



Qualificação de Câmara Reverberante

Samyrian F. Utida*, Stelamaris Rolla Bertoli

Resumo

A adequação acústica de ambientes expressa a necessidade de conferir condições compatíveis de audibilidade aos mesmos, adaptando-os de acordo com suas finalidades. Tempos de reverberação não indicados para o tipo de uso do recinto prejudicam a qualidade acústica do ambiente, comprometendo o bem-estar das pessoas que o utilizam. O tratamento acústico de recintos baseia-se no emprego de materiais absorvedores sonoros que possuem diferentes coeficientes de absorção sonora. Estes coeficientes são medidos através de dois métodos normalizados, pelas ISO 10534-2 (1998) e ISO 354 (2003). O ensaio com incidência sonora difusa é descrito pela ISO 354 (2003), em câmaras reverberantes. A câmara reverberante situada no Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada (LACAF) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP é empregada somente para fins didáticos. A presente pesquisa teve como objetivo, qualificar a câmara reverberante do LACAF, sendo a avaliação da câmara baseada no procedimento previsto pela ISO 354 (2003). Foi realizado o estudo de compatibilização da câmara com relação às suas dimensões, bem como ensaios para a qualificação do campo sonoro difuso no interior da câmara reverberante e, ainda, ensaios para obtenção dos coeficientes de absorção sonora de materiais comercializados, comparando os coeficientes obtidos com os ensaios na câmara do LACAF e os valores de catálogo das amostras utilizadas. Foram analisados os resultados obtidos com as etapas pertinentes da qualificação, com o propósito de verificar os fatores responsáveis por conferir limitações à câmara experimental na realização de ensaios acústicos, a fim de aplicar correções que possibilitassem a potencialização da câmara experimental do LACAF para o estudo efetivo de materiais acústicos.

Palavras-chave: câmara reverberante; coeficiente de absorção sonora; tempo de reverberação.

Introdução

A adequação da performance acústica de ambientes diversos tem como finalidade, propiciar o aperfeiçoamento do desempenho acústico do espaço, ao mesmo tempo que garante o bem-estar de seus usuários, promovendo bom isolamento acústico e controle de reverberação do recinto. Considerando os diferentes tipos de uso que cada ambiente pode ter, é necessário atentar-se à correção do tempo de reverberação de cada recinto, a fim de qualificá-lo acusticamente.

O tempo de reverberação, que indica o tempo de prosseguimento do som no ambiente após cessada a emissão da fonte sonora, é uma grandeza que depende do volume da sala e da absorção sonora conferida pelos materiais nela empregados. Os coeficientes de absorção sonora são definidos como a medida da capacidade de uma superfície (material absorvedor sonoro) em absorver som.

A ISO 354 (*Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room*, 2003) descreve o método para medição de coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante, por incidência difusa.

A câmara reverberante avaliada, situada no Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada (LACAF) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da UNICAMP, é empregada unicamente para fins didáticos.

Esta pesquisa teve como principal objetivo, qualificar a câmara reverberante do LACAF com o uso da Norma especificada, a ISO 354 (2003), estudando a possibilidade de estender seu uso não somente para fins didáticos, mas potencializá-la para o estudo efetivo de materiais de absorção.



Materiais e Métodos

Para o estudo de compatibilidade da câmara, verificou-se os parâmetros da câmara do LACAF (formato, volume e campo sonoro) e se estes atendiam aos requisitos apresentados pela norma ISO 354 (2003). Para a coleta dos dados, foram feitas medições das superfícies internas da câmara, que não possui paredes paralelas entre si. Foram coletadas as medidas de largura, bem como a altura de cada uma das paredes, que também são diferentes entre si. Assim, obtiveram-se as áreas das superfícies internas, além das diagonais internas da câmara. Com um modelo tridimensional da câmara reverberante, concebido no software AutoCAD®, obteve-se o volume total da câmara.

Em um pré-teste, executado na câmara do LACAF, realizou-se o estudo inicial de medição dos tempos de reverberação segundo a ISO 354 (2003), utilizando o software *DIRAC*, ferramenta para medição de parâmetros acústicos de salas, como tempo de reverberação pela técnica de resposta impulsiva, além de equipamentos como uma fonte omnidirecional, amplificador e dois microfones.

Para a qualificação experimental do campo sonoro difuso da câmara reverberante, realizou-se ensaios para a determinação dos coeficientes de absorção sonora em função da frequência de uma amostra de espuma de poliuretano. O ensaio foi realizado primeiramente na câmara sem difusores estáticos instalados, repetindo-o em seguida com a instalação de um grupo de difusores estáticos, confeccionados em policarbonato, levemente curvados e posicionados aleatoriamente na câmara. Repetiu-se o procedimento, inserindo gradativamente uma maior quantidade de placas, ampliando a área de difusores até atingir um valor constante para o coeficiente de absorção sonora médio da espuma de poliuretano, num intervalo de frequências de 500 Hz a 5000 Hz. Nessa condição, o campo sonoro no interior da câmara foi considerado difuso.

Por fim, foi proposta a realização de ensaios na câmara do LACAF seguindo a metodologia descrita pela ISO 354 (2003), para a determinação do coeficiente de absorção sonora de amostras de materiais comerciais, testados em outros laboratórios normalizados. Devido à condição de isolamento social imposta pela pandemia e a impossibilidade de realizar os ensaios presencialmente, optou-se por coletar dados de ensaios de determinação de coeficiente de absorção sonora de materiais realizados no LACAF entre 2011 a 2019, dentro das disciplinas de graduação e pós graduação. Os resultados dos coeficientes de absorção sonora desses materiais foram reunidos, analisados e comparados com os valores de catálogo fornecidos pelos fabricantes, a fim de verificar as discrepâncias existentes entre estes e analisar a existência de um fator de correção entre os resultados.

Resultados e Discussões

Na Tabela 1 são apresentados o valor obtido para o volume total da câmara reverberante do LACAF e, a partir do valor encontrado para a maior diagonal interna ($I_{m\acute{a}x}$), o valor calculado para a condição de proporcionalidade exigida pela norma ISO 354 (2003), comparando-os com os dados requisitados pela norma.

Tabela 1: Dados comparativos entre a câmara reverberante normalizada e a câmara do LACAF

	ISO 354 (2003)	LACAF
Volume	200 m ³	71,8 m ³
Formato	$I_{m\acute{a}x} < 1,9 V^{1/3}$	7,525 m < 7,897 m

Verificou-se que o volume da câmara experimental **não** atende o volume mínimo e é equivalente à escala de 1:1,3 de um volume de 150 m³ e 1:1,4 de um volume de 200 m³. Quanto ao formato indicado, sabendo que o $I_{m\acute{a}x}$ da câmara do LACAF é 7,525 m, comprimento da maior diagonal, com um volume de 71,8 m³, concluímos que a condição $I_{m\acute{a}x} < 1,9 V^{1/3}$ é satisfeita, conforme apresentado na Tabela 1.

Na caracterização do campo sonoro difuso do interior da câmara do LACAF, os resultados da variação dos coeficientes de absorção de uma amostra conhecida em função da variação da área de difusores instalados são apresentados de forma gráfica na Figura 1. São exibidos os valores dos coeficientes de absorção sonora calculados para a espuma de poliuretano em função de frequência em bandas de 1/3 de oitava.



A Figura 2 apresenta os valores dos coeficientes de absorção médios para o intervalo de frequências de 500 Hz a 5000 Hz, em função da área de difusores instalados sucessivamente nos ensaios realizados na câmara reverberante.

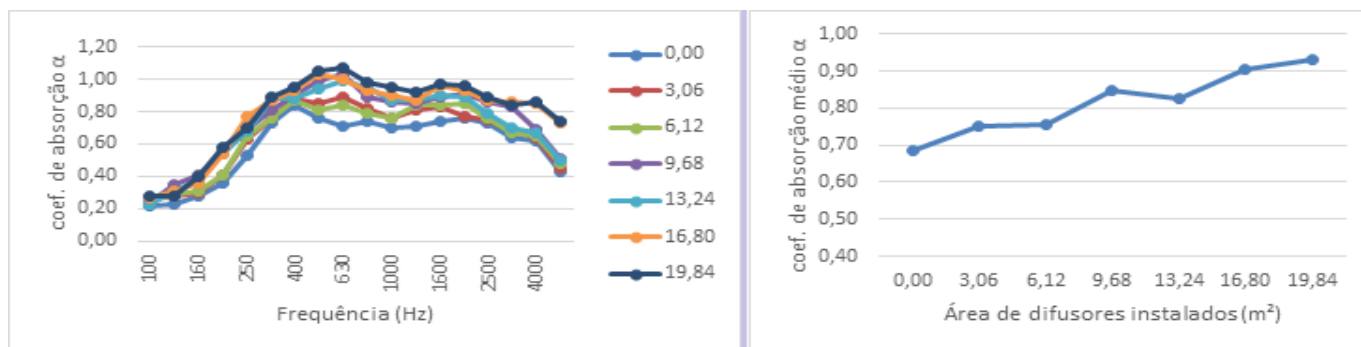


Figura 1: Coeficientes de absorção sonora da espuma de poliuretano em função da frequência

Figura 2: Coeficientes de absorção sonora médios (500 Hz a 5000 Hz) por área de difusores instalados

Analisando os resultados obtidos na qualificação do campo sonoro, verificou-se que a média dos coeficientes de absorção sonora para o intervalo de frequências de 500 Hz a 5000 Hz da amostra de espuma de poliuretano atingiu um valor estável com aproximadamente 19,84 m² de área de difusores instalados, totalizando 10 difusores estáticos posicionados aleatoriamente na câmara ao final. De acordo com a norma ISO 354 (2003), a área de difusores instalados deve variar entre 15% a 25% da área total das superfícies internas da câmara. O valor obtido de 19,84 m² corresponde a 18,86% da área total das superfícies internas, portanto, a porcentagem proposta pela norma ISO 354 (2003) foi satisfeita.

Os gráficos da Figura 3 apresentam as curvas para os coeficientes de absorção médios, com suas respectivas barras de erro (desvio padrão), em função da frequência, para cada material ensaiado no LACAF, em comparação com as curvas traçadas a partir dos resultados fornecidos pelos catálogos dos fabricantes destes materiais, obtidos em laboratórios credenciados. As amostras ensaiadas correspondem ao Forro ISOVER Boreal Plus de 20 mm de espessura, Sonex Illtec Plano de espessura 50 mm, Forro Mineral da Armstrong, Lã de Vidro ISOVER, Lã de PET Trisoft e Lã de Rocha da Rock Fibras.

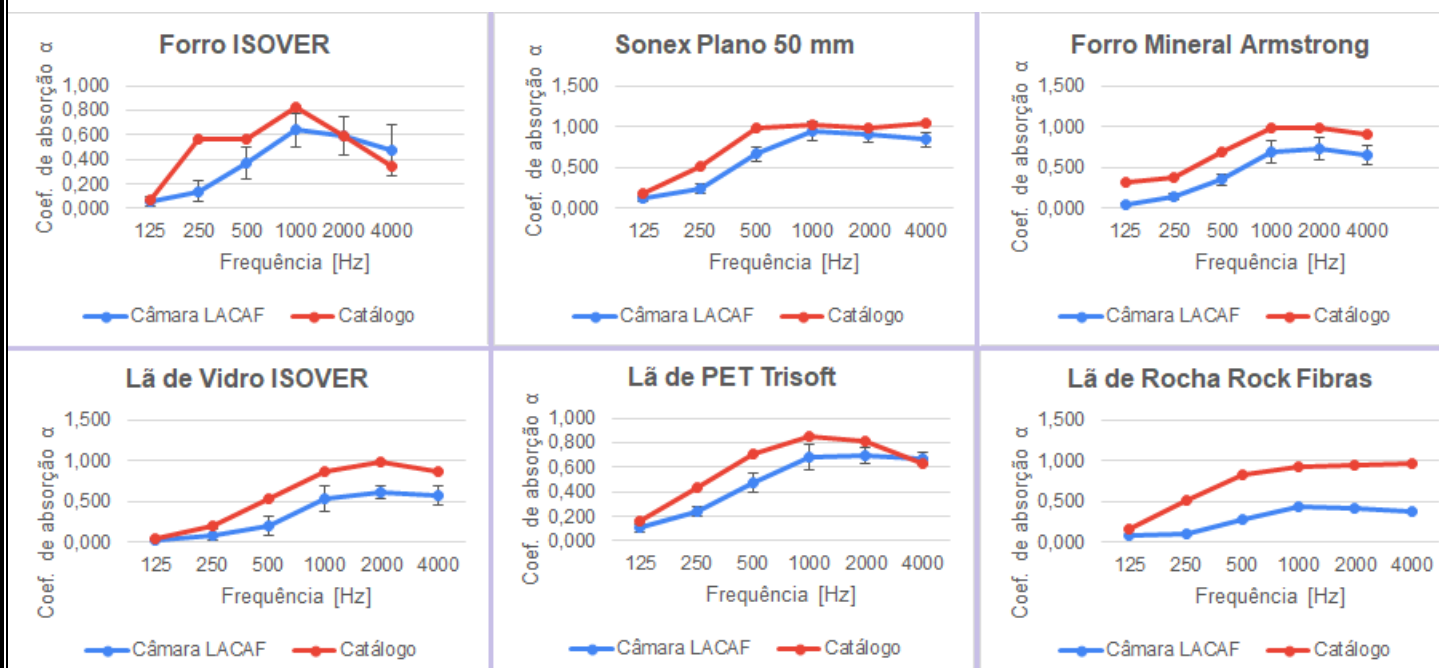


Figura 3: Comparação das curvas de coeficientes de absorção sonora em função da frequência para os materiais ensaiados



Analisou-se, a partir dos gráficos da Figura 3, que as curvas obtidas para os materiais ensaiados apresentam comportamento similar, em função da frequência, comparativa às curvas dos coeficientes de absorção fornecidos pelos fabricantes, com exceção do Forro ISOVER. Porém, os valores médios obtidos no LACAF mostram-se majoritariamente abaixo dos valores de catálogo, tendo suas curvas deslocadas para baixo em comparação às curvas obtidas em laboratórios credenciados.

Para frequências mais altas, o desvio padrão dos valores médios tende a aumentar, apontando maior dispersão entre os resultados dos coeficientes de absorção obtidos em cada ensaio realizado para um mesmo material na câmara do LACAF. Para o Sonex Plano e o Forro ISOVER, em altas frequências (a partir de 1000 Hz), as barras de erro do desvio padrão da média calculada para os coeficientes de absorção atingem as curvas de catálogo, ao contrário das demais amostras que se mantêm abaixo destas.

De acordo com a Equação (1), de Sabine, ao utilizarmos uma área maior da amostra de teste, obtêm-se valores menores para os coeficientes calculados.

$$\alpha_{Sab} = 0,161 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

Equação (1)

- V é o volume da câmara em metros cúbicos;
- S a área da amostra em metros quadrados;
- T e T⁰ são, respectivamente, os tempos de reverberação da câmara medidos com a presença da amostra de teste e sem.

A norma ISO 354 (2003) recomenda para os ensaios, uma área de amostra entre 10 a 12 m², para uma câmara reverberante de volume entre 150 a 200 m³. Nos ensaios realizados na câmara experimental do LACAF, que possui 71,8 m³ de volume total, as amostras de teste utilizadas possuíam em média, 8,5 m². Caso a câmara possua volume diferente do valor recomendado de 200 m³, deve-se multiplicar a área limite recomendada para a amostra pelo fator de escala $(V/200)^{\frac{2}{3}}$. Para a câmara do LACAF, o fator de escala calculado é de 0,51, multiplicado por 10 m², limite inferior do intervalo de áreas exigido pela norma ISO 354 (2003), obteve-se uma área ideal para ensaios equivalente de 5,05 m². Este valor corresponde a apenas 59,43% da área média de amostra utilizada nos ensaios efetuados na câmara em estudo, sendo possível inferir que as amostras dos materiais ensaiados no LACAF possuíam dimensões maiores que as ideais para a câmara em escala reduzida.

Os gráficos de barras apresentados na Figura 4 exibem os resultados obtidos para as diferenças entre os coeficientes médios de cada material obtidos no LACAF e os valores fornecidos pelos fabricantes, em função da frequência.

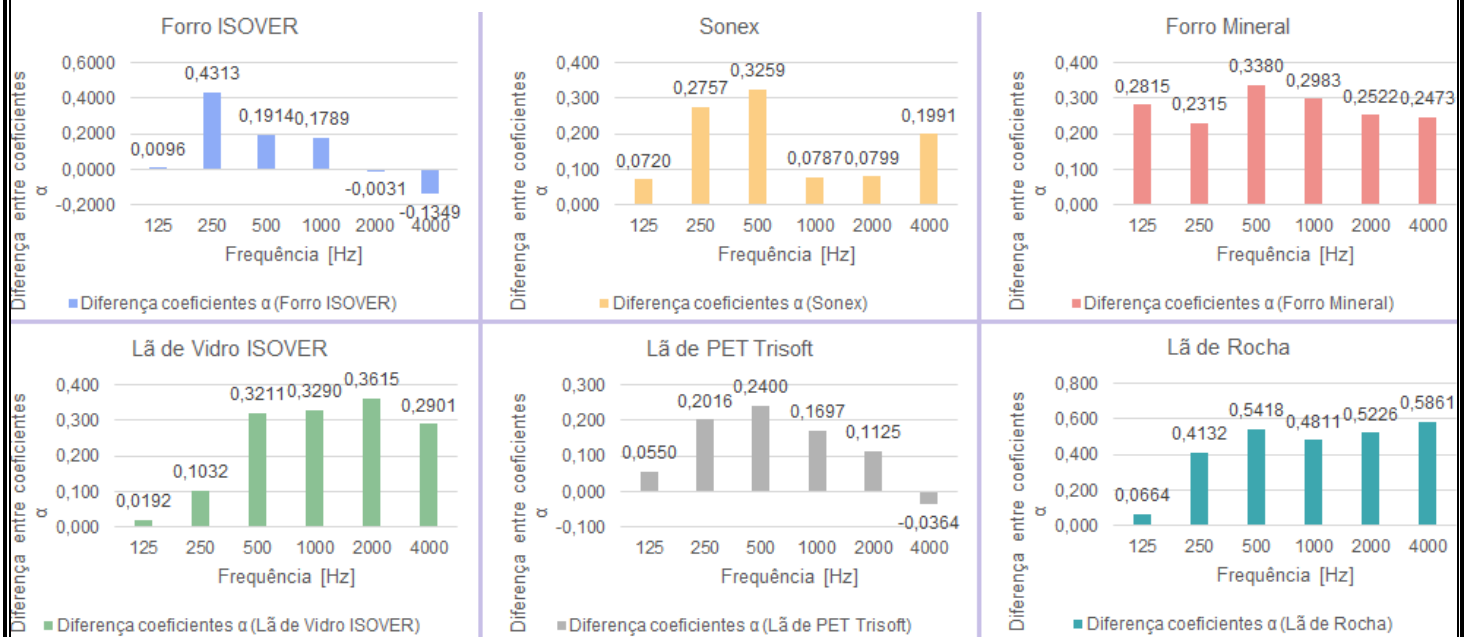


Figura 4: Diferença dos coeficientes em função da frequência para os materiais ensaiados



Analisando os gráficos da Figura 4, percebe-se que não há um fator constante para correção dos coeficientes de absorção obtidos na câmara experimental, sendo para cada material, as diferenças calculadas dos coeficientes em função da frequência divergentes entre si, não possibilitando a utilização de um valor fixo para correção dos dados. Os materiais que apresentam diferenças sutilmente constantes para o intervalo de frequências estudado são somente o Forro Mineral da Armstrong e a Lã de Rocha Rock Fibras, o último com exceção da diferença dos coeficientes obtida para a frequência de 125 Hz, que é visivelmente inferior às demais.

Conclusões

Ao realizar os estudos de compatibilidade, foi constatado que o volume total da câmara estudada é inferior ao recomendado. No entanto, seu formato atende à condição exigida pela norma. Como existem estudos de câmaras reverberantes em escala reduzida, buscou-se informações para usá-la nessa condição.

Na caracterização do campo sonoro no interior da câmara, foi possível adicionar uma área de difusores fixos suficiente para a obtenção de um campo sonoro potencialmente difuso para a câmara reverberante em escala reduzida.

Com os dados coletados a partir dos ensaios de coeficiente de absorção sonora realizados na câmara do LACAF, pôde-se notar que os valores obtidos nesta são, em maior parte, inferiores aos valores dos coeficientes de absorção sonora fornecido no catálogo dos fabricantes, obtendo curvas de coeficiente em função da frequência com comportamento semelhante às curvas fornecidas pelos fabricantes, porém, deslocadas para baixo. Concluiu-se que as áreas das amostras ensaiadas foram incompatíveis com a escala da câmara reverberante do LACAF, sendo maiores que o valor considerado ideal. Sugere-se que sejam realizados novos ensaios, adicionando gradativamente área de material até atingir uma área que forneça valores para os coeficientes de absorção mais compatíveis com os valores obtidos pelos fabricantes em laboratórios credenciados.

Por fim, ao analisar as diferenças entre os coeficientes de absorção médios em função da frequência obtidos na câmara do LACAF e os valores catalogados, foi possível observar que não há um fator de correção constante a ser aplicado nos coeficientes encontrados nos ensaios realizados na câmara experimental, visto que cada material se comporta de maneira muito diferente ao longo do intervalo de frequências analisado.

Apoio e Agradecimentos

Este projeto foi fomentado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, o CNPq. Agradeço, primeiramente, à Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli, pela orientação. À minha família que sempre me incentivou a ir além e ao meu querido amigo, Carlos Puga que me apoiou durante toda a pesquisa. Sem vocês este projeto não teria sido possível, meus mais sinceros agradecimentos.

Referências Bibliográficas

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle de ruído**. 2. ed. rev. São Paulo: Edgard Blucher, 2011. ISBN 9788521205814.

GUEDES, Reginaldo Cascaes. **Projeto e construção de uma câmara reverberante em escala reduzida para a caracterização acústica de materiais absorventes**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2007. Disponível em: http://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/5110/1/Dissertacao_ProjetoConstrucaoCamara.pdf. Acesso em: 23 set. 2020.

ISO 10534-2: *Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 2: Transfer-function method*, 1998.

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

RAMIRES, Fabiana. **Coeficiente de espalhamento sonoro de painéis perfurados**. 2011. 124 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/258539>.