

Tubo de impedância para baixas frequências: construção e validação

Thomazelli, R.¹; Bertoli, S. R.²

^{1,2} Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP
rodolfo.thomazelli@gmail.com, rolla@fec.unicamp.br

Resumo

Para a determinação dos coeficientes de absorção sonora de materiais acústicos existem métodos consagrados, como os empregados em câmara reverberante e em tubo de impedância. Para o desenvolvimento de materiais de absorção sonora, os métodos empregados em tubo de impedância – dentre os quais se destacam o de onda estacionária e o de função de transferência – são mais vantajosos por necessitarem de amostras comparativamente menores. O método de função de transferência é considerado mais prático quanto aos processos de medição pois permite a obtenção do coeficiente de absorção sonora sob uma faixa contínua de frequência. Os autores do presente artigo estão desenvolvendo pesquisa acerca de absorvedores de Helmholtz para atuar em frequências inferiores a 100 Hz. Devido as particularidades do objeto, para a respectiva caracterização acústica foi necessário construir um tubo de impedância configurado a fim de receber o método da função de transferência, e apto a atender as dimensões das amostras e a faixa de frequências almejadas. Esse artigo tem com objetivo apresentar os fundamentos teóricos e os requisitos técnicos que foram utilizados no desenvolvimento do aparato, bem como o respectivo processo de construção. Consta também no artigo o processo de validação do aparato, com o qual mostrou-se que o mesmo fornece resultados com desvio médio de 1,9 Hz em relação a previsão de modelo teórico consagrado.

Palavras-chave: tubo de impedância, absorção sonora, baixa frequência, absorvedores de Helmholtz.

PACS: 43.58.-e,43.20.Ye,43.20.Mv,43.55.Ev,43.58.Bh.

Low-frequency impedance tube: construction and validation

Abstract

For the determination of the sound absorption coefficients of acoustic materials there are established methods, such as those employed in reverberant room and impedance tube. For the development of sound absorption materials, the impedance tube methods - such as standing wave and transfer function - are more advantageous because they require comparatively smaller samples. The transfer function method is considered more practical for measurement processes as it allows the sound absorption coefficient to be obtained over a continuous frequency range. The authors of this paper are developing research on Helmholtz absorbers to operate at frequencies below 100 Hz. Due to the peculiarities of the object, for its acoustic characterization it was necessary to construct an impedance tube configured to receive the transfer function method, and able to meet the dimensions of the samples and the desired frequency range. This article aims to present the theoretical foundations and technical requirements that were used in the development of the apparatus, as well as the respective construction process. Also included in the article is the apparatus validation process, which showed that the experiments provides results with an average deviation of 1,9 Hz in relation to the predicted theoretical model.

Keywords: impedance tube, sound absorption, low frequency, Helmholtz absorbers.

1. INTRODUÇÃO

A determinação do coeficiente de absorção sonora de elementos acústicos tem métodos consagrados. Para incidência sonora aleatória, os coeficientes de absorção sonora são determinados em câmara reverberante com o procedimento indicado na norma ISO 354 (2003) [1]. Para incidência sonora normal, os coeficientes podem ser obtidos com o uso de um tubo de impedância. Nesse caso, dois métodos principais podem ser aplicados: o método de onda estacionária descrito na norma ISO 10534-1 (2001) [2], e o método da função de transferência descrito na norma ISO 10534-2 (2001) [3].

Nota-se na literatura que a caracterização experimental de absorvedores acústicos ocorre frequentemente com ensaios em tubos de impedância [4–10]. Os principais motivos do uso desse tipo de aparato experimental são a praticidade oferecida por requerer amostras reduzidas, a disponibilidade comercial, e a eficácia dos dois principais métodos experimentais que podem ser aplicados, descritos brevemente a seguir.

O método da onda estacionária [2] baseia-se na medição das pressões máxima e mínima das ondas sonoras estacionárias formadas ao longo do tubo, com a amostra posicionada na extremidade oposta à da fonte sonora. A partir da razão de tais pressões, calcula-se o coeficiente de reflexão sonora e a impedância acústica (variáveis complexas), com o valor de fase obtido pelas distâncias entre as posições de pressão mínima e a superfície da amostra. Esta técnica é confiável, mas pode ser lenta quanto ao processamento dos dados, uma vez que deve ser feita frequência por frequência [11].

O método da função de transferência [3] faz uso de múltiplas medições de resposta em frequência em pontos discretos localizados ao longo do tubo, utilizando a função de transferência entre tais medidas para calcular o coeficiente de reflexão sonora. Com o coeficiente de reflexão, calcula-se a impedância de superfície e o coeficiente de absorção sonora da amostra. Esse método pode ser considerado mais eficiente em termos de processamento dos dados, pois for-

nece o coeficiente de absorção sonora sob uma faixa contínua de frequência [11].

A norma ISO 10534-2 (2001) indica que a faixa de frequências de atuação do tubo de impedância é limitada pelas suas dimensões, a saber: comprimento e diâmetro do corpo do tubo. O diâmetro por sua vez limita o tamanho da amostra a ser avaliada. Para quantificar tais dependências, pode-se tomar como exemplo o tubo comercial modelo 4206A da empresa *Briuel & Kjaer*, que permite a avaliação de amostras de absorvedores circulares, com diâmetro de 100 mm, para a faixa de frequências entre 100 Hz e 3200 Hz (informações disponibilizadas pelo fabricante¹). Amostras maiores exigem tubos de seção transversal maiores, o que diminui a frequência máxima de atuação.

Os autores do presente artigo vêm desenvolvendo pesquisa que visa criar um protótipo sintonizável de absorvedor de Helmholtz para atuar de forma otimizada em frequências entre 20 e 300 Hz, que é a faixa na qual observa-se heterogeneidades espectral e espacial na resposta acústica de salas pequenas (volumes de até 60 m³), consequentes da formação dos modos acústicos. As geometrias propostas para as amostras do protótipo e a faixa de frequência desejada não são atendidas por tubos de impedância comerciais, de modo que foi necessário projetar e construir um tubo de impedância específico para a pesquisa. O presente artigo tem como objetivo apresentar e discutir o projeto, as etapas de construção e a validação do aparato desenvolvido.

2. PROJETO E CONSTRUÇÃO DO TUBO DE IMPEDÂNCIA

O desenvolvimento do tubo de impedância para baixas frequências contou com as seguintes etapas: projeto, na qual efetuou-se os estudos tanto da fundamentação teórica que rege o método da função de transferência, quanto dos requisitos técnicos aplicados aos objetivos do trabalho; e construção, na qual o projeto foi executado. Os detalhes do desenvolvimento de tais etapas são

¹bksv.com, acesso em 15/11/2019.

descritos a seguir.

2.1 Fundamentação teórica

O método da função de transferência, escolhido pelos autores pelas vantagens já discutidas, norteou o projeto do tubo de impedância, que pode ser entendido de maneira geral como uma guia de onda em cujas extremidades são posicionadas a fonte sonora (auto-falante) e a amostra. Tal qual descrito na norma ISO 10534-2 (2001), o método demanda o uso de dois microfones atuando como transdutores acústicos, que devem ser posicionados às distâncias x_1 e x_2 do plano de referência (plano no qual devem ser posicionada a superfície da amostra sob análise), tal qual ilustra a Figura 1.

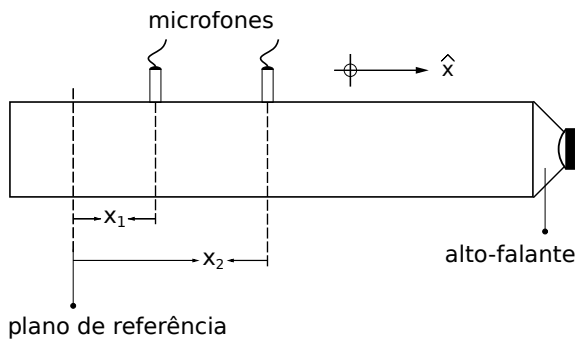


Figura 1: Ilustração esquemática do tubo de impedância, com indicação para as posições x_1 e x_2 dos microfones, para o plano de referência, e para a fonte sonora (alto-falante).

A pressão sonora p_I da onda incidente pode ser expressa por

$$p_I = p'_I e^{j k_0 x}, \quad (1)$$

enquanto a pressão sonora p_R da onda refletida pode ser expressa por

$$p_R = p'_R e^{-j k_0 x}. \quad (2)$$

Nas equações 1 e 2, p'_I e p'_R representam respectivamente as pressões da onda incidente e refletida no plano de referência, e k_0 representa o número de onda (ou a constante de propagação). Considera-se que o regime dinâmico no

interior do tubo favoreça a propagação de ondas planas.

As pressões sonoras em x_1 e x_2 (posições dos microfones), portanto, podem ser dadas respectivamente por

$$p_1 = p'_I e^{j k_0 x_1} + p'_R e^{-j k_0 x_1}, \quad (3)$$

$$p_2 = p'_I e^{j k_0 x_2} + p'_R e^{-j k_0 x_2}. \quad (4)$$

A função de transferência H_{12} do campo acústico resultante é dada pela razão p_2/p_1 . Sabendo que o coeficiente de reflexão r pode ser obtido por meio da expressão $p'_R = r p'_I$, pode-se escrever

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{j k_0 x_2} + r e^{-j k_0 x_2}}{e^{j k_0 x_1} + r e^{-j k_0 x_1}}. \quad (5)$$

Isolando r na Equação 5, obtém-se a expressão

$$r = e^{2 j k_0 x_1} \frac{H_{12} - e^{-j k_0 s}}{e^{j k_0 s} - H_{12}}, \quad (6)$$

na qual $s = x_1 - x_2$ é a distância entre os microfones. Assim, o coeficiente de absorção sonora α do material pode ser expresso por

$$\alpha = 1 - |r|^2. \quad (7)$$

2.2 Requisitos técnicos

A princípio, um tubo de impedância pode apresentar qualquer formato de seção transversal, desde que essa seja constante e permita a propagação de ondas sonoras planas. A norma ISO 10534-2 (2001), por outro lado, restringe as possibilidades ao recomendar seções circulares ou retangulares, sendo essas últimas preferivelmente quadradas. Expõem-se a seguir as exigências técnicas desta norma para a construção

de um tubo de impedância retangular, que é o aparato experimental arbitrado para o trabalho.

Para garantir que as ondas sonoras se propaguem devidamente ao longo do tubo (caráter plano com o mínimo possível de perdas por viscosidade), suas superfícies internas devem ser suficientemente lisas, livres de rugosidade, porosidade ou perfurações (exceto na posição dos microfones). A seção transversal retangular deve manter a forma e a proporção constantes por todo o comprimento, sendo recomendados desvios máximos de 2 %. As paredes do tubo devem ser rígidas o suficiente para impedir perturbações acústicas via ressonância estrutural, sendo recomendadas espessuras de no mínimo 10 % da largura referente ao corte transversal. O aparato deve ser vibro-acusticamente isolado, a fim de impedir a interferência de vibrações e ruídos externos nas medições.

As dimensões do tubo dependem da faixa de frequência para a qual os ensaios são executados. A máxima largura d referente a seção transversal do tubo deve obedecer a inequação

$$d < 0,5 \lambda_u \rightarrow f_u d < 0,5 c_0, \quad (8)$$

na qual λ_u é o comprimento de onda relativo ao limite superior f_u da faixa de frequência, e c_0 é a velocidade do som no meio. O espaçamento s entre os microfones, que deve ser conhecido com precisão de 2 mm, depende do limite superior da faixa de frequências, de acordo com a inequação

$$f_u s < 0,045 c_0. \quad (9)$$

O limite inferior f_l da faixa de frequências também impõe condições ao espaçamento entre os microfones, de acordo com a inequação

$$s > 0,05 \lambda_l \rightarrow f_l s > 0,05 c_0, \quad (10)$$

na qual λ_l é o comprimento de onda relativo a

f_l . Vale ressaltar que o sistema de aquisição de dados deve ser sensível a faixa de frequências a ser analisada.

Tanto o alto-falante quanto a amostra criam ondas distorcidas (não planas) em suas proximidades, sendo que os microfones devem ser posicionados fora de tais regiões. Recomenda-se assim que x_2 esteja a uma distância $3d$ da extremidade na qual encontra-se o alto-falante, e que x_1 esteja a uma distância entre $d/2$ e $2d$ do plano de referência, dependendo do tipo de amostra. Essas recomendações garantem a aquisição de sinais relativos somente às ondas planas, e determinam, em conjunto com a distância entre os microfones, o comprimento total do tubo.

Ambos os microfones, que devem ser sensíveis a pressão, devem ser do mesmo tipo e apresentar diâmetros d_m pequenos quando comparados a $c_0 f$, além de obedecerem a inequação $d_m < 0,2s$. A instalação dos mesmos deve ser procedida de forma a garantir isolamento entre o interior e o exterior do tubo, e a interferir o mínimo possível na superfície interior.

Tratando-se de tubos retangulares, recomenda-se que o espaço destinado a amostra seja integrado ao corpo do aparato. No caso, recomenda-se que a inserção das amostras se proceda longitudinalmente através de uma porta devidamente selada, permitindo assim o preciso ajuste ao plano de referência. O mesmo vale para a inserção do anteparo rígido que antecede a amostra.

O alto-falante deve ser acoplado ao tubo de maneira a preencher $2/3$ da área interna da seção transversal. Para evitar que as ondas emitidas no sentido oposto ao tubo interfiram no sinal captado pelos microfones, o alto-falante deve ser enclausurado por uma caixa acústica. As ressonâncias criadas na caixa e no tubo podem ser amenizadas com aplicação de material absorvente - preenchendo o volume no caso da caixa, e apresentando espessura mínima de 200 mm no caso do tubo. Ainda, o acoplamento entre a caixa acústica e o tubo deve contar com amortecimento, de forma a amenizar a criação de ressonâncias estruturais no corpo do aparato.

O sistema eletroacústico deve ser capaz de enviar um sinal amplificado ao alto-falante, caracterizado por uma varredura na faixa de frequências de interesse, e receber as respostas obtidas por ambos microfones. Ferramentas computacionais, por fim, devem atuar sobre os sinais captados, executando as transformações e manipulações matemáticas necessárias para a obtenção dos espectros de absorção sonora.

2.3 Projeto e construção

Para a construção do tubo de impedância, foram seguidas as diretrizes recomendadas pela norma ISO 10534-2 (2001), expostas na seção anterior. A princípio, tinha-se como projeto a construção de um tubo de seção transversal circular, como procedido por Oldfield e Bechwati [12]. Para tal, seria necessária a aquisição de um tubo de aço de aproximadamente 3000 mm de comprimento, 300 mm de diâmetro e 15 mm de espessura (5 % do diâmetro). Diante dos orçamentos elevados, optou-se pela busca de alternativas mais acessíveis, mas que ainda atendessem as exigências da norma para o aparato. Decidiu-se então por construir um tubo de seção transversal quadrada constituído de MDF (*medium density fiberboard*). Verificou-se posteriormente que tais escolhas apresentam vantagens além da acessibilidade. A saber, o material é de fácil manipulação quando comparado ao aço, e a forma da seção transversal facilita a adequação das amostras. Por outro lado, a necessidade de montagem do corpo do aparato pode ser considerada uma desvantagem quando comparada ao tubo cilíndrico, que é comercializado já no formato desejado.

O mercado disponibiliza as variações de MDF cru e laminado. O MDF cru é caracterizado por superfícies lisas, livres das lâminas rugosas presentes na segunda opção, o que atende a uma das exigências da norma. A espessura e das placas para a montagem do tubo dependem do lado interno d da seção transversal, devendo obedecer a inequação $e \geq 0,1d$. O lado d do tubo, por sua vez, limita o tamanho das amostras e a frequência máxima de atuação do aparato, de acordo com a inequação 8. Com base nessas

dependências e na disponibilidade do mercado, optou-se pela aquisição de placas de 30 mm de espessura, que impõem um máximo de 300 mm para d . Julgando-se que, dentro desse limite, quanto maior a área aceitável para a amostra, maior a flexibilidade de investigação experimental, optou-se pela construção de um tubo com seção quadrada de 300 mm de lado interno. Dessa forma, ficou estabelecido aproximadamente 570 Hz como limite superior de frequência de atuação, valor que se enquadra nas demandas da pesquisa de absorvedores de Helmholtz variáveis dos autores. A densidade média do painel de MDF do qual se extraiu as placas é de 391 kg/m^3 (valor fornecido pela fabricante DURATEX²).

O comprimento total do tubo é determinado pela distância s entre as posições dos microfones, e pelas distâncias mínimas entre tais posições e os limites do tubo (plano de referência e fonte sonora). As inequações 9 e 10 determinam a distância s perante a faixa de frequência de atuação desejada. Mesmo esta faixa não contemplando frequências acima de 400 Hz, são necessários no mínimo três valores de s para que as condições sejam satisfeitas. Para atender essa exigência, optou-se pelo uso de três posições fixas de microfones, M_1 , M_2 e M_3 . Após um procedimento por tentativas e erros, obteve-se os valores expostos na Tabela 1, que sumariza os valores de s adotados para a distância entre os microfones, as frequências mínima f_l e máxima f_u consequentes, e a dimensão máxima d_{max} da lateral da seção transversal do tubo, mostrando que 300 mm obedece os limites. Para os cálculos, utilizou-se $c_0 = 344 \text{ m/s}$, que é a velocidade de propagação do som no ar obtida com a expressão $c_0 = 343,2\sqrt{T/293}$ [3] para uma temperatura de $T = 295 \text{ K}$ ($\approx 22 \text{ }^\circ\text{C}$ – valor predominante no ambiente experimental).

A distância mínima entre M_1 (primeiro microfone) e o plano de referência deve estar entre $d/2$ e $2d$. Optou-se pelo limite superior, $2d = 600 \text{ mm}$. Na extremidade oposta, a recomendação é que a distância mínima entre M_3 e o alto-falante seja de $3d = 900 \text{ mm}$. A distância

²duratexmadeira.com.br, acesso em 26/11/2019.

Tabela 1: Valores escolhidos para a distância s entre os microfones, nas três combinações (Comb) entre M_1 , M_2 e M_3 , com os consequentes limites para a faixa de frequência (f_l e f_u) e para a dimensão da seção transversal (d_{max}).

Comb	s (mm)	f_l (Hz)	f_u (Hz)	d_{max} (mm)
M_1 - M_2	380	45	407	420
M_2 - M_3	520	33	298	580
M_1 - M_3	900	19	172	1000

entre o plano de referência e o alto-falante, portanto, é dada por $5d$ somados ao maior valor de s , resultando em 2400 mm. Para se obter o comprimento total do tubo, deve-se acrescentar a esse valor o comprimento da cavidade da amostra, já que optou-se por integrá-la ao corpo do aparato. Foi adotado 300 mm para tal dimensão, o que resulta em 2700 mm para o comprimento total do tubo. A ilustração da Figura 2 representa o tubo em vista superior, com detalhes para as dimensões escolhidas. Nela é representada também a porta de inserção de amostra, com limite escolhido de 450 mm.

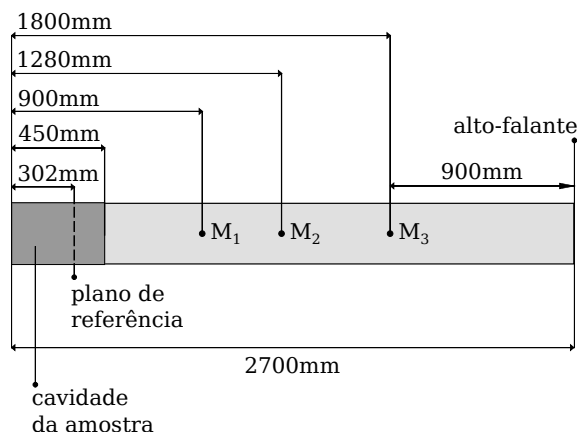


Figura 2: Representação em vista superior do tubo de impedância, com indicação para as partes e dimensões, sendo M_1, M_2 e M_3 a posição dos microfones.

Escolhidas tais dimensões, pode-se dar início a construção do aparato. A primeira etapa se baseou na montagem das placas que constituem as paredes do corpo do tubo. O peso elevado das partes exigiu fixação por cola e parafusos, e a constância da seção transversal foi garantida pela precisão geométrica dos cortes (executados pelo próprio vendedor). A parede superior do tubo foi dividida na distância específica para se formar a porta da cavidade da amostra. Na extremidade oposta, foi construído o flange que

constitui o sistema de acoplamento entre a caixa acústica e o corpo do tubo. A foto da Figura 3 mostra a vista geral do aparato resultante dessa primeira etapa de construção.



Figura 3: Foto do corpo do tubo de impedância após a primeira etapa de construção.

Para a instalação dos microfones, foram desenvolvidos suportes de náilon que permitem encaixe justo e posicionamento preciso. Tais características foram garantidas ao se projetar as peças de acordo com as dimensões dos microfones selecionados para o ensaio – microfones de medição omnidirecionais da fabricante DBX, modelo RTA-M, com resposta linear na faixa de 20 a 20 kHz. O canal interno dos suportes conta com duas juntas tóricas (*O'Ring*) que, em conjunto com o diâmetro justo, proporciona isolamento acústico suficiente para se obter qualidade nas medições. Além disso, as dimensões do suporte foram escolhidas de modo a garantir que a cápsula dos microfones, quando esses são inseridos, fique nivelada à superfície interna do tubo. A fixação das três peças nas posições dos microfones procedeu-se de forma a garantir encaixe justo, contando com aplicação de silicone para preencher possíveis ranhuras.

Os tubos de impedância comerciais contam com três microfones fixos, sendo que para cada medição são computados os sinais dos pares relativos à faixa de frequência em análise. A princípio optou-se por utilizar essa mesma estratégia para o aparato em construção, porém testes preliminares indicaram que o uso de apenas um par de microfones garante melhor repetibilidade dos resultados. Assim, optou-se por proceder com ensaios entre os quais troca-se a posição entre dois microfones. Para preencher o canal relativo

ao suporte sobressalente, foi desenvolvida uma peça com as mesmas dimensões do microfone que, quando aplicada, garanta isolamento acústico e nivelamento da superfície interna do tubo. As imagens da Figura 4 apresenta os detalhes do suporte e da peça isolante.



Figura 4: Fotos do suporte desenvolvido para os microfones. Esquerda: suporte não instalado, preenchido com a peça isolante; centro: suporte instalado no tubo, com a peça isolante separada; direita: microfone aplicado no tubo e suporte da posição sobressalente preenchido pela peça isolante.

A caixa acústica foi construída de acordo com as dimensões do alto-falante escolhido para o sistema. Os fatores que determinaram tal escolha foram o conceito da marca, o tamanho do equipamento e a característica da respectiva curva de resposta. Optou-se pelo *subwoofer* modelo GTO1014D do fabricante JBL Selenium, que responde linearmente entre 25 e 400 Hz, com dimensões de 148 mm de profundidade, 268 mm de diâmetro externo (sobre o tampo da caixa) e 228 mm de diâmetro interno (dimensão para o corte do tampo). O diâmetro de 254 mm do cone atende a exigência de cobrir 2/3 da área da seção transversal do tubo. Com base em tais dimensões, construiu-se uma caixa acústica de 300 x 300 x 250 mm. Especificamente, as dimensões do tampo excederam os limites da caixa, de modo a compor juntamente com o flange do tubo o sistema de acoplamento entre as partes. Na parte traseira da caixa foi instalado um painel conector devidamente selado por borracha e silicone. O alto-falante foi instalado de acordo com as sugestões do fabricante, que fornece a borracha necessária para selar e amortecer o encaixe. O espaço interno remanescente foi preenchido com espuma acústica da fabricante e importadora OWA SONEX³, modelo Sonex Illtec Perfilado de 25 mm (NRC = 0,45). As fotos da Figura 5 mostram alguns detalhes

dessa construção.



Figura 5: Fotos da caixa acústica em montagem. Esquerda: interior da caixa visto pela parte traseira aberta; centro: vista frontal; direita: interior da caixa preenchido com espuma acústica, com detalhe para o painel conector instalado na parte traseira.

A caixa acústica foi acoplada ao tubo pelo sistema de flange. Foram utilizados parafusos sextavados que permitem a remoção da caixa, caso haja necessidade de manutenção. Com intuito de garantir o isolamento entre as partes, foram aplicadas tiras de borracha de 1 mm na borda do tubo (o mesmo se procedeu para a união entre outras partes, quando julgou-se prudente). Antes de se proceder com o acoplamento, porém, foi inserido no tubo um conjunto de espumas acústicas (do mesmo tipo da utilizada na caixa acústica) formando um bloco de 300 x 300 x 200 mm, tal qual recomenda a norma ISO 10534-2 (2001). As fotos da Figura 6 mostram tais características.

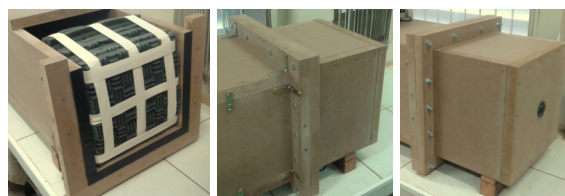


Figura 6: Fotos do acoplamento entre a caixa acústica e o tubo. Esquerda: detalhe para as espumas acústicas aplicadas na região em frente ao alto-falante e para as tiras de borracha aplicadas na borda; centro e direita: detalhes do sistema de flange.

Por fim, foi desenvolvido o mecanismo para o fechamento da porta pela qual a amostra deve ser inserida. Buscou-se por um sistema que permita facilidade de manipulação e garanta o isolamento acústico. Para tal, foram utilizados fechos de pressão nas paredes laterais e na parede superior, tal qual mostram as fotos da Figura 7. Nota-se que para auxiliar no isolamento, foi aplicada uma folha de borracha de 1 mm ao longo de toda parte inferior da porta, e na super-

³owa.com.br, acesso em 26/11/2019

fície de contato entre a porta e a parede superior do tubo.



Figura 7: Fotos da porta referente a cavidade da amostra. Esquerda: porta fechada sem o acionamento dos fechos de pressão; direita: porta aberta com detalhe para a borracha aplicada na parte inferior.

Para compor o alto-falante (JBL GTO1014D), os microfones (DBX RTA-M) e a interface de áudio (PreSonus AudioBox 44VSL), foi necessária a instalação de um amplificador de sinais. Optou-se pelo modelo LAB 300 da fabricante LAB.GRUPPEN, ao qual se tinha acesso. O sistema eletroacústico foi incorporado a um microcomputador munido de aplicativos destinados a análise de sinais. Ainda, um medidor de temperatura e umidade foi instalado na lateral do tubo, visto que o método experimental arbitrado demanda o conhecimento de tais grandezas. A foto da Figura 8 mostra o aparato pronto para executar as medidas, com indicação para os componentes do sistema de aquisição de dados.

2.4 Processamento dos sinais

Para o processamento dos sinais foi desenvolvida uma rotina computacional utilizando o aplicativo Gnu Octave 4.0.0 munido do pacote de áudio MATAA⁴ (*Mat's Audio Analyzer*), a qual atua executando as seguintes etapas: definição dos parâmetros físicos e computacionais (parâmetros de entrada); criação e reprodução do sinal; gravação das respostas; aplicação de filtro passa-baixa; cálculo da resposta ao impulso; janelamento; e cálculo da função de transferência. Ao final de tais etapas, a rotina foi programada para calcular e imprimir o espectro dos coeficientes de absorção sonora obtido.

⁴audioroot.net/mataa-mats-audio-analyzer, acesso em 25/11/2019.

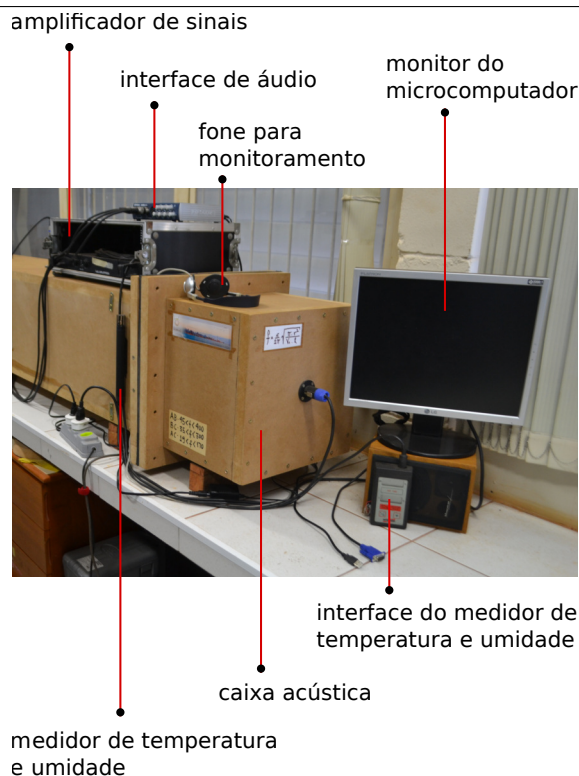


Figura 8: Foto do aparato pronto para executar as medidas, com indicação para os componentes do sistema eletroacústico e para o medidor de temperatura e umidade, estando ausente apenas o microcomputador.

3. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO TUBO DE IMPEDÂNCIA

Com o aparato pronto para executar ensaios, pôde-se dar início às etapas de calibração (ajustes no sistema eletroacústico) e validação (processo para verificar a eficácia do método), ambas descritas a seguir.

3.1 Calibração do aparato

A troca do posicionamento dos microfones exige modificações nas configurações eletroacústicas do aparato, sendo portanto necessária a sua calibração após cada troca de faixa de frequência. Para tal, adota-se os passos sugeridos pela norma ISO 10534-2 (2001), que prevê o ajuste da amplitude de resposta e fase dos microfones, a aquisição da temperatura e da umidade do ar (que exercem influência nos valores de densidade e velocidade de propagação do som), a análise da relação sinal-ruído, e a análise da distorção do alto-falante.

Como previa-se ensaios com uma grande quantidade de amostras, optou-se por fazer a correção da eventual diferença de fase entre os microfones com a predeterminação do fator de calibração H_c , que é obtido com medições entre as quais troca-se a posição dos microfones [3]. Já o ajuste da amplitude de resposta dos microfones, da relação sinal-ruído e da distorção do falante são efetuados variando os parâmetros da interface de áudio, que possibilita o controle do ganho dos sinais de entrada e saída. Dessa forma, antes de se dar início a cada bloco de medição (referente a cada faixa de frequência de análise), medições preliminares que retornam respostas tanto no domínio do tempo quanto das frequências devem ser executadas. A continuidade dos ensaios dependem da qualidade dos resultados obtidos em tal etapa, que compreende também o registro da temperatura e da umidade do ar.

3.2 Validação do aparato

A validação do aparato foi realizada de duas formas: Uma delas contou como amostra uma placa de MDF de 30 mm de espessura (placa utilizada como anteparo rígido para as amostras de absorvedor), cujos coeficientes de absorção devem ser próximos de zero em toda faixa de frequência considerada – o permite classificá-la como amostra de alta impedância acústica. A outra forma foi medir o coeficiente de absorção sonora de absorvedores de Helmholtz de dimensões e geometrias bem estabelecidas, e comparar os resultados com os valores calculados pelo modelo teórico exposto no trabalho de Parreira [13].

3.2.1 Validação com amostra de alta impedância

Os gráficos da Figura 9 mostram os coeficientes de absorção sonora em função da frequência obtidos para o anteparo rígido posicionado no plano de referência, para ambas faixas de frequência ensaiadas.

Observa-se pelo gráfico (a) da Figura 9 que há uma queda abrupta do coeficiente para frequên-

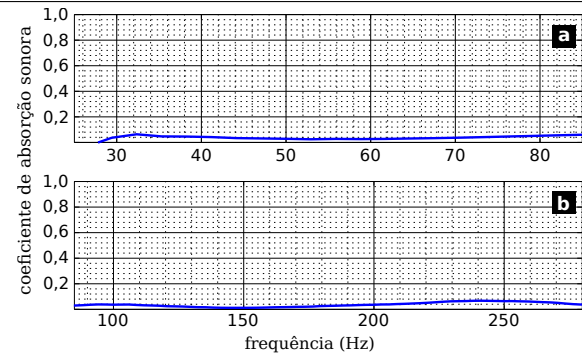


Figura 9: Coeficientes de absorção sonora em função da frequência obtidos para o anteparo rígido utilizado como amostra (posicionado no plano de referência), para as faixas de (a) 25 a 85Hz e (b) 85 a 270 Hz.

cias abaixo de 30 Hz, região na qual foram obtidos valores inclusive negativos e para qual, portanto, os resultados não podem ter qualidade atestada. Tal fenômeno pode estar relacionado com a resposta da fonte sonora na faixa de frequências em questão, e deve ser posteriormente investigado.

Mesmo utilizando uma amostra de impedância acústica elevada, espera-se observar alguma absorção sonora ao longo do espectro, tanto pela absorção do material em si quanto pelas perdas de energia sonora que ocorrem na propagação das ondas ao longo do tubo. Essa absorção, porém, não deve apresentar coeficientes elevados, visto que esse fenômeno pode distanciar os resultados do caso real [12]. Como foram obtidos coeficientes menores que 0.1 em toda faixa ensaiada, o aparato foi considerado como apto para executar os ensaios com amostras de absorvedor de Helmholtz.

3.2.2 Validação com absorvedor de Helmholtz

No presente trabalho, define-se como absorvedor de Helmholtz o sistema formado por uma placa perfurada e um anteparo rígido, ambos separados por uma caixa de ar (definição utilizada por Cox e D'Antonio [11]), tal qual representa a Figura 10. Nesse sentido, o absorvedor, também conhecido como painel perfurado, pode ser entendido como um conjunto de ressonadores de Helmholtz (dispositivos formados por uma cavidade de ar rígida munida de gargalo

aberto. As diversas configurações de absorvedores podem se diferenciar pela espessura da placa perfurada, pela quantidade de perfurações contida na placa (ou pela distância entre perfurações para o caso de uma distribuição simétrica), pelo raio de cada perfuração e pela espessura da caixa de ar (distância entre a placa e o anteparo). A combinação de tais parâmetros dita a frequência de sintonia do absorvedor.

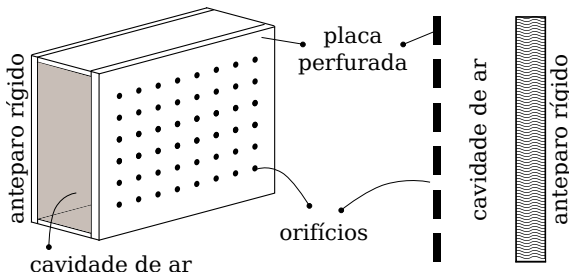


Figura 10: Ilustrações esquemáticas de um absorvedor de Helmholtz (ou painel perfurado) em vista tridimensional (esquerda) e corte transversal (direita).

A escolha das amostras a serem ensaiadas para esta etapa de validação baseou-se nas frequências dos modos acústicos de sala hipotética. Ou seja, optou-se por configurações de absorvedores de Helmholtz com coeficientes sintonizados em tais frequências. Para tal, foi considerada uma sala de 4,2 m de comprimento, 2,8 m de largura, e 3,3 m de altura, e calculou-se as frequências dos três primeiros modos normais axiais referentes a cada direção, que são os modos de maior energia [14]. A Tabela 2 sumariza os resultados obtidos.

Tabela 2: Frequências dos três primeiros modos axiais ($i = 1, 2, 3$) referentes a cada direção (x , y e z) da sala hipotética ($V = 4,2 \times 2,8 \times 3,3 \text{ m}^3$).

modos axiais $f(n_x, n_y, n_z)$ (Hz)			
i	$x(i, 0, 0)$	$y(0, i, 0)$	$z(0, 0, i)$
1	40,9	52,1	61,4
2	81,9	104,2	122,9
3	122,9	156,4	184,3

Da análise das diferentes configurações de absorvedores de Helmholtz obtidas a partir do modelo exposto por Parreira [13], foram selecionadas aquelas que permitiram a abrangência de absorção nas frequências consideradas (expostas na Tabela 2), visando maior praticidade

de confecção e menor desperdício de material. Para tal, optou-se por configurações que diferiram unicamente pela quantidade de perfurações na placa, mantendo-se constantes o raio das perfurações (3 mm), e as espessuras da cavidade de ar (50 mm) e da placa (15 mm). A Tabela 3 mostra as frequências f_{pico} e as magnitudes α_{pico} dos picos de absorção relativos a cada configuração selecionada. Nela, ε é a taxa (porcentagem) de abertura da placa⁵, definida como a razão entre a área de abertura (área de cada perfuração $a = \pi r^2$ multiplicada pelo número total n de perfurações) e a área total da placa d^2 , de acordo com a expressão $\varepsilon = 100 n a / d^2$.

Tabela 3: Relação entre o número de perfurações n , taxa de abertura ε , coeficiente de absorção sonora α e frequência de sintonia f_{pico} calculados para cada configuração de absorvedor selecionada.

f_{pico} (Hz)	α_{pico}	ε (%)	n
40	0,70	0,06	2
50	0,88	0,09	3
60	0,85	0,12	4
80	0,90	0,22	7
105	0,91	0,38	12
120	0,92	0,50	16
125	0,89	0,53	17
155	0,80	0,80	26
185	0,70	1,18	38

A fim de excluir a necessidade de se confeccionar uma placa perfurada para cada variação de amostra, optou-se por utilizar uma única placa munida com o máximo de perfurações necessárias, sendo essas passíveis de preenchimento por cavilhas de acordo com a necessidade. Seguindo os resultados obtidos com o modelo teórico, foi confeccionada uma placa em MDF de 15 mm de espessura, dimensionada de modo satisfazer as dimensões do tubo (300 x 300 mm), e nela foram feitas 38 perfurações de 3 mm de raio e igualmente espaçadas. O anteparo rígido

⁵Tal qual discutido por Everest e Pohlmann [15], ao se descrever a abertura das placas como a razão entre área perfurada e área total (abordagem comum na literatura [4] [11]), é introduzido um fator de incerteza de 100. Em vista de tal característica, os autores defendem o uso da porcentagem de abertura como parâmetro descritivo, sendo que tal abordagem foi a adotada para o presente trabalho.

foi posicionado de modo a formar uma cavidade de ar de 50 mm de espessura. A Figura 11 apresenta a configuração da placa testada (disposição das perfurações e como as cavilhas foram utilizadas a fim de se ajustar o número de perfurações) e como ela foi posicionada no interior do tubo de impedância, com o anteparo rígido formando a cavidade de ar.

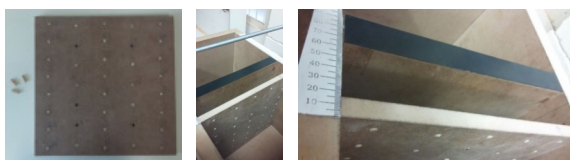


Figura 11: Montagem da amostra na cavidade. Esquerda: configuração da placa perfurada testada; centro e direita: montagem da placa e do anteparo na cavidade de amostra do tubo.

Com a placa confeccionada, foram realizados os ensaios para a obtenção dos coeficientes de absorção sonora em função de frequência das configurações selecionadas. A Figura 12 mostra os resultados obtidos para a primeira faixa do espectro analisada, onde localizam-se os picos de absorção das configurações com 2 a 7 perfurações. Já a Figura 13 refere-se aos resultados da segunda faixa do espectro, onde localizam-se os picos de absorção das configurações com 12 a 38 perfurações.

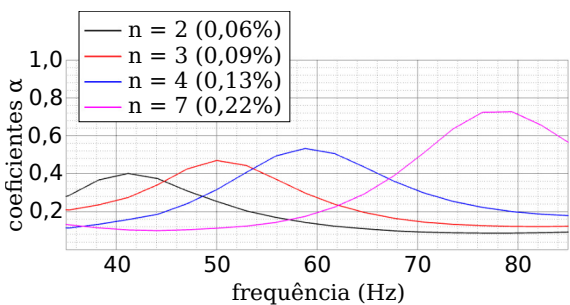


Figura 12: Coeficientes de absorção sonora obtidos para amostras munidas de placas com 2, 3, 4 e 7 perfurações.

A Tabela 4 mostra o comparativo entre as frequências de sintonia calculadas pelo modelo teórico (f_{pico}) e obtidas experimentalmente (f_{pexp}). Nela, n é a quantidade de perfurações das amostras, $\delta = f_{pico} - f_{pexp}$ é o erro absoluto, e $\delta\% = 100 \delta / f_{pico}$ é o erro percentual.

Com os erros absolutos δ apresentados na Ta-

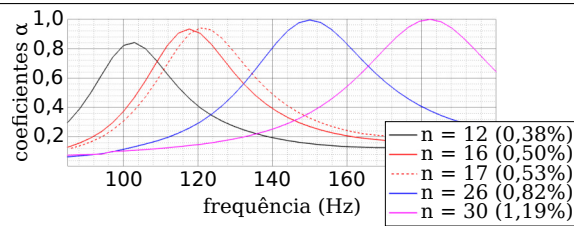


Figura 13: Coeficientes de absorção sonora obtidos para amostras munidas de placas com 12, 16, 17, 26 e 38 perfurações.

Tabela 4: Comparativo teórico \times experimental das frequências de sintonia dos absorvedores estudados (munidos de n perfurações), com colunas indicando os erros absoluto (δ) e percentual ($\delta\%$) entre as frequências teórica (f_{pico}) e experimental (f_{pexp}).

n	f_{pico} (Hz)	f_{pexp} (Hz)	δ (Hz)	$\delta\%$
2	40,0	41,2	-1,2	3,0
3	50,0	49,9	0,1	0,2
4	60,0	58,8	1,2	2,0
7	80,0	79,4	0,6	0,7
12	105,0	102,9	2,1	2,0
16	120,0	117,6	2,4	2,0
17	125,0	120,6	4,4	3,5
26	155,0	149,9	5,1	3,3
38	185,0	182,3	2,7	1,5

bela 4, obtém-se um desvio médio $d_{med} = 1,9$, valor que possibilita considerar o aparato desenvolvido como validado.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As características do absorvedor de Helmholtz em estudo pelos autores, e a necessidade de se investigar experimentalmente o seu comportamento acústico em frequências não contempladas por aparatos comerciais, foram a motivação do desenvolvimento do tubo de impedância apresentado no presente trabalho, que atende ao método da função de transferência para a determinação de coeficientes de absorção sonora de amostras. O estudo dos fundamentos teóricos do método e as diretrizes recomendados pela norma ISO 10534-2 (2001) fundamentaram os processos de projeto, construção, calibração e validação do aparato experimental.

O comparativo entre os resultados obtidos experimentalmente com o tubo de impedância desenvolvido e as predições do modelo teórico

mostrou que o aparato é apto para caracterizar amostras de absorvedores acústicos em faixas não contempladas por soluções comerciais. Os ensaios executados com a amostra de alta impedância mostraram que há espaço para aprimoramentos no aparato, aprimoramentos esses que formam a sugestão de continuidade do trabalho.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o auxílio prestado pelos pesquisadores Dr. Alexandre Maiorino, Dr. Ítalo César Montalvão Guedes, Dr. Bruno Masiero e Gustavo de Mattos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

1. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. *ISO 354 Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room*. Genebra, Suíça, 2003.
2. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. *ISO 10534 Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 1: Method using stand wave ratio*. Genebra, Suíça, 2001.
3. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. *ISO 10534 Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer-function method*. Genebra, Suíça, 2001.
4. LI, Dengke; CHANG, Daoqing; LIU, Bilong. Enhancing the low frequency sound absorption of a perforated panel by parallel-arranged extended tubes. *Applied Acoustics*, v. 102, p. 126–132, 2016.
5. JIMÉNEZ, N.; HUANG, W.; ROMEROGARCÍA, V.; PAGNEUX, V.; GROBY, J.-P. Ultra-thin metamaterial for perfect and quasi-omnidirectional sound absorption. *Applied Physics Letters*, v. 109, 2016.
6. WU, Xiaoxiao; FU, Caixing; LI, Xin; MENG, Yan; GAO, Yibo; TIAN, Jingxuan; WANG, Li; HUANG, Yingzhou; YANG, Zhiyu; WEN, Weijia. Low-frequency tunable acoustic absorber based on split tube resonators. *Applied Physics Letters*, v. 109, 2016.
7. XIAODAN, Zhao; XIANGQIAN, Fan. Enhancing low frequency sound absorption of micro-perforated panel absorbers by using mechanical impedance plates. *Applied Acoustics*, v. 88, p. 123–128, 2015.
8. WANG, Weichen; WICK, Robert; HERRIN, D. W. Designer backings to improve micro-perforated panel absorber performance. *Proceedings of the 44th Inter-Noise Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, 2015.
9. LARNER, David James; DAVY, John Laurence. The prediction of the diffuse field sound absorption of perforated panel systems. *Proceedings of the 44th Inter-Noise Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, 2015.
10. DUPONT, Thomas; VERDIÈRE, Kévin; LECLAIRE, Philippe; PANNETON, Raymond. A method to control the lateral boundary condition effects in the characterization of acoustic materials in an impedance tube. *Proceedings of the 44th Inter-Noise Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, 2015.
11. COX, Trevor J.; D'ANTONIO, Peter. *Acoustic absorbers and diffusers*. USA: Spon Press, Inc., 2006.
12. OLDFIELD, R.; BECHWATI, F. Accurate low frequency impedance tube measurements. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, v. 30, n. 4, 2008.
13. PARREIRA, Ricardo Jorge Patraquim Godinho. *Painéis acústicos perfurados em madeira: estudo e avaliação experimental de soluções*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2008.
14. SOUZA, Albano Neves e; PATRAQUIM, Ricardo. Análise preliminar da viabilidade de

ressoadores de helmholtz adaptáveis para otimização da resposta acústica de salas pequenas. *Anais do VIII Congresso Ibero-americano de Acústica*, 2012.

15. EVEREST, F. Alton; POHLMANN, Ken C. *Master handbook of acoustics*. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2009.