



## Projeto e construção de um dispositivo de determinação de resistividade ao fluxo de ar por meio do método de fluxo alternado

Bolsista: Lucas Carlquist Rabelo de Araujo RA: 220675

Orientador: Prof.Dr. Alberto Luiz Serpa

Departamento de Mecânica Computacional – DMC

Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

Vigência: 2019/2020

## 1 Introdução

Existem vários parâmetros que caracterizam um material em relação à sua habilidade de isolar um ambiente acusticamente. Um dos parâmetros mais importantes nesse âmbito é a resistividade ao fluxo de ar, cuja utilização permite calcular de modo não invasivo propriedades como densidade e diâmetro da fibra apenas com parâmetros acústicos como impedância de superfície e coeficiente de absorção [8].

Sua importância é devido a alta dependência da absorção e transmissão do som de materiais porosos em relação à resistividade ao fluxo de ar, sendo que baixos valores indicam baixa resistência à transmissão de ar, enquanto que alto valores denotam que a maioria dos poros do material está fechado [13].

Os métodos padrões de medição desse parâmetro se resumem em dois: fluxo de ar contínuo ou alternado. Ambos os casos são padronizados por várias organizações, sendo estudados nessa pesquisa os métodos descritos em ASTM C522-03 [4] e ISO 9053 [2], mais especificamente, o método de fluxo alternado.

O intuito desse trabalho é projetar, confeccionar e validar um dispositivo de baixo custo para medição da resistividade ao fluxo de ar de materiais porosos. O ponto inicial foi o projeto de Mareze [11], cuja versão foi construída em material acrílico. Ao decorrer da pesquisa, outros dispositivos foram utilizados como base deste projeto [9][7]. Outro ponto importante é que a pesquisa foi renovada, possibilitando a validação do dispositivo junto ao conteúdo adicional que será apresentado, os absorvedores acústicos naturais.

## 2 Materiais e Métodos

Tubos de impedância são utilizados para se medir diretamente o coeficiente de absorção, a perda de transmissão sonora, densidade efetiva, o módulo volumétrico efetivo e apenas indiretamente a resistividade ao fluxo de ar, tortuosidade, viscosidade e comprimento característico térmico [5].

Com um dispositivo que mede diretamente a resistividade ao fluxo de ar a partir da variação de pressão, há a possibilidade de determinar as características acústicas das amostras. De acordo com a ISO 9053 [2], essa variação de pressão é muito pequena e deveria ser medida por um microfone montado lateralmente a um tubo. A escolha do microfone foi fundamental para esse projeto, visto que como é esperado uma frequência de oscilação entre 2 Hz e 5 Hz, o microfone deveria ter sensibilidade para esse alcance, ou os experimentos com o dispositivo deveriam abranger frequências maiores utilizando os modelos empíricos corretos.



De acordo com a norma ISO 9053 [2], um dispositivo de medição de resistividade ao fluxo de ar é composto por um tubo de seção circular maior que  $95\text{ mm}$ , um oscilador e um suporte de amostra. A partir dessa afirmação a escolha de materiais teve início com um tubo de acrílico de  $4\text{ in} \times 200\text{ mm}$  e  $5\text{ mm}$  de espessura de parede, assim o diâmetro da seção circular atende à norma ( $4\text{ in} \approx 101,6\text{ mm}$ ).

Para atender às expectativas de ser possível projetar uma peça e a produzir nas instalações da UNICAMP, foi decidido que as peças de suporte do dispositivo deveriam ser em metal, devido à dificuldade de usinar acrílico, e deveria ser em um metal de usinabilidade alta como o alumínio. Definido que os materiais seriam usinados, iniciou-se os desenhos técnicos, sendo necessário considerar os seguintes pontos:

1. Os apoios das extremidades do tubo deveriam ser ajustados com vedação, a partir do uso de anéis de vedação, graxa ou silicone;
2. Suporte do oscilador LDS V201 deveria ser robusto, devido à sua massa de  $1,81\text{ kg}$ , ao mesmo tempo que deveria o estabilizar em operação;
3. Ajuste entre o pistão que oscila e a entrada para a região do tubo deveria ser de folga leve [3], ao mesmo tempo que deveria haver vedação;
4. Suporte para amostra com dimensão viável para experimentos;
5. Saída do ar que atravessa a amostra deveria ter mais de 50% de área livre, ou seja, possuir em sua extremidade uma estrutura gradeada ou furada [2].

A partir destes pontos, as seguintes ações foram completadas:

1. Teste com anéis de vedação não resultaram em vedação suficiente no encaixe entre a extremidade do tubo e os suportes, sendo necessário usinar novamente a extremidade do tubo e uso de silicone entre a extremidade do tubo;
2. Suporte do oscilador possui resistência para suportar o equipamento;
3. Como o modelo do oscilador tem carga máxima de  $17,8\text{ N}$  [1], foi utilizado uma massa de aproximadamente  $1\text{ kg}$  para exercer esforço vertical no pistão com a finalidade de definir seu nível máximo de vedação. A partir de anéis de vedação e acabamento do furo que recebe o pistão, foi obtido um melhor resultado na vedação;
4. A dimensão do diâmetro interno do suporte foi definido com  $40\text{ mm}$  baseado no material disponível no laboratório;
5. Como solução para a saída de ar, foi fixado no suporte da extremidade do tubo, uma estrutura metálica gradeada.

A montagem do dispositivo consiste nos seguintes passos:

- o oscilador foi fixado no suporte projetado por parafusos laterais;
- o pistão foi posicionado na entrada do suporte do tubo de acrílico;
- o microfone foi encaixado junto a um elástico ao furo lateral do tubo;



- a amostra foi colocada em seu suporte e posteriormente o conjunto posicionado no suporte do tubo.

Com o dispositivo montado, foi utilizado um amplificador de potência *LDS PA25e* para alimentar o oscilador e um gerador de ondas *Agilent 33120A*. Para se obter a medida do deslocamento pico-a-pico do oscilador, um acelerômetro foi posicionado no pistão projetado e a leitura dessas medidas e do microfone foram adquiridos pelo *LMS SCADAS Mobile*, transmitido para um computador com o software da *Siemens LMS TestLab*. Estes dados foram exportados para um arquivo *.mat* que foi lido e analisado no *Matlab*.

A resistividade ao fluxo de ar  $\sigma$  é utilizada em modelos empíricos simples de materiais porosos para o cálculo de sua impedância acústica e número de onda [10]. Considerando uma amostra de espessura  $d$ , cuja queda de pressão ao atravessar a amostra é de  $\Delta P$  com a velocidade do fluxo de ar a qual está sujeito  $U$ , define-se resistividade ao fluxo de ar de acordo com a equação abaixo:

$$\sigma = \frac{\Delta P}{Ud}$$

A unidade de resistividade ao fluxo de ar é o *rayls/m* no sistema de unidades MKS (metro, quilograma, segundo) [6]. Ao considerar a compressão do volume do tubo central do dispositivo  $V$ , o cálculo da resistividade ao fluxo do ar é resumido em uma equação [11]:

$$\sigma = \frac{Sp_0 10^{L_p/20}}{2\pi L f \frac{S_p h}{2\sqrt{2}} \sqrt{1 - \left( \frac{V p_0 10^{L_p/20}}{P_0 \gamma \frac{S_p h}{2\sqrt{2}}} \right)^2}}$$

onde  $S$  é a área da seção transversal da amostra,  $S_p$  é a área da seção transversal do pistão,  $L_p$  é o nível de pressão sonora no microfone,  $L$  é a espessura da amostra,  $h$  é o deslocamento pico-a-pico do pistão,  $p_0 = 2 \times 10^{-5} Pa$  é o limiar da audição,  $P_0$  é a pressão atmosférica no ambiente e  $\gamma = 1.4$  é o coeficiente de expansão adiabática. De acordo com a norma ISO 9053 [2], é necessário que o valor *rms* da velocidade do fluxo de ar  $u_{rms}$  não ultrapasse  $4 mm/s$ , logo é importante calcular este parâmetro, a partir da seguinte expressão:

$$u_{rms} = \frac{2\pi f h S_p}{S 2\sqrt{2}}$$

Como o valor medido pelo microfone  $p$  é convertido de *mV* para *Pa* no LMS, ainda há uma última expressão para o cálculo do nível de pressão sonora em *dB*:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0}$$

Os materiais que foram utilizados se resumem à 3 amostras de fibra de coco com espessuras de  $16,90 mm$ ,  $15,40 mm$  e  $17,30 mm$ , e diâmetros de  $39,90 mm$ ,  $39,80 mm$  e  $39,90 mm$  respectivamente. Do mesmo modo, amostras de tecido sintético também foram utilizadas com espessuras de  $5,14 mm$ ,  $6,51 mm$ ,  $6,20 mm$  e diâmetros  $39,92 mm$ ,  $39,89 mm$  e  $39,88 mm$ .



Para cada amostra, foram realizadas medidas em 8 frequências diferentes (5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 70  $Hz$ ). A média dos valores obtidos foi feita e o desvio padrão considerado como incerteza da medida. Além disso é necessário considerar as incertezas inerentes à frequência de saída do gerador de sinal e das dimensões dos componentes do dispositivo.

### 3 Resultados

A partir da média dos valores encontrados para as três amostras de fibra de coco foram obtidas os seguintes dados da resistividade ao fluxo de ar. No experimento com as amostras de fibra de coco, as menores frequências não resultaram em curvas senoidais no sinal do microfone e por isso não foram consideradas nos cálculos. Isso pode ter ocorrido devido à colocação da amostra no suporte permitir algum vazamento de ar que não passou pela amostra.

Outro ponto sobre esse tipo de amostra é que, de acordo com [12], as amostras de fibra de coco possuem uma resistividade ao fluxo de ar que varia de 500 a 3000  $rayls/m$ , dependendo do tratamento que é feita com a amostra e sua espessura. Para a espessura de  $16,530 \pm 0,005 mm$ , baseado em [12], era esperado um valor de em torno de 600  $rayls/m$ . Este valor foi medido entre as frequências de 20 e 30  $Hz$ , como previsto por [11], que realizou as medidas em 25  $Hz$ .

Um próximo passo seria fazer medidas com frequências baixas para diferentes valores de  $u_{rms}$  para notar se a propriedade de resistividade ao fluxo de ar se mantém dentro de uma variabilidade aceitável.

As amostras de tecido, típico componente de cobertores, mostrou um maior isolamento acústico em relação à fibra de coco, avaliado a partir do resultado da sua resistividade ao fluxo de ar, alcançando cerca de 3000  $rayls/m$  para medidas feitas entre 20 e 30  $Hz$ . A sua alta variabilidade se deu devido à compressão do material no suporte da amostra em altas frequências, que ocorreu com menos efeito nas amostras de coco por serem mais rígidas.

### 4 Conclusão

Este trabalho foi um passo inicial para o uso da resistividade ao fluxo de ar na caracterização de absorvedores de som no Laboratório de Vibroacústica da UNICAMP e a precisão nas medidas de resistividade ao fluxo de ar serão melhoradas a partir do desenvolvimento de vedações mais efetivas e um procedimento padrão de colocação de amostra.

Além disso, o projeto concentrou dados que serão utilizados em pesquisas do laboratório para caracterização das amostras utilizadas, o que irá acelerar a validação da bancada experimental e permitir o uso em pesquisas posteriores. A resistividade ao fluxo de ar é um parâmetro de extrema importância na caracterização de materiais acústicos, sendo que o estudo de modelos empíricos que utilizem esta propriedade, com o desenvolvimento de novos métodos para o medir diretamente, tende a contribuir para o campo do estudo da Acústica.

O resultado desse relatório consisti no projeto e construção do dispositivo de medição de resistividade ao fluxo de ar, mas devido à pandemia do corona vírus, conta apenas com as primeiras medições deste parâmetro tão essencial para a caracterização de isolantes



acústicos. Outros experimentos serão realizados em tempo hábil para validar esta bancada experimental e assim, permitir sua utilização com confiabilidade em outros projetos.

Como próximos passos, amostras ecológicas serão utilizadas e caracterizadas a partir do uso deste dispositivo, além do desenvolvimento de um procedimento padrão para a utilização dessa nova ferramenta do laboratório.

## Referências

- [1] Brüel & Kjær - Permanent Magnet Shaker - LDS V201. <https://www.bksv.com/en/products/shakers-and-exciters/LDS-shaker-systems/permanent-magnet-shakers/V201>, Acesso em 24 de janeiro de 2019.
- [2] ISO 9053, Acoustics - Materials for Acoustical Applications - Determination of Air-flow resistance, 1991.
- [3] NBR 6158, Sistema de Tolerâncias e Ajustes, 1995.
- [4] ASTM C522-03, Standard Test Method for Airflow Resistance of Acoustical Materials, American Society for Testing and Materials, 2006.
- [5] U. Berardi and R. Ramakrishnan. Comparison of the acoustic behavior of porous materials in compressed and uncompressed conditions. *International Congress in Acoustics*, 2016.
- [6] T. J. Cox and P. D'Antonio. *Acoustic Absorbers and Diffusers Theory Design and Application*. Spoon Press, first edition, 2004.
- [7] R. Dragonetti, C. Ianniello, and R. A. Romano. Measurement of the resistivity of porous materials with an alternating air-flow method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(2):753–764, 2011.
- [8] A. Hurrel, K. Horoshenkov, and M. Pelegrinis. The accuracy of some models for the airflow resistivity of nonwoven materials. 130:230–237, 2017.
- [9] K. U. Ingard and T. A. Dear. Measure of acoustic flow resistance. *Journal of Sound and Vibration*, 1985.
- [10] M. A. Kuczmarski and J. C. Johnston. Acoustic absorption in porous materials. *NASA STI Program*, 2011.
- [11] P. H. Mareze. Análise da influência da microgeometria na absorção sonora de materiais porosos de estrutura rígida. *Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis*, 2013.
- [12] J. Ramires, R. del Rey, J. Alba, L. Godinho, and J. Carbajo. A model for acoustic absorbent materials derived from coconut fiber. *Materiales de Construcción*, 2014.
- [13] R. D. Rey, J. P. Arenas, J. A. Fernandez, and J. R. Soreano. Evaluation of two alternatives procedures for measuring airflow resistance of sound absorbing materials. *Archives of Acoustics*, 2013.