

DESENVOLVIMENTO DE MODELO NUMÉRICO BEM 2D PARA ESTUDO DA ABSORÇÃO SONORA DE MATERIAS POROSOS COM SUPERFÍCIES IRREGULARES.

Matheus Pereira ¹; Luís Godinho ¹; Paulo Amado Mendes ¹; Ricardo Patraquim ¹

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra
R. Luís Reis Santos – Pólo II, 3030-788, Coimbra, Portugal
Tel: +351 239 797100; Fax: +351 239 797123; Email: matheus.pereira@student.dec.uc.pt

Palavras-chave: Absorção sonora; Materiais porosos; BEM 2D

RESUMO

O presente estudo apresenta o desenvolvimento de um modelo numérico BEM 2D para representação da absorção sonora de materiais porosos com superfícies irregulares. No desenvolvimento desse modelo são utilizadas metodologias analíticas, numéricas e experimentais. Através do método inverso torna-se possível a obtenção dos cinco parâmetros macroscópicos necessários para representação da absorção sonora através do modelo analítico de Allard-Champoux, com o qual se obtém a densidade característica e o módulo de compressibilidade, características utilizadas para representação do material poroso no modelo BEM. Apresenta-se a validação do modelo e o equacionamento utilizado no seu desenvolvimento, chegando no estudo de 6 configurações diferentes geometricamente para cada um dos dois materiais porosos estudados.

ABSTRACT

The present study presents the development of a 2D BEM numerical model to represent the sound absorption of porous materials with irregular surfaces. In the development of this model, analytical, numerical and experimental methodologies are used. By means of the inverse method, it is possible to obtain the five macroscopic parameters necessary to represent the sound absorption through the analytical model of Allard-Champoux, with which we obtain the complex density and the bulk modulus, characteristics used to represent the porous material in the BEM model. It presents the validation of the model and the equation used in its development, arriving at the study of 6 geometrically different configurations for each of the two porous materials studied.

INTRODUÇÃO

Materiais porosos são amplamente utilizados em estratégias de tratamento acústico de ambientes, bem como no controle passivo de ruído, devido a sua capacidade de absorção sonora. Esses materiais são constituídos de duas fases, sendo uma sólida, e outro fluída intersticial aos poros, que são pequenas cavidades oriundas do entrelaçamento entre as componentes sólidas. A atenuação sonora funcional de um material poroso é dada pela dissipação de energia acústica, a partir do movimento de fricção das partículas no interior do material [1].

A grandeza mais utilizada para caracterização acústica de um material poroso é o coeficiente de absorção sonora. Essa grandeza expressa a razão entre as energias sonoras absorvida e incidente sobre a amostra, dependendo da impedância acústica de superfície do material. Normalmente, pode-se obter o coeficiente de absorção sonora experimentalmente por meio de

um tubo de impedância, apesar de haver alternativas como a caracterização em câmara reverberante e medições de impedância *in situ* [2].

No presente trabalho optou-se pela utilização de um tubo de impedância para caracterização dos materiais porosos, sendo esse método descrito na Norma ISO 10534-2 [3]. Para estudo da absorção sonora de materiais porosos com superfícies irregulares, optou-se pelo desenvolvimento de um modelo numérico BEM 2D capaz de representar o coeficiente de absorção sonora em campo difuso. O desenvolvimento desse modelo foi baseado na utilização das seguintes metodologias: caracterização experimental (tubo de impedância), modelo analítico para obtenção da densidade característica e módulo de compressibilidade de materiais porosos, método inverso para obtenção dos parâmetros macroscópicos capazes de descrever a absorção sonora de um material poroso, além de comparações teóricas da passagem do coeficiente de absorção com incidência normal para coeficiente de absorção com incidência difusa. Apresenta-se também a validação do modelo numérico e resultados para 6 configurações de materiais porosos com superfícies irregulares.

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL EM TUBO DE IMPEDÂNCIA

Para desenvolvimento do modelo BEM 2D, o conhecimento das características acústicas dos materiais a serem estudados tornam-se necessárias. Optou-se então pela realização da avaliação experimental em tubo de impedância dos dois materiais a serem estudados na validação do modelo, tendo ambos a espessura de 3 centímetros e sendo esses denominados como material 1 e 2 para melhor entendimento ao longo do texto. O material 1 possui a densidade de $90 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$, enquanto o material 2 possui a densidade de $80 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$. Ambos materiais são apresentados respectivamente nas Figuras 1(a) e 1(b).

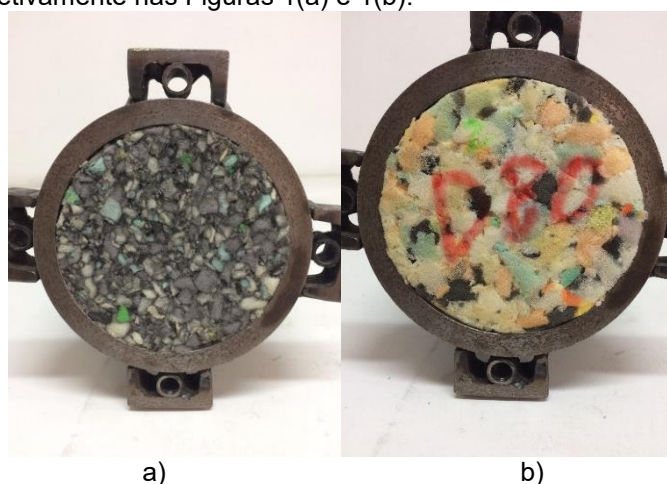


Figura 1. Representação ilustrativa dos dois materiais estudados, sendo (a) o material 1 e (b) o material 2.

A medição realizada é baseada no método da função de transferência, o qual foi proposto por Seybert e Ross [4]. Atualmente esse método é descrito pela Norma ISO 10534-2 [3], que considera a utilização alternada de dois microfones. Para calibração de fase e amplitude dos microfones é recomendada a realização de duas medições com troca de posição entre os microfones. A bancada experimental para realização desse ensaio é composta por um altifalante acoplado na extremidade de um tubo rígido de seção transversal uniforme. Na outra extremidade é acoplada a amostra do material a ser avaliado. O tubo de impedância utilizado possui um diâmetro de 0,10 [m], a distância entre os microfones é de 0,05 [m] e a distância entre o microfone mais próximo e a amostra é de 0,25 [m], uma representação ilustrativa da bancada experimental é apresentada na Figura 2.

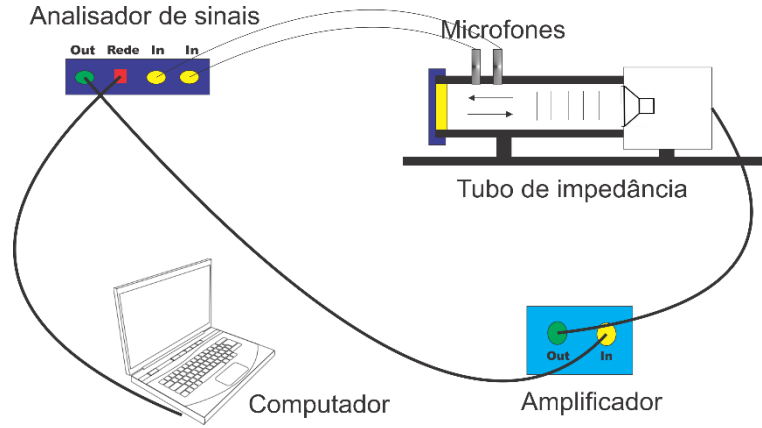


Figura 2. Ilustração da bancada experimental para medição do coeficiente de absorção de materiais porosos, utilizando um tubo de impedância.

A avaliação acústica dos materiais ensaiados é baseada no seguinte equacionamento. A função de transferência (H_{12}) é descrita pela seguinte equação:

$$H_{12} = \frac{p_{\text{mic1}}}{p_{\text{mic2}}}, \quad (1)$$

na qual, p_{mic1} é o espectro da pressão sonora captada pelo microfone mais próximo da fonte sonora, p_{mic2} é o espectro da pressão sonora captada pelo microfone mais próximo da amostra. A correção de fase e amplitude é descrita pela Equação (2),

$$H_{12}^* = \frac{(H_{12})^{0,5}}{(H_{21})^{0,5}}, \quad (2)$$

sendo, H_{21} a função de transferência da medição realizada com inversão na posição dos microfones. O coeficiente de reflexão (R) é descrito através da Equação (3),

$$R = \frac{H_{12}^* - e^{-j\tilde{k}s_i}}{e^{j\tilde{k}s_i} - H_{12}^*} e^{2j\tilde{k}x_i}, \quad (3)$$

em que, s_i é a distância entre os microfones, x_i é a distância entre a amostra e o microfone mais próximo da fonte, \tilde{k} é o número de onda complexo descrito na norma. Com a obtenção do coeficiente de reflexão é possível determinar a impedância de superfície e o coeficiente de absorção para incidência normal, sendo esses determinados respectivamente pelas Equações (4) e (5),

$$Z_s = \rho_0 c_0 \frac{(1+R)}{(1-R)}, \quad (4)$$

sendo, ρ_0 a densidade do ar e c_0 a velocidade de propagação do som no ar.

$$\alpha = 1 - |R|^2. \quad (5)$$

Os coeficientes de absorção experimentais dos dois materiais são apresentados na Figura 3.

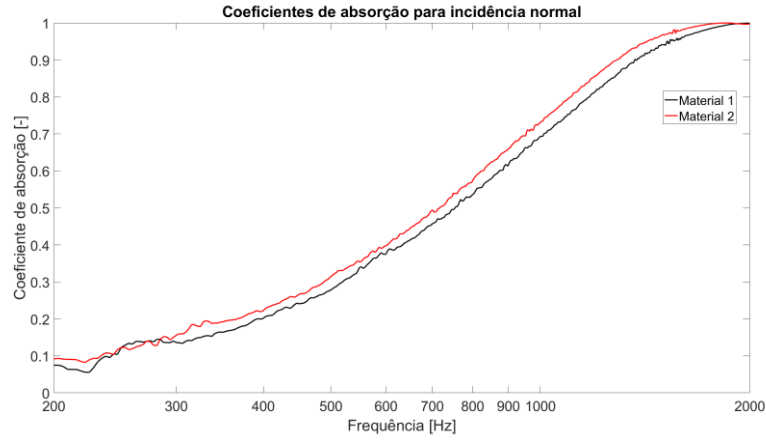


Figura 3. Coeficientes de absorção para incidência normal obtidos através de ensaio em tubo de impedância.

MÉTODO INVERSO PARA OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS MACROSCÓPICOS DO MODELO ANALÍTICO DE ALLARD-CHAMPOUX

Com o objetivo de caracterizar os materiais porosos através da sua densidade característica e módulo de compressibilidade, parâmetros que serão utilizados para caracterização do material poroso no modelo BEM 2D, optou-se pela utilização do modelo analítico de Allard-Champoux [5]. Sendo esse modelo baseado em cinco parâmetros macroscópicos: resistividade ao fluxo $\sigma \left[\frac{Ns}{m^4} \right]$, porosidade ϕ [-], tortuosidade α_∞ [-], comprimento característico viscoso Λ [μm], comprimento característico térmico Λ' [μm].

O modelo analítico de Allard-Champoux foi baseado nas equações propostas por Johnson em [6]. A densidade característica e o módulo de compressibilidade dos materiais são obtidos respetivamente pelas Equações (6) e (7).

$$\tilde{\rho}_{ef} = \rho_0 \alpha_\infty \left[1 + \frac{\sigma \phi}{j \alpha_\infty \rho_0 \omega} \left(1 + \frac{4j \alpha_\infty^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2} \right)^{1/2} \right], \quad (6)$$

$$\tilde{K}_{ef} = \frac{\gamma P_0}{\left[\gamma - \frac{\gamma - 1}{1 + \frac{\sigma \phi}{j \alpha_\infty \rho_0 B_2 \omega}} \left(\frac{1 + 4j \alpha_\infty^2 \eta \rho_0 B_2 \omega}{\sigma^2 \Lambda'^2 \phi^2} \right) \right]}, \quad (7)$$

sendo, η é a viscosidade do ar [$P_a s$], B_2 é o número de Prandtl, ρ_0 é a densidade do ar [$\frac{kg}{m^3}$], ω é a frequência angular, P_0 é a pressão atmosférica, γ é a razão dos calores específicos. Através das Equações (6) e (7) obtém-se a impedância característica Z_c e o número de onda característico k_c do material poroso, sendo esses descritos respetivamente pelas Equações (8) e (9).

$$Z_c = (\tilde{\rho}_{ef} \tilde{K}_{ef})^{1/2}, \quad (8)$$

$$k_c = \omega \left(\frac{\tilde{\rho}_{ef}}{\tilde{K}_{ef}} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

A impedância de superfície do material Z_s é obtida através das equações (8) e (9), sendo descrita pela seguinte equação:

$$Z_s = -j \left(\frac{Z_c}{\phi} \right) \cot(k_c L). \quad (10)$$

sendo L a espessura do material. O coeficiente de absorção do material pode ser obtido através da Equação (11).

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z - \rho_0 c_0}{Z + \rho_0 c_0} \right|^2. \quad (11)$$

Através do modelo analítico de Allard-Champoux optou-se pela utilização do método inverso para obtenção dos cinco parâmetros macroscópicos. Segundo Mareze [1] o método inverso é baseado na solução de um algoritmo de otimização de ajuste entre curvas de impedância de superfície experimental e as curvas de impedância de um modelo analítico, ambas no domínio da frequência. Bonfiglio e Pompoli [7] com a utilização desse método obtiveram uma função de erro a partir dos parâmetros de entrada do modelo. Com essa função encontra-se o melhor ajuste entre impedâncias e conseqüentemente o melhor ajuste de coeficiente de absorção. A função objetivo desse algoritmo genético é baseada na soma do erro quadrático entre a impedância de superfície do modelo analítico (\tilde{Z}_{ana}) e o resultado obtido experimentalmente (\tilde{Z}_{exp}), a função objetivo é dada pela Equação (12).

$$obj = \sum_{i=1}^{n_f} (Re [|\tilde{Z}_{ana} - \tilde{Z}_{exp}|])^2 + \sum_{i=1}^{n_f} (Im [|\tilde{Z}_{ana} - \tilde{Z}_{exp}|])^2. \quad (12)$$

O ajuste foi realizado nas frequências entre 400 e 2000 Hz, os valores dos parâmetros macroscópicos são apresentados na Tabela 1, os quais estão de acordo com os valores apresentados para esse tipo de material em [8]. As curvas de ajuste de impedância de superfície de cada um dos dois materiais são apresentados respectivamente nas Figuras 4(a) e 4(b).

Tabela 1. Parâmetros macroscópicos obtidos através do método inverso.

Parâmetros e Materiais	Resistividade ao fluxo $\sigma \left[\frac{Ns}{m^4} \right]$	Porosidade ϕ [-]	Tortuosidade α [-]	Comprimento característico viscoso Λ [μm]	Comprimento característico térmico Λ' [μm]
Material 1	25188,60	0,78	1,69	121,86	699,98
Material 2	24932,24	0,83	1,49	67,20	71,85

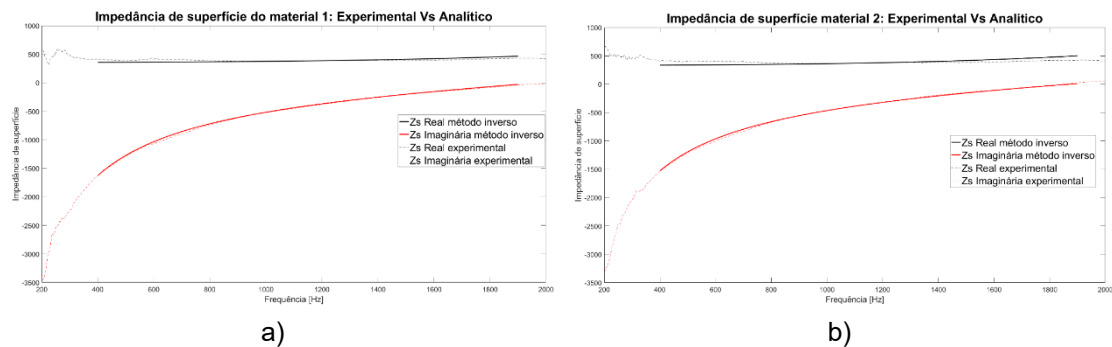


Figura 4. Ajuste de impedância de superfície baseado no método inverso para o material 1 (a) e 2 (b).

ALTERNATIVAS PARA TRANSFORMAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO COM INCIDÊNCIA NORMAL PARA INCIDÊNCIA DIFUSA

Nesta seção busca-se apresentar duas alternativas para transformação do coeficiente de absorção com incidência normal para incidência difusa, isso para validação do modelo BEM 2D, com o qual se pretende avaliar a absorção sonora em campo difuso.

Uma opção analítica para essa passagem é apresentada na Norma ISO 10534-2 [3], a qual é válida para materiais localmente reativos, sendo essa passagem definida através da seguinte equação:

$$\alpha_{st} = 8 \frac{Z'}{Z'^2 + Z''^2} \left[1 - \frac{Z'}{Z'^2 + Z''^2} \ln(1 + 2Z' + Z'^2 + Z''^2) + \frac{1}{Z''} \frac{Z'^2 - Z''^2}{Z'^2 + Z''^2} \tan^{-1} \frac{Z''}{1 + Z'} \right], \quad (13)$$

em que Z' é a parte real da impedância de superfície e Z'' a parte imaginária. Outra alternativa para essa passagem, sendo esta melhor representativa, é baseada no cálculo do coeficiente de absorção difuso através de diferentes graus de incidência, conforme sugerido por London [9], associando diversas ondas planas em um campo difuso. A impedância de superfície Z_s é então calculada através da seguinte equação:

$$Z_s = -i \frac{Z_1}{\cos(\theta_t)} \cot(k_1 d \cos(\theta_t)), \quad (14)$$

em que Z_1 é a impedância característica do material, k_1 é o número de onda correspondente ao material e d é a espessura. O valor de $\cos(\theta_t)$ é calculado através da Equação (15).

$$\cos(\theta_t) = \sqrt{1 - \left(\frac{k_0 \sin(\theta_i)}{k_1} \right)^2}, \quad (15)$$

sendo k_0 o número de onda correspondente ao fluido, $\sin(\theta_i)$ é o ângulo de incidência em questão. As comparações entre as metodologias apresentadas para cada um dos materiais analisados são apresentadas respectivamente nas Figuras 5(a) e 5(b).

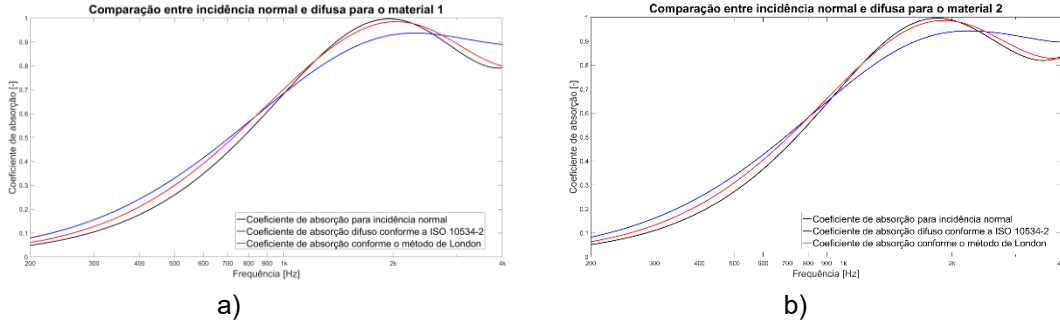


Figura 5. Comparação entre os métodos de passagem do coeficiente de absorção do material 1 (a) e 2 (b) com incidência normal para incidência difusa.

VALIDAÇÃO DO MODELO BEM 2D PROPOSTO

O presente modelo tem como objetivo representar a absorção sonora de materiais porosos com superfícies irregulares. Para realização desse estudo é necessária a validação do modelo, sendo esse um modelo BEM 2D discretizado em dois meios de propagação, sendo o primeiro com a presença do fluido e o segundo o meio em que representa o material poroso. A Equação (16), a qual governa o modelo BEM 2D, considera uma propagação de ondas sonoras em um meio fluido, infinito e homogêneo, contendo no seu interior uma inclusão. O modelo BEM é descrito partindo da equação integral de fronteira definida ao longo da fronteira S da inclusão.

$$\rho_{inc}(\underline{x}_p, \underline{x}_0) + \int q(\underline{x}) p^*(\underline{x}) dS = \int q(\underline{x}_p, \underline{x}) p(\underline{x}) dS + C_p(\underline{x}_p), \quad (16)$$

em que, $p(\underline{x})$ e $q(\underline{x})$ representam a pressão e seu gradiente na direção normal à fronteira da inclusão no ponto \underline{x} , $p(\underline{x}_p)$ representa a pressão no ponto de aplicação do carregamento virtual. C é uma constante que assume o valor 1 se o ponto estiver no domínio de propagação, $\frac{1}{2}$ se estiver localizado na fronteira, e 0 se estiver fora do meio de propagação em questão.

A representação das condições de fronteira dos materiais a serem analisados tem como entrada a densidade característica e o módulo de compressibilidade do material, sendo essas características apresentadas respectivamente nas Equações (6) e (7). Essas condições foram obtidas através dos parâmetros macroscópicos obtidos pelo método inverso e com a utilização do modelo analítico de Allard-Champoux.

A absorção sonora é calculada através de uma relação entre duas integrações numéricas, sendo uma a pressão sonora refletida por uma superfície totalmente rígida/refletora e a outra a pressão sonora refletida pelo material a ser estudado. A malha utilizada possui o tamanho de 8 elementos

por comprimento de onda, sendo satisfatória, já que na literatura encontra-se estudos os quais provam que para esse tipo de simulação numérica 6 elementos por comprimento de onda são suficientes.

Para estudo do coeficiente de absorção difuso distribuiu-se as fontes sonoras e os receptores com um passo de 10° , sendo esses fixados com um raio de 3 metros para as fontes e 1,5 metros para os receptores, com início em 30° e término em 150° . Faz-se então uma média entre cada resultado obtido, encontrando o coeficiente de absorção difusa para o material estudado. Com o objetivo da validação do modelo fez-se a simulação para os dois materiais estudados, ambos com 3 centímetros de espessura (assim como os ensaiados em tubo de impedância). No presente modelo, na busca por ganhos no custo computacional optou-se por realizar os cálculos nas frequências correspondentes as bandas centrais a banda de 1/3 de oitava (200, 250, 320, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3200 e 4000). Os coeficientes de absorção difusos calculados através do modelo BEM 2D para os dois materiais são apresentados respectivamente nas Figuras 6(a) e 6(b), em que são comparados com os coeficientes de absorção transformados para campo difuso, cujos valores foram apresentados na seção anterior.

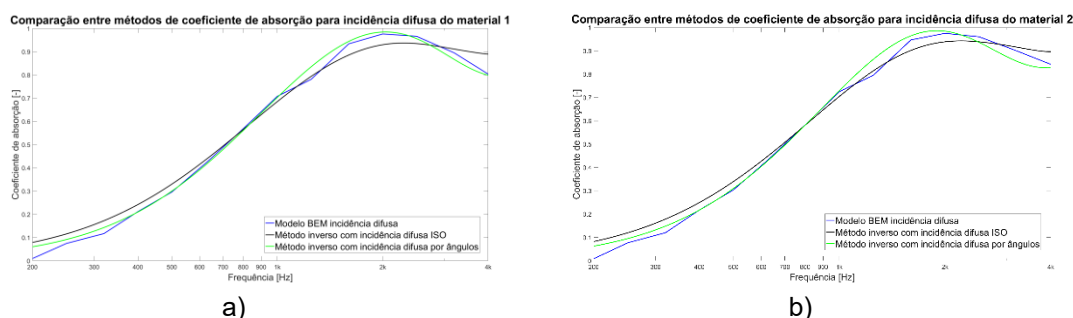


Figura 6. Comparação entre os métodos de cálculo para obtenção do coeficiente de absorção difuso para o material 1 (a) e 2 (b).

Observa-se que para ambos os materiais o modelo BEM 2D é representativo quando comparado ao método de London, sendo então validado para estudo de materiais porosos com superfícies irregulares.

ESTUDO DE MATERIAIS POROSOS COM SUPERFÍCIES IRREGULARES

Após a validação do modelo BEM 2D apresentado na seção anterior, optou-se por estudar os dois materiais porosos estudados. Realizou-se testes com variações na espessura e geometria dos materiais porosos, com o objetivo de entender como otimização da geometria influencia no coeficiente de absorção ao longo do eixo das frequências. No presente estudo optou-se pela utilização de uma função senoidal na representação de uma superfície irregular, sendo essa função descrita pela seguinte equação:

$$\text{Geometria} = H_2/2 * \sin(2\pi * x/0.1) + H_1 + H_2/2, \quad (17)$$

sendo, H_1 a espessura regular da amostra do material, H_2 a espessura máxima adicional e x a distância à origem na horizontal. Uma representação ilustrativa da geometria irregular e do posicionamento dos receptores utilizados no modelo, pode ser vista na Figura 7.

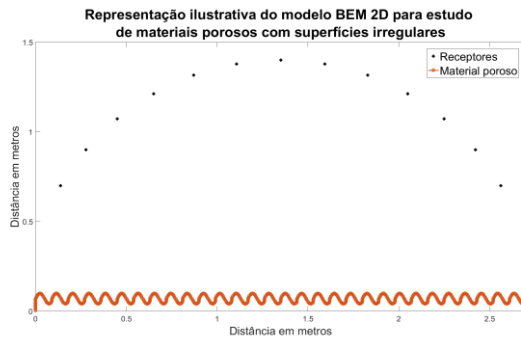


Figura 7. Ilustração da geometria irregular senoidal e do posicionamento dos receptores utilizados no modelo BEM 2D proposto.

Optou-se por dois tipos de variações na geometria do material, uma correspondente a espessura linear, e outra correspondente a geometria da função senoidal, gerando 6 configurações diferentes para cada um dos materiais, sendo essas configurações apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Variação de geometria dos materiais porosos com superfícies irregulares.

Geometria	Espessura linear [milímetros]	Espessura senoidal [milímetros]
Configuração 1	2	3
Configuração 2	2	4
Configuração 3	2	5
Configuração 4	4	3
Configuração 5	4	4
Configuração 6	4	5

Os coeficientes de absorção de ambos materiais para as configurações 1, 2 e 3 são apresentados na Figura 8(a), enquanto para as configurações 4, 5 e 6 são apresentados na Figura 8(b).

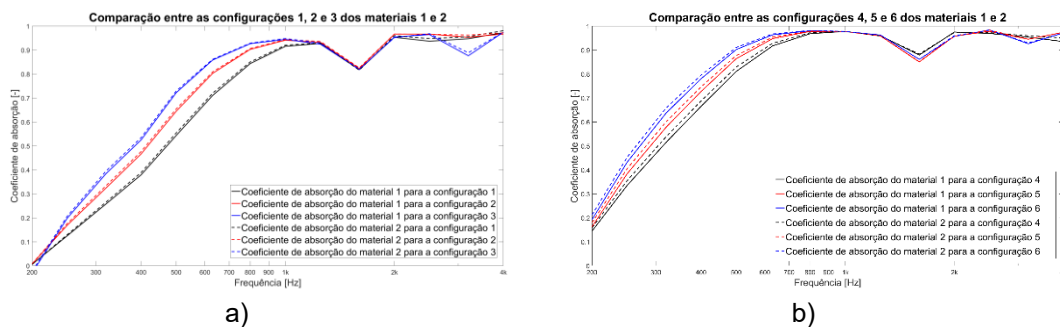


Figura 8 Coeficiente de absorção dos materiais 1 e 2 para as configurações 1, 2 e 3 (a) e 4, 5 e 6 (b).

Percebe-se a existência de uma antirressonância na frequência de 1600 Hz, a qual não sofre alteração com o aumento da espessura correspondente a função senoidal, sendo essa a única alternada entre as configurações 1, 2 e 3. Porém, com o aumento dessa espessura obtém-se um ganho de absorção sonora nas frequências menores que 1250 Hz. Observa-se que a configuração 3 possui uma quebra na absorção sonora na frequência de 3200 Hz. Na Figura 12 apresenta-se a análise das configurações 4, 5 e 6 para ambos materiais.

Com o aumento da espessura linear em 2 milímetros, observa-se que a antirressonância segue presente na frequência de 1600 Hz, porém com um pequeno acréscimo na absorção sonora nessa frequência, sendo perceptível também uma variação na antirressonância conforme a espessura da superfície irregular, em que a configuração 4 (com menor espessura) tem-se um maior coeficiente de absorção nessa frequência. Assim como nas configurações 1, 2 e 3 percebe-se que com o aumento da espessura da superfície irregular obtém-se um ganho em

termos de absorção nas frequências inferiores a 1250 Hz. Na Figura 9 apresenta-se uma comparação entre duas configurações em que se tem a mesma espessura da superfície irregular, porém com diferentes espessuras lineares.

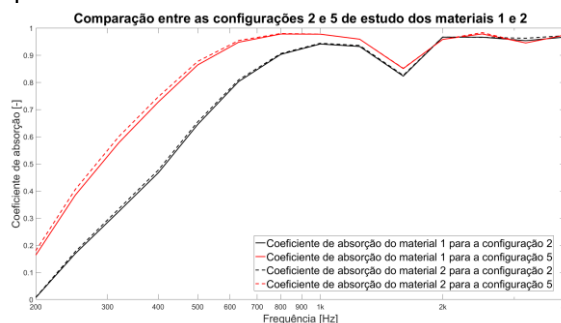


Figura 9. Coeficiente de absorção dos materiais 1 e 2 para as configurações 2 e 5.

Nota-se um acréscimo significativo na absorção sonora ao aumentar-se a espessura da superfície regular, sendo esse acréscimo presente nas frequências inferiores a 1250 Hz. Em um trabalho futuro pretende-se estudar a otimização da geometria irregular, com o objetivo de conseguir melhores coeficientes de absorção na frequência correspondente a antirressonância, sendo essa característica do material, ou então conseguir um deslocamento da mesma através da otimização geométrica.

CONCLUSÃO

O presente artigo abordou o desenvolvimento de um modelo numérico BEM 2D para estudo da absorção sonora de materiais porosos com superfícies irregulares. Ao longo do artigo apresentou-se o procedimento e equacionamento utilizado para desenvolvimento desse modelo, em que se utilizaram metodologias numéricas, analíticas e experimentais para caracterização dos materiais utilizados, chegando então a uma validação do modelo. Com o modelo validado estudaram-se 6 configurações geométricas diferentes para cada um dos dois materiais porosos apresentados. Nos vários casos, observou-se uma maior absorção sonora quando se usa o material 2, situação que é consistente com as medições diretas realizadas em tubo de impedância para os dois materiais em amostras simples. Percebe-se uma antirressonância presente na frequência de 1600 Hz, a qual se mantém presente em ambos materiais e em todas as configurações estudadas. Com o aumento da superfície irregular do material observou-se um acréscimo no coeficiente de absorção, sendo esse presente nas frequências inferiores a 1250 Hz, frequências em que os materiais com características construtivas semelhantes aos materiais estudados não costumam ter um coeficiente de absorção significativo. Com esse modelo pretende-se em trabalhos futuros estudar alternativas geométricas capazes de otimizar o coeficiente de absorção conforme a aplicação acústica, buscando maior absorção sonora na faixa de frequências necessária, assim como deslocamento ou diminuição da antirressonância presente.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelos fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade - COMPETE e por fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito do projeto com a ref.^a POCI-01-0145-FEDER-007633.

REFERÊNCIAS

- [1] Mareze, P. H., 2013. "Análise da influência da microgeometria na absorção sonora de materiais porosos de estrutura rígida.", Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina no Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
- [2] Eric Carneiro Brandão. *Análise teórica e experimental do processo de medição in situ da impedância acústica*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2011.

- [3] ISO, 1998. "*Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: transfer-function method.*", Geneva, Switzerland: ISO:1998, Norma 10534-2.
- [4] Seybert, A. F.; Ross, D. F., 1970. "*Experimental determination of acoustics properties using a two microphone random excitation technique.* ", *Journal of the Acoustical Society of America*, JASA, Vol 61, 1362 – 1370.
- [5] Allard, J.; Champoux, Y., 1992. "*New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials.*". *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 91, n.5, 3346-3353.
- [6] Johnson, D.; Koplik, J.; Dashen, R., 1987. "*Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media.*", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 176, 379-402.
- [7] Bonfiglio, P.; Pompili, F., 2007. "*Comparison of different inversion techniques for determining physical parameters of porous media.*", *19th International Congress on Acoustics*, Madrid, 2-7.
- [8] Cox, T.; D'Antonio, P., 2009. "*Acoustic Absorbers and Diffusers: theory, design and application*", Taylor & Francis.
- [9] London, A., 1950. "*The determination of reverberant sound absorption coefficients from acoustic impedance measurements.*", *The Journal of the Acoustical Society of America*, JASA, 22:263-269.