

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA ABSORÇÃO ACÚSTICA DA FIBRA DE COCO EM COMPARAÇÃO COM
ESPUMA ACÚSTICA COMERCIAL VIA TUBO DE IMPEDÂNCIA

por

Bruno Barcellos Pavan

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2017.

ANÁLISE DA ABSORÇÃO ACÚSTICA DA FIBRA DE COCO EM COMPARAÇÃO COM
ESPUMA ACÚSTICA COMERCIAL VIA TUBO DE IMPEDÂNCIA

por

Bruno Barcellos Pavan

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof.^a Dr.^a LETÍCIA FLECK FADEL MIGUEL

Comissão de Avaliação:

Prof.^a Dr.^a LETÍCIA FLECK FADEL MIGUEL

Prof. Dr. DANIEL DE LEON

Prof. Dr. EDSON HIKARO ASEKA

Porto Alegre, 04 de dezembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por todas as oportunidades que tive e tenho em minha vida. Agradeço por ter tido a oportunidade de estudar em uma Universidade de renome, bem conceituada e repleta de professores e profissionais altamente qualificados.

Agradeço a minha família por sempre permanecer unida e unânimes quando o assunto é me apoiar na busca de minhas metas de vida. Agradeço minha madrinha, Carmem, por todo carinho, por me passar visão sobre os desafios da faculdade e como resolvê-los. Ao meu tio Beto, que sempre sabe como resolver qualquer problema, agradeço muito pela inspiração. Sem o apoio deles, eu não seria o que sou e o que me tornei hoje.

Agradeço a minha mãe, Rose, que sempre esteve presente em meus altos e baixos na faculdade, não me deixando levar pelos erros e por algumas notas baixas. Meu alicerce. Meu ombro de apoio. É aquela que sempre me mostra que mesmo em momentos obscuros, não devemos abaixar a cabeça para que consigamos dar a volta por cima e atingir nossos objetivos. Agradeço ao meu pai, Luiz, por ser minha eterna referência. Exemplo de trabalhador, guerreiro, de quem lutou pela felicidade, própria e da família, e a conquistou. Exemplo de quem sabe o que quer e sabe como ir atrás. Tento, todos os dias, me espelhar, para que um dia possa ser, no mínimo, a metade do que esse homem é e o que representa para mim.

Agradeço a minha namorada, Fernanda, por ter ficado junto comigo durante toda minha graduação e por apoiar minhas decisões. Alguém que sempre me dizia que iria dar tudo certo nos finais de semestre, dividindo ansiedades. Agradeço a ela por conhecer meu potencial e sempre acreditar em mim.

Agradeço aos meus avós por toda a cultura passada de geração em geração, mas em especial ao meu avô, Oswaldo, por ter sido um eterno amante da música e ter me passado esse sentimento. Sentimento de amor por música, sons, que me incentivou, de certa forma, a escolher a área de estudo do meu último trabalho na graduação em engenharia mecânica. Saudade daquele que dizia sempre ter muita vontade de me ver colar grau, mas que, infelizmente, o tempo chegou na contra-mão e o levou. Mas tenho certeza, que de onde ele estiver, estará sempre me apoiando e me guiando com luz e sabedoria.

Entre na UFRGS em 2011, para cursar Química Industrial, e em 2013 fiz transferência para o curso de Engenharia Mecânica. Durante todos esses anos tive muitos professores e não poderia deixar de citar alguns, como forma de agradecimento, como o professor José Gregório e professora Deborah Dick, ambos presentes na minha graduação em Química, professor Francis, professora Letícia, minha orientadora, e professor Carlos por serem todos profissionais os quais considero referências na área acadêmica e referências como pessoas de lindo caráter, brilhantemente comprometidas em passar a diante seus conhecimentos aos alunos.

Por último, mas de longe não menos importante, agradeço aos meus amigos de infância, Julio Balena e Matheus Titton, que estiveram presentes nos bons e maus momentos durante a minha vida pré faculdade e durante a graduação. Aos meus colegas de turma na Engenharia Mecânica, um agradecimento especial a Camila Zanin, Gabriela Bellardinelli, Rafael Radtke e Rodrigo Schabbach pelos grupos de estudo, parcerias pré prova e sinceras amizades que espero levar para o resto da minha vida.

“Você não sabe o quanto eu caminhei
Pra chegar até aqui
Percorri milhas e milhas antes de dormir
Eu nem cochilei
Os mais belos montes escalei
Nas noites escuras de frio chorei

A vida ensina e o tempo traz o tom
Pra nascer uma canção
Com a fé do dia a dia encontro a solução”

Cidade Negra – A Estrada

PAVAN, B. B. **Análise da absorção acústica da fibra de coco em comparação com espuma acústica comercial via tubo de impedância.** 2017. 15 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

O trabalho se baseia em fazer uma comparação da absorção acústica da fibra de coco com material comercial. A ideia é apresentar o quanto a fibra vegetal pode se mostrar qualificada para substituição de materiais comerciais derivados do petróleo, por exemplo, apresentando uma solução sustentável, rentável e de qualidade para tal aplicação. Um experimento através de tubo de impedância é proposto para a comparação da absorção sonora entre os materiais. Parte do trabalho está direcionada na fabricação do tubo e outra parte voltada para análise e comparação dos resultados obtidos. É provado que a fibra de coco, respeitando-se alguns limites físicos, se apresenta tão qualificada quanto uma espuma comercial e assim se mostra um material eficaz, sustentável, de matéria prima abundante e não agressivo ao meio ambiente em tal aplicação como um substituto a alguns materiais derivados do petróleo empregados atualmente na área.

PALAVRAS-CHAVE: Fibra de coco; Absorção acústica; Sustentabilidade.

PAVAN, B. B. **Analysis of acoustic absorption of coconut fiber compared to commercial acoustic foam via impedance tube.** 2017. 15 pages. Monograph (Final paper in Mechanical Engineering) – Mechanical Engineering Department, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

The work is based on a comparison of acoustic absorption of coconut fiber with commercial material. The idea is to present how much this vegetable fiber can be qualified to substitute commercial materials derived from petroleum, for example, presenting a sustainable, cost-effective and quality solution for such application. An impedance tube experiment is proposed for the comparison of the acoustic absorption between the materials. Part of the work is directed at the manufacture of the tube and another part focused on analysis and comparison of the results obtained. It is proven that coconut fiber, respecting some physical limits, is as qualified as a commercial foam and thus shows an effective, sustainable and non aggressive material of abundant raw material for this application as a substitute for some petroleum-derived materials currently employed in the area.

KEYWORDS: Coconut fiber; Acoustic absorption; Sustainability.

ÍNDICE

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA... ..	1
4.1. Coeficiente de absorção sonora.....	2
4.2. Medição da impedância acústica e absorção sonora.....	2
4.3. Caracterização inversa.....	4
5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	4
5.1. Tubo fabricado e equipamentos utilizados.....	4
5.2. Amostras.....	7
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO... ..	9
7. CONCLUSÕES.....	14
7.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
APÊNDICE	16

1. INTRODUÇÃO

O coqueiro é uma planta comum de região litorânea no nordeste brasileiro, entretanto, pode ser encontrado em outras regiões de clima tropical caracterizadas por temperaturas acima de 22°C, com elevada umidade e chuvas sazonais. Segundo Dossiê técnico (Aproveitamento da fibra de coco), de 2011, o Brasil tem produzido cerca de 8,1 bilhões de unidades de coco e restos que não são comercializados, como a fibra do coco, cascas, entre outros, vêm sendo dispostos em aterros e lixões, provocando problemas aos serviços municipais de coleta de lixo e também ao meio ambiente que leva de 8 a 12 anos para decompor o coco.

O isolamento acústico é a técnica utilizada para evitar a passagem de som de um ambiente para outro, através do uso de diversos materiais em seus mais variados tipos: densos, pesados, leves, porosos, entre outros, que consigam amortecer e dissipar a energia sonora.

Este trabalho visa mostrar uma solução alternativa para dispor a fibra de coco que já é encontrada para comercialização, entre outras formas, compactada em placas retangulares de definida espessura para aplicação em jardinagem. Foram retiradas amostras dessas placas, analisadas acusticamente e apresentados resultados que mostram que a fibra nesse formato se apresenta como um bom absorvedor acústico se comparada a materiais acústicos comerciais, como a espuma de poliuretano.

2. OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo fazer uma comparação da absorção sonora da fibra de coco com material comercial, no caso espuma acústica de poliuretano, via experimento em tubo de impedância. A ideia é apresentar o quanto a fibra vegetal pode se mostrar qualificada para substituição de materiais comerciais derivados do petróleo, por exemplo, comparando-se as absorções acústicas de incidência normal de cada material.

A principal contribuição desse trabalho, tendo interesse em sustentabilidade, está em apresentar uma solução alternativa para absorvedores acústicos frente a outros materiais relativamente agressivos ao meio ambiente, no que se diz respeito à origem do material, e ao ser humano, no que se diz respeito à fabricação de tais produtos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foi em 1977 quando Seybert e Ross publicaram, pela primeira vez na história, como medir impedância acústica de materiais utilizando um ruído de banda larga. Um dos métodos que podem ser utilizados é o método da função de transferência em tubo de impedância que é descrito pela Norma internacional ISO 10534-2 de 1998.

Em seu trabalho, Bodén e Abom, em 1986 e 1988, apresentaram alguns indicativos práticos para minimizar os erros do método de medição. Adicionalmente a isso, Brandão, em seu livro de 2016, mostra a necessidade de ter-se um tubo de impedância com dois espaçamentos diferentes entre microfones sendo um maior para medições de baixas frequências e outro maior para medições de altas frequências.

Uma maneira prática e rápida para a determinação de outros parâmetros acústicos dos materiais a partir da medição com tubo de impedância é a utilização do método da caracterização inversa, que minimiza o erro entre as curvas experimentais e as obtidas por modelo teórico.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir apresentam-se algumas definições e conceitos utilizados no presente trabalho.

4.1. Coeficiente de absorção sonora

Dentre os coeficientes que caracterizam o comportamento do som frente a um obstáculo está o coeficiente de absorção sonora. De acordo com Miguel e Tamagna, 2007, o coeficiente de absorção, α , é a relação entre a energia absorvida pelo material e a energia incidente. É dado pela seguinte equação:

$$\alpha = \frac{E_{tra} + E_{abs}}{E_{inc}} \quad (4.1)$$

onde:

E_{abs} é a energia sonora absorvida;

E_{inc} é a energia sonora incidente;

E_{tra} é a energia sonora transmitida.

É dito material absorvente quando uma quantidade de energia incide em um material e fica retida em seu seio, transformando-se em energia mecânica e calor. Esse coeficiente é dependente do material, varia de 0 a 1 e varia com a frequência. Normalmente os fabricantes fornecem os coeficientes de absorção de seus produtos acústicos, ou caso não se tenham ensaios do material em consideração, podem-se ter valores aproximados para o coeficiente de absorção de acordo com a tabela da NBR12179/1992.

4.2. Medição da impedância acústica e absorção sonora

Entre os métodos existentes para medição do coeficiente de absorção sonora e/ou da impedância acústica da superfície está a medição da impedância de superfície em tubo de impedância.

O método da função de transferência em tubo de impedância é descrito pela Norma Internacional ISO 10534-2 (1998) e um conjunto de equipamentos utilizado, que pode ser visto na Figura 4.1, permite que se considere a formação de ondas planas internamente em um tubo e, conseqüentemente, incidência sonora normal à superfície do material a ser testado. No caso do experimento do presente trabalho, ainda há que se respeitar uma faixa de frequências em análise devido à distância entre microfones posicionados no tubo que captam os sinais para análise posterior em computador.

O aparato de medição consiste em um tubo com paredes suficientemente rígidas e que apresente em uma de suas extremidades internas um alto falante e na outra, a amostra a ser analisada. A medição é realizada através de dois microfones posicionados criteriosamente na superfície do tubo.

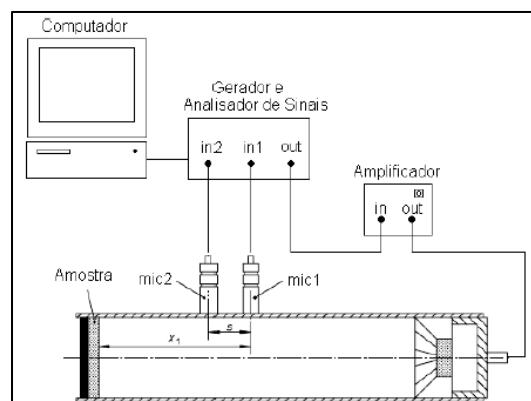


Figura 4.1. Esquema de funcionamento de experimento via tubo de impedância de acordo com a Norma ISO 10534-2.

A distância s entre os microfones determina a faixa de frequências a ser analisada. Um gerador de sinal gera um ruído branco e , amplificado, envia para o alto falante emitir internamente no tubo. Os microfones captam a pressão sonora interna no tubo de acordo com suas posições e enviam para um analisador de sinais que calcula a função de transferência entre as pressões sonoras. Um computador, dotado de algum *software* comercial de cálculo como MATLAB, por exemplo, recebe as informações do analisador de sinais e processa de acordo com uma rotina de cálculo e entrega as informações sobre impedância e absorção acústica do material analisado.

O tubo de impedância apresenta um diâmetro d que limita a frequência máxima a ser analisada, chamada frequência de corte do tubo. Essa frequência, segundo a ISO 10534-2, é definida como:

$$f_c = \frac{1,84c_0}{\pi d} \quad (4.2)$$

sendo f_c a frequência de corte do tubo, c_0 a velocidade do som dentro do tubo e d o diâmetro interno do tubo.

A função de transferência utilizada na medição é dada da seguinte maneira:

$$H_{12} = \frac{P_2(f)}{P_1(f)} \quad (4.3)$$

sendo $P_1(f)$ e $P_2(f)$ as pressões sonoras captadas pelos microfones 1 e 2, respectivamente, no domínio frequência.

Porém, segundo a ISO 10534-2, há uma recomendação de uma espécie de calibração da função de transferência que deve ser feita a partir do intercambiamento entre as posições dos microfones, isto é, faz-se uma medição com os microfones em suas devidas posições e mede-se a função de transferência $H(f)$. Logo após, trocam-se as posições dos microfones no tubo e realiza-se uma nova medição obtendo $H^*(f)$. Então, a função transferência do microfone 2 para 1, $H_{12}(f)$, é dada por:

$$H_{12} = [H(f) \cdot H^*(f)]^{0,5} \quad (4.4)$$

Com o valor da função de transferência é possível calcular o coeficiente de reflexão do material, segundo a ISO 10534-2, de acordo com:

$$r = \frac{H_{12} - e^{-ik_0s}}{e^{ik_0s} - H_{12}} e^{2k_0s} \quad (4.5)$$

onde k_0 é o número de onda.

Após, a ISO 10534-2 informa que o coeficiente de absorção por incidência normal a superfície do material é dado por:

$$\alpha(\theta) = 1 - |r|^2 \quad (4.6)$$

A ISO10534-2 também informa que devido à existência de modos transversais a frequência máxima de operação, além de limitada pela Equação (4.2), é relacionada com o espaçamento entre os microfones e recomenda que a distância s entre os microfones deve ser $s < 0,45\lambda_u$, sendo λ_u o comprimento de onda da maior frequência de interesse. Deve-se também salientar que devido a um pequeno espaçamento entre os microfones eles podem acabar medindo a mesma pressão sonora em baixas frequências e por isso a ISO 10534-2 também recomenda que $s > 0,05\lambda_l$, sendo λ_l o comprimento de onda da menor frequência de

interesse. Brandão, 2016, aconselha que devido ao compromisso de $s > 0,05\lambda_l$ e $s < 0,45\lambda_u$ tem-se a necessidade de ter-se um tubo de impedância com dois espaçamentos diferentes entre microfones sendo um maior para medições de baixas frequências e outro maior para medições de altas frequências.

Em seu trabalho, Bodén e Abom, 1986 e 1988, apresentaram alguns indicativos práticos para minimizar os erros do método de medição e, entre eles, a relação sobre a distância entre microfones e faixa de frequência é dada por:

$$\frac{0,1c_0}{2s} < f < \frac{0,8c_0}{2s} \quad (4.7)$$

4.3. Caracterização inversa

Para obter-se o controle do ruído em diversas situações, dados somente de absorção acústica podem ser insuficientes. Modelos clássicos da literatura incluem alguns outros parâmetros macroscópicos aos materiais porosos, como porosidade, resistividade ao fluxo, tortuosidade e comprimentos característicos para a caracterização acústica desses materiais.

Para medir diretamente esses parâmetros necessita-se de bancadas experimentais e procedimentos muitas vezes dispendiosos. Uma maneira prática e rápida para a determinação desses parâmetros é a utilização do método inverso, que minimiza o erro entre as curvas experimentais e as obtidas por modelo teórico. Para tanto, realiza-se medições em tubo de impedância do coeficiente de absorção e após emprega-se o algoritmo evolutivo de código aberto, chamado evolução diferencial.

O algoritmo tende a encontrar um grupo de parâmetros cujos valores minimizam o erro entre a curva experimental e teórica sobre o coeficiente de absorção sonora.

O coeficiente de absorção sonora é dependente da incidência do campo sonoro e da espessura do material, então, se a espessura de interesse for diferente daquela em um catálogo, por exemplo, ou se a incidência não for a mesma que a utilizada nas medições do fabricante, os dados de coeficiente de absorção não podem ser considerados condizentes.

Os modelos de Johnson-Champoux-Allard, dentro do modelo de Fluido Equivalente, aplicado no presente trabalho considera a estrutura do material poroso como rígida e é dado em função de cinco parâmetros macroscópicos [Allard e Atalla, 2009]: resistividade ao fluxo, porosidade, tortuosidade e comprimentos característicos viscoso e térmico. Os modelos de Johnson e Champoux-Allard permitem calcular a densidade efetiva e módulo de compressibilidade efetivo, respectivamente. A partir desses, tem-se a impedância característica e, após, o coeficiente de absorção sonora teórico.

A resistividade ao fluxo é equivalente à resistência que o ar enfrenta para penetrar no material e fluir entre sua estrutura. É um dos principais parâmetros macroscópicos e é independente de área e espessura. Porosidade é a relação entre o volume da fase fluida e o volume total do material. Pode-se dizer que a tortuosidade é a relação entre o grau de sinuosidade dos poros, o que contribui nos efeitos inerciais. E os comprimentos característicos térmico e viscoso estão relacionados ao raio dos poros menores e maiores, respectivamente, descrevendo os efeitos visco-inerciais e térmicos em altas frequências [Cavalheiro et al, 2017].

Para cada frequência, calcula-se o erro como sendo a diferença entre o coeficiente de absorção experimental, obtido com o experimento no tubo de impedância, e o coeficiente de absorção teórico calculado pelo método.

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1. Tubo fabricado e equipamentos utilizados

Dadas recomendações da Norma ISO 10534-2 e Equação (4.7), foi projetado um aparato de medição incluindo o tubo de impedância que podem ser vistos na Figura 5.1 em vista isométrica e na Figura 5.2 em vista lateral. O tubo possui diâmetro interno de 30 mm, o que lhe confere uma frequência de corte em torno de 6700 Hz segundo a Equação (4.2). Também foram projetados dois espaçamentos distintos entre os microfones. Um primeiro espaçamento de $s = 150 \text{ mm}$ destinado para medições de baixas frequências, sendo possível, de acordo com a Equação (4.7), varrer uma faixa de frequências de 110 a 900 Hz aproximadamente e outro, $s = 50 \text{ mm}$, destinado para medições de altas frequências, em torno de 400 a 2800 Hz aproximadamente. A distância entre o alto falante e a primeira posição do microfone foi projetada de forma conservadora em 120 mm, isto é, quatro vezes o diâmetro interno do tubo. Devido à formação de modos de onda não planos, a ISO 10534-2 recomenda que essa distância seja, no mínimo, três vezes o diâmetro interno para que isso não venha a interferir na medição.

A distância entre a superfície da amostra e a posição do microfone mais próximo depende da característica do material. Considerando o pior caso, deve ser da ordem de 2 diâmetros internos de acordo com a ISO 10534-2. Também de forma conservadora, a distância entre o microfone mais próximo das amostras e o fundo do porta amostra, que nada mais é que uma extensão do tubo, ficou em torno de 130 mm, uma vez que as amostras poderão variar até 50 mm de espessura. Em vermelho nas Figuras 2 e 3 tem-se a caixa para se posicionar o tubo junto ao alto falante. A caixa é necessária pois, de acordo com a ISO 10534-2, o alto falante além de posicionado concêntrico com o tubo, cobrindo pelo menos 2/3 do diâmetro interno, deve também permanecer isolado acusticamente. Para tanto, essa caixa deve ser preenchida com algum material isolante. Em verde tem-se o porta amostras projetado de forma a poder-se retirar e colocar novas amostras para análise. No caso, com um flange de oito furos que podem ser preenchidos com barras rosqueadas, arruelas e porcas. Na Figura 5.2 é também possível ver as distâncias comentadas acima no texto. Ao todo, o tubo tem em torno de 400 mm contando com o porta amostras.

O material de todas as partes do tubo é PLA, um polímero sintético termoplástico convencional em impressões 3D, o que também tornou parte do trabalho validar a qualidade desse material quando utilizado para tal função.

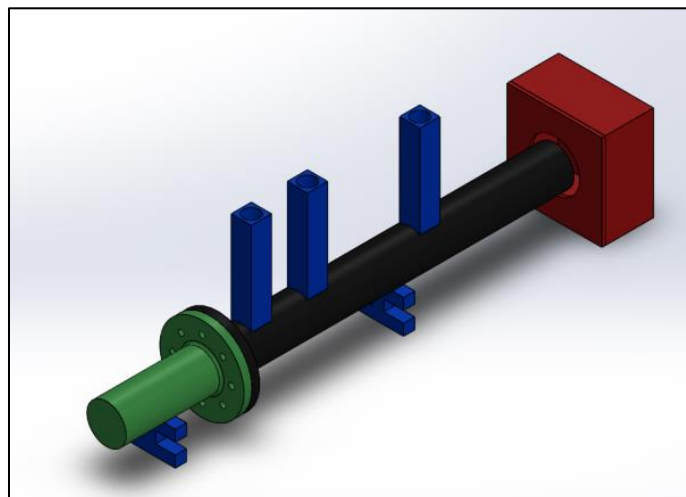


Figura 5.1. Tubo de impedância projetado em vista isométrica.

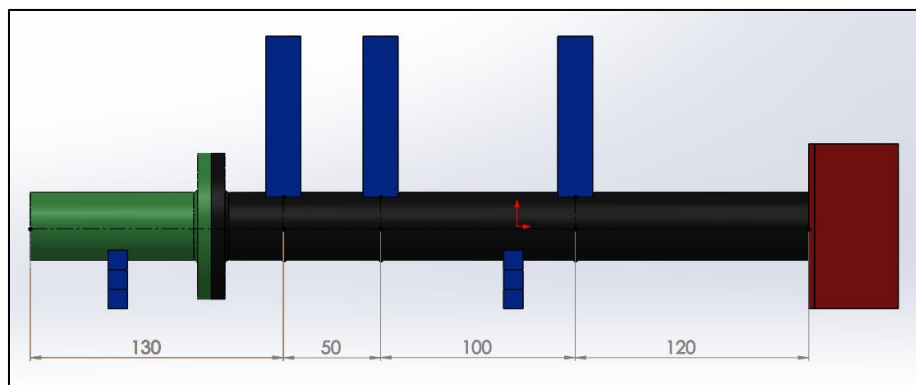


Figura 5.2. Tubo de impedância projetado em SOLIDWORKS, vista lateral, com distâncias em milímetros entre as posições dos microfones.

Na Figura 5.3 pode-se ver o tudo projetado em PLA em operação junto aos microfones conectados ao aparato de medição. A Tabela 5.1 apresenta o equipamento utilizado para as medições.

Tabela 5.1. Aparato de medição utilizado além dos tubos de impedância

Item	Descrição
Analizador de sinais	<i>Brüel & Kjær – Pulse Type 3160 B-042</i>
Computador	<i>Notebook com software Pulse</i>
Amplificador	B&K 2718
Microfone A	B&K sensibilidade 0.85mV/Pa
Microfone B	B&K sensibilidade 0.88mV/Pa

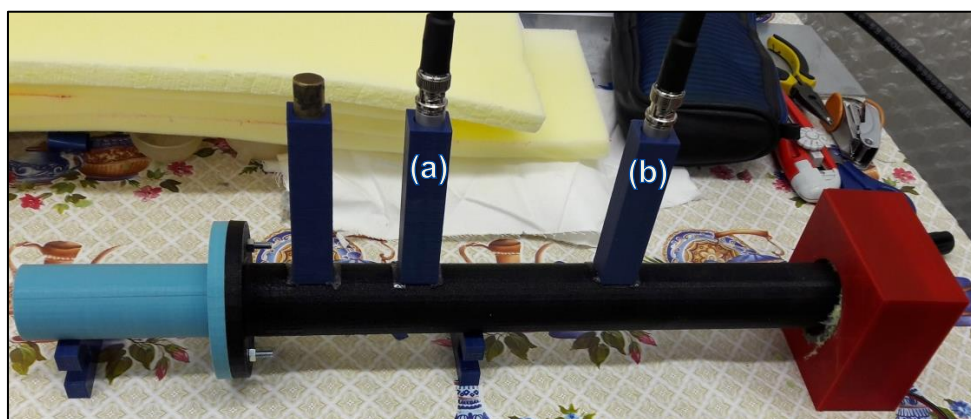


Figura 5.3. Tubo em projetado em operação

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Além do tubo projetado em PLA, também foi utilizado o tubo de impedância do laboratório que pode ser visto na Figura 5.4. O tubo é de aço inox, mede 27 mm de diâmetro interno, o que lhe confere uma frequência de corte em torno de 7400 Hz de acordo com a equação 4.2, e um espaçamento entre microfones de 23 mm, que lhe confere uma varredura segura de frequências da faixa em torno de 700 a 6000 Hz de acordo com a inequação 4.7.

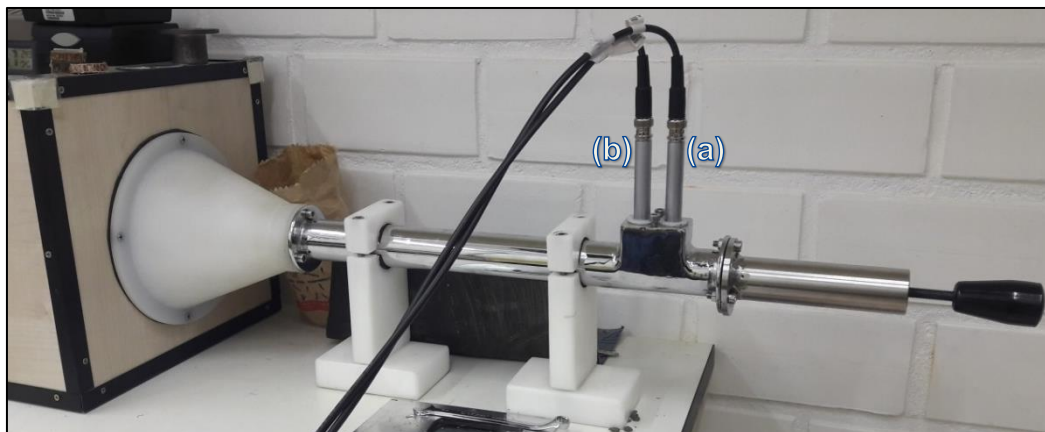


Figura 5.4. Tubo de impedância do laboratório de vibrações e acústica da UFSC.

5.2. Amostras

Para o objetivo de comparar a eficiência acústica em termos de absorção sonora da fibra de coco em relação a uma espuma acústica comercial, as amostras de espuma acústica a serem ensaiadas são lisas, possuem densidade de 26 kg/m^3 de acordo com o fabricante e espessura de 20 mm. As placas de onde serão retiradas as amostras podem ser vistas na Figura 5.5.



Figura 5.5. Espuma acústica lisa de 20 mm de espessura

Já as amostras de fibra de coco serão retiradas de uma placa semelhante a da Figura 5.6, tipicamente encontrada nesse formato para venda na área da jardinagem. A placa utilizada no presente trabalho possui em torno de 30 mm de espessura e densidade em torno de 200 kg/m^3 .



Figura 5.6. Placa de fibra de coco no formato chapa encontrado para venda

As amostras tanto da espuma comercial quanto da placa de fibra de coco foram extraídas com uma furadeira de mesa e cortador usinado especialmente para isso acoplado conforme mostra Figura 5.7. O cortador pode ser visto na Figura 5.8.



Figura 5.7. Demonstração de como as amostras foram extraídas a partir de uma furadeira de mesa



Figura 5.8. Cortador das amostras

A determinação do coeficiente de absorção sonora em tubos de impedância apresenta uma grande vantagem que é o tamanho da amostra. As amostras para ensaio de impedância acústica são tipicamente pequenas e, nesse caso, de diâmetro e espessura relativamente pequenos.

Foram experimentadas 10 amostras de fibra de coco frente a 5 amostras de espuma comercial. O número de amostras de fibra é maior, pois é uma quantidade mais segura, a princípio, para utilização do método da caracterização inversa. Representativas às amostras, a Figura 5.9 mostra exemplos das amostras de fibra de coco e de espuma experimentadas. Outra informação importante a se salientar é que as amostras de espuma foram ensaiadas todas com em torno de 40 mm de espessura.



Figura 5.9. Amostras exemplo das amostras ensaiadas

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tubo projetado em PLA não apresentou boa resposta ao ensaio. Um teste comum a se fazer é excitar o tubo com ruído branco sem nenhuma amostra dentro, isto é, verificar a absorção da parede rígida do tubo que normalmente deve ser baixa. Um exemplo de um bom tubo é mostrado na Figura 6.1. O resultado apresentado pelo tubo de PLA pode ser visto na Figura 6.2.

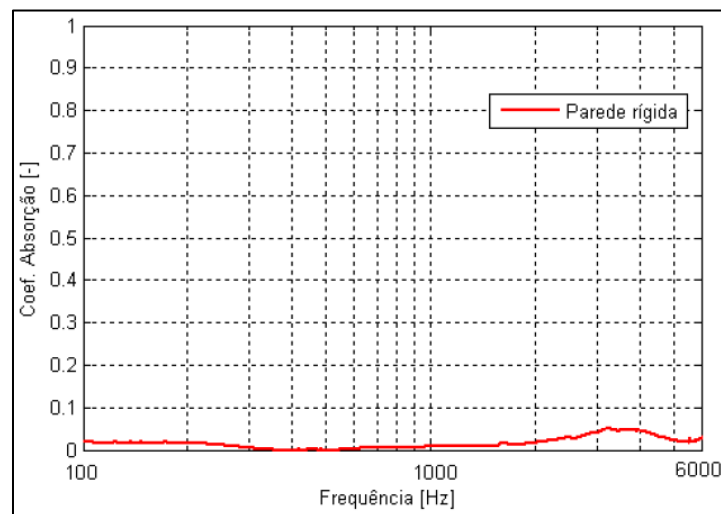


Figura 6.1. Resultado comum esperado para um ensaio de parede rígida em tubo de impedância. (Fonte: Mareze, 2013).

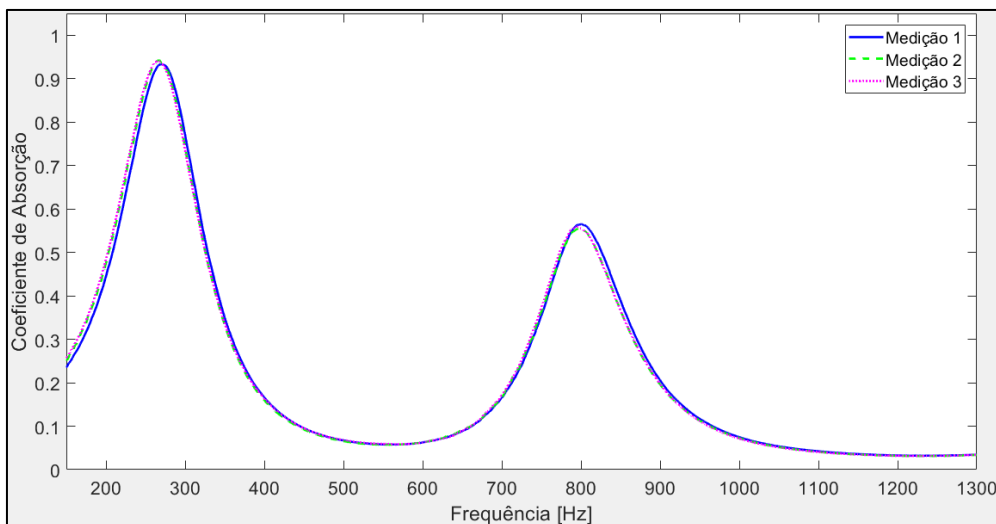


Figura 6.2. Resultado de ensaio de parede rígida apresentado pelo tubo projetado.

Já nas medições com o tubo do LVA, os resultados para as amostras de espuma comercial podem ser vistos na Figura 6.3, resultados por amostra, e Figura 6.4, média das curvas para o coeficiente de absorção sonora.

Pode-se observar que a espuma apresenta um coeficiente de absorção crescente até mais ou menos 2000 Hz e mantém um comportamento relativamente constante até em 4500 Hz com valor em torno de 0,8. Apresenta uma leve queda a partir dessa frequência e em torno de 5000 Hz apresenta valores próximos a 0,75. O coeficiente tende a crescer a partir de 5000 Hz quando atinge valores próximos a 0,9 em 6000 Hz.

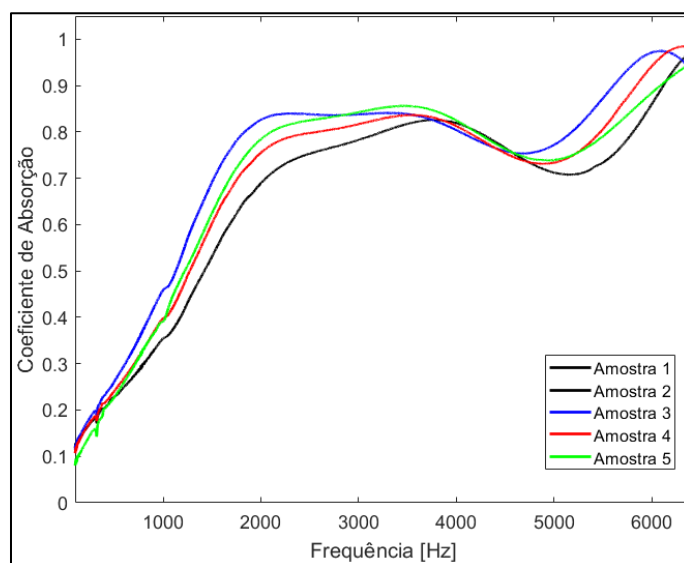


Figura 6.3. Resultados obtidos em tubo de impedância para amostras de espuma acústica comercial - Resultados de coeficiente de absorção por amostra.

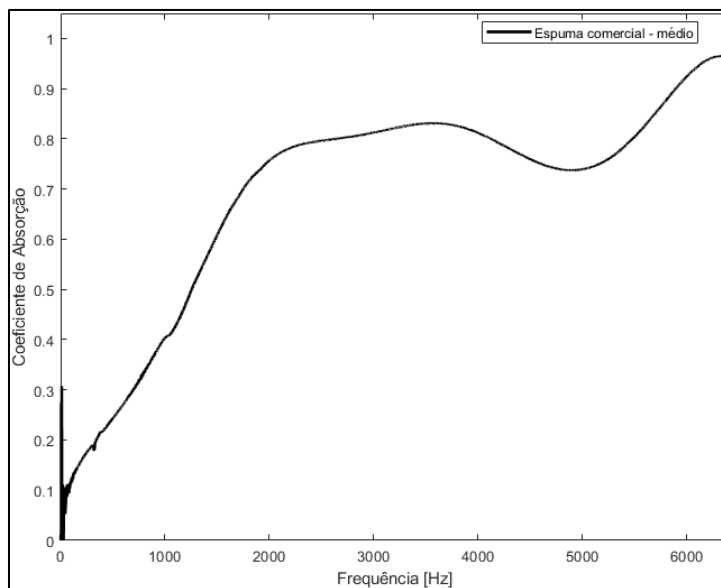


Figura 6.4. Resultados obtidos em tubo de impedância para amostras de espuma acústica comercial - curva média de coeficiente de absorção.

Na Figura 6.5 podem-se observar os resultados obtidos para as amostras de fibra de coco também sobrepostos. A média dos resultados pode ser vista na Figura 6.6. Na Figura 6.5 estão sobrepostos os resultados de 7 amostras, pois 3 dos 10 ensaios não apresentaram coerência na medição devido a, provavelmente, erros de medições talvez por conta de alocação indevida da amostra no tubo, fechamento incorreto do porta-amostra, oscilação no sistema de amostragem, entre outros.

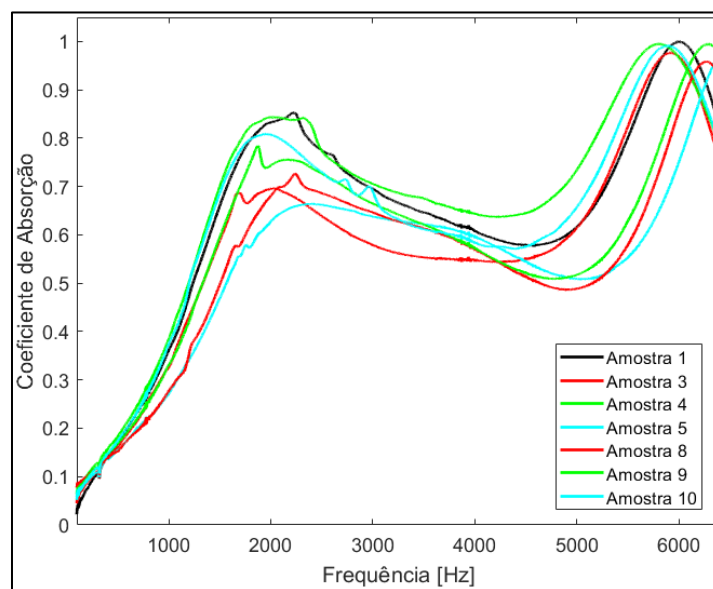


Figura 6.5. Resultados obtidos em tubo de impedância para amostras de fibra de coco - Resultados por amostra sobrepostos.

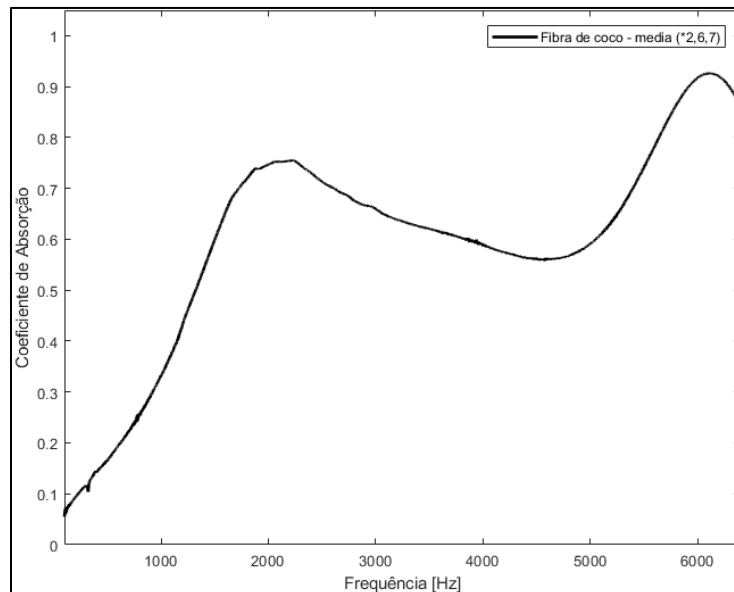


Figura 6.6. Resultados obtidos em tubo de impedância para amostras de fibra de coco - curva média de coeficiente de absorção.

Pode-se observar que a fibra apresenta um coeficiente de absorção crescente até mais ou menos 2000 Hz onde atinge valor próximo a 0,75, mas não mantém um comportamento constante como a espuma. Apresenta uma queda logo após o pico nessa frequência até atingir valor em torno de 0,55 na frequência de 4700 Hz, aproximadamente, quando a curva tende a crescer novamente até atingir valores próximos a 0,9 em 6000 Hz.

Na Figura 6.7 têm-se os resultados sobrepostos dos coeficientes de absorção médios das amostras de fibra de coco e espuma comercial. Analisando esse resultado, pode-se observar que os 2 materiais apresentam certa similaridade no coeficiente de absorção até a frequências próximas de 2000 Hz quando o coeficiente de absorção médio fica em torno de 0,8. Após, o coeficiente médio da fibra tende a valores mais baixos que o coeficiente médio da espuma. Por volta de 5500 Hz os coeficientes médios dos dois materiais tendem a apresentar valores próximos, em torno de 0,9.

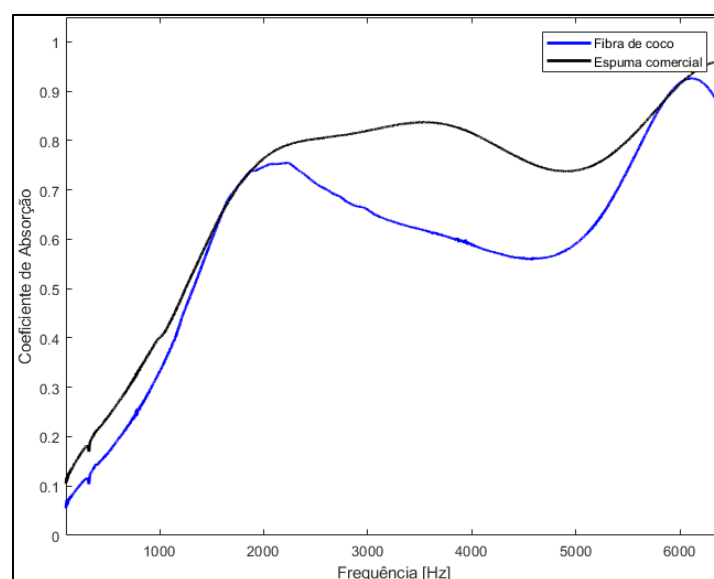


Figura 6.7. Coeficientes de absorção médios das amostras de fibra de coco e espuma comercial

Quanto às propriedades acústicas da fibra de coco em placas obtidas pela caracterização inversa, a Figura 6.8 mostra os resultados dos coeficientes de absorção médios experimental e obtido pelo modelo Johnson-Champoux-Allard, material rígido e algoritmo evolução diferencial.

Por este resultado da Figura 6.8, é possível observar bastante coerência entre as curvas experimental e a curva do modelo teórico utilizado na caracterização inversa.

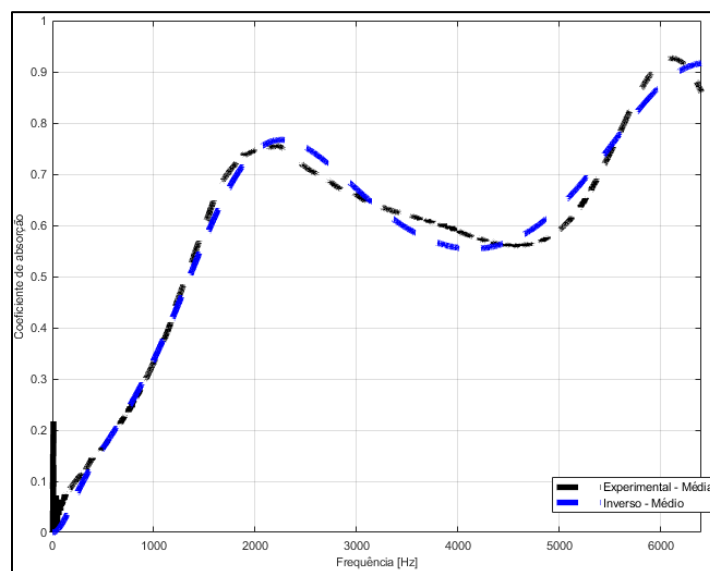


Figura 6.8. Caracterização inversa para a fibra de coco – Resultado sobre o coeficiente de absorção sonora médio

Resultados para as outras propriedades acústicas obtidas pela caracterização inversa para a fibra de coco que podem ser vistas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Propriedades acústicas da placa de fibra de coco.

Propriedade	Resultado obtido
Resistividade ao fluxo [Ns/m⁴]	2280
Porosidade	0,79
Tortuosidade	1,27
Comprimento Característico Viscoso [μm]	199
Comprimento Característico Térmico [μm]	263

Para efeito de comparação, a Tabela 6.2 traz resultados de propriedades acústicas obtidas para diferentes materiais além da fibra de coco.

Tabela 6.2. Propriedades acústicas de outros materiais além da fibra de coco pela caracterização inversa. (Fonte: Cavalheiro et al, 2017).

Material	Densidade [kg/m ³]	Resistividade ao fluxo [Ns/m ⁴]	Porosidade	Tortuosidade
Fibra de coco	200	2.280	0,79	1,27
Espuma	10	18.901	0,98	1,00
Espuma	27	5.457	0,94	1,19
Lã de rocha	32	8.870	0,99	1,01
Lã de rocha	64	33.506	0,87	1,04
Fibra - vidro	13	23.815	0,97	1,00

Deve-se ainda ressaltar que, utilizando microfones recomendados, a incerteza para determinação do coeficiente de absorção em tubos de impedância é de 1%, segundo a ISO 10354-2, o que lhe torna um ensaio muito interessante. O tubo de impedância do LVA na UFSC foi construído segundo as recomendações da referida norma.

7. CONCLUSÕES

O tubo projetado em PLA apresentou ressonâncias em algumas bandas de frequências e isso não é como um tubo de impedância deve se comportar. Não foi aferida exatamente a razão, ou razões, para essa situação ter ocorrido, no entanto há algumas hipóteses que são fortemente aceitas para tal comportamento que vão de encontro com o material e forma final do tubo como, por exemplo, alta rugosidade interna, baixa rigidez do material, porosidade relativamente alta nas paredes do tubo e leveza do conjunto em geral. Todas essas características podem contribuir para fortes vazamentos sonoros, não formação de ondas planas, vibração do tubo e conseqüentemente o resultado obtido.

Com o resultado comparativo pode-se afirmar que as amostras de espuma comercial apresentaram melhor eficiência no coeficiente de absorção acústica frente às amostras de fibra de coco, porém para uma possível aplicação comercial deve-se lembrar de que há alguns outros parâmetros físicos e econômicos que podem ser levados em consideração no momento de escolha do material mais adequado para a utilização. A fibra de coco, comercializada em placas como apresentado no presente trabalho, tende a ser mais barata em comparação a espumas acústicas. Em uma situação hipotética onde se precise aplicar um isolante acústico e não haja algum impedimento de alocação do material, pode-se aplicar ao invés de uma, mas sim duas placas de fibra, uma sobreposta a outra, o que pode resultar, em termos de absorção sonora, em uma eficiência melhor.

Outra informação importante é que o resultado para o coeficiente de absorção sonora é válido para incidência normal, o que entrega informações bastante interessantes sobre um material, porém um absorvedor sonoro aplicado em um ambiente, de forma geral, recebe incidência sonora difusa, isto é, de todas as direções possíveis na prática.

Após serem obtidos os resultados para as propriedades acústicas da fibra de coco em placa, alguns pontos interessantes puderam ser observados: A fibra de coco em placa apresenta um material em forma muito compactada, o que justifica uma densidade alta em um material de espessura relativamente baixa. Isso tem muita influência no resultado obtido para o coeficiente de absorção, uma vez que, por definição, esse coeficiente demonstra quanto um material consegue absorver energia em forma de onda e retê-la em seu seio e/ou transmiti-la. Um material que tem uma resistividade ao fluxo alta e porosidade baixa pode tender a apresentar um coeficiente de absorção sonora mais baixo em relação a materiais mais porosos e menos densos em uma comparação para uma mesma espessura. A própria espuma utilizada em comparação com a fibra no presente trabalho, de densidade em torno de 26 kg/m^3 vai de encontro com essa observação.

7.1. Sugestões para trabalhos futuros

Há na literatura diversos trabalhos realizados para construção de tubos de impedância de baixo custo. Há tubos de acrílico, plástico, PVC, entre outros. Não há limites para isso, portanto, para um trabalho futuro, pode-se pensar em outro tipo de material que se adeque melhor aos requisitos de um tubo de impedância para que esse possa operar corretamente.

Uma sugestão para um futuro trabalho é avaliar a absorção sonora da fibra de coco em um ensaio de câmara reverberante, por exemplo, o qual retorna um resultado de coeficiente de absorção difuso.

Outra sugestão de estudo futuro é avaliar as propriedades acústicas da fibra de coco em diferentes formas e não somente em forma de placa compactada. Uma fibra de coco menos densa com uma espessura em torno de 30 mm, como utilizada no presente trabalho,

por exemplo, pode apresentar resultados interessantes para as propriedades acústicas apresentadas nas Tabelas 6.1.

Uma vez validada a fibra de coco como bom material a ser empregado como isolante acústico, outro trabalho futuro possível muito importante seria transformar a fibra de coco em um material não inflamável com, por exemplo, uma resina anti-chama.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12179: **Tratamento acústico em recintos fechados**. Rio de Janeiro, p. 9, 1992.

Allard J., Atalla N. **“Propagation of Sound in Porous Media: Modeling Sound Absorbing Materials”** Wiley, United Kingdom, 2009.

Bodén, H. e Abom, M., **“Error analysis of two-microphone measurements in ducts with flow”**, JASA, vol. 83, nº 6, 1988.

Bodén, H. e Abom, M., **“Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts”**, JASA, vol. 79, nº 2, 1986.

Brandão, E. **“Acústica de Salas – projeto e modelagem”**, Blucher, 1ª edição, 2016.

Cavalheiro, T.; KulaKauskas, F.; De Santana Neto, J. P.; Fessel, M.; Kulakauskas, L; Lenzi, A. **“Método inverso para caracterização acústica de materiais porosos”**, XXVII Encontro da SOBRAC, Brasília/DF, Brasil, 2017.

Castilhos, L. F. F. **Dossiê técnico** (Aproveitamento da fibra de coco) TECPAR/BRT, 2011.

ISO 10534-2:98. **“Acoustics – Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes”** – Part 2: Transfer function, Multiple. Distributed through American National Standards Institute (ANSI), USA, 1998.

Kulakauskas, F. **“Avaliação do uso de materiais porosos na perda de transmissão de transmissão de painéis duplos”**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

Mareze, P. H. **“Análise da Influência Microgeometria na Absorção Sonora de Materiais Porosos de Estrutura Rígida”**, Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

Miguel, L. F.F.; Tamagna, A. **“Tópicos de Acústica Aplicada-Notas de Aula de Eng03015-Acústica Aplicada”**, Brasil, 1ª edição, 2007.

Seybert, A.; Ross, D. **“Experimental determination of acoustic properties using two-microphone random-excitation technique”**, The Journal of the Acoustical Society of America, 61:1362-1370, 1977.

APÊNDICE

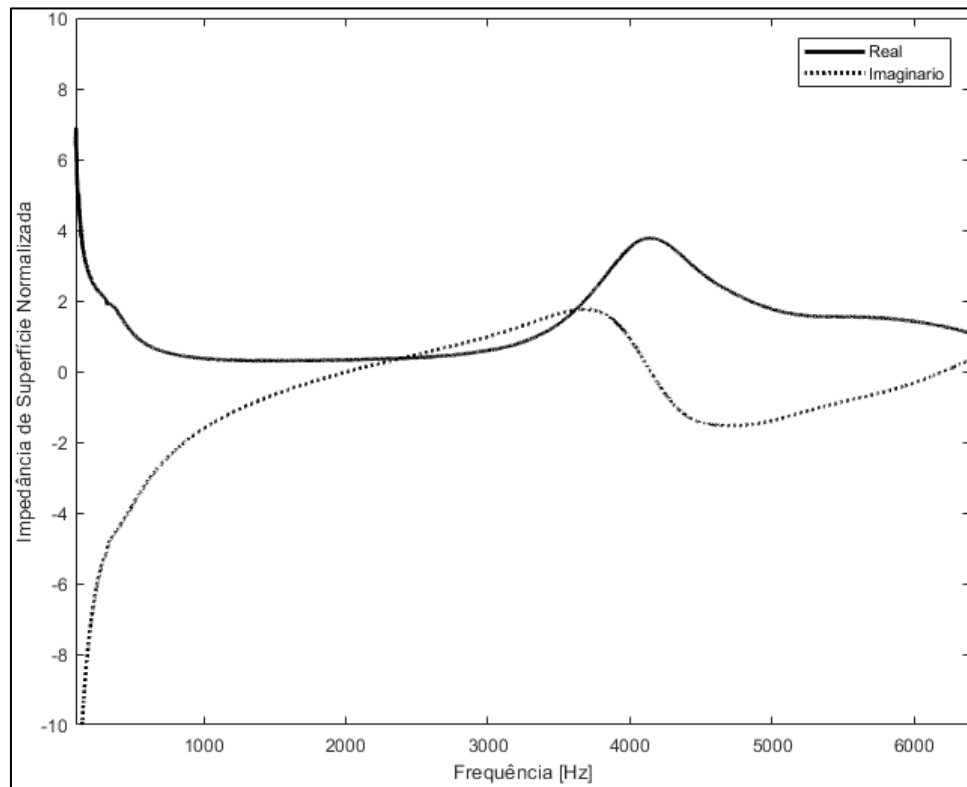


Figura A1.1. Impedância de superfície média das amostras de fibra de coco.

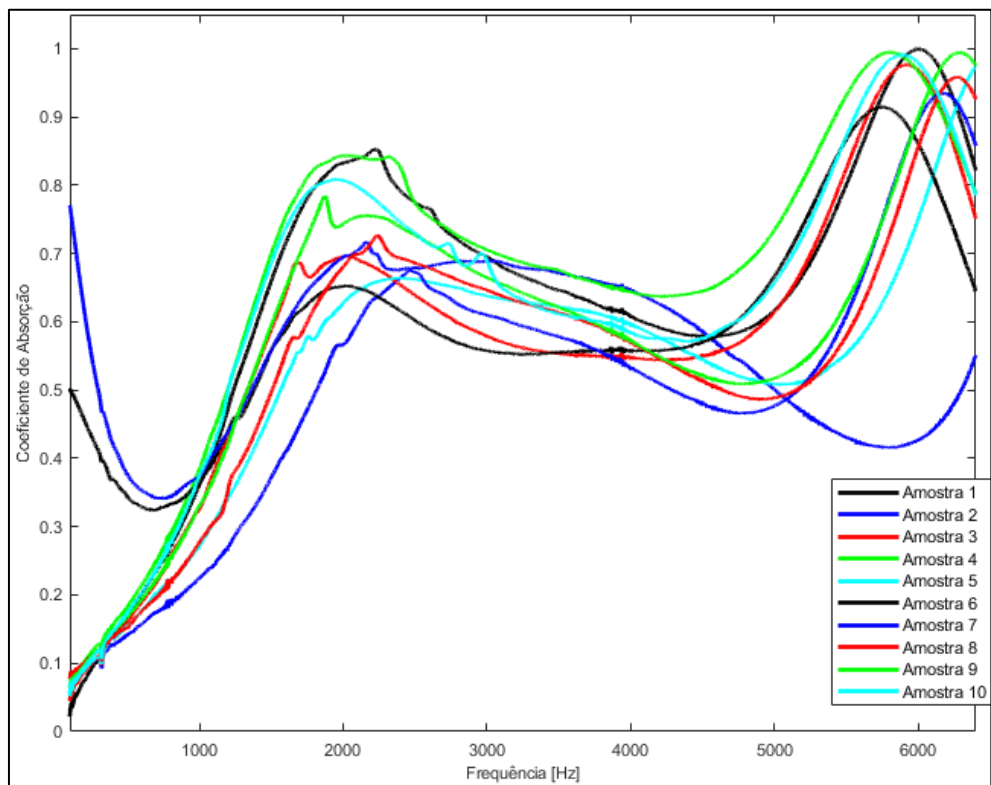


Figura A1.2. Absorção acústica de todas as amostras de fibra de coco.

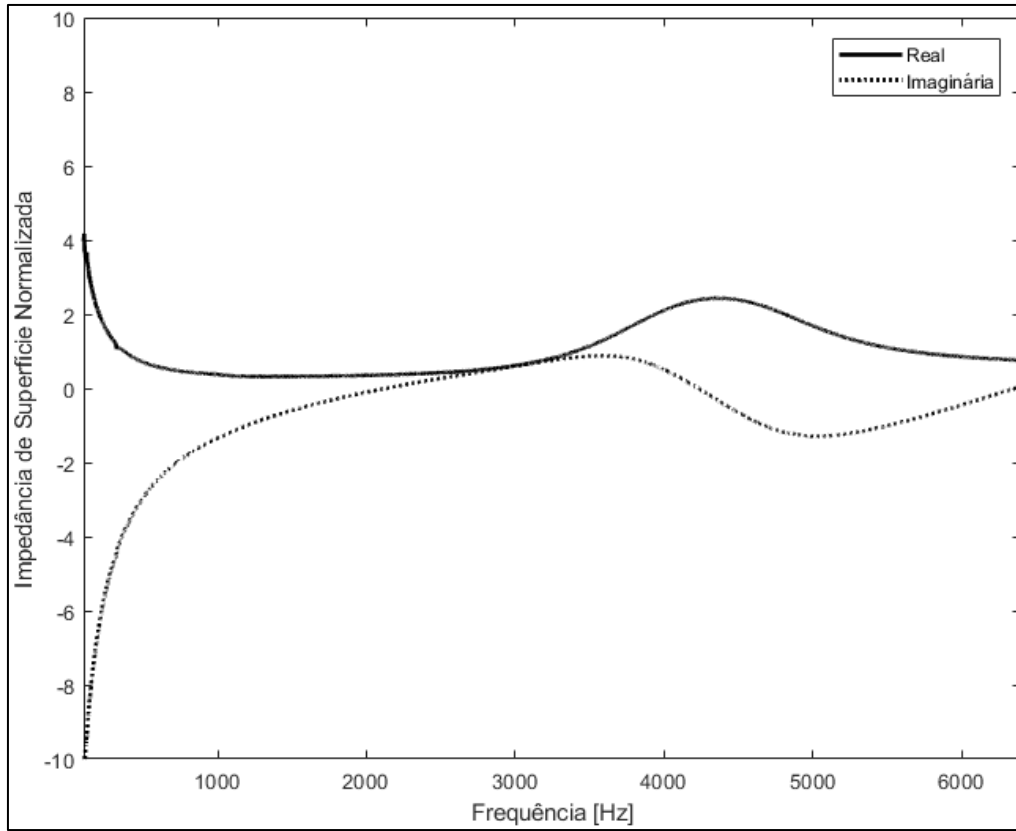


Figura A1.3. Impedância de superfície média das amostras de espuma comercial.