



IMPLEMENTAÇÃO DE PROTÓTIPO ACESSÍVEL PARA CARACTERIZAÇÃO IN SITU DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ACÚSTICA

Daniel Lucas Coutinho da Silva¹, José Robson Oliveira Júnior², Pedro Pio Rosa Nishida³, Ricardo Humberto de Oliveira Filho⁴

RESUMO: Os elevados custos da instrumentação acústica no Brasil limitam ensino e pesquisa, diante dessa problemática, este trabalho descreve o desenvolvimento e a validação experimental de um sistema de baixo custo para medir o coeficiente de absorção sonora. Baseado no método in situ, o protótipo utiliza Ruído Anônimo Ambiental como excitação. O hardware integra microfones reutilizados, placa de aquisição e suporte impresso em 3D para posicionamento *side-by-side*. Ensaios com materiais porosos absorventes demonstraram concordância com dados da literatura e fabricantes. Conclui-se que o dispositivo é uma alternativa econômica e viável para equipar laboratórios acadêmicos, fomentando a inovação tecnológica nacional.

Palavras-chave: absorção sonora; instrumentação de baixo-custo; método in situ; ruído anônimo ambiental; impressão 3D.

INTRODUÇÃO

A instrumentação em acústica e vibrações impõe elevados custos às instituições de ensino superior, agravados por cenários de restrição orçamentária. Como alternativa, desenvolveu-se um protótipo de baixo custo para a caracterização da impedância acústica e do coeficiente de absorção sonora (α) de materiais porosos, baseado no reaproveitamento de microfones de uma sonda de intensidade sonora inoperante. O sistema compreende um arranjo de transdutores fixados em suporte manufaturado via impressão 3D, integrados a um condicionador de sinais e a uma placa de aquisição, cujos cálculos e visualização dos resultados são realizados em ambiente computacional dedicado.

O diferencial deste trabalho reside na aplicação do método in situ fundamentado em Ruído Ambiental Anônimo (EA-Noise) (TAKAHASHI et al., 2005; OTSURO et al., 2009), que prescinde de fontes sonoras específicas ao assumir a condição de campo difuso para deduzir a impedância normal superficial de média de conjunto. A análise experimental demonstrou que o protótipo fornece medidas coerentes com valores catalogados e com o comportamento teórico esperado para absorvedores porosos. Dessa forma, o sistema valida-se como uma alternativa eficaz e sustentável, alinhada à lógica de economia circular, para laboratórios de pesquisa e ensino em engenharia de controle de ruído.

METODOLOGIA

A caracterização experimental utilizou amostras de lâ de rocha (espessura 0,1 m; densidade 32 kg/m³; área 0,296 x 0,443 m²) e lâ de vidro (espessura 0,05 m; densidade 40 kg/m³; área 0,132 x 0,186 m²). O arranjo experimental consistiu em dois microfones capacitivos de 0,5 pol, posicionados em configuração *side-by-side* paralela à amostra por meio de suportes manufaturados via impressão 3D. Os parâmetros geométricos fixados foram $d = 0,01$ m

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Graduando em Engenharia Mecatrônica.

² Universidade Federal de Uberlândia, Graduando em Engenharia Mecatrônica.

³ Universidade Federal de Uberlândia, Professor da Faculdade de Engenharia Mecânica.

⁴ Universidade Federal de Uberlândia, Professor da Faculdade de Engenharia Mecânica.

(distância entre o centro do microfone inferior e a superfície) e $l = 0,015$ m (espaçamento entre centros de transdutores). O sistema de aquisição integrou uma placa de quatro canais a um condicionador de sinais, conectada a um computador para processamento em ambiente MATLAB®.

O algoritmo desenvolvido executou a aquisição síncrona de dois sinais de pressão sonora, realizando a calibração de amplitude e a correção de descasamento de fase via técnica de *switching*. Para o cálculo da impedância e do coeficiente de absorção (α), o script processou funções de transferência com frequência de amostragem $f_s = 16384$ Hz e $N_{fft} = 16384$ pontos, garantindo uma resolução espectral de 1 Hz. Foram aplicados filtros digitais e critérios de exclusão para sinais com picos excedentes a 10 dB da média, além da análise da função coerência (γ^2) para assegurar a validade estatística das medições, adotando-se $c = 343$ m/s para a velocidade do som.

Os ensaios ocorreram no Laboratório de Acústica e Vibrações da UFU, com monitoramento do tempo de reverberação (RT_{60}) para fins de reprodutibilidade. Embora o método EA-Noise prescindia de fontes específicas, utilizou-se a emissão de um ruído de siderúrgica (30 s) por um alto-falante não direcionado para elevar a energia do campo difuso e otimizar a coerência dos sinais. O procedimento experimental compreendeu três medições em configuração direta e três em inversa (trocando-se microfones de posição entre si) para cada amostra, após calibração individual dos transdutores em 114 dB a 1000 Hz. A planta do ambiente e a montagem encontram-se detalhadas nas Figuras 1 e 2, e na Tabela 1 há as medições de tempos de reverberação do laboratório.

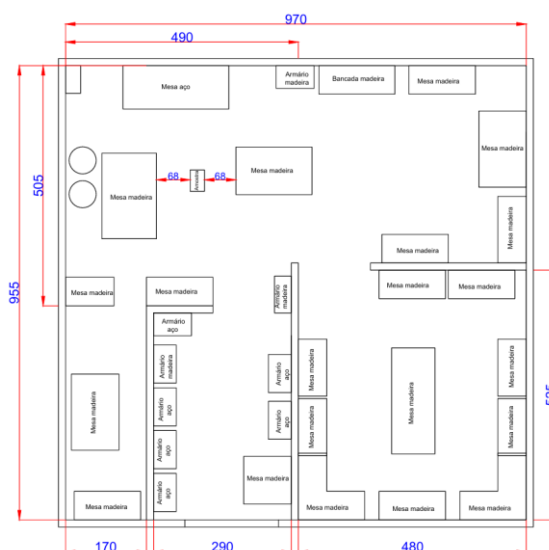


Figura 1: Planta baixa do LAV e mapeamento da amostra.

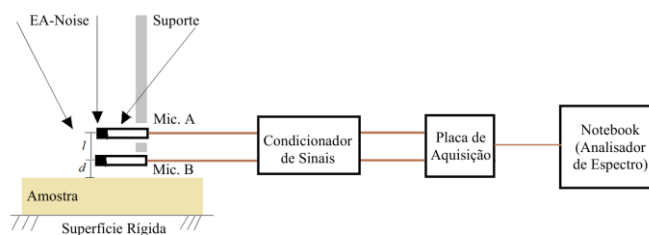


Figura 2: Esquemático da montagem.

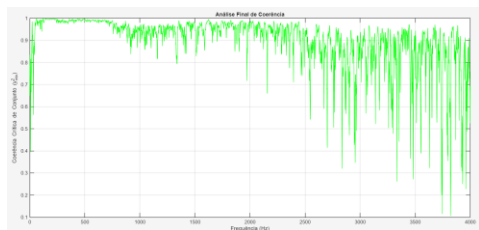
Tabela 1: Tempo de Reverberação Real (RT_{60}) para Bandas de 1/1 Oitava.

Frequência Central (Hz)	Tempo (s)
125	1,8782
250	1,6202
500	1,6422
1000	1,6418
2000	1,6028
4000	1,6064

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As estimativas espectrais sob ruído siderúrgico foram estabilizadas via médias de conjunto, adotando-se $\gamma^2_{crítico} > 0,9$ como critério de robustez no intervalo de 125 Hz a 4000 Hz. Pelas Figuras 3 a) e b), a lã de vidro apresentou melhor correlação linear que a lã de rocha, a qual exibiu maior incidência de $\gamma^2_{crítico} < 0,9$. Isso indica que, para este estudo, os dados coletados com a lã de rocha podem ser considerados menos confiáveis que os da lã de vidro sob a perspectiva da coerência crítica.

a)



b)

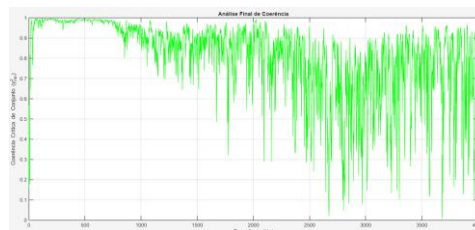
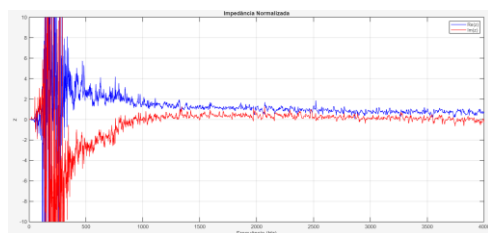


Figura 3: a) Coerência Crítica para amostra de lã de vidro; b) Coerência Crítica para amostra de lã de rocha.

A impedância normalizada z , Figuras 4 a) e b), convergiu ao comportamento teórico para materiais porosos, com valores reais tendendo a 1 e imaginários a 0 em altas frequências. Observou-se, contudo, que a validade dos resultados se inicia em 150 Hz para a lã de rocha e 300 Hz para a lã de vidro; abaixo desses limiares, ocorrem instabilidades matemáticas. Essa distinção indica que os dados da lã de rocha possuem maior validade em baixas frequências que os da lã de vidro. Com base nas Figuras 5 a) e b), nota-se ainda que, entre 500 Hz e 1000 Hz aproximadamente, a lã de rocha é mais estável em sua característica absorvente do que a lã de vidro, devido à menor amplitude de α , para esse intervalo, na lã de rocha.

a)



b)

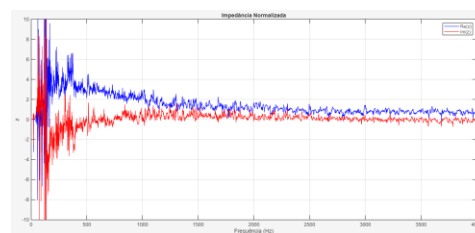
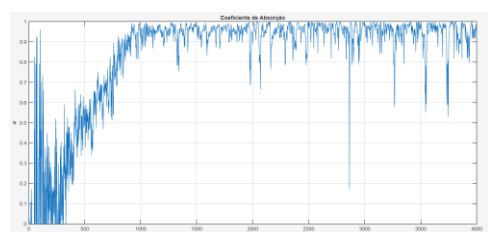


Figura 4: a) Impedância Normalizada para amostra de lã de vidro; b) Impedância Normalizada para amostra de lã de rocha.

a)



b)



Figura 5: a) Coeficiente de Absorção para amostra de lã de vidro; b) Coeficiente de Absorção para amostra de lã de rocha.

A comparação de α em bandas de 1/1 oitava exigiu o truncamento dos valores de catálogo superiores a 1 em 1,0, devido à impossibilidade matemática de se obter tais valores via EA-Noise. A análise do Erro Médio Percentual (*Mean Percentage Error*, MPE) revelou uma subestimação sistemática para as medições de ambas as amostras, mas menos acentuada na lã de vidro. De modo análogo, o Erro Médio Percentual Absoluto (*Mean Absolute Percentage Error*, MAPE) indicou uma ligeira maior exatidão para a lã de vidro. Entretanto, ao excluir as faixas de instabilidade (125 Hz para lã de rocha; 125 Hz e 300 Hz para lã de vidro), os erros reduziram-se, com MAPE passando a ser de 19,36 %, para a lã de rocha, e 16,34 %, para a lã de vidro. Essa tendência geral de menor erro, verificada com as medições da lã de vidro, pode ser explicada pela melhor confiabilidade de seus dados conforme discutido na questão da Coerência Crítica.

Tabela 2: Coeficiente de Absorção para Bandas de 1/1 Oitava (Lã de Vidro).

Frequências Centrais (Hz)	α medido	α fabricante	Erro (%)	Erro Absoluto (%)
125	0,22	0,20	10,26	10,26
250	0,17	0,72	-75,81	75,81
500	0,52	0,95	-44,94	44,94
1000	0,90	1,00	-9,79	9,79
2000	0,95	0,95	0,19	0,19
4000	0,89	0,99	-10,45	10,45
MPE			-21,76	
MAPE			25,24	



Tabela 3: Coeficiente de Absorção para Bandas de 1/1 Oitava (Lã de Rocha)

Frequências Centrais (Hz)	α medido	α fabricante	Erro (%)	Erro Absoluto (%)
125	0,32	0,85	-62,29	62,29
250	0,60	0,98	-38,74	38,74
500	0,72	1,00	-28,07	28,07
1000	0,87	1,00	-13,41	13,41
2000	0,94	1,00	-5,52	5,52
4000	0,89	1,00	-11,04	11,04
MPE			-26,51	
MAPE			26,51	

CONCLUSÕES

O protótipo desenvolvido demonstrou viabilidade técnica para a medição in situ do coeficiente de absorção sonora, apresentando resultados convergentes ao comportamento teórico esperado para materiais porosos. Embora tenham sido identificadas instabilidades matemáticas em baixas frequências (< 300 Hz) e uma tendência sistemática de subestimação das medidas, o sistema apresentou erros médios absolutos (MAPE) entre 16,34 % e 19,36 %, dentro das faixas de validade estabelecidas. O uso de componentes reaproveitados e a manufatura aditiva consolidam o dispositivo como uma ferramenta de baixo custo e sustentável, apta a suprir demandas de ensino e pesquisa em laboratórios com limitações orçamentárias.

REFERÊNCIAS

- ISO 354, 2003. "Acoustics: Measurement of sound absorption in a reverberation room". International Organization for Standardization.
- ISO 10534-2, 1998. "Acoustics: Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer function method". International Organization for Standardization.
- Otsuru, T., 2009. "Ensemble averaged surface normal impedance of material using an in-situ technique: Preliminary study using boundary element method".
- Takahashi, Y., Otsuru, T. and Tomiku, R., 2003. "In situ measurements of absorption characteristics using two microphones and environmental 'anonymous' noise". Acoustical Science and Technology, Vol. 24, No. 6, pp. 382-385.
- Takahashi, Y., Otsuru, T. and Tomiku, R., 2005. "In situ measurements of surface impedance and absorption coefficients of porous materials using two microphones and ambient noise". Applied Acoustics, Vol. 66, No. 8, pp. 845-865.