corpo de prova, a amostra é posta em um recipiente fechado e sua massa é medida. Em seguida, com uma bomba de vácuo é extraído todo ar contido no recipiente e sua massa medida novamente. A variação das massas determina a quantidade de ar contida entre os poros do material analisado.

Kino e Ueno (2007) mostraram a influência do diâmetro de amostras de fibra de vidro e feltro no diâmetro interno do tubo de impedância. Os autores concluíram que se a amostra for menor comparando-a ao diâmetro interno do tubo, há vazamentos laterais do som emitido pela fonte sonora, e que, se o diâmetro da amostra for maior, podem ocorrer ressonâncias decorrentes do efeito de membrana da amostra, estes dois fatores alteraram os resultados de propriedades acústicas como impedância característica, número de onda complexo e velocidade do som dentro do material absorvente. Portanto foi estabelecido que os diâmetros deverão ficar entre 0,5 e 1 mm menor que o porta amostras.

Larner e Davy (2014) analisaram a impedância característica complexa e número de onda complexo de materiais de pequenas espessuras e com baixa densidade através dos métodos das duas espessuras de Ferrero e Sacerdote (1951) e método das duas cavidades modificado de Utsuno et al., (1989). Como conclusão deste trabalho, o método das duas cavidades modificado deve conter

cavidades de até um quarto de comprimento de onda da maior frequência utilizada e que, para o método das duas espessuras o cálculo do módulo do número de onda complexo multiplicado pela espessura da amostra em estudo deve ser maior que 0,7. Estes cuidados evitam resultados imprecisos na determinação da impedância e do número de onda.

Terashima (2016), comparou as propriedades acústicas de materiais absorventes como fibra de coco, forro veicular e poliuretano, um dos compostos do forro veicular. Coeficiente de absorção, impedância característica e número de onda complexo foram analisados em amostras de pequenas espessuras, comparando com os métodos das duas cavidades modificado de Utsuno *et al.*, (1989), método das duas espessuras de Ferrero e Sacerdote (1951) e resistividade ao fluxo. O autor conclui que para a absorção, o poliuretano teve resultados superiores em frequências acima de 800 Hz à fibra natural, e que o forro composto obteve melhores resultados em toda a faixa de frequência. Os métodos das duas cavidades e Delany e Bazley (resistividade ao fluxo) tiveram boa concordância em relação a impedância características e número de onda, o que não ocorreu com o método das duas espessuras.

Lima *et al.*, (2016) estudaram a resistividade de fluxo das amostras de fibra de coco e fibra de sisal com massas iguais de 62,0, 71,5, 80,0 e 89,0 mm de diâmetro e com espessuras de 5, 10, 15 e 20 mm de acordo com a norma ASTM C522-03 (2009). Os autores concluíram que para ter resultados confiáveis há necessidade de se avaliar uma grande quantidade de amostras devido ao fato de se trabalhar com fibras naturais que são heterogêneas e devido ao processo de fabricação das amostras que deve garantir um estado homogêneo quando se considera uma amostra por inteiro.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. INTRODUÇÃO

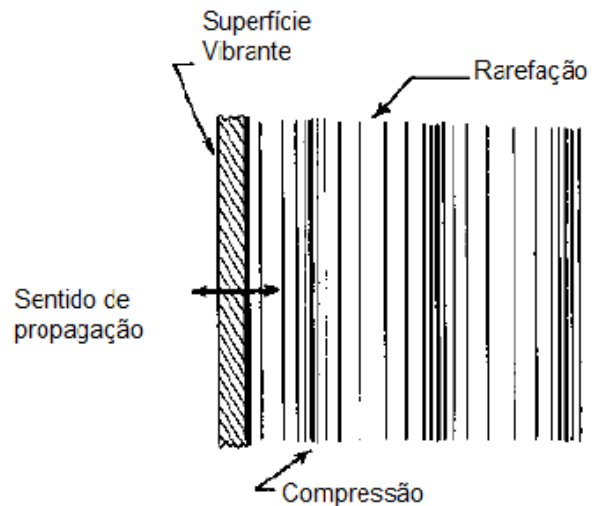
Neste capítulo serão vistos alguns conceitos importantes sobre acústica, assim como normas pertinentes a caracterização de materiais absorventes e a discretização das equações que regem o fenômeno físico da propagação de ondas sonoras no interior de suas fibras e poros.

3.2. CONCEITOS BÁSICOS

a) Som e ruído:

Som é definido como uma perturbação da pressão que se propaga em um material. A velocidade do som é dependente deste material ou meio (gasoso, líquido ou sólido), (BERANEK e VÉR, 1992). O som é uma onda mecânica, propaga-se na direção longitudinal e não propaga no vácuo. Ondas sonoras em fluidos são geralmente produzidas por superfícies vibrantes no fluido. Quando esta superfície vibra para a direita, o fluido adjacente à próxima é comprimido, conseqüentemente à superfície esquerda é rarefeita. Assim, este movimento de compressão e rarefação, causam variações na pressão dentro material, propagando o som, Figura 1, (BARRON, 2003).

Figura 1 – Propagação da onda plana.



Fonte: Adaptado de Barron, 2003.

Ruído pode ser definido como qualquer som perceptível ofensivo ou prejudicial ao ser humano (VÉR E BERANEK, 2006). Este conceito é subjetivo, pois para algumas pessoas o que possam parecer ruídos, para outras, o mesmo pode ser considerado como um som, por exemplo, a música.

Para um gás ideal, a velocidade sonora é uma função da temperatura absoluta desse gás:

$$c^2 = \gamma \bar{R} T \quad (3.1)$$

onde:

γ é a taxa de calor específico c_p/c_v ;

$\bar{R}$ é a constante ideal dos gases, equivalente a 287 J/kg.K;

T é temperatura absoluta em [K].

A velocidade do som pode ser dependente somente da temperatura absoluta do ar, a qual também pode ser descrita pelas equações 3.2 e 3.3, em graus Celsius e graus Fahrenheit respectivamente.

$$c = 331,5 + 0,58^\circ\text{C} \quad (3.2)$$

$$c = 1054 + 1,07^\circ F \quad (3.3)$$

Para graus Celsius, a velocidade é dada em metros por segundo (m/s) e em Fahrenheit é dada em pés por segundo (ft/s).

a) Pressão sonora:

A variação da pressão acima ou abaixo do valor da pressão atmosférica é chamada de pressão sonora, cuja a unidade é representada em Pascal (Pa). Uma pessoa jovem pode detectar pressões tão baixas quanto 20 μPa , que quando comparada à pressão atmosférica ($101,3 \times 10^3 \text{ Pa}$, aproximadamente) equivalem à uma diferença de 0,000000002 vezes, (VÉR E BERANEK, 2006).

b) Características das ondas sonoras

- Tom Puro

Tom puro é definido como uma onda sonora simples composta por uma única frequência. (VÉR E BERANEK, 2006). Em experimentos acústicos, tons puros são aplicados em análises de materiais absorventes. *Swept-sine* ou sinal varrido, como é chamado, denomina-se como uma varredura de tons puros em uma faixa de frequência especificada pelo operador.

- Período e Amplitude

Define-se período como intervalo de tempo decorrido para que um ciclo se complete, (BISTAF, 2006). Um ciclo é representado quando o tempo varia de 0 à $1/f$, onde f é a frequência. Esta quantidade é denominada por T , ou seja, o período.

A amplitude representa o valor máximo de pressão no período, este valor pode ser tanto positivo quanto negativo

- Pressão RMS (Raiz quadrática média – *Root-mean-square*)

Este conceito é utilizado para determinar valores médios de um ciclo completo de uma onda. Pode ser expressa pelas equações (VÉR E BERANEK, 2006):

$$p_{rms}^2 = \frac{1}{2} A^2 \quad (3.4)$$

ou

$$p_{rms} = 0,707 A \quad (3.5)$$

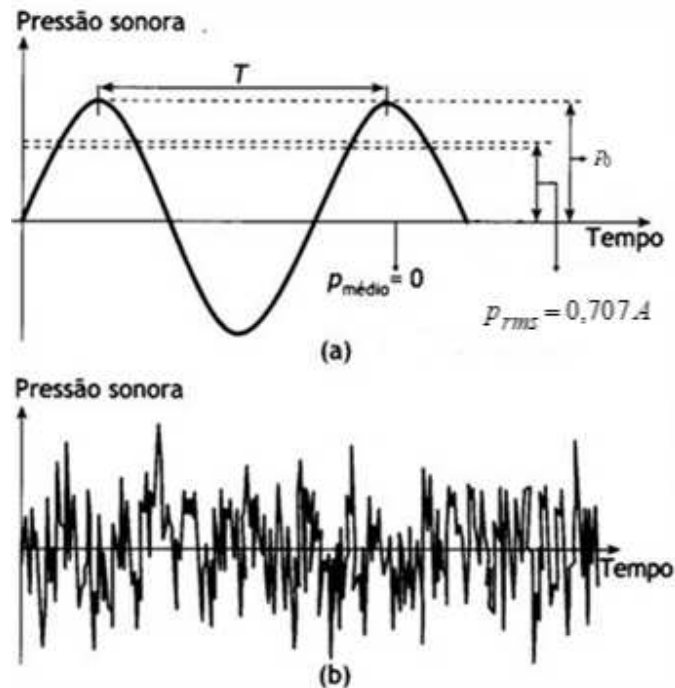
onde:

A é a máxima amplitude na pressão sonora instantânea [m];

p_{rms} é a pressão média quadrada [Pa] .

Na Figura 2, conceitos como tom puro, ruído, período e pressão média quadrática são descritos no gráfico.

Figura 2 – Formas de onda. (a) Tom puro, (b) ruído.



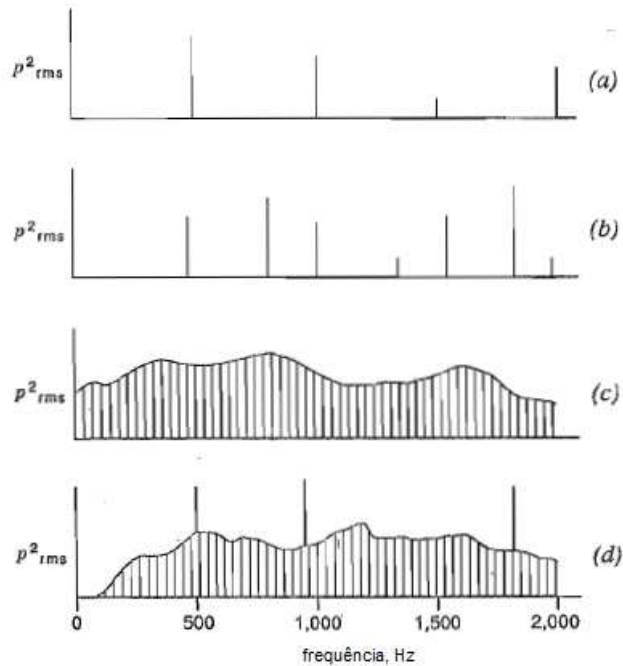
Fonte: Adaptado de Bistafa, 2006.

- Espectros do som

Também conhecida como análise de Fourier, os espectros são representações de ondas sonoras em função da amplitude e frequência.

Uma onda sonora pode ser composta por várias ondas puras. Estas combinações podem ser harmônicas ou não harmônicas, assim como finitas e infinitas. Para combinações finitas com um grande número de tons, denomina-se espectro linear, já para combinações infinitas denomina-se espectro contínuo, (VÉR E BERANEK, 2006). A Figura 3 mostra quatro tipos de espectros sonoros.

Figura 3 - Representações de espectro linear (a) e (b) e contínuo (c) e (d)



Fonte: Vér e Beranek, 2006.

Em (a) está representado um espectro linear de uma onda harmônica, enquanto em (b) representa uma onda não-harmônica. Já em (c) representa o espectro da densidade espectral contínua (função da frequência em relação ao tempo no espectro do som) e (d) uma combinação do espectro da densidade espectral contínua com espectro linear, também chamado de espectro complexo.

c) Nível de Intensidade Sonoro

Definida como uma contínua propagação de energia carregada pela pressão sonora através de uma pequena área em ponto no espaço. Está ligado diretamente à amplitude da onda sonora. O nível de intensidade sonora é pode ser definido como:

$$NI = 10 \log \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) \quad (3.6)$$

onde:

I é a intensidade sonora em $[W/m^2]$;

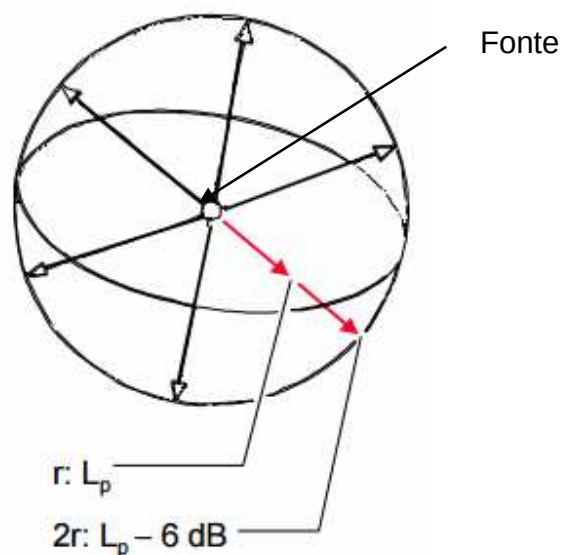
I_{ref} é a intensidade de referência padronizado como 10^{-12} W/m^2 .

NI é o nível de intensidade sonora em [dB];

A fonte sonora emite quantidades mensuráveis de energia ao ambiente, chamada potência sonora, medido em Watts.

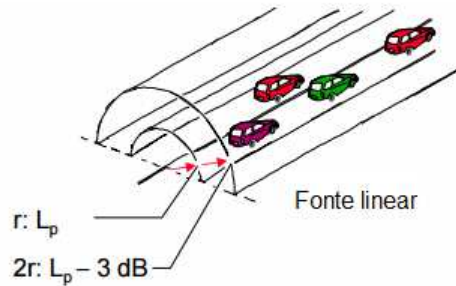
Se a fonte sonora for considerada esférica, ou seja, a potência emitida em todas as direções numa determinada distância “ r ” (raio da esfera) do centro imaginário da esfera, for constante, a potência será a mesma. Caso a distância do centro da esfera dobre, o nível de pressão sonora (L_p) decresce 6 dB, como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Fonte sonora esférica

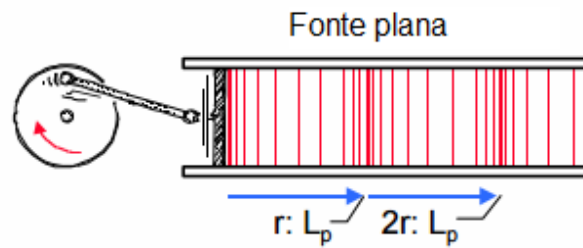


Fonte: Adaptado *Base Concepts of Sound*, Bruel & Kjaer, 1998.

Para fontes cilíndricas e lineares, respectivamente, o nível de pressão sonora, quando dobrada a distância “ r ”, decresce 3 dB e permanece constante, representadas pelas Figuras 5 e 6 respectivamente.

Figura 5 - Fonte sonora em coordenadas cilíndricas

Fonte: Adaptado *Base Concepts of Sound*, Bruel & Kjaer, 1998.

Figura 6 - Fonte sonora plana

Fonte: Adaptado *Base Concepts of Sound*, Bruel & Kjaer, 1998

d) Nível de Pressão Sonoro

O nível de pressão sonora é análogo ao nível de intensidade sonora (equação 3.6), entretanto para sua pressão. Sua expressão é dada por:

$$NPS = 10 \log \left(\frac{p(t)}{p_{ref}} \right)^2 \quad (3.7)$$

$$NPS = 20 \log \frac{p(t)}{p_{ref}} \quad (3.8)$$

onde:

$p(t)$ é a pressão sonora instantânea.

p_{ref} é a pressão de referência sonora, equivalente à 2×10^{-5} N/m² (20 µPa);

NPS é o nível de pressão sonora em [dB];

Define-se por comprimento de onda (λ) como a distância a partir de qualquer valor de pressão sonora para que um ciclo completo, (BISTAFA, 2006).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.9)$$

onde:

- λ é o comprimento de onda [m];
- c é a velocidade do som em [m/s];
- f é a frequência do tom puro [Hz].

Define-se por número de onda (k), o número de comprimento de ondas por um ciclo completo. Quanto maior a frequência, maior o seu número de onda, para um mesmo período, (BISTAFA, 2006).

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.10)$$

e) Nível de potência sonora (NWS)

O nível de potência sonora pode ser definido como a relação da potência sonora de uma fonte pela potência sonora de referência, (BIES e HANSEN, 2003):

$$NWS = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0} \quad (3.11)$$

onde:

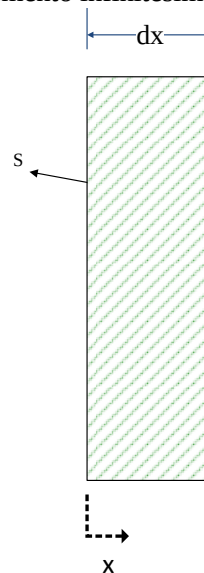
- W é a potência sonora em [W];
- W_0 é a potência sonora de referência, equivalente a 10^{-12} W.

3.3. EQUAÇÃO DA ONDA PLANA UNIDIMENSIONAL

Em um caso ideal de tubo, com paredes rígidas e com dimensões de sua secção transversal constante, preenchido com um fluido estacionário ideal, ou seja, não viscoso, com amplitude de onda pequena, as ondas propagam-se como ondas estacionárias. A perturbação da pressão sonora “ p ” e a velocidade da partícula “ u ” em todos os pontos ao longo da secção transversal do tubo permanecem constantes. A frente da onda ou fase da superfície, definida como superfície em todos os pontos onde “ p ” e “ u ” possuem a mesma amplitude e ângulo de fase, caracteriza-se como onda plana na direção da propagação da onda, neste caso no sentido longitudinal do tubo, (MUNJAL, 2014).

A equação da onda possui duas restrições importantes: os efeitos de dissipação de energia são desprezáveis e a amplitude da pressão da onda deve ser relativamente pequena, em comparação à pressão atmosférica, (BARRON, 2003). Supondo a propagação de uma estacionária na direção longitudinal x , em um meio elástico e unidimensional, a onda propaga-se em uma camada de um fluido qualquer com espessura infinitesimal dx e com área de secção transversal S como, mostra a figura 7.

Figura 7 – Elemento infinitesimal de um fluido

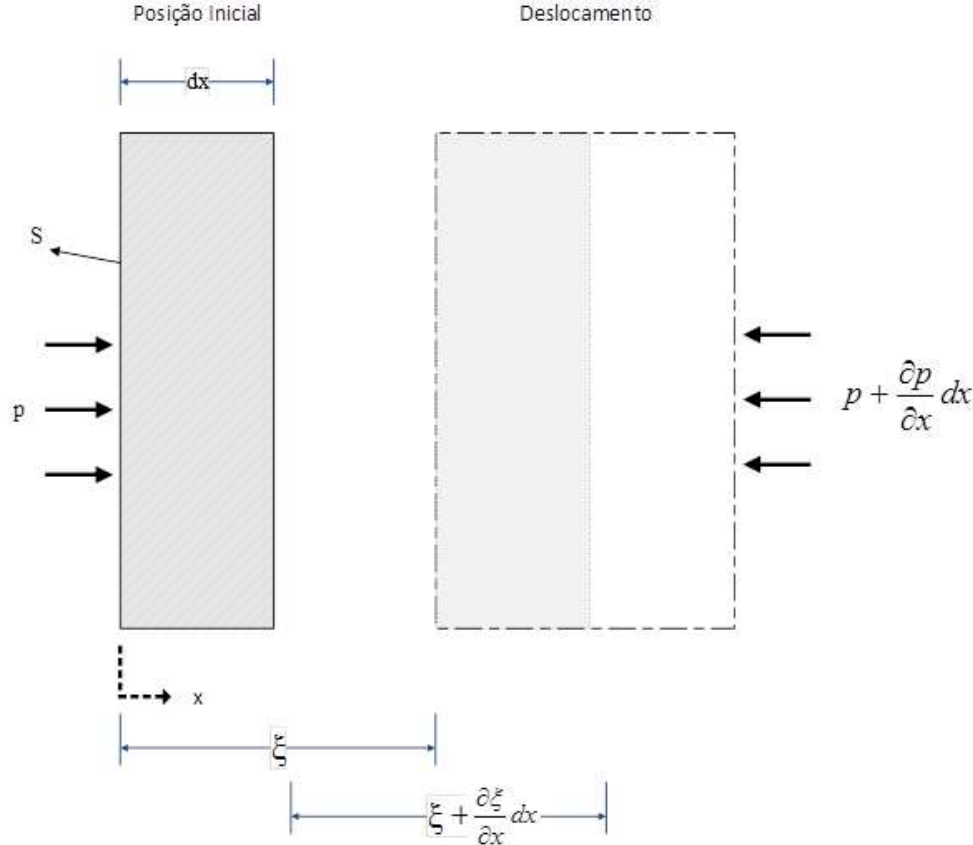


Fonte: o autor, 2017

Dada a Figura 7 como a posição inicial, uma onda sonora propaga-se através do fluido. Com um incremento de tempo dt o fluido move-se para uma nova posição ξ (deslocamento instantâneo

da partícula). Assim, pode-se afirmar que as coordenadas das faces frontal e traseira do fluido serão respectivamente $(x + dx)$ e $\left(\xi + \frac{\partial \xi}{\partial x} dx\right)$, como mostra a Figura 8.

Figura 8 – Posição inicial e deslocamento de um fluido de espessura infinitesimal



Fonte: O autor, 2017.

A pressão sonora é descrita por uma equação em um função seno ou cosseno, amplitude, número de onda e tempo.

O fluido desloca de uma posição para outra, acompanhando o movimento da onda exercida pelas forças aplicadas ao elemento, neste caso, a pressão. Uma primeira restrição pode ser introduzida: forças de fricção são desprezadas, então apenas as forças que atuam no elemento é a pressão. Pode-se dizer que a força líquida do sistema é:

$$F_{líquida} = pS - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) S = -\frac{\partial p}{\partial x} dx S \quad (3.12)$$

A velocidade da partícula para a camada do material é a variação do deslocamento por unidade de tempo, descrita pela equação 3.13.

$$u = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (3.13)$$

Derivando duas vezes a equação 3.13, tem-se a aceleração:

$$a = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (3.14)$$

A massa específica (ou densidade ρ) de uma pequena camada, por unidade de volume (Sdx) é dada como:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.15)$$

Na forma diferencial, tem-se:

$$dm = \rho S dx \quad (3.16)$$

Assim, utilizando a segunda Lei de Newton.

$$\Sigma \vec{F}_{líquida} = m \vec{a} \quad (3.17)$$

Substitui-se as equações 3.12 e 3.14 em 3.17 e obtém-se:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (3.18)$$

A equação 3.18 é dada como a forma diferencial da equação da onda.

Se o processo de propagação da onda for considerado isentrópico (entropia constante), ou seja, sem geração de entropia, a velocidade do som em um fluido qualquer pode ser determinada por (MUNJAL, 1987, KINSLER *et al.*, 2000 e MORAN E SHAPIRO, 2002):

$$c^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho} \quad (3.19)$$

Derivando a equação 3.19 em relação ao tempo:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.20)$$

A condensação ($\mathcal{C}$) é definida como a razão da perturbação do fluido pela densidade inicial do fluido não perturbado, (BARRON, 2003).

$$\mathcal{C} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (3.21)$$

onde:

ρ : densidade do fluido perturbado em $[\text{kg/m}^3]$;

ρ_0 : densidade do fluido não perturbado $[\text{kg/m}^3]$.

A condensação também pode ser escrita através da variação do seu volume, antes e depois da passagem da onda sonora.

$$\mathcal{C} = \frac{V - V_0}{V_0} = \frac{Sdx - S\left(\xi + \frac{\partial \xi}{\partial x} dx + dx - \xi\right)}{S\left(\xi + \frac{\partial \xi}{\partial x} dx + dx - \xi\right)} = -\frac{\frac{\partial \xi}{\partial x}}{1 + \frac{\partial \xi}{\partial x}} \quad (3.22)$$

onde:

V é o volume inicial do elemento;

V_0 é o volume final do elemento, após a perturbação da onda.

Pode-se considerar que o deslocamento da partícula atravessado pela onda sonora é infinitesimal, ou seja, $\partial \xi / \partial x \ll 1$. Aplicando estas condições, a equação 3.22 resultará em:

$$\mathcal{E} = -\frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (3.23)$$

Isolando a densidade final da equação 3.21:

$$\rho = \rho_0(1 + \mathcal{E}) \quad (3.24)$$

Derivando a equação 3.24 e substituindo em 3.20, tem-se:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \rho_0 \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} \quad (3.25)$$

Derivando mais uma vez a equação 3.25 em relação ao tempo:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \rho_0 \frac{\partial^2 \mathcal{E}}{\partial t^2} \quad (3.26)$$

Derivando a equação 3.18 em relação ao deslocamento:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = -\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \quad (3.27)$$

Quando o fluido é atingido por uma onda sonora, sua densidade é quase constante, assim pode-se dizer que:

$$\rho \approx \rho_0 \quad (3.28)$$

Substituindo as equações 3.23 e 3.28 em 3.27:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \rho_0 \frac{\partial^2 \mathcal{E}}{\partial t^2} \quad (3.29)$$

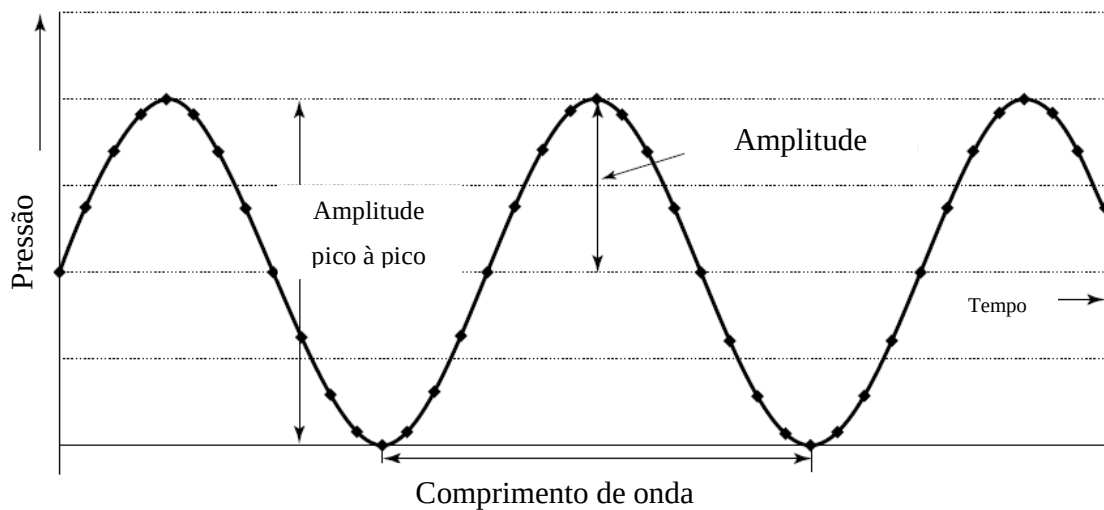
Substituindo a equação 3.28 em 3.25 e rearranjando os termos, tem-se:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right] p = 0 \quad (3.30)$$

A equação 3.30 representa a equação da onda unidimensional.

A Figura 9 mostra o gráfico de um tom puro unidimensional ao longo do tempo.

Figura 9 - Gráfico de uma onda plana ao longo do tempo

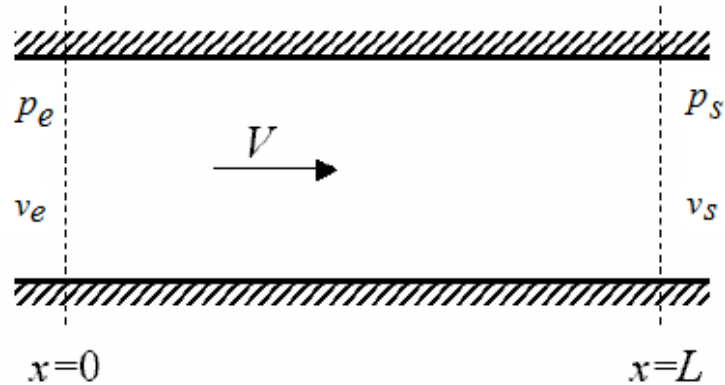


Fonte: Adaptado de Smith, 2011.

Considerando que uma onda plana propagando-se na mesma direção da coordenada longitudinal (positiva) em um meio isotrópico, ou seja, propaga-se com a mesma velocidade em qualquer direção, a pressão sonora dependerá do tempo e da distância x .

Representando em um elemento de comprimento “ L ”, é possível determinar as equações para determinar a pressão acústica. A Figura 10 mostra a secção de um tubo circular, e aplicadas as condições de contorno, tem-se:

Figura 10 – Representação de um elemento de tubo circular com comprimento “ L ”



Fonte: Adaptado de Gerges, 2005.

onde:

p_e e v_e são a pressão sonora e a velocidade volumétrica de entrada, respectivamente;

p_s e v_s são a pressão e a velocidade volumétrica de saída, respectivamente;

V é a velocidade do escoamento médio incompressível.

Considera-se um tubo uniforme (secção transversal constante), a onda propaga-se de forma plana, descrita pela equação, (MUNJAL, 1987).

$$p(x,t) = Ae^{-ikx} + Be^{+ikx} \quad (3.31)$$

$$u_x = \frac{1}{\tilde{Z}} (Ae^{-ikx} - Be^{+ikx}) \quad (3.32)$$

onde:

A é a amplitude da onda sonora incidente;

B é a amplitude da onda sonora refletida;

k é o número de onda;

u_x é a velocidade da partícula no eixo x ;

$\tilde{Z}$ é a impedância característica complexa;

x : é direção de propagação da onda de propagação da onda.

Dada uma condição de contorno inicial $x = 0$ e como o meio o ar, substitui-se nas equações (3.31) e (3.32) respectivamente:

$$p_e = A + B \quad (3.33)$$

$$u_e = \frac{(A - B)}{\tilde{z}} \quad (3.34)$$

Para uma outra condição de contorno com $x = L$, aplicando em (3.31) e (3.32).

$$p_s = A e^{-ik_0 L} + B e^{+ik_0 L}$$

$$p_s = (A + B) \cos k_0 L - i(A - B) \operatorname{sen} k_0 L$$

$$p_s = p_e \cos k_0 L - i \tilde{z} u_e \operatorname{sen} k_0 L \quad (3.35)$$

Analogamente à velocidade, aplica-se na equação (3.34)

$$u_s = \frac{(A e^{-ik_0 L} - B e^{+ik_0 L})}{\tilde{z}}$$

$$u_s = \left(\frac{A - B}{\tilde{z}} \right) \cos k_0 L - i \left(\frac{A + B}{\tilde{z}} \right) \operatorname{sen} k_0 L$$

$$u_s = u_e \cos k_0 L - i \frac{p_e}{\tilde{z}} \operatorname{sen} k_0 L \quad (3.36)$$

A impedância característica do meio pode ser definida como a razão entre a velocidade da partícula “ u ” e a pressão sonora “ p ” e é descrita como:

$$\tilde{z} = \frac{u}{p} \quad (3.37)$$

Utilizando o ar como meio, pode ser simplificada para:

$$z_0 = \rho_0 \cdot c_0 \quad (3.38)$$

onde:

z_0 : impedância característica do ar [rayl] ;

ρ_0 : densidade do ar [kg/m³];

c_0 : velocidade do som no ar [m/s].

Considera-se um tubo de secção transversal circular de área S e comprimento l . Um pistão é posicionado em uma das extremidades como gerador de ondas estacionárias, em $x=0$ e com uma terminação rígida no lado oposto com impedância acústica z_1 , em $x=l$, sabendo-se que a impedância é a relação entre a pressão e a velocidade da partícula, então z_1 :

$$z_1 = \frac{\rho c}{S} \frac{Ae^{-ikl} + Be^{ikl}}{Ae^{-ikl} - Be^{ikl}} \quad (3.39)$$

Em $x=0$, tem-se:

$$z_0 = \frac{\rho c}{S} \frac{A+B}{A-B} \quad (3.40)$$

Igualando as equações 3.39 e 3.40, isolando z_0 :

$$z_0 = \left(\frac{\rho c}{S} \right) \frac{z_1 + i \frac{\rho c}{S} \operatorname{tg}(kl)}{\frac{\rho c}{S} + iz_1 \operatorname{tg}(kl)} \quad (3.41)$$

Assim, a equação 3.41 mostra que a impedância depende da impedância do terminal do tubo z_1 , o comprimento do tubo l e o número de onda k .

A frequência de ressonância de um duto pode ser definida como sendo aquela onde o componente reativo da impedância de entrada é nulo. Nessa frequência de entrada é mínima e a potência irradiada para fora de um duto aberto é máxima, (GERGES, 2005).

Como $z_1 = (\alpha + i\beta)\rho c / S$, então:

$$z_0 = \left(\frac{\rho c}{S} \right) \frac{\alpha + i[tg(kl) + \beta]}{[1 - \beta tg(kl) + i\alpha tg(kl)]} \quad (3.42)$$

A frequência de ressonância é obtida quando a componente reativa é nula na equação 3.42.

$$\beta tg^2(kl) + (\beta^2 + \alpha^2 - 1)tg(kl) - \beta = 0 \quad (3.43)$$

Em baixas frequências $\beta \ll 1$ e $\alpha \ll 1$, simplifica-se a equação 3.43:

$$tg(kl) = -\beta \quad (3.44)$$

Quando o tubo termina em $x = l$ com um flange infinito, então $\beta \cong 8ka / 3\pi$, substituindo na equação 3.44, tem-se:

$$tg(kl) = -\frac{8ka}{3\pi} \quad (3.45)$$

Rearranjando 3.45:

$$tg(n\pi - kl) \cong tg\left(\frac{8ka}{3\pi}\right) \quad (3.46)$$

onde n é um número inteiro qualquer, ou:

$$n\pi - kl \cong \frac{8ka}{3\pi} \quad (3.47)$$

A frequência de ressonância fundamental correspondente a $n=1$ é dada por:

$$f_1 = \frac{c}{2 \left(\frac{l + 8a}{3\pi} \right)} \quad (3.48)$$

Se o tubo é possui terminação rígida em $x = l$, a impedância desta terminação será $z_l = \infty$ e a impedância de entrada z_0 , substituindo na equação 3.41:

$$z_0 = \frac{\rho c}{S} \frac{1}{i \tan(kl)} = -i \frac{\rho c}{S} \cot(kl) \quad (3.49)$$

Com a condição de $z_0 = 0$ quando $\cot(kl) = 0$ corresponde a:

$$kl = (2n - 1) \frac{\pi}{2} \quad (3.50)$$

Então, a frequência de ressonância para um tubo fechado, para um modo qualquer n , é dada por:

$$f_n = \frac{(2n - 1)c}{4l} \quad (3.51)$$

Se $n = 1$, esta se reduz a $f_1 = c/4l$, que está de acordo com a equação da frequência fundamental de um tubo fechado.

Com a equação 3.51 é possível determinar os nós das ondas propagadas no tubo de impedância. Estes pontos serão percebidos se, os microfones posicionados coincidem com o nó, resultando em uma baixa coerência.

3.4. EQUAÇÃO DA ONDA TRIDIMENSIONAL

Citado no tópico 3.2, a propagação da onda plana em um meio tridimensional é semelhante a deduzida no meio unidimensional, de modo que a onda irá propagar nos eixos x, y, e z. Definidos por ξ , η e ζ , respectivamente. Assim são definidos por:

$$u = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (3.52a)$$

$$v = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (3.52b)$$

$$w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (3.52c)$$

Aplicando os mesmos conceitos da equação 3.22 para os três eixos:

$$\mathcal{C} = \frac{V_0 - V}{V} = \frac{(dx dy dz) - (dx + \frac{\partial \xi}{\partial x} dx)(dy + \frac{\partial \eta}{\partial y} dy)(dz + \frac{\partial \zeta}{\partial z} dz)}{(dx + \frac{\partial \xi}{\partial x} dx)(dy + \frac{\partial \eta}{\partial y} dy)(dz + \frac{\partial \zeta}{\partial z} dz)} \quad (3.53)$$

Simplificando os termos em x, y e z:

$$\mathcal{C} = \frac{1 - (1 + \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial z})}{(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial z})} = \frac{\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial z}}{(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial z})} = - \frac{\nabla \mathbf{d}}{1 + \nabla \mathbf{d}} \quad (3.54)$$

onde:

∇ é o operador divergente que corresponde a $\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$;

$\mathbf{d}$ é o vetor do deslocamento das partículas e corresponde a $\xi \mathbf{i} + \eta \mathbf{j} + \zeta \mathbf{k}$.

Tratando de elementos infinitesimais, pode-se considerar que o deslocamento da partícula no ar neste caso é muito pequeno, portanto:

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} \ll 1 \quad (3.55a)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial y} \ll 1 \quad (3.55b)$$

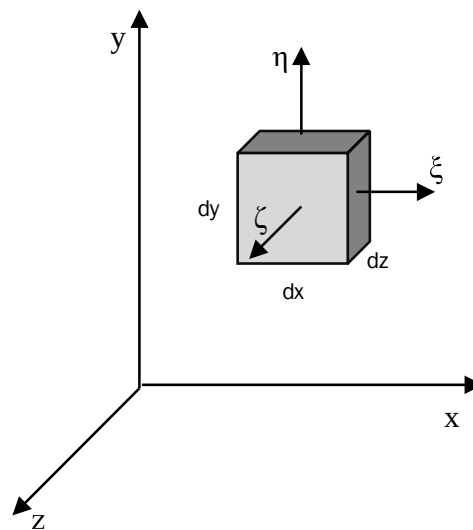
$$\frac{\partial \zeta}{\partial z} \ll 1 \quad (3.55c)$$

Substituindo as equações 3.47 em 3.46, obtém-se:

$$\mathcal{C} = -\nabla \mathbf{d} \quad (3.56)$$

Pela segunda lei de Newton, calcula-se a força líquida nas três direções de um elemento infinitesimal pela equação 3.57. E a Figura 11 mostra o fluido após ser perturbado por uma onda sonora.

Figura 11 - Volume infinitesimal tridimensional



Fonte: O autor, 2017.

Onde a força líquida corresponde $F = p.S$, aplicando o divergente, obtém-se:

$$-\left(\frac{\partial p}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial p}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial p}{\partial z}\mathbf{k}\right)dx dy dz = dm\left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}\mathbf{i} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2}\mathbf{j} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2}\mathbf{k}\right) \quad (3.57)$$

E sendo $dm = \rho dx dy dz$, substitui-se em 3.57:

$$-\left(\frac{\partial p}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial p}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial p}{\partial z}\mathbf{k}\right) = \rho\left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}\mathbf{i} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2}\mathbf{j} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2}\mathbf{k}\right) \quad (3.58)$$

Aplicando o divergente em 3.58:

$$-\nabla^2 p = \rho \nabla \cdot \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}\mathbf{i} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2}\mathbf{j} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2}\mathbf{k}\right) \quad (3.59)$$

Análogo a onda unidimensional, quando o fluido é perturbado pela onda sonora, sua densidade permanece constante, portanto conclui-se que $\rho \approx \rho_0$ e substituindo esta condição em 3.58, tem-se:

$$-\nabla^2 p = \rho_0 \nabla \cdot \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}\mathbf{i} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2}\mathbf{j} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2}\mathbf{k}\right) \quad (3.60)$$

Substituindo o divergente e rearranjando a equação:

$$-\nabla^2 p = \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial \eta}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial \zeta}{\partial z}\mathbf{k}\right) = \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\nabla \mathbf{d}) \quad (3.61)$$

Por fim substitui-se 3.26 e 3.56 em 3.61, obtendo a equação da onda tridimensional:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.62)$$

onde o operador Laplaciano é dado por:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

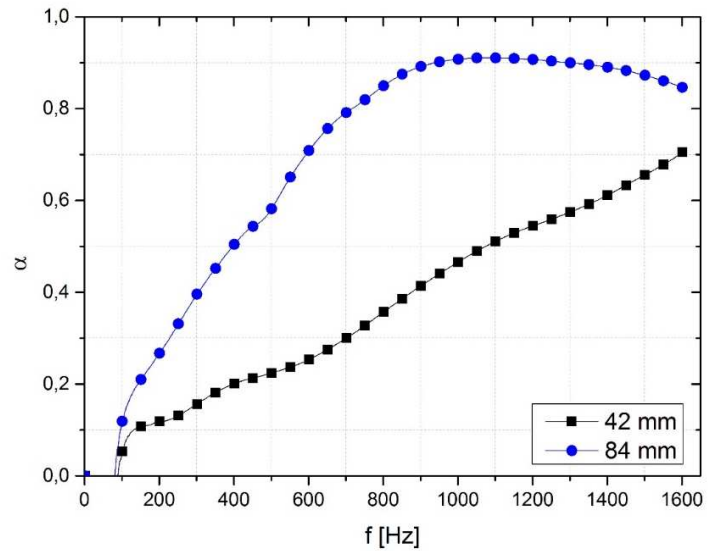
3.5. COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA (α)

Com larga aplicação em silenciadores automotivos, estúdios musicais, construções civis, etc., os materiais absorventes têm como objetivo eliminar ou diminuir ruídos. Na maioria dos casos são fibrosos ou porosos, devido como é realizada a dissipação da onda sonora. Ao entrar em contato com o material, a onda vibra entre os interstícios da fibra/poro, dissipando a energia sonora em energia térmica.

Uma das propriedades acústicas mais conhecidas dos materiais absorventes é o coeficiente de absorção, onde esta transformação de energia sonora em térmica é avaliada. Os valores de absorção variam de 0 a 1, quanto mais próximo o valor da unidade, maior a absorção. Esta propriedade depende diretamente do material em estudo, as frequências e ângulos de incidência. Em tubos de impedância, geralmente as amostras são posicionadas de forma que a onda incidente seja perpendicular à superfície da amostra. Porém, materiais absorventes costumam ter baixa absorção em baixas frequências, devido a energia gerada pela onda e seu comprimento de onda, mas quando há o aumento da frequência, a tendência é aumentar a absorção. Outro fator que irá influenciar os resultados de absorção é a espessura, isto é, quanto maior a espessura, maior a absorção deste material. É notável a diferença da absorção quando se dobra a espessura da amostra como mostra a Figura 12.

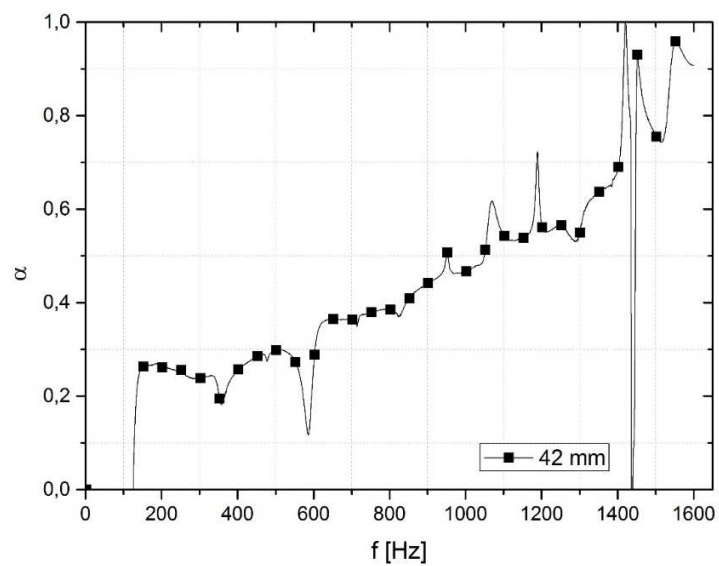
A Figura 13 mostra o coeficiente de absorção sonora da amostra de espuma comum de 42 mm de espessura e com densidade de 28 kg/m³, determinada através do método da matriz de transferência conforme a norma ASTM E2611-09 (2009). Apesar da norma comentar que é possível a obtenção do coeficiente de absorção através deste método, na literatura este coeficiente é avaliado preferivelmente pelo método da função de transferência de acordo com a norma ASTM E1050-10 (2010) segundo Salissou e Panneton, 2009 e Kimura *et al.*, 2014.

Figura 12 - Coeficiente de absorção para uma amostra de espuma comum com 42 e 84 mm de espessura.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 13 - Coeficiente de absorção para amostra com 42 mm pelo método da matriz de transferência



Fonte: O autor, 2017.

Na Figura 13, resultados para as frequências em 350, 600, 950, 1100, 1200 Hz podem estar relacionados as frequências de ressonância do tubo de acordo com a equação 3.51. O vale em 1450

Hz é resultante do valor ultrapassado da frequência de corte do tubo, onde a onda não é mais plana, estes conceitos serão vistos posteriormente no Capítulo 4.

Com o tubo de impedância e aplicando os método da função de transferência, MDC, MDE, determinam propriedades como impedância característica, número de onda complexo, coeficiente de reflexão e absorção, já o tubo de impedância, aplicando o MMT, preferencialmente, são determinadas propriedades como impedância característica, número de onda complexo, coeficiente de transmissão e perda de transmissão.

Por fim, nesta dissertação será determinada e comparada apenas a impedância característica complexa e número de onda complexo dos materiais absorventes.

3.6. IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA COMPLEXA ($\tilde{z}$) E NÚMERO DE ONDA COMPLEXO ($\tilde{k}$)

Estas duas propriedades acústicas podem ser determinadas experimentalmente ou por equações empíricas. A impedância característica e o número de onda complexo (ou constante de atenuação) definem o comportamento da onda sonora dentro de um material absorvente, desta forma são descritos como (ZWIKKER, 1949):

$$\tilde{z} = X - iY \quad (3.63)$$

$$\tilde{k} = A - iB \quad (3.64)$$

onde as componentes reais X e A correspondem respectivamente a resistência característica e a constante de propagação do som dentro material absorvente e as componentes imaginárias Y e B, respectivamente correspondem a reatância e a constante de atenuação ou dissipação do som no material absorvente, (LEE, 2005). Para determinar estas características, alguns métodos e normas foram criados, assim como expressões empíricas clássicas de Delany e Bazley (1970), a partir de valores de resistividade ao fluxo em materiais fibrosos. Essas expressões são:

$$\frac{\tilde{z}}{z_0} = \left[1 + 0,0511 \left(\frac{f}{r_0} \right)^{-0,75} \right] - i \left[0,0768 \left(\frac{f}{r_0} \right)^{-0,73} \right] \quad (3.65)$$

$$\frac{\tilde{k}}{k_0} = \left[1 + 0,0858 \left(\frac{f}{r_0} \right)^{-0,70} \right] - i \left[0,1749 \left(\frac{f}{r_0} \right)^{-0,59} \right] \quad (3.66)$$

Estas expressões são válidas na faixa de frequência entre $10^{-2} < f/r_0 < 1$. Miki (1990) analisou as equações de Delany e Bazley e verificou em diferentes amostras com valores de resistividade ao fluxo e espessura variáveis, a impedância característica e número de onda complexo. Os resultados abaixo do limite estipulado por Delany e Bazley, mostraram que os valores reais da impedância característica normalizada deram resultados negativos. Posteriormente Kirby (2014) estudou o mesmo problema, em que se esta faixa de frequência não for obedecida, os valores reais da impedância característica em baixas frequências são negativos, ou se $\xi < 0,01$, onde $\xi = \rho_0 f / \sigma$.

3.7. RESISTIVIDADE AO FLUXO (r_0)

Microscopicamente falando, a resistividade nada mais é do que uma camada limite do fluido a qual se direciona nos interstícios do material analisado. Isto faz com que o material crie uma resistência ao fluxo de fluido devido a sua viscosidade, denominada dissipação, (GIESBRECHT, 2007). Esta propriedade é considerada uma das mais importantes, pois com ela é possível caracterizar materiais absorventes, como citado no tópico 3.5, as formulações empíricas de Delany e Bazley dependem desta propriedade. Este método foi padronizado pela norma ASTM C522-03 (2010) de como construir uma bancada para experimento, assim como preparação das amostras, etc. Este tópico será mostrado detalhadamente no próximo capítulo.

O conceito de resistividade ao fluxo é a razão do diferencial de pressão sobre a velocidade do escoamento e a espessura do material em análise, podendo ser expressada como:

$$r_0 = \frac{\Delta p}{u_x \cdot t} \quad (3.67)$$

onde:

r_0 é o valor da resistividade ao fluxo em [rayl/m] ou $Pa.s/m^2$;

Δp é a diferença de pressão antes e depois da amostra em [Pa];

u_x é a velocidade do escoamento no eixo longitudinal a amostra em [m/s];

t é a espessura da amostra [m].

Outro conceito citado na norma é a resistência ao fluxo (r), semelhante a resistividade ao fluxo, exceto que a relação é somente dada pela diferença de pressão pela velocidade do escoamento. Pode ser expressa por:

$$r = \frac{\Delta p}{u} \text{ [rayl]} \quad (3.68)$$

Segundo a norma, para que os valores de resistividade ao fluxo (r_0) possam ser válidos, os resultados de resistência ao fluxo devem estar na faixa de 100 a 10.000 rayl.

CAPÍTULO 4

TÉCNICAS DE MEDIÇÃO

4.1. INTRODUÇÃO

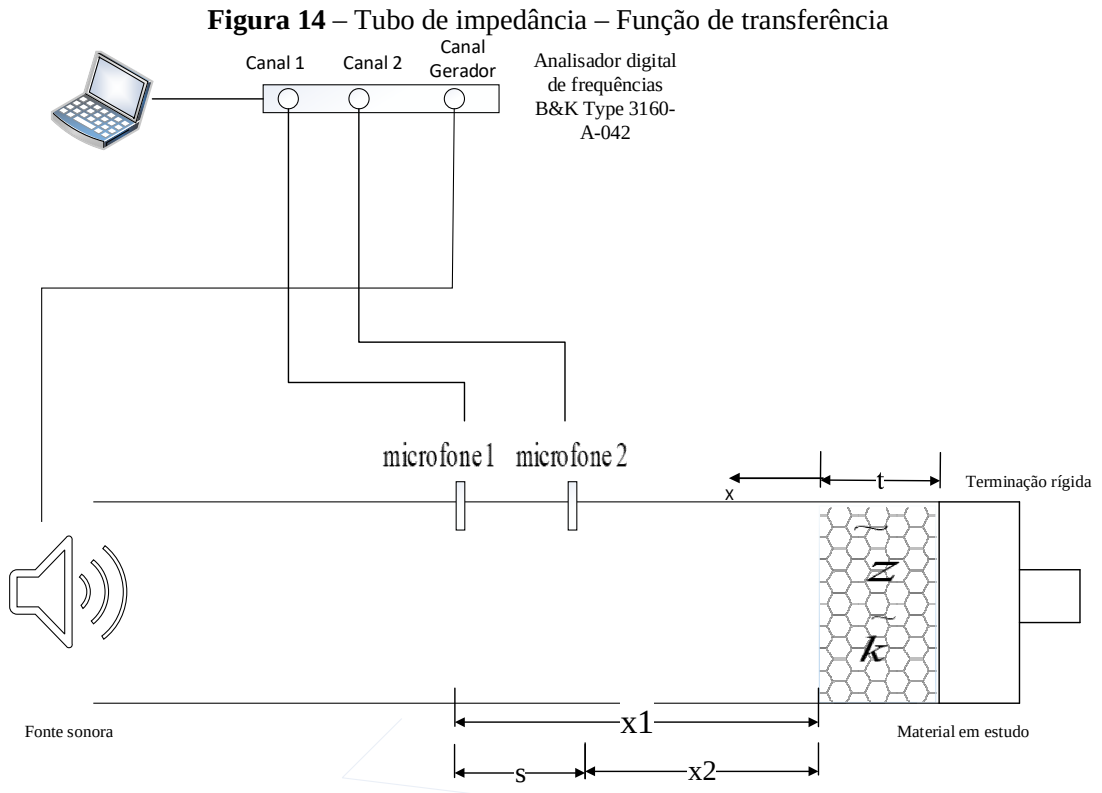
Neste capítulo serão apresentados os métodos experimentais aplicados neste trabalho para caracterizar as propriedades acústicas dos materiais como a impedância característica complexa e número de onda complexo. Os métodos a serem apresentados são: o método da função de transferência, método das duas espessuras (MDE), método das duas cavidades (MDC), método da matriz de transferência (MMT) e método da resistividade ao fluxo.

4.2. MÉTODO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Seybert e Ross (1976) apresentaram técnicas de medição em um tubo para determinar propriedades acústicas como impedância específica acústica e coeficiente de reflexão. Dois microfones são posicionados em localizações conhecidas ao longo do tubo para determinar espectro cruzado e espectro de potência, conseqüentemente, a função de transferência. Um ano mais tarde, estes autores avaliaram as propriedades acústicas de materiais absorventes empregando o método da função de transferência utilizando um tubo de impedância. Posteriormente, este método foi aperfeiçoado por Chung e Blaser (1980a) e atualmente, sua aplicação é governada pela norma ASTM E1050-10, 2010 (*Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System*).

Chung e Blaser (1980b) determinaram propriedades acústicas como: coeficiente de absorção e perda de transmissão de materiais através do método da função de transferência em um tubo circular utilizando sinais aleatórios de ondas estacionárias. A pressão sonora foi avaliada em duas posições distintas no tubo de impedância. O método apresentado pelos autores nesta publicação, consistia na utilização de um tubo de secção transversal circular ou retangular constante, onde em

uma das extremidades é conectado um alto-falante e na outra é posta a amostra a ser analisada, tangente a uma terminação rígida (material de alta densidade). Dois microfones de mesmo tamanho e modelo são posicionados ao longo do tubo conectados em um analisador digital de frequências, como mostra Figura 14.



O cálculo da pressão é dado pela equação da propagação de ondas planas descrita abaixo:

$$p(x, t) = C_1 e^{i(\omega t - kx)} + C_2 e^{i(\omega t + kx)} \quad (4.1)$$

onde:

C_1 e C_2 são amplitudes sonoras das ondas incidente e refletida, respectivamente em [Pa];

ω é a frequência angular em [rad/s];

k é o número de onda [m^{-1}];

t é o tempo em [s];

- x é a coordenada longitudinal;
 i é a unidade imaginária e vale $\sqrt{-1}$.

O primeiro termo da equação refere-se a onda incidente (parte negativa) e o segundo termo representa a parte refletida da onda (parte positiva).

Assim, para cada microfone utilizado, a pressão medida em função do tempo é descrita como:

$$p_1(x, t) = C_1 e^{i(\omega t - kx_1)} + C_2 e^{i(\omega t + kx_1)} \quad (4.2)$$

$$p_2(x, t) = C_1 e^{i(\omega t - kx_2)} + C_2 e^{i(\omega t + kx_2)} \quad (4.3)$$

A função de transferência $H_{12}(f)$ é a relação entre a pressão medida no ponto 2 ($p_2(x, t)$) sobre a pressão do ponto de referência, neste caso, o ponto 1 ($p_1(x, t)$).

$$H_{12}(f) = \frac{p_2(f)}{p_1(f)} = \frac{C_1 e^{i(\omega t - kx_2)} + C_2 e^{i(\omega t + kx_2)}}{C_1 e^{i(\omega t - kx_1)} + C_2 e^{i(\omega t + kx_1)}} \quad (4.4)$$

Simplificando os termos em comum da equação 4.4, tem-se:

$$H_{12}(f) = \frac{p_2(f)}{p_1(f)} = \frac{C_1 e^{ikx_2} + C_2 e^{-ikx_2}}{C_1 e^{ikx_1} + C_2 e^{-ikx_1}} \quad (4.5)$$

Dada a função de transferência, é possível calcular o coeficiente de reflexão (R), definido pela razão dos valores das amplitudes da onda refletida e incidente (SEYBERT e SONARKO, 1981; KINSLER *et al.*, e ALLARD e ATALLA, 2009).

$$R(f) = \left| \frac{C_2}{C_1} \right| \quad (4.6)$$

Portanto, substituindo a equação 4.5 em 4.6, obtém-se:

$$R(f) = \frac{H_{12}e^{ikx_1} - e^{ikx_2}}{e^{-ikx_2} - H_{12}e^{-ikx_1}} \quad (4.7)$$

De acordo com a figura 14 $x_2 = x_1 - s$ e substituindo na equação 4.7, tem-se:

$$R(f) = \frac{H_{12} - e^{iks}}{e^{iks} - H_{12}} e^{2ikx_1} \quad (4.8)$$

onde:

- R é o coeficiente de reflexão;
- H_{12} é a função de transferência [Pa/Pa];
- s é o espaçamento entre os microfones em [m];

Por fim, o coeficiente de absorção (α) pode ser calculado segundo Chung e Blaser (1980) por:

$$\alpha(f) = 1 - |R|^2 \quad (4.9)$$

A impedância superficial (Z_s) é uma outra propriedade que pode ser calculada a partir do coeficiente de reflexão. Segundo Seybert e Ross (1977), a expressão é:

$$Z_s(f) = z_0 \frac{1 + R}{1 - R} \quad (4.10)$$

onde:

- z_0 é a impedância característica do ar em [rayl] para onda planas.

A função de transferência obtida pelos microfones, também pode ser obtida pelas seguintes relações:

$$H_{12} = \frac{p_2(f)}{p_1(f)} = \frac{G_{12}(f)}{G_{11}(f)} \quad (4.11)$$

onde:

$G_{12}(f)$: é o espectro cruzado ou densidade espectral do microfone 2 com referência ao microfone 1;

$G_{11}(f)$: é o espectro de potência ou densidade auto espectral do microfone 1.

4.3. CALIBRAÇÃO DOS MICROFONES

Alguns erros de medição são comuns neste tipo de experimento. É necessário que os microfones sejam do mesmo tamanho e modelo, o tubo não pode conter espaços para que não haja vazamento do som. Um método simples e rápido para diminuir imprecisões em medições utilizando tubos de impedância é a calibração dos microfones. De acordo com a norma ASTM E1050-10 (2012), primeiramente é feita a medição posicionando os microfones no tubo ao longo de seu comprimento, chamando esta, da posição de I.

$$H^I_{n,ref} = |H^I| e^{j\phi I} = H_r^I + jH_i^I \quad (4.12)$$

onde:

$H^I_{n,ref}$ é a função de transferência de referência para a posição inicial;

H^I é a calibração da função de transferência na posição inicial;

ϕ é a fase da função de transferência complexa em [rad].

j é a parte imaginária e equivale a $\sqrt{-1}$.

r e i correspondem a parte real e imaginária.

A segunda medição será feita invertendo as posições destes microfones. Onde II é a posição referente a troca dos microfones.

$$H^{II}_{n,ref} = |H^{II}| e^{j\phi I} = H_r^{II} + jH_i^{II} \quad (4.13)$$

Ao trocar as posições dos microfones, é necessário que estejam em posições semelhantes com as medidas realizadas anteriormente.

Portanto, a função de transferência corrigida é dada por:

$$H^c_{n,ref} = (H^I \cdot H^{II})^{1/2} = |H^c| e^{j\phi^c} \quad (4.14)$$

onde o sobrescrito c , representa o sinal do microfone calibrado.

Entretanto, é possível realizar medições utilizando apenas um único microfone. Chu (1986) comprovaram que é possível eliminar o processo de calibração utilizando um único microfone.

$$H_{12}(f) = \frac{[p_2(f)p_1^*(f)][s(f)s^*(f)]}{[p_1(f)p_1^*(f)][s(f)s^*(f)]} \quad (4.15)$$

ou

$$H_{12} = \frac{G_{1s}(f)G_{s2}(f)}{G_{11}(f)G_{ss}(f)} \quad (4.16)$$

onde:

$s(f)$ é o sinal emitido pela fonte sonora em função da frequência;

G_{1s} é o espectro de potência da fonte sonora em relação ao microfone 1;

G_{2s} é o espectro de potência da fonte sonora em relação ao microfone 2;

$G_{ss}(f)$ é o espectro de potência ou densidade espectral da fonte sonora.

Como trata-se de um processo onde a onda de propagação é estacionária, a função de transferência pode ser obtida através de um microfone como citado anteriormente. Assim não é preciso calibrar os microfones e há uma diminuição dos erros sistemáticos e incertezas de medição.

Outro conceito aplicado para detectar erros é a coerência. Seybert e Soenarko (1981) concluíram que o surgimento de erros de medição pode ser evitado posicionando os microfones próximos a amostra, ou seja, nestas condições de acordo com os autores há um aumento na coerência dos sinais medidos. Entretanto, se a distância entre os microfones for muito pequena, há uma diminuição da precisão das medições na faixa de baixas frequências. Além disso, a posição do microfone pode coincidir ou estar muito próximo de um ponto nodal da onda sonora e como consequência deste fato, resultará em uma baixa coerência.

Segundo Bodén e Abom (1986), existe uma faixa de frequências ideal para trabalho onde há uma baixa margem de erro para determinar as propriedades do material, dada por:

$$0,1\pi < ks < 0,8\pi$$

onde:

s é o espaçamento entre microfones.

Substituindo o conceito de número de onda na equação acima, tem-se as frequências mínima e máxima onde são esperados bons resultados, expressas por:

$$f_{\min} > \frac{0,1c}{2s} \quad (4.17)$$

e

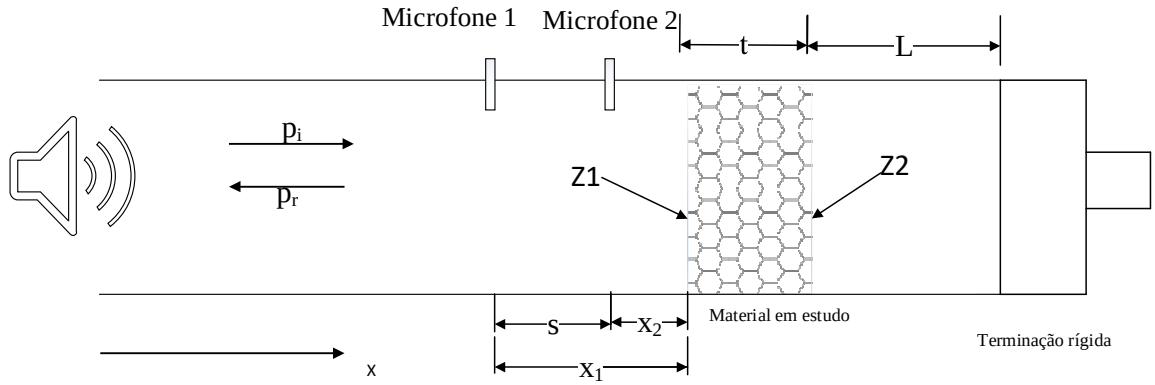
$$f_{\max} < \frac{0,8c}{2s} \quad (4.18)$$

4.4. MÉTODO DAS DUAS CAVIDADES MODIFICADO

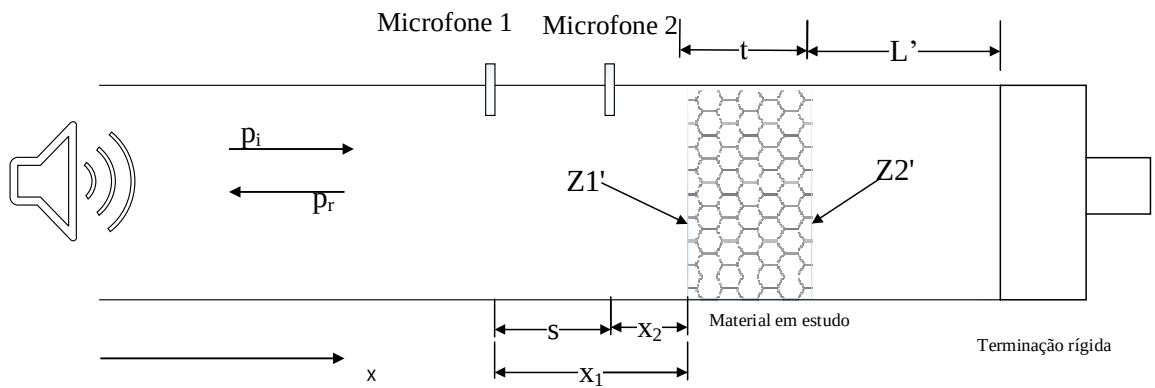
Outro método conhecido para determinar a impedância característica e número de onda complexos, é o método das duas cavidades. Desenvolvido por Utsuno *et al.*, 1989, utilizou um tubo de impedância, onde duas cavidades de ar com comprimentos distintos (L e L') são aplicadas. As impedâncias superficiais (Z_1 e Z_2) são obtidas da primeira cavidade (L), já para a lacuna de ar (L'), as impedâncias superficiais passarão a ser Z'_1 e Z'_2 .

A Figura 15 representa as duas condições do método.

Figura 15 - Esquematisação do tubo de impedância para o método das duas cavidades modificado.



(a) Cavidade de comprimento L

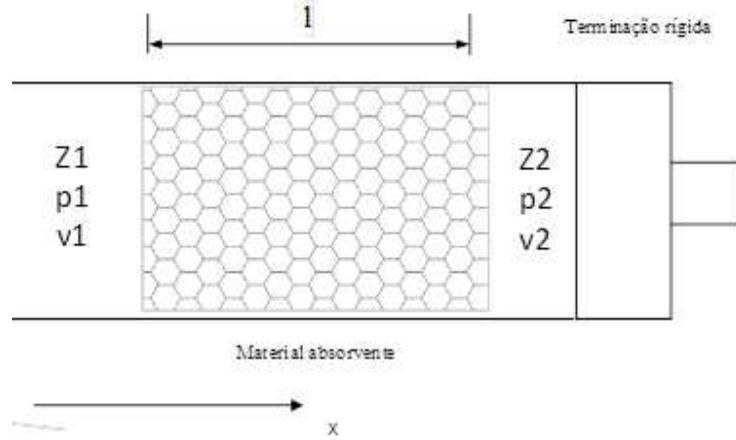


(b) Cavidade de comprimento L'

Fonte: Adaptado de Utsuno *et.al* (1989).

Em 1949, Zwicker e Kosten deduziram uma expressão para determinar a impedância característica superficial Z_1 e Z_2 de um material poroso de espessura l , constante de atenuação $\tilde{k}$ e impedância complexa $\tilde{z}$ posicionada próxima à uma terminação rígida, como mostra a Figura 16 e a equação 4.19.

Figura 16 – Impedâncias superficiais de um material absorvente



Fonte: Adaptado de Zwicker e Kosten (1949)

$$Z_1 = \tilde{z} \frac{Z_2 \cosh \tilde{k}l + \tilde{z} \sinh \tilde{k}l}{Z_2 \sinh \tilde{k}l + \tilde{z} \cosh \tilde{k}l} \quad (4.19)$$

onde as expressões matemáticas de cosseno e seno hiperbólicos podem ser definidas explicitamente segundo Kreyszig (1999), como:

$$\sinh \tilde{k}l = \frac{1}{2}(e^{\tilde{k}l} - e^{-\tilde{k}l}) \quad (4.20)$$

e

$$\cosh \tilde{k}l = \frac{1}{2}(e^{\tilde{k}l} + e^{-\tilde{k}l}) \quad (4.21)$$

Substituindo as equações 4.20 e 4.21 em 4.19 para as cavidades L e L' , obtém-se a impedância característica complexa mostrada na equação 4.22:

$$\tilde{z} = \pm \sqrt{\frac{Z_1 Z_1' (Z_2 - Z_2') - Z_2 Z_2' (Z_1 - Z_1')}{(Z_2 - Z_2') - (Z_1 - Z_1')}} \quad (4.22)$$

E o cálculo do número de onda complexo segundo Utsuno *et al.*, (1989) é dado por:

$$\tilde{k} = \frac{j}{2l} \ln \left(\frac{Z_1 + \tilde{z}}{Z_1 - \tilde{z}} \frac{Z_2 - \tilde{z}}{Z_2 + \tilde{z}} \right) = \frac{j}{2l} \ln \left(\frac{Z_1' + \tilde{z}}{Z_1' - \tilde{z}} \frac{Z_2' - \tilde{z}}{Z_2' + \tilde{z}} \right) \quad (4.23)$$

A impedância superficial depois da amostra para as cavidades L e L' respectivamente são:

$$Z_2 = -j\rho_0 c_0 \cot(k_0 L) \quad (4.24)$$

$$Z_2' = -j\rho_0 c_0 \cot(k_0 L') \quad (4.25)$$

onde:

L é a comprimento da cavidade de ar [m].

Se a cavidade utilizada para calcular Z_2 aproxima da cavidade de Z_2' , a impedância característica do material será igual a impedância do tubo fechado. Este fato ocorre devido o denominador $(Z_2 - Z_2')$ na equação 4.22 ser eliminado. Recomenda-se utilizar para as cavidades em função da frequência, a seguinte expressão (UTSUNO *et al.*, 1989).

$$f(L - L') = \frac{nc}{2}, \text{ para } n=1, 2, 3, \dots \quad (4.26)$$

Para determinar o valor de Z_1 , aplica-se a equação 4.10 utilizando a função de transferência do material absorvente.

Por fim, as amostras em estudo deverão ser semelhantes ao diâmetro do tubo em estudo. Kino e Keno (2007) comprovaram que há um efeito chamado *frame resonance effect* ou também chamado efeito de membrana, onde pode haver alteração nos resultados obtidos do coeficiente de absorção.

4.5. MÉTODO DAS DUAS ESPESSURAS

Aplicando os mesmos conceitos da função de transferência citado nas seções anteriores, o método das duas espessuras é uma outra alternativa para caracterizar materiais porosos e fibrosos.

Ferrero e Sacerdote (1951) estudaram e apresentaram o método das duas espessuras (MDE), sendo mais tarde aprimorado por Smith e Parrot (1983). O método consiste em analisar o material desejado com uma espessura qualquer, sendo que, a outra condição é dobrar esta espessura, utilizando o mesmo material. Assim, com estas duas condições é possível determinar as impedâncias superficiais, consequentemente o número complexo de onda ($\tilde{k}$) e a impedância característica complexa ($\tilde{z}$).

As impedâncias superficiais do material absorvente podem ser obtidos por:

$$Z_1 = -j\tilde{z} \cot(\tilde{k}t) \quad (4.27)$$

$$Z_2 = -j\tilde{z} \cot(\tilde{k}2t) \quad (4.28)$$

Onde, Z_1 corresponde a impedância superficial medida para espessura t e Z_2 a impedância superficial correspondente a espessura $2t$, ou seja, $d_2 = 2d_1 = 2d$. Portanto o número complexo de onda $\tilde{k}$ a impedância complexa $\tilde{z}$ serão:

$$\tilde{k} = \frac{1}{2}d \cdot \ln \frac{1+a}{1-a} \quad (4.29)$$

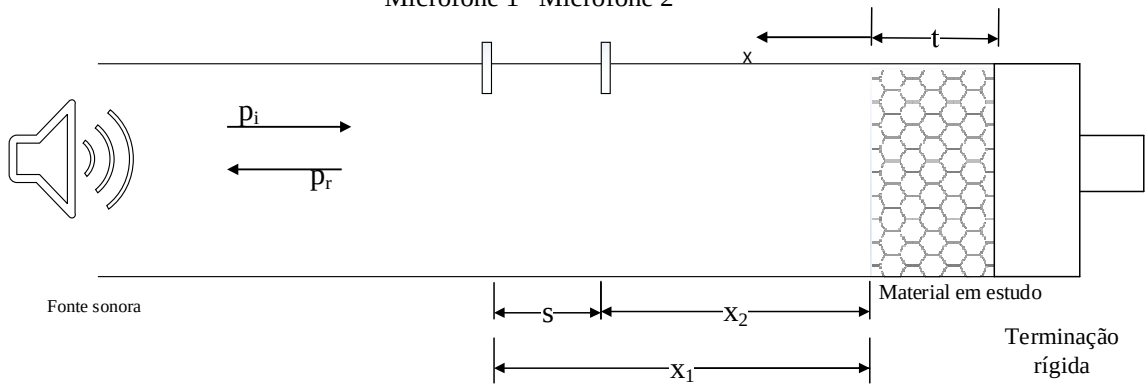
$$\tilde{z} = [Z_1(2Z_2 - Z_1)]^{1/2} \quad (4.30)$$

onde,

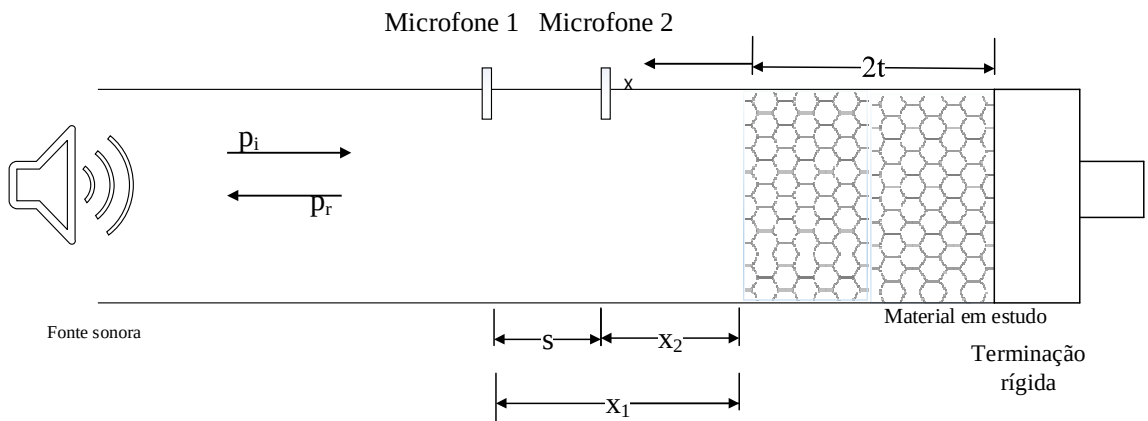
$$a = \left[\frac{(2Z_2 - Z_1)}{Z_1} \right]^{1/2}$$

Assim como o método das duas cavidades, no método das duas espessuras não é válido se o valor de Z_1 aproximar de Z_2 e as amostras em estudo deverão estar tangentes a terminação rígida, ou seja, com profundidade de cavidade nula. A Figura 17 mostra respectivamente as configurações da montagem do método com uma e duas espessuras.

Figura 17 - Tubo de impedância com amostras de 1 (a) e 2 (b) espessuras



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Ferrero & Sacerdote, 1951.

4.6. MÉTODO DE RESISTIVIDADE AO FLUXO

Outro método importante para determinar as propriedades acústicas dos materiais é a resistividade ao fluxo (r_0). Com a resistividade é possível encontrar a impedância característica complexa ($\tilde{z}$) e número de onda complexo ($\tilde{k}$) através das equações empíricas desenvolvidas por Delany e Bazley em 1970. Como base neste trabalho, o padrão de medição de resistividade ao fluxo

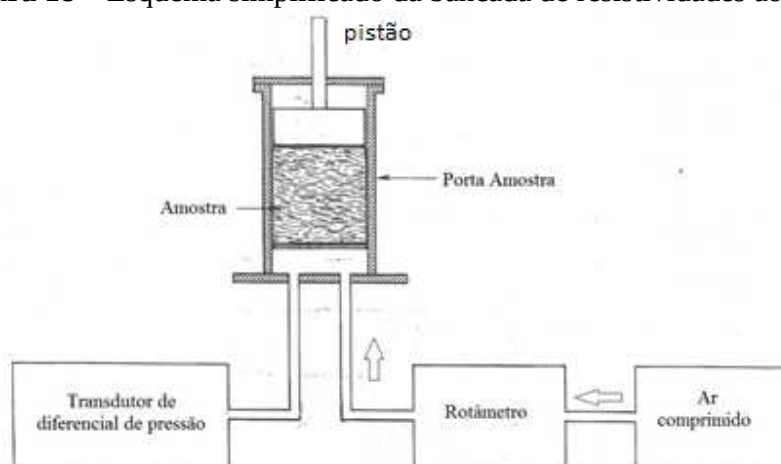
será padronizado pela norma ASTM C522-03, 2010 (*Standard Test Method for Airflow Resistance of Acoustical Materials*).

O método consiste em medir a diferença de pressão entre dois pontos da amostra em estudo, estas medições de resistividade ao fluxo deverão ficar entre 100 à 100.000 rayls (Pa.s/m), com velocidades de escoamento linear variando entre 0,5 à 50 mm/s e pressões que variam de 0.1 à 250 Pa. Acima destes valores de velocidade linear, o ponto em que o escoamento atravessa os poros dos materiais é parcial, ou há transição completa de escoamento laminar para turbulento, isto é, um regime transiente dará valores não constantes para resistividade ao fluxo.

A temperatura do ar não deve exceder 25 ± 5 °C e experimentos deverão ser feitos repetitivamente com alteração apenas na velocidade do escoamento. De preferência três medições devem ser feitas utilizando a mesma velocidade.

A bancada deverá conter os seguintes componentes: ar comprimido ou vácuo com taxa constante de escoamento, rotâmetro para medir a vazão do escoamento através da amostra (é preferível ter dois ou mais rotâmetros com escalas diferentes para medir com mesma precisão), transdutor de pressão para medir a diferença de pressão entre as faces da amostra e um porta amostra onde haja fixação da mesma para que o escoamento em velocidades mais altas não altere sua posição. Com a descrição acima, a bancada deverá ser montada de acordo com a Figura 18. A norma sugere um esquema para montagem.

Figura 18 – Esquema simplificado da bancada de resistividades ao fluxo



Fonte: adaptado ASTM C-522-03 (2010)

Por definição, a resistência ao fluxo específico é a relação da variação da pressão pela velocidade volumétrica do escoamento através da amostra mostrado na equação 3.68.

$$r = \frac{\Delta p}{u}$$

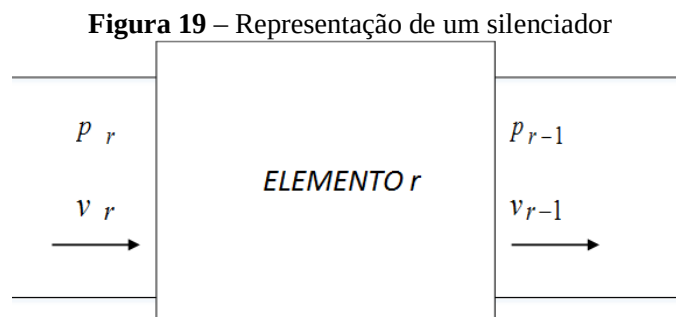
Já, a resistividade ao fluxo é definida como a relação da variação pressão pela velocidade linear do escoamento por unidade de espessura, dada em *rayl/m*, citada no Capítulo 3 pela equação 3.67:

$$r_0 = \frac{\Delta p}{u.t}$$

4.7. MÉTODO DAS DUAS CARGAS

A técnica de medição das duas cargas consiste em um artifício matemático aplicado por Munjal (1987), que utilizou para o cálculo da perda de transmissão em silenciadores automotivos. O autor também definiu como matriz de transferência a relação da pressão “*p*” e a velocidade da partícula “*v*” como duas variáveis de estado, semelhante a um volume de controle. Considerando um elemento qualquer “*r*”, a matriz descrita pela equação 4.31, representa os dois lados do elemento contendo condições de entrada e saída.

A Figura 19 mostra a representação do silenciador, seguida pela equação 4.32.



Fonte: O autor, 2017.

Relacionando os dados de entrada e saída em forma matricial, tem-se:

$$\begin{bmatrix} p_r \\ v_r \end{bmatrix} = [T_r] \begin{bmatrix} p_{r-1} \\ v_{r-1} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

onde:

$$[T_r] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

E $[p_r \quad v_r]$ é chamado de vetor estado no ponto “ r ” ou também conhecido como montante (*upstream*) e, $[p_{r-1} \quad v_{r-1}]$ é denominado vetor de estado para o ponto “ $r - 1$ ”, conhecido como jusante (*downstream*). E a matriz T_r é a matriz de transferência a qual representa este elemento. A montante e jusante foram representadas anteriormente como entradas e saídas da pressão e velocidade, aplicadas abaixo.

Aplicando condições de contorno pode-se concluir as seguintes relações

$$T_{11} = \left. \frac{p_r}{p_{r-1}} \right|_{v_{r-1}=0}, \quad T_{12} = \left. \frac{p_r}{v_{r-1}} \right|_{p_{r-1}=0}, \quad T_{21} = \left. \frac{v_r}{v_{r-1}} \right|_{v_{r-1}=0} \quad \text{e} \quad T_{22} = \left. \frac{v_r}{p_{r-1}} \right|_{p_{r-1}=0}$$

onde, T_{11} representa a razão entre pressão montante pela pressão jusante para um caso hipotético onde a jusante possui uma terminação rígida fixa ($\zeta_{r-1} \rightarrow \infty$), e T_{12} é a razão da pressão montante pela velocidade da partícula jusante para um caso hipotético de uma terminação aberta ($\zeta_{r-1} \rightarrow 0$). Neste caso ζ_{r-1} significa a impedância equivalente no ponto $r - 1$ (Munjal, 1987).

Aplicando as condições de contorno acima e adaptado por Lee (2005) obtém-se que:

$$\begin{bmatrix} p_e \\ u_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\tilde{k} l_t) & i\tilde{z} \sin(\tilde{k} l_t) \\ i \frac{\sin(\tilde{k} l_t)}{\tilde{z}} & \cos(\tilde{k} l_t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_s \\ u_s \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} p_e \\ u_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_0 L) & i\rho_0 c_0 \sin(k_0 L) \\ i \frac{\sin(k_0 L)}{\rho_0 c_0} & \cos(k_0 L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_s \\ u_s \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

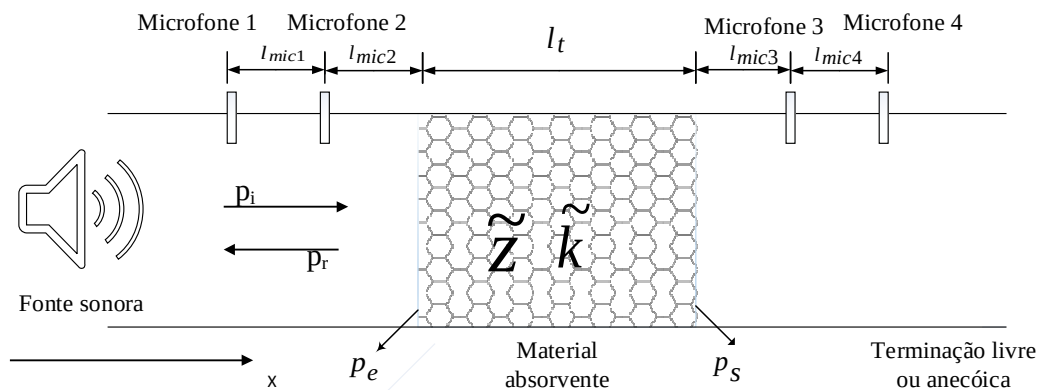
onde, p_e e u_e são respectivamente a pressão e a velocidade da partícula na entrada e p_s e u_s respectivamente a pressão e velocidade da partícula na saída.

Este método é capaz de determinar propriedades acústicas como: impedância característica complexa, número de onda complexo, perda de transmissão, coeficiente de reflexão, absorção e transmissão sonoros, os quais serão vistos posteriormente seguindo a norma ASTM E2611-09 (2009).

Com objetivo de determinar as propriedades acústicas dos materiais porosos/fibrosos, o método exige duas condições indispensáveis. A aplicação das terminações rígida e livre, ou anecóica. A terminação rígida é posicionada ao final do comprimento do tubo, é recomendado a utilização de um material de alta densidade, como por exemplo o latão, já a terminação livre, ao final do tubo basta deixar aberta, ou uma caixa contendo material absorvente sem que haja reflexão da onda sonora.

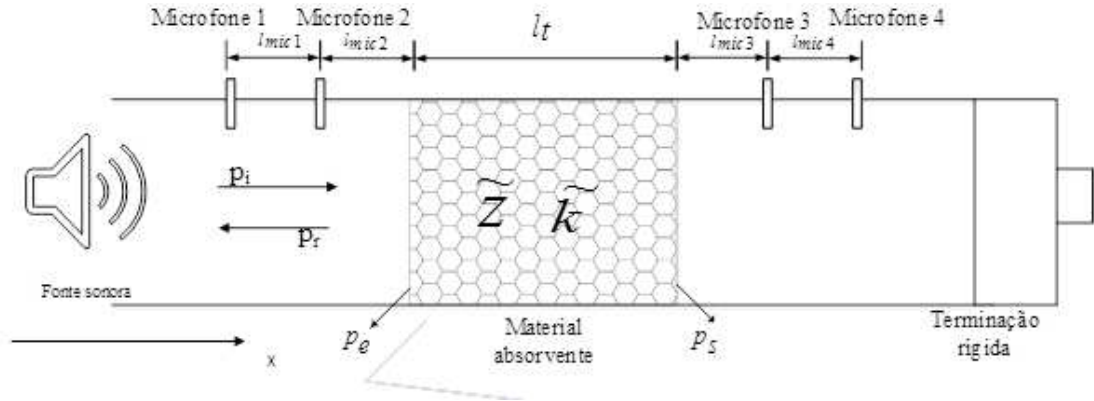
Para melhor visualização, as Figuras 20 e 21 mostram a esquematização do tubo de impedância com as terminações anecóica e rígida, respectivamente.

Figura 20 – Esquematização do tubo de impedância com terminação anecóica



Fonte: adaptado ASTM E2611-09 (2009)

Figura 21 - Esquemática do tubo de impedância com terminação rígida



Fonte: adaptado ASTM E2611-09 (2009)

onde:

- l_t é a espessura do material absorvente em [m];
- l_{mic1} é a distância entre centros dos microfones 1 e 2 em [m];
- l_{mic2} é a distância entre o microfone 2 e a parte frontal da amostra em [m];
- l_{mic3} é a distância entre o microfone 3 e a parte traseira da amostra em [m];
- l_{mic4} é a distância entre centros dos microfones 3 e 4 em [m];
- $\tilde{Z}$ é a impedância característica complexa do material absorvente em [rayl];
- $\tilde{k}$ é o número de onda complexo do material em [1/m].

Adaptando a equação 4.33 para as terminações anecóica e rígida, respectivamente tem-se:

$$\begin{bmatrix} p_e \\ u_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\tilde{k} l_t) & i\tilde{Z}\sin(\tilde{k} l_t) \\ i\frac{\sin(\tilde{k} l_t)}{\tilde{Z}} & \cos(\tilde{k} l_t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_s \\ u_s \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$\begin{bmatrix} p'_e \\ u'_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\tilde{k} l_t) & i\tilde{Z}\sin(\tilde{k} l_t) \\ i\frac{\sin(\tilde{k} l_t)}{\tilde{Z}} & \cos(\tilde{k} l_t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p'_s \\ u'_s \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Relacionando as equações 4.34 e 4.35:

$$\begin{bmatrix} p_e \\ u_e \\ p'_e \\ u'_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_s & u_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_s & u_s \\ p'_s & u'_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p'_s & u'_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\tilde{k} l_t) \\ i\tilde{z} \sin(\tilde{k} l_t) \\ i \frac{\sin(\tilde{k} l_t)}{\tilde{z}} \\ \cos(\tilde{k} l_t) \end{bmatrix}$$

Isolando a matriz de transferência, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \cos(\tilde{k} l_t) \\ i\tilde{z} \sin(\tilde{k} l_t) \\ i \frac{\sin(\tilde{k} l_t)}{\tilde{z}} \\ \cos(\tilde{k} l_t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_s & u_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_s & u_s \\ p'_s & u'_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p'_s & u'_s \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_e \\ u_e \\ p'_e \\ u'_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

Por fim, com a equação 4.36 é possível determinar as propriedades acústicas como a impedância e número de onda complexos com base nas pressões medidas no tubo. Já o cálculo da velocidade da partícula será através das relações das matrizes de transferência entre o fluido do tudo de impedância, neste caso o ar, e a superfície do material absorvente. De acordo com a Figura 19, a relação será entre o microfone 2 e a superfície de entrada do material.

Na forma matricial tem-se:

$$\begin{bmatrix} p_e \\ u_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_0 l_{mic2}) & i\rho_0 c_0 \sin(k_0 l_{mic2}) \\ i \frac{\sin(k_0 l_{mic2})}{\rho_0 c_0} & \cos(k_0 l_{mic2}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_{mic2} \\ u_{mic2} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

Assim, isolando a velocidade da partícula no microfone 2 (u_{mic2}), tem-se:

$$u_{mic2} = \frac{p_{mic1} - p_{mic2} \cos(k_0 l_{mic1})}{i \rho_0 c_0 \sin(k_0 l_{mic1})} \quad (4.38)$$

Substituindo a equação 4.38 em 4.37:

$$\begin{bmatrix} p_e \\ u_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_0 l_{mic2}) & i \rho_0 c_0 \sin(k_0 l_{mic2}) \\ i \frac{\sin(k_0 l_{mic2})}{\rho_0 c_0} & \cos(k_0 l_{mic2}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_{mic2} \\ \frac{p_{mic1} - p_{mic2} \cos(k_0 l_{mic1})}{i \rho_0 c_0 \sin(k_0 l_{mic1})} \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

A equação 4.39 determina a pressão sonora e a velocidade da partícula na superfície do material em uma terminação anecóica. Analogamente para terminação rígida pela equação (4.40):

$$\begin{bmatrix} p'_e \\ u'_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_0 l_{mic2}) & i \rho_0 c_0 \sin(k_0 l_{mic2}) \\ i \frac{\sin(k_0 l_{mic2})}{\rho_0 c_0} & \cos(k_0 l_{mic2}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p'_{mic2} \\ \frac{p'_{mic1} - p'_{mic2} \cos(k_0 l_{mic1})}{i \rho_0 c_0 \sin(k_0 l_{mic1})} \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

Aplica-se o mesmo conceito para determinar as propriedades do outro lado da superfície da amostra (entre a superfície de trás da amostra e o microfone 3) para terminação anecóica e rígida, respectivamente nas equações (4.41) e (4.42).

$$\begin{bmatrix} p_s \\ u_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_0 l_{mic3}) & i \rho_0 c_0 \sin(k_0 l_{mic3}) \\ i \frac{\sin(k_0 l_{mic3})}{\rho_0 c_0} & \cos(k_0 l_{mic3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{mic3} \\ \frac{-p_{mic4} - p_{mic3} \cos(k_0 l_4)}{i \rho_0 c_0 \sin(k_0 l_4)} \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

$$\begin{bmatrix} p'_s \\ u'_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_0 l_{mic3}) & i \rho_0 c_0 \sin(k_0 l_{mic3}) \\ i \frac{\sin(k_0 l_{mic3})}{\rho_0 c_0} & \cos(k_0 l_{mic3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p'_{mic3} \\ \frac{-p'_{mic4} - p'_{mic3} \cos(k_0 l_{mic4})}{i \rho_0 c_0 \sin(k_0 l_{mic4})} \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

Com as matrizes de transferência descritas acima, é possível determinar todos os parâmetros necessários com objetivo de calcular o número de impedância e o número de onda complexo, assim com outras propriedades acústicas. Sendo assim, a matriz de transferência T :

$$T = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 \\ T_3 & T_4 \end{bmatrix}$$

Como T_1 e T_4 (4.36) possuem valores idênticos, então:

$$T_1 = T_4 = \cos(\tilde{k} l_t)$$

Isolando o número de onda complexo, tem-se para T_1 e T_4 :

$$\begin{aligned}\tilde{k} &= \frac{\cos^{-1}}{l_t}(T_1) \\ \tilde{k} &= \frac{\cos^{-1}}{l_t}(T_4)\end{aligned}\quad (4.43)$$

Já o valor de impedância característica complexa é determinada pela relação de T2 e T3.

$$\begin{aligned}T_2 &= i\tilde{z}\operatorname{sen}(\tilde{k} l_t) \\ T_3 &= i \frac{\operatorname{sen}(\tilde{k} l_t)}{\tilde{z}}\end{aligned}$$

Dividindo T_2 por T_3 ,

$$\tilde{z} = \sqrt{\frac{T_2}{T_3}} \quad (4.44)$$

Finalmente, as equações 4.43 e 4.44 fornecem os valores de número de onda e impedância característica complexos do material absorvente analisado.

Outros parâmetros citados anteriormente que poderão ser calculados através da matriz de transferência segundo a norma ASTM E2611-09 (2009).

Coefficiente de transmissão Sonoro (τ) - com terminação anecóica:

$$\tau = \frac{2e^{jkl_t}}{T_1 + \left(\frac{T_2}{\rho c}\right) + \rho_0 c_0 T_3 + T_4} \quad (4.45)$$

Perda de transmissão com incidência normal (TL_n):

$$TL_n = 20 \log_{10} \left| \frac{1}{\tau} \right| \quad (4.46)$$

Coefficiente de reflexão (R) – com terminação rígida:

$$R = \frac{T_1 - \rho_0 c_0 T_3}{T_1 + \rho_0 c_0 T_3} \quad (4.47)$$

Coefficiente de absorção (α):

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (4.48)$$

CAPÍTULO 5

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

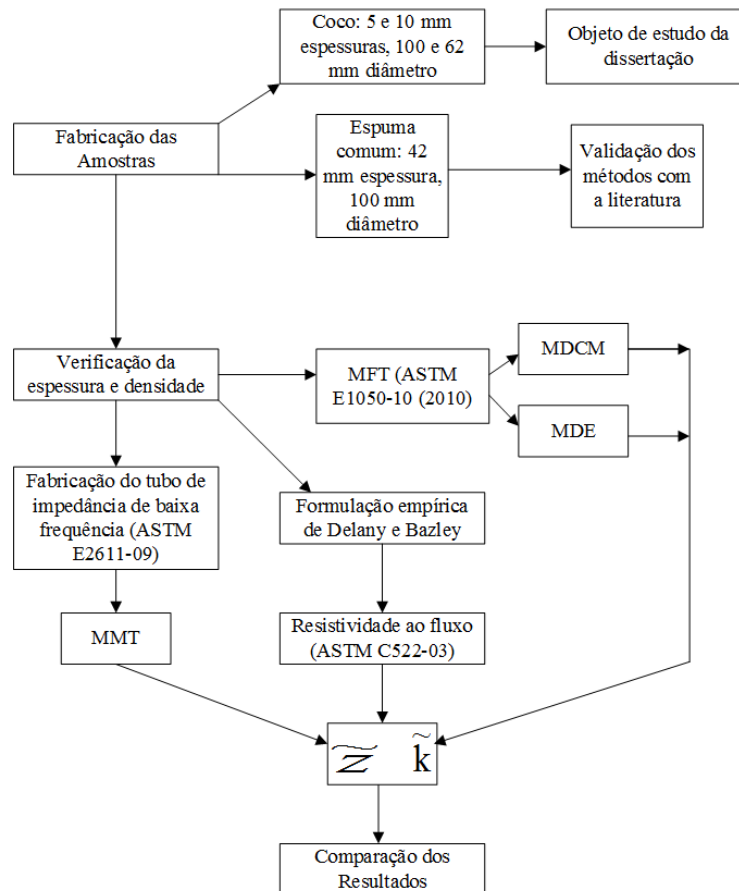
5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos adotados neste trabalho para a avaliação experimental das amostras de material absorvente escolhidas. Além disto, serão descritas as etapas de fabricação do tubo de impedância para avaliação de amostras com Método da Matriz de Transferência de acordo com a norma ASTM E2611-09 (2009). A Figura 22 mostra um resumo do procedimento adotado para determinação das propriedades acústicas dos materiais a serem adotados.

5.2. FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras a serem apresentadas neste trabalho foram preparadas no laboratório de Dinâmica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná. No processo de fabricação, foram realizadas as seguintes etapas: separação das fibras, pesagem das massas da fibra de coco e cola branca, mistura dos componentes, modelagem e secagem. Foram avaliados dois tipos de amostras: a) de espuma comum com densidade de $26,3 \text{ kg/m}^3$ com 42 mm de espessura e b) de fibra de coco de densidade média de 192 e 209 kg/m^3 para as espessuras de 5 e 10 mm, respectivamente. O objetivo de se avaliar amostras de espumas é verificar se métodos experimentais a serem utilizados neste trabalho apresentam resultados coerentes com literatura estudada. Esta necessidade decorre do fato de que as amostras de espuma são uniformes, ao contrário das amostras de fibra de coco por se tratarem de fibras naturais não serem homogêneas.

As amostras foram fabricadas a partir das fibras de coco desidratadas, Figura 23 adquiridas em lojas de materiais de construção. Recomenda-se aqui, a separação das fibras para haver uma melhor uniformidade dos diâmetros dos fios da fibra.

Figura 22 - Fluxograma dos procedimentos

Fonte: O autor, 2017

Figura 23 - Fibra de coco desidratada

Fonte: O autor, 2017.

A Figura 24 mostra os moldes metálicos utilizados para a fabricação das amostras de fibra de coco. Os anéis possuem diâmetro nominal de 100 mm de diâmetro com alturas dimensionadas para fornecerem amostras de 5 e 10 mm de espessura.

Figura 24 – Anéis para amostras de 5 e 10 mm de espessura respectivamente e tampas.



Fonte: O autor, 2017.

Quanto a união das fibras, aplicou-se cola branca com base de PVA (Acetato de Polivinila) como aglutinante, Figura 25. A proporção de fibra e cola aplicadas podem ser vistas na Tabela 1.

Figura 25 – Fibra de coco e cola pesadas.



Fonte: O autor, 2017.

Tabela 1 – Proporção fibra/cola.

Espessura (mm)	Fibra (g)	Cola Branca (g)
5	6,32	5,37
10	12,64	10,74

Fonte: O autor, 2017.

O processo de mistura dos componentes é realizado manualmente, até que haja uma distribuição uniforme entre a cola e a fibra. Após esta etapa, a mistura é inserida no molde metálico e prensada durante 24 horas com pesos de massa igual a 10 kg. O tempo de 24 h é recomendação do fabricante para que se obtenha a cura da cola em ambiente aberto, Figuras 26 e 27.

Figura 26 – Mistura (cola/coco) inserida e prensada no molde

Fonte: O autor, 2017.

Figura 27 – Retirada da amostra após 24 horas.

Fonte: O autor, 2017.

Após a cura, as amostras seguem para a estufa com o objetivo de que a umidade seja evaporada, já que os moldes metálicos não contêm furos que permitam esta evaporação. O tempo de secagem varia entre 4 a 8 horas dependendo da espessura da amostra e da umidade relativa do ambiente, Figura 28.

Figura 28 – Estufa para secagem das amostras



Fonte: O autor, 2017.

As Tabelas 2 e 3 contêm as propriedades das amostras de fibra de coco obtidas. Foram avaliadas as espessuras em cinco pontos, quatro localizadas nas extremidades e um no centro das amostras

Tabela 2 - Amostras de fibra de coco de 5 mm de espessura e 100 mm de diâmetro.

	Pontos de medição da espessura (mm)					Média	Massa Final	Densidade
	1	2	3	4	5	(mm)	(g)	(kg/m ³)
Amostra 1	5.6	5.8	5.5	5.4	5.7	5.6	8.1	183.6
Amostra 2	6.3	5.5	5.5	5.5	5.8	5.7	8.0	178.3
Amostra 3	5.5	5.7	5.5	5.5	5.7	5.6	8.8	202.3
Amostra 4	5.0	5.7	5.4	5.0	5.7	5.4	8.4	199.4
Amostra 5	5.5	5.3	5.4	5.5	5.7	5.5	8.0	185.4
Amostra 6	5.5	5.0	5.4	5.1	5.5	5.3	8.3	199.0
Amostra 7	5.3	5.3	5.5	5.3	5.3	5.3	7.9	188.4
Amostra 8	5.3	5.1	5.1	5.3	5.4	5.2	8.3	202.8
Amostra 9	5.1	5.5	5.5	5.1	5.3	5.3	8.3	199.9
Amostra 10	5.6	5.6	5.3	5.4	5.6	5.5	7.9	182.3
Média	x	x	x	x	x	x	8.2	192.1
Desvio P.	0.34	0.27	0.14	0.18	0.18	0.16	0.28	9.44

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 3 - Amostras de fibra de coco de 10 mm de espessura e 100 mm de diâmetro.

	Pontos de medição da espessura (mm)					Média	Massa Final	Densidade
	1	2	3	4	5	(mm)	(g)	(kg/m ³)
Amostra 1	10.2	10.1	10.4	10.1	10.5	10.2	16.78	208.6
Amostra 2	10.0	10.0	10.3	10.4	10.1	10.1	16.52	207.4
Amostra 3	10.0	10.0	10.3	10.4	10.0	10.1	17.3	217.7
Amostra 4	9.6	9.7	9.9	10.0	9.7	9.8	16.1	209.6
Amostra 5	10.5	10.5	10.3	10.6	10.7	10.5	16.7	202.3
Amostra 6	10.3	10.1	10.9	10.8	10.4	10.5	17.34	210.3
Amostra 7	9.8	9.3	9.4	10.2	9.8	9.7	15.98	210.0
Amostra 8	9.9	10.5	10.5	9.5	10.0	10.1	15.38	194.3
Amostra 9	9.7	9.7	9.8	9.7	9.8	9.7	17.09	223.6
Amostra 10	9.9	10.6	10.3	10.2	10.1	10.2	16.56	206.3
Média	x	x	x	x	x	10.1	16.6	209.0
Desvio P.	0.27	0.41	0.41	0.39	0.32	0.29	0.62	7.91

Fonte: O autor, 2017.

Com base nas Tabelas 1 e 2 pode-se afirmar que as espessuras médias valem $5,4 \pm 0,16$ mm e $10,1 \pm 0,29$ mm e as densidades médias valem $192,1 \pm 9,44$ kg/m³ e $209,9 \pm 7,91$ kg/m³. Esta diferença de espessura é devido ao fato das fibras não serem homogêneas, pois em uma única fibra, o seu diâmetro não é constante.

5.3. CONSTRUÇÃO DO TUBO DE IMPEDÂNCIA PARA ATENDER A NORMA ASTM E2611-09 (2009)

Este tópico mostrará a construção e os elementos utilizados para a construção do tubo de impedância.

De acordo com a ASTM E2611-09, o tubo de impedância consiste em dois tubos de seção transversal uniforme (quadrada ou circular). O tubo próximo à fonte sonora é denominado de tubo montante e o tubo próximo a terminação é denominado de tubo jusante. O tubo jusante deve ser preparado para receber duas terminações, uma rígida e outra livre ou ainda, pode ser anecóica, como já citado na seção 4.7. Além disso, os tubos deverão conter suportes para os microfones que serão posicionados ao longo do tubo, neste caso dois a montante e dois a jusante. As distâncias ideais dos microfones serão especificadas mais adiante.

O tubo poderá ser construído com diversos tipos de materiais (PVC, madeira, metal, acrílico, etc.). Devido as medidas específicas de projeto, o material selecionado foi alumínio com espessura 7,25 mm, para minimizar a perda de transmissão do sinal medido pelas suas paredes.

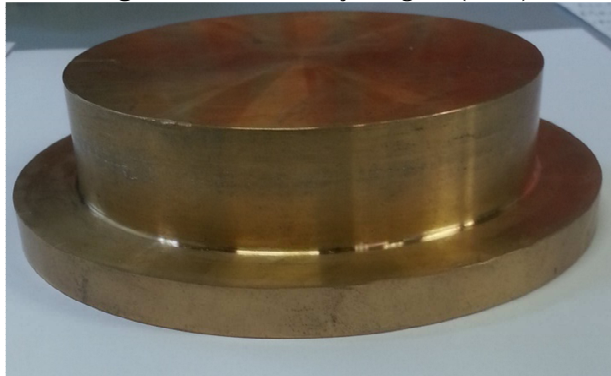
A norma ainda recomenda que o tubo deverá ter comprimento suficiente para que a onda se desenvolva completamente como plana, para isso, um mínimo de três vezes o diâmetro interno do tubo, deve ser considerado desde a fonte e a amostra de material absorvente a ser estudado. O acabamento interno deve ser liso e limpo para não ocorrer atenuação sonora. Quanto a terminação, livre ou anecóica, é facultativa, segundo a norma.

A terminação anecóica é composta por um material altamente absorvente que forneça uma alta atenuação acústica, para que haja o mínimo de reflexão da onda emitida pela fonte sonora, já a terminação rígida (reflexiva) deverá ser composta por um material de alta densidade e de preferência com pouca ou sem nenhuma atenuação ao contrário da anecóica. Neste trabalho utilizaram-se para a terminação anecóica a lã de rocha juntamente com placas Ampliespuma de 35 mm de espessura e densidade de 28 kg/m^3 , Figura 29, e para a terminação rígida, Figura 30, é utilizado latão com densidade aproximada de 8.000 kg/m^3 . De acordo com a recomendação da norma, foi adicionado um cone de lã de rocha de 300 mm de altura dentro do tubo de alumínio. A Figura 31 mostra o coeficiente de absorção da terminação anecóica e rígida determinados através do MFT (Método da Função de Transferência).

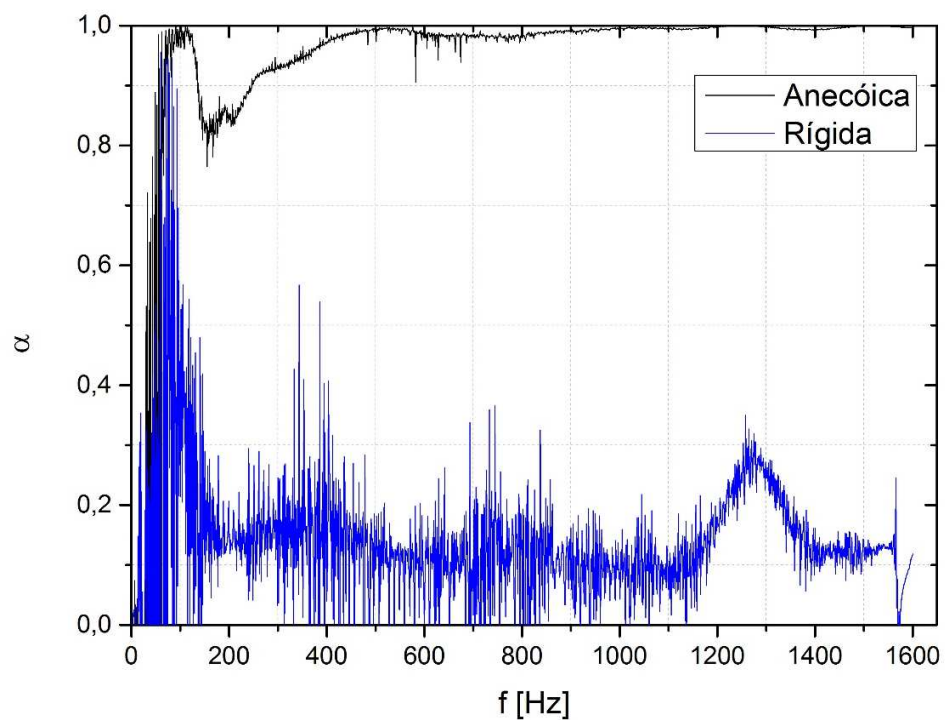
Figura 29 – Terminação anecóica



Fonte: O autor, 2017.

Figura 30 – Terminação rígida (latão)

Fonte: O autor, 2017.

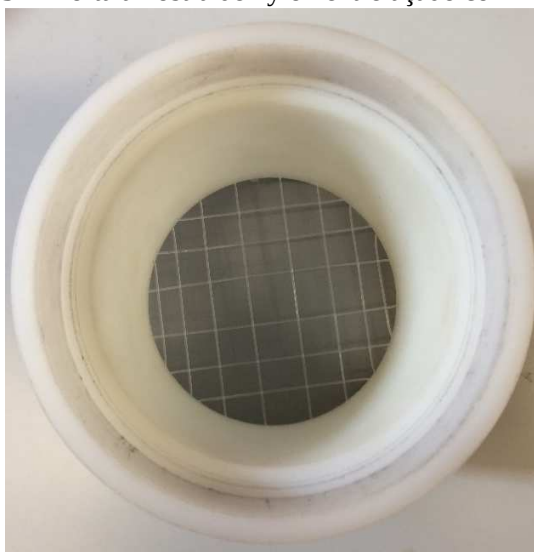
Figura 31 - Coeficiente de absorção (α) das terminações anecóica e rígida.

Fonte: O autor, 2017.

Na Figura 31, observa-se que o coeficiente α para a terminação anecóica e para terminação rígida são aproximadamente 1,0 e 0,1, respectivamente. A norma ASTM E2611-09 não fornece valores limites para esta grandeza. A faixa de frequência de 0 a 1600 Hz, Figura 31 é a faixa válida recomenda pela norma para o tubo em questão, ou seja, para 100 mm de diâmetro.

O porta amostras pode ser integrado ao tubo ou separado, desde que seja ajustável ao longo do tubo. Para este tubo, o porta amostra foi fabricado em nylon e a grade de sustentação das amostras foi montada em seu interior com fio de nylon de diâmetro 1,0 mm entrelaçado com Parnell nó, o mesmo utilizado na fabricação de raquetes de tênis. Este nó não permite a perda de tensão tração nos fios da grade, Figura 32.

Figura 32 - Porta amostra de nylon entrelaçado com Parnell nó



Fonte: O autor, 2017.

A norma recomenda que os microfones deverão ser do mesmo tamanho e do mesmo fabricante. É também recomendado que o diâmetro do microfone seja menor que 20% do comprimento de onda da maior frequência de interesse. A Tabela 4 especifica as faixas de frequências máximas de operação dos microfones.

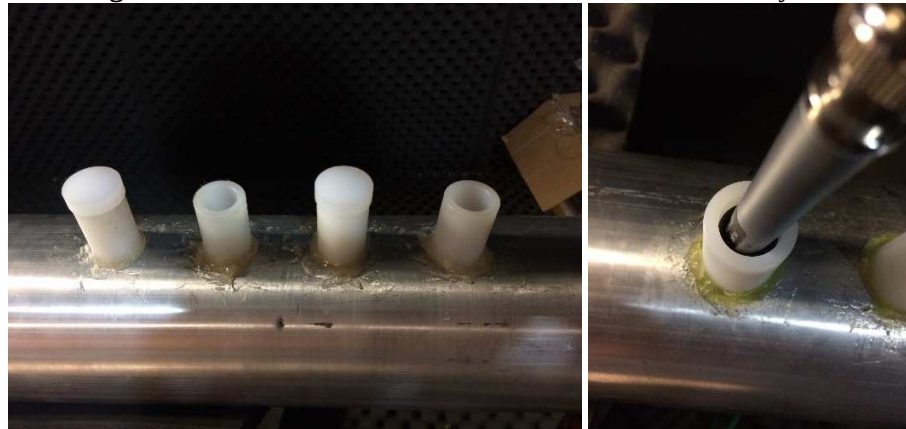
Tabela 4 - Microfones recomendados para frequências limites

Diâmetro Nominal (pol)	Diâmetro do Diafragma (mm)	Frequência Máxima (Hz)
1	22.70	3000
1/2	12.20	5600
1/4	5.95	11500

Fonte: adaptado ASTM E2611-09 (2009).

Os microfones também são posicionados em buchas de nylon usinado e vedados com anéis de borracha para evitar vazamentos durante o experimento como mostra a Figura 33. A Figura 34 mostra a bancada de medição completa para o MMT (Método da Matriz de Transferência) conforme a norma ASTM E2611-09.

Figura 33 - Posicionamento dos microfones nas buchas de nylon.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 34 - Bancada de medição montada, segundo a norma ASTM E2611-09.



Fonte: O autor, 2017.

5.4. BANCADAS DE MEDIÇÃO

As três bancadas são usadas neste trabalho para determinar as propriedades acústicas dos materiais absorventes de acordo o fluxograma apresentado na Figura 22. O tubo de impedância de baixa frequência para amostras de 100 mm e com dois microfones pode ser utilizado para aplicar os seguintes métodos: o Método da Função de Transferência - MFT (Chung & Blaser, 1980), o Método das Duas Cavidades Modificado - MDCM (Utsuno *et. al.*, 1989) e o Método das Duas Espessuras – MDE (Ferrero & Sacerdote, 1951). Este tubo para dois microfones é do fabricante EuroAcoustic modelo SCS 9020 B/K, Figura 35.

Figura 35 - Tubo de impedância para o MFT, MDCM e MDE

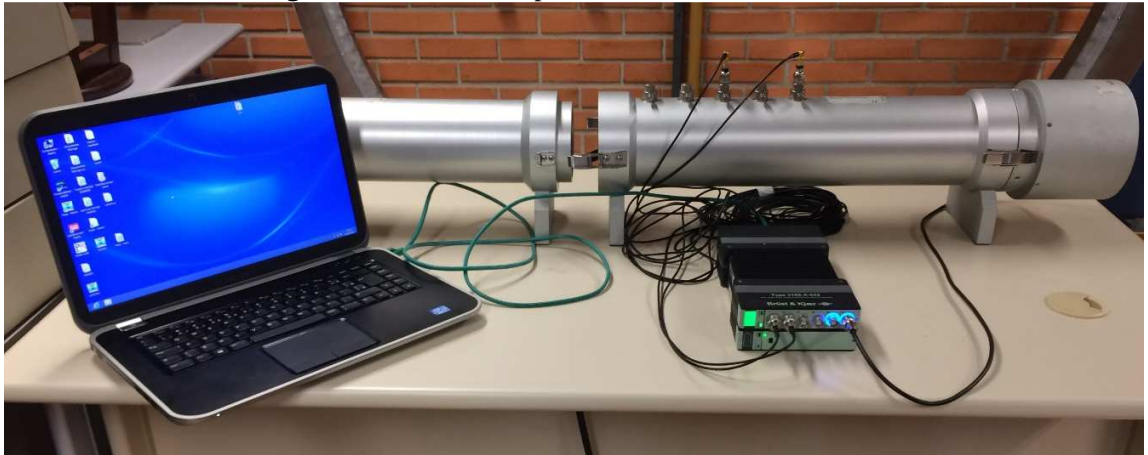


Fonte: O autor, 2017.

O tubo com 4 microfones, construído para esta dissertação, aplica o Método da Matriz de Transferência – MMT (Bolton, 2000). As propriedades acústicas das amostras, também serão determinadas com a bancada de resistividade ao fluxo através das equações empíricas de Delany e Bazley (1970). Esta bancada foi construída de acordo com a norma ASTM C522-03 (2009).

A aquisição e o processamento do sinal gerado são medidos nos dois tubos de impedância, como citados no parágrafo anterior, como mostra as Figuras 36 e 37.

Figura 36 - Tudo de impedância com dois microfones.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 37 - Tubo de impedância com 4 microfones



Fonte: O autor, 2017.

1. Um analisador e gerador de sinais Brüel & Kjær Type 3160-A-042 contendo 6 sinais, sendo quatro de entrada e dois de saída, Figura 38;
2. Dois microfones Brüel&Kjær Type 4935 de ¼'' pré-polarizados e pré-amplificados e com sensibilidade de 5,6 mV/Pa (para os métodos MFT, MDCM, MDE), Figura 39.

3. Quatro microfones Brüel & Kjær *Type 4189-A* de ½'' pré-polarizados e pré-amplificados, com sensibilidade nominal variando entre 47,0 e 52,0 mV/Pa (para o método MMT, Figura 40).

Figura 38 - Brüel & Kjær Type 3160-A-042



Fonte: O autor, 2017.

Figura 39 - Brüel & Kjær Type 4935 de ¼'' pré-polarizados



Fonte: O autor, 2017.

Figura 40 - Microfone ½'' Brüel & Kjær Type 4189-A pré-polarizados



Fonte: O autor, 2017.

Para garantir que haja apenas propagação de ondas planas geradas pela fonte sonora no interior do tubo, aplica-se a equação que determina a frequência de corte do tubo (f_c), isto é, a

frequência não deverá ultrapassar este limite caso contrário poderá existir a propagação de ondas não planas como mostra a equação 5.1, (ERIKSSON, 1980).

$$f_c < \frac{1,84c}{\pi D} \text{ em [Hz]} \quad (5.1)$$

onde:

D é o diâmetro interno do tubo em [m].

O limite da frequência mínimo é determinado pelo espaçamento dos microfones, ou seja, quanto maior o espaçamento dos microfones maior será a faixa de trabalho em baixas frequências e vice-versa. O limite de frequência máxima está relacionado ao diâmetro do tubo e a velocidade do som, e é determinado pela equação (5.2) de acordo com (MUNJAL, 1987).

$$f_u < \frac{Kc}{d} \quad (5.2)$$

ou

$$d < \frac{Kc}{f_u}$$

onde:

f_u é a frequência máxima limite em [Hz];

d é o diâmetro interno do tubo em [m];

K equivale a 0,586 (constante – tubo secção circular).

O espaçamento entre os microfones deve ser menor do que a metade do comprimento de onda de interesse, ou seja, (SEYBERT e ROSS, 1977):

$$s << \frac{c}{2f_u} \quad (5.3)$$

onde:

s é o espaçamento entre os microfones em [m];

f_u é a frequência máxima de operação em [Hz].

Este espaçamento não deve passar de 80% de $c/(2f_u)$. A mínima distância entre a fonte sonora e o primeiro microfone deverá ser no mínimo três vezes o diâmetro interno do tubo como dito anteriormente.

Como neste trabalho será utilizada amostras contendo fibras, não serão totalmente idênticas, portanto, considerando as amostras assimétricas, o espaçamento entre a superfície e o microfone deverá ser no mínimo duas vezes o diâmetro do tubo.

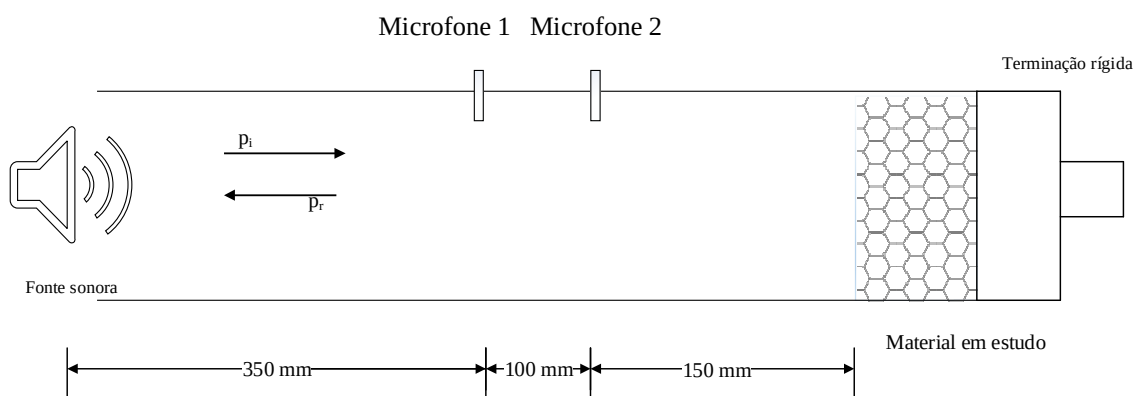
Nos experimentos realizados foram definidos os seguintes parâmetros:

- Tubo de impedância (2 microfones) – função de transferência: o espaçamento entre os microfones é de 100 mm, a distância do microfone mais próximo da amostra e a amostra é de 150 mm e a distância do microfone próximo a fonte sonora é 350 mm. O ruído selecionado é aleatório.

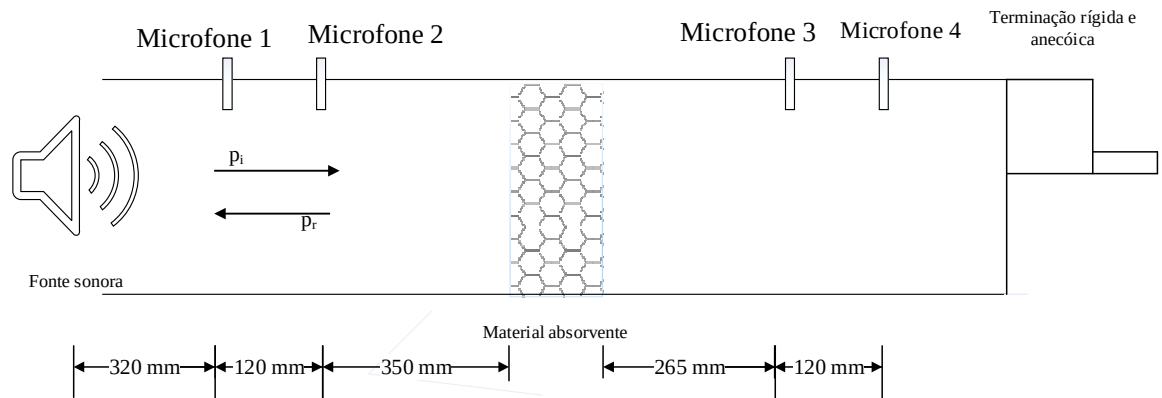
- Tubo de impedância (4 microfones) – matriz de transferência: o espaçamento entre os microfones é de 120 mm, a distância do microfone mais próximo da amostra e a amostra frontal é de 345 mm, a distância do microfone mais próximo da amostra e a amostra de trás é de 265 mm e a distância do microfone próximo a fonte sonora é 320 mm. O ruído selecionado é aleatório.

As duas representações descritas acima, podem ser visualizadas pelas Figuras 41.

Figura 41 – Posicionamento dos microfones – (a) tubo de impedância de 2 microfones (b) tubo de impedância de 4 microfones.



(a)



(b)

Fonte: O autor, 2017.

5.5. APARATO DE RESISTIVIDADE AO FLUXO

A resistividade ao fluxo (r_0) do material pode ser determinada experimentalmente em uma bancada relativamente simples, como mostrado na Figura 42. A ideia deste experimento é induzir o fluxo de ar através da amostra de teste e medir o gradiente de pressão resultante de acordo com os procedimentos descritos na norma ASTM C522-03 (2009), o tubo de acrílico possui dimensões de 62 mm de diâmetro e 1100 mm de comprimento, garantindo que o escoamento interno seja laminar e completamente desenvolvido como determina Fox *et al.*, 2006.

$$\frac{L_e}{d} \approx 0,06 \text{ Re}$$

onde,

L_e : comprimento de entrada do tubo [m];

d : diâmetro do tubo [m];

Re : número de Reynolds.

Figura 42 - Bancada de resistividade ao fluxo.



Fonte: O autor, 2017.

Os equipamentos que compõem a bancada são:

1. Válvula reguladora de pressão Parker, modelo 27R112AD – série 27R, variando de 0 a 2,8 bar com filtro de particulado e água, série 6-½ com dreno manual e elemento filtrante de 40 micra, Figura 43;
2. Duas válvulas reguladoras de fluxo modelo PFC06N Parker;
3. Dois rotômetros Omega, um modelo FL-3139SA-NISTAIR com faixa de trabalho de 0 a 11,887 L/min de ar e outro, FL-3140SA-NISTAIR com faixa de trabalho de 0 a 29,364 L/min de ar, Figura 35. Ambos os rotômetros contém erros de fundo de escala com 2% do máximo valor medido conforme recomenda a norma ASTM C522-03 (2009), Figura 44;
4. Um manômetro diferencial de pressão Dwyver, modelo 616WL-22 com faixa de trabalho de 0 a 60 Pa com erro de fundo de escala de 0,5% do máximo valor medido, Figura 45;
5. Fonte DC da Hawllet Packard com 15 volts de tensão para alimentação do manômetro diferencial, Figura 46.

Figura 43 - Válvula reguladora de pressão



Fonte: O autor, 2017

Figura 44 - Rotâmetros



Fonte: O autor, 2017.

Figura 45 - Manômetro diferencial de pressão



Fonte: O autor, 2017.

Figura 46 - Fonte alimentadora

Fonte: O autor, 2017.

A seguir, são descritas as etapas para a realização das medições de resistividade ao fluxo.

- a) A amostra deverá ser acomodada no porta amostra, rente a tela;
- b) A pressão da tubulação de ar medida na válvula reguladora de pressão deverá permanecer em 0,5 bar;
- c) As velocidades de escoamento medidas no rotâmetro são: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50 e 55 mm/s. Estas velocidades devem varia intermitentemente;
- d) Medir a diferença de pressão antes e depois da amostra, utilizando o manômetro para todas as velocidades descritas acima;
- e) Calcular a resistividade ao fluxo aplicando a equação 3.67;
- f) Temperatura deve estar na faixa de 22 ± 5 °C;
- g) A norma recomenda um número superior a três amostras e calcular sua média.

Determinados os valores de resistividade ao fluxo, por fim aplica-se a fórmula empírica de Delany e Bazley (1970) com objetivo de determinar os valores de impedância característica complexa e número de onda complexo, ou seja, pela equação:

$$\frac{\tilde{z}}{\rho_0 c_0} = \left[1 + 0,0511 \left(\frac{f}{r_0} \right)^{-0,75} \right] + i \left[-0,0768 \left(\frac{f}{r_0} \right)^{-0,73} \right] \quad (5.4)$$

$$\frac{\tilde{k}}{k_0} = \left[1 + 0,0858 \left(\frac{f}{r_0} \right)^{-0,70} \right] + i \left[-0,1749 \left(\frac{f}{r_0} \right)^{-0,59} \right] \quad (5.5)$$

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão mostrados os resultados obtidos para avaliar as propriedades acústicas das amostras de fibra de coco. As grandezas a serem avaliadas são: resistividade ao fluxo (r_0), impedância característica complexa ($\tilde{z}$) e número de onda complexo ($\tilde{k}$). Nesta dissertação serão realizadas 5 análises para cumprir os objetivos propostos no Capítulo 1, ou seja:

Análise 1 – Com os valores obtidos de resistividade ao fluxo, seguindo a norma ASTM C522-03 (2009), são aplicados na equação empírica de Delany e Bazley (1970) para determinar impedância característica e número de onda complexos;

Análise 2 – Através do Método das Duas Cavidades de Utsuno *et al.*, (1989), obter as propriedades de impedância característica e número de onda complexos;

Análise 3 – Utilizando o Método das Duas Espessuras de Ferrero e Sacerdote (1951), obter as propriedades de impedância característica e número de onda complexos;

Análise 4 – Com o Método da Matriz de Transferência de Song e Bolton (2000), obter as propriedades de impedância característica e número de onda complexos;

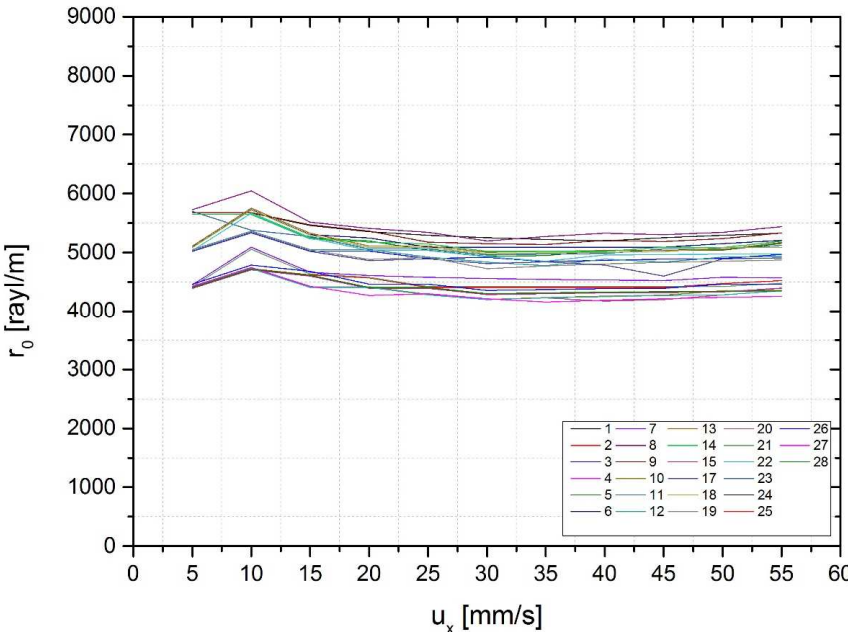
Análise 5 – Comparação dos resultados obtidos nas análises anteriores.

6.2. ANÁLISE 1

Nesta primeira análise, foi avaliada a resistividade ao fluxo (r_0) da fibra de coco com amostras de 62 mm de diâmetro e com 5 e 10 mm de espessura. Determinada esta propriedade, calcula-se a impedância característica e número de onda complexos aplicando as expressões empíricas de Delany e Bazley (1970).

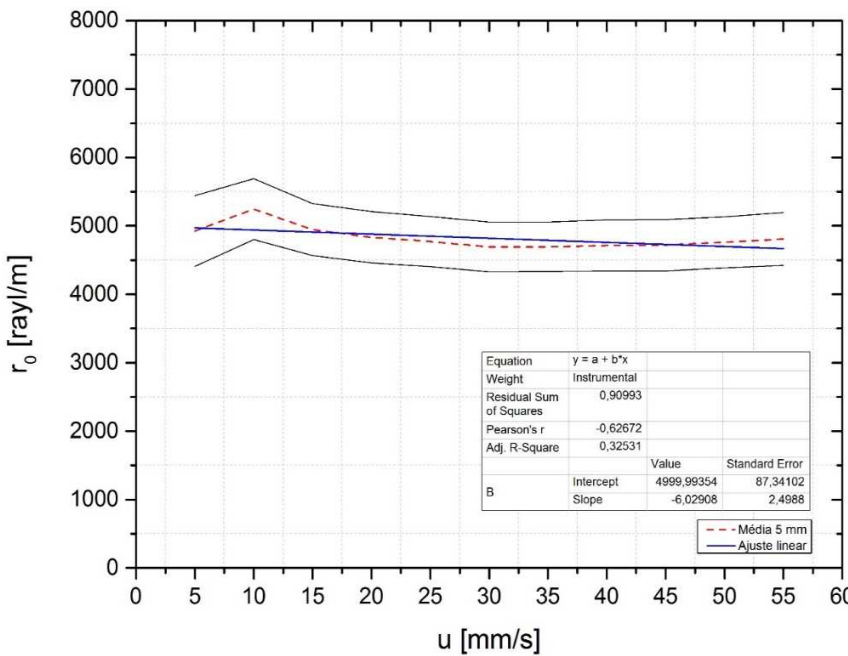
Avaliaram-se oito amostras de 5 mm de espessura foram combinadas em grupos de seis, totalizando 28 combinações de 6 amostras cada e sete amostras de 10 mm espessura, combinadas em grupos de quatro, totalizando 35 combinações de 4 amostras cada. As amostras foram combinadas como o objetivo de aumentar a perda de carga para uma medição mais precisa pelo manômetro diferencial de pressão da bancada, que possui a leitura mínima 1,2 Pa e de forma que a atingir o valor mínimo de 100 rayls da resistência ao fluxo exigido pela norma. Isto somente é possível porque a resistividade ao fluxo é inversamente proporcional a espessura, segundo a equação 3.67. Estas conclusões também foram apresentadas por Lima *et al.*, 2016. Os resultados para a resistividade de fluxo para as amostras de 5 e 10 mm de espessura são apresentados na Figuras 47 e 49, respectivamente e, nas Figuras 48 e 50, são mostradas as médias dos resultados das amostras.

Figura 47 - Gráfico da resistividade ao fluxo da fibra de coco para amostras de 5 mm de espessura.



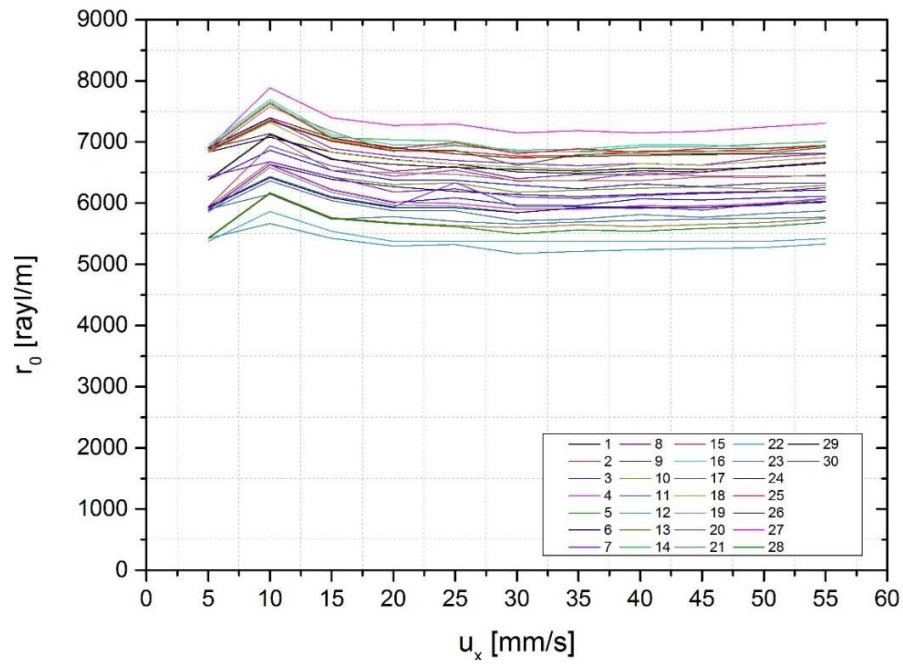
Fonte: O autor, 2017.

Figura 48 – Média da resistividade ao fluxo da fibra de coco para amostras de 5 mm de espessura.



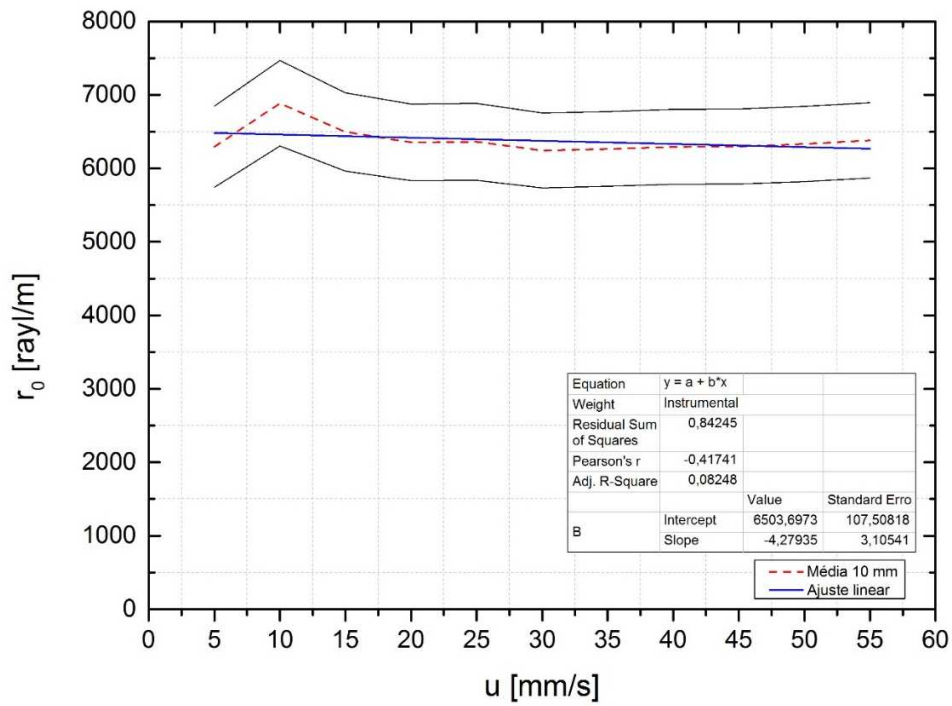
Fonte: O autor, 2017.

Figura 49- Gráfico da resistividade ao fluxo da fibra de coco para amostras de 10 mm de espessura.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 50 - Média da resistividade ao fluxo da fibra de coco para amostras de 10 mm de espessura.



Fonte: O autor, 2017.

Com base nos resultados das Figuras 48 e 50 verifica-se que a resistividade ao fluxo para as amostras de fibra de coco de 5 e 10 mm são respectivamente 4827 e 6381 rayl/m, comprovando que quanto maior a espessura, maior a dificuldade da passagem do fluxo de ar. A norma recomenda que o coeficiente angular das retas de r_0 seja o mais próximo possível de “zero” e com uso de equipamentos de medição com erros de 0,5% do seu fundo de escala, são aceitos erros de 5% no valor da resistividade de fluxo. Além disso, pode-se observar que para os fluxos com velocidades de 5 a 15 mm/s os resultados não são recomendados, uma vez que os valores das perdas de carga medidas ficaram muito próximos do erro de escala dos equipamentos, já que os valores mínimos de diferença de pressão deverão ser de 1,2 Pa. Os valores da perda de carga medidas para todas as amostras podem ser vistas no Apêndice A e B.

Lembrando, segundo a norma ASTM 522-03 (2009), os valores válidos de resistência ao fluxo (r) deverão estar na faixa de trabalho entre 100 a 10.000 rayls ou 0,1 e 250 Pa de diferencial de pressão, caso contrário, os resultados obtidos deverão ser descartados. Os valores da resistência de fluxo para as amostras ficaram entre 130 e 300 rayl. Os valores de r para todas as amostras podem ser vistas no Apêndice C e D.

A partir dos valores médios obtidos de resistividade ao fluxo, aplica-se a equação empírica de Delany e Bazley (1970). Os valores médios de resistividade ao fluxo para as amostras de fibra de coco de espessuras de 5 e 10 mm são respectivamente 4827 e 6381 rayls, substituindo nas equações 3.65 e 3.66, tem-se para 5 mm:

$$\frac{\tilde{z}_{coco}}{\rho_0 c_0} = \left[1 + 0,0511 \left(\frac{f}{4827} \right)^{-0,75} \right] + i \left[-0,0768 \left(\frac{f}{4827} \right)^{-0,73} \right] \quad (6.1)$$

$$\frac{\tilde{k}_{coco}}{k_0} = \left[1 + 0,0858 \left(\frac{f}{4827} \right)^{-0,70} \right] + i \left[-0,1749 \left(\frac{f}{4827} \right)^{-0,59} \right] \quad (6.2)$$

E para 10 mm de espessura:

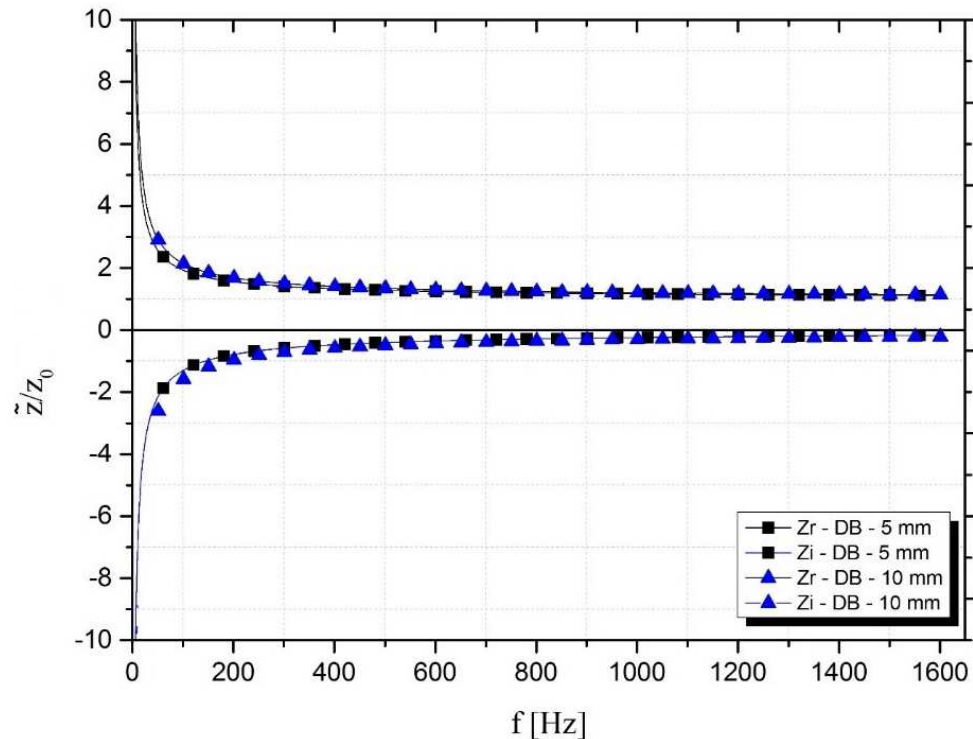
$$\frac{\tilde{z}_{coco}}{\rho_0 c_0} = \left[1 + 0,0511 \left(\frac{f}{6381} \right)^{-0,75} \right] + i \left[-0,0768 \left(\frac{f}{6381} \right)^{-0,73} \right] \quad (6.3)$$

$$\frac{\tilde{k}_{coco}}{k_0} = \left[1 + 0,0858 \left(\frac{f}{6381} \right)^{-0,70} \right] + i \left[-0,1749 \left(\frac{f}{6381} \right)^{-0,59} \right] \quad (6.4)$$

As Figuras 51 e 52 mostram respectivamente os valores obtidos de impedância característica complexo e número de onda complexo normalizados, ou seja, em relação ao ar para ambas espessuras. Onde a parte real situa-se na coordenada positiva e a componente imaginária na coordenada negativa, representadas pelos subscritos “r” e “i”, respectivamente.

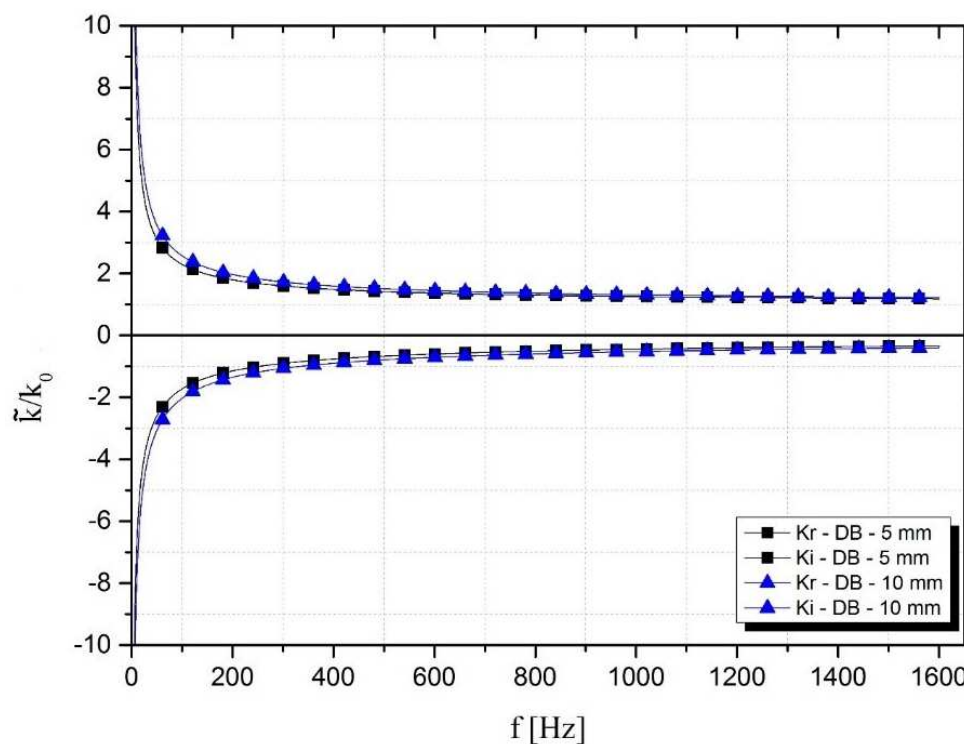
Nota-se em ambos os resultados, apesar dos valores de r_0 serem diferentes, que tanto a impedância quanto número de onda complexos são semelhantes para as duas espessuras, com um pequeno aumento para as amostras de 10 mm. Também observa-se que os valores reais de impedância característica (resistência característica) e número de onda (constante de propagação) tendem a o valor unitário, enquanto que os valores imaginários da impedância característica (reatância característica) e número de onda (constante de atenuação) tendem a zero.

Figura 51 - Impedância característica normalizada da fibra de coco (5 e 10 mm de espessura) obtidas por Delany e Bazley.



Fonte: O autor, 2017

Figura 52 – Número de onda complexo normalizado da fibra de coco (5 e 10 mm de espessura) obtidas por Delany e Bazley.

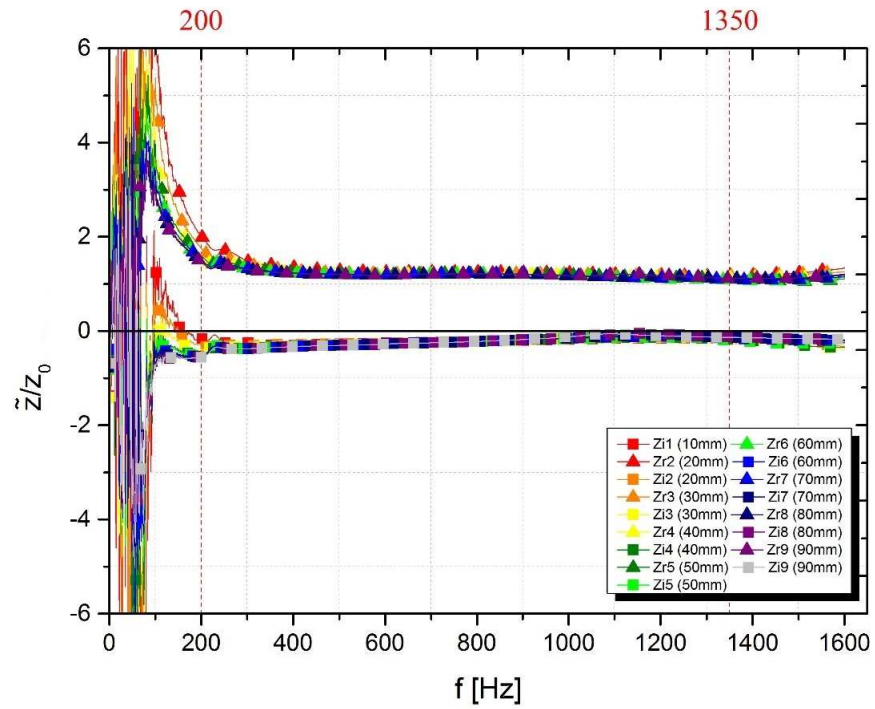


Fonte: O autor, 2017.

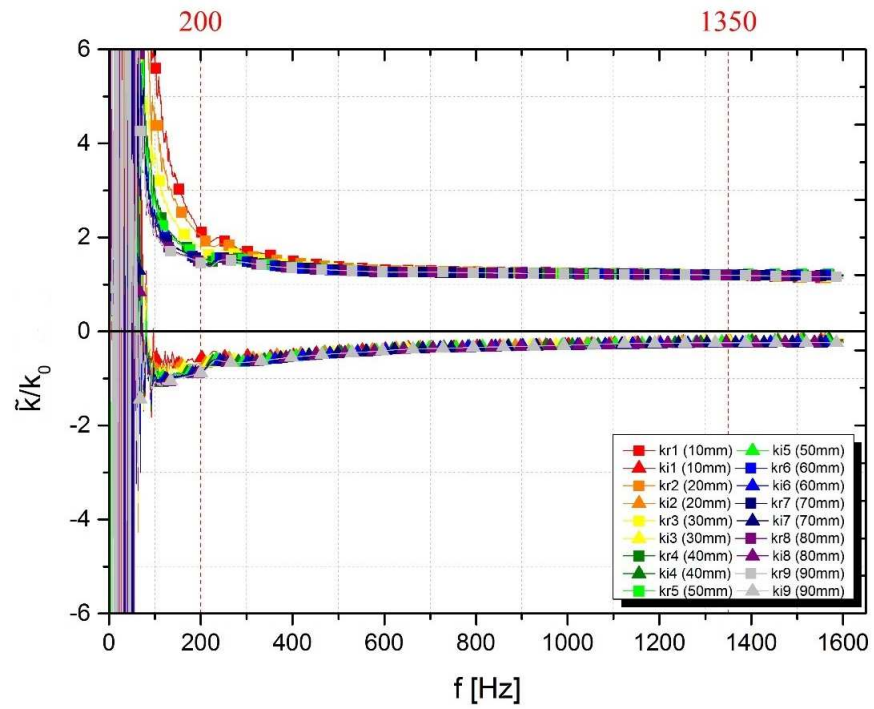
6.3.ANÁLISE 2

O método das duas cavidades desenvolvido por Utsuno *et al.*, (1989) também irá determinar os valores de impedância característica e número de onda complexos dos materiais absorventes.

Com o tubo de impedância de baixa frequência com 100 mm de diâmetro interno, são determinadas primeiramente o comprimento das cavidades. Os melhores resultados serão selecionados para as análises posteriormente. Para isto, uma espuma comum com 42 mm espessura e densidade de 28 kg/m³ é testada em diversas cavidades, sendo estas de: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 mm. Os resultados da impedância característica e número de onda são apresentados nas Figuras 53 e 54.

Figura 53 - Impedância característica da espuma obtida pelo MDC.

Fonte: O autor, 2017

Figura 54 - Número de onda complexo da espuma obtida pelo MDC.

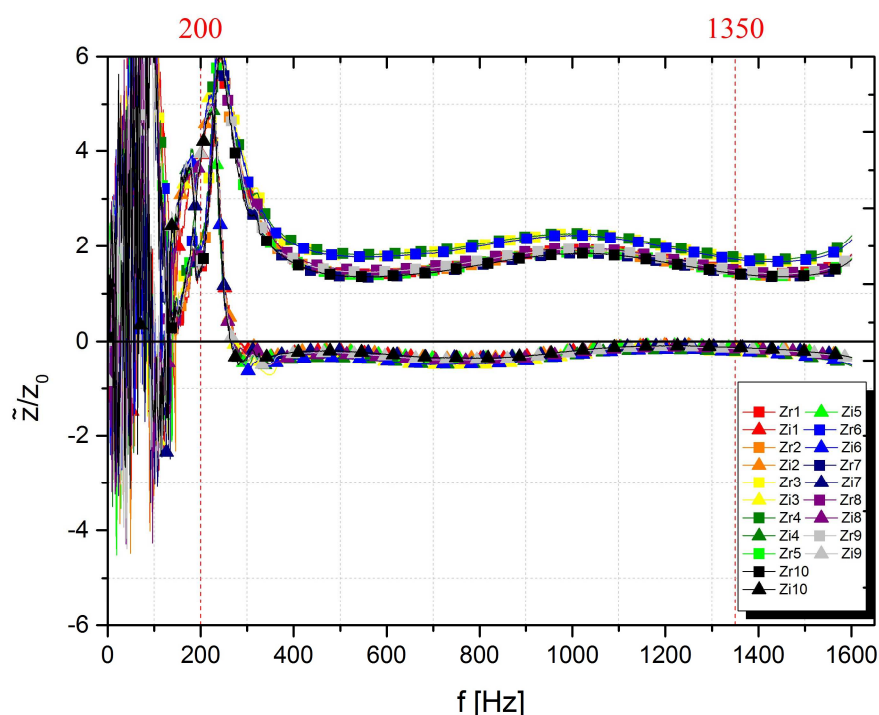
Fonte: O autor, 2017.

As linhas vermelhas tracejadas mostradas nas Figuras 53 e 54 acima, delimitam a faixa de frequência onde são esperados bons resultados de acordo com as equações 4.17 e 4.18. Nota-se que os valores reais e imaginários da impedância característica e número complexo para todas as cavidades permaneceram sobrepostos para todas as cavidades avaliadas. Neste caso, a largura da cavidade não irá influenciar nos resultados. Com base nestes resultados, foram definidas as cavidades de 10 e 50 mm de comprimento para os experimentos com as amostras de espuma comum.

Assim, para as 10 amostras de fibra de coco, a impedância característica e número complexo de onda normalizados para as espessuras de 5 e 10 mm respectivamente são mostradas nas figuras 55, 56, 57 e 58.

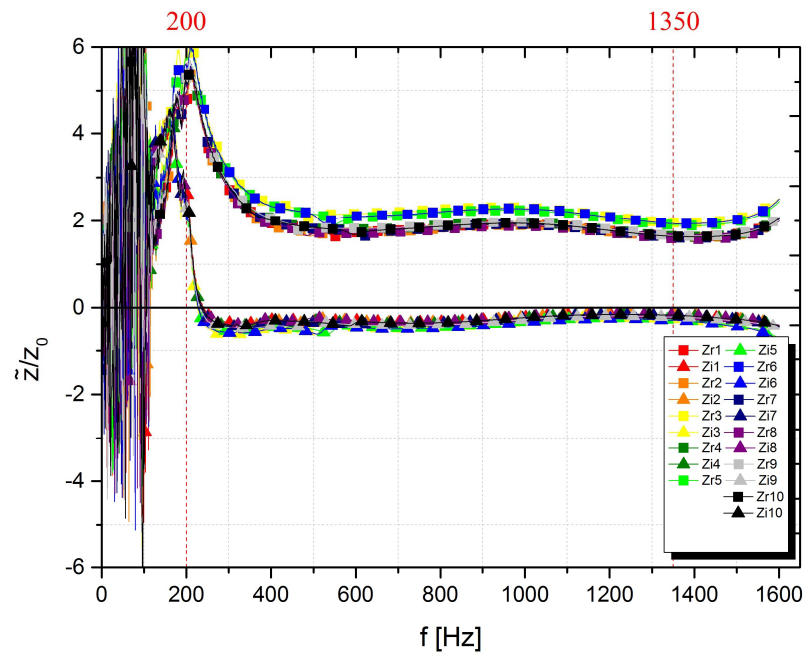
Observa-se nas Figuras 55 e 56 que a componente real das amostras de 5 mm possuem uma oscilação maior (1,5 a 2 vezes a impedância característica do ar) em relação as de 10 mm na faixa de frequência entre 350 a 1350 Hz, isto dá-se pelo fato da espessura ser duas vezes maior, onde a parte real está relacionada com a resistência característica. Nota-se também nas figuras 57 e 58, em que a parte imaginária de ambas espessuras estão próximas de zero na faixa de frequências entre 350 a 1600 Hz e as partes reais são semelhantes e próximas de 2.

Figura 55 - Impedância característica normalizada da fibra de coco com 5 mm de espessura (MDC)



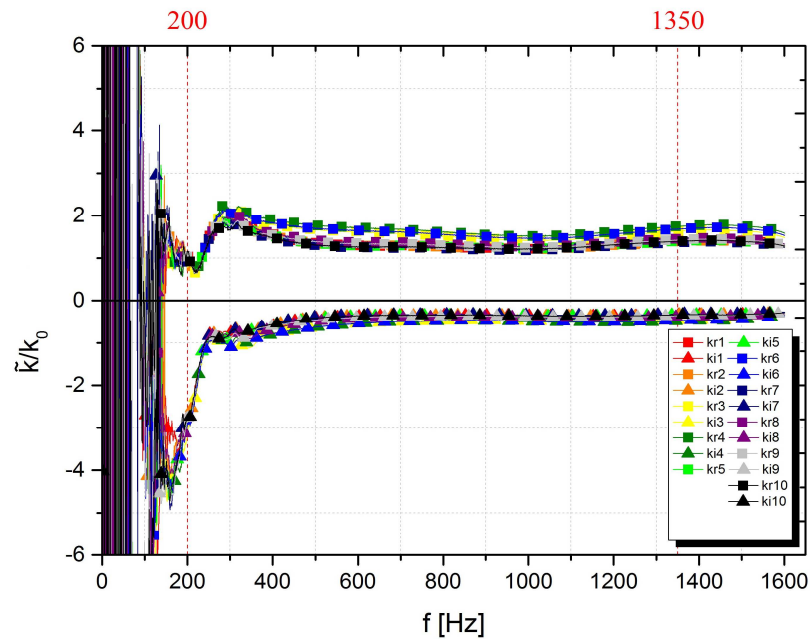
Fonte: O autor, 2017.

Figura 56 - Impedância característica normalizada da fibra de coco com 10 mm de espessura
(MDC)



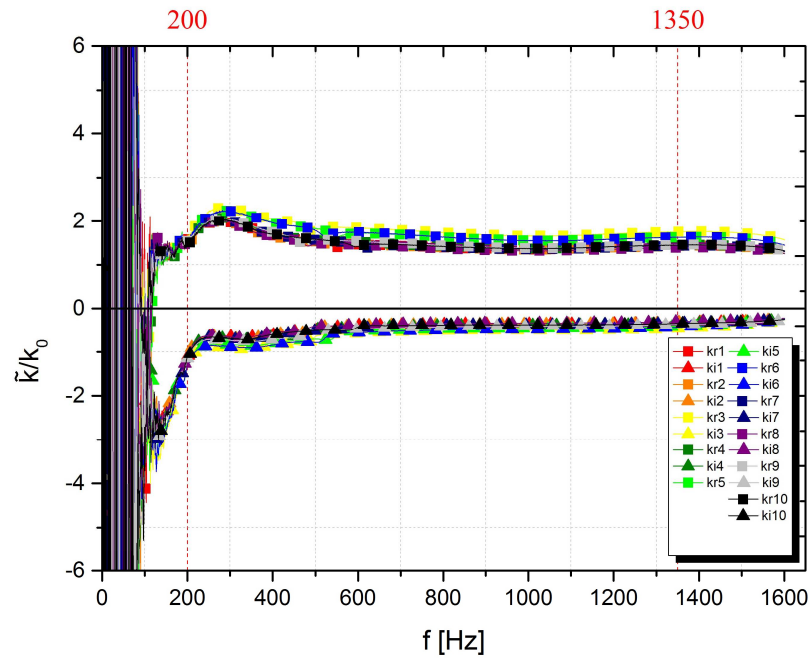
Fonte: O autor, 2017.

Figura 57 – Número de onda complexo normalizado da fibra de coco com 5 mm de espessura
(MDC)



Fonte: O autor, 2017.

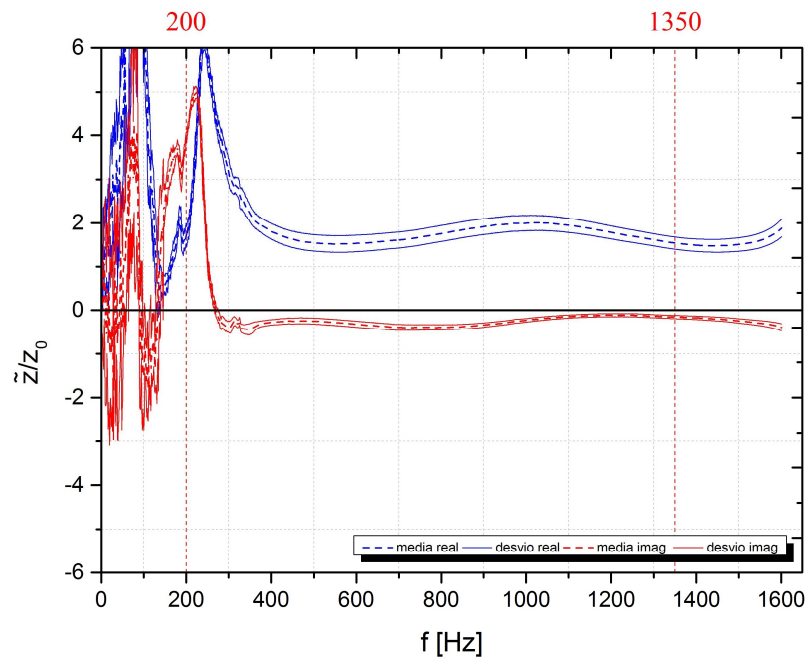
Figura 58 - Número de onda complexo normalizado da fibra de coco com 10 mm de espessura (MDC)



Fonte: O autor, 2017.

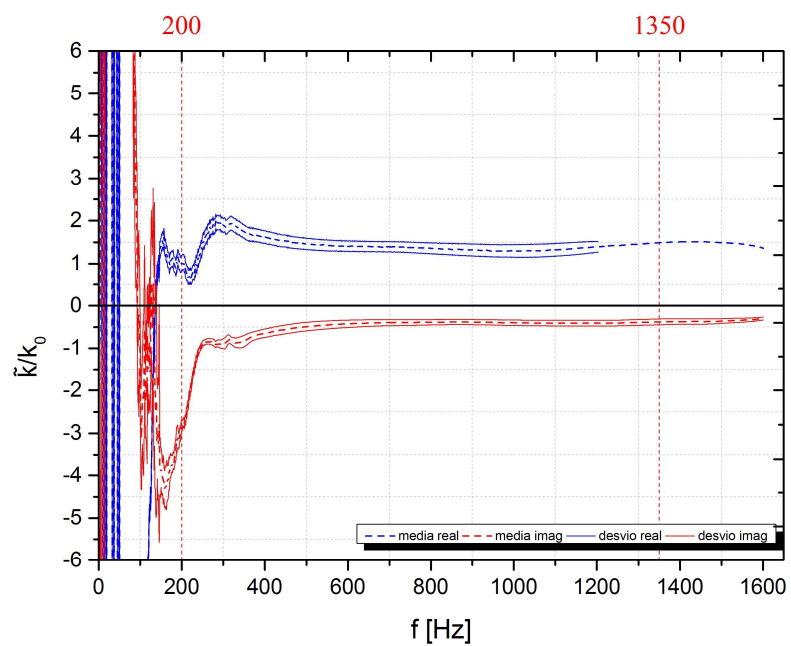
Com os resultados mostrados acima tiveram valores próximos a partir de 350 Hz, será utilizado os valores médios de todas as amostras medidas. Observa-se nas Figuras 59,60,61 e 62 que há uma dispersão tanto quanto nas partes reais e imaginárias da impedância característica normalizada, quanto o número complexo de onda normalizado em baixas frequências, na faixa de 200 a 350 Hz).

Figura 59 - Impedância característica normalizada média da fibra de coco com 5 mm de espessura (MDC)



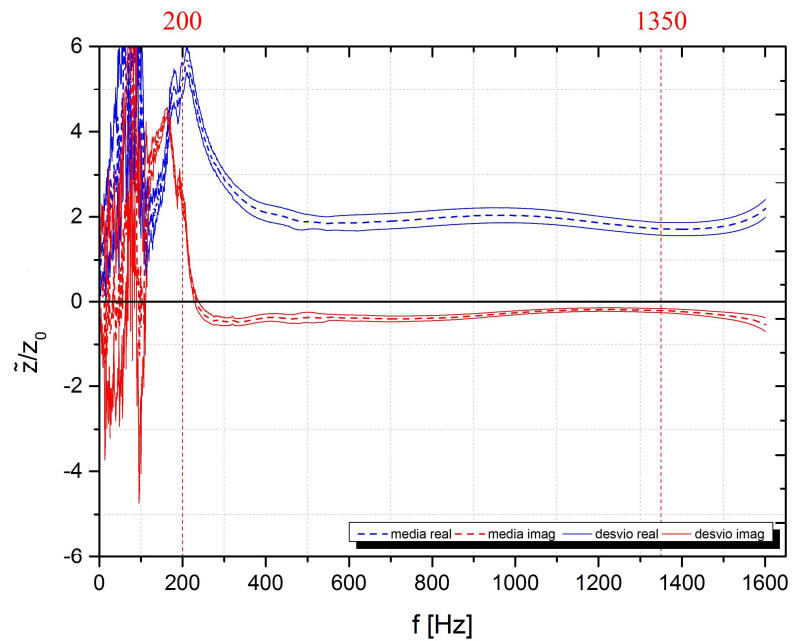
Fonte: O autor, 2017.

Figura 60 - Número de onda complexo médio normalizado da fibra de coco com 5 mm de espessura (MDC)



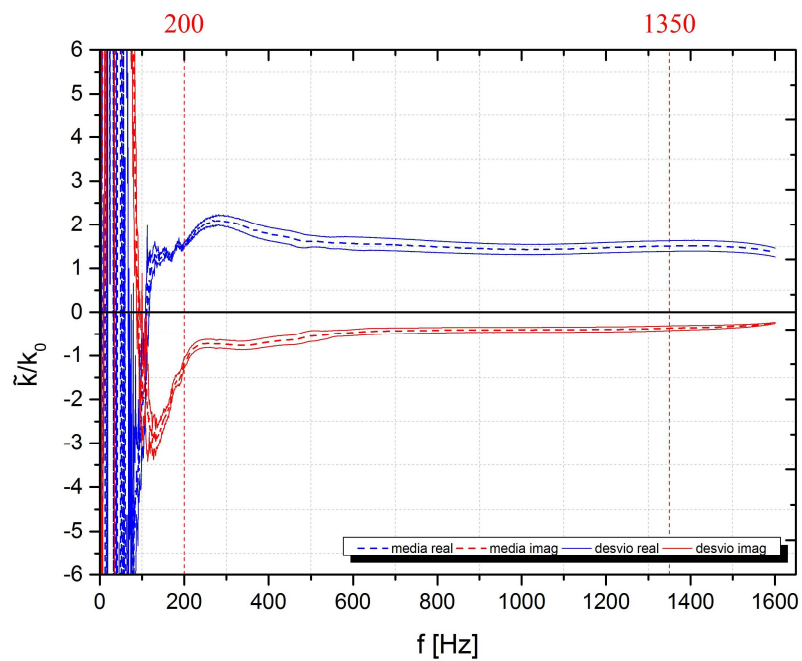
Fonte: O autor, 2017

Figura 61 - Impedância característica normalizada da fibra de coco com 10 mm de espessura (MDC)



Fonte: O autor, 2017.

Figura 62 - Número de onda complexo médio normalizado da fibra de coco com 10 mm de espessura (MDC)



Fonte: O autor, 2017.

6.4. ANÁLISE 3

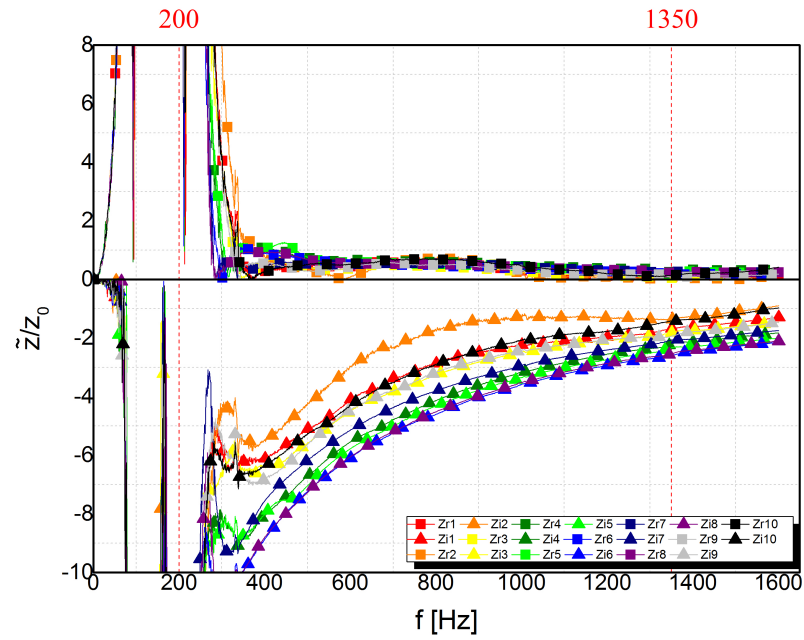
Nesta análise será determinada a impedância característica complexa e número de onda complexo através do método das duas espessuras de Ferrero e Sacerdote (1951). Utilizando o mesmo tubo de impedância de baixa frequência da Análise 2, o experimento consiste em duas etapas: primeiro coloca-se uma amostra e segundo coloca-se duas amostras, respectivamente para 5 e 10 mm de espessura, de forma que sejam os mais semelhantes possíveis.

As Figuras 63 e 64 mostram a impedância característica normalizadas da fibra de coco de 5 e 10 mm de espessura respectivamente. A componente real da amostra na faixa de 350 a 1350 Hz está entre 0 e 1 da impedância característica do ar, já para amostra de 10 mm na mesma faixa de frequência, houve uma dispersão, com valores próximos a 2 vezes a impedância característica do ar. Observa-se também uma descontinuidade na parte imaginária denotada por Z_{i2} , não obedecendo os padrões das amostras restantes, onde pode estar relacionado com sua distribuição das fibras. Assim como a componente imaginária das amostras de 10 mm foi menor comparada as amostras de 5 mm, com valores tendendo próximo de 0.

As Figuras 65 e 66 apresentam os números de onda complexos para amostras de 5 e 10 mm de espessura respectivamente. Os valores reais de ambas espessuras são semelhantes e próximos de 0, enquanto que os valores imaginários da amostra de 10 mm são maiores comparadas as de 5 mm. Também nota-se um “vale” entre as faixa des frequências de 200 a 400 Hz da parte imaginária na Figura 65, onde está relacionado com a atenuação do material absorvente, já que este possui espessura pequena.

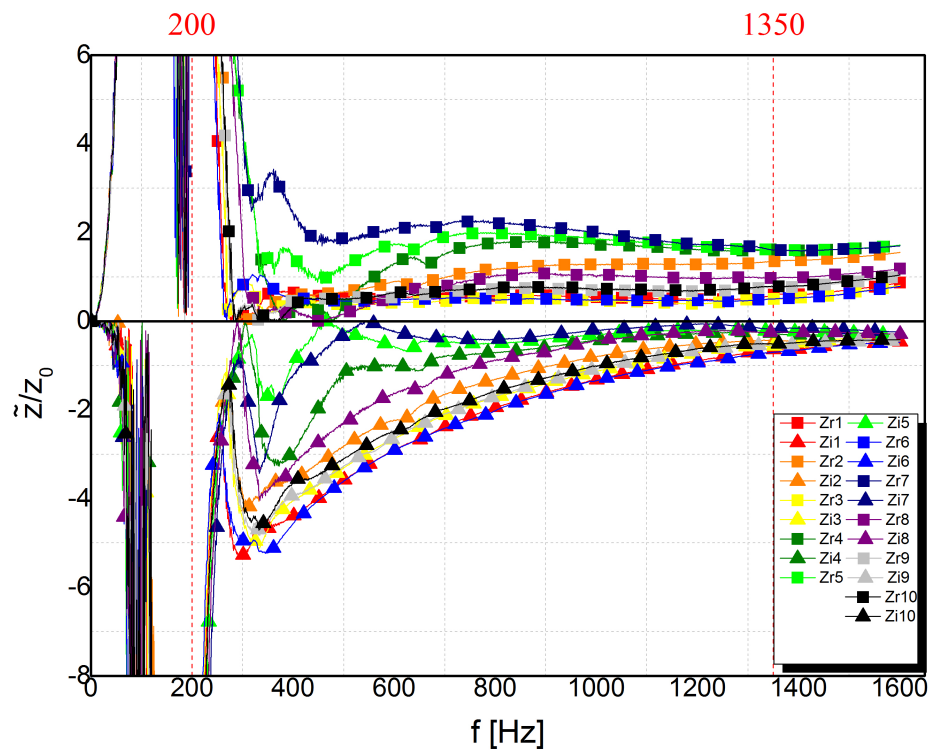
As figuras 67, 68, 69 e 70 representam as médias de impedância característica e número de onda complexos para 5 e 10 mm de epsessura respectivamente, obtidas através das amostras citadas nas Figuras 63 a 66. Para obtenção destes resultados foram excluídos os resultados da amostra nº 2.

Figura 63 - Impedância característica normalizada da fibra de coco com 5 mm de espessura (MDE)



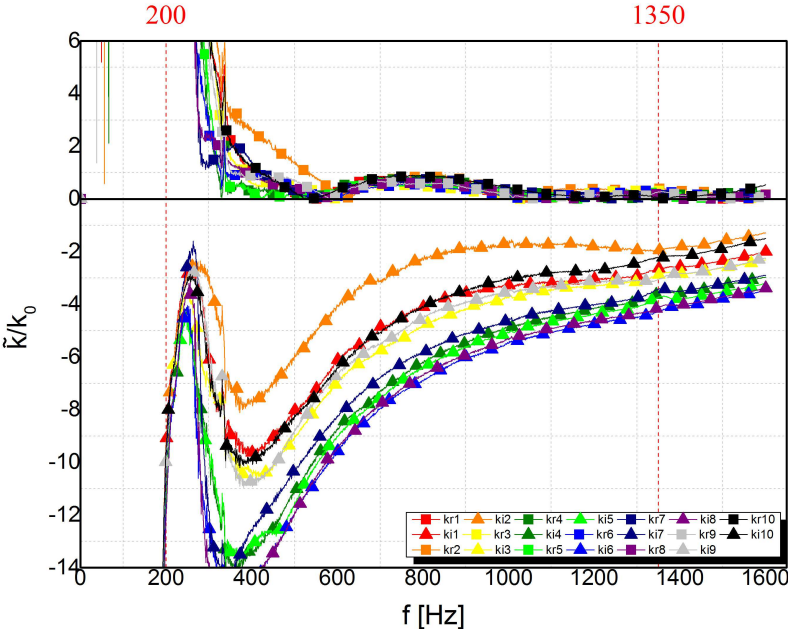
Fonte: O autor, 2017.

Figura 64 - Impedância característica normalizada da fibra de coco com 10 mm de espessura (MDE)



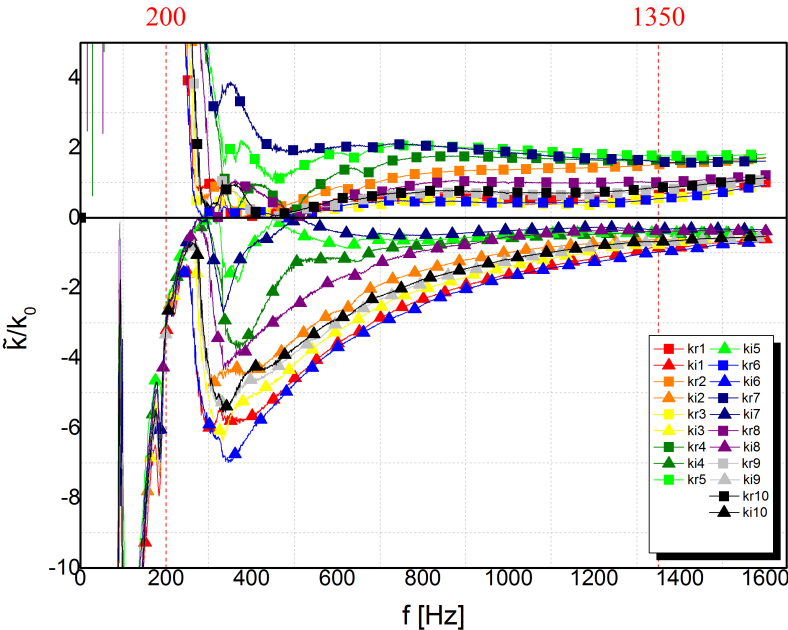
Fonte: O autor, 2017.

Figura 65 – Número de onda complexo normalizado da fibra de coco com 5 mm de espessura (MDE)



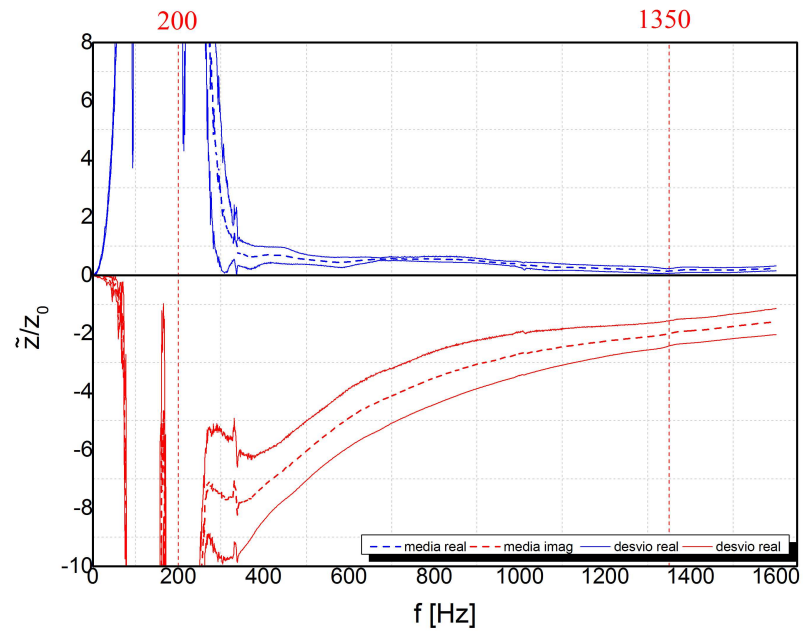
Fonte: O autor, 2017.

Figura 66- Número de onda complexo normalizado da fibra de coco com 10 mm de espessura (MDE)



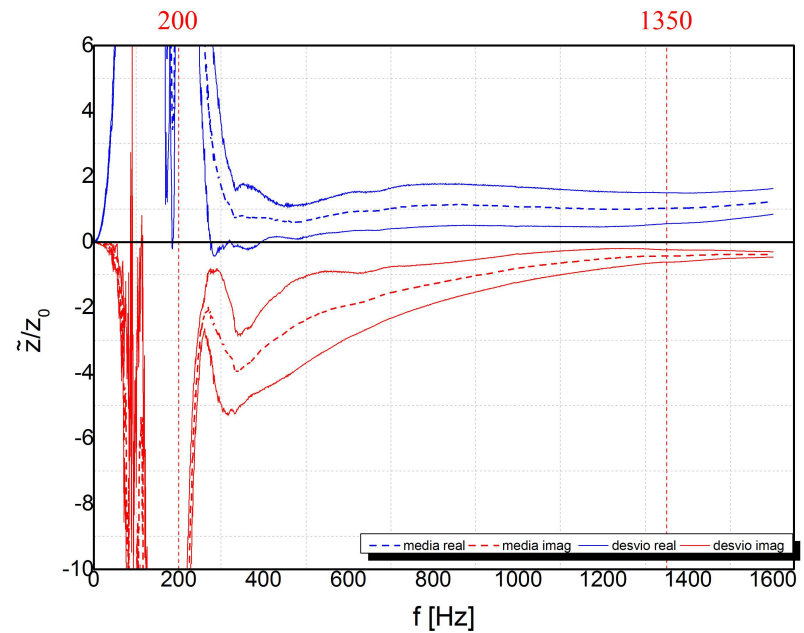
Fonte: O autor, 2017.

Figura 67- Impedância característica média normalizada da fibra de coco com 5 mm de espessura (MDE)



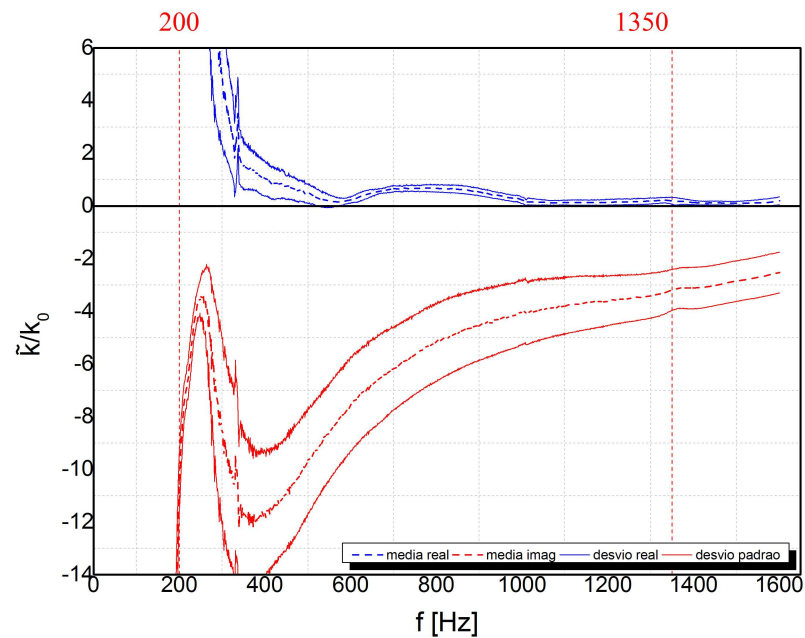
Fonte: O autor, 2017.

Figura 68- Impedância característica média normalizada da fibra de coco com 10 mm de espessura (MDE)



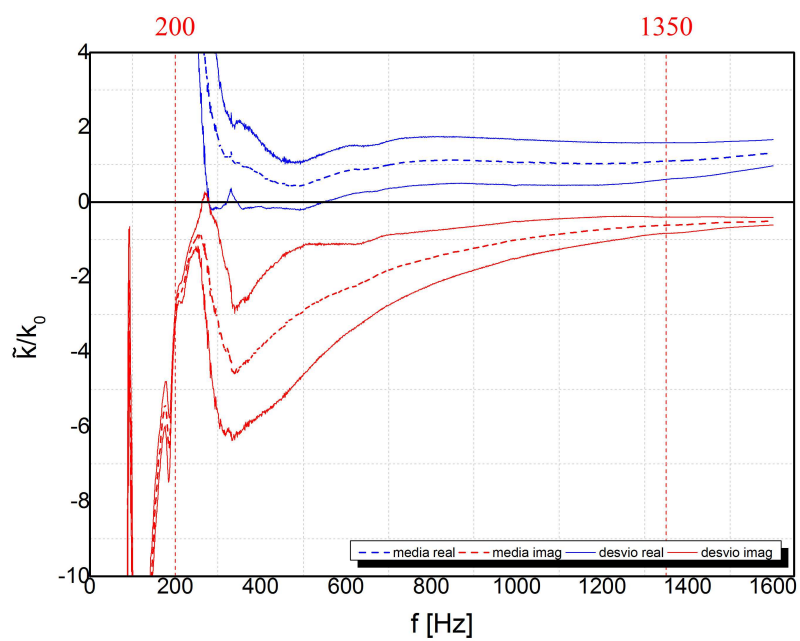
Fonte: O autor, 2017.

Figura 69 - Número de onda complexo médio normalizado da fibra de coco com 5 mm de espessura (MDE)



Fonte: O autor, 2017.

Figura 70 - Número de onda complexo médio normalizado da fibra de coco com 10 mm de espessura (MDE)



Fonte: O autor, 2017.

6.5. ANÁLISE 4

Utilizando o método da matriz de transferência de Song e Bolton (2000), determinaram-se a impedância característica e número de onda complexos da fibra de coco com espessuras de 5 e 10 mm respectivamente. Neste método é utilizado um tubo de baixa frequência com diâmetro interno de 100 mm. As propriedades são avaliadas na faixa de frequência entre 150 e 1200 Hz, devido ao espaçamento dos microfones ser 120 mm de acordo com as equações 4.17 e 4.18.

As figuras 71 e 72 apresentam as impedâncias características complexas da fibra de coco para 5 e 10 mm de espessura respectivamente. Nota-se que a parte real de ambas espessuras variam entre 1,5 a 2,5 vezes a impedância do ar na faixa de frequência entre 300 a 1200 Hz. Também é possível verificar que para 5 mm, a parte imaginária tende a zero a partir de 700 Hz, enquanto que para 10 mm a frequência está próxima de 300 Hz.

As figuras 73 e 74 apresentam os números de onda complexos, para 5 e 10 mm respectivamente. Observa-se na figura 73 uma oscilação tanto da parte real quanto imaginária na faixa de frequência entre 150 a 1200 Hz, o mesmo não acontece na figura 74, onde as partes reais e imaginárias possuem valores contínuos, equivalente a aproximadamente 2,5 vezes a impedância do ar e próximo de zero, respectivamente. Os resultados da impedância característica e número de onda complexos para as espessuras de 5 e 10 mm possuem valores positivos na faixa de frequência entre 0 e 900, aproximadamente, nas Figuras 71 a 74. Este fato pode ter ocorrido devido a atenuação das amostras de fibra de coco ser baixa por consequência de sua espessura.

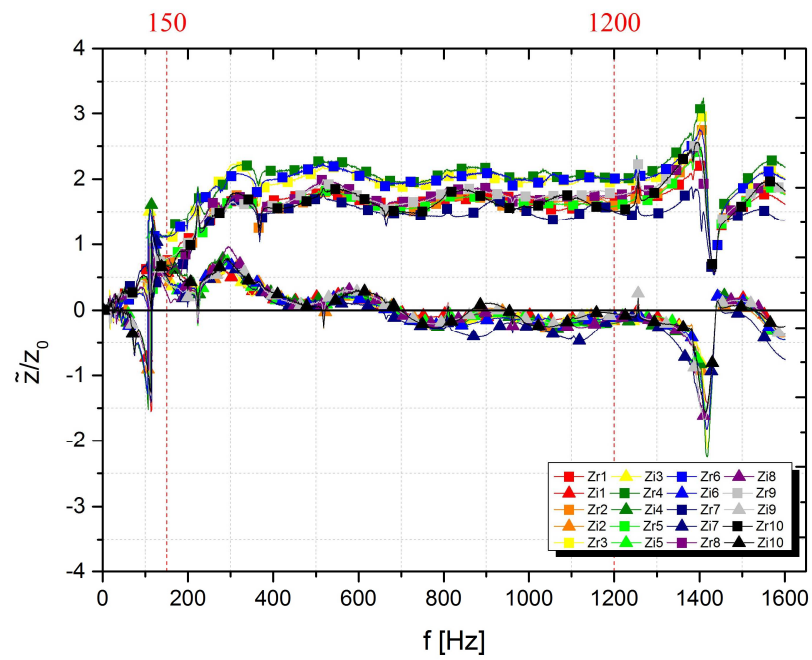
As Figuras 75, 76, 77 e 78, apresentam os valores médios obtidos pelos dados obtidos nesta análise. Representando a impedância característica e número de onda complexos para as espessuras de 5 e 10 mm respectivamente.

Uma hipótese pela divergência dos resultados de impedância característica e número de onda complexo das amostras de fibra de coco com espessuras finas pode estar relacionado à baixa coerência dos sinais obtidos, devido as ressonâncias na cavidade do tubo de impedância e a alta reflexão da terminação rígida, o que não acontece nos outros métodos, pois a amostra está muito afastada da terminação, as Figuras 79 e 80 mostram a coerência dos microfones para a amostra de fibra de coco para as terminações rígida e anecóica, respectivamente.

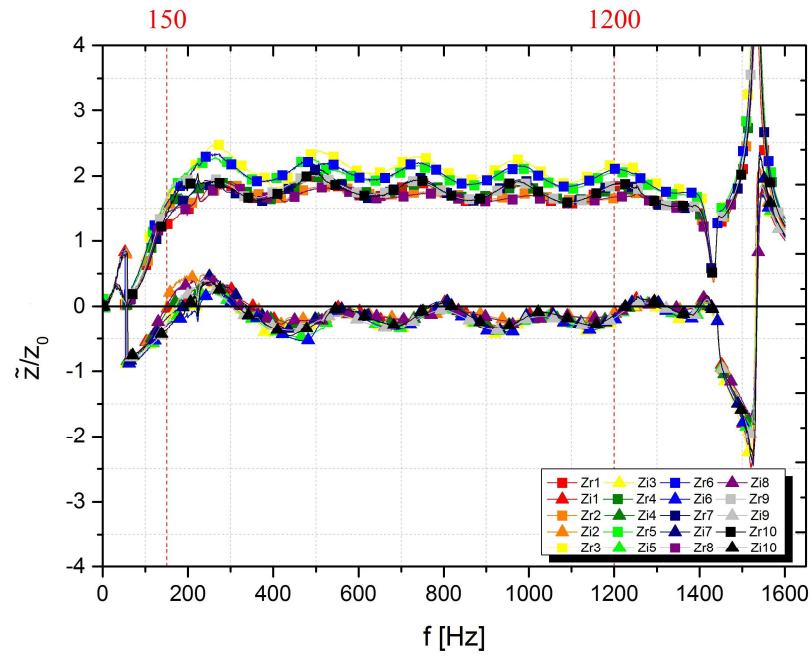
Observa-se que para a terminação anecóica, os valores da coerência são constantes e equivalem a uma unidade, pois a onda sonora gerada está sendo absorvida pela terminação, ao contrário da terminação rígida. Também é possível notar na Figura 79, a simetria dos picos de baixa

coerência, resultantes pelos pontos nodais captados pelos microfones, onde a pressão medida neste ponto é nula.

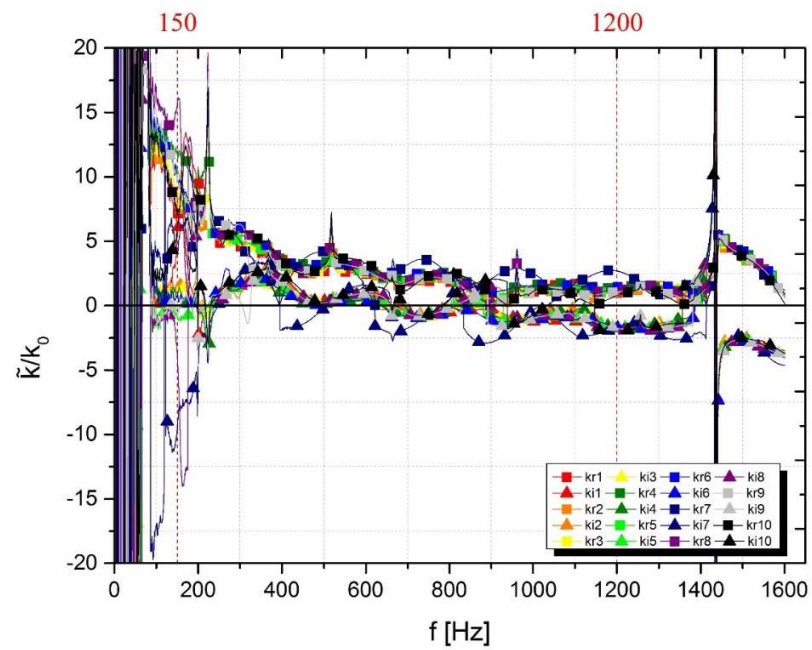
Figura 71 - Impedância característica normalizada para amostras de 5 mm (MMT)



Fonte: O autor, 2017

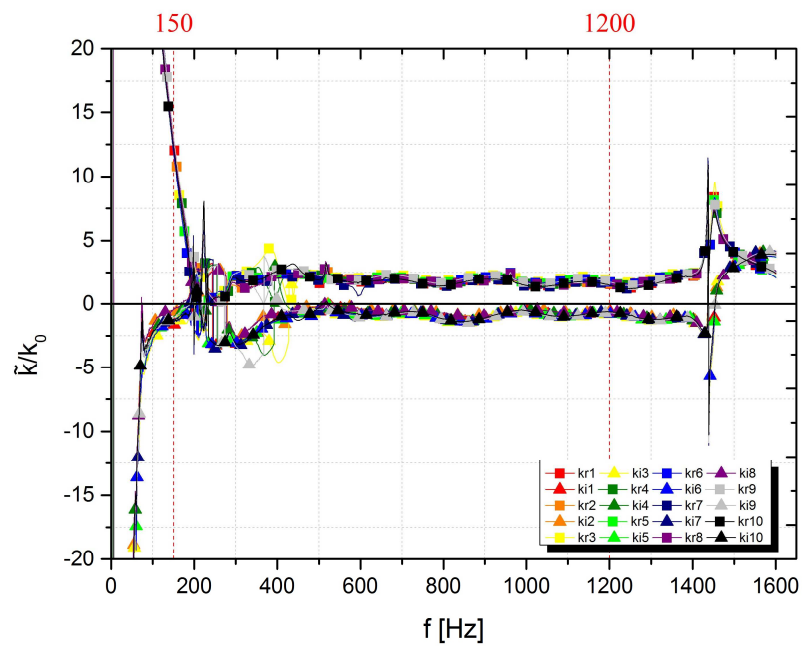
Figura 72 - Impedância característica normalizada para amostras de 10 mm (MMT)

Fonte: O autor, 2017

Figura 73 - Número de onda complexo normalizado para amostra de 5 mm (MMT)

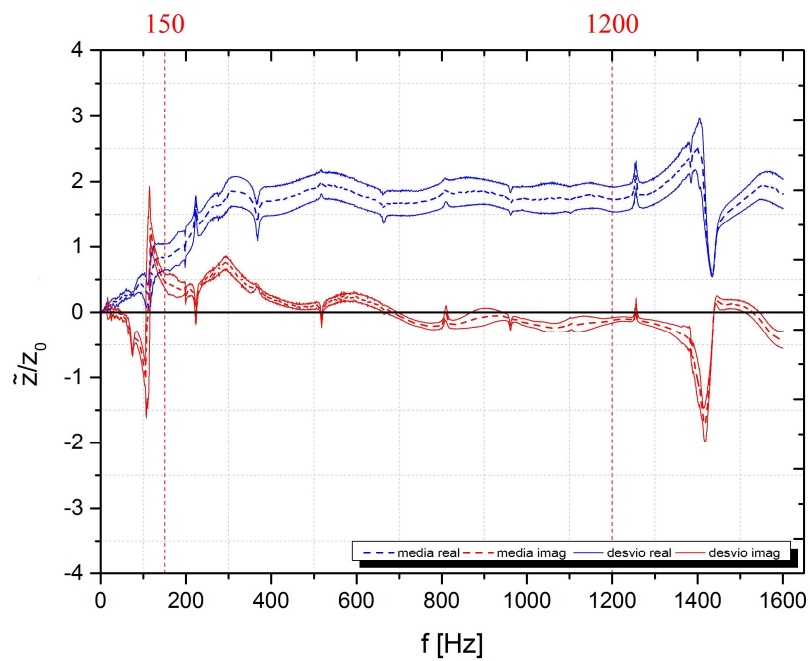
Fonte: O autor, 2017

Figura 74- Número de onda complexo normalizado para amostra de 10 mm (MMT)



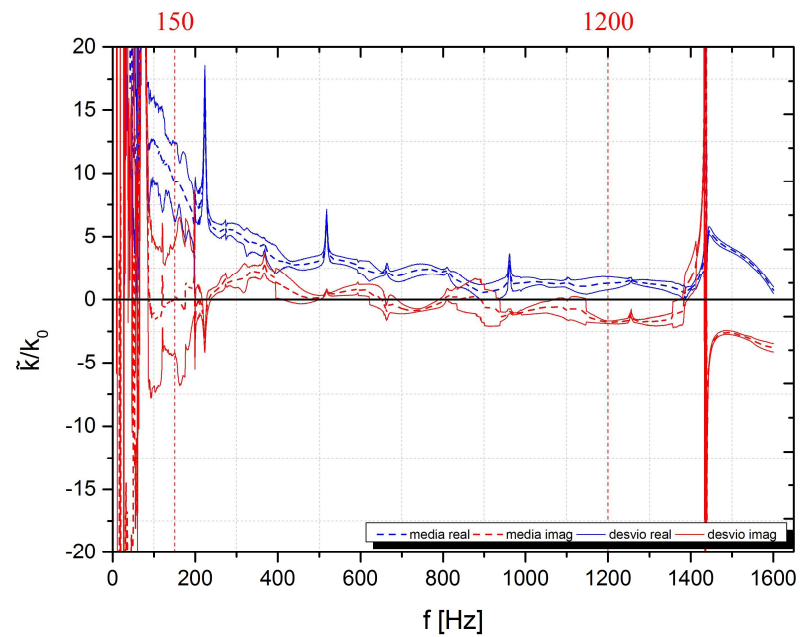
Fonte: O autor, 2017

Figura 75- Impedância característica normalizada média para amostras de 5 mm (MMT)



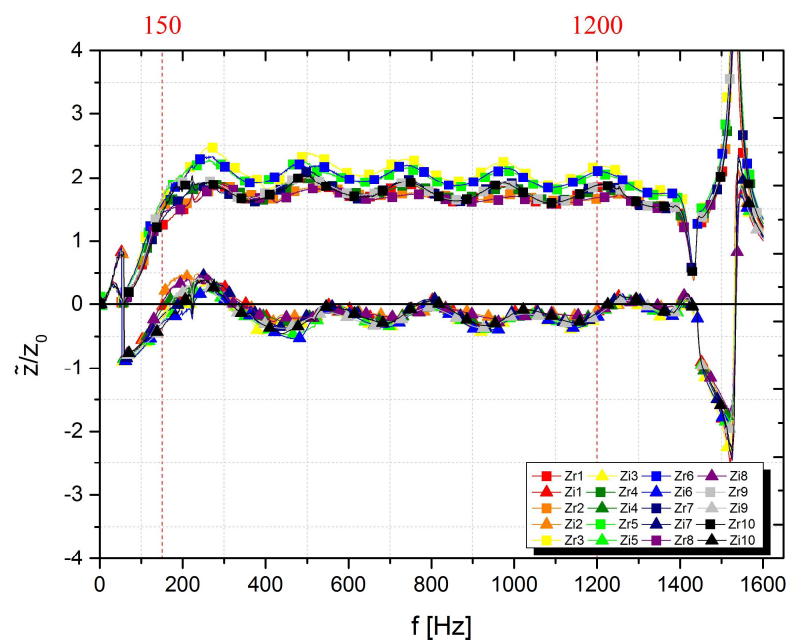
Fonte: O autor, 2017

Figura 76 - Número de onda complexo normalizado médio para amostra de 5 mm (MMT)



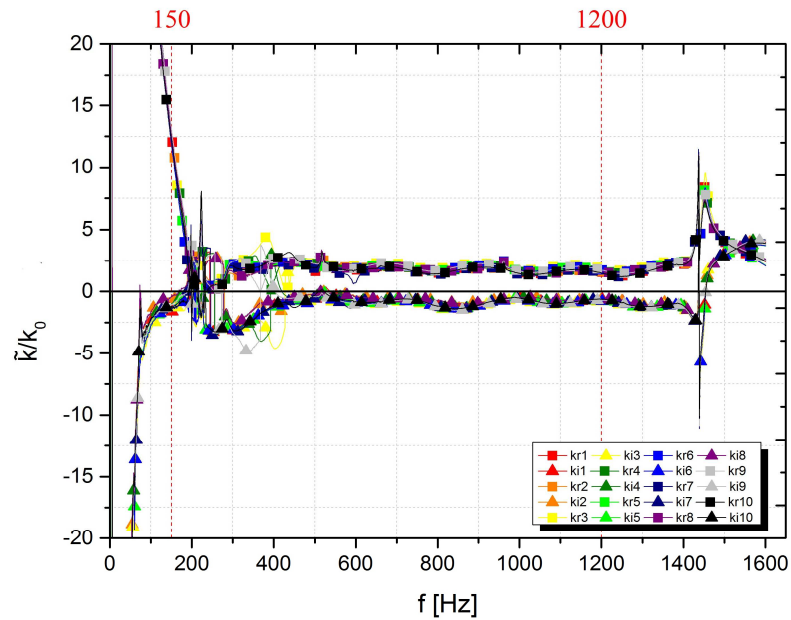
Fonte: O autor, 2017

Figura 77 - Impedância característica normalizada para amostras de 10 mm (MMT)



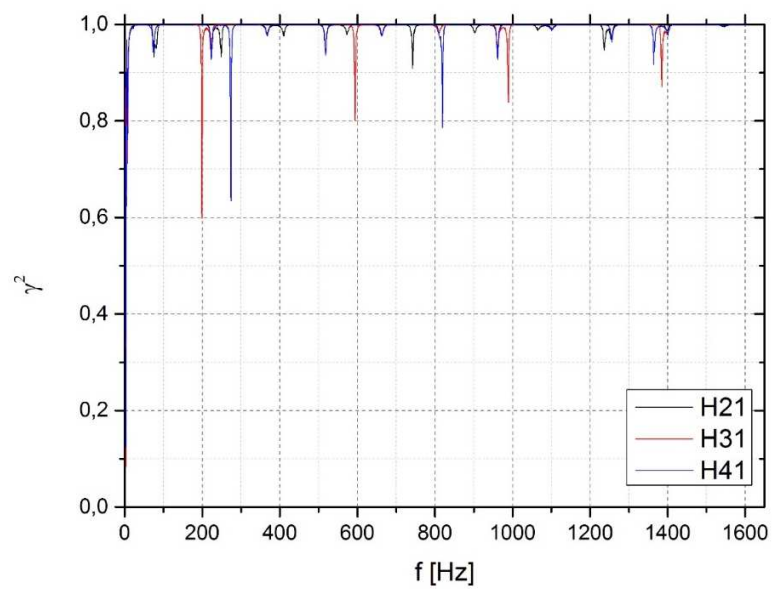
Fonte: O autor, 2017

Figura 78 - Número de onda complexo normalizado médio para amostra de 10 mm (MMT)



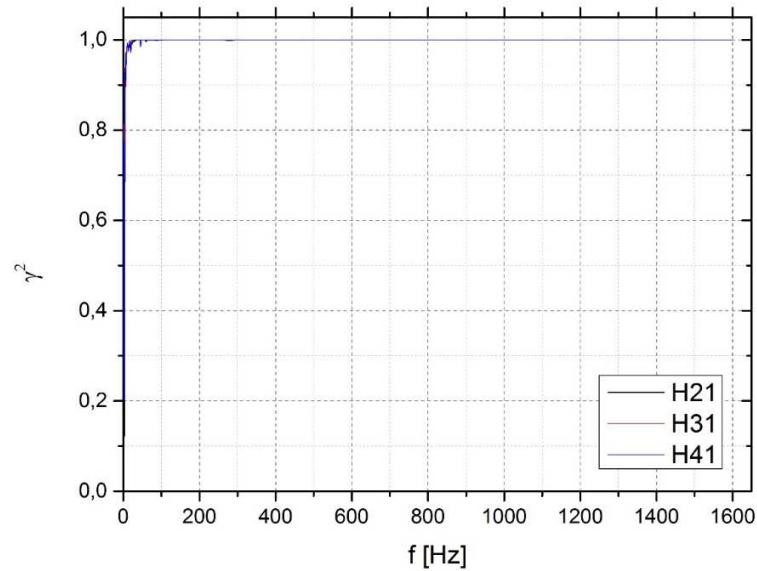
Fonte: O autor, 2017

Figura 79 – Coerência dos microfones da amostra de fibra de coco para a terminação rígida



Fonte: O autor, 2017.

Figura 80 – Coerência dos microfones da amostra de fibra de coco para a terminação anecóica



Fonte: O autor, 2017

6.6. ANÁLISE 5

Nesta última análise será comparado todos os métodos feitos anteriormente. Para facilitar a leitura dos resultados, foram abreviados os métodos aplicados neste tudo sendo: DB – método empírico de Delany e Bazley, 2 cav. – Método das Duas Cavidades Modificado, 2 esp. – Método das Duas Espessuras e Matriz – Método da Matriz de Transferência.

Neste trabalho, a referência dos resultados para a impedância característica e número complexo de onda estão nas equações de Delany e Bazley, portanto, para verificar qual o método que obteve melhor concordância dos resultados, fez-se a relação da impedância e número de onda dos métodos aplicados (MDC, MDE e MMT) pela referência, denotados por $\tilde{z}/\tilde{z}_{ref}$ e $\tilde{k}/\tilde{k}_{ref}$, respectivamente.

As Figuras 81 e 82 mostram as impedâncias características da razão entre os métodos pela referência das amostras de fibra de coco com 5 e 10 mm de espessura. Observa-se que as componentes reais de 2 cav. e matriz possuem boa concordância, já o 2 esp. está um pouco abaixo da referência, porém possui unitário, o que significa que a razão deste método pela referência são

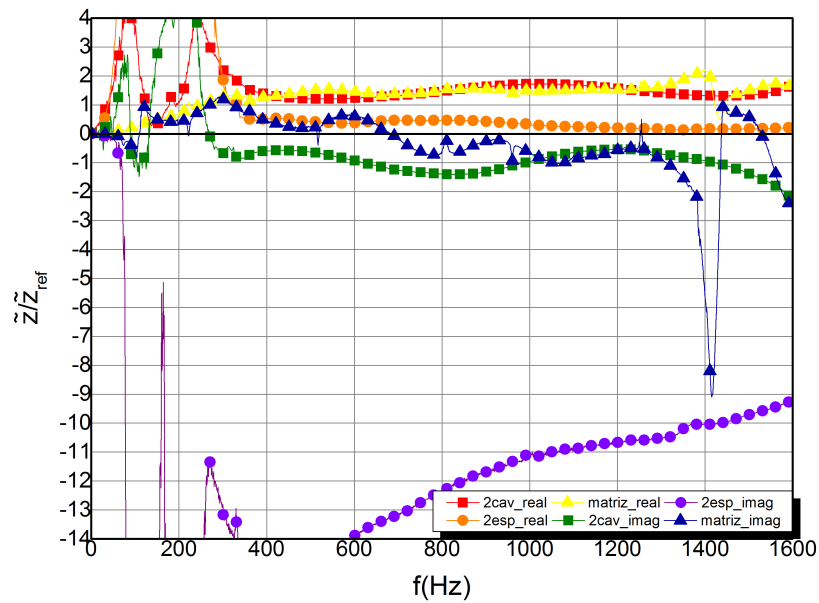
próximos. Para a componente imaginária o valor mais próximo da unidade está em 2cav. (MDC), em ambas as espessuras. Já a matriz, possui concordância em alguns pontos, mas com oscilações nos resultados. Por fim, o 2esp. (MDE) contém valores muito inferiores à referência, o que demonstra um resultado não satisfatório para as amostras de 5 e 10 mm de espessura.

As Figuras 83 e 84 mostram a comparação dos métodos em relação ao número de onda complexo para as espessuras de 5 e 10 mm, respectivamente. Nota-se nas componentes real e imaginária da Figura 83, uma boa concordância em toda a faixa de frequência para 2cav., o que não ocorre para os outros métodos, onde há uma dispersão dos valores em toda a faixa de frequência. Para a Figura 84, tanto a componente real quanto imaginária de 2cav. possuem valores próximos da unidade. Observa-se que parte real de 2 esp. está paralela à 2cav. a partir de 800 Hz, onde os valores estão próximos da unidade, e a matriz possui valor unitário em apenas alguns pontos na faixa de frequência. A componente imaginária para 2esp. e matriz não possuem boa concordância dos resultados.

Uma análise também foi feita utilizando uma amostra de espuma comum com 42 mm de espessura para comparar as propriedades acústicas como impedância característica e número de onda complexos aplicando os mesmo métodos realizados nesta análise. As Figuras 85 e 86 mostram respectivamente $\tilde{z}$ e $\tilde{k}$.

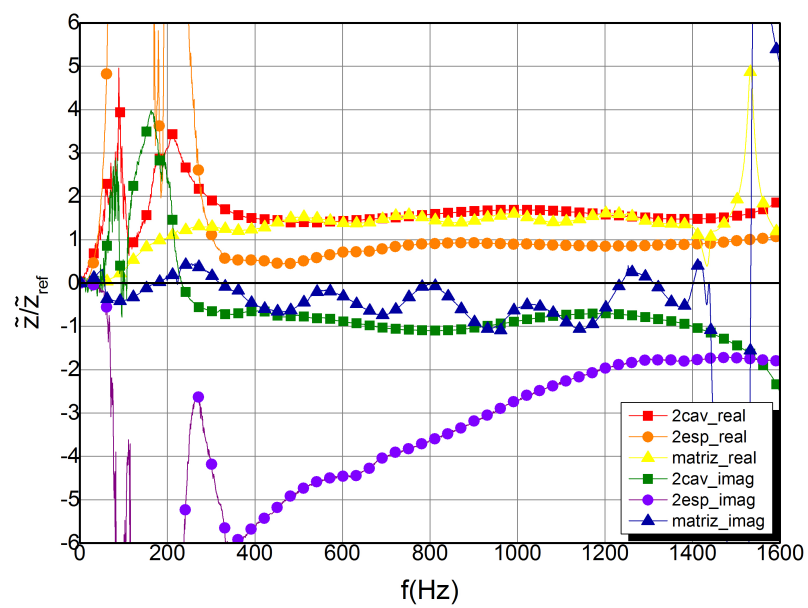
Observa-se nas Figuras 85 e 86, que o aumento da espessura da amostra e a sua homogeneidade, influenciaram nos resultados das propriedades acústicas. Nota-se uma melhor concordância entre todos os métodos aplicados para toda faixa de frequência, onde os valores estão próximos da unidade. O que valida o tudo de impedância para o método da matriz de transferência de acordo com a norma ASTM-E2611-09 (2009).

Figura 81 - Comparação dos métodos da impedância característica das amostras de fibra de coco com 5 mm.



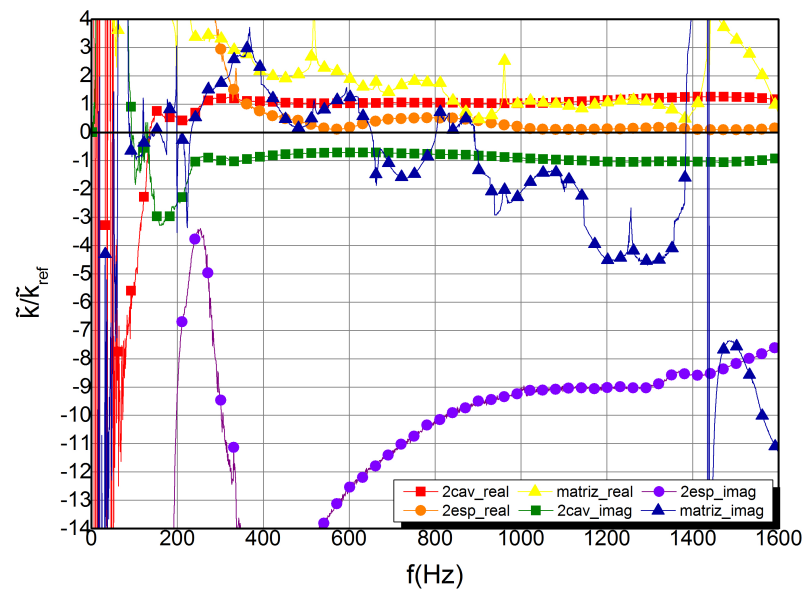
Fonte: O autor, 2017

Figura 82 - Comparação dos métodos da impedância característica das amostras de fibra de coco com 10 mm.



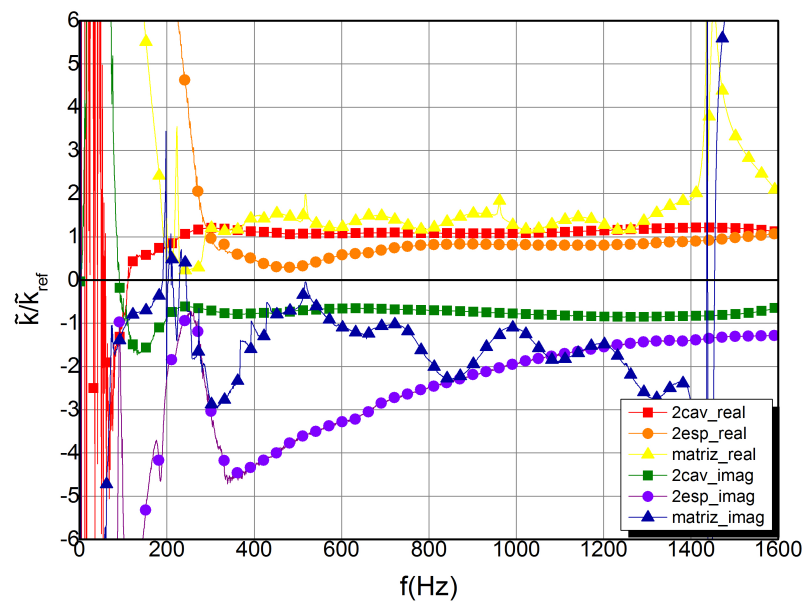
Fonte: O autor, 2017

Figura 83 - Comparação dos métodos do número de onda complexo das amostras de fibra de coco com 5 mm.



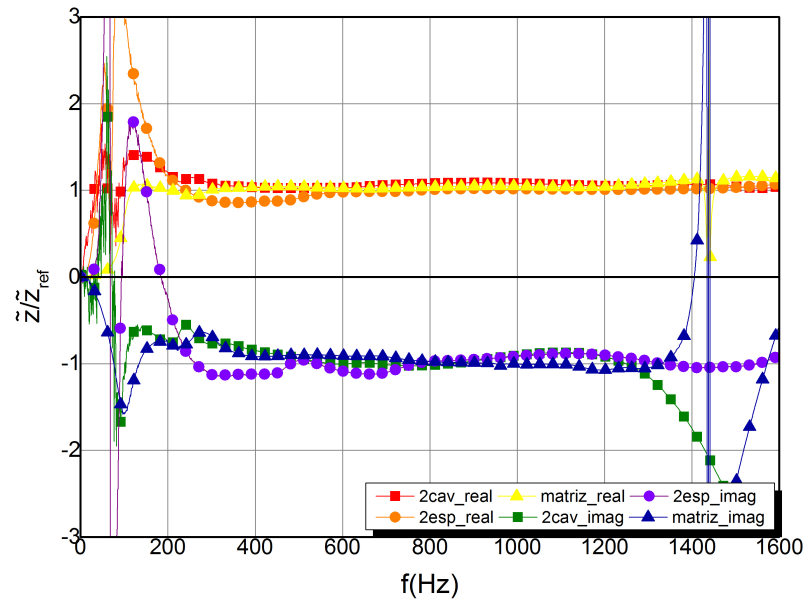
Fonte: O autor, 2017

Figura 84 - Comparação dos métodos do número de onda complexo das amostras de fibra de coco com 10 mm.



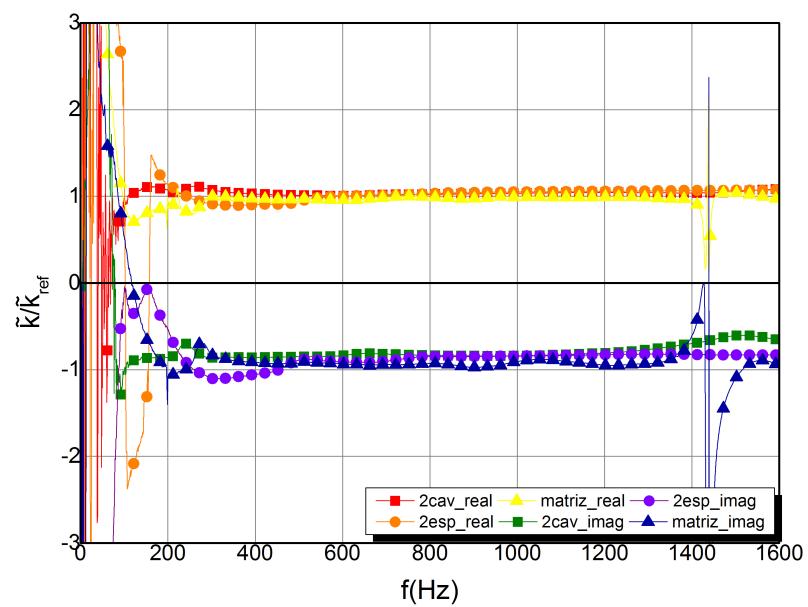
Fonte: O autor, 2017

Figura 85 - Comparação dos métodos, avaliação a impedância característica para espuma comum.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 86 - Comparação dos métodos, avaliação do número de onda para espuma comum.



Fonte: O autor, 2017.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram analisados e comparados os resultados obtidos das propriedades acústicas como: impedância característica complexa e número de onda complexo da fibra de coco, tanto quanto a construção e a validação do tubo de impedância seguindo a norma ASTM E2611-09 (2009). Estas propriedades foram determinadas através dos métodos: resistividade ao fluxo, segundo a norma ASTM C522-03 (2010), aplicando as formulações empíricas de Delany e Bazley, Método das Duas Cavidades Modificado, Método das Duas Espessuras e Método da Matriz de Transferência, seguindo a norma ASTM E2611-09 (2009).

A análise da resistividade ao fluxo das amostras de fibra de coco houve necessidade de montar combinações contendo mais uma amostra, devido ao fato de uma única amostra não favorecer com a mínima diferença de pressão determinada pela norma. Várias combinações também influenciaram nas médias dos resultados minimizando os erros de medição e aumentando a precisão dos resultados. Os resultados obtidos por Delany e Bazley serviram como referência para comparação e validação dos outros métodos.

Com os resultados do Capítulo 6, pode-se afirmar que o melhor método para caracterizar a fibra de coco deste trabalho foi o Método das Duas Cavidades. Porém, os resultados correspondentes a componente real das Figuras 81 e 82, obtiveram boas concordâncias também para o MMT. Entretanto, as medições realizadas pelo método das duas espessuras não obtiveram resultados satisfatórios, divergindo dos outros métodos e com maior discordância principalmente na parte imaginária da impedância característica e número de onda complexos para ambas espessuras, como mostram as Figuras 81,82,83 e 84. Estes resultados são justificados por Lerner e Davy (2014), onde os autores concluem que as propriedades acústicas podem divergir por serem materiais de espessuras finas. O autor ressalta também que a relação número de onda complexo e espessura $|\tilde{k}d|$ deve ser acima de 0,7, isto é, os materiais deverão possuir maior espessura e densidade. Isso é justificado pelas Figuras 85 e 86, onde o aumento da espessura do material

absorvente resultou em boa concordância para todos os métodos aplicados neste trabalho, porém a norma ASTM E2611-09, não indica limites quanto a espessura das amostras utilizadas para a caracterização.

Por fim, a Tabela 5 mostra um resumo dos métodos utilizados neste trabalho.

Tabela 5 - Resumo dos resultados para fibra de coco e espuma comum

	Fibra de coco	
	Satisfatório	Não Satisfatório
MDC	X	
MDE		X
MMT		X

	Espuma comum $\varnothing$ 42 mm	
	Satisfatório	Não Satisfatório
MDC	X	
MDE	X	
MMT	X	

Fonte: O autor, 2017.

RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS:

Para trabalhos futuros podem-se sugerir os seguintes tópicos:

- Utilização de mais de uma amostra com espessuras finas no tubo de impedância de baixa frequência, aplicando o MMT.
- Construção de um tubo de alta frequência seguindo a norma ASTM E2611-09;
- Simular materiais absorventes com método de elementos finitos e comparar os resultados com os métodos citados neste trabalho.
- Aplicar outros tipos de aglutinadores na fabricação das amostras.

REFERÊNCIAS

ALLARD, J. F., ATALLA, N., **“Propagation of Sound in Porous Media – Modeling Sound Absorbing Materials”**, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, (2009).

ALLARD, J. F., CHAMPOUX, Y., DEPOLLIÉ, C., **“Modelization of layered sound absorbing materials with transfer matrices”**, Laboratoire d’Acoustique associé au C.N.R.S UA 1101, Faculté des Sciences du Mans, Route de Laval-BP-535,72017, Le Mans Cedex, France, (1987).

ANFAVEA, **“Anuário da Indústria Automobilística Brasileira”**, (2016).

ASTM C522-03, **“Standard Test Method for Airflow Resistance of Acoustical Materials”**, (2010)

ASTM E1050-10, **“Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphone and a Digital Frequency Analysis System”**, (2010).

ASTM E2611-09, **“Standard test method for measurement of normal incidence sound transmission of acoustical materials based on the transfer matrix method”**, (2009).

BARRON, F. R., **“Industrial Noise Control and Acoustic”**, Louisiana Tech University, Ruston, Louisiana, U.S.A, Marcel Dekker, Inc., (2003).

BERANEK, L. L., **“Acoustic Impedance of Porous Materials”**, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 13, pg. 248-260, (1942).

BERANEK, L. L., **“Acoustic impedance of porous materials”**, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 19, pp. 248-260, (1947).

BERANEK, L. L., **“Noise and Vibration Control”**, Institute of Noise Control Engineering, Washington, DC, (1988).

BIES, D. A., HANSEN, C. H., **“Engineering Noise Control – Theory and Practice”**, Spon Press 3rd Edition, (2003).

BISTAFA, S. R., **“Acústica Aplicada ao Controle do Ruído”**, Editora Edgard Blücher, (2006).

BODÉN, H., ABOM, M. **“Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts”**, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 79, pp. 541-549, (1986).

BOLTON, J. S., HOU, K. **“A transfer Matrix Method for Estimating the Dispersion and Attenuation of Plane Waves in a Standing Wave Tube”**, Publications of the Ray W. Herrick Laboratories. Paper 54, (2009).

BROWN, R. L., BOLT, R. H., **“The measurement of flow resistance of porous acoustic materials”**, Journal of the acoustical Society of America, vol. 13, pp. 337-344, (1942).

BRUEL&KJAER, “Basic Concepts of Sound”. Disponível em <http://cafe.foundation/v2/pdf_tech/Noise.Technologies/PAV.Sound.B&K.Primar.pdf>, (1998).

CAMPOS, R. V. M., **“Painéis para tratamento acústico utilizando fibras naturais”**, Universidade Estadual de Maringá, Paraná, (2012).

CHAMPOUX, Y., STINSON, M. R., DAIGLE G. A., **“Air-base system for the measurement of the porosity”**, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 89, pp. 910-916, (1991).

CHUNG, J. Y., BLASER, D. A., **“Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties: I. Theory, II. Experiment”**, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 68, pp. 907-921, (1980).

DELANY, M. E., BAZLEY, E. N., **“Acoustical properties of fibrous absorbent materials”**, Applied Acoustics 3, pp. 105-116, (1970).

DESARNAULDS, V., CONSTANZO, E., **“Sustainability of Acoustic Materials and Acoustic Characterization of Sustainable Materials”**, (2005).

ERSOY, S., KÜÇÜK, H., **“Investigation of tea-leaf-fibre waste material for its sound absorption properties”**, Applied Acoustics 70, pp.215-220, (2009).

ERIKSSON, L.J., **“Higher order mode effects in circular ducts and expansion chambers”**, Acoustical Society of America, (1980)

FAHY, F. J., **“Rapid method for the measurement of sample acoustic impedance in a standing wave tube”**, Journal of Sound and Vibration, vol. 97, pp. 168-170, (1984).

FERRERO, M. A., SACERDOTE, G. G., **“Parameters of sound propagation in granular absorption materials”**, Acustica 1, vol. 1, pp. 135-142 (1951).

FOULADI, M. H., NOR, M. J. M., AYUB, Md., Leman, Z. A., **“Utilization of Coir Fiber in Multilayer Acoustic Absorption Panel”**. Applied Acoustics 71, pp. 241-249, (2009).

FOULADI, M. H., AYUB, M. and NOR, M. J. M., **“Analysis of coir fiber acoustical characteristics”**, Applied Acoustics, vol. 72, pp. 35-42, (2011).

GERGES, S. N. Y., JORDAN, R., Thieme, F. A., BENTO, C. J. L., ARENAS, J. P., **“Muffler modeling by transfer matrix method and experimental verification”**, J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. vol.27 no.2 Rio de Janeiro April/June, (2005).

GIESBRECHT, P.K., **“Incerteza na Medição das Características Acústicas dos Materiais”**, (Dissertação), Universidade Federal de Santa Catarina, pp. 9-12, (2007).

GROS, E., PANNETON, R., **“A Missing Mass Method to Measure the Open Porosity of Porous Solids”**, Canadian Acoustic, vol. 32, No. 3, (2004).

H. BENKREIRA, Khan, A., HOROSHENKOV, K. V., **“Sustainable acoustic and thermal insulation materials from elastomeric waste residues”**, Chemical Engineering Science 66 pp.4157-4171, (2011).

IGARASHI, J., TOYAMA, M., **“Fundamentals of Acoustic Silencers”**, Report No. 339, Aeronautical Research Institute, University of Tokyo, pp. 223-241 (1958).

KIMURA, M., KUNIO J., SCHUHMACHER, A., RYU, Y., **“A new high-frequency impedance tube for measuring sound absorption coefficient and sound transmission loss”**, Internoise, Australia, (2014).

KINO, N., UENO, T., **“Investigation of sample size effects in impedance tube measurements”**, Applied Acoustic, vol. 68, pp. 1485-1493, (2007).

KINSLER, L. E., FREY, A. R.; COPPENS, A. B., SANDERS, J. V., **“Fundamentals of acoustics”**, 4th ed., John & Wiley & Sons, (2000).

KREYSIZIG, E., **“Advance Engineering Mathematics”**, 8th ed., John Wiley & Sons, (1999).

LACOSTE, C.; BASSO, M. C.; PIZZI, A., CELZARD, A.; EBANG, E. E.; GALLON, N. and CHARRIER, B., **“Pine (*P. pinaster*) and quebracho (*S. lorentzii*) tannin-based foams as green acoustic absorbers”**, Industrial Crops and Products, vol. 67, pp. 70-73, (2015).

LARNER, D. J., DAVY, J. L., **“The prediction of the complex characteristic acoustic impedance of porous material”**, In norm Broner, Charles Don (ed.) Proceedings of the 43rd International Congress on Noise Control Engineering: Internoise 2014, Australia, 16-19 November 2014.

LEE, I., **“Acoustic Characteristics of Perforated Dissipative and Hybrid Silencers”**, School of the Ohio State University (2005)

LEE, C. M. and Wang, Y. S., **“A prediction method of the acoustical properties of multilayered noise control materials in standing wave-duct systems”**, Journal of Sound and Vibration, vol. 298, pp. 350-365, (2006).

LIMA, K. F., BARBIERI, N., BARBIERI, R., **“Alternative method for acoustical characterization of absorbent materials based on the assessment of the acoustical efficiency of dissipative silencers”**, Noise Control Engineering Journal, vol. 64, pp. 197-207, (2016).

MAHZAN, S.; ZAIDI, A. M. A.; ARSAT, N.; HATTA, M. N. M.; GHAZALI, M. I. and MOHIDEEN, S. R., **“Study on sound absorption properties of coconut coir fibre reinforced composite with added recycled rubber”**, International Journal of Integrated Engineering, vol. 2, pp. 29-34, (2010).

MIKI, Y., **“Acoustical properties of porous materials – Modifications of Delany-Bazley models”**, J. Acoust. Soc. Jpn, (1990).

MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N., **“Princípios de termodinâmica para engenharia”**, 4 ed., Ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., (2002).

MUNJAL, M. L., **“Velocity ratio-cum-transfer matrix method for the evaluation of a muffler with mean flow”**, Journal of Sound and Vibration, pp.105–119, (1975).

MUNJAL, M. L., **“Acoustic of ducts and mufflers with application to exhaust and ventilation system design”**, 1st ed. John and Wiley & Sons, (1987).

MUNJAL, M. L., **“Acoustic of Ducts and Mufflers”**, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., (2014).

NICHOLS, R. H., **“Flow-Resistance Characteristics of Fibrous Acoustical Materials”**. The Journal of the Acoustical Society of America Vol.19, No. 5 pg. 866-871, (1947).

NOR, M.J.M., JAMALUDIN, N., TAMIRI, F.M., **“A preliminary study of sound absorption using multi-layer coconut coir fibers”**. Electron J: Tech Acoustic, (2004).

SALISSOU, Y., PANNETON, R., **“A general wave decomposition formula for the measurement of normal incidence sound transmission loss in impedance tube”**, GAUS, Departmente of Mechanical Engineering, Université de Sherbrooke, pp. 2083-2090, (2009).

SCHIAVONI, S., ASDRUBALI, F., HOROSHENKOV, K. V., **“A Review of Sustainable Materials for Acoustic Applications”**, Building Acoustics, Vol. 19, No. 4, pp. 283-312, (2012).

SCOTT, R. A., **“An Apparatus for Accurate Measurement of the Acoustic Impedance of Sound-Absorbing Materials”**. Proceedings of the Physical Society 58, pp. 253-264, (1946b).

SEYBERT, A. F., ROSS, D. F., **“Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique”**, Journal of the Acoustical Society of America 61, pg. 1362-1370, (1977).

SEYBERT, A. F., SOENARKO, B., **“Errors analysis of spectral estimates with application to the measurements of acoustic parameters using random sound field in ducts”**, Journal of the Acoustic Society of America, vol. 69, pp 1190-1199, (1981).

SMITH, B. J., PETERS, R. J., HOLLINS, M., **“Acoustic and Noise Control”**, Routledge Taylor and Francis Group, Third edition, (2011)

SMITH, C. D., PARROT, T. L., **“Comparison of three methods for measuring acoustic properties of bulk materials”**, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 74, pp. 1577-1582, (1983).

SONG, B. H., BOLTON, J. S., **“A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave number of limp and rigid porous materials”**, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 107, pp. 1131-1152, (2000).

TARNOW, V., **“Airflow Resistivity of Models of Fibrous Acoustic Materials”**, Acoustic Society of America 100, pp. 3706-3713, (1996).

TARNOW, V., **“Measured anisotropic air flow resistivity and sound attenuation of glass wool”**, Journal of the Acoustical Society of America 111, pp. 2735-2739, (2002).

TERASHIMA, F. J. H., **“Caracterização das Propriedades Acústicas de Materiais Absorventes de Pequenas Espessuras Com Três Métodos De Avaliação”**, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, (2016).

UTSUNO, H., TANAKA, T., FUJIKAWA, T., SEYBERT A. F., **“Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous material”**, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 86, pp. 637-643, (1989).

VÉR, I. L., BERANEK, L. L., **“Noise and Vibration Control Engineering – Principles and Applications”**, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., (2006).

YANIV, S. L., **“Impedance tube measurement of propagation constant and characteristic impedance of porous acoustical material”**, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 64, pp. 1138-1142, (1973).

WASSILIEFF, C., **“Sound Absorption of Wood-Based Materials”**, Applied Acoustics, Vol. 48, No., pp. 339-356, (1996).

ZWIKKER C., KOSTEN, C. W., **“Sound Absorbing Materials”**, Elsevier Publishing Company, Inc., (1949).

APÊNDICES

APÊNDICE A – Diferencial de pressão (Pa) da fibra de coco para amostras de 5 mm

APÊNDICE B – Diferencial de pressão (Pa) da fibra de coco para amostras de 10 mm

APÊNDICE C - Tabela da resistência ao fluxo das amostras de fibra de coco com 5 mm

APÊNDICE D - Tabela da resistência ao fluxo das amostras de fibra de coco com 5 mm

APÊNDICE A

Combinações	Velocidade [mm/s]										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
1	1,1	1,6	2,3	3	3,6	4	5	5,8	6,5	7,3	8,1
2	0,9	1,8	2,6	3,4	4,2	5	5,8	6,6	7,5	8,4	9,3
3	0,7	1,5	2,2	2,9	3,5	4,2	4,9	5,6	6,3	7,1	7,9
4	0,8	1,7	2,4	3,2	3,9	4,7	5,4	6,2	7	7,8	8,7
5	0,7	1,5	2,2	2,8	3,5	4,1	4,8	5,5	6,2	6,9	7,7
6	0,9	1,8	2,5	3,3	4	4,7	5,5	6,4	7,2	8	9
7	0,8	1,8	2,5	3,3	4	4,8	5,6	6,4	7,2	8,1	9
8	0,7	1,6	2,2	2,9	3,6	4,3	5	5,7	6,4	7,2	7,9
9	1	2	2,8	3,7	4,5	5,3	6,2	7,2	8,1	9,9	10,3
10	0,9	1,9	2,6	3,4	4,2	4,9	5,8	6,7	7,5	8,4	9,4
11	0,9	1,8	2,6	3,4	4,1	4,9	5,7	6,6	7,4	8,3	9,3
12	0,7	1,5	2,1	2,8	3,4	4	4,7	5,4	6,1	6,9	7,6
13	0,9	1,7	2,5	3,2	4	4,7	5,5	6,3	7,2	8	8,9
14	0,8	1,7	2,4	3,2	3,9	4,6	5,3	6,2	6,9	7,8	8,6
15	0,8	1,8	2,5	3,2	4	4,7	5,5	6,3	7,1	7,9	8,9
16	0,9	1,8	2,5	3,3	4,1	4,8	5,6	6,4	7,3	8,1	9,1
17	0,7	1,5	2,2	2,8	3,5	4,1	4,8	5,5	6,2	6,9	7,7
18	0,8	1,8	2,5	3,2	4	4,7	5,4	6,3	7,1	7,9	8,7
19	0,8	1,7	2,4	3,1	3,9	4,6	5,4	6,1	6,6	7,8	8,6
20	0,8	1,8	2,5	3,2	4	4,7	5,5	6,3	7,1	8	8,8
21	0,8	1,7	2,4	3,1	3,9	4,5	5,3	6,1	6,9	7,7	8,5
22	0,7	1,5	2,1	2,8	3,4	4	4,7	5,3	6	6,8	7,6
23	0,6	1,3	1,9	2,4	3	3,6	4,1	4,8	5,3	6	6,6
24	0,7	1,6	2,2	2,9	3,5	4,2	4,9	5,6	6,3	7	7,8
25	0,7	1,5	2,1	2,8	3,4	4	4,7	5,4	6,1	6,8	7,6
26	0,7	1,5	2,2	2,8	3,5	4,1	4,8	5,5	6,2	7	7,7
27	0,7	1,5	2,1	2,7	3,4	4	4,6	5,3	6	6,7	7,4
28	0,7	1,5	2,2	2,8	3,5	4,1	4,8	5,5	6,2	6,9	7,6

Fonte: O autor, 2017.

APÊNDICE B

Combinações	Velocidade [mm/s]										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
1	1,6	3,5	5	6,4	8	9,4	11,1	12,6	14,1	16	17,9
2	1,4	2,9	4,2	5,5	6,8	8	9,3	10,7	12	13,5	15
3	1,4	3	4,3	5,6	7	8,3	9,7	11,2	12,6	14	15,6
4	1,3	2,8	4	5,2	6,5	7,7	8,9	10,3	11,5	12,9	14,2
5	1,5	3,4	4,8	6,3	7,8	9,3	10,8	12,3	13,9	16,2	17,1
6	1,6	3,4	4,8	6,3	7,9	9,3	10,9	12,5	14,1	15,6	17,3
7	1,4	3,2	4,5	5,9	7,4	8,7	10,2	11,6	13,1	14,7	16,3
8	1,4	3	4,3	5,6	7	8,1	9,7	11,1	12,5	13,9	15,5
9	1,2	2,7	3,9	5,1	6,3	7,5	8,7	10	11,3	12,6	13,9
10	1,4	3	4,2	5,5	6,8	8,1	9,4	10,8	12,1	13,7	15,2
11	1,4	2,9	4,1	5,3	6,7	7,8	9,2	10,5	11,9	13,4	14,9
12	1,4	3	4,3	5,6	6,9	8,2	9,6	11	12,4	13,8	15,2
13	1,2	2,7	3,9	5,1	6,4	7,5	8,8	10,1	11,4	12,6	14
14	1,2	2,5	3,5	4,7	5,8	6,9	8,1	9,3	10,5	11,7	12,9
15	1,1	2,3	3,3	4,3	5,4	6,3	7,4	8,5	9,6	10,7	11,9
16	1,1	2,5	3,5	4,6	5,7	6,8	8	9,1	10,3	11,5	12,8
17	1,4	3,1	4,3	5,7	7,1	8,3	9,7	11,2	12,6	14,1	15,6
18	1,2	2,8	4	5,2	6,6	7,7	9	10,5	11,7	13	14,3
19	1,4	3,1	4,3	5,6	7	8,3	9,7	11,2	12,6	13,9	15,4
20	1,2	2,6	3,7	4,8	6,4	7,2	8,4	9,6	10,7	12,1	13,4
21	1,4	3	4,2	5,5	6,8	8,1	9,4	10,9	12,2	13,7	15,2
22	1,4	3,1	4,4	5,6	7,1	8,4	9,8	11,2	12,6	14,1	15,6
23	1,3	2,9	4	5,3	6,6	7,8	9,1	10,4	11,8	13,1	14,5
24	1,2	2,7	3,8	4,9	6,1	7,2	8,5	9,7	11	12,2	13,7
25	1,1	2,4	3,4	4,4	5,5	6,6	7,7	8,8	9,9	11	12,2
26	1,2	2,6	3,7	4,8	6	7	8,2	9,5	10,6	11,9	13,2
27	1,4	3,1	4,5	5,1	7,2	8,4	9,9	11,3	12,8	14,3	15,8
28	1,3	2,9	4,1	5,4	6,7	8	9,3	10,7	12	13,4	14,9
29	1,4	3,1	4,3	5,6	7,1	8,3	9,8	11,1	12,6	14	15,5
30	1,2	2,7	3,8	4,9	6,2	7,3	8,5	9,9	11,1	12,4	13,7
31	1,2	2,7	3,8	4,9	6,1	7,2	8,4	9,7	10,9	12,2	13,6
32	1,1	2,5	3,5	4,6	5,7	6,7	7,9	9	10,2	11,4	12,7
33	1,2	2,6	3,7	4,8	6	7,1	8,4	9,6	10,8	12,1	13,4
34	1	2,2	3,1	4,1	5,1	6	7	8,1	9,1	10,1	11,3
35	1,3	2,7	3,9	5	6,3	7,4	8,6	9,9	11,2	12,5	13,9

Fonte: O autor, 2017.

APÊNDICE C

Combinações	Velocidade [mm/s]										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
	r [rayl]										
1	220,0	160,0	153,3	150,0	144,0	133,3	142,9	145,0	144,4	146,0	147,3
2	180,0	180,0	173,3	170,0	168,0	166,7	165,7	165,0	166,7	168,0	169,1
3	140,0	150,0	146,7	145,0	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	142,0	143,6
4	160,0	170,0	160,0	160,0	156,0	156,7	154,3	155,0	155,6	156,0	158,2
5	140,0	150,0	146,7	140,0	140,0	136,7	137,1	137,5	137,8	138,0	140,0
6	180,0	180,0	166,7	165,0	160,0	156,7	157,1	160,0	160,0	160,0	163,6
7	160,0	180,0	166,7	165,0	160,0	160,0	160,0	160,0	160,0	162,0	163,6
8	140,0	160,0	146,7	145,0	144,0	143,3	142,9	142,5	142,2	144,0	143,6
9	200,0	200,0	186,7	185,0	180,0	176,7	177,1	180,0	180,0	198,0	187,3
10	180,0	190,0	173,3	170,0	168,0	163,3	165,7	167,5	166,7	168,0	170,9
11	180,0	180,0	173,3	170,0	164,0	163,3	162,9	165,0	164,4	166,0	169,1
12	140,0	150,0	140,0	140,0	136,0	133,3	134,3	135,0	135,6	138,0	138,2
13	180,0	170,0	166,7	160,0	160,0	156,7	157,1	157,5	160,0	160,0	161,8
14	160,0	170,0	160,0	160,0	156,0	153,3	151,4	155,0	153,3	156,0	156,4
15	160,0	180,0	166,7	160,0	160,0	156,7	157,1	157,5	157,8	158,0	161,8
16	180,0	180,0	166,7	165,0	164,0	160,0	160,0	160,0	162,2	162,0	165,5
17	140,0	150,0	146,7	140,0	140,0	136,7	137,1	137,5	137,8	138,0	140,0
18	160,0	180,0	166,7	160,0	160,0	156,7	154,3	157,5	157,8	158,0	158,2
19	160,0	170,0	160,0	155,0	156,0	153,3	154,3	152,5	146,7	156,0	156,4
20	160,0	180,0	166,7	160,0	160,0	156,7	157,1	157,5	157,8	160,0	160,0
21	160,0	170,0	160,0	155,0	156,0	150,0	151,4	152,5	153,3	154,0	154,5
22	140,0	150,0	140,0	140,0	136,0	133,3	134,3	132,5	133,3	136,0	138,2
23	120,0	130,0	126,7	120,0	120,0	120,0	117,1	120,0	117,8	120,0	120,0
24	140,0	160,0	146,7	145,0	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	141,8
25	140,0	150,0	140,0	140,0	136,0	133,3	134,3	135,0	135,6	136,0	138,2
26	140,0	150,0	146,7	140,0	140,0	136,7	137,1	137,5	137,8	140,0	140,0
27	140,0	150,0	140,0	135,0	136,0	133,3	131,4	132,5	133,3	134,0	134,5
28	140,0	150,0	146,7	140,0	140,0	136,7	137,1	137,5	137,8	138,0	138,2

Fonte: O autor, 2017.

APÊNDICE D

Combinações	Velocidade [mm/s]										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
	r [rayl]										
1	320,0	350,0	333,3	320,0	320,0	313,3	317,1	315,0	313,3	320,0	325,5
2	280,0	290,0	280,0	275,0	272,0	266,7	265,7	267,5	266,7	270,0	272,7
3	280,0	300,0	286,7	280,0	280,0	276,7	277,1	280,0	280,0	280,0	283,6
4	260,0	280,0	266,7	260,0	260,0	256,7	254,3	257,5	255,6	258,0	258,2
5	300,0	340,0	320,0	315,0	312,0	310,0	308,6	307,5	308,9	324,0	310,9
6	320,0	340,0	320,0	315,0	316,0	310,0	311,4	312,5	313,3	312,0	314,5
7	280,0	320,0	300,0	295,0	296,0	290,0	291,4	290,0	291,1	294,0	296,4
8	280,0	300,0	286,7	280,0	280,0	270,0	277,1	277,5	277,8	278,0	281,8
9	240,0	270,0	260,0	255,0	252,0	250,0	248,6	250,0	251,1	252,0	252,7
10	280,0	300,0	280,0	275,0	272,0	270,0	268,6	270,0	268,9	274,0	276,4
11	280,0	290,0	273,3	265,0	268,0	260,0	262,9	262,5	264,4	268,0	270,9
12	280,0	300,0	286,7	280,0	276,0	273,3	274,3	275,0	275,6	276,0	276,4
13	240,0	270,0	260,0	255,0	256,0	250,0	251,4	252,5	253,3	252,0	254,5
14	240,0	250,0	233,3	235,0	232,0	230,0	231,4	232,5	233,3	234,0	234,5
15	220,0	230,0	220,0	215,0	216,0	210,0	211,4	212,5	213,3	214,0	216,4
16	220,0	250,0	233,3	230,0	228,0	226,7	228,6	227,5	228,9	230,0	232,7
17	280,0	310,0	286,7	285,0	284,0	276,7	277,1	280,0	280,0	282,0	283,6
18	240,0	280,0	266,7	260,0	264,0	256,7	257,1	262,5	260,0	260,0	260,0
19	280,0	310,0	286,7	280,0	280,0	276,7	277,1	280,0	280,0	278,0	280,0
20	240,0	260,0	246,7	240,0	256,0	240,0	240,0	240,0	237,8	242,0	243,6
21	280,0	300,0	280,0	275,0	272,0	270,0	268,6	272,5	271,1	274,0	276,4
22	280,0	310,0	293,3	280,0	284,0	280,0	280,0	280,0	280,0	282,0	283,6
23	260,0	290,0	266,7	265,0	264,0	260,0	260,0	260,0	262,2	262,0	263,6
24	240,0	270,0	253,3	245,0	244,0	240,0	242,9	242,5	244,4	244,0	249,1
25	220,0	240,0	226,7	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0	221,8
26	240,0	260,0	246,7	240,0	240,0	233,3	234,3	237,5	235,6	238,0	240,0
27	280,0	310,0	300,0	255,0	288,0	280,0	282,9	282,5	284,4	286,0	287,3
28	260,0	290,0	273,3	270,0	268,0	266,7	265,7	267,5	266,7	268,0	270,9
29	280,0	310,0	286,7	280,0	284,0	276,7	280,0	277,5	280,0	280,0	281,8
30	240,0	270,0	253,3	245,0	248,0	243,3	242,9	247,5	246,7	248,0	249,1
31	240,0	270,0	253,3	245,0	244,0	240,0	240,0	242,5	242,2	244,0	247,3
32	220,0	250,0	233,3	230,0	228,0	223,3	225,7	225,0	226,7	228,0	230,9
33	240,0	260,0	246,7	240,0	240,0	236,7	240,0	240,0	240,0	242,0	243,6
34	200,0	220,0	206,7	205,0	204,0	200,0	200,0	202,5	202,2	202,0	205,5
35	260,0	270,0	260,0	250,0	252,0	246,7	245,7	247,5	248,9	250,0	252,7

Fonte: O autor, 2017.