

AVALIAÇÃO DA POROSIDADE DE MATERIAIS ABSORVENTES UTILIZADOS EM FILTROS ACÚSTICOS DISSIPATIVOS

Ana Carolina Mendonça Mansur, anamendoncamansur@gmail.com¹
Cláudia Cilene Bittencourt da Silva, claudiabittencourt2010@gmail.com¹
Vinícius Antonio Grossl, viniciusantoniogrossl@gmail.com¹
Key Fonseca de Lima, keyflima@gmail.com¹

¹Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Rua Imaculada Conceição, 1155 – Prado Velho, Curitiba – PR, 80215-901

Resumo: O Ser Humano está continuamente exposto a ruídos emitidos por veículos automotivos. Em prol da atenuação destes sons indesejáveis, em muitas situações são utilizados filtros acústicos de baixa frequência; uma vez que os ruídos automotivos possuem energia significativa até 1.000 Hz. Os materiais absorventes são geralmente fibrosos e, consequentemente, porosos. Além disso, possuem a propriedade de serem excelentes dissipadores acústicos para uma grande banda de frequência. A eficiência de um material fibroso é conduzida por duas propriedades: a porosidade (ϕ) e a resistividade ao fluxo (R). A porosidade é a fração do volume de ar do material absorvente, que é calculado pela razão entre o volume do poro livre e o volume total do material absorvente.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente a porosidade e compará-la à resistividade ao fluxo a partir de bancada no Laboratório de Dinâmica da PUCPR. Foram avaliadas amostras de 5, 10, 20 e 22 mm de espessura, ambas com 100 mm de diâmetro; sendo espumas com densidades de 26,6 e 45,5 kg/m³; e fibras naturais de coco de sisal.

Palavras-chave: porosidade; resistividade ao fluxo; material absorvente.

1. INTRODUÇÃO

No anuário da indústria automotiva brasileira, publicado em 2016 pelo Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores, a frota brasileira é estimada em 42,87 milhões de veículos automotores. Em consequência, o ser humano está exposto a ruídos indesejáveis contínuos e intermitentes emitido por estes veículos. A exposição prolongada ao ruído pode causar danos irreversíveis à nossa saúde, tais como: estresse, depressão, insônia, hipertensão, arritmia cardíaca, pré-disposição a infecções, modificação dos índices de glicose, alterações no sistema digestivo, zumbido e surdez (Griefahn *et al.*, 2006; Bistafa, 2011; Babisch *et al.*, 2014).

Para atenuar ou até mesmo eliminar os ruídos, em muitas situações, é necessário um filtro acústico. Atualmente, existem muitos trabalhos que envolvem filtros acústicos puramente reativos, ou seja, sem material absorvente em seu interior. Por outro lado, existem poucas pesquisas que tratam o comportamento acústico dos filtros com material absorvente, chamados dissipativos. A dificuldade encontrada neste tipo de silenciador é a caracterização das propriedades acústicas do material absorvente.

Pode-se afirmar de uma forma geral que os ruídos automotivos são de baixa frequência e possuem energia significativa até aproximadamente 1.000 Hz. Os filtros acústicos para baixas frequências devem ter grandes volumes e material absorvente em seu interior (Munjál, 1987; Selamet *et al.*, 2004). Os materiais absorventes são geralmente fibrosos e, consequentemente, porosos.

A eficiência de um material absorvente fibroso é conduzida por duas propriedades: a porosidade (ϕ) e a resistividade ao fluxo (R), (Champoux *et al.*, 1990; Beranek & Vér, 1992; Allard, 2009). A porosidade é a fração de volume de ar do material absorvente, sendo calculada pela razão entre o volume de poro livre e o volume total do material absorvente. Os poros fechados não contam nas medições da porosidade, uma vez que não podem ser acessados por ondas sonoras. Diz-se que um material absorvente com poros inteiramente fechados apresenta porosidade igual a zero. Um material absorvente poroso é eficaz quando a porosidade é muito próxima à unidade (Oldfield, 2006).

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente a porosidade de materiais fibrosos sintéticos e naturais, a partir de bancada construída no Laboratório de Dinâmica da PUCPR.

2.1. Objetivos Específicos

- Construção da bancada de resistividade para determinação da porosidade. Recursos provenientes do Projeto Universal aprovado em 2013 pelo professor orientador;
- Preparação das amostras de material fibroso – fibras de coco, sisal e duas espumas sintéticas com densidades de 26,6 e 45,5 kg/m³;
- Avaliação experimental da porosidade das amostras;
- Correlação entre porosidade e resistividade ao fluxo dos materiais em estudo.

3. MÉTODO

O método é dividido em construção da bancada, elaboração das amostras de fibras naturais, procedimento experimental e análise dos resultados.

3.1. Construção da Bancada

O artigo de Champoux et al., 1990 foi usado como parâmetro para a fabricação da bancada de medição da porosidade de materiais absorventes. O projeto da bancada de medição sofreu uma pequena alteração, retirando-se o reservatório de ar. A Figura 1 mostra a concepção final da bancada utilizada.

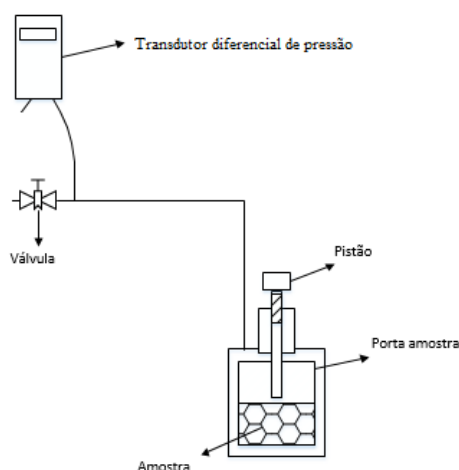


Figura 1. Esquema ilustrativo da bancada fabricada para medição da porosidade

Fonte: O autor, 2017

A alteração foi realizada devido à grande oscilação dos valores medidos no transdutor diferencial de pressão (manômetro). Apesar de Champoux et al., 1990 mencionar que a finalidade do reservatório de ar é fazer com que a pressão atmosférica seja o mais constante possível para garantir leituras estáveis no manômetro, isto não ocorreu. Ao contrário, somente foram obtidas leituras estáveis com a exclusão do reservatório.

3.1.1. Componentes utilizados na construção da bancada

Os desenhos técnicos referentes aos componentes para construção da bancada de porosidade foram elaborados pelos autores e posteriormente encaminhados ao laboratório de usinagem da PUCPR.

A Figura 2 mostra a tampa e a câmara da porta amostra, ambas as peças usinadas em alumínio.

A tampa é utilizada para selar a câmara e determina a variação de volume em função do deslocamento do pistão. É constituída por 4 furos passantes, uma conexão reta de 1/4" para tubo de 6 mm de diâmetro e furo central de M18 para encaixe do pistão. A câmara da porta amostra possui um anel O-ring na parte superior para vedação e 4 furos com rosca M6 utilizados para fixação da tampa.

O pistão também é uma peça usinada em alumínio e possui a finalidade de variar o volume e a pressão no interior da câmara.

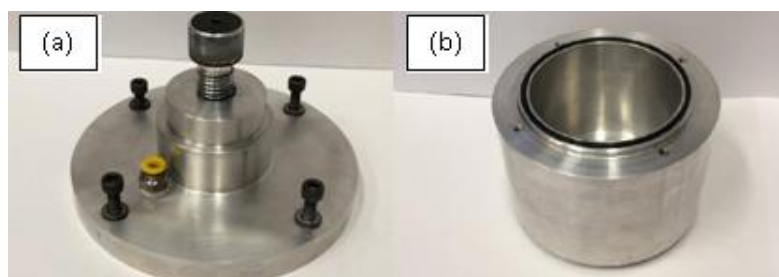


Figura 2. Tampa da câmara da porta amostra (a); câmara da porta amostra (b)

A Figura 3a mostra os três discos usinados, tendo como finalidade a calibração, ambos com diâmetro de 100 mm e espessuras de 20, 20 e 22 mm. Os discos são constituídos por um pequeno furo passante com rosca M8 no centro para que os mesmos possam ser retirados de dentro da câmara, evitando-se o vácuo. Essas três peças são utilizadas no momento da calibração para simular o volume total da amostra, tornando possível a determinação do volume total de ar do sistema de medição.



Figura 3. Discos para calibração (a); bancada para determinação da porosidade (b)

A pressão interna foi monitorada utilizando um transdutor diferencial de pressão modelo 475-000-FM; série 475 Mark III, com faixa de medição de 0 a 250 Pa, conforme mostra a Fig. 3b. O transdutor responde à diferença de pressões entre câmara e atmosfera.

Para tornar possível a conexão do sistema e isolamento do mesmo, foram adquiridas conexões retas de 1/4"; válvula reguladora de fluxo; conexão de tubos tipo T; mangueiras de 6 mm de diâmetro externo e 3 mm interno. A Figura 3b ilustra a bancada finalizada para medição da porosidade.

3.1.2. Obtenção das Amostras

Para este trabalho foram avaliadas amostras de 5, 10, 20 e 22 mm de espessuras, todas com diâmetros iguais a 100 mm, divididas em materiais absorventes sintéticos e naturais.

Tabela1. Propriedades das amostras

Material da amostra	Espessura [mm]	Espessura média [mm]	Densidade média [kg/m³]
Fibra de coco	5,0	5,7	177,4
	10,0	9,6	202,7
Fibra de sisal	5,0	5,4	203,0
	10,0	10,5	198,5
Espuma branca	22,0	22,0	45,5
Espuma rosa	20,0	20,0	26,6

Para os materiais sintéticos foram analisadas espumas brancas de 22 mm de espessura e espumas rosa de 20 mm de espessura, adquiridas na empresa “Rei das Espumas”, na cidade de Curitiba. Os materiais absorventes naturais dizem respeito às fibras de coco e sisal, ambas analisadas nas espessuras de 5 e 10 mm. A Tabela 1 traz as propriedades referentes aos materiais citados.

3.2. Procedimento De Medição

Para obtenção dos valores referentes à porosidade dos materiais, algumas equações em função de variação de volume e pressão foram utilizadas. Os dados referentes a essas variações foram obtidos a partir de ensaios experimentais na bancada construída.

3.2.1. Procedimento Analítico

A medição da porosidade tem como base a lei dos gases ideais e destina-se a medir o volume de ar contido no interior de um material poroso. A Figura 4 representa um sistema idealizado, onde uma amostra de material poroso que ocupa um volume total V_t é colocada em uma câmara e selada. No interior do material absorvente, os espaços porosos da amostra estão preenchidos por ar e ocupam um volume de ar igual à V_a . Os poros vedados (poros sem passagem de ar) não são incluídos no valor final.

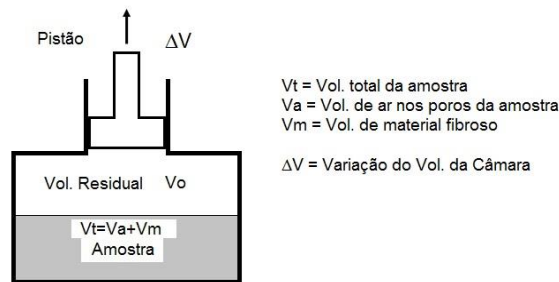


Figura 4. Esquema do dispositivo de avaliação da porosidade.

Fonte: Champoux *et al.*, 1990

A porosidade (ϕ) é definida como a fração entre o volume de ar contido nos poros (V_a) e pelo volume total da amostra (V_t), como mostram as Eq.(1) e (2).

$$\phi = V_a / V_t \quad (1)$$

$$V_t = V_a + V_m \quad (2)$$

Sendo V_m o volume do material absorvente condicionado na câmara, o volume total de ar na câmara de ar (V) é definido por:

$$V = V_a + V_o \quad (3)$$

Entende-se por V_o o volume residual da câmara da amostra. Inicialmente, a pressão na câmara da amostra é a pressão atmosférica P_o . Se o volume da câmara é aumentado de uma quantidade ΔV pelo movimento de um pistão, a pressão no interior da câmara também irá se modificar de uma quantidade ΔP . Considerando o ar no interior da câmara como um gás ideal e assumindo que esta expansão seja isotérmica, tem-se que:

$$P_o V = (P_o + \Delta P)(V + \Delta V) \quad (4)$$

Consequentemente, a medida da variação da pressão ΔP , conhecendo P_o e ΔV , permite que o volume de ar V seja conhecido através de:

$$V = -[(P_o + \Delta P) \Delta V] / \Delta P \quad (5)$$

Desta forma, torna-se possível determinar V_a a partir da Eq. (3):

$$V_a = V - V_o \quad (6)$$

Por fim, para o cálculo do volume total de ar (V') a ser determinado pela calibração é definida como sendo:

$$V' = V_o - V_t \quad (7)$$

3.2.2. Procedimento experimental

O procedimento para realização do ensaio é relativamente simples e segue uma sequência estabelecida.

Primeiramente, é realizada a calibração do sistema. Foi avaliada a câmara vazia e com três amostras maciças ($V_a = 0$) de alumínio, ou seja:

- 1) Câmara da porta amostra vazia;
- 2) Câmara da porta amostra com um disco de 20 mm de espessura;
- 3) Câmara da porta amostra com um de 20 e de 22 mm de espessura;
- 4) Câmara da porta amostra com os três discos de 20, 20 e 22 mm de espessura.

Nesta etapa, variou-se a pressão no interior da câmara com o movimento do pistão para cima em intervalos de aproximadamente 0,7 mm. A medição da subida do pistão foi realizada com auxílio de um paquímetro digital da marca TESA com precisão centesimal. Cada elevação do pistão representa uma variação de volume da porta amostra de aproximadamente $\Delta V = 0,11 \text{ mm}^3$.

Após a calibração, a amostra porosa é colocada na câmara cilíndrica de diâmetro igual a 100 mm. O volume dessa câmara é alterado ao movimentar-se o pistão para fora. Este tem eixo de $14,5 \pm 0,01 \text{ mm}$ de diâmetro e uma rosca M18 na parte superior para sua movimentação.

O procedimento para realização do ensaio obedece à sequência:

- 1) Adição dos três discos de alumínio para diminuir o volume interno;
- 2) Fixação da amostra no interior da câmara;
- 3) Fechamento da porta amostra de modo que permaneça vedada sem vazamento;
- 4) Abertura da válvula para que se estabeleça a pressão atmosférica;
- 5) Depois de equalizado o transdutor diferencial de pressão (manômetro marcando zero), realiza-se o fechamento da válvula;
- 6) Eleva-se o pistão em intervalos de aproximadamente 0,7 mm de modo a expandir o volume e diminuir a pressão no interior da câmara;
- 7) Anota-se os deslocamentos do pistão para determinar cada variação do volume;
- 8) Anota-se a variação de pressão apresentada no transdutor diferencial de pressão a cada momento em que o pistão permanecer estático. Nesta etapa, deve-se esperar o manômetro estabilizar a leitura em aproximadamente 30 s.

3.2.3. Obtenção da porosidade

Com os valores obtidos a partir do procedimento experimental, retorna-se às fórmulas apresentadas na seção 2.2.1. A substituição dos valores pertinentes às variações de volume (ΔV) e pressão (ΔP) nas eq.(5), (6) e (7), determina o volume total de ar (V'). Com este novo valor de V' , subtrai-se o volume dos discos maciços. Retorna-se à Eq.(7) para se obter o volume residual contido na câmara (V_0). Com a Equação (5), calcula-se o volume aparente (V); e com auxílio da Eq.(6), obtém-se o volume de ar na amostra (V_a). Por fim, calcula-se o valor da porosidade (ϕ) através da Eq.(1).

4. RESULTADOS

Ao finalizar a calibração foram encontrados diferentes valores de V_0 (volume residual) em cada uma das avaliações descritas na seção 2.2.2. A partir disso, é possível a determinação de V' , onde V_t é conhecido pelas dimensões dos discos presentes nas avaliações e portanto, obtém-se um padrão para V' conforme determina Champoux *et al.*, 1990. A Figura 5 mostra o volume total de ar ($V_0 + V_t$) em função da $-\Delta P$.

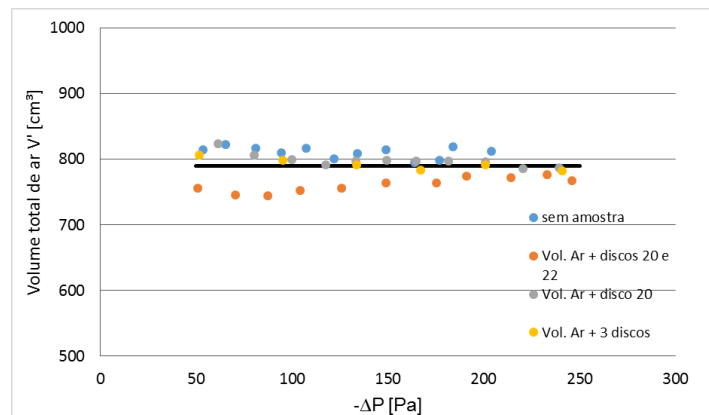


Figura 5. Calibração do sistema de medição

O volume total de ar V' é quase constante, dependendo do valor de ΔP e V_t . Para as avaliações deste projeto, o volume total de ar na câmara é definido como sendo $V' = 790,3 \pm 11,08 \text{ cm}^3$. Este valor é adotado como padrão para os resultados da porosidade das amostras de coco, sisal e espumas analisadas.

Para as demais amostras, variou-se o volume da câmara com uso do pistão e foi determinada a porosidade ϕ . A Figura 6 apresenta os resultados da porosidade para as amostras de espuma com 22 e 20 mm de espessura. Para ΔP maiores de 50 Pa, as porosidades são constantes e se obtém a porosidade de $\phi = 0,87 \pm 0,01$ para espuma de 22 mm e $\phi = 0,91 \pm 0,01$ para espuma de 20 mm de espessura.

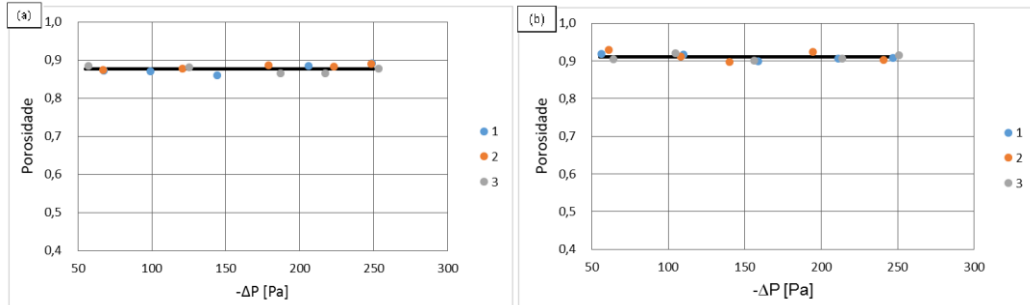


Figura 6. Resultado da porosidade para três amostras de espuma branca de 22 mm (a); resultado da porosidade para três amostras de espuma rosa de 20 mm (b)

A Figura 7 apresenta os resultados referentes às amostras de sisal de 5 e 10 mm, respectivamente. As porosidades são constantes para ΔP maiores que 100 Pa em amostras de 10 mm, obedecendo ao intervalo de erro experimental máximo de 5%.

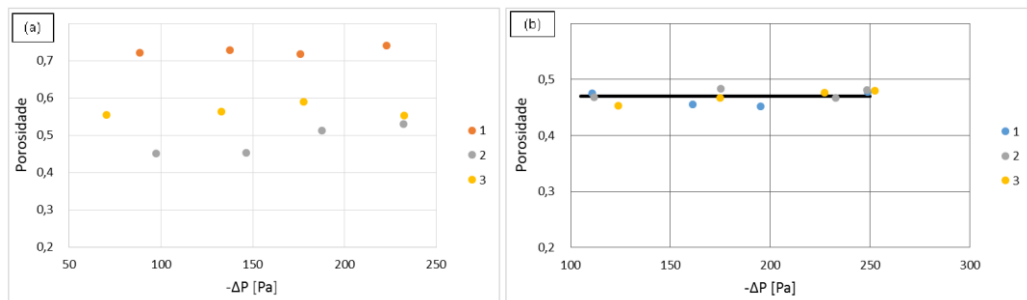


Figura 7. Resultado da porosidade para três amostras de fibra de sisal com 5 mm de espessura (a); resultado da porosidade para três amostras de fibra de sisal com 10 mm de espessura (b)

O primeiro gráfico diz respeito às amostras de 5 mm de espessura da fibra de sisal. Por apresentarem uma diferença elevada entre si, não foi possível determinar um valor constante da porosidade, uma vez que os mesmos ultrapassaram o erro experimental máximo. Já para as amostras de 10 mm deste mesmo material (7-b), as porosidades são constantes para variações de pressão superiores a 100 Pa. Sendo assim, a porosidade apresenta valor de $\phi = 0,46 \pm 0,01$.

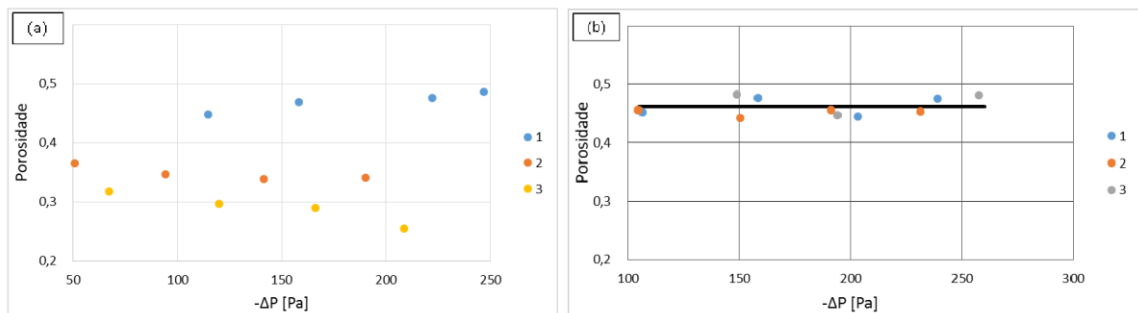


Figura 8. Resultado da porosidade para três amostras de fibra de coco com 5 mm de espessura (a); resultado da porosidade para três amostras de fibra de coco com 10 mm de espessura (b)

Assim como as amostras de sisal de 5 mm, as fibras de coco para esta mesma espessura apresentaram resultados dispersantes, como pode ser facilmente observado na Fig. 8a. Desta forma, verifica-se que a metodologia empregada

não é adequada para espessuras finas. Já para as amostras de coco com espessuras de 10 mm, a porosidade pode ser obtida e encontra-se no valor de $\phi = 0,46 \pm 0,01$; conforme Fig. 8b.

Com as medições referentes à avaliação da porosidade realizadas, parte-se para a última etapa desta pesquisa – relacionar os valores da porosidade (ϕ) quanto à resistividade ao fluxo (R) das amostras de espumas e fibras naturais utilizadas. A R já fora determinada nos anos de 2015 e 2016 pelos autores e posteriormente publicada em Lima *et al.*, 2016. A Tabela 2 mostra a correlação entre as propriedades avaliadas.

Tabela2. Correlação entre porosidade (ϕ) e resistividade ao fluxo (R)

Material da amostra	Espessura [mm]	Densidade média [kg/m ³]	Porosidade média	Resistividade ao fluxo [Pa.s/m ²]
Fibra de coco	5,0	211,1 ± 9,5	-	5,97
	10,0		0,46 ± 0,01	
Fibra de sisal	5,0	228,4 ± 12,3	-	4,29
	10,0		0,47 ± 0,01	
Espuma branca	22,0	45,5	0,88 ± 0,01	16,60
Espuma rosa	20,0	26,6	0,91 ± 0,01	4,10

Cabe ressaltar que a relação entre as propriedades somente foi possível com as amostras de mais de 10 mm de espessura, uma vez que para amostras de 5 mm de espessura a metodologia utilizada conduz a resultados imprecisos.

5. CONCLUSÃO

Os resultados encontrados foram satisfatórios para as amostras com espessuras acima de 10 mm, uma vez que os valores de porosidade apresentaram-se constantes para os materiais estudados. O mesmo não se pode concluir para as amostras de 5 mm, dada a dificuldade de manipulação das fibras durante a fabricação. Pode-se dizer, ainda, que a imprecisão dos resultados referentes às amostras de 5 mm para as fibras de coco e sisal, diz respeito à baixa porosidade apresentada pelas mesmas. Conclui-se em primeira instância que a metodologia não é ideal para amostras de baixa densidade e espessuras finas. Neste caso, recomenda-se o uso de materiais mais densos e mesma espessura.

Para todas as amostras avaliadas foi possível observar uma pequena flutuação da pressão até sua estabilização no transdutor diferencial, quando aplicado à câmara uma expansão do pistão para obtenção das leituras. Uma das possíveis causas diz respeito à variação de temperatura interna, uma vez que em poucos segundos ocorre a expansão dos gases em função do calor gerado e dissipado pelas paredes de alumínio. Nestas condições, o isolamento térmico da bancada garantiria melhora dos resultados.

Conclui-se também que a porosidade (ϕ) não tem relação direta com a resistividade ao fluxo (R). Isso é facilmente interpretado para amostras de espuma, cujos valores similares quanto à porosidade não acontecem quando comparadas entre si para o parâmetro da resistividade ao fluxo. Para uma melhor correlação entre a porosidade e a resistividade ao fluxo, recomenda-se o estudo da tortuosidade de materiais absorventes utilizados em filtros acústicos.

Autores como Beranek (1992), Gerges (2000); Selam *et al.*, (2004); Oldefield, (2006); Allard & Atalla, (2009) e Lima *et al.*, (2016); afirmam que materiais de média ou alta porosidade com resistividade de fluxo alta são desejáveis para serem aplicados como materiais absorventes em filtros acústicos dissipativos.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Projeto Universal pelos recursos financeiros disponibilizados no ano de 2013 para construção da bancada de avaliação da porosidade. Agradecem, ainda, aos incentivos financeiros da Capes, Fundação Araucária e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUCPR.

7. REFERÊNCIAS

- Allard, J. F. and Atalla, N., “Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials”, 2 ed, John Wiley & Sons, (2009).
- Babisch, W., Wölke, G., Heinrich, J., Straff, W. Road traffic noise and hypertension Accounting for the location of rooms. Environmental Research, vol. 133, p. 380-87, 2014.
- Beranek, L.L. and Vér, I.L. Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications, John Wiley and Sons, New York, (1992).
- Bistafa, S. R., Acústica Aplicada ao Controle de Ruído, 2ª ed., editora Edgard Blucher, 2011.
- Champoux, Y.; Stinson, M. R. and Daigle, G. A., “Air-based system for the measurement of porosity”, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 89, pp. 910-916, 1991.
- Gerges, S. N. Y., Ruído: Fundamentos e Controle, 2ª ed., editora NR Consultoria e Treinamento, Florianópolis, 2000.

- Griefahn B., Marks A., Robens S. Noise emitted from road, rail and air traffic and their effects on sleep. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 295, p. 129-40, (2006).
- Lima, K. F.; Barbieri, N.; Barbieri, R.; Grossl, V. A. Determination of the acoustical properties of sisal and coconut fiber samples based on the flow resistivity experimental assessment. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 140, issue 4, pp. 3141-3141, 2016.
- Munjal, M. L. *Acoustics of Ducts and Mufflers*. Wiley-Interscience, 1987.
- Oldfield, R., *Improved membrane absorbers*, Dissertation, University of Salford, UK, Salford, 2006.
- Selamet, A. and Xu, M. B., Lee, I. J. and Huff, N. T., Analytical Approach for sound attenuation in perforated dissipative silencers, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 115, n.º 5, pp. 2091-2099, 2004.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EVALUATION OF THE POROSITY OF ABSORBENT MATERIALS USED IN DISSIPATIVE ACOUSTIC FILTERS

Ana Carolina Mendonça Mansur, anamendoncamansur@gmail.com¹
Cláudia Cilene Bittencourt da Silva, claudiabittencourt2010@gmail.com¹
Vinícius Antonio Grossl, viniciusantoniogrossl@gmail.com¹
Key Fonseca de Lima, keyflima@gmail.com¹

¹Pontifical Catholic University of Paraná, Imaculada Conceição Street, 1155 – Prado Velho, Curitiba – PR, 80215-901

Abstract. *Man is continually exposed to noise emitted by automotive vehicles. In order to attenuate these undesirable sounds, in many situations low frequency acoustic filters are used; since automotive noise has significant energy up to 1,000 Hz. The absorbent materials are generally fibrous and, therefore, porous. In addition, they have the property of being excellent acoustic waster for a large frequency band. The efficiency of a fibrous material is driven by two properties: the porosity (ϕ) and the resistivity to the flow (R). The porosity is the fraction of the air volume of the absorbent material, which is calculated by the ratio of the free pore volume to the total volume of the absorbent material.*

This work aims to evaluate experimentally the porosity and resistivity to flow from stand in the Laboratory of Dynamics of PUCPR. Samples of 5, 10, 20 and 22 mm thickness were evaluated, both with 100 mm diameter; being foams with densities of 26.6 and 45.5 kg / m³, sisal coconut fibers.

Keywords: *porosity, flow resistivity, absorbent material.*