



## MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA ACÚSTICA *IN SITU* USANDO ARRANJO DE MICROFONES

Malaguetta, Thiago; Masiero, Bruno.

Dept. de Comunicações, Fac. Eng. Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas  
thiago.malaguetta@gmail.com, masiero@unicamp.br

### RESUMO

O comportamento acústico de salas de aula, carros, aviões, teatros e outros lugares é de suma importância e objeto de constante melhoria. Para podermos simular e prever o comportamento destes espaços é necessário conhecer sua geometria e a impedância acústica dos materiais construtivos. Esta pesquisa tem como objetivo caracterizar a impedância acústica de materiais utilizando um arranjo de microfones e técnicas de processamento de sinais promotoras de esparsidade. Inicialmente, foi elaborado um modelo computacional para simular a reflexão de uma onda por um material poroso finito e assim avaliar a viabilidade do uso da técnica proposta. Verifica-se que as técnicas promotoras de esparsidade estudadas foram capazes de localizar e segregar o som direto do som refletido, para posterior cálculo da impedância acústica. Em um segundo momento, as técnicas também foram avaliadas com medidas reais. Para tanto, foi utilizado um arranjo linear com quatro microfones e dois materiais diferentes foram medidos: lã de vidro (material poroso) e madeira (material rígido). As medições indicam que o método é viável para uma banda limitada de frequência.

**Palavras-chave:** impedância acústica, medição *in situ*, arranjo de microfones, algoritmos promotores de esparsidade.

### ABSTRACT

The acoustic behavior of classrooms, cars, airplanes, theaters and other places is of great importance and subject of constant improvement. In order to simulate and predict the behavior of these spaces it is necessary to know its geometry and the acoustic impedance of the building materials. This research aims at characterizing the acoustic impedance of materials using an array of microphones and sparsity promoting regularization techniques. At first, a computational model was developed to simulate the wave reflection by a limited porous material and thus to evaluate the feasibility of the proposed technique. We were able to verify that the sparsity promoting algorithms used were able to separate direct and reflected sound, thus allowing the calculation of the reflection coefficient and acoustic impedance. In a second moment, the proposed technique was applied to a real measurement. In that sense, a linear array with four microphones was used and two different materials were measured: glass wool (porous material) and wood (rigid material). Measurements indicate that the method is applicable in a limited frequency band.

**Keywords:** acoustics impedance, *in situ* measurement, microphone array, sparsity promoting algorithms.

## 1. INTRODUÇÃO

A grandeza física que permite caracterizar a resposta acústica dos materiais é a sua impedância acústica. Uma definição mais formal da impedância acústica é dada como a medida da oposição que um sistema apresenta ao fluxo acústico, resultante de uma pressão acústica aplicada ao sistema. Para uma explicação detalhada sobre embasamento teórico desse assunto recomenda-se a leitura de [1].

A medição da impedância acústica ganhou importância nos últimos anos principalmente com a popularização de técnicas de simulação acústica e auralização, que têm a impedância como um dos seus parâmetros de entrada [2]. O método padrão para caracterização da impedância acústica é usando um tubo de impedância [3]. Este método possui o inconveniente de que as amostras precisam ser cortadas para que apenas parte delas sejam inseridas no tubo. Uma outra forma padronizada de caracterizar materiais é expondo o material a um campo sonoro reverberante dentro de uma câmara reverberante [4]. Este método permite a caracterização apenas do coeficiente de absorção do material, e não de sua impedância. Busca-se então uma forma de realizar a medição da impedância acústica *in situ*, ou seja, com o material intacto e onde o material é aplicado, o que permite examinar os efeitos de montagem de amostra (por exemplo, compressão), os efeitos do tempo (por exemplo, umidade e acúmulo de sujeira), os efeitos do ângulo de incidência da onda sonora [5], bem como caracterizar diversos tipos de ambientes [6] e cavidades (por exemplo, automóveis e aviões) [7].

Os principais métodos de medição *in situ* de impedância acústica são classificados e discutidos em [8]. Estes métodos variam amplamente quanto aos sensores usados esta tarefa [9–11]. Um dos métodos adapta um tubo de impedância para ser usado *in situ*, de forma a caracterizar a pressão sonora e a velocidade de partícula no final do tubo onde está a amostra [12]. Outros métodos se utilizam de um microfone e aplicam diversas técnicas de processamento de sinais para realizar a medição do coeficiente de absorção [13] ou coeficiente de reflexão [14] através da relação entre a pressão incidente e refletidas no ambiente em estudo.

O uso de arranjo de microfones está dentre as formas mais inovadoras de medição de impedância. Onde eles permitem realizar uma estimativa do campo acústico incidente sobre um arranjo. Quando esta informação é exibida na forma de um mapa de cores sobreposta a uma imagem fotográfica, dá-se o nome de imagem acústica ao resultado [15], que permite a captação da informação sonora vindo de uma dada direção enquanto o ruído ou as informações provenientes das demais direções são suprimidas. É justamente esta segunda característica que torna o uso de arranjos de microfones interessante para a medição acústica, assumindo que ela permita segregar a onda incidente da onda refletida e estas duas das demais ondas interferentes.

Mas apesar de a popularidade de arranjos de microfones ter aumentado consideravelmente nas últimas décadas, sua aplicação para medição de impedância acústica ainda é rara. Isso pode ser explicado, em parte, pelas seguintes dificuldades: como os arranjos são, em geral, pequenos se comparados ao comprimento de onda sob análise e contêm um número relativamente reduzido de microfones, a resolução espacial obtida é muito baixa.

Para a resolução espacial do arranjo sem, contudo, aumentar o número de sensores propomos o uso de algoritmos promotores de esparsidade para separar os componentes da onda incidente e da onda refletida pelo material que incidem sobre o arranjo [16]. Alguns métodos com este intuito já foram propostos para aplicações de imageamento acústico, como por exemplo [16–18], que

aplicam técnicas de deconvolução para eliminar o efeito da função de espalhamento do arranjo na imagem estimada. Técnicas esparsas são consideradas técnicas matemáticas que buscam uma melhor resolução espacial usando o conhecimento *a priori* de que o campo sonoro é composto por poucas fontes. Isto resulta em uma localização mais acurada das fontes sonoras do ambiente de teste e da estimação de suas energias. Assim, através do uso das técnicas esparsas para uma melhor resolução nas direções das ondas incidente e refletida, junto do uso da modelagem de campo acústico sonoro foi possível caracterizar a impedância acústica.

Além disso, quando medições são realizadas *in situ* e não é possível fazer uma medida direta, é necessário modelar o campo acústico do ambiente. Para isso, foi modelado o campo acústico frente a presença de uma amostra não localmente reativa [1]. Isso significa que a amostra em teste possui alto índice de refração, fazendo com que o ângulo de refração se torne pequeno o suficiente para que ele seja independente do ângulo de incidência. Esses conceitos são o suporte para a criação da simulação proposta nesse trabalho.

Este documento tem quatro seções à seguir. Primeiro, a descrição, explicação da teoria por trás do método escolhido, e os resultados numéricos para simulação de medição proposta. Posteriormente, as características e resultados para as medições realizadas em câmara anecoica são mostradas. Seguido de uma breve discussão dos resultados. Finalmente, a conclusão junto de recomendações para trabalhos futuros deste trabalho são apresentadas.

## 2. MODELAGEM DO PROBLEMA

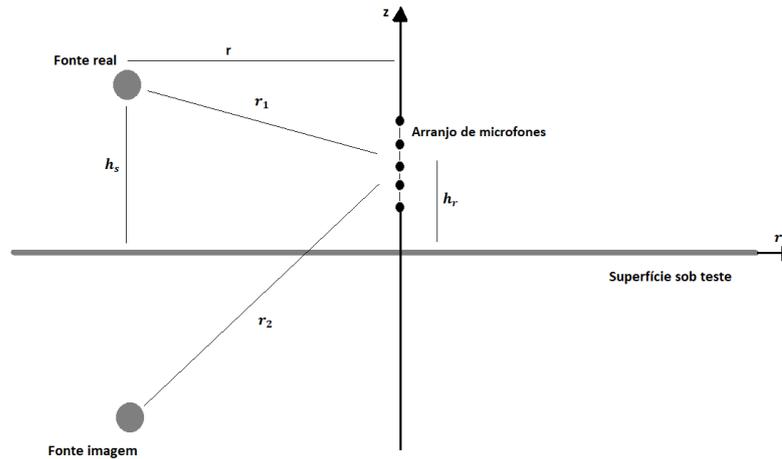
Como foi mencionado previamente, inicialmente foi construído em Matlab um modelo matemático para simular diversas situações de disposição da fonte, amostra e arranjo de sensores sobre uma amostra de tamanho infinito. Nesta etapa é possível avaliar a influência dos algoritmos de filtragem espacial no resultado observado.

Para as simulações realizadas até o momento foi utilizado o modelo encontrado em [1]. Nesse modelo a primeira fonte é denominada de real (pode ser chamada de fonte objeto devida a semelhança com problemas da óptica física) que gera a pressão incidente sobre a amostra. A segunda fonte é chamada de fonte imagem, nessa abordagem pode-se dizer que a pressão refletida é emitida por ela. Utilizando como referencial o plano que contém a amostra, a posição da fonte imagem é simétrica à posição da fonte objeto em relação ao plano da amostra. Esse esquema é ilustrado na Figura 1.

As incógnitas representadas na Figura 1 são a distância da fonte real ao microfone  $r_1$ , a distanciada fonte imagem ao microfone  $r_2$ , a distância da fonte real ao vetor normal a superfície sob teste passando pelo microfone  $r$ , a distância da fonte real a superfície sob teste  $h_s$  e a distância de cada microfone a superfície sob teste  $h_r$ . Importante que essas distâncias são mantidas fixas para cada ensaio. As relações entre as distâncias da Figura 1 podem ser obtidas pelas seguintes equações:

$$r_1 = \sqrt{r^2 + (h_s - h_r)^2}, \quad (1)$$

$$r_2 = \sqrt{r^2 + (h_s + r)^2}. \quad (2)$$



**Figura 1:** Propagação de ondas esféricas sobre uma superfície plana.

## 2.1 Modelo acústico de amostra não localmente reativa

Quando consideramos a amostra sob teste localmente reativa, isso implica que sua impedância de superfície  $Z_s$  não varia com o ângulo de incidência  $\theta$ . A pressão sonora resultante, neste caso, é dada pela Equação (3), em que o primeiro termo é referente à onda incidente, o segundo termo à onda refletida (fonte imagem) e o terceiro termo se refere à absorção e difração da onda esférica na amostra.

$$p = \frac{e^{-jk_0 r_1}}{r_1} + \frac{e^{-jk_0 r_2}}{r_2} - \frac{2k_0 \rho_0 c_0}{Z_s} \int_0^\infty e^{\frac{2k_0 \rho_0 c_0}{Z_s} q} \frac{e^{-jk_0 \sqrt{r^2 + (h_s + h_r - jq)^2}}}{\sqrt{r^2 + (h_s + h_r - jq)^2}} dq. \quad (3)$$

Pela Equação (3) nota-se que é necessário estimar a impedância de superfície para este método. Para tanto, foi utilizado um modelo que baseado no modelo de Allard e Champoux [19], onde é possível estimar a impedância característica da amostra segundo as equações

$$Z_c = \sqrt{K \rho_c}, \quad (4)$$

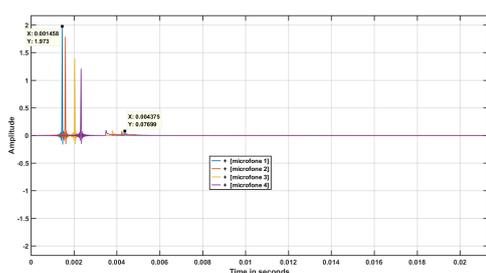
$$K = \frac{\gamma P_0}{\gamma - \frac{1}{1 + \frac{\sigma \phi}{j \alpha_\infty \rho_0 B_2 \omega} (1 + \frac{4j \alpha_\infty^2 \rho_0 n \omega}{\sigma^2 \wedge^2 \phi^2})^{1/2}}}, \quad (5)$$

$$\rho_c = \rho_0 \alpha_\infty \left[ 1 + \frac{\sigma \phi}{j \alpha_\infty \rho_0 B_2 \omega} \left( 1 + \frac{4j \alpha_\infty^2 \rho_0 n \omega}{\sigma^2 \wedge^2 \phi^2} \right)^{1/2} \right], \quad (6)$$

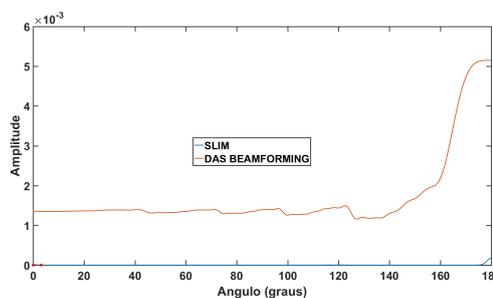
onde  $\phi$  é a porosidade do material (definido como a razão entre o volume total dos poros e o volume total ocupado pelo material),  $\sigma$  é resistividade ao fluxo (facilidade de um fluxo de ar em penetra e atravessar uma camada do material poroso),  $\alpha_\infty$  é a tortuosidade (desvio da orientação dos poros em relação à direção de propagação no interior do material),  $\wedge$  é o comprimento característico (razão da média entre o volume e a área superficial dos poros do material),  $n = 1,8410^{-5} [Pa.s]$  é a viscosidade do ar,  $B_2 = 0,77$  é o número de Prandtl e  $\gamma = C_p/C_v$  é a razão de calores específicos do gás a pressão constante  $C_p$  e a volume constante  $C_v$ .

### 3. RESULTADOS NÚMERICOS

Com o modelo apresentado na seção anterior foi gerada a pressão total (incidente mais refletida) para um determinado ponto no espaço, como pode ser visto na Figura 2a. Este ambiente é formado por uma fonte e uma amostra, amostra essa que gera a onda refletida no ambiente, sendo assim, torna-se possível determinar qual seria a pressão medida por um arranjo de microfones (4 pontos distintos no espaço), possibilitando o cálculo da impedância de superfície. Porém, para simular corretamente essa medição é necessária a estimação da impedância de superfície dessa amostra (no caso um material poroso) através da Equação (4). Para isso foi utilizado os valores obtidos em [1]. A Figura 3b ilustra o resultado teórico para o coeficiente de absorção de um material poroso (melamina). Importante ressaltar que os resultados foram compatíveis com os encontrados em [1]. Além disso, os métodos esparsos SLIM (Sparse learning via iterative minimization) e RELAX (Relaxation algorithm) [16], foram utilizados para segregar o campo sonoro. De forma sucinta o SLIM é responsável pela localização das fontes sonoras no ambiente de teste, e o RELAX pela recuperação da energia sonora e da forma de onda daquele ambiente. Foi possível verificar que o SLIM conseguiu identificar adequadamente a posição das duas fontes geradas Figura 2b, fonte objeto em  $180^\circ$  e fonte imagem em  $0^\circ$ . Além disso, o RELAX conseguiu recuperar a relação entre as energias de forma adequada (Figura 3a).

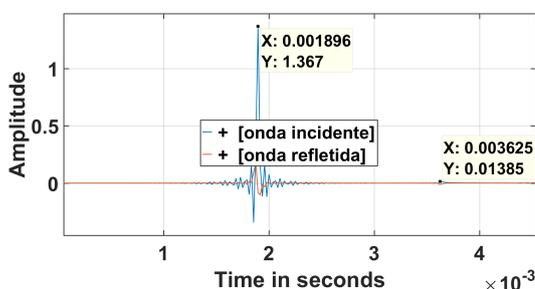


(a) Simulação do campo acústico em um ambiente com melamina

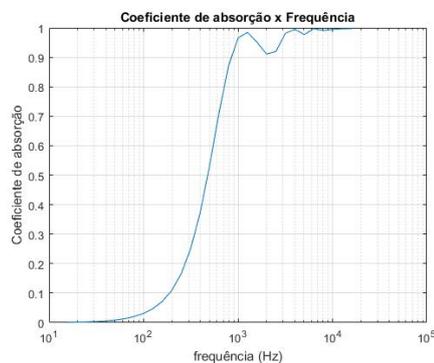


(b) Localização das fontes pelo algoritmo SLIM

Figura 2: Gráficos gerados da simulação



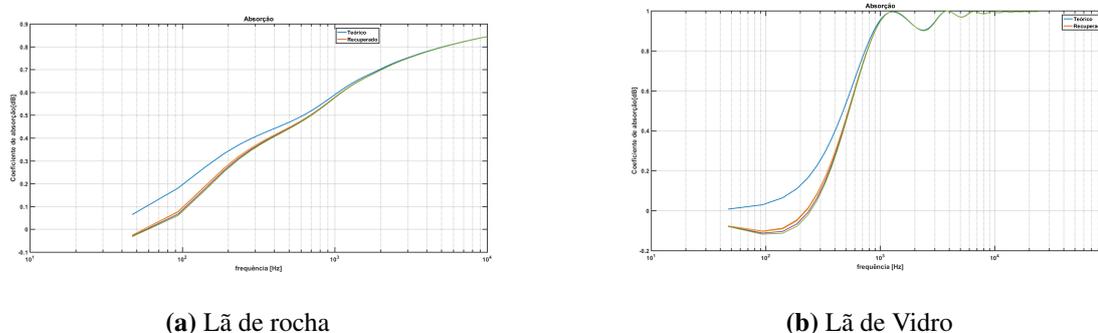
(a) Recuperação da energia do ambiente com aplicação do algoritmo RELAX na onda gerada



(b) Simulação para coeficiente de absorção com modelo Allard [9]

Figura 3: Gráficos gerados da simulação

Obtendo-se a direção e o valor da energia sonora é possível calcular os valores do coeficiente de reflexão ( $R$ ), Impedância de superfície ( $Z_s$ ), e coeficiente de absorção ( $\alpha$ ). Esses cálculos foram feitos assumindo onda plana, e podem ser encontrados em [1]. Por motivos de logística nesse artigo apenas os resultados teóricos do coeficiente de absorção para as amostras escolhidas serão mostradas (vide Figura 4).



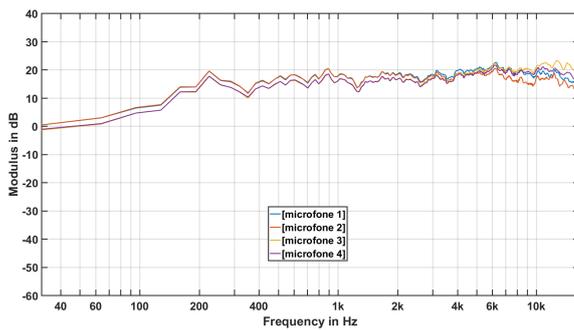
**Figura 4:** Comparação dos valores teóricos e dos recuperados do coeficiente de absorção na simulação

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A segunda parte desse trabalho é a aplicação do modelo de medição elaborado anteriormente em um ambiente real. Para isso, medições foram feitas em bandas de frequência limitada, garantindo sempre condição de incidência próximas de ondas planas, já que realizadas as medidas em câmara anecoica. Os instrumentos utilizados foram: arranjo de microfones formado por quatro microfones Gras 26CA (com preamplificador PCB 583A), alto-falante Yamaha HS5, e sistema de aquisição LMS Scadas—usado para gerar e reproduzir o sinal de excitação e para condicionar e fazer aquisição do sinal dos microfones. O pós-processamento foi todo feito com o software MATLAB.

Para a etapa de medição foi necessário selecionar os materiais a serem medidos. Acredita-se que materiais previamente caracterizados seriam ideais e por esta razão foram escolhidas amostras de lã de rocha e lã de vidro (materiais porosos) que foram caracterizadas previamente em tubo de impedâncias [20].

Primeiramente foi feita uma medição com os quatro microfones, averiguando possíveis diferenças na medição de cada um deles, a diferença na fase de cada um é uma das possíveis diferenças. Através dessa medição foi possível calibrar (Figura 5a) o sistema de microfones para as medições subsequentes. O nível do alto-falante foi diminuído e dos quatro microfones aumentado para reduzir efeitos não-lineares. A diferença de fase encontrada nos microfones era na região abaixo de 100Hz e acima de 9000Hz. A relação pico-ruído (PNR) era de 50dB para aquelas condições de medição.



(a) Nível por frequência da medição dos quatro microfones



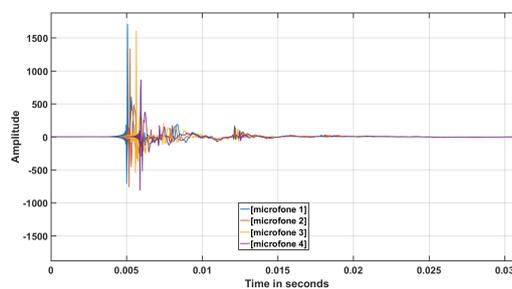
(b) Sistema de medição na câmara anecoica FEM. Arranjo de microfones com distância coprima [21] mais fonte

**Figura 5:** Gráficos sobre a medição

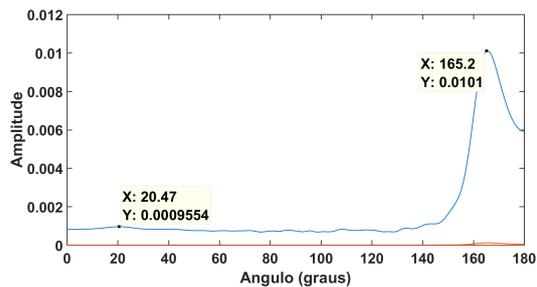
Posteriormente o arranjo dos microfones foi construído (ilustrado dentro da Figura 5b), sendo a distância entre cada um deles selecionada através da construção de arranjo não redundante [22]. Assim, garante-se que o arranjo é formado pela maior possibilidade de diferentes distâncias entre cada par de microfones. As medições foram feitas com o sinal de excitação sendo uma varredura exponencial com frequências de 60 a 16000 Hz. A Figura 5b ilustra o aparato e as condições para as medições.

A pressão sonora medida na câmara anecoica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Campinas é apresentada na Figura 6. Nota-se a semelhança dela com a da onda gerada artificialmente (apresentada na Figura 2a).

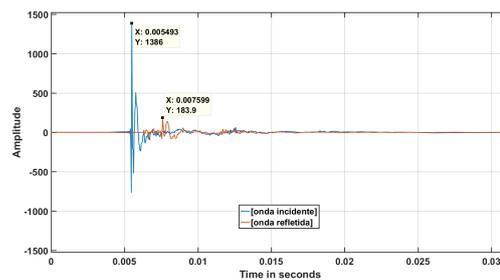
Por questão de logística os resultados dos algoritmos esparsos serão indicados somente para a lâ de rocha neste artigo. Na Figura 4a é verificado que o algoritmo SLIM conseguiu identificar as posições das fontes, uma localizada em  $0^\circ$  e a outra em  $290^\circ$ . Como é mencionado em [16], o algoritmo SLIM tende a distorcer a informação da amplitude de energia. Para isso é necessário recuperar essa informação com outro algoritmo (RELAX) Figura 7b.



**Figura 6:** Pressão sonora medida na câmara anecoica da FEM

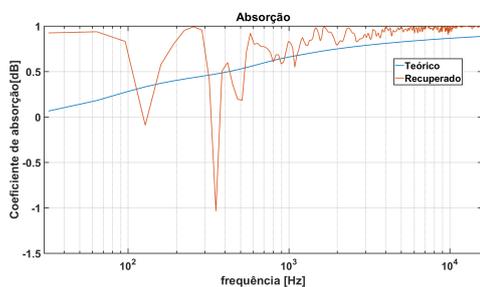


(a) Resultado da separação de fontes com o algoritmo SLIM [16]

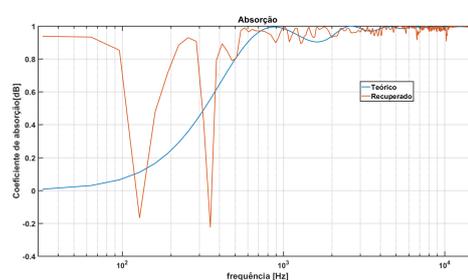


(b) Resultado da recuperação da energia sonora com o algoritmo RELAX

**Figura 7:** Resultados da aplicação dos algoritmos esparsos



(a) Lã de rocha



(b) Lã de Vidro

**Figura 8:** Comparação dos valores teóricos e dos recuperados do coeficiente de absorção da medição na FEM

Por fim, foi possível calcular os parâmetros acústicos, onde apenas coeficiente de absorção de ambas as amostras é ilustrado neste trabalho (Figura 8), segundo [1], que como foi ressaltado no início deste artigo é derivado da impedância acústica.

## 5. DISCUSSÃO

Tanto nos valores apresentados da simulação (Figura 4) e da medição (Figura 8), é notável que os resultados abaixo de 1000Hz não apresentam um comportamento real para o coeficiente de absorção. Porém, o formato da curva para valores acima de 1000 Hz apresenta um comportamento muito próximo do teórico. Pelo cálculo dos parâmetros acústicos ter sido realizado assumindo onda plana, que é uma aproximação razoável para frequências acima de 1000 Hz, mas não para as frequências abaixo (se propagariam como ondas esféricas). Onde no caso da onda esférica, tanto pressão incidente quanto a refletida dependem da posição. Logo, o coeficiente de absorção também será função da posição. Assim, faz diferença na posição onde a medição está sendo realizada. Idealmente teria-se que medir exatamente em cima da superfície, porque é este parâmetro que representa a amostra. Mas isso é muito complicado de medir, já que o menor dos microfones estaria a alguma distância da superfície causando diferença na medição. Além de que existe a possibilidade de o falante não responder adequadamente para toda essa região, uma melhor resolução ser necessária na medição, e até mesmo o fato de que para a câmara fosse perfeitamente anecoica na região de graves, ela precisaria ter uma maior dimensão.

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados são promissores. Eles ainda podem ser melhorados para a região abaixo de 1000Hz. Porém, tanto na simulação como na medição do material poroso o comportamento do coeficiente de absorção é coerente com as referências utilizadas. Além disso os algoritmos esparsos apresentaram bom funcionamento para localizar a fonte e recuperar a relação da energia sonora incidente e refletida.

Esses resultados mostram que a continuidade da pesquisa será em procurar melhorar os resultados para as baixas frequências. Para isso será necessário estudar o cálculo dos parâmetros acústicos para diferentes campos sonoros, em especial ondas esféricas.

Finalmente, seria interessante que novas medidas fossem realizadas com os materiais propostos. Verificando se existiu alguma interferência causada pelo ambiente de teste. Além de realizar medições de diferentes materiais com aplicações acústicas recorrentes. Com os resultados das novas medições, seria possível compará-los com os resultados obtidos em outros métodos de medição, especificamente a medição com tubo de impedância, afim de que fosse possível apontar qual a viabilidade do uso de arranjo de microfones e técnicas de esparsidade para a medição da impedância acústica in situ.

## REFERÊNCIAS

- [1] Brandão, E. *Acústica de Salas projeto e modelagem*. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2016.
- [2] Vorländer, M. *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. RWTHedition: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [3] ISO - 10534-2. Acoustics determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 2: Transfer-function method, 1998.
- [4] ISO -354. Measurement of sound absorption in a reverberation room Title, 1985.
- [5] Brandão, E. *Análise teórica e experimental do processo de medição in situ da impedância acústica*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2011.
- [6] Tijs, E.; Bree, H. E. D. e Brandão, E. Large scale in situ acoustic reflection measurements in a theatre. *Nag/Daga*, pages 549–552, 2009.
- [7] Tijs, E.; Bree, H. E. D. e Brandão, E. “In situ PU surface impedance measurements for quality control in an assembly line,”. *Proceedings of SAE international*, 2009.
- [8] Brandão, E.; Lenzi, A. e Paul, S. A review of the in situ impedance and sound absorption measurement techniques. *Acta Acustica united with Acustica*, 101(3):443–463, 2015.
- [9] Allard, J. F.; Champoux, Y. e Nicolas, J. Impedance Measurement At Oblique Incidence and Low Frequencies. *Journal of the Acoustical Society of America*, 86(2):766–770, 2014.
- [10] Kruse, R. “Application of the two-microphone method for in-situ ground impedance measurements,”. *Acta acustica united with acustica*, 93 (5):837–842, 7.
- [11] Jansens, G.; Lauriks, W.; Vermeir, G. e Allard, J. F. Free field measurements of the absorption coefficient for nonlocally reacting sound absorbing porous layers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(4): 1327–1334, 2002.

- [12] Champoux, Y.; Berry, A. e Amedín, C. K. Acoustical characterization of absorbing porous materials through transmission measurements in a free field. *102(4):1982–1994*, 1997.
- [13] Garai, M. Measurement of the Sound-Absorption Coefficient In Situ . The Reflection Method Using Periodic Pseudo- random Sequences of Maximum Length. *Applied Acoustics*, 39:119–139, 1993.
- [14] Mommertz, E. Angle-dependent in-situ measurements of reflection coefficients using a subtraction technique. *Applied Acoustics*, 46(3):251–263, 1995.
- [15] Johnson, D. H. e Dudgeon, D. E. Array signal processing. *Connexions - Web-based authoring, teaching and learning environment*, 1993.
- [16] Wang, Y.; Li, J.; Stoica, P.; Sheplak, M. e Nishida, T. Wideband RELAX and wideband CLEAN for aeroacoustic imaging. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(2):757–767, 2004.
- [17] Yan, S.; Ma, Y. e Hou, C. Optimal array pattern synthesis for broadband arrays. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(5):2686–2696, 2007.
- [18] Remillieux, M.; Camargo, H.; Burdisso, R. e Ng, W. Aeroacoustic study of a 26%-scale, high-fidelity, Boeing 777 main landing gear in a semi-anechoic-wind-tunnel test section. *13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (28th AIAA Aeroacoustics Conference)*, (May 2007), 2007.
- [19] Allard, J.; Champoux, Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1992.
- [20] Zaroni, G. P. *Caracterização acústica de materiais com dupla porosidade usando lãs minerais*. Dissertação de mestrado, Universidade de Campinas, 2018.
- [21] Qin, S.; Zhang, Y. D. e Amin, M. G. Generalized coprime array configurations for direction-of-arrival estimation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 63(6):1377–1390, 2015.
- [22] Vertatschitsch, E. e Haykin, S. Nonredundant arrays. *Proceedings of the IEEE*, 74(1):217–217, Jan 1986.