



UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGEM

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

## CARACTERIZAÇÃO INVERSA VIBROACÚSTICA DE MATERIAIS POROSOS EM TUBO DE IMPEDÂNCIA

DIEGO WILLIAN DA SILVA

JOINVILLE, 2018

ANO  
2018

DIEGO WILLIAN DA SILVA | CARACTERIZAÇÃO INVERSA VIBROACÚSTICA DE  
MATERIAIS POROSOS EM TUBO DE IMPEDÂNCIA

Materiais porosos como espumas ou compostos fibrosos são amplamente utilizados em diversas aplicações de controle de ruído, assim a caracterização destes materiais é fundamental para uma aplicação eficiente de recursos. Muitos modelos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos, buscando caracterizar acusticamente materiais porosos, normalmente estes modelos dependem das propriedades físicas do material. No trabalho desenvolvido por Johnson-Champoux-Allard (JCA), um material poroso pode ser modelado acusticamente por cinco parâmetros físicos: porosidade, tortuosidade, resistividade ao fluxo e comprimentos característicos viscoso e térmico. No entanto, há dificuldade em medir todas as propriedades necessárias para caracterizar o material, pelo menos através dos métodos tradicionais, uma vez que faz-se necessário um experimento específico e aparato dedicado para estimar cada propriedade. Assim, nos anos recentes pesquisas e métodos alternativos vêm sendo desenvolvidos para estimar estas propriedades.

Um método que chama atenção é a caracterização inversa das propriedades, com base em medições em tubo de impedância, desta forma é possível substituir os testes tradicionais por um único teste em tubo de impedância. As propriedades necessárias no modelo JCA podem ser obtidas através de um processo de otimização, neste trabalho uma caracterização inversa acústica de materiais porosos através de otimização genética, utilizando o algoritmo de Evolução Diferencial (DE), é apresentada. A efetividade do método apresentado é avaliada através de um modelo numérico, validado experimentalmente, de um tubo de impedância virtual. A validação experimental do modelo numérico, que é feita através de medições de uma amostra padrão, é apresentada e o processo de otimização é explorado e analisado, uma vez que os parâmetros podem ser controlados e são conhecidos no modelo numérico. Por fim, foi possível obter uma metodologia eficiente para a estimativa das propriedades físicas do material, permitindo apresentar boa representatividade de seu comportamento acústico.

Orientador: Prof. Dr. Renato Barbieri

Joinville, 2018

**DIEGO WILLIAN DA SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO INVERSA VIBROACÚSTICA DE MATERIAIS POROSOS EM  
TUBO DE IMPEDÂNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Renato Barbieri

**JOINVILLE – SC**

**2018**

da Silva, Diego Willian  
CARACTERIZAÇÃO INVERSA VIBROACÚSTICA DE MATERIAIS  
POROSOS EM TUBO DE IMPEDÂNCIA / Diego Willian da  
Silva. - Joinville , 2018.  
87 p.

Orientador: Renato Barbieri  
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de  
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,  
Joinville, 2018.

1. Acústica. 2. Materiais Porosos. 3.  
Caracterização Inversa. 4. Tubo de Impedância. 5.  
Otimização Genética. I. Barbieri, Renato. II.  
Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa  
de Pós-Graduação. III. Título.

**Caracterização Inversa Vibroacústica de Materiais Porosos em Tubo de Impedância**

por

**Diego Willian da Silva**

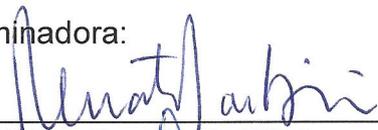
Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

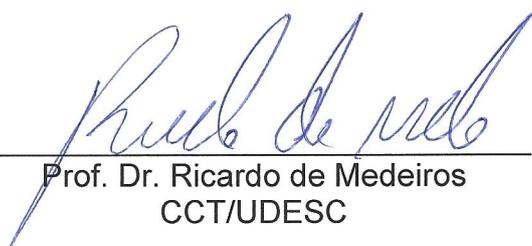
Área de concentração em “Modelagem e Simulação Numérica”  
e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA  
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

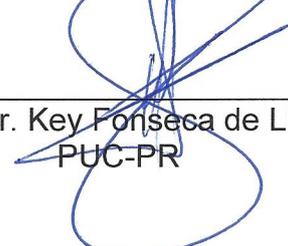
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Renato Barbieri  
CCT/UEDESC (Orientador/Presidente)



Prof. Dr. Ricardo de Medeiros  
CCT/UEDESC



Prof. Dr. Key Fonseca de Lima  
PUC-PR

Joinville, SC, 28 de fevereiro de 2018.



Faço a dedicatória deste trabalho em memória ao meu grande amigo de infância, Guilherme Willemann Felício, que a sua memória sempre viva.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais Sônia e Vanderlei, e à família, principalmente aqueles com quem convivo regularmente e sei que posso contar sempre com o apoio de vocês. Em meu último trabalho desejei mais festas e churrascos, como deu certo até aqui, vou desejar de novo, que as jogatinas continuem e que os momentos felizes perdurem.

Em segundo lugar, mas não menos importante, gostaria de agradecer aos amigos, aqueles que estão sempre me aturando e proporcionando bons momentos, alguns mais presentes como o Patrick e outros que não vejo com tanta frequência, mas sei que posso contar sempre também, como o Moacir.

Agradeço à Vibroacustica por me proporcionar os recursos necessários para realização deste e de muitos outros trabalhos, assim não posso deixar de agradecer também aos meus companheiros de profissão, Edmar e Celso, por tudo o que me é ensinado no dia à dia.

Gostaria de agradecer ainda aos meus “afilhados” Fernando e Luiza, pessoas por quem eu tenho um carinho especial.

Por fim gostaria de agradecer também em especial, ao meu amigo Eduardo, quem eu considero um irmão, afinal de contas, sem você eu teria terminado esse trabalho à muito tempo.



“Sucesso não é o final, fracasso não é fatal: é a coragem para continuar que conta.”

Winston Churchil



## RESUMO

Materiais porosos como espumas ou compostos fibrosos são amplamente utilizados em diversas aplicações de controle de ruído, assim a caracterização destes materiais é fundamental para uma aplicação eficiente de recursos. Muitos modelos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos, buscando caracterizar acusticamente materiais porosos, normalmente estes modelos dependem das propriedades físicas do material. No trabalho desenvolvido por Johnson-Champoux-Allard (JCA), um material poroso pode ser modelado acusticamente por cinco parâmetros físicos: porosidade, tortuosidade, resistividade ao fluxo e comprimentos característicos viscoso e térmico. No entanto, há dificuldade em medir todas as propriedades necessárias para caracterizar o material, pelo menos através dos métodos tradicionais, uma vez que faz-se necessário um experimento específico e aparato dedicado para estimar cada propriedade. Assim, nos anos recentes pesquisas e métodos alternativos vêm sendo desenvolvidos para estimar estas propriedades. Um método que chama atenção é a caracterização inversa das propriedades, com base em medições em tubo de impedância, desta forma é possível substituir os testes tradicionais por um único teste em tubo de impedância. As propriedades necessárias no modelo JCA podem ser obtidas através de um processo de otimização, neste trabalho uma caracterização inversa acústica de materiais porosos através de otimização genética, utilizando o algoritmo de Evolução Diferencial (DE), é apresentada. A efetividade do método apresentado é avaliada através de um modelo numérico, validado experimentalmente, de um tubo de impedância virtual. A validação experimental do modelo numérico, que é feita através de medições de uma amostra padrão, é apresentada e o processo de otimização é explorado e analisado, uma vez que os parâmetros podem ser controlados e são conhecidos no modelo numérico. Por fim, foi possível obter uma metodologia eficiente para a estimativa das propriedades físicas do material, permitindo apresentar boa representatividade de seu comportamento acústico.

**Palavras-chave:** Acústica, Materiais Porosos, Caracterização Inversa, Tubo de Impedância, Otimização Genética



## ABSTRACT

Porous materials such as foams or fibrous composites are widely used in several applications of noise control, thus the acoustic characterization of these materials is fundamental for an efficient application of resources. Several models have been developed throughout the years looking to acoustically characterize porous materials, usually these models depend on the physical properties of the material. In the model developed by Johnson-Champoux-Allard (JCA) a porous material can be modelled acoustically by five physical parameters: the porosity, the tortuosity, the flow resistivity and the viscous and thermal characteristic lengths. However, there's difficulty in measuring all the necessary properties to characterize the material, at least through the traditional methods, since it is necessary a specific test and apparatus to estimate each property. Thus, in recent years researches and alternative methods are being developed for obtaining these properties. A method that draws attention is the inverse characterization of the properties based on impedance tube measurements, this way it's possible to replace the traditional tests by a single test in impedance tube. The properties needed in the JCA model can be obtained through an optimization process, in this work an inverse acoustic characterization of porous materials through a genetic optimization, using the Differential Evolution (DE) algorithm, is presented. The effectiveness of the presented method is evaluated through an experimentally validated virtual impedance tube numerical model. The experimental validation of the numeric model, which is done through standard samples measurements, is presented and the optimization process is explored and analyzed since the parameters can be controlled and are well known in the numeric model. Finally, it was possible to obtain an effective methodology to estimate the physical properties of the material, allowing to present good representability of its acoustical behavior.

**Keywords:** Acoustics, Porous Material, Inverse Characterization, Impedance Tube, Genetic Optimization



# Sumário

<b>Capítulo 1 Introdução .....</b>	<b>23</b>
1.1. Justificativas.....	24
1.2. Hipótese .....	24
1.3. Objetivos .....	25
1.3.1. Objetivo Geral .....	25
1.3.2. Objetivos Específicos .....	25
1.4. Estrutura da Dissertação .....	25
<b>Capítulo 2 Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>27</b>
<b>Capítulo 3 Embasamento Teórico.....</b>	<b>31</b>
3.1. Modelo Acústico.....	35
3.2. Métodos Tradicionais .....	38
3.2.1. Medição de Porosidade.....	38
3.2.2. Medição de Resistividade ao Fluxo.....	39
3.2.3. Medição de Comprimentos Característicos Viscoso e Térmico.....	41
3.2.4. Medição da Tortuosidade .....	42
3.3. Método Inverso .....	42
3.3.1. Medição em Tubo de Impedância .....	42
3.3.2. Rotina de Otimização .....	44
<b>Capítulo 4 Resultados.....</b>	<b>47</b>
4.1. Experimento.....	48
4.2. Validação do Modelo Numérico .....	55
4.3. Validação da Metodologia .....	57
4.4. Aplicação da Metodologia .....	66
4.4.1. Material 1 – Espuma de Poliuretano.....	69
4.4.2. Material 2 – Espuma de Melanina.....	70

4.4.3.	Material 3 – Kenaf .....	71
4.4.4.	Material 4 – Feltro Macio .....	72
4.4.5.	Material 5 – Fibra de Madeira.....	73
4.4.6.	Material 6 – Hastes de Mudas ( <i>Switchgrass</i> ).....	74
4.5.	Comparativo .....	75
4.6.	Revisão .....	76
<b>Capítulo 5</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>77</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>.....</b>	<b>79</b>

# Lista de Figuras

Figura 1: Zonas de Frequências de uma Curva de Absorção Típica .....	28
Figura 2: Processo de Validação em Loop-Fechado .....	28
Figura 3: Fonte-Caminho-Receptor .....	31
Figura 4: Absorção de Materiais Absorvedores .....	33
Figura 5: Tubo de Impedância - Incidência Normal.....	35
Figura 6: Aparato Utilizado para Medir Porosidade .....	38
Figura 7: Sistema para Medição de Resistência ao Fluxo .....	40
Figura 8: Comprimentos Característicos Viscoso e Térmico .....	41
Figura 9: Esboços da Reconstrução Geodésica (a) e da Reconstrução Direta (b) de um Poro Tortuoso.....	42
Figura 10: Medição de Coeficiente de Absorção em Tubo de Impedância.....	43
Figura 11: Algoritmo de Evolução Diferencial .....	45
Figura 12: Fluxograma da Metodologia Aplicada.....	47
Figura 13: Tubo de Impedância Bruel & Kjaer Type 4206.....	48
Figura 14: Amostra Padrão de Calibração Bruel & Kjaer.....	48
Figura 15: Setup Experimental.....	49
Figura 16: Microfones B&K Type 4187 .....	50
Figura 17: Pré-Amplificador B&K Type 2670 .....	50
Figura 18: Módulo de Aquisição B&K Type 3160-A-042 .....	50
Figura 19: Amplificador de Potência Type 2732 .....	51
Figura 20: Configuração do Tubo de Impedância .....	51
Figura 21: Amostras Medidas .....	52
Figura 22: Posicionamento das Amostras no Tubo .....	52

Figura 23: Coeficientes de Absorção das Amostras Padrão para Baixas Frequências .....	53
Figura 24: Coeficientes de Absorção das Amostras Padrão para Altas Frequências.....	54
Figura 25: Coeficiente de Absorção Combinado das Amostras Padrão .....	54
Figura 26: Modelo Numérico do Tubo de Impedância.....	55
Figura 27: Validação do Modelo Numérico .....	56
Figura 28: Modelo Numérico do Tubo de Impedância com JCA.....	57
Figura 29: Absorção Estimada: (a) 1 Espessura (Tent. 1), (b) 2 Espessuras (Tent. 2) .....	61
Figura 30: Impedância Estimada (Tent. 3).....	61
Figura 31: Absorção Estimada: (a) Tent. 1, (b) Tent. 2, (c) Tent. 3 .....	64
Figura 32: Absorção Estimada Modelo Final .....	65
Figura 33: Material 1 – Espuma de Poliuretano 40kg/m <sup>3</sup> .....	66
Figura 34: Material 2 – Espuma de Melanina 8kg/m <sup>3</sup> .....	67
Figura 35: Material 3 – Kenaf 40kg/m <sup>3</sup> .....	67
Figura 36: Material 4 – Feltro Macio 24kg/m <sup>3</sup> .....	67
Figura 37: Material 5 – Fibra de Madeira .....	68
Figura 38: Material 6 – Hastes de Mudanças (Switchgrass) .....	68
Figura 39: Absorção Estimada Material 1 .....	69
Figura 40: Absorção Estimada Material 2 .....	70
Figura 41: Absorção Estimada Material 3 .....	71
Figura 42: Absorção Estimada Material 4 .....	72
Figura 43: Absorção Estimada Material 5 .....	73
Figura 44: Absorção Estimada Material 6 .....	74

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Parâmetros da Medição .....	53
Tabela 2: Propriedades do Ar .....	58
Tabela 3: Propriedades do Material Poroso.....	59
Tabela 4: Estimativa Inicial dos Parâmetros .....	60
Tabela 5: Estimativa dos Parâmetros (Calibração).....	63
Tabela 6: Erros Associados à Estimativa dos Parâmetros (Calibração).....	63
Tabela 7: Estimativa dos Parâmetros (Consolidação).....	65
Tabela 8: Parâmetros dos Materiais Avaliados .....	66
Tabela 9: Estimativa dos Parâmetros (Material 1) .....	69
Tabela 10: Estimativa dos Parâmetros (Material 2) .....	70
Tabela 11: Estimativa dos Parâmetros (Material 3) .....	71
Tabela 12: Estimativa dos Parâmetros (Material 4) .....	72
Tabela 13: Estimativa dos Parâmetros (Material 5) .....	73
Tabela 14: Estimativa dos Parâmetros (Material 6) .....	74
Tabela 15: Comparativo dos Parâmetros Estimados (Erros Percentuais) .....	75
Tabela 16: Revisão dos Parâmetros Estimados (Erros Percentuais) .....	76



# Lista de Símbolos

## Abreviações

B&K	Brüel & Kjør
BET	Brunauer-Emmett-Teller
DE	Differential Evolution
JCA	Johnson-Champoux-Allard
SPC	Source Path Contribution
TPA	Transfer Path Analysis

## Nomenclaturas

$\sim$	Variável com componente complexa e dependente da frequência.
$c$	Velocidade do Som no Meio
$f_u$	Limite Superior de Frequência
$I_{inc}$	Intensidade Sonora Incidente
$I_{abs}$	Intensidade Sonora Absorvida
$I_{ref}$	Intensidade Sonora Refletida
$j$	$\sqrt{-1}$
$\tilde{K}$	Módulo Volumétrico
$k_{eff}$	Módulo Volumétrico Efetivo do Ar
$\tilde{k}$	Número de Onda Complexo
$L$	Espessura

$N_{pr}$	Número de Prandtl
$p$	Pressão Sonora
$P$	Pressão
$V$	Volume
$v_{inv}^2$	Velocidade de Escoamento Inviscido
$\tilde{Z}$	Impedância de Superfície
$Z_0$	Impedância Característica do Ar
$\tilde{Z}_c$	Impedância Característica
$\tilde{Z}_s$	Impedância Normalizada de Superfície

### **Símbolos Gregos**

$\alpha$	Coefficiente de Absorção Sonora
$\rho_0$	Densidade do Ar
$\tilde{\rho}$	Densidade Efetiva
$\phi$	Porosidade
$\alpha_\infty$	Tortuosidade
$\sigma$	Resistividade ao Fluxo
$\Lambda$	Comprimento Característico Viscoso
$\Lambda'$	Comprimento Característico Térmico
$\eta$	Viscosidade Dinâmica
$\gamma$	Razão de Calores Específico
$\omega$	Frequência Angular

# Capítulo 1

## Introdução

Materiais porosos como espumas ou compósitos fibrosos são amplamente utilizados em diversas aplicações de controle de ruído. Esses materiais são frequentemente utilizados nas indústrias automotiva e aeronáutica. A caracterização vibroacústica desses materiais é fundamental na aplicação eficiente de recursos em controle de ruído.

A caracterização de materiais é fundamental na análise de um sistema, visto que um modelo numérico precisa de dados de entrada consistentes para ter a robustez necessária na representação do domínio físico, permitindo assim o diagnóstico correto de problemas e avaliações de oportunidades de melhorias.

Diversos trabalhos e modelos interessantes foram desenvolvidos ao longo dos anos buscando caracterizar acusticamente materiais porosos. Normalmente, esses modelos dependem de propriedades físicas do material, como a porosidade entre tantos outros.

No entanto, há dificuldade em medir todas as propriedades necessárias para caracterizar o material, pelo menos através dos métodos tradicionais, uma vez que é necessário um ensaio e aparato específico para estimar cada propriedade, além desses métodos serem muito sensíveis à incertezas, uma vez que as grandezas são estimadas indiretamente.

Com a evolução do poder computacional, ambos modelos numéricos e algoritmos de otimização estão sendo amplamente utilizados na engenharia. A necessidade de reduzir tempo e custo está fazendo engenheiros substituírem alguns métodos tradicionais por métodos computacionais.

Com isso, pesquisas vêm sendo desenvolvidas e métodos alternativos para obtenção dessas propriedades vem sendo estudados. Uma abordagem que está sendo explorada para a estimativa das propriedades que definem o comportamento acústico do material baseia-se em uma otimização inversa de medições em tubo de impedância.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma rotina com base nessa metodologia para estimar as propriedades físicas do material de modo que essas possam ser utilizadas para representar o comportamento acústico do material em simulações numéricas.

## 1.1. Justificativas

Visando buscar alternativas aos métodos tradicionais de obtenção das propriedades necessárias para caracterizar acusticamente um material poroso, pesquisas vem sem desenvolvidas na área, crescendo ao longo dos anos.

Um método que chama atenção é a caracterização inversa das propriedades, com base em medições em tubo de impedância. Dessa forma, é possível substituir os ensaios tradicionais por um único ensaio em tubo de impedância.

Apesar dos trabalhos recentes desenvolvidos na área, uma das principais referências ainda é o trabalho de Atalla & Panneton (2005). No entanto, em seu trabalho, Atalla e Panneton estimam apenas algumas das propriedades necessárias para a caracterização vibroacústica do material, mantendo a estimativa por métodos tradicionais de certas propriedades.

É notável assim que há margem para aprimoramentos da metodologia empregada. O diferencial deste trabalho é o foco maior nos métodos computacionais, procurando avaliar o desempenho da metodologia através de materiais simulados cujas propriedades são controladas.

## 1.2. Hipótese

Um material poroso pode ser modelado acusticamente através do modelo apresentado por Johnson-Champoux-Allard (JCA, 1991). O modelo em questão necessita de cinco parâmetros físicos do material para caracterizá-lo: porosidade, tortuosidade, resistividade ao fluxo, comprimento característico viscoso e comprimento característico térmico.

Com base no trabalho de Atalla & Panneton (2005) mencionado, e em outros trabalhos recentemente desenvolvidos, conforme serão apresentados na revisão bibliográfica, as propriedades necessárias para utilizar o modelo de JCA podem ser obtidas através de um processo de otimização inversa de medições em tubo de impedância.

O tubo de impedância por sua vez pode ser facilmente simulado através de um modelo numérico, o que possibilita assim, através de um modelo validado, controlar as propriedades do material no tubo de impedância virtual, permitindo avaliar assim o desempenho da rotina de otimização, uma vez que os valores a serem estimados são conhecidos.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo Geral

- Caracterizar acusticamente um material poroso para modelagem numérica através do modelo de Johnson-Champoux-Allard (JCA).

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar os ensaios experimentais necessários ao desenvolvimento do trabalho.
- Desenvolver e validar um modelo virtual de tubo de impedância para simular materiais à serem utilizados como dados de entrada.
- Elaborar uma rotina de otimização para obter as propriedades necessárias para caracterização acústica do material através de medições em tubo de impedância.

## 1.4. Estrutura da Dissertação

O presente trabalho é dividido em 5 capítulos, sendo o primeiro deles esta introdução ao trabalho, onde foi apresentada a ideia por trás do trabalho e a motivação do mesmo.

O segundo capítulo consiste em uma revisão bibliográfica, onde o estado da arte é apresentado, o objetivo é mostrar alguns dos trabalhos já desenvolvidos até o momento por outros autores acerca deste tema, bem como a pertinência do mesmo.

O terceiro capítulo traz o embasamento teórico, onde os modelos acústico e numérico são apresentados e detalhados, abordando as grandezas envolvidas desde o modelo matemático até o modelo numérico, bem como da rotina de otimização.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos, neste capítulo as etapas de desenvolvimento desde o modelo inicial até o modelo final são demonstradas, mostrando as dificuldades encontradas até a obtenção de uma metodologia funcional. O capítulo encerra com os resultados obtidos pela utilização da metodologia desenvolvida, onde uma nova etapa de revisão da metodologia é apresentada visando obter uma melhora nos resultados.

Finalizando, o sexto capítulo encerra o trabalho apresentando as conclusões do autor.



## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

Quando o assunto é caracterização acústica de materiais porosos através do método inverso de medições em tubo de impedância, uma referência muito citada por autores que abordam o assunto, é o trabalho de Atalla & Panneton (2005).

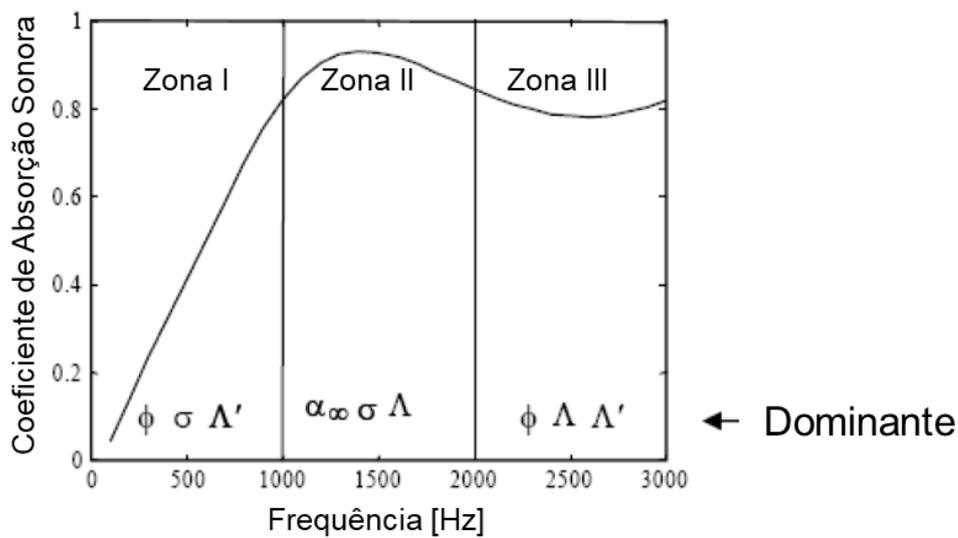
Assim, nesse trabalho, considera-se como ponto inicial para o estado da arte, o referido trabalho de 2005 e demais trabalhos que o sucederam até o presente ano. Algumas fontes mais antigas serão citadas para abordar os métodos tradicionais e também para introduzir o modelo matemático no embasamento teórico.

Atalla & Panneton (2005) propõem investigar a viabilidade de uma caracterização inversa para identificar a tortuosidade ( $\alpha_\infty$ ), e os comprimentos característicos viscoso ( $\Lambda$ ) e térmico ( $\Lambda'$ ) de um meio poroso baseado em simples medições padronizadas em um tubo de impedância. Esses parâmetros são os dados de entrada para o modelo acústico JCA.

O presente trabalho segue essa mesma ideia, diferindo-se porém por ter como objetivo estimar todas as cinco propriedades físicas do material que descrevem o comportamento acústico do mesmo no modelo de JCA, ou seja, incluindo no procedimento a estimativa da porosidade ( $\phi$ ) e da resistividade ao fluxo ( $\sigma$ ).

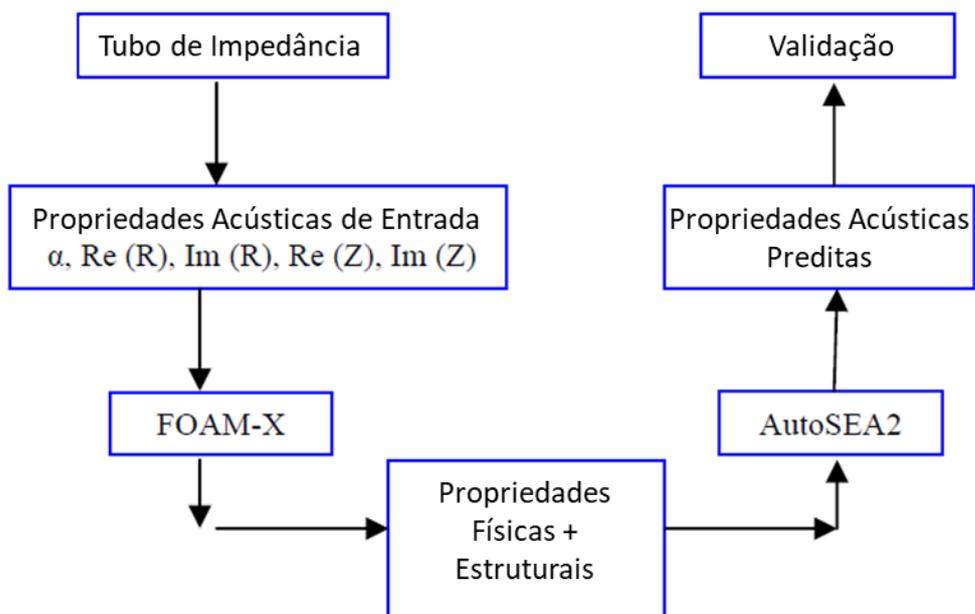
Em seu trabalho, Atalla & Panneton (2005) desenvolvem e apresentam um algoritmo de caracterização inversa baseado em um processo de otimização, avaliando duas espumas e dois materiais fibrosos. São apresentadas validações através de comparações entre os modelos numéricos e os resultados medidos. Eles concluem que apesar das propriedades estimadas pelo algoritmo serem baseadas em um ótimo matemático para uma dada configuração (espessura da amostra e faixa de frequências medida), elas são as propriedades intrínsecas do material poroso. Sendo esse o princípio básico para a caracterização de um material.

Outra conclusão importante do trabalho de Atalla & Panneton (2005) é que o método inverso conduz a resultados precisos na determinação das propriedades físicas intrínsecas do material quando as zonas (I, II, e III) da curva de absorção, como ilustrado na Figura 1, são abrangidas.



**Figura 1: Zonas de Frequências de uma Curva de Absorção Típica**  
 [Fonte: Atalla & Panneton (2005)]

O algoritmo desenvolvido por Atalla & Panneton (2005) foi incorporado no *software* FOAM-X. Sharma *et al.* (2006) desenvolveram um processo, ilustrado na Figura 2, para validar as propriedades físicas de materiais porosos estimados utilizando o FOAM-X e dados de testes em tubo de impedância: coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ), coeficiente de reflexão sonora (R) e impedância de superfície (Z).



**Figura 2: Processo de Validação**  
 [Fonte: Sharma *et al.* (2006)]

Shravage *et al.* (2010) apresentam em seu trabalho uma comparação entre o método inverso e métodos analíticos na estimativa das propriedades físicas intrínsecas do material poroso. A conclusão importante deste trabalho é de que é possível obter precisão adequada na estimativa das propriedades através de ambos os métodos, sendo que o método analítico pode ser utilizado para realizar uma verificação (*cross-check*) dos resultados obtidos através do método inverso. Apesar de não haver um modelo analítico para a estimativa da porosidade, a mesma é uma das duas propriedades para as quais há um método padronizado de medição (a outra é a resistividade ao fluxo). Vale ressaltar que os autores ainda concluem que o método inverso é adequado para a estimativa de todas as propriedades.

Doutres *et al.* (2010), por sua vez, apresentam um método indireto para estimativa das propriedades necessárias para o modelo JCA. O método de medição simultânea de absorção e perda de transmissão com três microfones em tubo de impedância é utilizado. Os resultados obtidos através do método indireto apresentado são comparados com resultados provenientes de métodos diretos, bem como de métodos inversos.

Alba *et al.* (2011) apresentam um método de caracterização inversa, através de medições em tubo de impedância, para obter porosidade, diâmetro de fibra e densidade de materiais acústicos fibrosos. O objetivo é avaliar o desempenho acústico de materiais utilizando o modelo de Voronina (1994). Os autores alertam para a alta sensibilidade do processo à pequenas variações da densidade, indicando a necessidade de cuidado ao avaliar a mesma.

Apesar do modelo empregado por Alba *et al.* ser diferente, a metodologia tem o mesmo princípio, mostrando que uma família diferente de materiais pode também ser caracterizada por essa metodologia através do modelo adequado.

Chazot *et al.* (2012) apresentam um método inverso de caracterização acústica de materiais poroelásticos utilizando uma abordagem Bayesiana. Diferentemente de Atalla & Panneton (2005), que utilizam o método de medição de absorção com dois microfones em tubo de impedância, Chazot *et al.* (2012) utilizam o método de medição de perda de transmissão com quatro microfones em tubo de impedância. Um ponto importante no trabalho de Chazot *et al.* é que os autores utilizam o modelo de Biot, que é mais extensivo que o modelo de JCA.

No presente trabalho o modelo abordado é o de JCA, justamente devido à menor quantidade de parâmetros necessários para a aplicação do mesmo, no entanto nada impede que em trabalhos futuros a metodologia seja ampliada para o modelo de Biot, visando diversificar mais a gama de materiais aplicáveis. Uma mensagem importante passada por Chazot *et al.* (2012) em suas conclusões é de que o objetivo da caracterização inversa não necessariamente é estimar as propriedades do material com o menor erro possível, mas sim estimar um conjunto

de parâmetros que permita reproduzir adequadamente o comportamento do material em um modelo mais complexo.

Zielinski (2015) aborda a caracterização inversa não somente na condição padronizada de medição em tubo de impedância (quando a terminação é a parede do pistão), mas também quando há uma camada de ar de espessura conhecida entre o pistão e a face da amostra. Com as diferenças apresentadas, atenta-se para a importância do critério na hora de realizar a medição. Uma forma de diminuir o erro é realizar múltiplas medições à fim de eliminar pontos fora da curva, como uma amostra mal posicionada. Essas incertezas relativas à medição reforçam a proposta de estudar a metodologia através de resultados simulados, onde garante-se condições ideais, restando apenas o erro relativo à rotina de otimização empregada.

Por fim, Zhang & Zhu (2016) ampliam a gama de materiais avaliados ao utilizarem métodos inversos para determinar parâmetros acústicos de materiais porosos metálicos. São desenvolvidos e apresentados vários métodos para determinação das propriedades, utilizando diferentes modelos, para os quais os resultados são confrontados entre si. O modelo de JCA mostrou-se o mais adequado para descrever a absorção e a propagação do som no meio também para essa família de materiais.

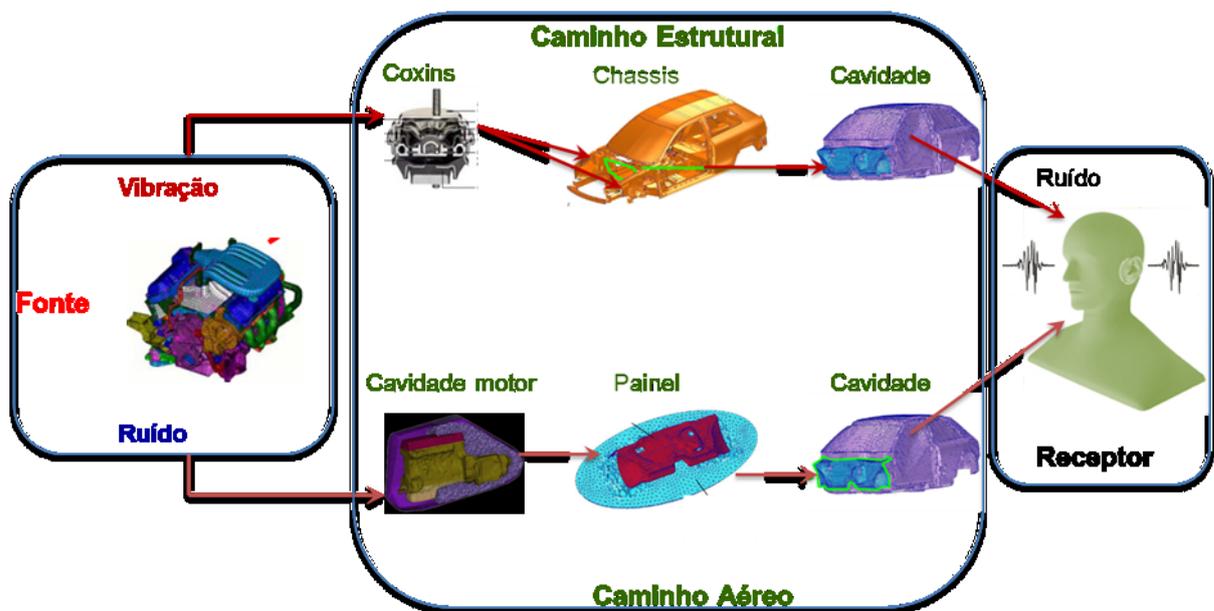
Assim, observa-se a aplicabilidade do modelo de JCA para materiais porosos. Embora haja modelos mais amplos como o modelo de Biot ou modelos específicos para outra família de materiais como o modelo de Voronina, cada um tem suas vantagens e suas desvantagens, como o maior número de parâmetros no modelo de Biot ou a alta sensibilidade do modelo de Voronina.

Como o objetivo do presente trabalho é avaliar a caracterização acústica de materiais porosos sob uma perspectiva de representatividade numérica, o modelo JCA apresenta-se como o mais adequado nesse primeiro momento. É notável também que ao longo dos anos estudos vêm sendo realizados buscando explorar melhor as metodologias inversas, uma vez que através de métodos tradicionais apenas a porosidade e a resistividade ao fluxo possuem metodologias de medição padronizadas e aceitas pela comunidade científica, restando apenas metodologias alternativas para os demais parâmetros. Isso mostra não somente a atualidade e pertinência do tema, como também que há margem para evolução das metodologias existentes.

## Capítulo 3

### Embasamento Teórico

Controle de ruído é o processo de obtenção de um ambiente acusticamente aceitável controlando a fonte, o caminho, o receptor, ou ainda todos os três. Assim apresenta-se uma abordagem clássica em acústica para controle de ruído, onde um mapa de ruído é elaborado, identificando as fontes e os caminhos pelos quais o ruído pode ser conduzido até o receptor. A Figura 3 exemplifica esta abordagem.



**Figura 3: Fonte-Caminho-Receptor**

A Figura 3 ainda introduz o conceito de caminhos estruturais, onde o ruído percebido é proveniente da vibração de alguma estrutura excitada por uma fonte, e caminhos aéreos, onde o ruído percebido é transmitido diretamente pelo ar, passando por possíveis obstáculos.

Existem técnicas poderosas para separar o ruído em contribuições de fontes/caminhos, como o SPC (*Source Path Contribution*) e o TPA (*Transfer Path Analysis*). Estas técnicas normalmente são utilizadas para identificar as maiores contribuições e definir potenciais para redução de ruído, seja trabalhando na fonte ou no caminho.

Técnicas ativas também podem ser utilizadas para tal, as quais consistem na modificação do campo sonoro através de meios eletro-acústicos. Duas abordagens clássicas são: cancelamento de ruído, onde atuadores são fontes sonoras que produzem um sinal fora de fase para atenuar a perturbação, e controle acústico-estrutural, para quando o ruído é causado pela vibração de uma estrutura, onde os atuadores são fontes vibratórias, que podem modificar a forma como a estrutura vibra, alterando assim o ruído radiado pela mesma.

No entanto este trabalho aborda controle de ruído sobre a perspectiva de quando o mesmo tem que ser tratado no receptor, ou seja, melhorando as características do ambiente.

Assim, técnicas passivas podem ser utilizadas, as quais resultam na modificação do ambiente no qual as fontes sonoras operam e não requerem fonte de alimentação para reduzir o ruído e a vibração. O que torna o controle passivo mais econômico e fácil de implementar. Por outro lado, o desempenho é limitado para médias e altas frequências. Felizmente, controles ativos funcionam melhor em baixas frequências, assim, uma combinação de controles ativos e passivos são uma prática comum.

Controles passivos utilizam um ou mais dos seguintes tipos de controles: absorvedores e barreiras para controle de ruído aéreo, e isoladores e amortecedores para controle de ruído estrutural.

Absorvedores sonoros reduzem o ruído por dissipação da energia sonora, enquanto que barreiras sonoras controlam o ruído por um mecanismo não-dissipativo (reflexão).

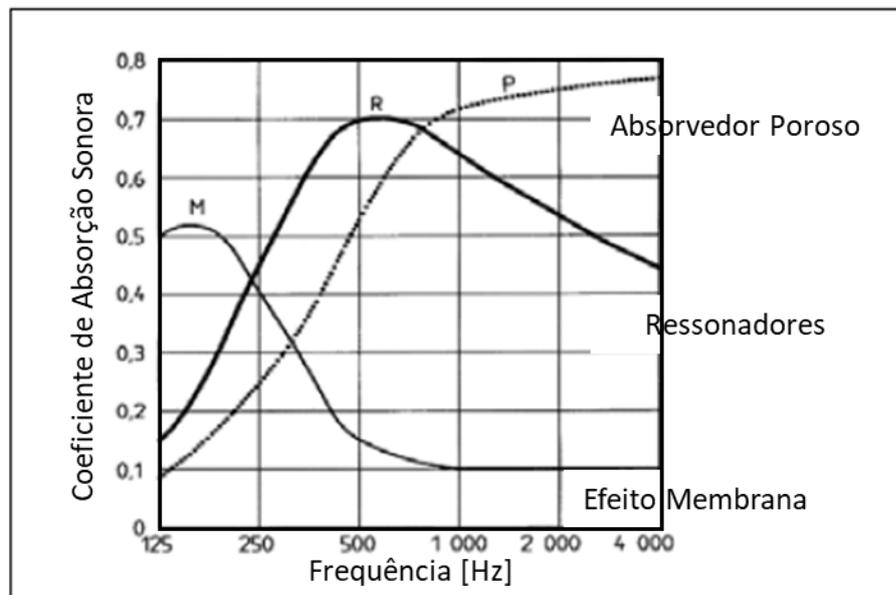
Os materiais abordados neste trabalho encaixam-se na categoria de absorvedores sonoros. A energia sonora propagando-se livremente é dissipada por uma combinação de mecanismos viscosos e térmicos, referidos como absorção sonora. Absorvedores sonoros são utilizados para dissipar a energia sonora e minizar a reflexão do som.

O coeficiente de absorção  $\alpha$  é um índice para medir a absorção sonora de um material, sendo definido como a razão de energia absorvida pela energia incidida, conforme Equação 1.

$$\left( \begin{array}{l} \alpha = \frac{I_{abs}}{I_{inc}} \\ I_{inc} = I_{abs} + I_{ref} \\ \alpha = 1 - \frac{I_{ref}}{I_{inc}} \end{array} \right) \quad (1)$$

sendo  $I_{inc}$  a intensidade sonora incidente na superfície,  $I_{ref}$  a intensidade sonora refletida pela superfície, e  $I_{abs}$  a intensidade sonora absorvida pela superfície.

Absorvedores sonoros podem ser não porosos ou porosos. Absorvedores não-porosos podem ser por efeito membrana ou ressoadores. Os materiais estudados neste trabalho são materiais absorvedores porosos, que tratam-se de materiais nos quais a propagação do som ocorre através dos poros interconectados de modo que os efeitos viscosos causem dissipação da energia acústica em forma de calor. A Figura 4 mostra as características de cada um desses absorvedores.



**Figura 4: Absorção de Materiais Absorvedores**

[Fonte: Ravindran (2007)]

Para entender a pesquisa envolvida em caracterização acústica de materiais porosos, é importante revisar as propriedades que governam a propagação do som em meios porosos.

Conforme Ravindran (2007), a propagação do som em meios porosos é governada por propriedades que dependem da geometria do material poroso, da propriedade do ar nos poros, e de propriedades mecânicas do sólido.

Cinco parâmetros descrevem as propriedades físicas macroscópicas (geométricas) do material e definem a complexidade da propagação do som no meio poroso. Esses parâmetros são: porosidade, tortuosidade, resistividade ao fluxo, comprimento característico viscoso e comprimento característico térmico.

- A porosidade é a razão entre o volume de ar nos poros e o volume total.
- A tortuosidade é a propriedade que descreve o quanto o material poroso previne fluxo direto através do meio. Relacionando o comprimento médio do caminho que o fluido tem que percorrer no material com a espessura do mesmo.
- A resistividade ao fluxo é a queda de pressão necessária para forçar um escoamento unitário através do material. Expressando as perdas viscosas das ondas sonora propagando-se no material poroso.
- O comprimento característico viscoso é a dimensão média macroscópica das células relacionada com as perdas viscosas. Está relacionado com os menores poros de um agregado poroso.
- O comprimento característico térmico é a dimensão média macroscópica das células relacionada com as perdas térmicas. Está relacionado com os maiores poros de um agregado poroso.

A descrição matemática do comprimento característico, por Johnson *et al.* (1987), é:

$$\Lambda = 2 \frac{\int_V v_{inv}^2 dV}{\int_A v_{inv}^2 dA} \quad (2)$$

Já o ar nos poros pode ser considerado um gás ideal. A densidade, a velocidade do som, a viscosidade, o número de Prandtl e o calor específico definem as propriedades do ar.

A equação modificada para propagação de onda plana no ar contido em materiais porosos rígidos é dada por (Fahy, 2001):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \left( \frac{\alpha_\infty \rho_0}{k_{eff}} \right) \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \left( \frac{\sigma \phi}{k_{eff}} \right) \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

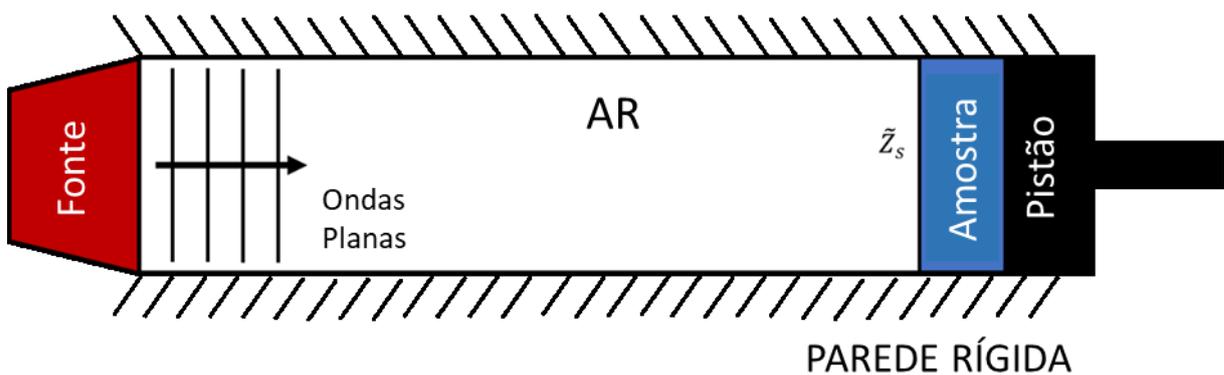
sendo que  $p$  denota a pressão sonora nos poros do material,  $\rho_0$  é a densidade do ar,  $k_{eff}$  é o módulo volumétrico efetivo do ar,  $\alpha_\infty$  é a tortuosidade,  $\phi$  é a porosidade, e  $\sigma$  é a resistividade ao fluxo.

O comportamento acústico de um material poroso homogêneo também pode ser determinado partindo de suas grandezas fundamentais: o número de onda complexo e a impedância característica. Essas grandezas são a solução harmônica da equação de onda plana

e podem ser utilizadas para determinar o desempenho acústico de materiais porosos, sendo estes coeficiente de absorção, impedância de superfície, e perda de transmissão.

### 3.1. Modelo Acústico

A impedância específica pode ser obtida através de medições padronizadas em tubo de impedância. O modelo acústico consiste de uma camada porosa sobre uma terminação rígida impermeável, como ilustrado na Figura 5. As paredes do tubo são assumidas rígidas, impermeáveis e perfeitamente refletivas. Um pistão encosta na face traseira da amostra porosa, sendo que a camada porosa também fica encostada na parede em torno de todo o seu contorno, sendo este circular.



**Figura 5: Tubo de Impedância - Incidência Normal**

Assim, é importante precisão no diâmetro da amostra para evitar um efeito membrana na interface, bem como garantir contato do pistão com a face, para não haver uma camada adicional de ar, evitando também comprimir a amostra de modo a descaracterizá-la.

Incidência normal de ondas acústicas excitam a face frontal da camada porosa. Na interface da cavidade de ar e a camada porosa, a impedância normalizada de superfície do lado da cavidade de ar é dada por Allard (1993):

$$\tilde{Z}_s = \frac{\tilde{Z}}{Z_0} = -j \frac{\tilde{Z}_c}{\phi Z_0} \cot(\tilde{k}L) \quad (4)$$

sendo que  $\tilde{Z}$ ,  $\tilde{Z}_c$ ,  $\tilde{k}$ , e  $\phi$  são a impedância de superfície (a razão entre a pressão acústica e a velocidade de partícula associada), a impedância característica do fluido equivalente, o número de onda complexo, e a porosidade da amostra porosa, respectivamente.  $Z_0$  é a impedância característica do ar. O símbolo *til* ( $\sim$ ) indica que a variável associada tem componente complexa e é dependente da frequência,  $L$  é a espessura da amostra, e  $j = \sqrt{-1}$ .

Para eliminar os efeitos da elasticidade da borda da amostra porosa, as excitações acústicas são em uma faixa de frequência na qual a camada porosa comporta-se, sobretudo, como acusticamente rígida, isto é, para frequências maiores que a frequência de desacoplamento.

Como a borda do material é assumida estática, apenas uma onda longitudinal de compressão na fase de fluido propaga-se ao longo do seu eixo. Sob esta suposição de borda rígida, o fluido saturando as células interconectadas do meio poroso podem ser descritas macroscopicamente como um fluido homogêneo equivalente de densidade  $\tilde{\rho}$  e módulo efetivo volumétrico  $\tilde{K}$ .

Nesse caso, seguindo o modelo de fluido equivalente baseado nos trabalhos de Johnson *et al.* (1987), que propuseram um modelo semi-fenomenológico para descrever a densidade complexa ( $\tilde{\rho}$ ) de um material poroso com esqueleto estático tendo formas arbitrárias de poros, e Champoux & Allard (1991), que introduziram uma expressão para o módulo volumétrico ( $\tilde{K}$ ) para o mesmo tipo de material poroso tendo como base o trabalho anterior de Johnson *et al.*, a impedância característica e o número de onda complexo do meio poroso são dados por:

$$\tilde{Z}_c = \sqrt{\tilde{\rho}\tilde{K}} \quad (5)$$

e

$$\tilde{k} = \omega \sqrt{\frac{\tilde{\rho}}{\tilde{K}}} \quad (6)$$

com densidade complexa efetiva  $\tilde{\rho}$ :

$$\tilde{\rho} = \rho_0 \alpha_\infty \left( 1 + \frac{\phi \sigma}{j \omega \rho_0 \alpha_\infty} \left( 1 + j \frac{4 \omega \rho_0 \eta \alpha_\infty^2}{\sigma^2 \phi^2 \Lambda^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (7)$$

e módulo volumétrico  $\tilde{K}$ :

$$\tilde{K} = \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) \left( 1 + \frac{8\eta}{j\omega N_{pr} \Lambda'^2 \rho_0} \left( 1 + j \frac{\omega N_{pr} \rho_0 \Lambda'^2}{16\eta} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1}} \quad (8)$$

Nas equações,  $\omega$  é a frequência angular,  $P_0$  é a pressão barométrica, e  $\gamma$ ,  $N_{pr}$ ,  $\rho_0$  e  $\eta$  são a taxa específica de calor, o número de Prandtl, densidade, e viscosidade dinâmica do ar saturado, respectivamente.

As cinco propriedades remanescentes são aquelas que definem a complexidade da amostra porosa. Elas são a porosidade  $\phi$ , resistividade estática ao fluxo  $\sigma$ , tortuosidade  $\alpha_\infty$ , comprimento característico viscoso  $\Lambda$ , e comprimento característico térmico  $\Lambda'$ .

O limite superior de frequência  $f_u$  é definido tal qual a frequência até que se pode garantir incidência normal (frequência de corte do tubo de impedância). Esse limite é dependente do espaçamento entre os microfones e do diâmetro da amostra (diâmetro interno do tubo), sendo que para diâmetros menores é possível atingir frequências maiores, conforme Equação 9.

$$f_u < \frac{Kc}{d} \quad (9)$$

onde  $K$  é uma constante de valor 0.586,  $c$  é a velocidade do som e  $d$  é o diâmetro do tubo. No que diz respeito ao espaçamento entre microfones, um espaçamento grande melhora a precisão das medições, no entanto, o espaçamento deve ser menor que metade do menor comprimento de onda de interesse.

Nos capítulos à seguir são apresentados alguns dos métodos tradicionais para estimativa das propriedades que caracterizam o material poroso de acordo com o modelo de JCA.

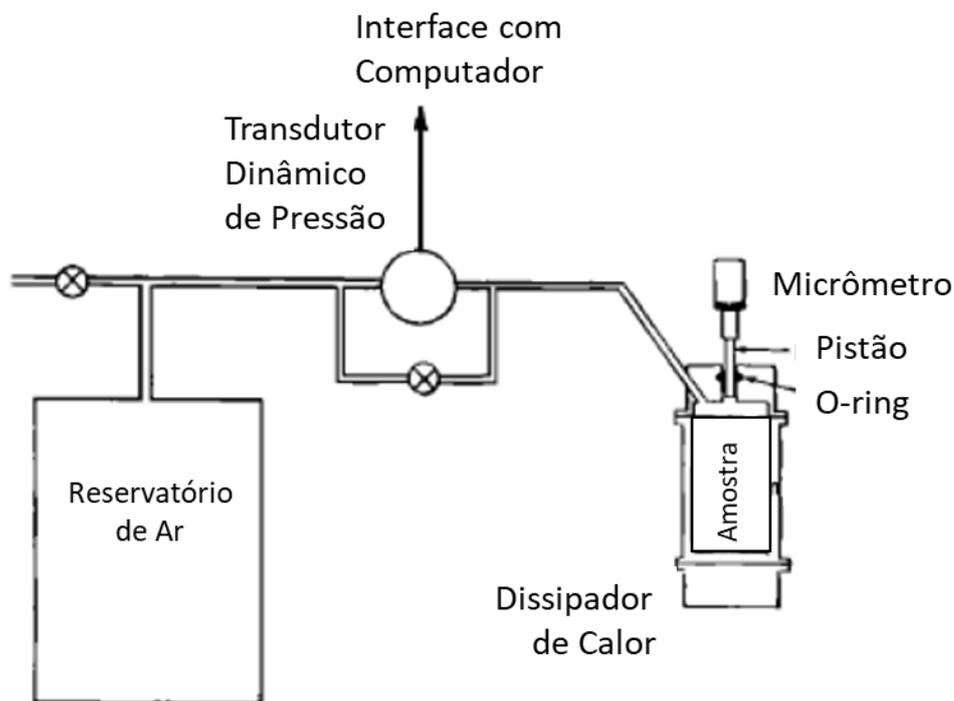
## 3.2. Métodos Tradicionais

### 3.2.1. Medição de Porosidade

Numerosas abordagens têm sido aplicadas para medir a porosidade de materiais. As técnicas mais comuns são baseadas em sorção de gás, intrusão líquida, microscopia e dispersão de raios-x e neutrões.

A técnica, talvez mais utilizada, é apresentada por Champoux *et al.* (1991), seguindo a técnica apresentada primeiramente por Beranek (1942), onde a porosidade é avaliada medindo a variação isoterma de pressão em um volume fechado contendo a amostra para uma variação conhecida no volume. O volume de ar contido na amostra e, conseqüentemente, a porosidade, é inferida à partir dessas duas grandezas.

O aparato proposto por Champoux *et al.* (1991), ilustrado na Figura 6, evita o uso de líquidos. Ao invés, um pistão de diâmetro precisamente conhecido é utilizado para produzir a variação no volume, e a variação na pressão é medida com um transdutor eletrônico de pressão.



**Figura 6: Aparato Utilizado para Medir Porosidade**  
 [Fonte: Champoux *et al.* (1991)]

A porosidade pode então ser obtida através das Equações 10 e 11:

$$\phi = \frac{V_V}{V_T} \quad (10)$$

$$V_V = V_T - V_a - V_b \frac{P_2}{P_2 - P_1} \quad (11)$$

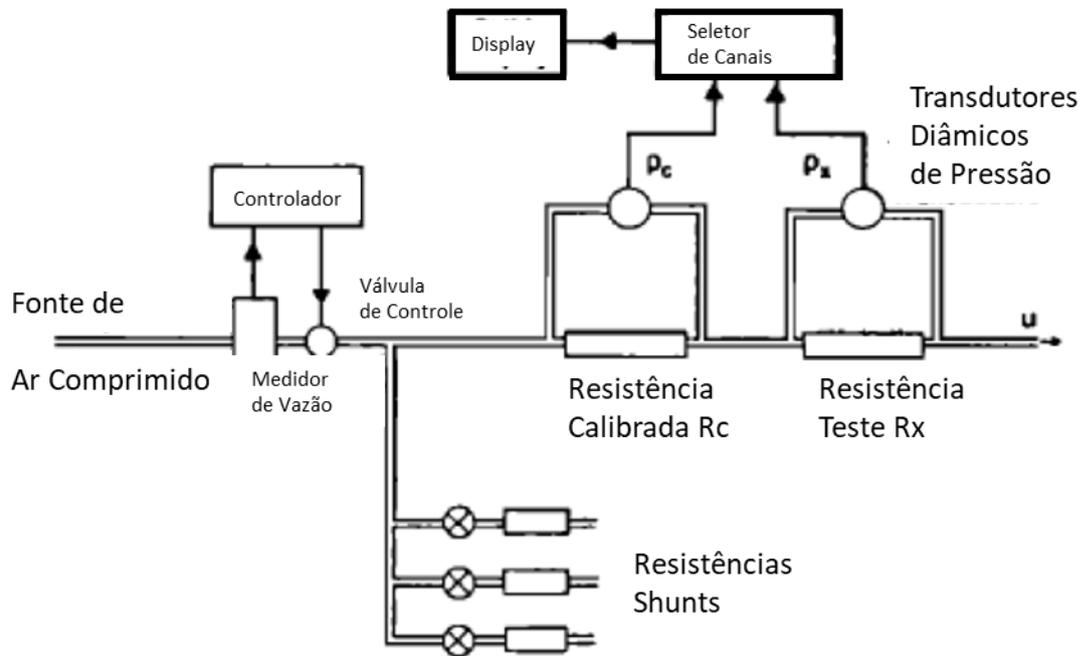
onde  $V_V$  é o volume efetivo dos poros,  $V_T$  é o volume efetivo da amostra,  $V_a$  é o volume do recipiente contendo a amostra,  $V_b$  é o volume do recipiente evacuado,  $P_1$  é a pressão inicial na amostra e  $P_2$  é a pressão final presente no sistema.

Panneton & Gros (2005) propuseram outra técnica para medir a porosidade aberta de materiais quando a densidade do constituinte na fase sólida é desconhecida. Este método é baseado na medição da massa aparente (no ar) e verdadeira (no vácuo) do sólido poroso, onde no ar uma “massa ausente” é encontrada e relacionada com o volume da fase sólida através do princípio de Arquimedes.

### 3.2.2. Medição de Resistividade ao Fluxo

A resistividade ao fluxo do material é definida como a razão entre a diferença de pressão através da amostra e a velocidade do fluxo de ar através da amostra por unidade cúbica, assim para obter a resistividade ao fluxo, é necessário medir a velocidade do fluxo e a diferença de pressão entre a face frontal e traseira da amostra enquanto o ar flui através do material.

Stinson & Diagle (1988) desenvolveram um sistema eletrônico para medir a resistividade ao fluxo de materiais porosos utilizando um transdutor de pressão de capacitância variável, como ilustrado na Figura 7.



**Figura 7: Sistema para Medição de Resistência ao Fluxo**  
**[Fonte: Stinson & Diagle (1988)]**

O procedimento de medição de resistividade ao fluxo é normalizado pela ISO 9053 (1991), onde a velocidade do fluxo é regulamentada em 0.5 mm/s, assim a diferença de pressão entre o material é extremamente baixa e um sensor de pressão com alta precisão é necessário. A resistividade ao fluxo pode ser obtida então através das equações 12 e 13:

$$\sigma = \frac{RA}{L} \quad (12)$$

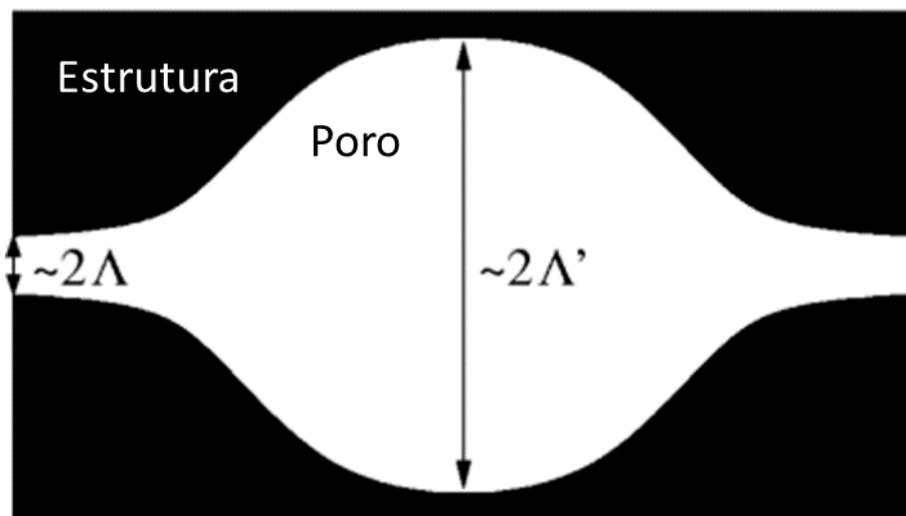
$$R = \frac{\Delta p}{q_V} \quad (13)$$

onde R é a resistência ao fluxo, A é a área da seção transversal da amostra, L é a espessura da amostra,  $\Delta p$  é a diferença de pressão através da amostra, e  $q_V$  é a taxa volumétrica de escoamento.

Alternativamente, Fella *et al.* (2005) propuseram um método para medição de resistividade ao fluxo de materiais porosos que possuem borda rígida utilizando o método de refletividade acústica. Foi descoberto que a resistividade ao fluxo tem sensibilidade significativa nas ondas refletidas em baixas frequências.

### 3.2.3. Medição de Comprimentos Característicos Viscoso e Térmico

Os comprimentos característicos viscoso ( $\Lambda$ ) e térmico ( $\Lambda'$ ) representam as perdas viscosas e térmicas do material, podendo ser vistos como o raio médio dos menores e maiores poros, respectivamente, conforme ilustra Figura 8.



**Figura 8: Comprimentos Característicos Viscoso e Térmico**

Os comprimentos característicos viscoso e térmico, relacionados ao tamanho dos poros, não podem ser medidos diretamente. Uma estimativa do seu valor para um dado material poroso pode ser obtido através de análise 2D ou 3D da microestrutura do material, medições em tubo de impedância em frequências audíveis, ou medições em frequências ultrassônicas.

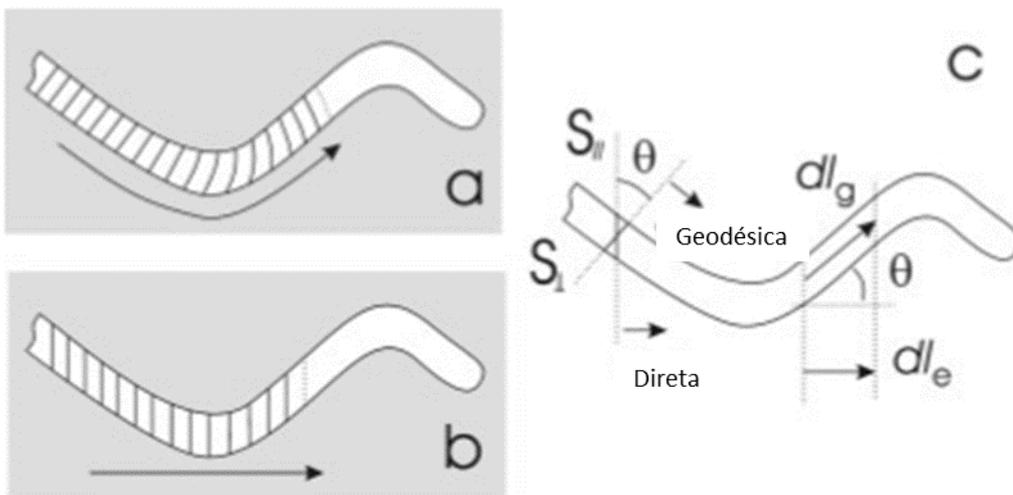
Henry *et al.* (1995) utilizaram o método padronizado de Brunauer, Emmett e Teller (BET) que é utilizado para medir o módulo volumétrico de materiais porosos para avaliar os comprimentos característicos viscoso e térmico de materiais porosos.

Com base em medições acústicas de ultrassom, Moussatov *et al.* (2001) desenvolveram um método de ultrasonografia para estimar a tortuosidade, e os comprimentos característicos viscoso e térmico baseados na avaliação da velocidade do som e na atenuação dentro do material quando a pressão estática do gás saturando o material é variada.

### 3.2.4. Medição da Tortuosidade

Assim como os comprimentos característicos, a tortuosidade exige métodos especiais na sua estimativa. Como já mencionado a tortuosidade pode ser estimada através de métodos de ultrasonografia, mas há também métodos óticos que podem ser empregados.

Gommes *et al.* (2009) propõem dois métodos para medição da tortuosidade de um material poroso através de sua reconstrução tomográfica. O primeiro método tem base na medição direta da menor distância entre dois pontos nos poros, e o segundo tem base na reconstrução geodésica do espaço poroso, conforme ilustra a Figura 9.



**Figura 9: Esboços da Reconstrução Geodésica (a) e da Reconstrução Direta (b) de um Poro Tortuoso**  
 [Fonte: Gommes *et al.* (2009)]

## 3.3. Método Inverso

### 3.3.1. Medição em Tubo de Impedância

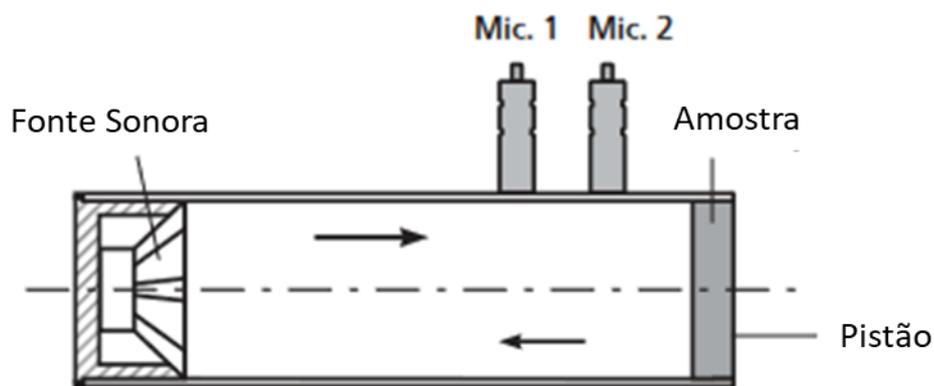
Em uma primeira versão do teste, o tubo de impedância possui um alto-falante através do qual passa uma sonda conectada a um microfone. A sonda pode se movimentar ao longo do tubo de impedância e uma escala marca sua posição em relação à origem, considerada como sendo a superfície da amostra.

Uma das terminações do tubo é rígida e na outra o alto-falante excita o tubo com um ruído senoidal de frequência conhecida. Sob a terminação rígida a amostra a ser medida é posicionada. Devido às dimensões do tubo, a uma certa distância do alto-falante, pode-se considerar o campo acústico composto por ondas planas e a superposição das ondas incidente e refletida forma uma onda estacionária.

Medindo-se os valores absolutos dos máximos e mínimos de pressão, pode-se obter o módulo do coeficiente de reflexão, e medindo-se as distâncias da superfície da amostra em que esses máximos e mínimos ocorrem, pode-se calcular a fase do coeficiente de reflexão.

Este método de medição pode ser feito com equipamentos relativamente mais simples como por exemplo um osciloscópio, dispensando o uso dos modernos analisadores de sinais. No entanto, é um método custoso em termos do tempo gasto no ensaio, já que são necessárias várias medições de pressão sonora e posição da sonda para cada frequência medida.

Na segunda versão, ao invés de se utilizar 1 sonda conectada ao microfone e excitação com um tom puro, utilizam-se 2 microfones e excitação com um ruído de banda larga (ruído branco ou sweep). O esquema do tubo de impedância usado neste caso é mostrado na Figura 10.



**Figura 10: Medição de Coeficiente de Absorção em Tubo de Impedância**  
[Fonte: Bruel & Kjaer]

Este método permite uma redução drástica do tempo gasto no ensaio através do uso dos modernos analisadores de sinais e da medição da função resposta em frequência ( $H(f)$ ) medida pelos 2 microfones utilizados no ensaio. A partir da medição da  $H(f)$  e da distância entre os dois microfones é possível calcular 3 grandezas: o coeficiente de reflexão (complexo), a impedância de superfície (complexa) e o coeficiente de absorção (real).

A norma ASTM E1050-10 (2010) descreve o procedimento e o equacionamento para medição de impedância e absorção de materiais acústicos utilizando o tubo de impedância com o método dos dois microfones.

O tubo de impedância deve ser construído de paredes rígidas e pode ter secção transversal circular ou quadrada, o que pode ser conveniente dependendo do tipo de amostra a ser caracterizada. No entanto, tubos de secção circular são mais usualmente utilizados devido a maior rigidez mecânica desta geometria, já que a norma especifica que as paredes do tubo devem ser rígidas de forma que modos de vibração na faixa de frequências de operação do tubo não sejam excitados por fontes externas ou pelo alto-falante. O tubo também deve ser reto e com secção interna constante (variabilidade  $< 0.2\%$ ).

Para uma amostra de material poroso, por exemplo, pode-se utilizar o coeficiente de absorção obtido com o tubo de impedância para estimar as propriedades macroscópicas da amostra utilizando um método iterativo de ajuste de curvas.

### 3.3.2. Rotina de Otimização

O algoritmo de otimização utilizado neste trabalho é o de Evolução Diferencial, o qual foi desenvolvido e apresentado por Price & Storn (1995).

Evolução Diferencial, do inglês Differential Evolution (DE), é um método que procura o ótimo de uma função iterativamente, tentando melhorar uma solução candidata dada uma medida de qualidade. Tais métodos são comumente conhecidos como metaheurísticos, uma vez que fazem pouca ou nenhuma suposição sobre o problema sendo otimizado e podem procurar espaços muito grandes de soluções candidatas. No entanto, metaheurísticos como DE não garantem que uma solução ótima será encontrada.

Evolução Diferencial é utilizado para funções multidimensionais mas não utiliza gradientes, o que significa que não requer que a função de otimização seja diferenciável, em contraste aos métodos clássicos de otimização como os métodos de gradientes ou de Newton.

Uma variação básica do algoritmo de Evolução Diferencial trabalha tendo uma população de soluções candidatas (chamadas de agentes). Estes agentes são movidos no espaço de busca através de simples formulação matemática para combinar as posições de agentes existentes da população. Se a nova posição de um agente é uma melhoria então a mesma é aceita e passa a fazer parte da população, no contrário a nova posição é simplesmente

descartada. O processo é repetido e, assim, é esperado, mas não garantido, que uma solução satisfatória seja eventualmente encontrada.

Variações do algoritmo de Evolução Diferencial estão continuamente sendo desenvolvidas numa tentativa de melhorar o desempenho da otimização. Muitos esquemas diferentes para realizar crossover e mutação de agentes são possíveis no algoritmo base.

A idéia crucial por trás da Evolução Diferencial é um esquema para gerar vetores de parâmetro. Basicamente, DE adiciona a diferença ponderada entre dois vetores de população a um terceiro vetor. Dessa forma não é necessário utilizar distribuição de probabilidade separada, o que torna o esquema completamente auto-organizável, como ilustrado na Figura 11.

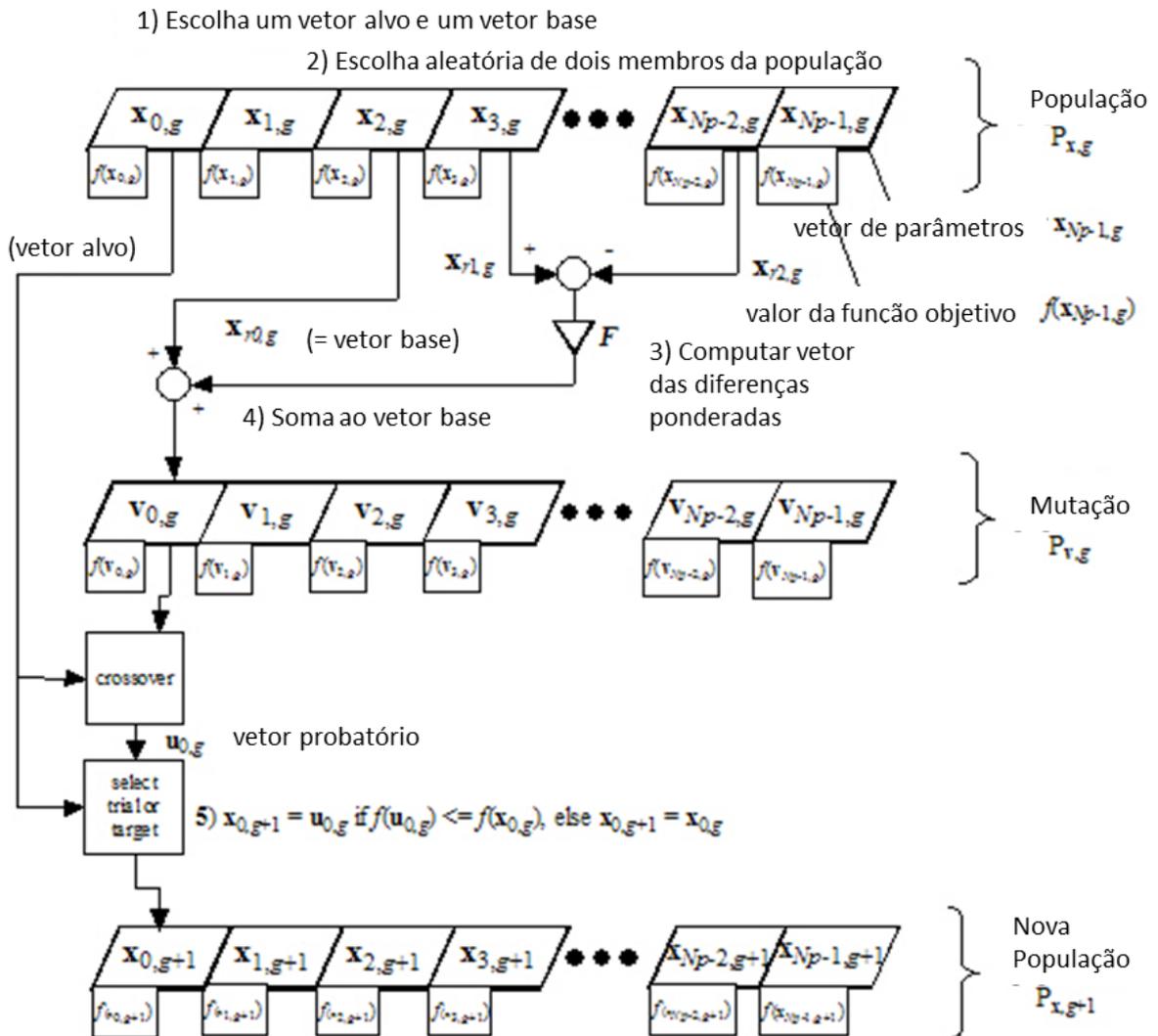


Figura 11: Algoritmo de Evolução Diferencial

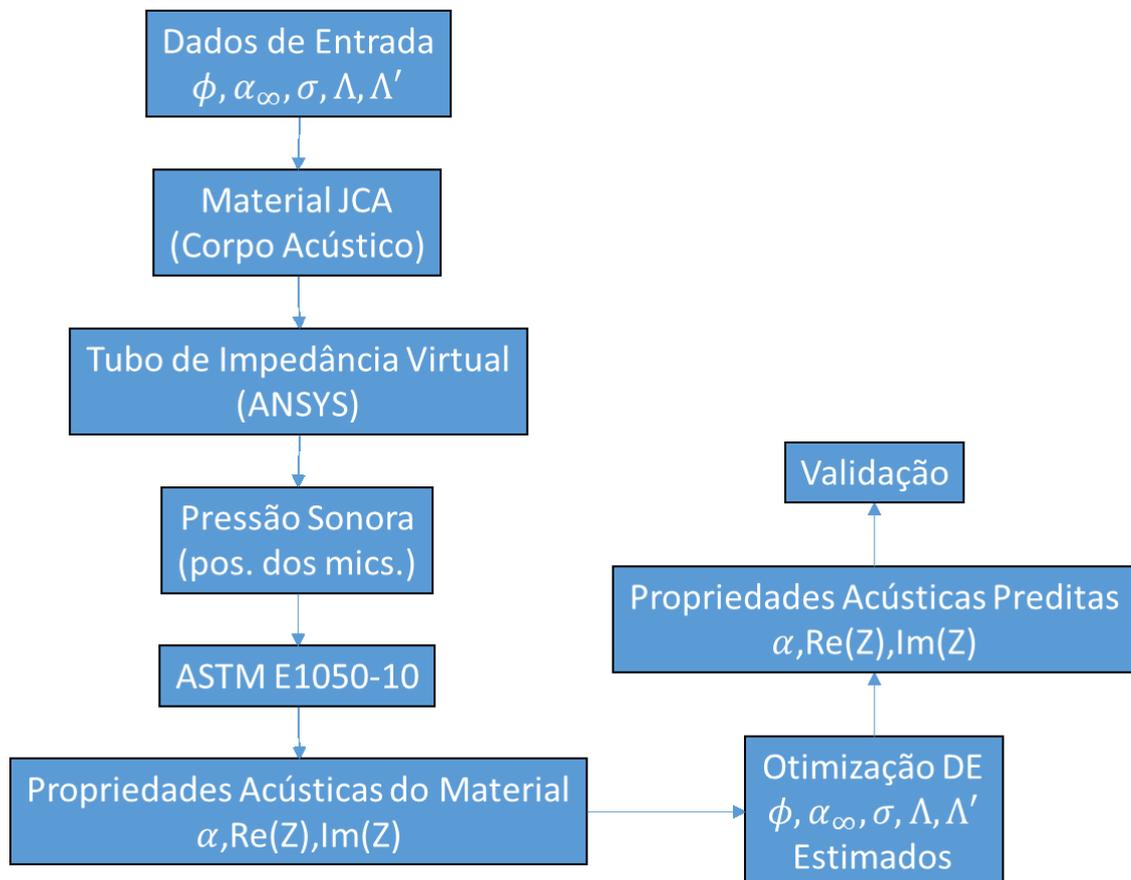
[Fonte: Price & Storn (1995)]

O algoritmo inverso envolve o ajuste de dados em um modelo de material acústico poroso (JCA) que depende de parâmetros ajustáveis independentes de porosidade, tortuosidade, resistividade ao fluxo, e comprimentos característicos viscoso e térmico.

## Capítulo 4

### Resultados

Neste capítulo são apresentadas as validações do modelo numérico, utilizado para gerar os dados de entrada controlados, e da metodologia inversa (rotina de otimização). São descritos também como parte do desenvolvimento as etapas de ajustes realizadas para obtenção de um método funcional e calibrado. Por fim são apresentados os resultados da aplicação da metodologia, ilustrada na Figura 12.



**Figura 12: Fluxograma da Metodologia Aplicada**

## 4.1. Experimento

As medições para obtenção da impedância e do coeficiente de absorção das amostras utilizadas neste trabalho são realizadas em um tubo de impedância Bruel & Kjaer Type 4206.

São realizadas duas medições, uma com amostra de diâmetro de 100mm para a faixa de frequências de 50Hz – 1.6kHz, e outra com amostra de diâmetro de 29mm para a faixa de frequências de 500Hz – 6.4kHz, os tubos utilizados estão representados na Figura 13.



**Figura 13: Tubo de Impedância Bruel & Kjaer Type 4206**  
[Fonte: Bruel & Kjaer]

A amostra à ser caracterizada, para fins de validação do modelo numérico, é a amostra padrão de calibração da Bruel & Kjaer (Figura 14), por apresentar resultados já conhecidos e ser bem comportada e dimensionada.



**Figura 14: Amostra Padrão de Calibração Bruel & Kjaer**

Foi utilizado o método de medição dos dois microfones, conforme apresentado no Capítulo 3.3.1 Medição em Tubo de Impedância, as medições realizadas e os cálculos subsequentes seguem a norma ASTM E1050-10.

O software utilizado para fazer a aquisição dos dados é o Pulse Labshop da Bruel & Kjaer, é utilizado o template AMT Normal Incidence Absorption, uma vez que o mesmo já possui o setup para adquirir os dados e calcular a impedância e o coeficiente de absorção, conforme a norma mencionada.

O setup experimental, ilustrado na Figura 15, é composto por:

- 1 tubo de impedância B&K Type 4206 (Figura 13);
- 1 par de microfones  $\frac{1}{4}$ " B&K Type 4187 (com fase calibrada) (Figura 16);
- 2 pré-amplificadores B&K Type 2670 (Figura 17);
- 1 módulo de aquisição de sinais 4/2ch. B&K Type 3160-A-042 (Figura 18);
- 1 amplificador de potência B&K Type 2732 (Figura 19);



**Figura 15: Setup Experimental**



**Figura 16: Microfones B&K Type 4187**



**Figura 17: Pré-Amplificador B&K Type 2670**

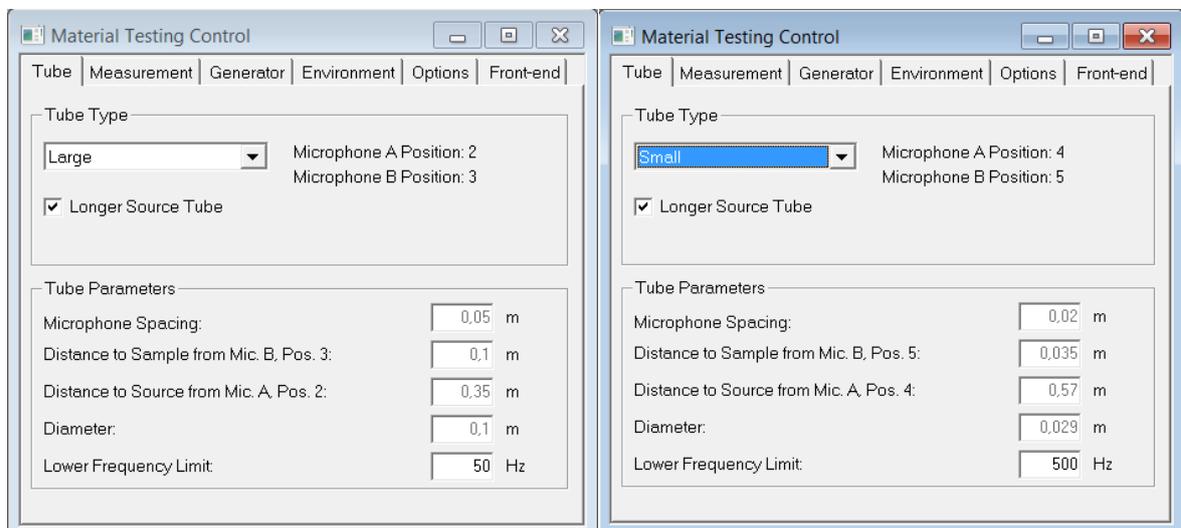


**Figura 18: Módulo de Aquisição B&K Type 3160-A-042**



**Figura 19: Amplificador de Potência Type 2732**

A configuração do tubo de impedância utilizado está ilustrada na Figura 20, tanto para a amostra de 100mm (Tube Type Large), como para a amostra de 29mm (Tube Type Small).



**Figura 20: Configuração do Tubo de Impedância**

Foram medidas três amostras de cada diâmetro com a finalidade de avaliar o desvio, as amostras estão ilustradas na Figura 21 e o posicionamento das amostras no tubo pode ser visto na Figura 22.



**Figura 21: Amostras Medidas**



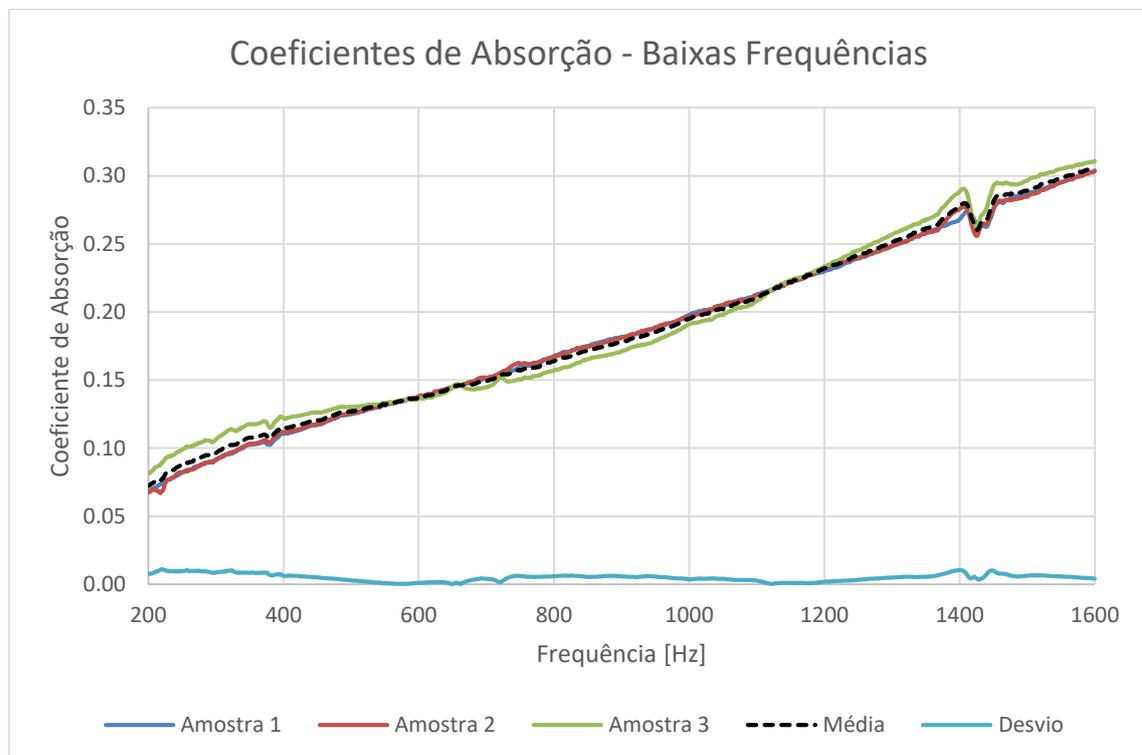
**Figura 22: Posicionamento das Amostras no Tubo**

Os parâmetros ambientais no momento das medições estão descritos na Tabela 1. Os coeficientes de absorção, bem como a média e o desvio (diferença para a média) estão nos gráficos da Figura 23 e Figura 24, para as baixas frequências (amostras de 100mm) e para as altas frequências (amostras de 29mm), já na Figura 25 é possível ver um combinado dos resultados, onde é realizado uma média na faixa de frequências comum (500Hz à 1.6kHz) para ambos tamanhos de amostras. É possível notar em todos os gráficos uma irregularidade na curva

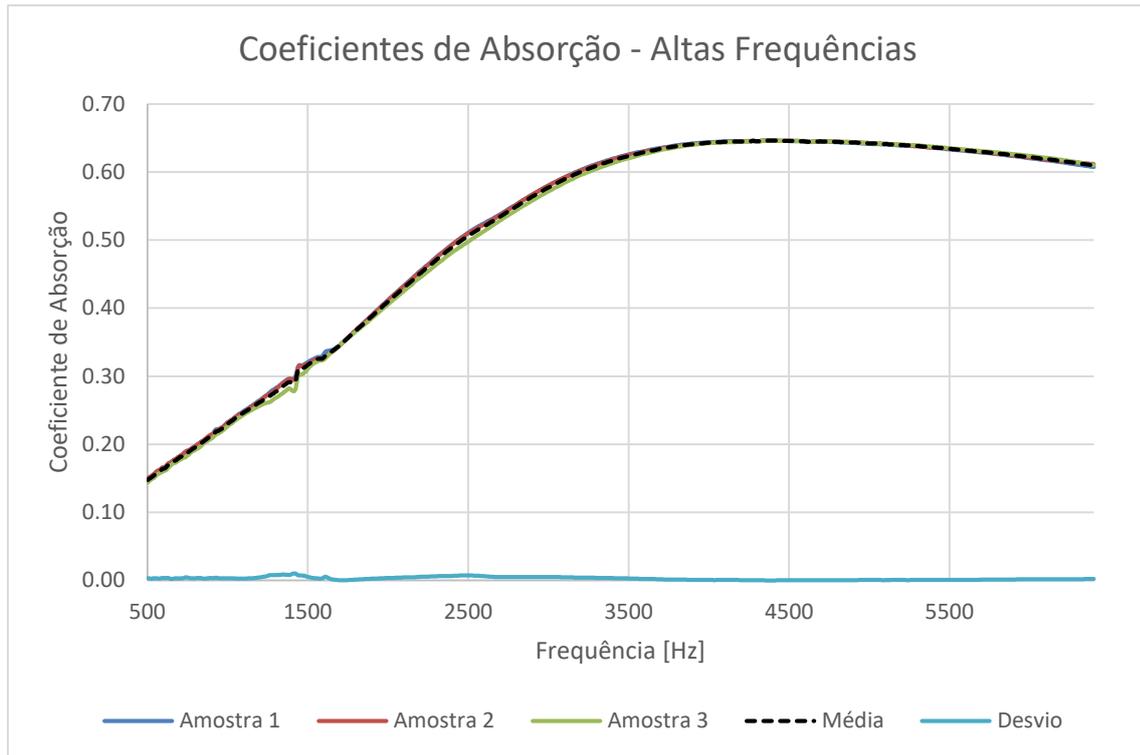
em torno de 1.4kHz, acredita-se que esse fenômeno possa estar relacionado à uma característica do próprio tubo.

**Tabela 1: Parâmetros da Medição**

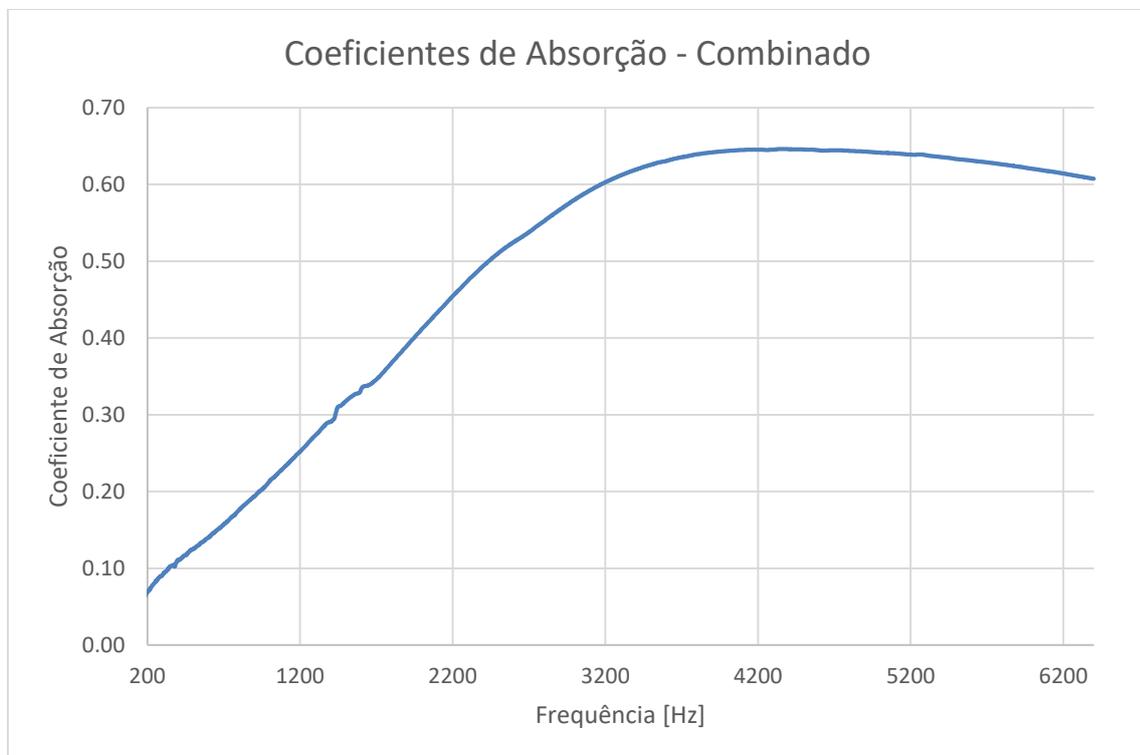
Pressão Atmosférica	100680 [Pa]
Temperatura	26.7 [°C]
Humidade Relativa do Ar	85.0 [%]
Densidade do Ar	1.168 [kg/m <sup>3</sup> ]
Velocidade do Som	347.14 [m/s]
Impedância Característica do Ar	405.3 [Pa/(m/s)]



**Figura 23: Coeficientes de Absorção das Amostras Padrão para Baixas Frequências**



**Figura 24: Coeficientes de Absorção das Amostras Padrão para Altas Frequências**



**Figura 25: Coeficiente de Absorção Combinado das Amostras Padrão**

## 4.2. Validação do Modelo Numérico

A validação numérica é realizada através do *software* Ansys Workbench utilizando o ACT Acoustics do mesmo em uma análise harmônica.

Um modelo da cavidade de ar do tubo foi construído com as dimensões de projeto do tubo (diâmetro, distância da fonte para o microfone 1, distância da amostra para o microfone 2, e distância entre microfones).

Um corpo acústico é definido com as propriedades do ar, uma velocidade unitária é utilizado como excitação, representando a fonte sonora, e a impedância medida da amostra padrão é prescrita na superfície da amostra no modelo numérico, conforme ilustra a Figura 26, onde os microfones indicados são apenas os pontos onde a pressão é monitorada, foram utilizados elementos hexaédricos lineares.

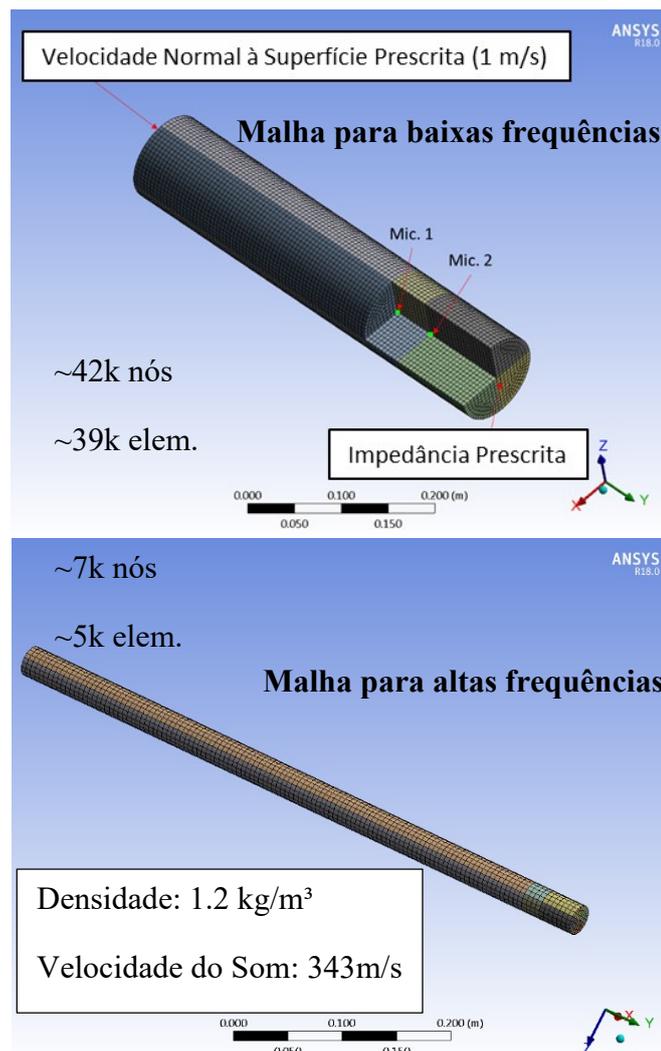
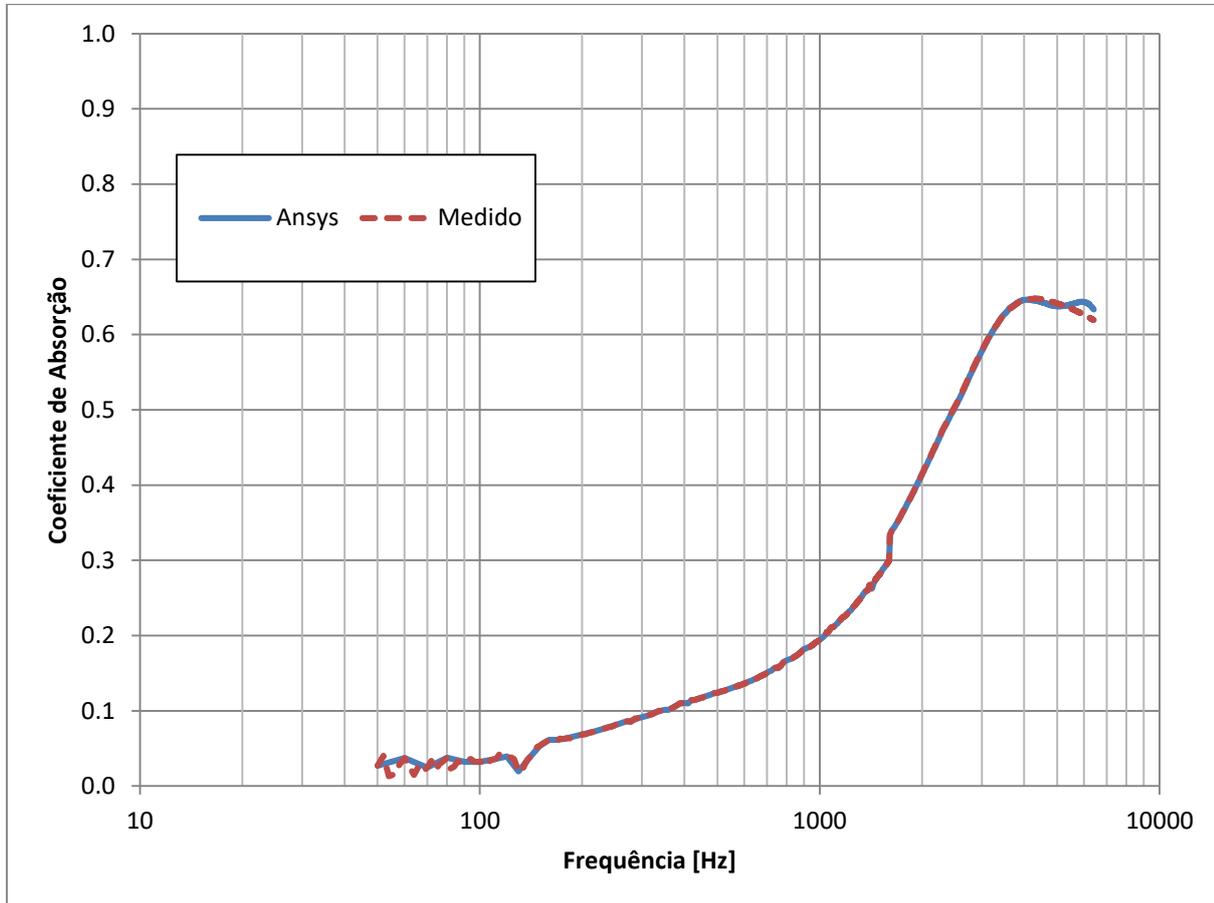


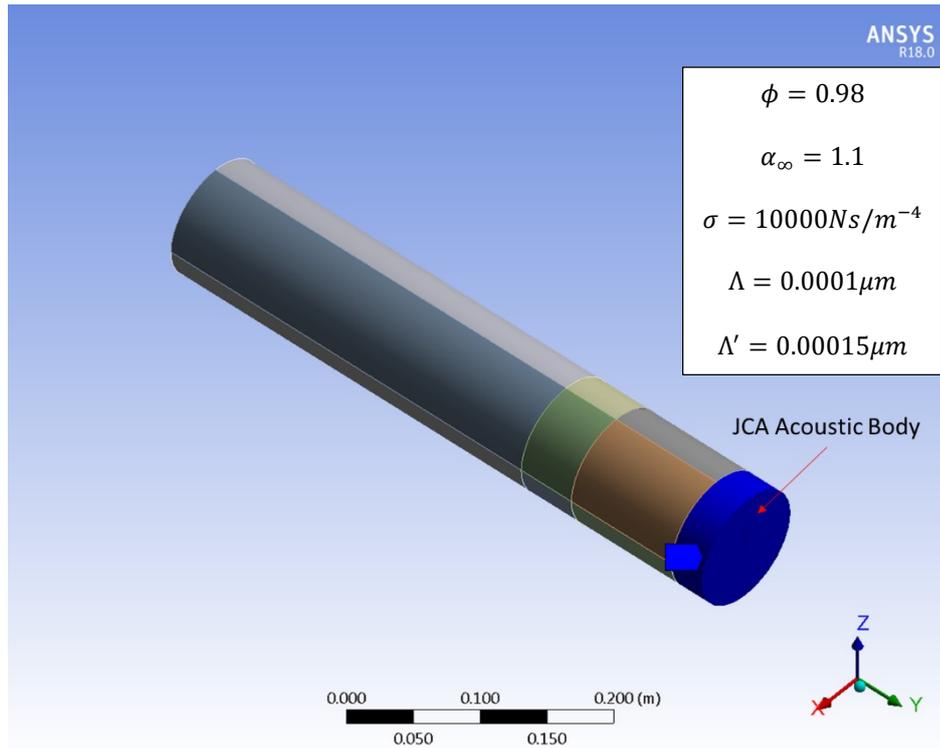
Figura 26: Modelo Numérico do Tubo de Impedância

O resultado comparado, mostrado na Figura 27, é o coeficiente de absorção, calculado como especificado na norma ASTM E1050-10, para medição através do método de dois microfones.



**Figura 27: Validação do Modelo Numérico**

Os resultados comparados mostram uma boa concordância, indicando que o modelo está representando bem o experimento. Agora, através desse modelo validado, outra simulação é realizada, criando o corpo acústico equivalente referente à um material genérico, utilizando a formulação JCA como dados de entrada, conforme ilustrado na Figura 28. Com estas entradas controladas, a etapa de otimização pode então ser avaliada.



**Figura 28: Modelo Numérico do Tubo de Impedância com JCA**

### 4.3. Validação da Metodologia

Neste trabalho, uma função de otimização multidimensional é utilizada para ajustar os resultados provenientes do tubo de impedância e as grandezas acústicas obtidas através das propriedades físicas estimadas iterativamente.

A função objetivo é definida de modo que o algoritmo minimize o erro entre a impedância medida e a impedância estimada, conforme Equação 14.

$$R(a) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N |\tilde{Z}_s^e(a) - \tilde{Z}_s^o|^2 \quad (14)$$

onde os sobrescritos  $e$  e  $o$  representam valores estimados e observados, respectivamente,  $N$  é o número total de frequências computadas na faixa de frequências de interesse. Os valores estimados são obtidos através da Equação 4 para um dado vetor paramétrico  $a$ .

A função ainda é submetida às seguintes restrições durante o processo de otimização:

- $0.1 \leq \phi \leq 1$
- $1 < \alpha_\infty < 10$
- $1000Ns/m^{-4} \leq \sigma \leq 200000Ns/m^{-4}$
- $10\mu m \leq (\Lambda) \leq 2000\mu m$
- $\Lambda < \Lambda'$

Os limites inferiores e superiores são estabelecidos baseados em definição e também em resultados empíricos, conforme sugerido nos trabalhos de Atalla & Panneton (2005) e Shrivage *et al.* (2010). Para forçar a condição  $\Lambda < \Lambda'$ , o parâmetro  $\Lambda'$  foi definido como  $k\Lambda$ , sendo que  $1 < k < 4$ .

O algoritmo de otimização para estimativa das propriedades inerentes ao material caracterizado foi desenvolvido em Python (*software* de licença livre), utilizando o método DE/best/1/exp, do pacote *scipy.optimize*.

A primeira etapa de avaliações da metodologia, consistiu em avaliar o desempenho da rotina utilizando o próprio equacionamento do modelo de JCA, descrito no Capítulo 3, para gerar os dados de entrada.

Uma vez que na simulação as variáveis ambiente podem ser controladas, as propriedades do ar foram definidas conforme Tabela 2:

**Tabela 2: Propriedades do Ar**

Pressão Barométrica ( $P_0$ )	101325 [Pa]
Densidade ( $\rho_0$ )	1.2041 [kg/m <sup>3</sup> ]
Velocidade do Som ( $c_0$ )	343.24 [m/s]
Capacidade Térmica a Pressão Constante ( $C_p$ )	1005 [J/(kg K)]
Capacidade Térmica a Volume Constante ( $C_v$ )	718 [J/(kg K)]
Viscosidade Dinâmica do Ar ( $\eta$ )	0.00001783 [Pa s]
Condutividade Térmica ( $k$ )	0.0257 [W/(m K)]

As demais propriedades do ar utilizadas no modelo JCA: razão de calores específicos ( $\gamma$ ) e número de Prandtl ( $N_{pr}$ ), são calculadas à partir das grandezas listadas, conforme Equação 15 e Equação 16:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (15)$$

$$N_{pr} = \frac{C_p \eta}{k} \quad (16)$$

As propriedades do material poroso foram definidas conforme Tabela 3:

**Tabela 3: Propriedades do Material Poroso**

Porosidade ( $\phi$ )	0.98 []
Tortuosidade ( $\alpha_\infty$ )	1.10 []
Resistividade ao Fluxo ( $\sigma$ )	10000 [ $Ns/m^{-4}$ ]
Comprimento Característico Viscoso ( $\lambda$ )	100 [ $\mu m$ ]
Comprimento Característico Térmico ( $\lambda'$ )	150 [ $\mu m$ ]

A tentativa inicial foi de otimizar a curva na faixa de frequências de 50Hz à 6.4kHz, utilizando como função objetivo a curva de absorção, onde o coeficiente de absorção é calculado à partir da impedância conforme Equação 17.

$$\alpha = 1 - \left| \frac{\tilde{Z}_s - Z_0}{\tilde{Z}_s + Z_0} \right|^2 \quad (17)$$

onde  $\tilde{Z}_s$  é a impedância específica de superfície e  $Z_0$  é a impedância característica do ar ( $\rho_0 c_0$ ). Assim, a função objetivo fica sendo:

$$R(a) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N |\alpha_i^e(a) - \alpha_i^o|^2 \quad (18)$$

Tal abordagem não retornou resultados satisfatórios, sendo que nenhum dos parâmetros do material poroso foi estimado corretamente. Assim, visando aprimorar a metodologia, a curva de absorção referente à uma segunda espessura foi incorporada à função objetivo, uma vez que a impedância e, conseqüentemente, a absorção variam com a espessura, mas os parâmetros do material permanecem os mesmos. A função objetivo então tornou-se:

$$R(a) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N |\alpha_i^e(a, h_1) - \alpha_i^o(h_1)|^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N |\alpha_i^e(a, h_2) - \alpha_i^o(h_2)|^2 \quad (19)$$

onde  $a$  é o vetor paramétrico das variáveis otimizadas, e  $h_1$  e  $h_2$  são as duas espessuras de material.

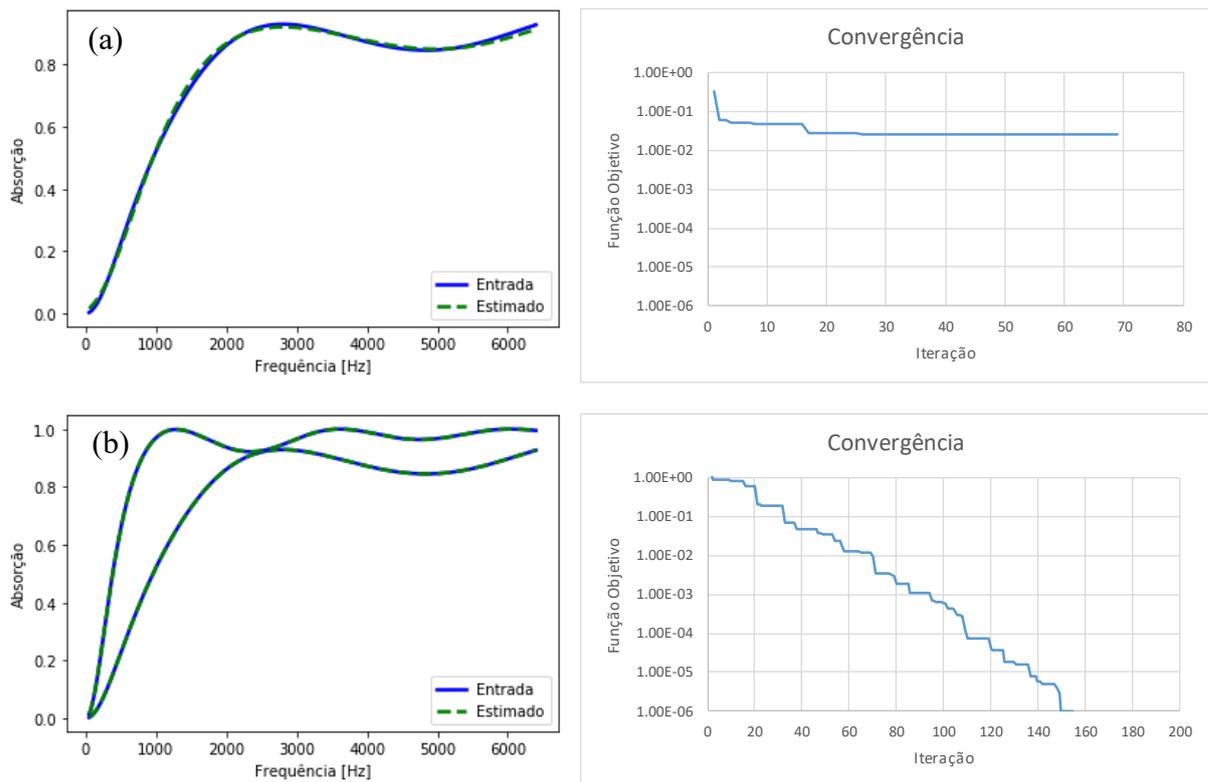
Dessa forma os parâmetros foram todos estimados corretamente. Ainda visando avaliar a sensibilidade da função objetivo, uma outra abordagem foi avaliada, utilizando novamente informação referente à apenas uma única espessura, porém otimizando a curva de impedância ao invés da curva de absorção, conforme descrito na Equação 14. Novamente, todos os parâmetros foram estimados corretamente, mostrando também vantagens nesta abordagem. Os resultados obtidos etapa podem ser vistos na Tabela 4 e nas Figuras 29 e 30.

**Tabela 4: Estimativa Inicial dos Parâmetros**

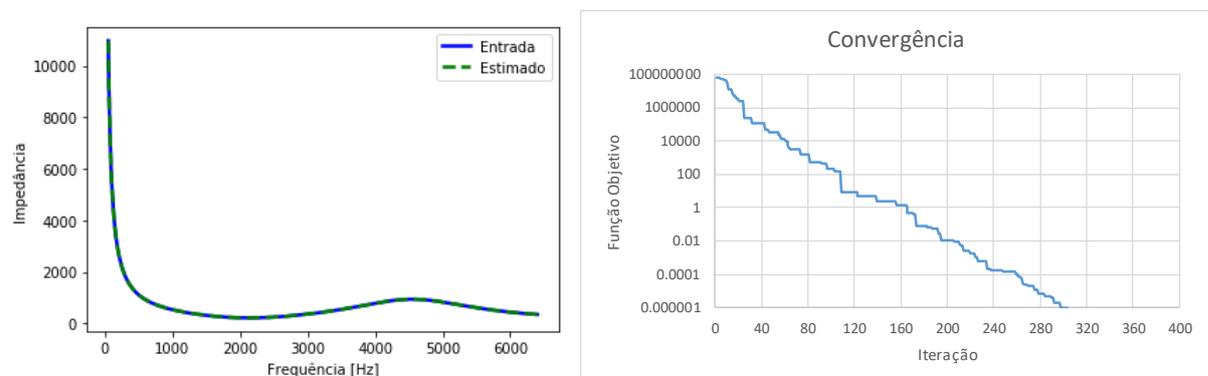
Parâmetro	Entrada	Tent. 1	Tent. 2	Tent. 3
Porosidade ( $\phi$ ) []	0.98	0.75	0.98	0.98
Tortuosidade ( $\alpha_\infty$ ) []	1.10	1.25	1.10	1.10
Resistividade ao Fluxo ( $\sigma$ ) [ $Ns/m^{-4}$ ]	10000	49058	10000	10000
Comprimento Característico Viscoso ( $\lambda$ ) [ $\mu m$ ]	100	336	100	100
Comprimento Característico Térmico ( $\lambda'$ ) [ $\mu m$ ]	150	819	150	150

Os parâmetros do DE utilizados foram:

- Estratégia: best/1/exp;
- Tamanho da população: 30 (a população total tem 30 \* número de variáveis indivíduos);
- Máximo de iterações: tamanho da população (30) \* número de variáveis (5);
- Tolerância: 0.01 (quando a média das energias da população, multiplicado pela tolerância, dividido pelo desvio padrão das energias da população é maior que 1 o processo termina, convergência = média (pop) \* tol / desv.pad. (pop) > 1);
- Mutação: [0.5,1] ([mín,máx]);
- Recombinação: 0.7 (possibilidade de *crossover*);
- Inicialização: Hipercubo Latino.



**Figura 29: Absorção Estimada: (a) 1 Espessura (Tent. 1), (b) 2 Espessuras (Tent. 2)**



**Figura 30: Impedância Estimada (Tent. 3)**

Os valores mais elevados apresentados pela função objetivo no método com base em impedância (Tent. 3) se deve justamente a formulação da função objetivo, a absorção varia entre 0 e 1 enquanto que o módulo da impedância pode apresentar valores elevados.

O objetivo dessa análise inicial foi de avaliar a funcionalidade da rotina da forma mais simples possível, utilizando a própria equação implementada no algoritmo para gerar os dados de entrada à serem otimizados. Assim já era esperado, chegar nos valores exatos dos parâmetros. No entanto, essa primeira análise permitiu não somente avaliar a rotina do ponto de vista de implementação, mas também realizar análises de sensibilidade da função objetivo.

A etapa seguinte consiste na calibração e consolidação da metodologia, para tal o dado de entrada utilizado dessa vez é a curva proveniente da simulação numérica no Ansys, utilizando o corpo acústico equivalente com as propriedades do modelo JCA, conforme descrito na validação do modelo numérico.

Inicialmente foi utilizado o método através das curvas de absorção de duas espessuras, uma vez que o algoritmo funcionou no teste inicial. O objetivo é calibrar o modelo para esse método e, posteriormente, poder avaliar se há vantagem em utilizar as curvas de impedância (também para duas espessuras).

Como já era esperado, baseado na revisão da literatura, dessa vez o algoritmo não converge na estimativa dos parâmetros ao tentar otimizar a curva inteira de uma só vez, devido ao fato de se ter parâmetros dominantes para diferentes faixas de frequências.

Sabe-se que uma curva característica de absorção possui inicialmente uma região linear e depois apresenta inflexões, conforme já ilustrado na Figura 1: Zonas de Frequências de uma Curva de Absorção Típica (Atalla & Panneton, 2005).

A primeira região, referente à parte linear da curva, possui como parâmetros dominantes a porosidade, a resistividade ao fluxo e o comprimento característico térmico. Já a segunda região, referente à primeira inflexão, é dominada pelos parâmetros tortuosidade, resistividade ao fluxo e comprimento característico viscoso. Por fim, a terceira região, é dominada novamente pela porosidade e comprimentos característicos viscoso e térmico.

Com base nisso, foram feitos diversos testes, avaliando a definição dessas regiões e os parâmetros à serem estimados em cada região, uma vez que cada parâmetro aparece como dominante em mais de uma região.

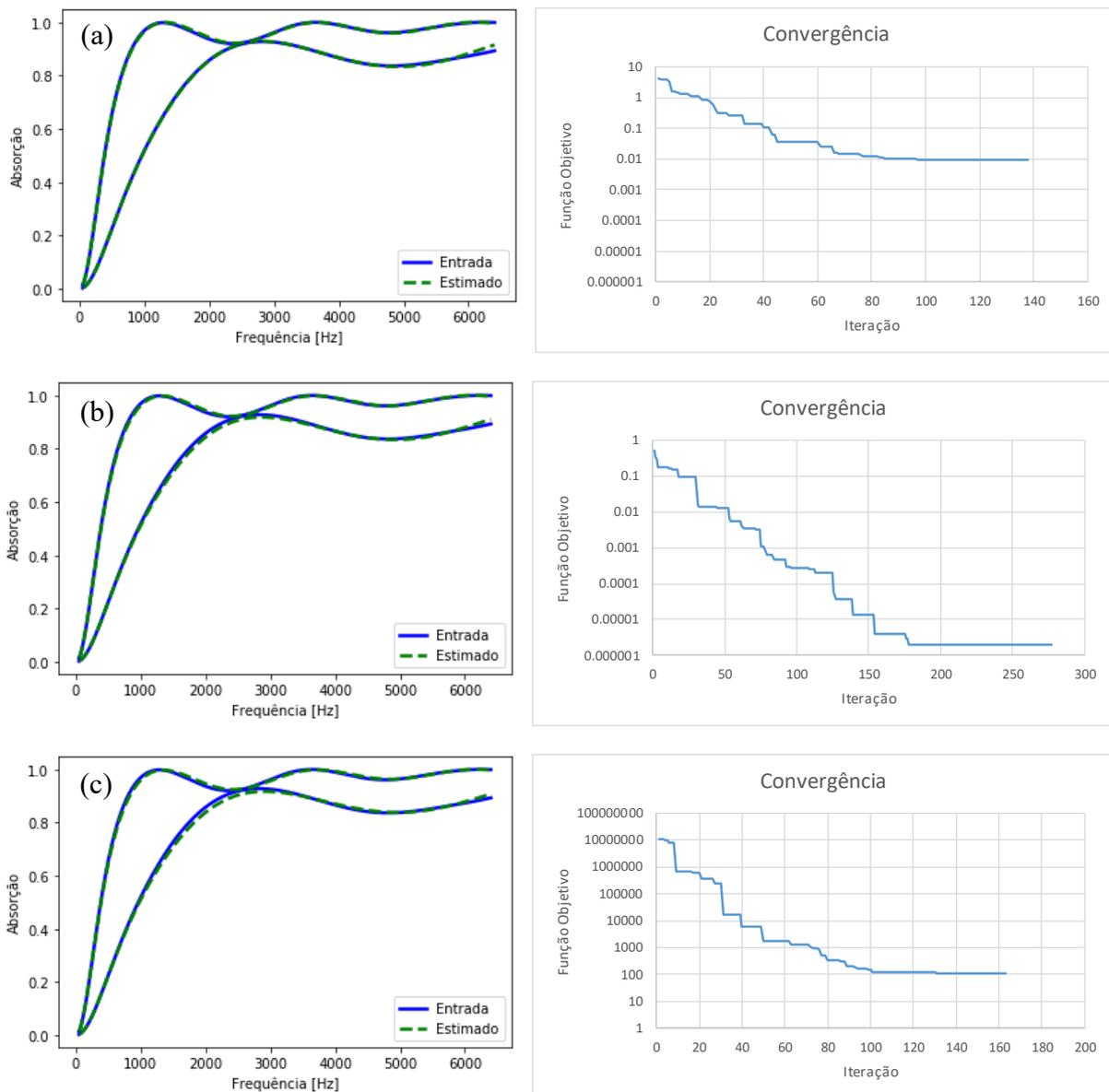
Assim um resumo das tentativas realizadas para calibrar a rotina é apresentado nas Tabelas 5 e 6, sendo que a tentativa 1 é referente ao teste inicial utilizando a curva inteira (sem separar por regiões), a tentativa 2 é referente a quando os resultados começaram a convergir numa direção satisfatória, obtidos através da otimização da curva por regiões separadas, e a tentativa 3 trata da implementação da otimização através das curvas de impedância ao invés da absorção.

**Tabela 5: Estimativa dos Parâmetros (Calibração)**

Parâmetro	Entrada	Tent. 1	Tent. 2	Tent. 3
Porosidade ( $\phi$ ) []	0.98	0.96	0.97	0.98
Tortuosidade ( $\alpha_{\infty}$ ) []	1.10	1.12	1.12	1.10
Resistividade ao Fluxo ( $\sigma$ ) [ $Ns/m^{-4}$ ]	10000	10843	10122	9974
Comprimento Característico Viscoso ( $\lambda$ ) [ $\mu m$ ]	100	115	116	114
Comprimento Característico Térmico ( $\lambda'$ ) [ $\mu m$ ]	150	149	150	150

**Tabela 6: Erros Associados à Estimativa dos Parâmetros (Calibração)**

Parâmetro	Tent. 1	Tent. 2	Tent. 3
Porosidade ( $\phi$ ) [%]	2.40	0.52	0.01
Tortuosidade ( $\alpha_{\infty}$ ) [%]	1.40	1.46	0.09
Resistividade ao Fluxo ( $\sigma$ ) [%]	8.43	1.22	0.26
Comprimento Característico Viscoso ( $\lambda$ ) [%]	14.89	16.18	14.09
Comprimento Característico Térmico ( $\lambda'$ ) [%]	0.68	0.06	0.06



**Figura 31: Absorção Estimada: (a) Tent. 1, (b) Tent. 2, (c) Tent. 3**

Analisando os erros obtidos, é evidente uma melhora na estimativa dos parâmetros ao tratar a curva em regiões separadas. Confirmou-se também que ao utilizar as curvas de impedância para estimar os parâmetros, aumenta-se a eficiência da rotina, melhorando os resultados obtidos.

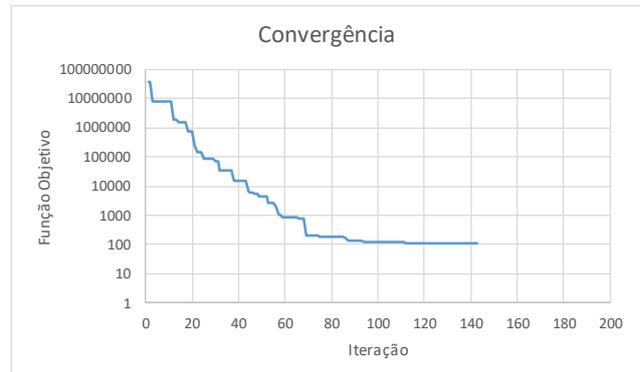
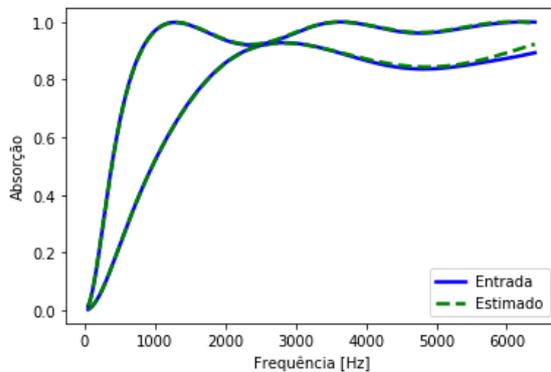
No entanto, um dos parâmetros, o comprimento característico viscoso, ainda apresenta um erro elevado. Nota-se também nas curvas de absorção, que apesar da estimativa dos parâmetros ter melhorado, a curva de absorção estimada vai ficando menos ajustada à curva original. Assim, realizou-se mais testes buscando consolidar o modelo. É importante ressaltar

que os parâmetros aceitos são prescritos na etapa seguinte de otimização (próxima região) à fim de evitar produzir uma combinação de resultados inviáveis fisicamente.

Por fim, os resultados do modelo final são apresentados na Tabela 7, e a curva ajustada de impedância é ilustrada na Figura 32.

**Tabela 7: Estimativa dos Parâmetros (Consolidação)**

Parâmetro	Entrada	Final	Erro [%]
Porosidade ( $\phi$ ) []	0.98	0.98	0.01
Tortuosidade ( $\alpha_\infty$ ) []	1.10	1.10	0.10
Resistividade ao Fluxo ( $\sigma$ ) [ $Ns/m^{-4}$ ]	10000	9973	0.27
Comprimento Característico Viscoso ( $\lambda$ ) [ $\mu m$ ]	100	102	2.48
Comprimento Característico Térmico ( $\lambda'$ ) [ $\mu m$ ]	150	150	0.07



**Figura 32: Absorção Estimada Modelo Final**

O erro relativo ao comprimento característico viscoso foi então reduzido para aproximadamente 2.5%, vale ressaltar que os valores na tabela foram truncados, por isso o erro maior que zero para valores significativamente iguais.

Assim, aceitou-se essa rotina como definitiva. À seguir o desempenho da rotina é testado para diferentes materiais e os resultados são confrontados.

## 4.4. Aplicação da Metodologia

Uma vez definida a metodologia, a mesma terá sua eficácia avaliada frente à diferentes materiais encontrados na literatura. Os materiais têm suas propriedades descritas na Tabela 8.

**Tabela 8: Parâmetros dos Materiais Avaliados**

Parâmetro	Mat. 0	Mat. 1	Mat. 2	Mat. 3	Mat. 4	Mat. 5	Mat. 6
Porosidade ( $\phi$ ) []	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99	0.98	0.78
Tortuosidade ( $\alpha_\infty$ ) []	1.10	1.11	1.00	1.00	1.00	1.07	2.50
Resistividade ao Fluxo ( $\sigma$ ) [Ns/m <sup>-4</sup> ]	10000	6036	10634	6918	6135	5000	1359
Comprimento Característico Viscoso ( $\lambda$ ) [ $\mu$ m]	100	125	95	62	164	100	153
Comprimento Característico Térmico ( $\lambda'$ ) [ $\mu$ m]	150	295	180	185	230	200	689

As propriedades acima descritas são prescritas em modelos numéricos do tubo de impedância virtual criado e descrito no capítulo anterior. O material 0 é o utilizado na etapa de desenvolvimento e ajustes também já apresentada no capítulo anterior, assim serão apresentados os resultados para os demais materiais.

Com a finalidade de contextualizar melhor cada material avaliado, os mesmos são apresentados nas figuras à seguir.



**Figura 33: Material 1 – Espuma de Poliuretano 40kg/m<sup>3</sup> [Fonte: Shrivage *et al.* (2010)]**



**Figura 34: Material 2 – Espuma de Melanina 8kg/m<sup>3</sup> [Fonte: Shrivage *et al.* (2010)]**



**Figura 35: Material 3 – Kenaf 40kg/m<sup>3</sup> [Fonte: Shrivage *et al.* (2010)]**



**Figura 36: Material 4 – Feltro Macio 24kg/m<sup>3</sup> [Fonte: Shrivage *et al.* (2010)]**



**Figura 37: Material 5 – Fibra de Madeira [Fonte: Prisutova *et al.* (2014)]**



**Figura 38: Material 6 – Hastes de Mudas (*Switchgrass*) [Fonte: Verdière *et al.* (2011)]**

O objetivo na escolha dos materiais foi de abranger uma ampla variedade de combinações de parâmetros, para avaliar como a metodologia se comporta frente a materiais razoavelmente diferentes entre si. O material 6 inclusive diverge das características dos materiais abrangidos pelo modelo JCA.

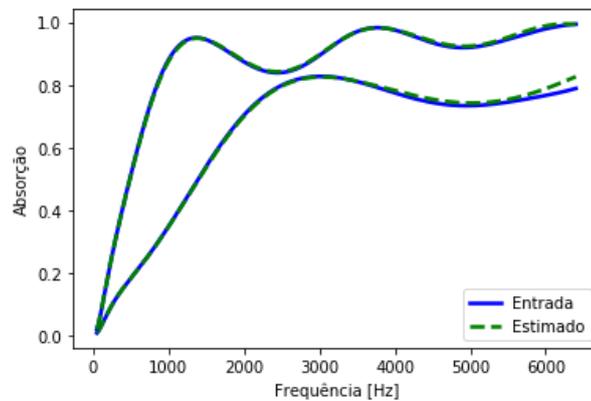
Outro ponto importante na escolha de materiais na literatura é a existência física do material, uma vez que o modelo numérico aceita qualquer combinação de parâmetros, permitindo assim simular um material que não existe, podendo ocasionar maiores incertezas.

#### 4.4.1. Material 1 – Espuma de Poliuretano

Para o material 1 foram obtidos resultados satisfatórios, com erros significativamente baixos (<1.1%), conforme Tabela 9.

**Tabela 9: Estimativa dos Parâmetros (Material 1)**

Parâmetro	Entrada	Saída	Erro [%]
Porosidade ( $\phi$ ) []	0.98	0.98	0.00
Tortuosidade ( $\alpha_\infty$ ) []	1.11	1.10	0.90
Resistividade ao Fluxo ( $\sigma$ ) [ $Ns/m^{-4}$ ]	6036	6014	0.36
Comprimento Característico Viscoso ( $\lambda$ ) [ $\mu m$ ]	125	126	1.10
Comprimento Característico Térmico ( $\lambda'$ ) [ $\mu m$ ]	295	295	0.01



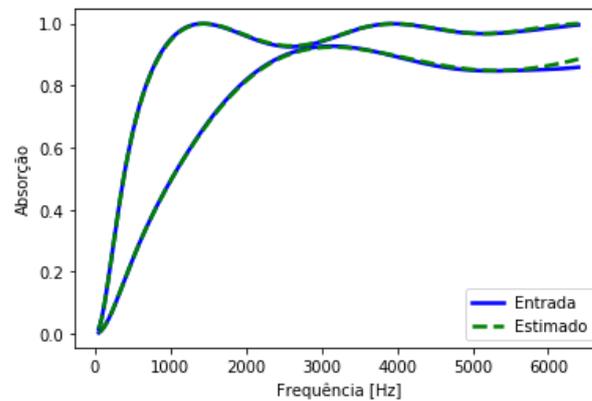
**Figura 39: Absorção Estimada Material 1**

#### 4.4.2. Material 2 – Espuma de Melanina

Para o material 2 os resultados obtidos também foram bons, apenas um parâmetro apresentou erro maior que 1%, mas embora o erro apresentado pelo comprimento característico viscoso tenha sido em torno de 10%, a diferença no valor absoluto não é tão significativa, permitindo assim boa representatividade do material, conforme Figura 40.

**Tabela 10: Estimativa dos Parâmetros (Material 2)**

Parâmetro	Entrada	Saída	Erro [%]
Porosidade ( $\phi$ ) []	0.98	0.98	0.00
Tortuosidade ( $\alpha_\infty$ ) []	1.00	1.01	0.55
Resistividade ao Fluxo ( $\sigma$ ) [ $Ns/m^{-4}$ ]	10634	10631	0.03
Comprimento Característico Viscoso ( $\lambda$ ) [ $\mu m$ ]	95	104	9.88
Comprimento Característico Térmico ( $\lambda'$ ) [ $\mu m$ ]	180	180	0.08



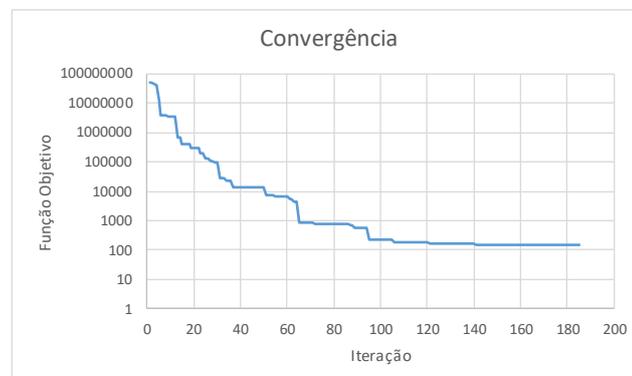
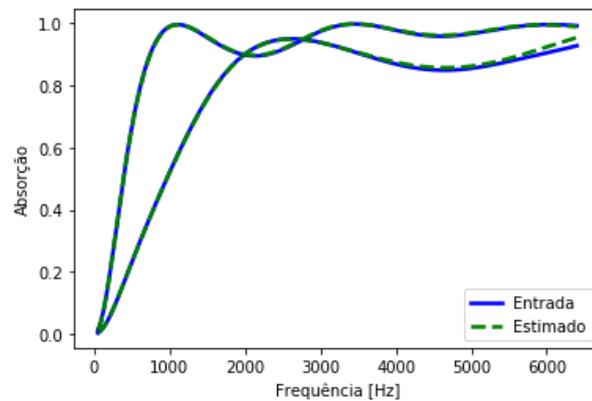
**Figura 40: Absorção Estimada Material 2**

#### 4.4.3. Material 3 – Kenaf

Para o material 3 os resultados obtidos novamente apresentaram erros significativamente baixos (<1.6%), conforme Tabela 11.

**Tabela 11: Estimativa dos Parâmetros (Material 3)**

Parâmetro	Entrada	Saída	Erro [%]
Porosidade ( $\phi$ ) []	0.98	0.98	0.01
Tortuosidade ( $\alpha_\infty$ ) []	1.00	1.00	0.00
Resistividade ao Fluxo ( $\sigma$ ) [ $Ns/m^{-4}$ ]	6918	6934	0.23
Comprimento Característico Viscoso ( $\lambda$ ) [ $\mu m$ ]	62	63	1.61
Comprimento Característico Térmico ( $\lambda'$ ) [ $\mu m$ ]	185	185	0.03



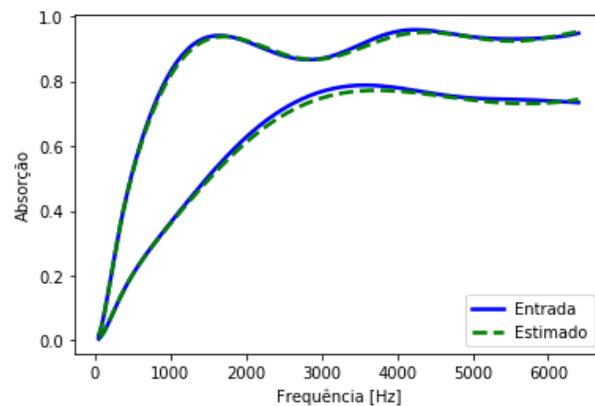
**Figura 41: Absorção Estimada Material 3**

#### 4.4.4. Material 4 – Feltro Macio

O material 4 apresenta conclusão análoga ao Material 2, com erros abaixo de 1% para todas as propriedades exceto o comprimento característico viscoso, mas novamente apesar do erro maior, o material teve boa representatividade, conforme Figura 42.

**Tabela 12: Estimativa dos Parâmetros (Material 4)**

Parâmetro	Entrada	Saída	Erro [%]
Porosidade ( $\phi$ ) []	0.99	0.99	0.01
Tortuosidade ( $\alpha_\infty$ ) []	1.00	1.00	0.00
Resistividade ao Fluxo ( $\sigma$ ) [ $Ns/m^{-4}$ ]	6135	6151	0.27
Comprimento Característico Viscoso ( $\lambda$ ) [ $\mu m$ ]	164	192	16.89
Comprimento Característico Térmico ( $\lambda'$ ) [ $\mu m$ ]	230	230	0.17



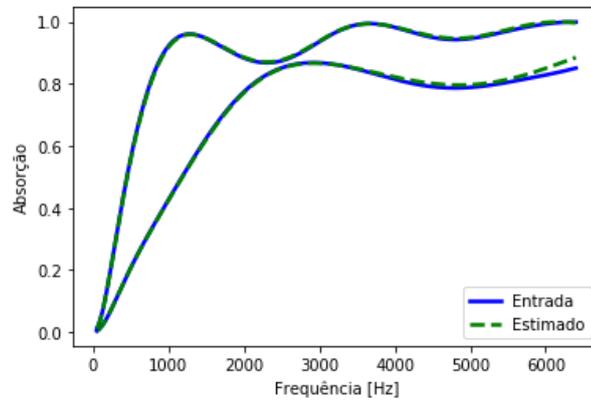
**Figura 42: Absorção Estimada Material 4**

#### 4.4.5. Material 5 – Fibra de Madeira

O material 5 apresentou erros menores que 1% para todos os parâmetros avaliados, conforme Tabela 13.

**Tabela 13: Estimativa dos Parâmetros (Material 5)**

Parâmetro	Entrada	Saída	Erro [%]
Porosidade ( $\phi$ ) []	0.98	0.98	0.01
Tortuosidade ( $\alpha_\infty$ ) []	1.07	1.06	0.86
Resistividade ao Fluxo ( $\sigma$ ) [ $Ns/m^{-4}$ ]	5000	4963	0.75
Comprimento Característico Viscoso ( $\lambda$ ) [ $\mu m$ ]	100	101	0.71
Comprimento Característico Térmico ( $\lambda'$ ) [ $\mu m$ ]	200	200	0.06



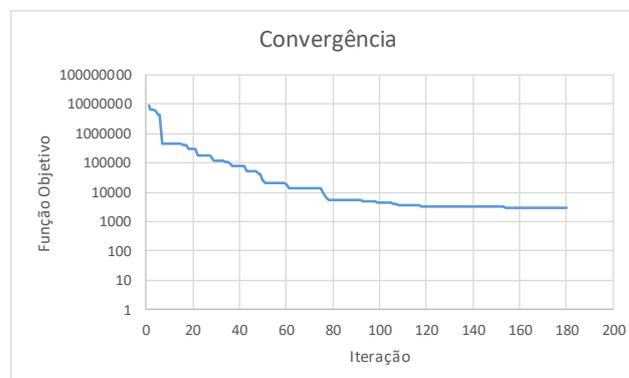
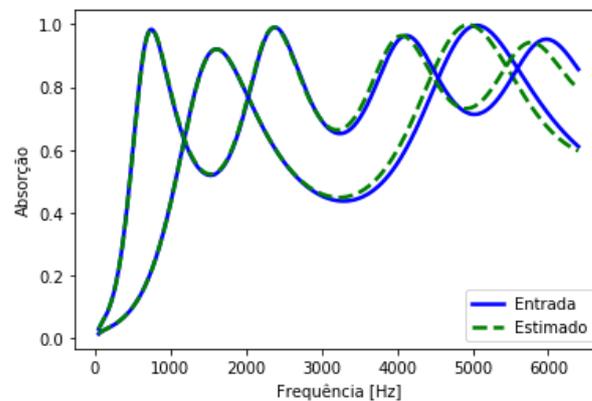
**Figura 43: Absorção Estimada Material 5**

#### 4.4.6. Material 6 – Hastes de Mudas (*Switchgrass*)

Já o material 6 apresenta um erro alto para a resistividade ao fluxo, em torno de 68%, no entanto a curva apresentada (Figura 44) parece ter pouca sensibilidade à este parâmetro. Os demais parâmetros apresentaram erros baixos, conforme Tabela 14.

**Tabela 14: Estimativa dos Parâmetros (Material 6)**

Parâmetro	Entrada	Saída	Erro [%]
Porosidade ( $\phi$ ) []	0.78	0.78	0.11
Tortuosidade ( $\alpha_\infty$ ) []	2.50	2.49	0.36
Resistividade ao Fluxo ( $\sigma$ ) [ $Ns/m^{-4}$ ]	1359	2287	68.30
Comprimento Característico Viscoso ( $\lambda$ ) [ $\mu m$ ]	153	155	1.32
Comprimento Característico Térmico ( $\lambda'$ ) [ $\mu m$ ]	689	683	0.89



**Figura 44: Absorção Estimada Material 6**

## 4.5. Comparativo

A Tabela 15 mostra os erros percentuais estimados para cada parâmetro de cada material avaliado neste trabalho.

**Tabela 15: Comparativo dos Parâmetros Estimados (Erros Percentuais)**

Parâmetro	Mat. 0	Mat. 1	Mat. 2	Mat. 3	Mat. 4	Mat. 5	Mat. 6
Porosidade ( $\phi$ )	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.11
Tortuosidade ( $\alpha_\infty$ )	0.10	0.90	0.55	0.00	0.00	0.86	0.36
Resistividade ao Fluxo ( $\sigma$ )	0.27	0.36	0.03	0.23	0.27	0.75	68.30
Comprimento Característico Viscoso ( $\lambda$ )	2.48	1.10	9.88	1.61	16.89	0.71	1.32
Comprimento Característico Térmico ( $\lambda'$ )	0.07	0.01	0.08	0.03	0.17	0.06	0.89

É notável que os erros ficam todos abaixo de 1% para os parâmetros porosidade, tortuosidade e comprimento característico térmico, independente do material avaliado.

A resistividade ao fluxo também fica abaixo de 1% para todos os materiais, exceto para o material 6, hastes de mudas (switchgrass). No entanto, este material, conforme já mencionado, diverge das características dos materiais contemplados no modelo JCA. O que mostra uma possibilidade de extensão da metodologia desenvolvida para outros materiais com características diferentes, dadas certas limitações, como nesse caso, a resistividade ao fluxo.

Assim, investigações mais profundas de materiais de naturezas diferentes devem ser realizadas antes da utilização dessa metodologia, com a finalidade de levantar as incertezas envolvidas no processo.

O parâmetro que apresentou maiores erros foi o comprimento característico viscoso, tendo ficado abaixo dos 2.5% esperados pela validação da metodologia para a maioria dos materiais, mas não todos. O erro observado foi de aproximadamente 9.9% no material 2 (espuma de melanina) e 16.9% no material 4 (feltro macio).

Com a finalidade de avaliar uma possível melhoria da metodologia, uma revisão foi realizada, avaliando como fica a estimativa desse parâmetro em uma região diferente da curva.

## 4.6. Revisão

Nesta revisão, o comprimento característico viscoso passou a ser estimado na região linear da curva de absorção.

A Tabela 16 mostra os erros percentuais estimados para o comprimento característico viscoso de cada material avaliado nesta revisão. Os demais parâmetros não são apresentados pois não mudaram significativamente, uma vez que a metodologia permaneceu inalterada para eles nesta revisão, tendo apresentado apenas mínimas variações que ocorrem ao executar o algoritmo repetidas vezes.

**Tabela 16: Revisão dos Parâmetros Estimados (Erros Percentuais)**

Parâmetro	Mat. 0	Mat. 1	Mat. 2	Mat. 3	Mat. 4	Mat. 5	Mat. 6
Comprimento Característico Viscoso ( $\lambda$ )	0.78	1.10	6.19	0.82	3.22	1.30	11.44

O erro percentual reduziu para os materiais que apresentavam erros mais expressivos, como o próprio material 0 que foi de aproximadamente 2.5% para 0.8%. O material 2 que apresentava erro de 9.9% reduziu o mesmo para 6.2%, já o material 4 que apresentava o maior erro teve a redução mais expressiva do erro, indo de 16.9% para 3.2%.

Os demais materiais que já apresentavam erro baixo foram pouco afetados, sendo que o material 5 apresentou um aumento no erro, que antes era 0.7%, indo para 1.3%, sendo que o erro ainda continua significativamente baixo.

O único material para o qual a rotina modificada apresentou divergência, foi novamente o material 6, que apresentou um aumento expressivo no erro indo de aproximadamente 1.3% para 11.4%. O que reforça a ideia de que materiais desta natureza necessitam de uma revisão mais profunda da metodologia, lembrando que este material não condiz com o modelo JCA, tendo sido avaliado para testar a metodologia frente um material com parâmetros muito diferentes dos demais avaliados.

## Capítulo 5

### Conclusão

O objetivo geral deste trabalho foi definido como caracterizar acusticamente um material poroso para modelagem numérica através do modelo JCA.

Para tal seguiu-se uma metodologia baseada em uma caracterização inversa de materiais porosos através de uma rotina de otimização alimentada por medições em tubo de impedância, a qual ajusta a curva teórica proposta no modelo JCA às curvas medidas, definindo assim os parâmetros que caracterizam o comportamento acústico do material.

Como a ênfase do trabalho é em simulações numéricas, o primeiro passo no caminho para atingir o objetivo, foi desenvolver um modelo numérico de um tubo de impedância virtual. A ideia por trás do tubo de impedância virtual é gerar dados de entrada controlados para alimentar e permitir assim o ajuste adequado da rotina de otimização.

Assim, um dos objetivos específicos foi definido como o desenvolvimento e validação do modelo virtual do tubo de impedância, o que foi feito através de medições padronizadas de amostras padrões, seguindo estritamente os procedimentos de medição e cálculo dos resultados propostos na norma.

A representação numérica da curva de absorção mostrou-se adequada para toda a faixa de frequências de interesse, atingindo assim o primeiro objetivo específico do trabalho.

O segundo objetivo específico trata da elaboração da rotina de otimização propriamente dita. Baseado nos trabalhos pesquisados na revisão da literatura, foi desenvolvido uma rotina inicial, a qual funcionou perfeitamente utilizando a própria equação para gerar os dados de entrada, indicando correta implementação do código, mas encontrou dificuldades ao utilizar os dados provenientes do tubo de impedância virtual, que traz uma representatividade física maior do problema.

Diversos ajustes foram então realizados, envolvendo variações da função objetivo, dos parâmetros do algoritmo e da forma como os dados de entrada eram tratados, para enfim chegar numa rotina funcional para o problema proposto. Atingindo assim o segundo objetivo específico.

Obeve-se, assim, erros baixos para uma das curvas simuladas, a que foi utilizada no ajuste da rotina, no entanto com a necessidade de confirmar a eficácia da mesma, bem como sua abrangência, a metodologia foi aplicada para os outros materiais simulados.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, porém ficou notório ainda uma margem para melhoria da rotina, uma vez que o parâmetro comprimento característico viscoso, apresentou erros mais altos que os demais, tendo sido este o único parâmetro a apresentar erros maiores do que 1%.

Assim, realizou-se uma nova revisão, onde conseguiu-se melhorar a estimativa desse parâmetro, reduzindo consideravelmente o erro relativo para o mesmo.

Pode-se dizer então que o objetivo geral foi atingido com plenitude, ao atingir erros numéricos significativamente baixos.

É importante notar, que um dos materiais apresentou erros relativamente maiores, tendo inclusive apresentado um erro alto para a resistividade ao fluxo. No entanto, este material não encaixa-se nas características dos materiais abrangidos pelo modelo JCA.

O objetivo com a avaliação deste material, foi de averiguar como a rotina iria se portar, frente um material com características muito diferentes dos demais. A decisão de apresentar os resultados fundamenta-se na justificativa para desenvolvimento de trabalhos futuros.

Fica claro assim que ainda há margem para melhoria da metodologia desenvolvida, podendo talvez aumentar a abrangência da gama de materiais aos quais a mesma pode ser aplicada, e consequentemente a sua robustez.

Outra opção ainda seria a troca do modelo utilizado para o ajuste de curvas na rotina de otimização, uma vez que há modelos mais abrangentes, porém mais complexos, como o modelo de Biot.

## Referências Bibliográficas

ALLARD, J. F. **Propagation of Sound in Porous Media: Modeling Sound Absorbing Materials**. Elsevier Applied Science (1993).

ALBA, J. *et al.* **An Inverse Method to Obtain Porosity, Fibre Diameter and Density of Fibrous Sound Absorbing Materials**. Archives of Acoustics 36 (2001).

ATALLA, N.; ALLARD, J. F. **Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials**. Second Edition, Wiley (2009).

ATALLA, Y.; PANNETON R. **Inverse Acoustical Characterization of Open Cell Porous Media Using Impedance Tube Measurements**. Canadian Acoustics 11 - Vol. 33 No. 1 (2005).

BERANEK, L. **Acoustic Impedance of Porous Materials**. Journal of Acoustical Society of America 13 (1942).

CHAMPOUX, Y.; ALLARD, J. F. **Dynamic Tortuosity and Bulk Modulus in Air-Saturated Porous Media**. Journal of Applied Physics 70 (1991).

CHAMPOUX, Y.; STINSON, M. R.; DAIGLE, G. A. **Air-Based System for the Measurement of Porosity**. Journal of the Acoustical Society of America - Vol. 89 (1991).

CHAZOT, J. D.; ZHANG E.; ANTONI, J. **Acoustical and Mechanical Characterization of Poroelastic Materials Using a Bayesian Approach**. Journal of the Acoustical Society of America - Vol. 131 (2012).

DOUTRES, O. *et al.* **Evaluation of the Acoustic and Non-Acoustic Properties of Sound Absorbing Materials Using a Three-Microphone Impedance Tube**. Applied Acoustics - Vol. 71 Issue 6 (2010).

FAHY, F. **Foundations of Engineering Acoustics**. Academic Press, London (2001).

FELLAH, Z. E. A. *et al.* **Measuring Flow Resistivity of Porous Material via Acoustic Reflected Waves.** Journal of Applied Physics - Vol. 98 No. 8 (2005).

GERGES, S. N. Y. **Estado da Arte para Solução dos Problemas de Vibroacústica por Métodos Numéricos.** Acústica 2000. Florianópolis, Brasil (2000).

GOMES, C. J. *et al.* **Practical Method for Measuring the Tortuosity of Porous Materials from Binary or Gray-Tone Tomographic Reconstructions.** American Institute of Chemical Engineers Journal (2009).

HENRY, M. *et al.* **Evaluation of the Characteristic Dimensions for Porous Sound-Absorbing Materials.** Journal of Applied Physics - Vol. 77 No. 1 (1995).

HOROSHENKOV, K. V. **Porous Material Characterisation via Acoustical Methods.** 22<sup>nd</sup> International Congress on Sound and Vibration (2015).

JOHNSON, D. L.; KOPLIK, J.; DASHEN R. **Theory of Dynamic Permeability and Tortuosity in Fluid-Saturated Porous Media.** Journal of Fluid Mechanics 176 (1987).

MOUSSATOV, A.; AYRAULT, B.; CASTAGNEDE, B. **Porous Material Characterization: Ultrasonic Method for Estimation of Tortuosity and Characteristic Length Using a Barometric Chamber.** Ultrasonics - Vol. 39 No. 3 (2001).

OLUWOLE, O. **Finite Element Modeling for Materials Engineers Using MATLAB.** Springer (2011).

PANNETON, R.; GROS, E. **A Missing Mass Method to Measure the Open Porosity of Porous Solids.** Acta Acustica - Vol. 91 No. 2 (2005).

PRISUTOVA, J. *et al.* **A method to determine the acoustic reflection and absorption coefficients of porous media by using modal dispersion in a waveguide.** Journal of the Acoustical Society of America - Vol. 136 (2014).

RAVINDRAN, A. **Investigation of Inverse Acoustical Characterization of Porous Materials Used in Aircraft Noise Control Application.** Department of Mechanical Engineering, Wichita State University, Master of Science (2007).

SHARMA, S. *et al.* **Computation and Validation of Acoustical Properties of Various Foams and Fibers Using the Impedance Tube, FOAM-X and AutoSEA2.** INTER NOISE (2006).

SHRAVAGE, P.; JAIN, S.; KARANTH, N. **A Comparison of Analytical and Optimization Inverse Techniques for Characterizing Intrinsic Parameters of Porous Materials.** NOISE-CON (2010).

STINSON, M. R.; DAIGLE, G. A. **Electronic System for the Measurement of Flow Resistance.** Journal of the Acoustical Society of America - Vol. 83 (1988).

STORN, R.; PRICE, K. **Differential Evolution - A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization Over Continuous Spaces.** ICSI Technical Report TR-95-012 (1995).

VERDIÈRE, K. *et al.* **Switchgrass-Based Noise Absorbing Material: Characterization and Modeling.** Canadian Acoustics – Vol. 39 No. 3 (2011).

ZHANG, B.; ZHU, J. **Inverse Methods of Determining the Acoustical Parameters of Porous Sound Absorbing Metallic Materials.** 22<sup>nd</sup> International Congress of Acoustics (2016).

ZIELINSKI, T. G. **Normalized Inverse Characterization of Sound Absorbing Rigid Porous Media.** Journal of the Acoustical Society of America - Vol. 137 No. 6 (2015).