

Análise numérica e experimental da medição da impedância acústica e absorção sonora utilizando a técnica *in situ* com dois microfones

Lobato, L. C.*⁺; Brandão, E.⁺

* Laboratório de Vibrações e Acústica, UFSC, Florianópolis, SC, lucascostalobato@gmail.com

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

Resumo

Impedância acústica e absorção sonora são parâmetros importantes para diversas áreas da Engenharia Acústica, como: Acústica de Salas, Controle de Ruído, Auralização e Eletroacústica. Assim, a medição com precisão e exatidão da impedância acústica de materiais se faz necessária. Neste trabalho, o método de medição *in situ* de absorção sonora e impedância acústica que utiliza dois microfones (Sistema PP) é descrito. Em seguida, dois modelos para dedução da impedância de superfície são apresentados, são eles: modelo PWA e algoritmo q-term. Um modelo utilizando o Método dos Elementos Finitos (FEM - *Finite Element Method*) é proposto e uma análise a partir dele é feita. Através do modelo FEM foi possível demonstrar a convergência do algoritmo q-term para amostras localmente reativas e a divergência do modelo PWA para baixas frequências. Também através do modelo FEM uma análise de amostras finitas de superfícies circulares foi feita. O erro devido às pequenas dimensões da amostra foi identificado, uma estratégia baseada na literatura foi aplicada e uma melhora significativa foi obtida. Uma bancada experimental foi construída e testada. Os resultados experimentais a partir da bancada para uma amostra localmente reativa tiveram boa concordância com o modelo de Delany e Bazley e com os resultados obtidos em Tubo de Impedância, concordando com as previsões feitas a partir do modelo FEM. Erros encontrados nos resultados numéricos também foram encontrados nos resultados experimentais, mostrando que o modelo FEM é uma ferramenta válida para realizar previsões acerca do método de medição *in situ* utilizando Sistema PP. Ao final é apresentada a medição de uma amostra em um ambiente comum, mostrando a boa aplicabilidade da técnica *in situ* utilizando Sistema PP.

Palavras-chave: Medição *in situ*, Absorção Sonora, Impedância acústica, Materiais Porosos.

1. INTRODUÇÃO

A absorção sonora e impedância acústica são grandezas de grande interesse e relevância em várias áreas da Engenharia Acústica. Campos como Acústica de Salas, Controle de Ruído e Eletroacústica possuem em comum a frequente utilização de materiais porosos, sendo esses normalmente caracterizados por sua impedância acústica e coeficientes de absorção sonora.

O estudo e desenvolvimento de métodos para medição da impedância acústica é um tema relativamente antigo. Em 1940, Leo Beranek (1940) publicou um artigo com uma revisão de 9 métodos diferentes de medição de impedância acústica. Ao longo do tempo, todos os métodos

relatados por Beranek em 1940 acabaram se tornando obsoletos, porém, eles serviram como base para métodos que, hoje em dia, são consolidados (BRANDÃO *et al.*, 2015).

Os métodos de medição em Tubo de Impedância e em Câmara Reverberante são frequentemente utilizados na pesquisa e indústria por serem padronizados pelas normas ISO 10534:1998 e ISO 354:2003. Entretanto, ambos os métodos possuem restrições e desvantagens como: ser um método destrutivo do material, medir apenas impedância de superfície sob incidência normal e faixa de frequência limitada (caso do Tubo de Impedância) ou possuir um ambiente rigorosamente controlado, obter resultados apenas em bandas de frequência de oitava

ou 1/3 de oitava e obter apenas absorção sonora por incidência difusa (caso da Câmara Reverberante). Partindo de tais pontos, a técnica *in situ* pode apresentar vantagens em relação a ambos os métodos normatizados.

Dentre as principais vantagens da técnica *in situ* estão o fato de considerar condições reais de aplicação da amostra sendo possível realizar medições de materiais em utilização, ser uma técnica não-destrutiva do material e poder obter a impedância de superfície sob diferentes ângulos de incidência da onda sonora (BRANDÃO *et al.*, 2015). A possibilidade de realizar medições em ambientes comuns torna a técnica *in situ* uma ferramenta poderosa e com apelo comercial.

Os objetivos deste trabalho são:

- Apresentar uma breve descrição sobre o método de medição *in situ* de absorção sonora e impedância acústica a partir da técnica utilizando dois microfones (Sistema PP);
- Realizar uma análise da técnica do Sistema PP a partir de um modelo utilizando o Método dos Elementos Finitos, analisando a exatidão dos algoritmos de dedução do campo acústico, a influência do tamanho e da resistividade ao fluxo das amostras através de comparações ao modelo analítico de Johnson-Champoux-Allard (JOHNSON *et al.*, 1987; CHAMPOUX e ALLARD, 1991);
- Apresentar a bancada construída para realização dos experimentos e validá-la através de comparações com o modelo analítico de Denaly e Bazley (DELANY e BAZLEY, 1970) e medições em Tubo de Impedância.

1.1 Breve revisão teórica sobre impedância acústica e absorção sonora

A impedância acústica é dada como a razão entre a pressão sonora e velocidade de partícula em uma dada direção sendo ambas em um

mesmo ponto no espaço (FAHY F.J.; WALKER, J., 1998), como mostra a equação a seguir

$$\tilde{Z}_{Ac} = \frac{\tilde{P}}{\tilde{U}}, \quad (1)$$

em que \tilde{P} é a pressão sonora complexa e \tilde{U} é a velocidade de partícula complexa em uma dada direção.

Para o cálculo do coeficiente de absorção sonora, a grandeza de interesse é a impedância de superfície, que representa a impedância acústica na interface entre dois meios. Como descrito em detalhes por Brandão (2016), considerando uma camada de material sobre uma superfície rígida, como ilustrado pela Figura 1, a impedância de superfície é dada como

$$\tilde{Z}_s = -j \frac{\rho_1 c_1}{\cos(\theta_t)} \cot(d_1 k_1 \cos(\theta_t)), \quad (2)$$

sendo que ρ_1 é a densidade complexa, c_1 a velocidade de propagação complexa da onda, θ_t o índice de refração da onda incidida, k_1 o número de onda e d_1 a espessura da amostra (MAREZE, 2013).

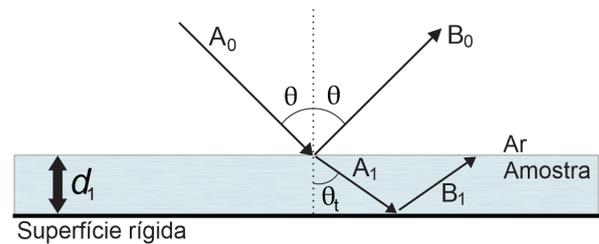


Figura 1: Ilustração de camada de material sobre superfície rígida e sob a incidência de uma onda sonora com amplitude A_0 que reflete com amplitude B_0 , refrata com um ângulo θ_t e amplitude A_1 .

O coeficiente de reflexão de um material quantifica o quanto da energia sonora incidida sobre ele é refletida. O coeficiente de absorção sonora α , por sua vez, indica o quanto de energia sonora incidida em uma amostra é dissipada por ela. Ambas grandezas são dependentes da impedância de superfície do material \tilde{Z}_s e suas equações são dadas por

$$R = \frac{\tilde{Z}_s \cos(\theta) - \rho_0 c_0}{\tilde{Z}_s \cos(\theta) + \rho_0 c_0} \quad (3)$$

e

$$\alpha = 1 - |R^2|, \quad (4)$$

sendo θ o ângulo de incidência da onda em relação ao vetor normal à superfície, ρ_0 e c_0 a densidade e velocidade de propagação da onda no ar, respectivamente.

2. O MÉTODO IN SITU UTILIZANDO DOIS MICROFONES

No trabalho de Brandão *et al.* (2015) os autores apresentam uma larga revisão sobre os métodos de medição *in situ* de absorção sonora e impedância acústica dividindo-os em duas grandes classes: métodos de separação temporal e métodos baseados em modelos de campo acústico.

Os métodos de separação temporal, introduzido nos trabalhos de Garai (1993) e Mommertz (1995), tem o objetivo de separar a onda sonora incidente de sua reflexão através de medições de pressão sonora próximas à superfície de uma amostra. Tendo as informações de onda incidente e onda refletida separadamente, é possível calcular o coeficiente de reflexão da superfície a partir de sua definição (como descrito na Seção 1.1). Os métodos baseados em modelos de campo acústico, por sua vez, utilizam formulações matemáticas que descrevem o campo acústico sobre uma superfície com impedância \tilde{Z}_s , relacionando tal impedância com grandezas mensuráveis como pressão sonora e/ou velocidade de partícula. Assim, realizando medições dessas grandezas próximas à superfície de uma amostra, é possível estimar sua impedância de superfície Z_s utilizando tais formulações matemáticas.

No presente trabalho será utilizada a técnica do Sistema PP. Essa técnica se encaixa na classe de métodos *in situ* baseados em modelos de campo acústico. O método foi introduzido por Allard e Sieben (1984), em que os autores apresentaram como calcular uma impedância de superfície a partir da medição da pressão sonora feita por dois microfones. Li e Hodgson (1997) apresentaram uma alternativa para calcular a impedância de superfície a partir da FRF entre dois microfones. Esses novos cálculos propo-

tos por Li e Hodgson vieram a ser chamados de modelo PWA (*Plane Wave Approximation*), e sua formulação será apresentada na Seção 2.1.1.

A técnica do Sistema PP consiste em posicionar dois microfones paralelamente sobre uma superfície que deseja-se medir, onde z_1 é a altura do microfone 1 e z_2 é a altura do microfone dois. Posiciona-se uma fonte sonora com uma altura h_s à uma distância horizontal r dos microfones, como mostra a Figura 2. A FRF de interesse, que é a função utilizada para estimar a impedância de superfície desejada, é a razão entre as pressões medidas pelos dois microfones, dada como

$$H_m = \frac{p_{m1}}{p_{m2}}, \quad (5)$$

sendo p_{m1} o espectro da pressão sonora medida pelo microfone 1 e p_{m2} o espectro da pressão sonora medida pelo microfone 2.

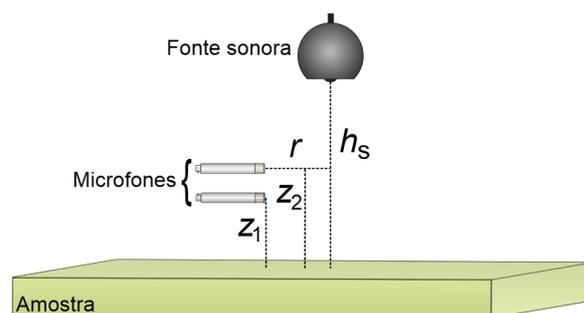


Figura 2: Disposição do Sistema PP sobre uma superfície que deseja-se medir.

2.1 Modelos de campo acústico para cálculo da impedância de superfície

Como mostrado na seção anterior, a utilização do Sistema PP consiste em obter dois pontos de pressão sonora sobre a amostra, sendo necessária a utilização de algum modelo de campo acústico para estimar a impedância de superfície da amostra medida. Neste trabalho são utilizados dois modelos: modelo PWA e algoritmo q-term.

2.1.1 Modelo PWA (Plane Wave Approximation)

O modelo PWA considera em sua formulação a incidência de ondas esféricas que refletem de maneira especular sobre uma superfície com coeficiente de reflexão R_{PWA} . Tal consideração torna o modelo menos exato, porém menos complexo e menos computacionalmente custoso.

Para o cálculo de R_{PWA} é usada como dado de entrada a FRF H_m , como mostrado a seguir

$$R_{PWA} = \frac{\frac{e^{-jk_0|r_{11}|}}{|r_{11}|} - H_m \frac{e^{-jk_0|r_{21}|}}{|r_{21}|}}{H_m \frac{e^{-jk_0|r_{22}|}}{|r_{22}|} - \frac{e^{-jk_0|r_{12}|}}{|r_{12}|}}, \quad (6)$$

sendo $|r_{11}| = \sqrt{r^2 + (h_s - z_1)^2}$, $|r_{12}| = \sqrt{r^2 + (h_s + z_1)^2}$, $|r_{21}| = \sqrt{r^2 + (h_s - z_2)^2}$ e $|r_{22}| = \sqrt{r^2 + (h_s + z_2)^2}$. A partir de R_{PWA} é possível calcular a impedância de superfície $Z_{s,PWA}$ estimada pelo modelo PWA (BRANDÃO, 2011), sendo

$$Z_{s,PWA} = \frac{1 + R_{PWA}}{1 - R_{PWA}} \frac{\sqrt{r^2 + h_s^2}}{h_s} \frac{jk_0 \sqrt{r^2 + h_s^2}}{1 + jk_0 \sqrt{r^2 + h_s^2}}. \quad (7)$$

2.1.2 Modelo q-term

Di e Gilbert (1993) propuseram uma equação para prever a pressão sonora acima uma amostra localmente reativa sobre superfície rígida com impedância de superfície Z_s , dada por.

$$p = \frac{e^{-jk_0|\vec{r}_1|}}{|\vec{r}_1|} + \frac{e^{-jk_0|\vec{r}_2|}}{|\vec{r}_2|} - 2k_0\beta \int_0^\infty e^{-k_0\beta q} \frac{e^{-jk_0\sqrt{r^2 + (h_s + h_r - jq)^2}}}{\sqrt{r^2 + (h_s + h_r - jq)^2}} dq, \quad (8)$$

em que k_0 é o número de onda do ar e h_r é a altura do ponto receptor em relação a superfície de admitância β . Essa equação é baseada no posicionamento relativo entre fonte e receptor, como pode ser vista na Figura 3, e descreve a

pressão sonora em função das posições relativas da fonte, receptor e superfície da amostra e também da admitância $\beta = \rho_0 c_0 / \tilde{Z}_s$ da amostra.

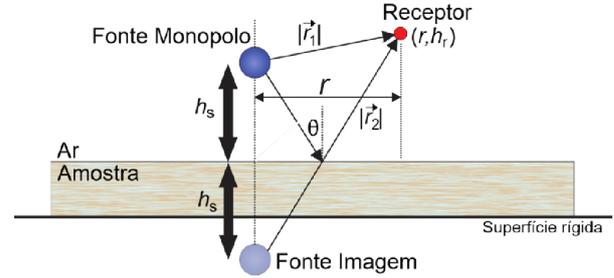


Figura 3: Ilustração de uma fonte monopolo e sua “fonte imagem” e um receptor acima de uma amostra que está sobre superfície rígida.

A Eq. 8 possui uma certa complexidade pois não é possível invertê-la analiticamente para obter \tilde{Z}_s em função da pressão sonora p . Assim, baseado no trabalho de Di e Gilbert, Alvares e Jacobsen (2008) propuseram um algoritmo iterativo, que mais tarde veio a ser chamado de algoritmo q-term no trabalho de Brandão (2011), para solução de tal modelo. Como q-term é um algoritmo iterativo, ele necessita de uma estimativa inicial $Z_{inicial}$ para poder convergir para algum valor. Além disso, também são dados de entrada do algoritmo, no caso do Sistema PP, a FRF H_m e as posições relativas h_s , r , z_1 e z_2 (ver Figura 2). A sequência lógica do algoritmo pode ser dada da seguinte forma:

1. $Z_{inicial}$ é informado ao algoritmo. Neste trabalho Z_{PWA} será utilizado como estimativa inicial;
2. A partir de $Z_{inicial}$ são calculados dois pontos de pressão com alturas z_1 e z_2 e, logo após, uma FRF H_{mc} é calculada;
3. A FRF H_{mc} é subtraída do valor medido H_m . Se $|H_m - H_{mc}|$ for menor que uma tolerância ξ definida previamente, $Z_{inicial}$ é a impedância de superfície da amostra e o algoritmo é encerrado. Caso contrário, uma nova estimativa é calculada pelo método da secante e os passos 1 e 2 são repetidos até a tolerância ser satisfeita ou o número máximo de iterações seja alcançado.

3. ANÁLISE ATRAVÉS DO MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

A análise numérica dos métodos de medição *in situ* da impedância acústica não é algo inédito. Trabalhos como (HIROSAWA *et al*, 2008; HIROSAWA *et al*, 2009; BRANDÃO *et al*, 2010, BRANDÃO *et al*, 2012; TOMIKU *et al*, 2012) realizaram largas análises utilizando o Método dos Elementos de Contorno. Dessa forma, foi visto que utilização do Método dos Elementos Finitos para tal prática é algo ainda pouco explorado na literatura.

3.1 Breve descrição do modelo FEM

As simulações foram realizadas utilizando o *software* COMSOL Multiphysics com módulo *Pressure Acoustics* em um modelo 2D axissimétrico. Após criadas geometrias que representem o ar e a amostra que pretende-se caracterizar, foram atribuídas as propriedades que caracterizam tais meios. Para o ar foi atribuída sua densidade ρ_0 e velocidade do som c_0 . Para a amostra, foram informados parâmetros de materiais porosos, como resistividade ao fluxo, porosidade e tortuosidade através do modelo de Johnson-Champoux-Allard já implementado no módulo *Pressure Acoustics* do *software* COMSOL. Foi considerada a configuração de amostra sob superfície rígida e em condição de campo livre, como mostra a Figura 4.

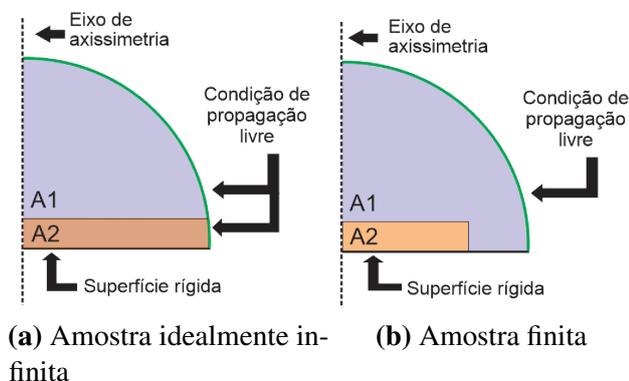


Figura 4: Condições de contorno do modelo em elementos finitos, onde A1 é o ar e A2 a amostra de material poroso.

Por ser um modelo 2D axissimétrico, quando consideradas finitas, as amostras possuem superfície circular, como ilustrado pela Figura 5.

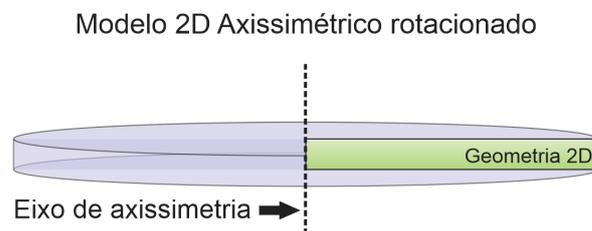


Figura 5: Ilustração de uma amostra finita no modelo 2D axissimétrico.

Para todas as simulações, foram considerados os seguintes parâmetros:

- Discretização da malha com pelo menos 6 elementos por comprimento de onda da máxima frequência de interesse;
- $\rho_0 = 1,21 \text{ kg/m}^3$ e $c_0 = 343 \text{ m/s}$;
- $h_s = 0,3 \text{ m}$, $r = 0 \text{ m}$, $z_1 = 0,01 \text{ m}$ e $z_2 = 0,02 \text{ m}$ (caso alterado, será informado ao longo do texto);
- Espessura da amostra $d = 0,04 \text{ m}$, tortuosidade = 1,2, porosidade = 0,98.

Todos os resultados obtidos pelo modelo numérico terão como referência o modelo analítico de Johnson-Champoux-Allard.

3.2 Influência da resistividade ao fluxo da amostra

A resistividade ao fluxo σ , segundo Mareze (2013), é o parâmetro mais importante em materiais porosos. Por isso, a resistividade ao fluxo é um descritor frequentemente usado para caracterizar materiais porosos. Assim, uma das análises propostas é verificar o comportamento da técnica do Sistema PP, juntamente com os modelos PWA e q-term, em função da resistividade ao fluxo.

A Figura 6 apresenta o coeficiente de absorção de uma amostra com resistividade ao fluxo $\sigma = 5000 \text{ Nsm}^{-4}$ e superfície infinita calculado

a partir dos modelos PWA e q-term. Como mencionado na Seção 2.1.2, o modelo q-term considera uma superfície localmente reativa. Um comportamento localmente reativo tende a acontecer em amostras com altos índices de refração. E como pode ser concluído através do trabalho de Delany e Bazley (1970), altas resistividades ao fluxo resultam em altos índices de refração. Isso justifica o erro do algoritmo q-term já que, a princípio, a resistividade ao fluxo do amostra não é alta o suficiente para apresentar um comportamento localmente reativo. Em baixas frequências é necessário um índice de refração maior para que a superfície seja considerada localmente reativa. Isso explica o porque em baixas frequências o erro para amostras não-localmente reativas é maior. Esse resultado corrobora com o trabalho de Brandão *et al.* (2012).

O modelo PWA apresenta valores negativos de coeficiente de absorção em baixa frequência, algo que não possui sentido físico. Porém, isso acontece porque nessa faixa de frequência a aproximação feita pelo modelo em sua formulação matemática, de que a onda esférica reflete como uma onda plana, não é válida.

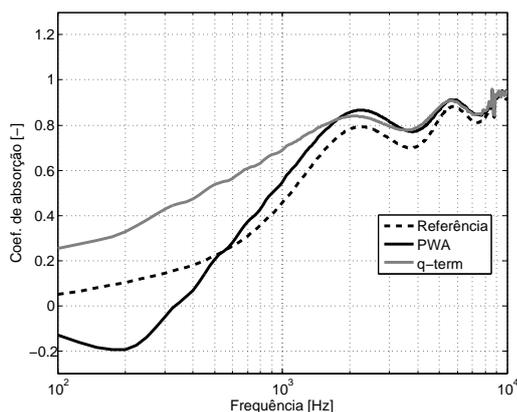


Figura 6: Coef. de abs. α de uma amostra com $\sigma = 5000 \text{ Nsm}^{-4}$ de superfície infinita.

A Figura 7 apresenta o resultado de uma simulação semelhante ao resultado apresentado pela Figura 6, porém nesta, com uma amostra de resistividade ao fluxo $\sigma = 50000 \text{ Nsm}^{-4}$, 10 vezes maior do que a anterior. Neste caso, o erro do modelo PWA persiste, já que a mudança de re-

sistividade ao fluxo em nada muda a limitação do modelo. Porém, o algoritmo q-term apresenta um resultado substancialmente diferente. A diferença entre a resposta através do q-term e a referência que no caso anterior chegava à 0,25, neste caso tende à 0,00. O aumento da resistividade ao fluxo faz com que a amostra tenha um comportamento localmente reativo, explicando o sucesso do algoritmo q-term. Isso também demonstra que apesar do modelo PWA apresentar resultados erráticos em baixa frequência, ele é uma boa estimativa inicial para o algoritmo q-term, algo bastante importante para garantir a convergência do algoritmo.

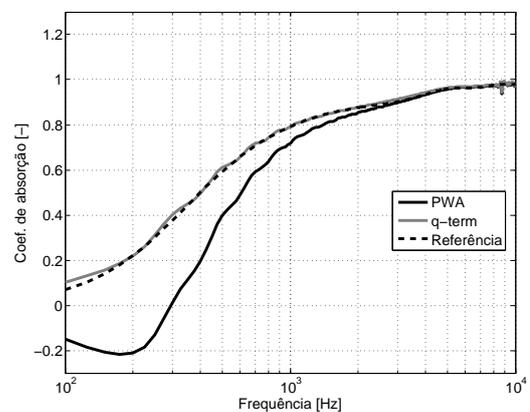


Figura 7: Coef. de abs. α de uma amostra com $\sigma = 50000 \text{ Nsm}^{-4}$ de superfície infinita.

3.3 Influência do tamanho da amostra

Até então, foram analisadas apenas amostras idealmente infinitas. Entretanto na prática toda e qualquer amostra possui uma dimensão finita. O objetivo desta seção é analisar a influência do tamanho finito de uma amostra de superfície circular e aplicar uma estratégia para a redução do erro devido a influência do tamanho da amostra. As condições de contorno aplicadas são ilustradas pela Figura 8.

Considerando uma resistividade ao fluxo $\sigma = 50000 \text{ Nsm}^{-4}$, foram simuladas amostras circulares de três diferentes raios: 60 cm, 40 cm e 20 cm. A Figura 9 apresenta o coeficiente de absorção das três amostras de tamanhos diferentes calculado com o algoritmo q-term. Para a amostra de raio 20 cm, até 600 Hz

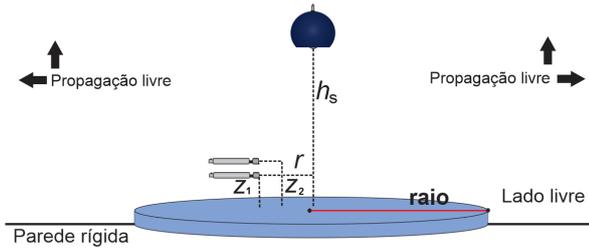


Figura 8: Ilustração das condições de contorno consideradas para simular amostras finitas.

o erro fica em torno de 0,1, em relação a referência. Acima de 600 Hz o resultado oscila consideravelmente, causando um erro de até 0,3 em aproximadamente 2000 Hz. O erro mais proeminente acontece na frequência de 8675 Hz, onde metade do comprimento de onda é aproximadamente 2 cm, exatamente a distância entre os pontos de pressão captados sobre a amostra. Esse erro causado pela distância entre os dois pontos de pressão sonora captados é evidenciado com a diminuição do tamanho da amostra.

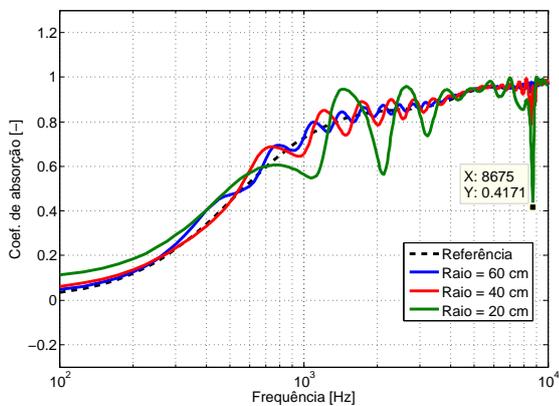


Figura 9: Coef. de abs. α de uma amostra com $\sigma = 50000 \text{ Nsm}^{-4}$ de três diferentes tamanhos.

Brandão *et al.* (2010) e Hirosawa *et al.* (2009) propuseram estratégias para diminuir o erro devido ao tamanho finito da amostra. Ambos obtiveram resultados satisfatórios para amostras de superfícies retangulares. Baseados nas estratégias utilizadas por Brandão e Hirosawa, a estratégia aqui aplicada consiste em variar a distância horizontal r entre fonte e sensores, mantendo a fonte sonora no centro geométrico da superfície da amostra.

A Figura 10 apresenta o coeficiente de absorção da amostra de raio 20 cm presente na Figura 9, porém, desta vez, para quatro diferentes valores da distância horizontal r .

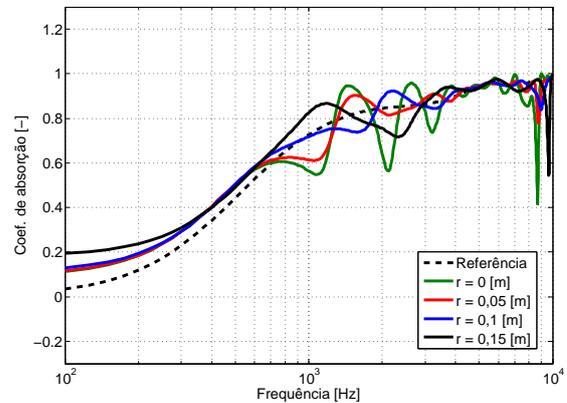


Figura 10: Coef. de abs. α de uma amostra com $\sigma = 50000 \text{ Nsm}^{-4}$ e raio 20 cm medido com quatro diferentes valores da distância horizontal r .

A estratégia de variar a distância r , utilizada na literatura em amostra de superfície quadrada, também funciona para amostra de superfície circular. Entre as distâncias $r = 0 \text{ m}$, $r = 0,05 \text{ m}$, $r = 0,1 \text{ m}$ e $r = 0,15 \text{ m}$, a que apresentou o melhor resultado é a distância $r = 0,1 \text{ m}$. Com $r = 0 \text{ m}$, em 2000 Hz chegou à 0,25, com $r = 0,1 \text{ m}$, por sua vez, o erro foi reduzido à menos de 0,05.

Ter um valor de r diferente de zero significa ter uma incidência oblíqua. Para $h_s = 0,3 \text{ m}$, $z_1 = 0,01 \text{ m}$ e $z_2 = 0,03 \text{ m}$, um valor de $r = 0,1 \text{ m}$ é igual a um ângulo de incidência $\theta = 20^\circ$ em relação ao vetor normal à superfície da amostra. O cálculo do ângulo de incidência é feito a partir da distância horizontal r e da distância entre a fonte e o ponto médio entre os microfones, e pode ser calculado como

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{r}{h_s - \frac{(z_1 + z_2)}{2}} \right). \quad (9)$$

4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Para a realização dos experimentos de medição com Sistema PP, foram utilizados os seguintes equipamentos: computador, placa de aquisição de sinais, amplificador de potência, fonte sonora e dois microfones de 1/2". Primeiramente o sinal de excitação, ainda digital, é gerado no computador e enviado ao conversor digital-analógico. O conversor envia o sinal analógico (elétrico) para ao amplificador, onde será configurada a potência do sinal que será enviado à fonte sonora. Do amplificador, o sinal elétrico é enviado à fonte sonora, que radiará a energia sonora. Os sensores próximos à amostra captam a energia sonora radiada pela fonte e a enviam em termos de sinal elétrico à placa de aquisição de sinais, onde o sinal será convertido de analógico para digital. A placa de aquisição de sinais envia o sinal, em formato digital, ao computador, onde é gravado e analisado. A cadeia de medição é ilustrada pela Figura 11.

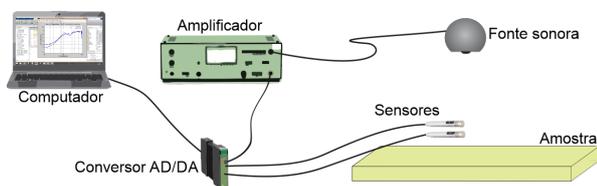


Figura 11: Ilustração das condições de contorno consideradas para simular amostras finitas.

Para a realização dos experimentos, uma série de aparatos foram construídos para sustentação dos microfones e da fonte sonora, de modo a ter um controle preciso do posicionamento relativo entre ambos. A Figura 12 mostra o sistema de sustentação construído e a Figura 13 detalha os ajustes possíveis das distâncias h_s , r , z_1 e z_2 .

Foram selecionadas duas amostras diferentes para realização dos experimentos, denominadas Amostra 1 e Amostra 2. Ambas amostras tiveram sua resistividade ao fluxo medida através da norma ISO 9053:1991 e também seu coeficiente de absorção em Tubo de Impedância utilizando a norma ISO 10534:1998. A partir do dado de resistividade ao fluxo, é possível



Figura 12: Foto da estrutura de sustentação da fonte sonora e microfones.

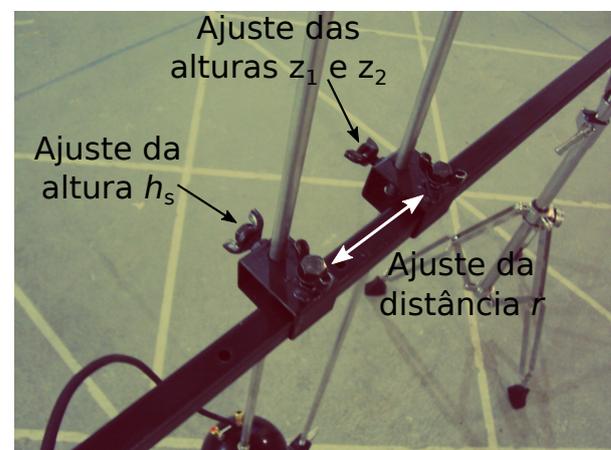


Figura 13: Detalhe dos ajustes das distâncias h_s , r , z_1 e z_2 .

através do modelo de Delany e Bazley calcular o coeficiente de absorção dos materiais. Sendo assim, tem-se duas referências para os resultados experimentais: modelo analítico de Delany e Bazley (chamado de referência nas legendas dos gráficos) e o método normalizado do Tubo de Impedância.

Para validação da técnica do Sistema PP as me-

dições foram realizadas dentro de uma Câmara Reverberante apenas para garantir uma boa relação sinal-ruído. Posteriormente foram realizadas também medições em ambientes factíveis para analisar a aplicabilidade do método. Antes da realização dos experimentos, os microfones foram calibrados seguindo os procedimentos descritos no Apêndice 5.1.

4.1 Validação da técnica do Sistema PP

A Figura 14 apresenta o coeficiente de absorção da Amostra 1, que possui resistividade ao fluxo $\sigma = 6900 \text{ Nsm}^{-4}$ e dimensões 0,05 m x 0,8 m x 0,6 m, medido com Sistema PP e calculado com os modelos PWA e q-term. A configuração do Sistema PP foi $h_s = 0,3 \text{ m}$, $r = 0,1 \text{ m}$, $z_1 = 0,01 \text{ m}$ e $z_2 = 0,025$.

Assim como nas simulações, os modelos PWA e q-term convergiram para referência (modelo de Delany e Bazley) em alta frequência, porém falharam em baixas frequências pelos mesmos motivos descritos na Seção 3.2, visto que a Amostra 1 possui baixa resistividade ao fluxo. O que é, de certa forma, satisfatório já que os resultados previstos em simulação foram confirmados experimentalmente.

O decaimento brusco no coeficiente de absorção devido ao espaçamento dos microfones encontrado nas simulações também é verificado nos experimentos. O decaimento no coeficiente de absorção chega ao seu máximo em 11800 Hz. Essa é a frequência cujo meio comprimento de onda vale aproximadamente 0,015 m, a mesma distância que separa os microfones.

O resultado obtido em Tubo de Impedância apresentou uma diferença em relação ao modelo de Delany e Bazley (DELANY e BAZLEY, 1970). Tal discordância ocorreu devido a dificuldade de moldar a amostra para ser inserida no tubo, pois ao ser introduzida nele, a Amostra 1 acabou sendo comprimida, tendo sua sua espessura reduzida.

A Figura 15 apresenta o coeficiente de absorção da Amostra 2, que possui resistividade ao fluxo

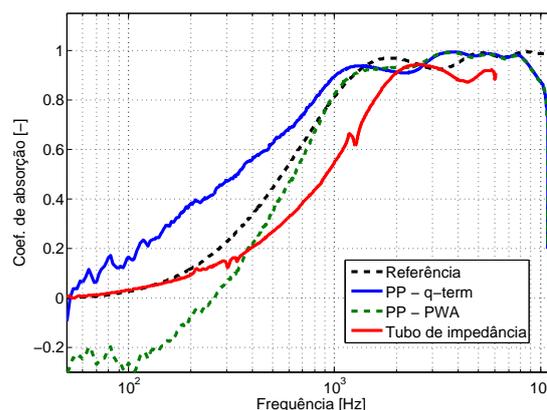


Figura 14: Coef. de abs. α da Amostra 1 com $\sigma = 6900 \text{ Nsm}^{-4}$ e dimensões 0,05 m x 0,8 m x 0,6 m.

$\sigma = 54700 \text{ Nsm}^{-4}$ e dimensões 0,02 m x 0,8 m x 0,6 m, medido com Sistema PP e calculado com os modelos PWA e q-term. A configuração do Sistema PP foi $h_s = 0,3 \text{ m}$, $r = 0,1 \text{ m}$, $z_1 = 0,01 \text{ m}$ e $z_2 = 0,025$.

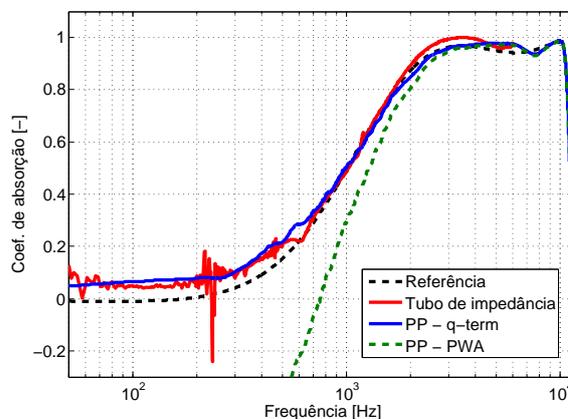


Figura 15: Coef. de abs. α da Amostra 2 com $\sigma = 54700 \text{ Nsm}^{-4}$ e dimensões 0,02 m x 0,8 m x 0,6 m.

Para a Amostra 2 (ver Figura 16), o algoritmo q-term apresentou um ótimo desempenho, tendo um erro desprezível em relação ao modelo analítico e ao tubo de impedância. Como a Amostra 2 possui alta resistividade ao fluxo, assumi-la como localmente reativa é uma consideração válida. O modelo PWA, por sua vez, convergiu apenas em altas frequências, apresentando coe-

ficiente de absorção negativo em baixa frequência, como previsto pelos resultados numéricos.

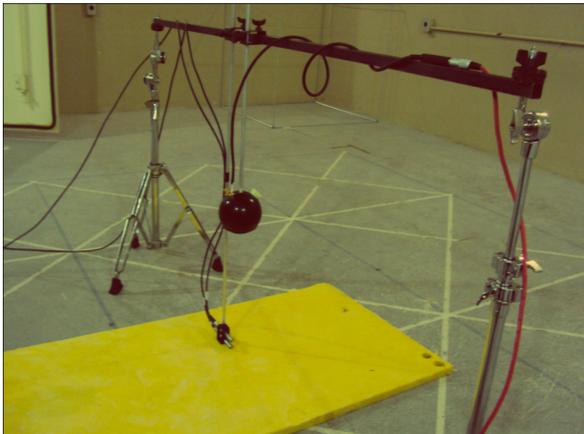


Figura 16: Foto da medição da Amostra 2 utilizando Sistema PP realizada dentro de uma câmara reverberante.

4.2 Aplicação prática

A Amostra 2 com dimensões 0,02 m x 0,6 m x 0,6 m foi medida em um ambiente comum. A medição feita no ambiente ambiente, denominada “*in situ*”, foi realizada em uma sala de escritório de pequeno porte. A amostra foi posicionada sobre o chão e o processo de medição foi realizado assim como feito previamente dentro da câmara reverberante. A medição realizada no ambiente *in situ* foi comparada a medição realizada em câmara reverberante utilizando a mesma amostra e mesma configuração de medição, que foi: $h_s = 0,3$ m, $r = 0$ m, $z_1 = 0,01$ m e $z_2 = 0,025$ m. A Figura 17 apresenta o coeficiente de absorção da Amostra 2 medida em câmara reverberante e *in situ*. A medição *in situ* superestimar o coeficiente de absorção em 0,05 em relação a medição em câmara reverberante até a frequência de 1 kHz. Após 1 kHz ambas medições convergiram para referência. A superestimativa do coeficiente de absorção pode ser devido à uma incerteza de medição associada à erros experimentais no posicionamento da fonte e sensores (BRANDÃO, 2011). Em outras palavras, a diferença encontrada entre as medições não necessariamente se deve ao fato de terem sido realizadas em ambientes diferentes, já que, segundo Brandão (2011), os métodos *in situ* são vulneráveis a incertezas de medição.

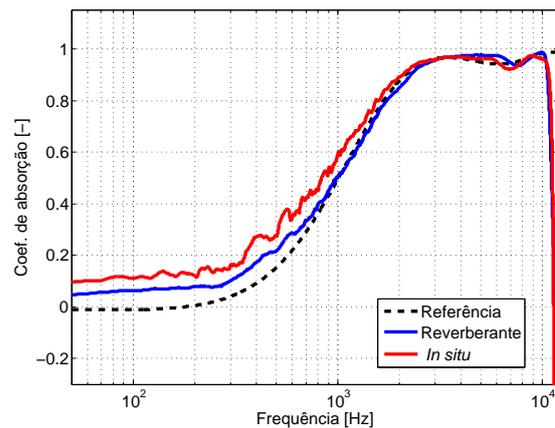


Figura 17: Coef. de abs. α da Amostra 2 com $\sigma = 54700 \text{ Nsm}^{-4}$ e dimensões 0,02 m x 0,8 m x 0,6 m medido *in situ*.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o referencial teórico utilizado no método de medição *in situ* utilizando o Sistema PP. Através de simulações utilizando o Método dos Elementos Finitos foi possível identificar que o modelo PWA, apesar de ser um modelo aproximado e apresentar falhas em baixas frequências, é uma boa estimativa inicial para o algoritmo q-term. O algoritmo q-term, por sua vez, apresentou ótimos resultados para amostras localmente reativas. O erro para amostras finitas de superfície circular também foi verificado numericamente e para reduzir tal erro, foi visto que a estratégia utilizada na literatura para amostras retangulares também se aplica no caso de amostras circulares.

Duas amostras com resistividades ao fluxo diferentes tiveram seus coeficientes de absorção medidos e comparados ao modelo analítico de Delany e Bazley e resultados obtidos no Tubo de Impedância. As previsões feitas através da análise numérica foram comprovadas experimentalmente.

5.1 Vantagens e desvantagens

A técnica *in situ* tem como principais vantagens ser um método não destrutivo do material e que leva em conta suas condições reais de aplicação. Assim, a medição pode ser feita em materiais já

aplicados e também em materiais para os quais a medição utilizando outros métodos seria inviável, como: absorvedores de membrana, asfalto, cadeiras, materiais porosos já aplicados, etc.

A desvantagem do método é que o mesmo possui um pós-processamento complexo e computacionalmente custoso. A implementação dos algoritmos que deduzem o campo acústico, principalmente algoritmos como o *q-term*, que considera a reflexão da frente de onda esférica, não é uma tarefa fácil. O método também é suscetível a incertezas associadas ao posicionamento relativo entre fonte, receptores e amostra, ficando evidente através do resultado apresentado pela Figura 17.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao FIPE (Fundo de Incentivo à Pesquisa) pelo suporte financeiro, à Universidade Federal de Santa Maria e à Universidade Federal de Santa Catarina pelas estruturas oferecidas para realização das tarefas envolvidas no trabalho.

APÊNDICE

Na prática, os transdutores possuem, um em relação ao outro, desvios de magnitude e fase que são inerentes à fabricação. Então, para se obter a FRF com maior exatidão é necessário realizar uma calibração relativa entre os transdutores. O processo de calibração, apresentado por Champoux, Nicolas e Allard (1998) consiste em posicionar ambos microfones sobre uma superfície rígida, com os diafragmas um de frente ao outro à 1 mm de distância, como mostra a Figura 18. Com a fonte sonora sobre os transdutores, alimenta-se a mesma com um sinal que varra a faixa de frequência de interesse. Assim, a função resposta em frequência p_{m1}/p_{m2} entre os dois transdutores será chamada de H_{cal} . A mesma será multiplicada pelas medições próximas à amostra, com a intenção de diminuir erros associados a diferença de magnitude e fase entre os microfones. Experimentalmente, a FRF H_m será

$$H_m = \left(\frac{p_{m1}}{p_{m2}} \right) H_{cal}^{-1}. \quad (10)$$



Figura 18: Foto da calibração relativa entre os microfones.

REFERÊNCIAS

- ALLARD J. F.; SIEBEN, B. Measurements of acoustic impedance in a free field with two microphones and a spectrum analyzer. **Journal of Acoustical Society of America**, 1984.
- ALVARES, F.; JACOBSEN, D. An iterative method for determining the surface impedance of acoustic materials in situ. **Internoise**, 2008
- BERANEK, L. Precision measurement of acoustic impedance. **Journal of Acoustical Society of America**, 1940.
- BRANDÃO, E. **Análise teórica e experimental do processo de medição in situ da impedância acústica**. Tese de doutorado. UFSC, 2011.
- BRANDÃO, E. **Acústica de Salas: Projeto Modelagem**. [S.l.]: Blucher, 2016. ISBN 9788521210061.

BRANDÃO E.; LENZI, A.; PAUL, S. A review of the in situ impedance and sound absorption measurement techniques. **Acta Acustica unitedwith Acustica**, 2015.

BRANDÃO, E.; LENZI, A.; FULCO, E.; TIJS, E. Error estimation due to sample size effects of in situ surface impedance measurements. **Journal of the Acoustical Society of America**, 2010.

BRANDÃO, E.; MAREZE, P. H.; SILVA, A. R. Impedance measurement of non-locally reactive samples and the influence of the assumption of local reaction. **Journal of Acoustic Society of America**, 2012.

CHAMPOUX, J.; NICOLAS, Y.; ALLARD, J. F. Measurement of acoustic impedance in a free field at low frequencies. **Journal of Sound and Vibration**, 1988.

CHAMPOUX, J.; ALLARD, J. F. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media, **J. Appl. Phys.** 70, 1991, pp. 1975-1979.

DELANY M. E.; BAZLEY E. N., Acoustical properties of fibrous absorbent materials, **Applied Acoustics** 3, 1970, pp. 105-116

DI X.; GILBERT, K. An exact laplace transform formulation for a point source above a ground surface. **Journal of the Acoustical Society of America**, 1993.

FAHY F.J.; WALKER, J. **Fundamentals of Noiseand Vibration**: Spoon, 1998.

GARAI, M. Measurement of the sound-absorption coefficient in situ: The reflection method using periodic pseudo random sequences of maximum length. **Applied Acoustics**, 1993.

HIROSAWA, K.; TAKASHIMA, K.; NAKAGAWA, H.; KON, M.; YAMAMOTO, A. Comparison of three measurement techniques for the normal absorption coefficient of sound absorbing materials in the free field. **Journal of the Acoustical Society of America**, 2009.

HIROSAWA, K.; TAKASHIMA, K.; NAKAGAWA, H.; KON, M.; YAMAMOTO, A. Comparison of three measurement techniques of normal absorption coefficients in free field method using boundary element method. **SAPEM**, 2008.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 10534**: Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tube. 1998.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 354**: Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room. 2003.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 9053**: Acoustics - Materials for acoustical applications - Determination of air-flow resistance. 1991.

JOHNSON D. L.; KOPLIK J.; DASHEN R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media, **J. Fluid Mech.** 176, 1987, pp. 379-402

LI, J. F.; HODGSON, M. Use of pseudo-random sequences and a single microphone to measure surface impedance at oblique incidence. **Journal of the Acoustical Society of America**, 1997.

MAREZE, P. H. **Análise da influência da microgeometria na absorção sonora de materiais porosos de estrutura rígida**. Tese de doutorado, UFSC, 2013.

MOMMERTZ, E. Angle-dependent in-situ measurements of reflection coefficients using a subtraction technique. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 1995.

TOMIKU, R.; OTSURU, T.; DIN, N. B. C. Ensemble averaged surface normal impedance of material using an in-situ technique: Preliminary study using boundary element method. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 2012.