

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

EAnoise: Medição da impedância de superfície *in-situ* utilizando instrumentação de baixo custo

Candido, S.¹; Brandão, E.¹; Serrano, P.², Mareze, P.¹

¹ Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, sidney.candido@eac.ufsm.br

² Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, eric.brandao@eac.ufsm.br

³ Portal Acústica, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, contato@portalacustica.info

⁴ Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, paulo.mareze@eac.ufsm.br

Resumo

Neste trabalho, os autores abordam a técnica de medição de impedância de superfície *in-situ* em campos difusos, conhecida como EAnoise. Medições *in-situ* são versáteis e não-destrutivas. O método EAnoise considera o som residual ou ruído incoerente como sinal de excitação, o que torna o método independente de uma fonte sonora padronizada. O método EAnoise consiste na medição e processamento da Função Resposta em Frequência entre dois microfones posicionados próximos à amostra. O processo de medição e estimativa da impedância de superfície é simples. Além disso, possibilita a utilização de instrumentação de baixo custo, o que é investigado neste artigo. A repetibilidade do método foi avaliada em medições realizadas em um painel acústico de lã de vidro, investigando a influência de duas fontes localizada em duas salas com volumes distintos. Para verificar a aplicabilidade e confiabilidade do método, um absorvedor ressonante também foi medido e os resultados comparados com as estimativas calculadas pelo método de matriz de transferência.

Palavras-chave: Impedância de superfície, coeficiente de absorção, medição *in-situ*, absorvedor poroso, absorvedor ressonante.

PACS: 43.55.Ev, 43.58.Bh, 43.55.Nd.

EAnoise: *in-situ* surface impedance measurement using low-cost instrumentation

Abstract

In this paper, the authors approach the *in-situ* measurement of the surface impedance in diffuse fields, referred to as EAnoise. *In-situ* measurements are versatile and non-destructive. The EAnoise method considers the background or incoherent noise as the excitation signal, which makes the method independent of a standardized sound source. The EAnoise method measures and processes the Frequency Response Function between two microphones close to the sample. A straightforward inversion is used to estimate the surface impedance is simple. In addition, it enables the use of low-cost instrumentation, which is investigated in this paper. The method's repeatability is assessed in measurements of a glass wool acoustic panel, investigating the influence of two sources located in two rooms with different volumes. A resonant absorber was also measured, and the absorption coefficient is compared to the estimations calculated by the transfer matrix method.

Keywords: Surface impedance, absorption coefficient, *in-situ* measurement, porous absorber, resonant absorber.



1. INTRODUÇÃO

As soluções aplicadas no condicionamento acústico de edificações, na acústica arquitetônica e no controle de ruído normalmente requerem a aplicação de materiais fono-absorvedores. Logo, se faz necessário conhecer as propriedades acústicas destes materiais, sendo a impedância de superfície uma propriedade ligada a absorção sonora, dada pela razão das amplitudes complexas da pressão sonora e da velocidade de partícula normal à interface entre dois meios (e.g. um material poroso e ar) [1].

A literatura sobre materiais sonoros absorvedores é bastante extensa e inúmeros autores já contribuíram para o atual estado da arte sobre o tema. O trabalho experimental de Delany e Bazley [2] abriu espaço para o desenvolvimento de diversos modelos que calculam a impedância característica e a constante de propagação de um meio poroso. Tais propriedades são intrínsecas do material, e possibilitam a estimativa da impedância de superfície e do coeficiente de absorção (características da amostra aplicada). O modelo de Delany e Bazley [2] apresenta certas limitações em baixa frequências e uma correção foi proposta por Miki [3].

No que tange à caracterização experimental, há dois métodos normatizados, a saber:

- ISO 10534 – 2 [4], conhecido como o método de tubo de impedância. Este considera apenas a incidência de ondas planas e normais a superfície. Além disso, é método destrutivo;
- ISO 354 [5], conhecido como o método da câmara reverberante. Este é aplicado em um ambiente laboratorial controlado e de grande porte, requer áreas expressivas de amostras ($10 - 12 \text{ m}^2$). Além disso, apenas o coeficiente de absorção por incidência difusa é obtido, não sendo possível calcular diretamente a impedância de superfície.

Os métodos de medição de impedância *in-situ* possuem grande apelo prático, pois podem levar em conta as condições de montagem dos materiais acústicos, são não destrutivos e consideram a influência do ângulo de incidência da onda sonora.

Diversos métodos de medição *in-situ* foram propostos. Uma extensa e detalhada revisão do tema é realizada no trabalho de Brandão et al. [6], em que as técnicas de medição *in-situ* baseadas em formulação de campo acústico são classificadas em dois grupos: (i) de propagação de onda esférica (SWA - *Spherical Wave Approximation*); (ii) de propagação de onda plana (PWA - *Plane Wave Approximation*), em que o método do presente trabalho se encaixa.

Neste trabalho, os autores exploram o método de medição *in-situ* de impedância de superfície conhecido como EAnoise [7]. Demonstra-se que o método pode ser utilizado com instrumentação de baixo custo. A repetibilidade do experimento é investigada, verificando a influência do volume do ambiente onde é realizado a medição e a influência da fonte. Demonstrações da medição de materiais porosos e de um absorvedor ressonante são realizadas. Por fim os autores discutem a aplicabilidade do método e suas limitações.

O trabalho é estruturado da seguinte forma: na Sec. 2 o método EAnoise é apresentado com suas pré-suposições, método de calibração e algoritmo para recuperação da impedância de superfície; na Sec. 3 a metodologia experimental usada no trabalho é apresentada; na Sec. 4 são apresentados os resultados obtidos e discussões, seguidos pelas conclusões do trabalho na Sec. 5.

2. MÉTODO EANOISE

O método de medição *in situ* EAnoise foi batizado a partir do termo "*Environmental Anonymous Noise*". Ou seja, um ruído "anônimo" (e.g. conversas, ruído de maquinário, etc.) excita o ambiente em que a amostra está aplicada e sensores próximos à amostra captam as informações do campo acústico. O método EAnoise difere de outras técnicas por poder utilizar este ruído. O uso de alto-falantes emitindo sons não correlacionados também garante a condição de ruído necessária para o método [7].

O experimento é baseado na medição da Função Resposta em Frequência (FRF) entre dois microfones (sistema PP) localizados próximo à amostra. Na Figura 1 é apresentado um esquemático simplificado da geometria do experimento. A amostra recebe um campo sonoro considerado difuso.

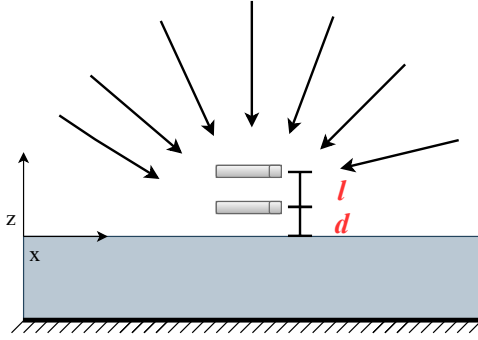


Figura 1: Esquemático da medição. Neste caso, considera-se uma amostra sobre superfície rígida (em azul). O campo incidente é considerado difuso.

Para o referido experimento utilizou-se um microfone Behringer ECM8000 e um microfone Daytonn EMM-6. Ambos são microfones capacitivos omnidirecionais de baixo custo (com respeito a instrumentação de laboratório). Os microfones foram conectados a uma mesa de som ALESIS MultiMix 16 USB 2.0 para realizar a aquisição dos sinais. Estes então são gravados e processados utilizando algoritmos implementados em MATLAB.

2.1 Calibração

Devido às diferenças de sensibilidade (amplitude) e de fase entre os microfones, causadas por incertezas no processo de fabricação de cada um, deve-se aplicar uma calibração relativa. Utiliza-se neste trabalho a calibração com base na média geométrica entre duas medições de FRF. Assim, mede-se um par de FRF's invertendo o posicionamento de microfones. A FRF corrigida H_m é dada por:

$$H_m = \sqrt{\frac{H_{12}}{H_{21}}}, \quad (1)$$

na qual H_{12} é a FRF original, e H_{21} é a FRF medida com os microfones invertidos. Então, H_m é medida acima da amostra e utilizada no cálculo da impedância de superfície, demonstrado a seguir.

2.2 Recuperação da impedância de superfície

Quando um material encontra-se aplicado em uma sala ou cavidade e o campo sonoro é excitado por uma ou mais fontes, os sinais de pressão sonora captados pelos microfones são usados para estimar a impedância de superfície da amostra. Tais sinais podem ser vistos como resultado da inter-

ferência de frentes de onda oriundas de diversos ângulos de incidência. Ademais, o método de Welch [8] é utilizado para segmentar os sinais medidos e obter as FRFs H_{12} e H_{21} , que podem ser vistas como médias espectrais ao longo do tempo.

De posse da FRF calibrada, H_m , pode-se calcular a impedância de superfície. No trabalho de Takahashi et al. [9] é proposta uma simplificação com o uso do modelo descrito na Equação (2), a saber

$$\frac{Z_s}{\rho_0 c_0} = \frac{H_m(1 - e^{2jk(l+d)}) - e^{jkl}(1 - e^{2jkd})}{H_m(1 + e^{2jk(l+d)}) - e^{jkl}(1 + e^{2jkd})}, \quad (2)$$

na qual l é o espaçamento entre os microfones, d a distância do microfone mais próximo até a amostra, $k = \omega/c_0$ é a magnitude do número de onda do ar, com ω sendo a frequência angular e c_0 a velocidade do som; $j = \sqrt{-1}$ é a unidade imaginária. Note que a Equação (2) assume a incidência de apenas uma onda plana normal à superfície, diferindo da condição de excitação da amostra. No entanto, essa pré-suposição é necessária para se possuir uma solução analítica para Z_s em função da H_m medida. Ela também fornece um método prático de estimativa da absorção sonora *in situ*, o que tem valor prático.

A principal desvantagem prática é que este método de recuperação de Z_s apresenta limitações para frequências maiores que 3.000 [Hz], o que foi concluído após extensa investigação. Por outro lado, no trabalho de pesquisa dos autores, modelos de campo acústico mais complexos estão sendo desenvolvidos e testados. Estes envolvem pré-suposições mais sofisticadas de incidência difusa e levam à necessidade de métodos de recuperação iterativos. Tais análises fogem ao escopo deste artigo e serão apresentadas em outras publicações.

Com a impedância de superfície normalizada, Z_s , pode-se estimar o coeficiente de absorção, dado por

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - 1}{Z_s + 1} \right|^2. \quad (3)$$

Note que a mesma pré-suposição de uma onda plana em incidência normal se aplica com a Equação (3).



3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Dois tipos de experimentos são realizados neste estudo. No primeiro a repetibilidade da técnica é avaliada por meio da medição de uma amostra de material poroso. No segundo experimento, uma amostra de um absorvedor ressonante é testada e seu coeficiente de absorção comparado com um modelo analítico.

3.1 Teste de repetibilidade

A repetibilidade do experimento é investigada avaliando um painel acústico composto por lã de vidro emoldurada por ripas de madeira e revestido por um tecido acusticamente transparente. O painel tem dimensões $1,2 \times 0,6$ [m²] e 50 [mm] de espessura.

O experimento foi conduzido em duas salas distintas: (i) um quarto mobiliado, com volume aproximado de **35 [m³]** (**Sala 1**); (ii) uma oficina com volume aproximado de **150 [m³]** (**Sala 2**).

Também foram utilizadas duas fontes sonoras, a fim de avaliar sua influência no experimento: (i) uma **JBL GO 2**, que possui um único alto-falante e sua diagonal com tamanho de 105 [mm] (Figura 2a); (ii) uma caixa de som do sistema *mini HI-FI system* **LG CM8350**, que possui três alto-falantes de 240 [mm], 100 [mm], e 20 [mm] (*twitter*) de diâmetro, para reprodução de baixas, médias e altas frequências, respectivamente. A fonte sonora (ii) possui 2 dutos ressonadores com 70 [mm] de diâmetro e 140 [mm] de profundidade. As dimensões são de $450 \times 350 \times 250$ [mm] (Figura 2a). Nos experimentos realizados neste trabalho, as fontes sonoras foram movimentadas nas salas durante o tempo de coleta dos sinais. Essa estratégia visa obter uma FRF média que aproxima-se ao máximo de um campo acústico difuso.

O sinal utilizado como excitação do campo sonoro é uma varredura de senos (*sweep*) com duração de 6 [s]. A excitação é contínua e em *loop*. O tempo de aquisição é de 30 [s]. Os sinais adquiridos passam por processamento estatístico de sinais [8]. Janelas *Hamming* de 1 [s] e *overlap* de 50 [%] resultam em 45 blocos para o cálculo da FRF média, utilizada como entrada na Equação (2).

No teste de repetibilidade, o microfone mais próximo é posicionado a uma distância $d = 10$ [mm] da superfície da amostra. O espaçamento entre os



Figura 2: Fontes sonoras utilizadas nos experimentos.

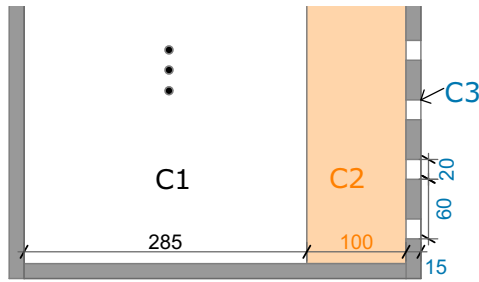
microfones é $l = 20$ [mm] (ver Figura 1).

3.2 Absorvedor ressonante

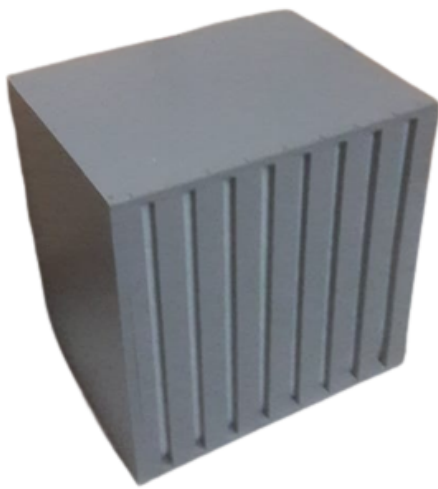
Um ressonador de placa ranhurada foi desenvolvido para um estúdio de audição crítica, visando mitigar a influência dos modos acústicos na região de 180 [Hz]. Na fase de projeto, estimou-se o coeficiente de absorção, por incidência normal, com o método de matriz de transferência (TMM) [10, 11]. Então, o absorvedor foi construído e medido utilizando o método EAnoise.

Para estimar o coeficiente de absorção do ressonador com o método TMM, considerou-se um sistema de três camadas, com um desenho esquemático apresentado na Figura 3a. A primeira camada (C1), mais próxima da superfície rígida, consiste numa camada de ar com 285 [mm] de espessura. A segunda camada (C2) consiste num material poroso com 100 [mm] de espessura e resistividade ao fluxo de 3.940 [Nsm⁻⁴]. A resistividade do material foi estimada a partir de sua curva de absorção, utilizando o método de ajuste de curva dos mínimos quadrados. A camada de material poroso com 100 [mm] de espessura foi realizada pela junção de 4 placas de 25 [mm]. Por fim, uma placa de madeira ranhurada, com 15 [mm] de espessura, foi adicionada no topo da camada de material poroso (C3). As ranhuras possuem 20 [mm] de largura sendo espaçadas em 60 [mm] umas das outras. A placa ranhurada é constituída por ripas de MDF laminado. Uma fotografia do ressonador construído é mostrada na Figura 3b.

O absorvedor ressonante foi medido apenas na **Sala 2** com a caixa **LG CM8350**. O absorvedor foi disposto na **Sala 2** com a placa ranhurada



(a) Corte de topo. C1 representa a camada de ar, mais próxima a superfície rígida. C2 é a camada de material poroso e C3 representa a placa ressonante ranhurada. Unidades em mm.



(b) Foto do ressonador construído.

Figura 3: Esquemático e foto do ressonador projetado e construído.

virada para cima, de modo que sua superfície estivesse distante de planos refletorres próximos. Na medição do absorvedor ressonante, o microfone mais próximo é posicionado a uma distância $d = 15$ [mm] da superfície da amostra. O espaçamento entre os microfones é $l = 22$ [mm] (ver Figura 1). Realizaram-se três medições: duas com ruído rosa como sinal excitação, com mais energia nas baixas frequências; e uma medição com o uso de um sinal que continha música e fala, consideradas como fontes de sinal utilizadas no método original [7].

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais do teste de repetibilidade com o absorvedor poroso e da medição do absorvedor resso-

nante.

4.1 Teste de repetibilidade

Na Figura 4 são apresentados, em bandas de terço de oitava, o coeficiente de absorção médio $\bar{\alpha}$ para cada valor de frequência e o intervalo de confiança IC para 95 % de probabilidade, calculado como:

$$IC = \bar{\alpha} \pm 1,96 S_{\alpha}, \quad (4)$$

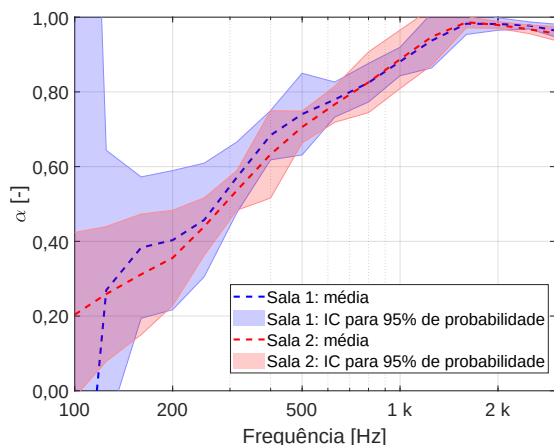
na qual S_{α} é o desvio padrão do conjunto.

Na Figura 4a o leitor pode observar o comparativo entre as salas 1 e 2, excitadas pela fonte **LG CM8350**. Em contrapartida, nota-se na Figura 4b o mesmo comparativo entre as salas 1 e 2, mas excitadas pela fonte **JBL GO 2**. Na Figura 4c é mostrado um comparativo entre as fontes sonoras 1 e 2, medidas na **Sala 2**. Cinco medições foram tomadas em cada experimento.

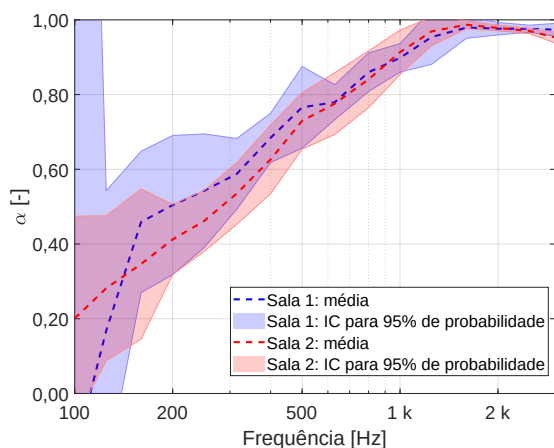
Nas Figuras 4a e 4b pode-se notar que o valor médio do coeficiente de absorção medido na **Sala 1** é maior que o medido na **Sala 2**. Isto pode ser atribuído a maior influência dos modos acústicos na **Sala 1**, que possui menor volume. A diferença no valor médio do coeficiente de absorção é mais significativa para a fonte **JBL GO 2** (Figura 4b), o que parece estar ligado a menor capacidade desta fonte em gerar uma boa relação sinal-ruído (SNR). Quando se compara o valor médio do coeficiente de absorção entre as duas fontes sonoras na **Sala 2**, os resultados são bastante similares (Figura 4c).

No que tange ao intervalo de confiança, pode-se notar que em todos os casos, este tende a aumentar com a diminuição da frequência (e também do coeficiente de absorção da amostra porosa). Abaixo de 160 [Hz], a incerteza é significativa, dificultando a caracterização da absorção sonora. Na banda de 100 [Hz], o intervalo de confiança medido na **Sala 1**, é muito grande, a ponto de tornar o valor médio do coeficiente de absorção negativo. A maior incerteza ocorrida na medição na **Sala 1** está associada a maior influência dos modos acústicos e à presença de superfícies refletoras próximas da amostra sob teste. Na **Sala 2**, as medições com ambas as fontes sonoras resultam num intervalo de confiança da ordem de $\pm 0,10$ para bandas de frequência acima de 200 [Hz], para as quais $\alpha \geq 0,40$.

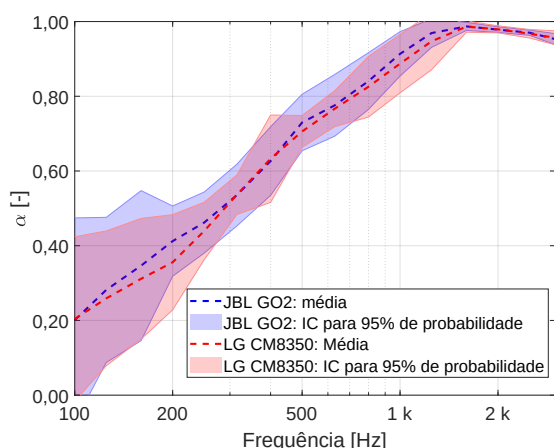
Tais resultados apontam ser possível caracterizar



(a) Comparativo entre Sala 1 e a Sala 2, usando a caixa LG CM8350;



(b) Comparativo entre Sala 1 e a Sala 2, usando a caixa JBL GO 2;



(c) Caixas LG CM8350 e JBL GO 2, Sala 2.

Figura 4: Coeficiente de absorção comparativo entre salas com diferentes volumes avaliadas com as caixas LG CM8350 e JBL GO 2. A Sala 1 possui 35 [m³] e a Sala 2 150 [m³].

in-situ amostras porosas na **Sala 1**. No entanto,

é aconselhável usar uma fonte sonora capaz de excitar o campo acústico com boa potência sonora na faixa de frequências pretendidas. Assim, será possível reduzir a incerteza de medição. Em ambientes com volumes maiores, como a **Sala 2**, o tipo de fonte sonora tem menor influência sobre o resultado. Ainda assim, a utilização da fonte **LG CM8350** se mostrou mais apropriada para obter resultados mais consistentes. Vale ressaltar que as caixas foram movimentadas nas salas durante o experimento, o que tornou a medição com a **LG CM8350** mais exaustivo, por conta do seu tamanho e massa.

4.2 Absoverdor ressonante

Na Figura 5 é apresentado o coeficiente de absorção por bandas de frequência de terço de oitava. O resultado estimado pelo método TMM (para incidência normal) é comparado com 3 curvas obtidas pelo experimento *in situ* usando a técnica EAnoise, sendo as Medições 1 e 2 utilizando ruído rosa e a Medição 3 utilizando música e fala como sinal de excitação. Entre as bandas de 20 [Hz] a 80 [Hz], é possível notar uma grande variação entre as curvas medidas. Isso é atribuído a pequena distância entre os microfones, já que neste caso a diferença entre as pressões sonoras medidas será muito pequena ($\lambda \gg l$ – Figura 1). Assim, qualquer perturbação no campo acústico tende a impactar a medição de maneira significativa, contribuindo para o aumento da incerteza de medição. Ainda assim, a Medição 1 apresentou boa concordância com o TMM nessa faixa de frequência.

Entre 100 [Hz] e 630 [Hz], a concordância entre as 3 curvas experimentais e o TMM é satisfatória. Entre as bandas de 800 [Hz] e 1250 [Hz], o coeficiente de absorção obtido nas medições 1 e 2 é menor que o estimado por TMM, com 0,20 de diferença na banda de 800 [Hz], quando comparado com a Medição 1 e 0,25 no caso da Medição 2. Na curva Medição 3, também é observado essa subestimativa, porém apenas na banda de 800 [Hz]. Nas bandas de 1.000 [Hz] e 1.250 [Hz], a absorção obtida com a Medição 3 é similar a estimada.

No absorvedor construído, uma única cavidade serve todas as 9 ranhuras, o que pode explicar a absorção reduzida em 800 [Hz]. Este efeito

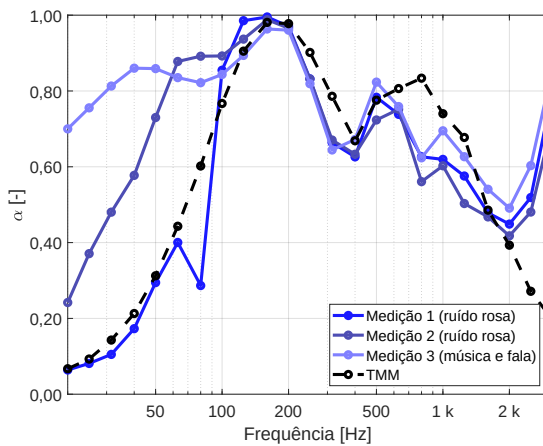


Figura 5: Coeficiente de absorção. Comparativo entre curvas medidas e obtido com o método de matriz de transferência (TMM).

foi investigado em [12]. Por outro lado, a curva experimental segue a mesma tendência geral da curva obtida pelo TMM. Acima de 2.000 [Hz], o método TMM estima um coeficiente de absorção $\alpha \leq 0,4$. Em contrapartida, a curva experimental apresenta um comportamento inesperado, o que pode estar ligado ao aumento da incerteza de medição para baixa absorção. Este ponto ainda requer um maior esforço investigativo.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho faz uma análise do método de caracterização da impedância de superfície *in-situ* conhecido como EAnoise. Este é um método experimentalmente simples, e tem como diferencial o uso do som residual ou o ruído de fontes incoerentes em um campo difuso como sinal de excitação.

A repetibilidade do método foi investigada experimentalmente. Microfones de baixo custo e duas fontes sonoras de uso comercial foram usadas nos experimentos, realizados em dois ambientes. Ao se medir uma amostra porosa e ao comparar a influência das duas fontes sonoras e das salas com volumes distintos, conclui-se que o uso da caixa LG CM8350 na sala de maior volume apresentou menor incerteza de medição, com intervalo de confiança da ordem de $\pm 0,10$ a partir de 200 [Hz] ($\alpha \geq 0,40$).

Um ressonador ranhurado também teve seu coeficiente de absorção estimado por TMM e medido *in situ*. Ainda que observadas divergências entre a curva estimada pelo modelo TMM e a medida, os

resultados mostraram tendências similares entre as bandas de frequência de 100 [Hz] a 2000 [Hz]. Abaixo de 100 [Hz], a incerteza de medição tende a aumentar devido à pequena distância entre os microfones. Na medição do ressonador, o método EAnoise mostrou limitações mais severas para as frequências acima de 2.000 [Hz] ($\alpha \leq 0,4$). Ainda assim, pode ser utilizado como ferramenta de análise de protótipo de tais dispositivos, visto que estes são projetados para atuar em frequências mais baixas.

Por fim, existem fatores a serem considerados no futuro, que são importantes assuntos de investigação. Primeiramente, o método de recuperação de impedância assume que a amostra sob teste tem dimensões infinitas. Assim, os efeitos de difração nas bordas e da impedância de radiação são desconsiderados, mas podem ter um efeito significativo. É preciso lembrar ainda que a Equação (2) assume a incidência de apenas uma onda plana normal à superfície, diferindo da condição de excitação da amostra. Além disso, para amostras finitas e sob condições de incidência difusa não se pode assumir *a priori* que a impedância de superfície seja constante em toda a superfície da amostra. Modelos mais sofisticados estão em estudo e espera-se que sua implementação leve a menores incertezas de medição e a uma interpretação física mais fidedigna da técnica de medição *in situ* EAnoise.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro parcial a este trabalho por meio do edital universal (processo nº 402633/2021-0).

REFERÊNCIAS

- [1] Brandão, Eric. *Acústica de Salas: Projeto e Modelagem*. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2016. ISBN 978-8521210061.
- [2] Delany, ME e Bazley, EN. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied acoustics*, 3(2): 105–116, 1970.
- [3] Miki, Yasushi. Acoustical properties of porous materials-modifications of delany-bazley models. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 11(1): 19–24, 1990.
- [4] ISO 10534-2: *Acoustics-Determination of sound ab-*



sorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 2. International Organization for Standardization Geneva, 1998.

- [5] *ISO 354: Acoustics Measurement of sound absorption in a reverberation room.* International Organization for Standardization Geneva, 2003.
- [6] Brandão, Eric; Lenzi, Arcanjo e Paul, Stephan. A review of the in situ impedance and sound absorption measurement techniques. *Acta Acustica united with Acustica*, 101(3):443–463, 2015.
- [7] Takahashi, Yasuo; Otsuru, Toru e Tomiku, Reiji. In situ measurements of absorption characteristics using two microphones and environmental “anonymous” noise. *Acoustical Science and Technology*, 24(6): 382–385, 2003.
- [8] Welch, Peter. The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, 15(2): 70–73, 1967.
- [9] Takahashi, Yasuo; Otsuru, Toru e Tomiku, Reiji. In situ measurements of surface impedance and absorption coefficients of porous materials using two microphones and ambient noise. *Applied Acoustics*, 66 (7):845–865, 2005.
- [10] Cox, Trevor e d’Antonio, Peter. *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application.* Crc Press, 2016.
- [11] Petrolli, Rinaldi; Zorzo, Artur e D’Antonio, Peter. Comparison of measurement and prediction for acoustical treatments designed with transfer matrix models.
- [12] Patricio, Jorge e Patraquim, Ricardo. Avaliação experimental da absorção sonora em painéis de madeira. 11 2008.