

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA
XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Estudo de erros de medição da resistividade de materiais de absorção: simulação computacional e método experimental

Datsch Jr., S. P.¹; Mareze, P. H.¹; Fonseca, W. D'A.¹

¹ Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil,
{sadi.datsch, paulo.mareze, will.fonseca}@eac.ufsm.br

Resumo

A resistividade ao fluxo de ar é um dos parâmetros macroscópicos mais importantes na caracterização de materiais de absorção. Neste trabalho será abordado o método experimental proposto por Dragonetti, Ianniello e Romano e o método normatizado pela ISO 9053-2:2020. O primeiro apresenta limitações quanto a faixa de frequência útil e os limites de obtenção da resistividade. O segundo propõe medidas usando um fluxo alternado na frequência de 2 Hz, que podem conter erros devido à baixa sensibilidade dos transdutores (microfones e acelerômetros). Assim, um dos objetivos deste trabalho é mapear os citados erros de obtenção da resistividade ao fluxo em relação à escolha da espessura do material usando modelagem numérica com a frequência de 25 Hz. Os métodos experimentais supracitados foram simulados computacionalmente pelo Método de Elementos Finitos (FEM). O mapeamento dos erros de ambos os métodos permite identificar qual deles é mais indicado para realizar a medição de resistividade ao fluxo de acordo com diferentes tipos de materiais (porosos ou perfurados), observando as limitações de espessura e resistividade ao fluxo de cada método. Bancadas experimentais foram construídas pelos autores para avaliar os dois métodos, observando as regiões de maior confiabilidade previamente simuladas. Dois tipos diferentes de materiais (Material A e Material B) foram medidos com as duas bancadas e uma análise estatística dos dados foi realizada para avaliar as variações entre corpos de prova e também na própria influência da montagem do material nos tubos. As bancadas apresentaram razoável estabilidade de dados, sendo que o Material A (melamina) apresentou resistividade média de 10,94 kNs/m⁴ pelo método normatizado e 11,12 kNs/m⁴ para o Método de Dragonetti, os quais corroboram com dados da literatura.

Palavras-chave: método de Dragonetti, ISO 9053-2, mapeamento de erro, resistência ao fluxo de ar.

PACS: 43.10.Df, 43.15.+s, 43.20.Ye, 43.80.Vj.

Study of measurement errors of the resistivity of absorption materials: computer simulation and experimental method

Abstract

Airflow resistivity is one of the most important macroscopic parameters in the characterization of absorption materials. In this work, the experimental method proposed by Dragonetti, Ianniello, and Romano and the method standardized by ISO 9053-2:2020 is discussed. The first has limitations regarding the useful frequency range and the limits for obtaining resistivity. While the second proposes measurements using an alternating flow at a frequency of 2 Hz, which may contain errors due to the low sensitivity of the transducers (microphones and accelerometers). Thus, one of the objectives of this work is to map the aforementioned errors in obtaining the flow resistivity in relation to the choice of material thickness using numerical modeling with a frequency of 25 Hz. The aforementioned experimental methods were computationally simulated by the Finite Element Method (FEM). The mapping of the errors of both methods allows identifying which one is more suitable to carry out the measurement of flow resistivity according to different types of materials (porous or perforated), observing the limitations of thickness and flow resistivity of each method. Experimental benches were built by the authors to evaluate the two methods, observing the regions of greater reliability previously simulated. Two different types of materials (Material A and Material B) were measured with the two benches and statistical analysis of the data was performed to evaluate the variations among specimens and also the influence of the material assembly in the tubes. The benches performed reasonable data stability. Material A (melamine) have shown an average resistivity of 10,94 kNs/m⁴ for the standardized method and 11,12 kNs/m⁴ for Dragonetti's method, which corroborates with literature data.

Keywords: Dragonetti method, ISO 9053-2, error mapping, airflow resistance.



1. INTRODUÇÃO

A vasta gama de materiais utilizados na Engenharia Acústica atualmente permite que determinados parâmetros apresentem ampla variação de valores dentre os diferentes materiais, como é o caso da *resistividade ao fluxo* que pode assumir desde valores superiores à 10^3 Ns/m⁴ até valores abaixo de 10^6 Ns/m⁴. Devido a essa ampla faixa possível, o aparecimento de erros dependentes de diferentes condições de contorno nos diversos métodos de medição de tal parâmetro são passíveis de ocorrer. A resistividade ao fluxo é um parâmetro necessário em equações empíricas ou fenomenológicas que descrevem o comportamento acústico dos materiais porosos, sendo este o mais importante parâmetro para a descrição de tais materiais [1]. Há diversos métodos para se obter as informações de resistividade ao fluxo, neste trabalho serão abordados dois métodos diretos para fins de comparação: (i) o método proposto por Dragonetti¹, Ianniello e Romano [2] e (ii) o método normatizado pela ISO 9053-2 (publicada em 2020).

Os métodos abordados permitem obter a resistividade ao fluxo de maneiras distintas. No método de Dragonetti *et al.* [2] esse dado é obtido a partir da razão entre a pressão acústica das duas cavidades do aparato, das características geométricas da amostra e da frequência tonal utilizada para realizar a medição. O método normatizado pela ISO 9053-2:2020 [3] utiliza parâmetros similares, utilizando a pressão sonora em uma cavidade selada como referência e, ainda, o valor do deslocamento eficaz do pistão na frequência tonal selecionada.

Neste trabalho os métodos supracitados serão simulados computacionalmente via Método de Elementos Finitos (em Matlab) [4] afim de mapear regiões de maior ou menor erro. A variação da espessura e resistividade ao fluxo de ar permitirão observar combinações nas quais os métodos apresentam desempenhos adequados. Assim, será possível indicar o método com menor erro percentual para medir materiais porosos com diferentes características físicas, nesse caso, propondo uma

frequência mais elevada para estimativa (25 Hz). Após observar regiões do mapa simulado com erro percentual aceitável (abaixo de 5%) é então possível confirmar experimentalmente os resultados por meio de ensaios em bancadas usando as mesmas condições.

2. METODOLOGIA

Esta seção destacará pontos importantes para compreensão das duas abordagens utilizadas no trabalho. Ainda, é interessante aclarar que o método proposto por Dragonetti, Ianniello e Romano [2] não é normatizado.

2.1 Método normatizado ISO 9053-2:2020

O método normatizado propõe a utilização de um tubo fechado em uma das extremidades por um pistão e outra terminação acoplada com o corpo de prova a ser ensaiado, como o ilustrado na parte superior da Figura 1. O aparato possui também um microfone para captar o nível de pressão sonora (NPS) no interior do tubo para o cálculo da resistividade ao fluxo, além de um acelerômetro acoplado ao alto-falante para medir o deslocamento do pistão.

A norma propõe a realização de duas medições para obter os dados necessários para o cálculo da resistividade ao fluxo. A primeira é com o corpo de prova do qual se deseja obter o valor da resistividade ao fluxo e outra seria a cavidade de ensaio hermeticamente selada (condição de máximo valor de resistividade ao fluxo de ar). Isso permite que pequenos erros relacionados ao instrumento de ensaio sejam reduzidos, tornando os resultados mais confiáveis, bem como avaliar por meio da razão entre os dados medidos se o erro associado é aceitável. Neste trabalho, afim de eliminar a influência de ruído residual e utilizar a mesma bancada para ambos os métodos estudados, a cavidade inferior apresentada na Figura 1 foi utilizada como cavidade fechada. O fato das cavidades superior e inferior possuírem o mesmo volume permitiu uma aplicação combinada do mesmo aparato para os dois ensaios.

Como supracitado, o método utiliza os dados de duas medições para a realização dos cálculos, logo, pressões diferentes são obtidas, a saber, a pressão sonora com o material investigado (P_s) e a pressão sonora com o tubo hermeticamente

¹Dentro deste artigo o método proposto por Dragonetti, Ianniello e Romano [2] será chamado de forma abreviada de “Método Dragonetti” ou ainda referenciado como “Dragonetti *et al.* [2]”.

fechado (P_h) — ambas em Pascal. Segundo a norma, a razão entre essas duas pressões é proporcional à diferença dos níveis de pressão sonora (L_p) em cada um dos casos, permitindo que um valor de NPS, em decibel, seja utilizado ao invés da pressão eficaz como mostra a equação

$$\frac{P_s}{P_h} = 10^{\frac{L_{p,s} - L_{p,h}}{20}}. \quad (1)$$

Dada a dificuldade de se medir exatamente a velocidade de volume do fluxo de ar (q), essa razão pode ser substituída pela razão entre os deslocamentos (h) do pistão, em metros, para os casos com amostra e com cavidade selada, pois estes dados são proporcionais. Assim, obtém-se

$$\frac{q_h}{q_s} = \frac{h_h}{h_s}, \quad (2)$$

na qual h_s é o deslocamento do pistão com o corpo de prova posicionado na extremidade da cavidade e h_h é o deslocamento do pistão com o tubo hermeticamente fechado.

Utilizando as relações de proporção descritas e os procedimentos apresentados em norma, a resistividade ao fluxo pode ser obtida com o uso da seguinte equação

$$\sigma = \frac{A \cdot 10^{\frac{L_{p,s} - L_{p,h}}{20 \text{ dB}}}}{d \omega \frac{V}{k' P_0}} \frac{h_h/h_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{h_h}{h_s} \cdot 10^{\frac{L_{p,s} - L_{p,h}}{20 \text{ dB}}} \right)^2}}, \quad (3)$$

na qual A e d representam a área (m^2) e a espessura (m) da amostra, respectivamente. A variável $\omega = 2\pi f$ representa a frequência angular (rad/s) e V o volume da cavidade superior (m^3), neste caso o volume da cavidade inferior também pode ser usado por ser igual ao superior. A pressão atmosférica (em Pascal) e o coeficiente de expansão adiabática corrigido (adimensional) são representadas por P_0 e k' , respectivamente. Cabe citar que a correção do coeficiente de expansão adiabática é dependente do volume e da área de superfície interna da cavidade utilizada e da espessura da camada limite térmica do ar. Neste caso, os valores de k' e P_0 utilizados nas simulações foram de 1,39 (–) e 101,32 kPa, respectivamente.

2.2 Método Dragonetti

O método proposto por Dragonetti, Ianniello e Romano [2] utiliza também um instrumento conforme ilustrado na Figura 1 para medir a pressão nas duas cavidades. A resistência ao fluxo é obtida a partir da parte imaginária da razão entre as pressões sonoras nas cavidades superior e inferior dividida pela compliância acústica da cavidade inferior e pela frequência angular.

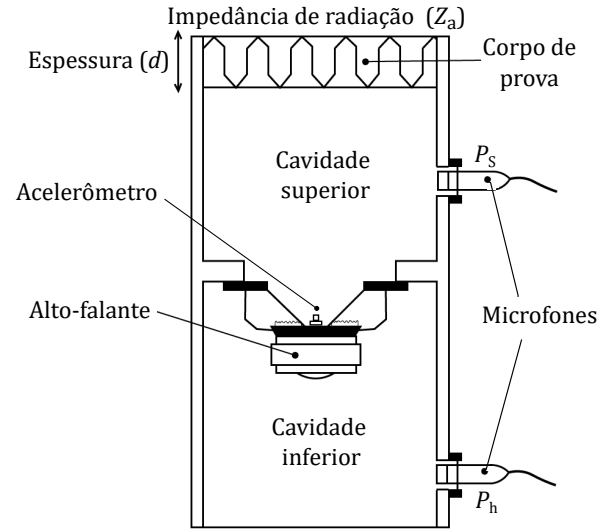


Figura 1: Modelo de bancada utilizada para o Método Dragonetti [2].

De acordo com Dragonetti *et al.* [2], a propagação acústica através da amostra porosa com suas condições de contorno pode ser calculada via modelo matemático a partir do qual pode-se descrever a impedância acústica específica do sistema vista pela onda sonora, tal que:

$$Z = \frac{Z_c}{\phi} \frac{-j Z_a \cot(k_c d) + Z_c}{Z_a - j Z_c \cot(k_c d)}, \quad (4)$$

na qual ϕ é a porosidade do material (adimensional), k_c é o número de onda do material poroso (adimensional) e $j = \sqrt{-1}$. Ainda, a impedância característica do material poroso é representada por Z_c e a impedância de radiação por Z_a , ambas com unidade em Rayl.

Considerando as aproximações e simplificações descritas por Allard e Atalla [5] para descrever a impedância de materiais obtém-se a equação

$$Z_a = \sigma d + j \omega d \frac{\rho_0 \alpha_\infty}{\phi} \left(1 + \frac{2 \alpha_\infty \eta}{\sigma L_v^2 \phi} \right), \quad (5)$$



em que α_∞ é a tortuosidade do material (adimensional), L_v é o comprimento característico viscoso (m), η é a viscosidade dinâmica do ar (Pas) e ρ_0 é a densidade do ar (kg/m^3). Com o intuito de simular o método em questão, algumas variáveis tiveram seus valores estimados, sendo $\eta = 1,83 \times 10^{-5}$ Pas e $\rho_0 = 1,19 \text{ kg/m}^3$.

Utilizando a parte imaginária da razão entre as pressões das cavidades superior e inferior (r) e a impedância descrita pela Equação (5) juntamente com as simplificações propostas pelo autor do método, pode-se obter a equação que descreve esta razão como

$$\Im(r) = -\omega C_{dw} R_s, \quad (6)$$

na qual R_s é a resistência ao fluxo (Ns/m^3) obtida pela multiplicação da resistividade ao fluxo (σ , em Ns/m^4) pela espessura do material (m). O termo C_{dw} é a compliância acústica na cavidade inferior dividida pela área da amostra, sendo definido em m^3/Pa . Isolando a resistividade ao fluxo na equação anterior obtém-se

$$\sigma = -\frac{\Im(r)}{\omega C_{dw} d}. \quad (7)$$

2.3 Método de Elementos Finitos para simulação acústica de materiais porosos

A teoria do Método dos Elementos Finitos (MEF ou FEM) da propagação sonora em um meio fluidos é uma das bases fundamentais da simulação numérica em acústica. É uma ferramenta utilizada para resolver problemas de maior complexidade geométrica nos quais são necessários analisar a interação entre diferentes domínios e a resposta de grandezas acústicas para as condições de contorno desejadas [4]. Essa teoria pode ser analisada, por exemplo, para aplicações especiais com absorvedores porosos de estrutura rígida (para maiores detalhes sugere-se a leitura dos artigos de Chazot, Nennig e Perrey [6] e de Antebas et al. [7]). Basicamente as propriedades de cada domínio (ar ou material de absorção) são impostas na montagem das matrizes elementares por meio da densidade do fluido e a velocidade do som, que podem ser reais para o ar atmosférico. No entanto, esses valores são complexos e variam com a frequência para os materiais de absorção.

O FEM é utilizado a partir da construção de uma malha que discretiza a geometria do problema. A modelagem aqui é realizada usando funções de forma lineares e os elementos são tetraedros de quatro nós. A discretização atende pelo menos 6 elementos por comprimento de onda da frequência de simulação, critério mínimo indicado em tais simulações. No entanto como a frequência é muito baixa (25 Hz) e as dimensões do objeto são relativamente pequenas, tal critério é atendido com uma margem excessivamente ampla. Alguns domínios e condições de contorno são definidas para o modelo representar o mais próximo possível o experimento. Neste trabalho, um exemplo de malha que tenta representar numericamente a bancada da Figura 1 pode ser vista na Figura 2. Ela apresenta três diferentes domínios de fluido e duas condições de contorno.

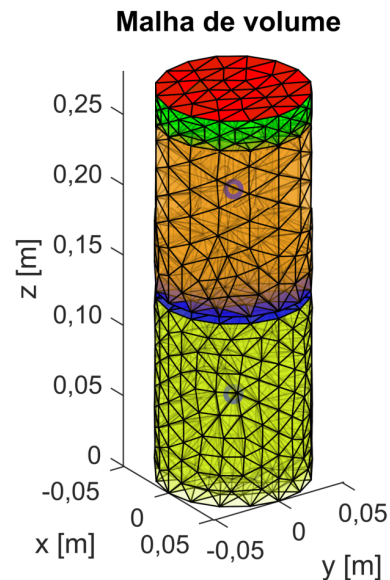


Figura 2: Malha de elementos finitos para a simulação numérica proposta; as regiões e as condições de contorno estão descritas no texto.

Observe a Figura 2, em amarelo pode ser visto o volume de ar da cavidade inferior e em laranja está o volume de ar da cavidade superior. Ambas as cavidades estão conectadas pelo movimento de um pistão rígido em azul, que movimenta-se com uma certa velocidade (fonte de excitação). O material poroso em verde é representado pela teoria de fluido equivalente, usando o modelo de Johnson–Champoux–Allard–Lafarge (ou apenas JCAL) [8, 9]. Além disso, pode-se notar a aplicação de uma impedância de radiação para duto não flangeado, em vermelho, na qual o equacionamento pode ser visto em Pierce [10] e Lafarge

[11]. Essa impedância é importante ser considerada, visto que o topo do material absorvedor apresenta uma condição aberta para atmosfera, ao final do duto. A resposta necessária basicamente é razão entre as pressões das cavidades superior e inferior (r) e são obtidas avaliando-se as pressões complexas nos pontos em azul (cavidade superior e inferior).

Assim, foi possível analisar as interações entre a fonte de excitação e o fluido no interior das cavidades, bem como a interação do fluido com o material investigado, alterando a sua espessura e também a própria resistividade ao fluxo imposta inicialmente. A intenção é verificar se o método consegue recuperar o valor imposto, usando uma frequência de análise mais elevada (de 25 Hz no caso deste trabalho). Transdutores como microfones e acelerômetros possuem uma resposta bastante confiável e plana logo acima de 20 Hz, por isso a intenção de avaliar incertezas para frequências um pouco mais elevadas, desviando assim de possíveis problemas experimentais em medir frequências extremamente baixas (2 Hz) como a ISO 9053-2:2020 ainda propõe atualmente [3]. Essa norma utiliza uma condição de cavidade fechada e isso teoricamente tende a reduzir a incerteza devido à baixa sensibilidade do microfone em extrema baixa frequência (2 Hz), visto que uma diferença de nível sonoro ($L_{p,s} - L_{p,h}$) é contabilizada. É algo que a norma mais antiga, ISO 9053:1991 [12] não contemplava.

2.4 Experimento computacional

Para a realização do experimento simulado numericamente, foi desenvolvido um *software* computacional em Matlab capaz de calcular, via FEM, a magnitude complexa da pressão sonora nas cavidades e obter os valores de resistividade ao fluxo de ar. Vale ressaltar que a geometria utilizada pelo método de Dragonetti *et al.* [2] pode ser utilizada também para se obter os dados pelo método normalizado e, uma vez que as cavidades superior e inferior tenham o mesmo volume, pode-se medir ambos os métodos simultaneamente. Tais constatações permitem que a mesma geometria seja utilizada nos cálculos de ambos os métodos, tornando as comparações entre os métodos menos propensas a erros relacionados às diferenças entre geometrias ou malhas.

Para o mapeamento dos erros foram escolhidos dois dados de entrada suscetíveis às alterações durante as medições, são eles a espessura da amostra ensaiada e a resistividade ao fluxo do material utilizado na medição. O mapeamento foi feito com o uso de mapas de erro percentual obtidos a partir do cálculo computacional. Para tais cálculos foi fornecido ao *software* um valor de resistividade ao fluxo (σ_r) a partir do qual são calculados a velocidade do som, número de onda e a densidade equivalente do fluido. A resistividade ao fluxo é então calculada por meio das equações descritas previamente nesta seção para cada um dos métodos. Ou seja, é fornecido um valor de resistividade ao fluxo para o cálculo dos dados de entrada necessários para as equações e, em posse de tais dados, o *software* calcula um valor de resistividade ao fluxo (σ_c) para ser comparado com o valor de entrada. O erro é então calculado por meio da equação

$$\varepsilon = \frac{\sigma_r - \sigma_c}{\sigma_r} \cdot 100. \quad (8)$$

O valor do erro foi calculado para cada uma das combinações de valores dos dados que sofriam variação, obtendo desse modo uma matriz de erro. Nesses mapas valores de erro acima de cinquenta por cento são apresentados como um único grupo, ou seja, englobados como uma única linha de contorno.

2.5 Experimento em bancada

Duas amostras de diferentes materiais — A e B — sendo ambos melaminas, foram medidas em uma bancada com dimensões da geometria da bancada simulada. Os dados dos materiais utilizados são apresentados na Tabela 1 e o fluxograma de medição da bancada experimental é apresentado na Figura 3.

Tabela 1: Dados das amostras A e B utilizadas.

Parâmetro / Material	A	B
Porosidade, ϕ (—)	0,98	0,97
Tortuosidade, α_∞ (—)	1,00	1,04
Compr. viscoso, Λ (μm)	115	105
Compr. térmico, Λ' (μm)	116	109
Densidade, ρ_a (kg/m^3)	10,17	6,73
Espessura, d (mm)	25,4	12,7

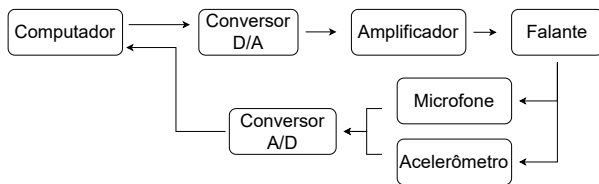


Figura 3: Fluxograma da medição em bancada experimental.

A bancada utiliza um alto-falante de quatro polegadas como pistão que divide as cavidades, acoplado a um tubo acrílico de 100 mm de diâmetro. As cavidades superior e inferior possuem o mesmo volume de $0,2 \text{ m}^3$, o que implica em cavidades de alturas diferentes para se compensar o volume adicionado à cavidade superior pelo cone do alto-falante e pelo volume removido da cavidade inferior pelo ímã e pelo cone do alto-falante. Para as medições em bancada foram utilizados dois microfones de 1/2 polegada, além de um acelerômetro com massa de 0,5 g afim de reduzir os efeitos do seu acoplamento ao cone — todos da marca Brüel & Kjær.

Cabe citar que a amplitude do deslocamento do pistão foi mantida próxima a 4 mm/s afim de atender ao valor indicado pela norma e manter um padrão. Ainda, cabe ressaltar que os valores de deslocamento do pistão serão os mesmos para o caso da cavidade selada e da cavidade fechada com a amostra porosa, uma vez que o alto-falante se encontra entre elas.

Para cada tipo de amostra foram utilizados três corpos de prova e, para cada um dos corpos, foram realizadas trinta reposições do mesmo na bancada de ensaio afim de investigar possíveis erros relacionados à montagem e/ou à execução. Além disso, o procedimento foi repetido outras trinta vezes em sequência, sem alterar as condições da bancada e sem remoção das amostras, afim de avaliar a estabilidade da bancada de testes.

3. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados em bancada experimental e simulada numericamente.

Cabe informar que a norma ISO 9053-2 [3] indica um melhor desempenho do método com frequências de excitação próximas a 2 Hz e, ainda, que uma das hipóteses adotadas por Dragonetti *et al.*

[2] para o desenvolvimento do método é que a frequência assume valores próximos a zero, ou seja, próximos ao indicado pela norma. No entanto, com o objetivo de avaliar o comportamento do método em frequências mais altas que as indicadas pela norma (e por Dragonetti), utilizou-se a frequência de 25 Hz para a realização dos ensaios.

Embora o experimento em bancada e o simulado numericamente utilizem materiais e instrumentos de geometrias similares, os erros associados podem sofrer influências de diferentes fatores. Isso ocorre devido ao fato do simulado numericamente avaliar apenas as limitações do método de medição escolhido — normatizado ou de Dragonetti — e o experimento em bancada estar sujeito aos erros humanos de montagem e/ou execução do ensaio, bem como incertezas e imperfeições da bancada. Com isso, possivelmente o experimental tem um erro aumentado em relação ao simulado.

3.1 Resultados numéricos

A simulação variou valores de resistividade ao fluxo entre 2 kNs/m^4 e 150 kNs/m^4 e valores de espessura entre 4 mm e 32 mm mapeando o erro percentual associado a cada uma das combinações de resistividade ao fluxo e espessura. Assim, foram plotadas linhas de contorno que englobam regiões com 2% de variação do erro, ou seja, a cada variação de 2% do erro uma nova linha de contorno era gerada.

O método normatizado é proveniente de um método consagrado proposto por Utsuno *et al.* [13] e apresenta valores de erro percentual aceitáveis, abaixo de 5%, para a maioria das combinações de resistividade ao fluxo e espessura de amostra, como apresentado na Figura 4, gerada a partir de um sinal de excitação com frequência de 25 Hz. Entretanto, para combinações de espessuras inferiores a 16 mm e resistividades ao fluxo inferiores a 8 kNs/m^4 o erro apresenta valores superiores a 20%, comprometendo significativamente a confiabilidade os resultados obtidos. O eixo das abscissas é apresentado em escala logarítmica para melhor evidenciar erros em baixos valores de resistividade.

O método proposto por Dragonetti *et al.* [2] apresenta um desempenho adequado para combinações nas quais pelo menos um dos valores, de resistividade ao fluxo ou espessura da amostra,

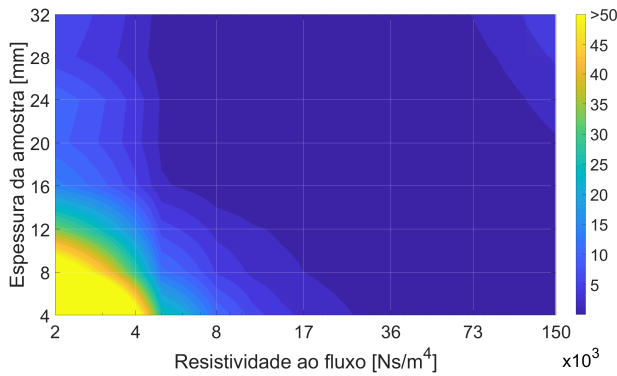


Figura 4: Mapa de erro associado ao método normalizado (simulação numérica em 25 Hz).

sejam relativamente baixos como pode ser analisado na Figura 5. A medida que os valores de resistividade ao fluxo e espessura crescem, o erro percentual para valores medidos com frequência de excitação de 25 Hz assume valores elevados, tornando o método não confiável para medições de resistividade ao fluxo de materiais com tais combinações.

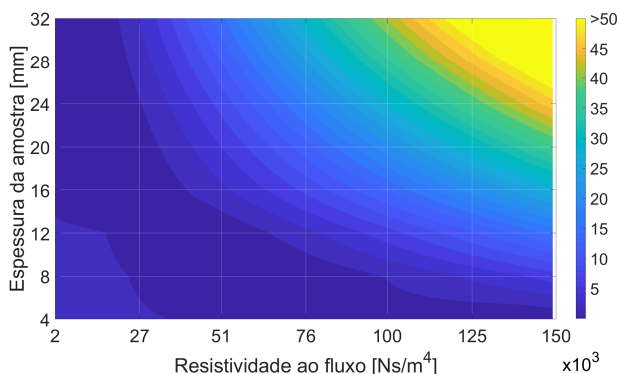


Figura 5: Mapa de erro associado ao Método Dragonetti (simulação numérica em 25 Hz).

É interessante notar que os experimentos apresentam valores elevados de erro em diferentes regiões do mapa, de modo que as regiões nas quais o método normalizado pela ISO 9053-2:2020 [3] possui menores erros são as regiões nas quais o Método Dragonetti possui valores elevados. A análise inversa também é verdadeira, ou seja, as regiões nas quais o Método Dragonetti possui menores valores de erro são as regiões nas quais o método normalizado possui valores elevados.

3.2 Resultados experimentais

Como citado anteriormente, a bancada utilizada permitiu avaliar a resistividade ao fluxo dos materiais estudados por ambos os métodos estudados em um único ensaio para cada um dos corpos de prova.

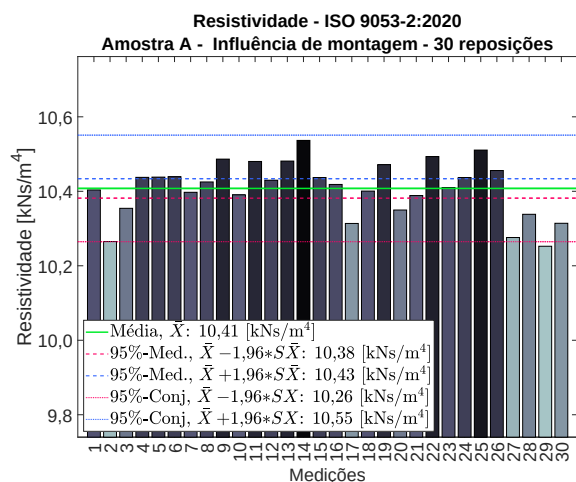
A Figura 6 apresenta os resultados obtidos para três corpos de prova do Material A, a esquerda os resultados obtidos pelo método normalizado e a direita os resultados obtidos via método de Dragonetti *et al.* [2]. Para esse caso a medição foi realizada retirando e reposicionando o mesmo corpo de prova por 30 vezes. O procedimento foi realizado para os 3 corpos de prova diferentes, tanto do Material A quanto do Material B. Percebe-se que, embora os resultados sejam semelhantes, o método proposto por Dragonetti *et al.* [2] apresenta uma média de valores aproximadamente 200 Ns/m⁴ acima do método normalizado. Na Figura 7, que apresenta os resultados obtidos com os corpos de prova do Material B, é possível perceber que um comportamento semelhante ocorre, todavia, nesse caso, a média dos resultados são aproximadamente 200 Ns/m⁴ abaixo do método normalizado.

Tais desvios são perceptíveis ao comparar as médias dos conjuntos de medições e, também, ao comparar individualmente cada um dos ensaios realizados para cada um dos corpos de prova. Uma vez assumido que o valor médio obtido a partir do método normalizado representa o *valor real* de resistividade ao fluxo do material, pode-se dizer que o valor médio obtido a partir de Dragonetti desviou do *valor real* em menos de 3%, corroborando os resultados obtidos via simulação numérica apresentados na Figura 5.

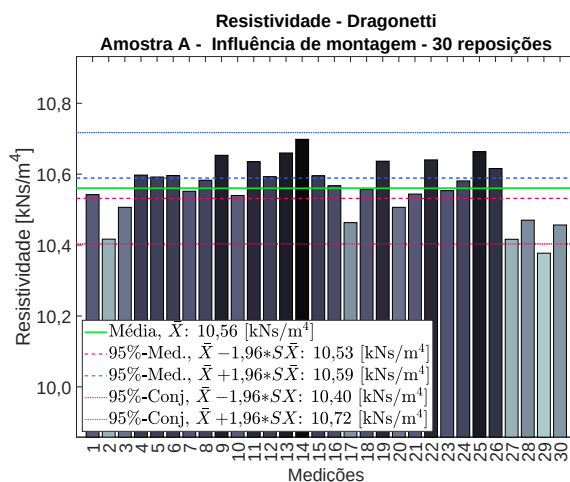
Em praticamente todos os casos a faixa de intervalo de confiança (IC) do desvio padrão do conjunto para 95% foi de 300 Ns/m⁴ a 400 Ns/m⁴. É interessante notar que o intervalo obtido representa bem a variação de valores máximo e mínimos obtidos em cada conjunto de corpos de prova.

Outro aspecto interessante do experimento com reposição é que ele mostra que se um experimentador faz um único experimento, ele pode ter a *sorte* ou *azar* da ocorrência de um valor baixo ou elevado — considere o valor mínimo e máximo da Figura 6 (c), por exemplo. Com isso, aclara-se a importância de se repetir a medição e buscar um valor médio.

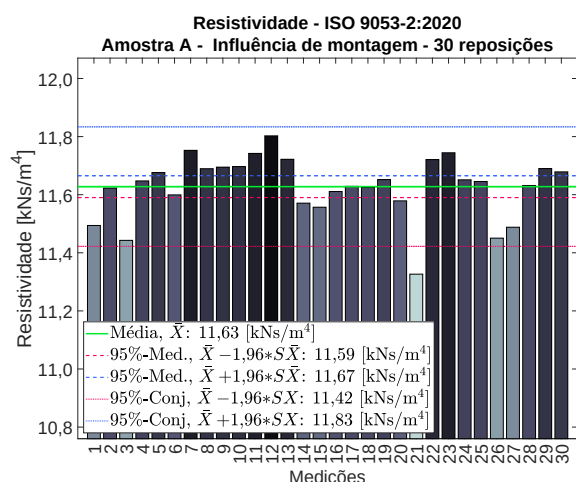
Os autores Kino e Ueno [14] apresentam resultados de resistividade ao fluxo para melaminas de densidade, porosidade, tortuosidade e espes-



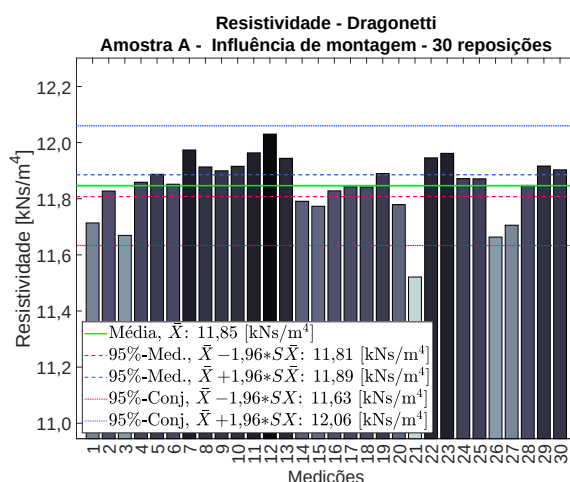
(a) Corpo de Prova 01 – ISO 9053-2.



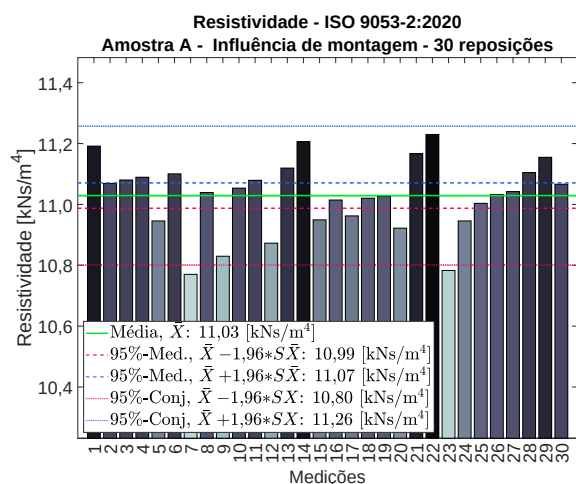
(b) Corpo de Prova 01 – Dragonetti.



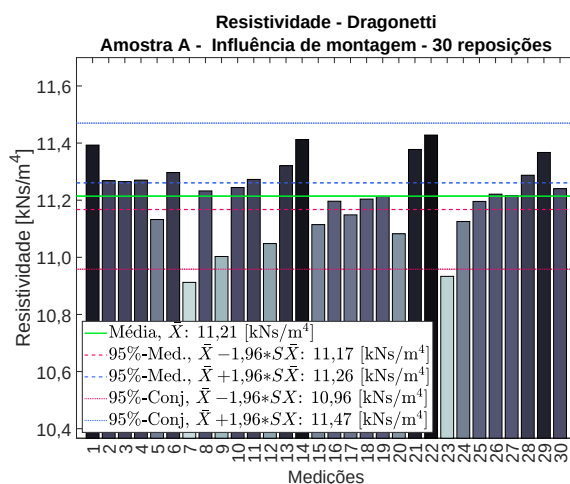
(c) Corpo de Prova 02 – ISO 9053-2.



(d) Corpo de Prova 02 – Dragonetti.

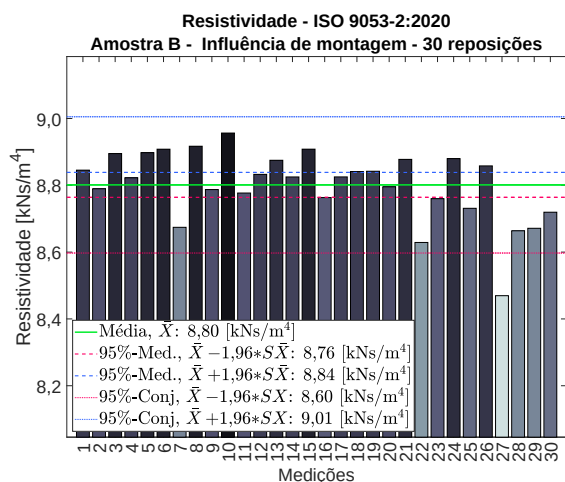


(e) Corpo de Prova 03 – ISO 9053-2.

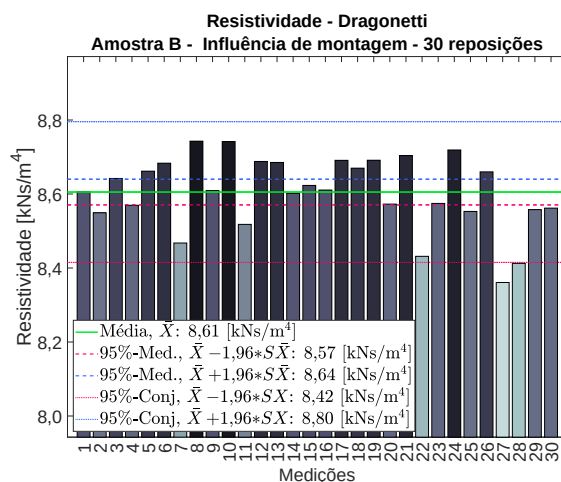


(f) Corpo de Prova 03 – Dragonetti.

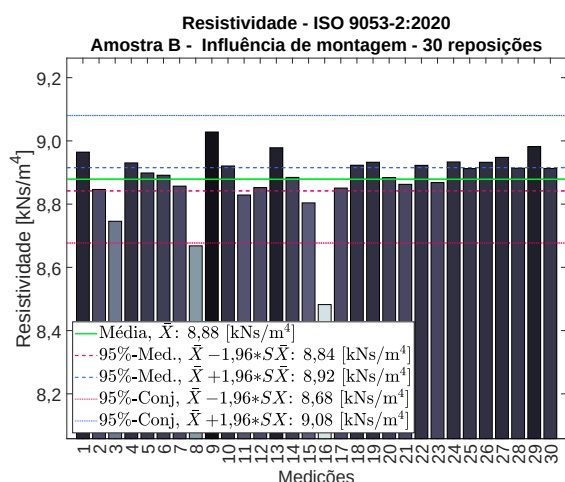
Figura 6: Resultados experimentais com corpos de prova do Material A (30 repetições com reposição, ambos os métodos).



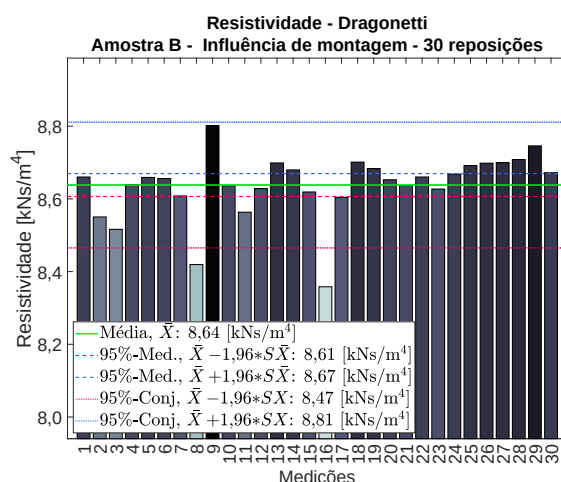
(a) Corpo de Prova 01 – ISO 9053-2.



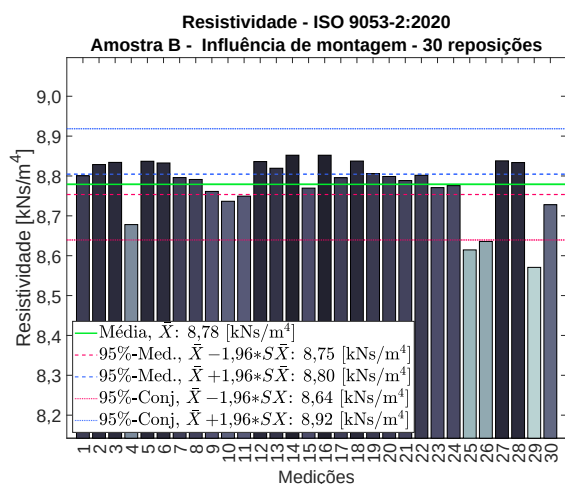
(b) Corpo de Prova 01 – Dragonetti.



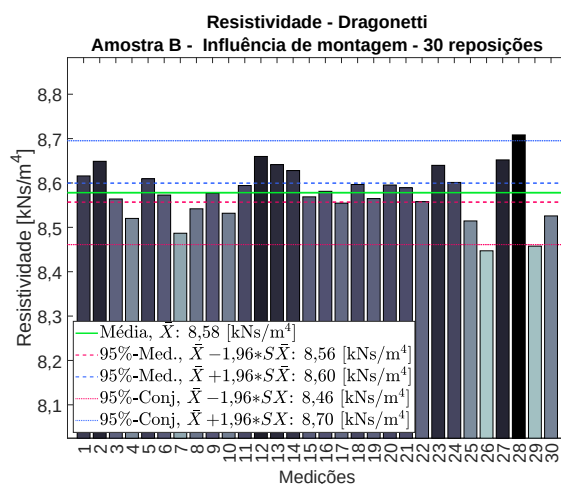
(c) Corpo de Prova 02 – ISO 9053-2.



(d) Corpo de Prova 02 – Dragonetti.



(e) Corpo de Prova 03 – ISO 9053-2.



(f) Corpo de Prova 03 – Dragonetti.

Figura 7: Resultados experimentais com corpos de prova do Material B (30 repetições com reposição, ambos os métodos).



sura semelhantes ao da Melamina A utilizada neste trabalho, permitindo a comparação entre os resultados. O valor obtido por eles foi de $\sigma = 13,1 \text{ kNs/m}^4$, ligeiramente acima dos encontrados neste trabalho, porém ainda na faixa das melaminas. Dragonetti *et al.* [2] também apresentaram algumas comparações entre os valores de resistividade ao fluxo de uma amostra de densidade similar ao Material A, os dados obtidos por eles foram: pelo método proposto $\sigma = 11,4 \text{ kNs/m}^4$; e, em relação ao normatizado pela ISO 9053:1991 [12], $\sigma = 10,7 \text{ kNs/m}^4$.

Ainda, der Kelen [15] apresenta uma interessante análise da variação da resistividade ao fluxo de uma mesma amostra regida pelo resíduo da função custo. Utilizando uma melamina de densidade similar ao Material A, o autor apresenta resultados próximos aos obtidos neste trabalho, com valores entre de $9,8 \text{ kNs/m}^4$ e $11,1 \text{ kNs/m}^4$. Tais dados corroboram os resultados obtidos em bancada para caracterizar as amostras estudadas neste trabalho.

A estabilidade da bancada também foi avaliada. Neste caso as amostras não foram reposicionadas e os 30 ensaios para cada corpo de prova ocorreram sequencialmente de forma automatizada. Os resultados obtidos para cada uma das amostras são apresentados nas Tabelas 2 e 3. Percebe-se que para todos os casos, a faixa do intervalo de confiança do conjunto para 95% é inferior a 130 Ns/m^4 , indicando que as condições de contorno constantes à bancada não apresentam desvios significativos, ou seja, sua resposta é relativamente estável e praticamente não afeta a repetibilidade dos ensaios nela realizados.

As Figuras 8 e 9 apresentam os valores de resistividade ao fluxo obtidos experimentalmente, sua média e o valor obtido via simulação numérica para as Amostras A e B, respectivamente. Para esse caso, a imposição de resistividade ao modelo numérico foi o próprio valor médio experimental, como ponto de partida. É interessante notar que o resultado numérico para ambos os métodos com a Amostra A, apresentados na Figura 8 é bastante próximo ao valor médio obtido via procedimento experimental, indicando que os desvios apresentados pelo método para tais combinações são relativamente pequenos.

Os resultados apresentados na Figura 9 indicam um desvio maior para o método normatizado, enquanto o Método de Dragonetti apresenta resultados próximos à média. Assim, cabe lembrar que a Amostra B possui uma combinação de resistividade ao fluxo que se encontra em uma região de maior erro percentual conforme apresentado na Figura 4. Entretanto, o desvio apresentado na Figura 9 (a) é inferior a 3%, sendo esse um erro aceitável segundo a norma ISO 9053-2:2020 [3].

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresenta uma comparação entre erros percentuais associados a dois métodos de medição de resistividade ao fluxo de materiais porosos. A partir dos resultados obtidos via simulação computacional foi possível perceber que o método normatizado pela ISO 9053-2:2020 [3] é estável e apresenta baixos valores de erro para grande parte da gama de espessura de corpos de prova e resistividade analisadas. Embora o método proposto por Dragonetti, Ianniello e Romano [2] apresente resultados com baixo valor de erro para pequenas espessuras de corpos de prova e baixos valores de resistividade, o mesmo não ocorre quando ambos parâmetros crescem. Nesse caso, os erros associados ao método podem chegar a 50%, tornando os resultados não confiáveis.

Os resultados indicam que ambos os métodos podem apresentar baixos valores de erro percentual ainda que a frequência de excitação seja de 25 Hz, proposto neste trabalho, e que a escolha de tal frequência é válida. Entretanto, deve-se atentar às limitações de cada método com relação aos valores das espessuras dos corpos de prova, bem como as resistividades ao fluxo da amostra.

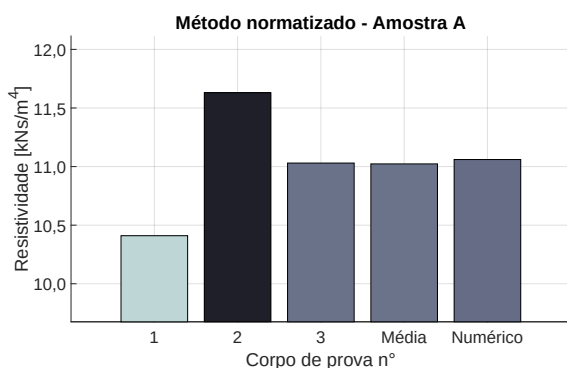
Os resultados obtidos experimentalmente em bancada corroboram com os dados simulados na região medida, apresentando um desvio dos resultados obtidos via método de Dragonetti, Ianniello e Romano [2] em relação aos obtidos via método normatizado inferior a 3%. A análise dos mapas de erro obtidos a partir das simulações computacionais permitem observar que os métodos podem ser utilizados de forma complementar de modo que todas as combinações de resistividade ao fluxo e espessura da amostra possuam baixos valores de erro. Isso é possível devido ao fato do método normatizado apresentar valores elevados

Tabela 2: Resultados experimentais obtidos com ambos os métodos para o Material A (30 repetições sem reposição; intervalo de confiança a partir do desvio padrão do conjunto).

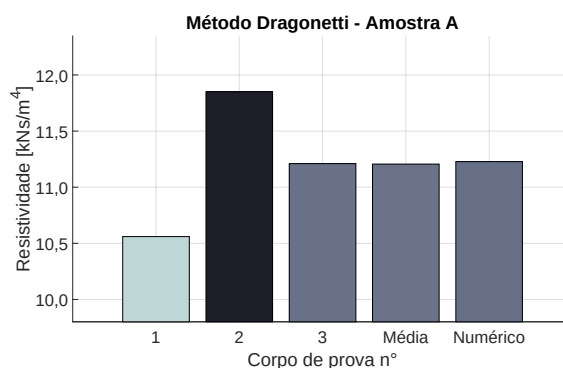
Método	ISO 9053-2:2020			Dragonetti		
Corpo de prova / Parâmetro	01	02	03	01	02	03
$\bar{x}$ (kN · s/m ⁴)	10,32	11,49	11,01	10,45	11,71	11,20
+IC(95%) (kN · s/m ⁴)	10,33	11,50	11,04	10,46	11,72	11,21
−IC(95%) (kN · s/m ⁴)	10,31	11,47	10,99	10,44	11,70	11,19

Tabela 3: Resultados experimentais obtidos com ambos os métodos para o Material B (30 repetições sem reposição; intervalo de confiança a partir do desvio padrão do conjunto).

Método	ISO 9053-2:2020			Dragonetti		
Corpo de prova / Parâmetro	01	02	03	01	02	03
$\bar{x}$ (kN · s/m ⁴)	8,78	8,89	8,75	8,58	8,61	8,48
+IC(95%) (kN · s/m ⁴)	8,80	8,96	8,79	8,59	8,62	8,50
−IC(95%) (kN · s/m ⁴)	8,76	8,83	8,71	8,57	8,60	8,47

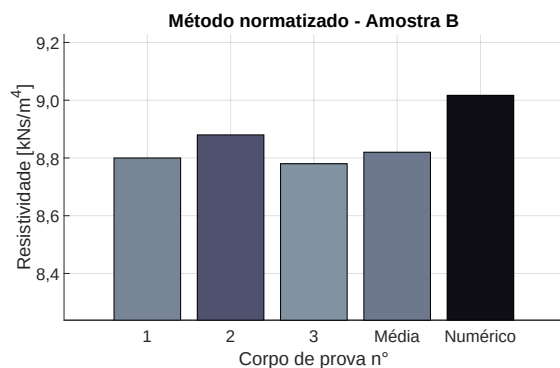


(a) Método normalizado – ISO 9053-2.

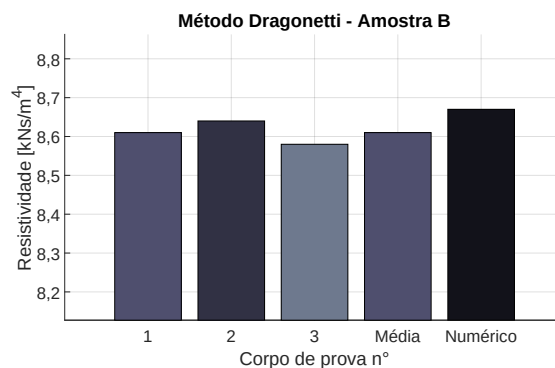


(b) Método de Dragonetti.

Figura 8: Comparativo entre resultados experimentais médios (com reposição) de cada corpo de prova e numérico (FEM) para a Amostra A.



(a) Método normalizado – ISO 9053-2.



(b) Método de Dragonetti.

Figura 9: Comparativo entre resultados experimentais médios (com reposição) de cada corpo de prova e numérico (FEM) para a Amostra B.



de erro para combinações de pequenas espessuras e baixos valores resistividade enquanto o Método Dragonetti apresenta baixos valores nessa região. Um comportamento similar ocorre para combinações de elevados valores de resistividade ao fluxo e espessura da amostra, todavia, neste caso, o método normatizado pela ISO 9053-2:2020 [3] apresenta baixos valores de erro enquanto o método proposto por Dragonetti, Ianniello e Romano [2] apresenta valores elevados de erro.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer todo o apoio e infraestrutura fornecidos pelo curso de Engenharia Acústica (EAC) e pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, Brasil).

REFERÊNCIAS

- [1] Mareze, Paulo Henrique. *Análise da influência da micro geometria na absorção sonora de materiais porosos de estrutura rígida*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/106792>.
- [2] Dragonetti, Raffaele; Ianniello, Carmine e Romano, Rosario A. Measurement of the resistivity of porous materials with an alternating air-flow method. *Journal of the Acoustical Society of America*, 129(2):753–764, março 2011. doi: [10.1121/1.3523433](https://doi.org/10.1121/1.3523433).
- [3] ISO 9053-2:2020. Acoustics – determination of air-flow resistance – Part 2: Alternating airflow method. Standard, International Organization for Standardization, págs. 1–20, Suíça, set. 2020. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/76744.html>.
- [4] Atalla, Nouredine e Sgard, Franck. *Finite Element and Boundary Methods in Structural Acoustics and Vibration*. 1ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. ISBN 978-1138749177. Disponível em: <https://www.routledge.com/book/9781138749177>.
- [5] Allard, Jean e Atalla, Nouredine. *Propagation of Sound in Porous Media*. 2ª ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2009. ISBN 978-0470747339. doi: [10.1002/9780470747339](https://doi.org/10.1002/9780470747339).
- [6] Chazot, J-D; Nennig, Benoit e Perrey-Debain, E. Performances of the partition of unity finite element method for the analysis of two-dimensional interior sound fields with absorbing materials. *Journal of Sound and Vibration*, 332(8):1918–1929, 2013. doi: [10.1016/j.jsv.2012.06.016](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.06.016).
- [7] Antebas, AG; Denia, Francisco David; Pedrosa, AM e Fuenmayor, FJ. A finite element approach for the acoustic modeling of perforated dissipative mufflers with non-homogeneous properties. *Mathematical and Computer modelling*, 57(7-8):1970–1978, 2013. doi: [10.1016/j.mcm.2012.01.021](https://doi.org/10.1016/j.mcm.2012.01.021).
- [8] Champoux, Yvan e Allard, Jean-F. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *Journal of applied physics*, 70(4):1975–1979, 1991. doi: [10.1063/1.349482](https://doi.org/10.1063/1.349482).
- [9] Lafarge, Denis. *Propagation du son dans les matériaux poreux à structure rigide saturés par un fluide viscothermique: Définition de paramètres géométriques, analogie électromagnétique, temps de relaxation*. Tese de doutorado, Le Mans Université, Le Mans, França, 1993. Disponível em: <https://scanr.enseignementsup-recherche.gouv.fr/publication/these1993LEMA1009>.
- [10] Pierce, Allan D. *Acoustics: an introduction to its physical principles and applications*. Springer, 2019. ISBN 978-3030112134.
- [11] Levine, Harold e Schwinger, Julian. On the radiation of sound from an unflanged circular pipe. *Physical review*, 73(4):383–406, 1948. doi: [10.1103/PhysRev.73.383](https://doi.org/10.1103/PhysRev.73.383).
- [12] ISO 9053:1991. Acoustics – materials for acoustical applications – determination of airflow resistance. Standard, International Organization for Standardization, págs. 1–9, Suíça, jun. 1991. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/16622.html>.
- [13] Utsuno, Hideo; Tanaka, Toshimitsu; Fujikaw, Takeshi e Soybe, A. F. Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials. *Journal of the Acoustical Society of America*, 86(2):637–643, agosto 1989. doi: [10.1121/1.398241](https://doi.org/10.1121/1.398241).
- [14] Kino, Naoki e Ueno, Takayasu. Comparisons between characteristic lengths and fibre equivalent diameters in glass fibre and melamine foam materials of similar flow resistivity. *Applied Acoustics*, 69(4):325–331, abril 2008. doi: [10.1016/j.apacoust.2006.11.008](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2006.11.008).
- [15] Kelen, Christophe Van. *Characterisation of anisotropic acoustic properties of porous materials - inverse estimation of static flow resistivity*. Licentiate thesis, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, Sweden, 2011. ISBN 978-9174158946. Disponível em: <https://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A403017>.