

Avaliação do desempenho acústico da lã de PET e placa de vermiculita no sistema construtivo light steel framing

Evaluation of the acoustic performance of recycled-PET fiber and vermiculite board in the light steel framing construction system

Evaluación del desempeño acústico de lana de PET y placa de vermiculita en el sistema constructivo de estructura light steel framing

Recebido: 21/09/2022 | Revisado: 06/10/2022 | Aceitado: 08/10/2022 | Publicado: 14/10/2022

Janaina Costa Rezende

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4839-8858>

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

E-mail: janacrezende@gmail.com

Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7870-0283>

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

E-mail: mantilla.carrasco@gmail.com

Max de Castro Magalhaes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8692-2414>

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

E-mail: maxcm.professor@gmail.com

Resumo

A busca por construções mais racionalizadas e sustentáveis como o sistema Light Steel Framing (LSF) vem crescendo mundialmente junto à necessidade de um melhor desempenho acústico do sistema, da mesma forma que aumenta a demanda por pesquisas em materiais reciclados ou com baixo impacto ambiental. Assim, o objetivo desta pesquisa é determinar o coeficiente de absorção sonora de um sistema de multicamadas formado por lã de PET e por placas de vermiculita, para ser utilizado no interior das paredes do sistema construtivo LSF, por meio de tubos de impedância acústica, conforme a ASTM E 1050 (2019). Os ensaios foram realizados em amostras de diâmetro de 60 mm de lã de PET e placa de vermiculita de forma individual e em amostras com duas camadas, sendo uma das combinações com a placa de vermiculita na parte mais interna do tubo e a lã de PET logo à frente e a outra forma, invertendo suas posições. Os resultados mostraram que o melhor desempenho da absorção sonora para frequências acima de 1000 Hz foi o sistema com duas camadas, sendo a vermiculita na parte mais interna do tubo e a lã de PET na parte mais externa. O desempenho mais baixo foi a da lã de PET analisada de forma isolada, não apresentou valores superiores a 0,5 em toda a faixa de frequência analisada. Logo, foi possível concluir que a utilização em conjunto da placa de vermiculita com a manta de lã de PET é um sistema absorvedor capaz de otimizar o desempenho acústico do sistema LSF.

Palavras-chave: Construção industrializada; Conforto acústico; Materiais sustentáveis.

Abstract

The search for more rationalized and sustainable constructions such as the Light Steel Framing (LSF) system has been increasing worldwide along with the need for a better acoustic performance of the system, in the same way that the demand for research on recycled materials or materials with low environmental impact increases. Thus, the objective of this research is to determine the sound absorption coefficient of a multilayer system formed by recycled-PET fiber and vermiculite board, to be used inside the walls of the LSF constructive system, through acoustic impedance tubes, according to ASTM E 1050 (2019). The tests were performed on 60 mm diameter samples of recycled-PET fiber and vermiculite board individually and samples with two layers, one of the combinations was with the vermiculite board in the innermost part of the tube and the recycled-PET fiber just ahead and the other way, inverting their positions. The results showed that the best performance for sound absorption for frequencies above 1000 Hz was the two-layer system, with vermiculite in the innermost part of the tube and recycled-PET fiber in the outermost part. The lowest performance was the recycled-PET fiber used in isolation, it did not present values greater than 0,5 in the entire frequency range analyzed. Therefore, it was possible to conclude that the use of the vermiculite board together with the recycled-PET fiber is an absorber system capable of optimizing the acoustic performance of the LSF system.

Keywords: Industrialized construction; Acoustic comfort; Sustainable materials.

Resumen

La búsqueda de construcciones más racionalizadas y sostenibles como el sistema Light Steel Framing (LSF) ha ido creciendo a nivel mundial junto con la necesidad de un mejor rendimiento acústico del sistema, del mismo modo que aumenta la demanda de investigación sobre materiales reciclados o materiales de bajo impacto ambiental. Así, el objetivo de esta investigación es determinar el coeficiente de absorción acústica de un sistema multicapa formado por lana de PET y placas de vermiculita, para ser utilizado en el interior de las paredes del sistema constructivo LSF, a través de tubos de impedancia acústica, según la norma ASTM E 1050 (2019). Los ensayos se realizaron en muestras de 60 mm de diámetro de lana de PET y placa de vermiculita individualmente y en muestras con dos capas, siendo una de las combinaciones con la placa de vermiculita en la parte más interna del tubo y la lana de PET justo delante y la otra manera, invirtiendo sus posiciones. Los resultados mostraron que el mejor comportamiento de absorción acústica para frecuencias superiores a 1000 Hz fue el sistema de dos capas, con vermiculita en la parte más interna del tubo y lana de PET en la parte más externa. El rendimiento más bajo fue de la lana de PET utilizada aisladamente, no presentó valores superiores a 0,5 en todo el rango de frecuencias analizado. Por tanto, fue posible concluir que el uso de la placa de vermiculita junto con la manta de lana de PET es un sistema absorbente capaz de optimizar el rendimiento acústico del sistema LSF.

Palabras clave: Construcción industrializada; Confort acústico; Materiales sostenible.

1. Introdução

O Light Steel Framing (LSF) é um sistema construtivo composto por perfis de aço galvanizado formados a frio, introduzido no Brasil no final da década de 1990, sua concepção é feita de forma racional, permitindo uma construção a seco, com poucos resíduos de obra e maior rapidez durante sua execução. O LSF pode ser dividido em três subsistemas, formados por perfis estruturais de aço formados a frio; por painéis de fechamento, como as placas de gesso acartonado, placas de OSB e/ou placas cimentícias; e por materiais de absorção termoacústica, como as lãs minerais, inseridas dentro das paredes e lajes. Apesar da crescente demanda, a difusão do conhecimento técnico sobre o sistema LSF ainda é pouco sólida e a execução inadequada do sistema pode causar um baixo desempenho acústico na edificação e comprometer o conforto do usuário. Esse fato está diretamente relacionado a função do isolamento acústico, impedindo que os ruídos externos entrem no ambiente (Gomes et al., 2013; Santos, 2017; Terrados-Cepeda & Lizana, 2020; Wang *et al.*, 2020).

O isolamento acústico do LSF é feito por meio da combinação de placas de revestimento afastadas entre si, utilizando materiais com alta absorção sonora, como as lãs minerais, no afastamento entre as placas de fechamento, conforme mostra a Figura 1 (Crasto et al., 2012; Rukavina *et al.*, 2020). O LSF também pode ser executado com paredes de camadas duplas, com combinação de diferentes materiais absorventes e espessuras, e deve ser feito conforme a necessidade dos ocupantes e do local (Venkatesan & Ganesan, 2021).

Figura 1 - Componentes utilizados em uma parede típica em LSF.



Fonte: Adaptado de Santos (2017).

De acordo com Way e Couchman (2008), o isolamento acústico é controlado por três características: a massa, o isolamento e a selagem. A lei da massa sugere que o isolamento acústico de um elemento sólido aumentará em aproximadamente 5 dB se houver duplicação de massa; o isolamento entre as camadas de parede é otimizado com a presença de ar, assim como ocorre nas paredes do sistema LSF. Além disso, a presença de um material absorvente entre as camadas de fechamento em associação com outros componentes do sistema também contribui para o isolamento, pois utilizá-los no interior das paredes de LSF favorece a redução das ressonâncias acústicas; e por último, a selagem em torno dos pisos e paredes, para que haja a vedação completa do sistema, principalmente nas juntas entre paredes e, entre teto e paredes. Normalmente são utilizados selantes acústicos para esse fim ou lãs minerais.

Dentre os materiais frequentemente usados como materiais absorventes acústicos no Brasil, estão a lã de vidro e a lã de rocha. Essas lãs minerais são conhecidas por serem fibrosas e, dessa forma, a energia acústica incide entre as fibras do material, vibra junto com o ar, transformando-se em energia térmica pelo atrito causado entre as fibras que compõem o material (Magalhães, 2013). De acordo com Roque, Santos e Pereira (2019), a adição de uma pequena quantidade de material absorvente no interior das paredes, como 25 mm de lã de rocha, é capaz de aumentar o isolamento sonoro aéreo do sistema em até 4 dB. Conforme a Associação Brasileira para a Qualidade Acústica - ProAcústica (2019), para caracterizar os materiais absorventes é medido seu coeficiente de absorção sonora, que varia entre 0 e 1, quanto mais esse valor se aproxima de 1, melhor é sua capacidade de absorção sonora.

Na última década, a lã de PET (politereftalato de etileno) (Figura 2) também começou a ser utilizada no sistema LSF. Devido a preocupação com a produção de resíduos sólidos no ambiente, o recipiente de PET tem sido cada vez mais utilizado em processos de reciclagem em todo o mundo. Em 2019, o Brasil reciclou 55% dos resíduos de PET produzidos no país, o que representou 311 mil toneladas do material, 12% acima da quantidade reciclada de PET em 2018, gerando 3,6 bilhões de faturamento (ABIPET, 2019). A lã de PET é desenvolvida a partir da reciclagem de garrafas plásticas e também, assim como as lãs minerais, pode ser utilizada como um absorvedor acústico no sistema LSF, na forma de lã. Por apresentar uma característica fibrosa, a lã de PET atende às demandas de condicionamento acústico. A absorção sonora da lã de PET apresentou valores típicos de materiais fibrosos, com maior absorção nas bandas de médias (1250 Hz) e em altas frequências (2500 Hz e 3150 Hz) de acordo com a pesquisa realizada por Klippel Filho *et al.* (2017). Del Rey *et al.* (2011) compararam os valores do coeficiente de absorção sonora da lã de PET reciclável e de lãs feitas com fibras de poliéster virgem em câmaras de reverberação sonora e em incidência normal, o resultado mostrou-se favorável ao uso do material reciclável.

Figura 2 – Manta de lã de PET.



Fonte: SULMÓDULOS (2020).

Outro material com potencial de absorção acústica, mas pouco explorado no sistema LSF, é a vermiculita, um mineral

industrial composto por ferro, magnésio, potássio e alumínio. O mineral apresenta estrutura lamelar e características físicas iguais à mica, ela se expande quando é aquecida, aumentando o seu volume em até 30 vezes em relação ao seu tamanho original. Dessa forma, o mineral denso é transformado em partículas porosas e leves. Em sua forma expandida apresenta baixa densidade, facilidade de manuseio e alta capacidade de absorção termoacústica (França *et al.*, 2016) e conforme Shmuradko *et al.*, 2012, apresentou coeficiente de absorção entre 0,7 e 0,8 na frequência de 1000 Hz. Como agregado de vermiculita em amostras de concreto, por meio de ensaios em tubo de impedância, apresentou um coeficiente de absorção no valor de 0,9, na faixa de frequência entre 1000 Hz e 1400 Hz, na pesquisa feita por Carbajo *et al.* (2015). Os resultados mostraram um resultado relativamente alto com a inclusão de vermiculita na amostra. As placas desse mineral (Figura 3) são fabricadas com vermiculita expandida e ligantes inorgânicos prensados e podem ser utilizadas sob temperaturas contínuas de até 800°C, frequentemente são usadas como miolos de portas e divisórias corta-fogo em edifícios residenciais e industriais. As placas apresentam uma porosidade total no valor de 84% e densidade de 2650 Kg/m³ (CALDESUL, 2022).

Figura 3 – Placa de vermiculita



Fonte: CALDESUL (2022).

O efeito da poluição sonora na saúde humana vem crescendo e evidências epidemiológicas indicam que pessoas expostas continuamente a altos níveis de ruído ambiental têm um risco aumentado para desenvolver doenças cardiovasculares, comprometimento cognitivo, distúrbios do sono e zumbido. Esses ruídos são originados principalmente de estradas, ferrovias, aeroportos e instalações industriais (World Health Organization, 2018). Devido a importância do desempenho acústico nas edificações, o objetivo desta pesquisa é determinar o coeficiente de absorção sonora de um sistema de multicamadas formado por lã de PET e por placas de vermiculita para ser utilizado no sistema construtivo LSF. Os materiais absorventes contribuem com o isolamento acústico, diminuindo as ressonâncias acústicas no interior das paredes em LSF.

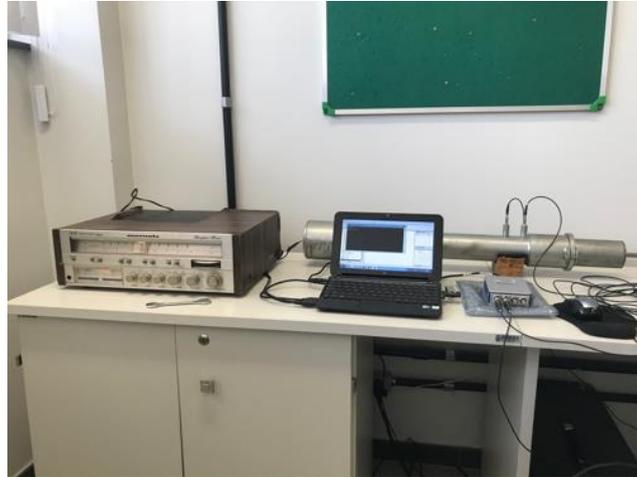
2. Materiais e Métodos

2.1 Materiais

Os ensaios foram realizados na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), utilizando um tubo de impedância de diâmetro de 60 mm e comprimento de 57 cm, com dois microfones da marca BSWA. O amplificador utilizado foi o *Marantz SR 6000 Stereophonic Receiver* e o sistema de aquisição de dados da marca *National Instruments* modelo NI 9234 (Figura 4). O modelo computacional utilizado para a digitalização dos resultados adquiridos durante os ensaios foi desenvolvido por Magalhães (2013), utilizando o *software* MATLAB. O sinal de banda larga constante em todas as frequências

do espectro, utilizado durante os ensaios, foi o ruído branco, tipicamente usado para obter a função de transferência de sistemas (Bistafa, 2011).

Figura 4 - Configuração do ensaio no tubo de impedância.



Fonte: Autores (2022).

Para a realização dos ensaios de caracterização termoacústica da lã de PET e da placa de vermiculita, foram utilizadas mantas de lã de PET doadas pela empresa TRISOFT com densidade de 7 Kg/m^3 e espessura de 30 mm, o rolo da manta apresentou largura de 1200 mm e 10 m comprimento. A placa de vermiculita foi adquirida pela empresa CALDESUL com densidade de 360 Kg/m^3 , espessura de 24 mm e dimensões de 300 mm por 600 mm. No ensaio de caracterização acústica, a lã de PET e a placa de vermiculita foram cortadas em seis amostras de diâmetro de 60 mm, de acordo com o tamanho do tubo de ensaio, como mostra a Figura 5 e a Figura 6.

Figura 5 - Amostras da lã de PET.



Fonte: Autores (2022).

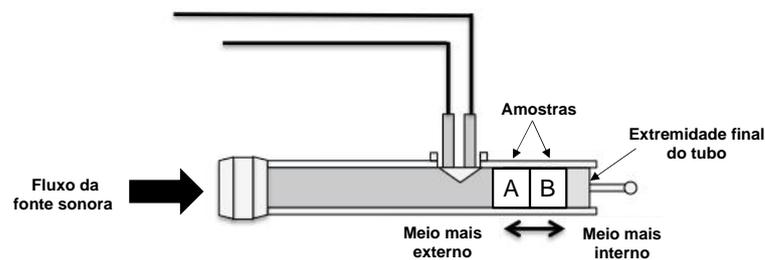
Figura 6 - Amostras da placa de vermiculita.



Fonte: Autores (2022).

Nos ensaios realizados com multicamadas, com a amostra de lã de PET e a placa de vermiculita juntas, as amostras de mesmo número foram ensaiadas sempre em conjunto. As duas amostras foram inseridas no fundo tubo de impedância e configuradas de duas maneiras diferentes, a primeira com a placa de vermiculita na parte mais interna do tubo e a lã de PET logo à frente e a outra forma, invertendo suas posições, colocando a lã de PET na parte mais interna e a placa de vermiculita em seguida, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 - Disposição dos materiais no tubo de impedância



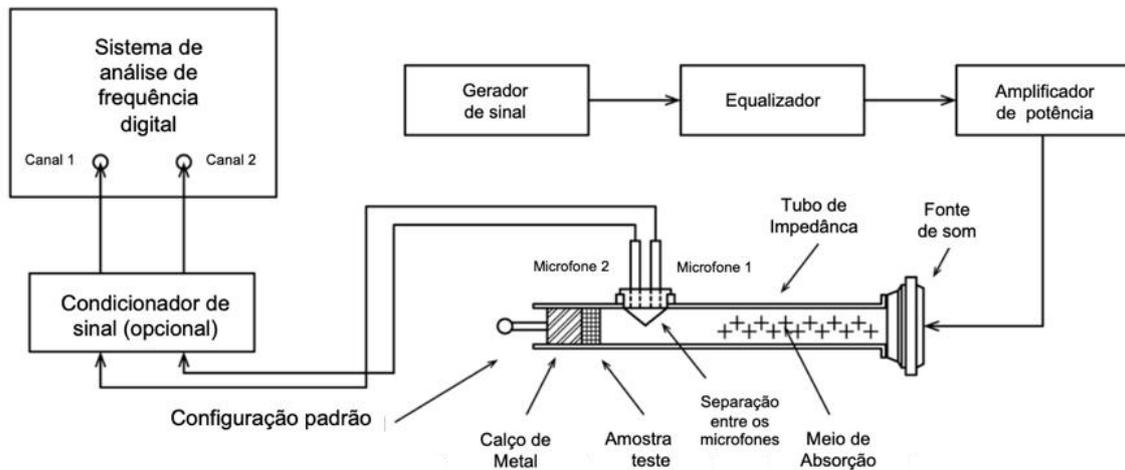
Fonte: Adaptado de Gomes (2015).

2.2 Métodos

Os ensaios de absorção acústica na lã de PET e em placas de vermiculita para a medição do coeficiente de absorção sonora por meio de um tubo de impedância foram realizados conforme ASTM E 1050 (2019). O ensaio em câmara reverberante não foi avaliado como o método mais adequado nesta pesquisa, pois o tubo de impedância permite maior quantidade de ensaios em menores quantidades de materiais. Em contrapartida, o método de câmara reverberante necessita de grandes laboratórios e não é economicamente viável. Os dois métodos são descritos por normas internacionais. No tubo de impedância o coeficiente de absorção é medido por meio de ondas sonoras de incidência normal e na câmara de reverberação o ensaio é feito por meio de incidência sonora difusa (Salvo *et al.*, 2005).

Além do tubo de impedância, neste ensaio recomenda-se utilizar dois microfones, um sistema de análise de frequência digital para a determinação de coeficientes de absorção de som de incidência normal do material. O tubo apresenta de um lado, um alto falante e, no outro lado, o material a ser analisado junto a uma tampa com isolamento acústico (ASTM E 1050, 2019), conforme a Figura 8.

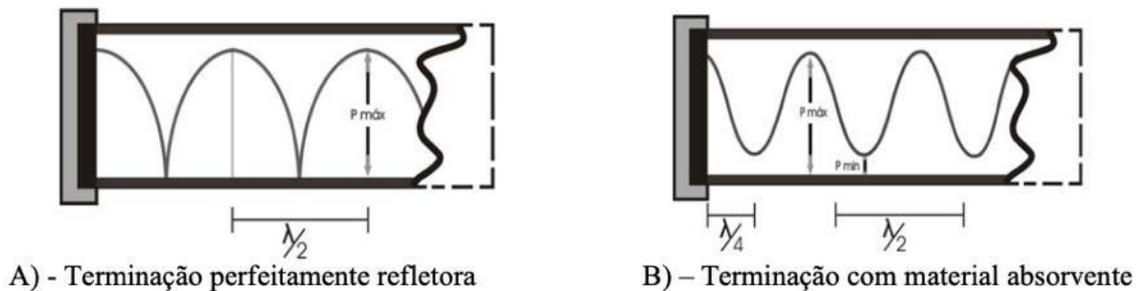
Figura 8 - Aparelho e instrumentação do ensaio no tubo de impedância.



Fonte: Adaptado de ASTM E 1050 (2019).

Segundo Gerges (2000), quando a amostra analisada é colocada no fundo do tubo e o som é emitido, haverá uma variação entre as ondas incidentes e refletidas, devido à impedância acústica do material. Dessa forma, ocorrerá uma onda estacionária, quando uma onda incidente encontra com uma onda refletora, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Representação esquemática das sonoras em um tubo de impedância.



Fonte: Oliveira e Teodoro (2005).

De acordo com a norma ASTM E 1050 (2019), o tubo de impedância deve ser suficientemente longo para que as ondas planas sejam totalmente desenvolvidas antes de atingir os microfones e o corpo de prova, as ondas planas são geradas por meio de um sinal de banda larga constante. Além disso, a seção do tubo pode ser circular ou retangular com dimensão constante de ponta a ponta, a superfície interna deve ser lisa e apresentar uma estrutura maciça, para que não haja perdas significativas durante a transmissão sonora. As amostras devem ter a mesma forma e área que a seção transversal do tubo e serem posicionadas na parte traseira e perpendicularmente ao eixo do tubo. A norma recomenda que haja ao menos duas amostras para cada ensaio sob as mesmas condições de montagem.

A faixa de frequência de operação utilizada no ensaio é dada pela Equação 1, onde f_l é o limite mínimo da frequência e f_u é o limite máximo da frequência. O f_l depende do espaçamento dos microfones e recomenda-se que essa distância exceda 1% do comprimento de onda correspondente à frequência de interesse mais baixa (ASTM E 1050, 2019).

$$f_l < f < f_u \quad (1)$$

Enquanto f_u e o comprimento de onda dependem do diâmetro do tubo de impedância e da velocidade de propagação do som, e é dado pela Equação 2:

$$f_u < K c/d \quad (2)$$

onde K é igual a 0,586, c é a velocidade do som no tubo em m/s^2 e d é o diâmetro do tubo em m . A faixa de frequência utilizada nesta pesquisa, calculada conforme a norma ASTM E 1050 (2019), ficou entre 500 Hz e 3000 HZ.

A fonte sonora deve apresentar uma potência uniforme na faixa de frequência de interesse e deve ser isolada do tubo para diminuir a excitação sonora transmitida pela estrutura do tubo de impedância. Os microfones devem ser idênticos e apresentar o diâmetro inferior a 20% do comprimento de onda em relação a frequência máxima de interesse. Além disso, o espaçamento máximo deve ser de acordo com a Equação 3, onde c é a velocidade do som e f_u é o limite máximo da frequência (ASTM E 1050, 2019).

$$80 \% (c/2f_u) \quad (3)$$

Para a realização do cálculo do coeficiente de absorção sonora e da impedância acústica é necessário encontrar o valor da velocidade do som e da densidade do ar por meio das seguintes Equações (4 e 5):

$$c = 20,047\sqrt{273,15 + T} \quad (4)$$

$$c = 1,290 \left(\frac{P}{101,325} \right) \left(\frac{273,15}{273,15 + T} \right) \quad (5)$$

onde c é a velocidade do som em m/s ; T é a temperatura do ambiente em $^{\circ}C$; ρ é a densidade do ar em g/cm^3 e; P a pressão atmosférica em KPa .

O cálculo para a função de transferências (H) dos sinais dos microfones, para aferir valores de pressão acústica, é dado pela Equação 6. Os microfones recebem a informação gerada pela fonte sonora e um sistema de análise de frequência digital é responsável por converter o sinal recebido na curva de absorção sonora em função da frequência. A função de transferência é dada pela razão entre a pressão acústica no microfone 1 e no microfone 2 (Masini & Teodoro, 2011).

$$H_{12}(\omega) = \left(\frac{P_1(\omega)}{P_2(\omega)} \right) = \frac{[Ae^{-iKz_1} + Be^{iKz_1}]}{[Ae^{-iKz_2} + Be^{iKz_2}]} \quad (6)$$

onde, A e B as amplitudes das ondas incidente e refletida respectivamente em m , K é o número de onda, c é a velocidade de propagação do som no ar em m/s^2 e Z_1 e Z_2 as distâncias entre a amostra e a posição do microfone mais afastado e do microfone mais próximo, respectivamente, em m .

Por meio da função de transferência, é encontrado o coeficiente de reflexão complexo (R) dado pela Equação 7, sendo s o espaçamento entre os microfones.

$$R = \left(\frac{H_{12}(\omega) - e^{-iKs}}{e^{iKs} - H_{12}(\omega)} \right) e^{2iKZ_1} \quad (7)$$

Dessa forma, é possível encontrar o coeficiente absorção, conforme a Equação 8 (ASTM, 2019; GOMES, 2015):

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (8)$$

A partir dos resultados encontrados foram calculadas as médias aritméticas entre as seis amostras de cada conjunto de ensaio, no entanto a norma sugere que sejam realizados ensaios em apenas duas amostras e então, foram calculados os valores de variância, desvio padrão e coeficiente de variação (Equações 9, 10 e 11). Por fim, foi encontrado o erro padrão (Equação 12) e o intervalo de confiança de 95% das amostras realizadas (limite inferior e superior) (Equação 13).

$$Var = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)} \quad (9)$$

$$Dp = \sqrt{Var} \quad (10)$$

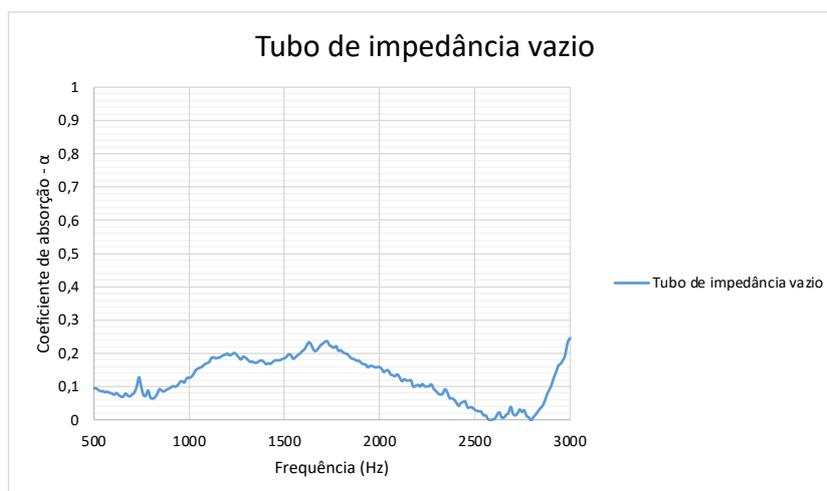
$$Cv = \frac{Dp}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (11)$$

$$SE = \frac{Dp}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

$$E = \bar{x} \pm 1,96 (SE) \quad (13)$$

Ademais, antes de iniciar os ensaios com as amostras, realizou-se a caracterização do tubo de impedância vazio, no qual é feito um ensaio com nenhum material absorvente. Dessa forma, o tubo apresentou valores de coeficiente de absorção abaixo de 0,25, para a faixa de frequência utilizada na pesquisa, entre 500 Hz e 3000 Hz (Figura 10).

Figura 10 – Gráfico de coeficiente de absorção sonora no tubo de impedância vazio.

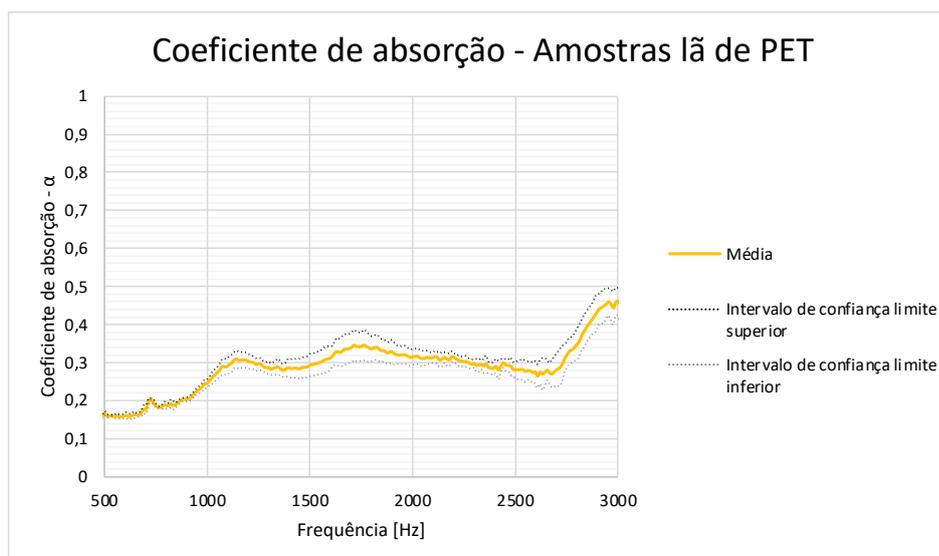


Fonte: Autores (2022).

3. Resultados e Discussões

Para cada material ou conjunto de materiais ensaiados foram feitos os gráficos de frequência versus coeficiente de absorção, no qual se encontra o resultado da média das seis amostras do coeficiente de absorção do material ou do conjunto ensaiado junto ao seu intervalo de confiança (limite inferior e superior). O valor máximo encontrado para o coeficiente de absorção sonora médio da lã de PET foi de 0,46 na frequência de 3000 Hz, o segundo pico médio de absorção máxima foi de 0,35 para a frequência de 1760 Hz. Para as frequências mais baixas analisadas, entre 500 Hz e 1000 Hz, o coeficiente de absorção máximo foi de 0,25. A média dos resultados mostrou um estreito intervalo de confiança, com amplitudes baixas, menores que 0,09 (Figura 11).

Figura 11 - Intervalo de confiança de 95% para a média das curvas de absorção acústica das amostras de lã de PET.

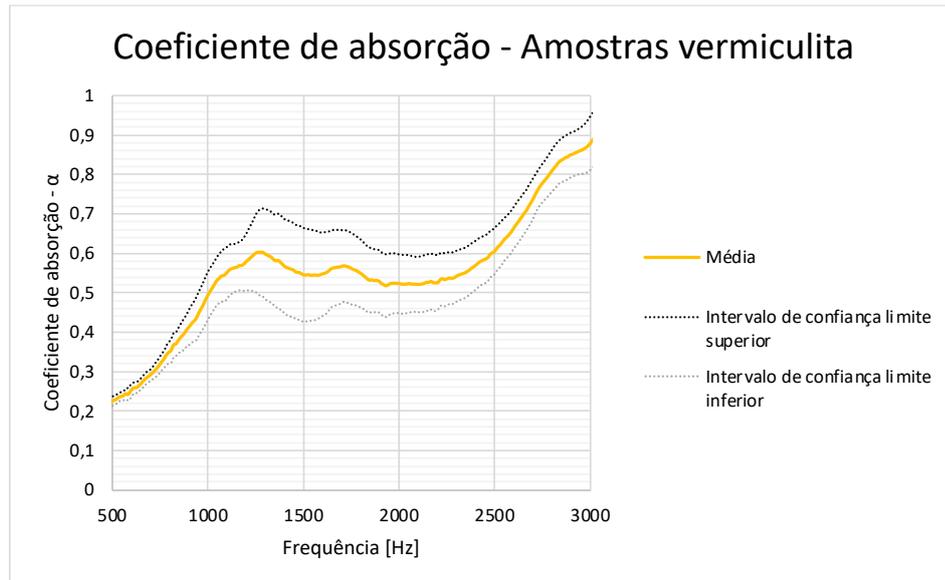


Fonte: Autores (2022).

Nos ensaios realizados com a placa de vermiculita, os valores médios de coeficiente de absorção sonora foram maiores que a lã de PET para todas as frequências analisadas. O valor máximo da curva média foi de 0,87 para a frequência de 3000 Hz e o segundo pico de absorção sonora médio foi de 0,6 durante a frequência de 1280 Hz. Nas frequências entre 500 Hz e 1000 Hz

o coeficiente de absorção máximo foi de 0,49. Como houve diferenças entre os picos nas curvas das amostras, principalmente entre as frequências correspondentes a 1000 Hz e 2000 Hz, a diferença entre o intervalo de confiança superior e inferior dos ensaios da placa de vermiculita apresentou uma maior amplitude neste intervalo em relação a outras faixas de frequência (Figura 12).

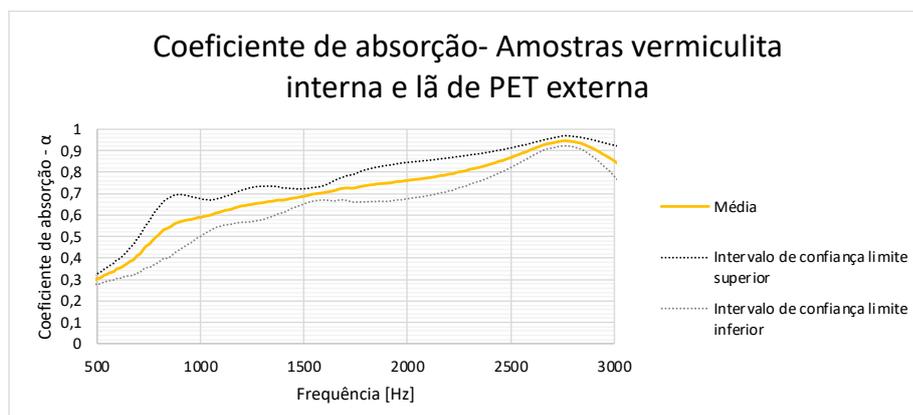
Figura 12 - Intervalo de confiança de 95% para a média das curvas de absorção acústica das amostras de vermiculita



Fonte: Autores (2022).

Para os ensaios realizados em amostras com duas camadas, a placa de vermiculita na parte mais interna do tubo e a lã de PET na parte mais externa, os resultados apresentaram valores médios superiores em relação às amostras de camadas únicas em todas as faixas de frequência. O coeficiente de absorção sonora máximo foi de 0,91 na frequência de 2700 Hz. Entre as frequências de 500 Hz e 1000 Hz, o valor máximo do coeficiente de absorção sonora foi de 0,59. A curva média apresentou apenas uma pequena queda na absorção sonora a partir da frequência de 2800 Hz. Os resultados dos ensaios apresentaram valores mais variados entre 700 Hz e 1000 Hz e, valores mais próximos para as outras faixas de frequência, conforme mostra a Figura 13.

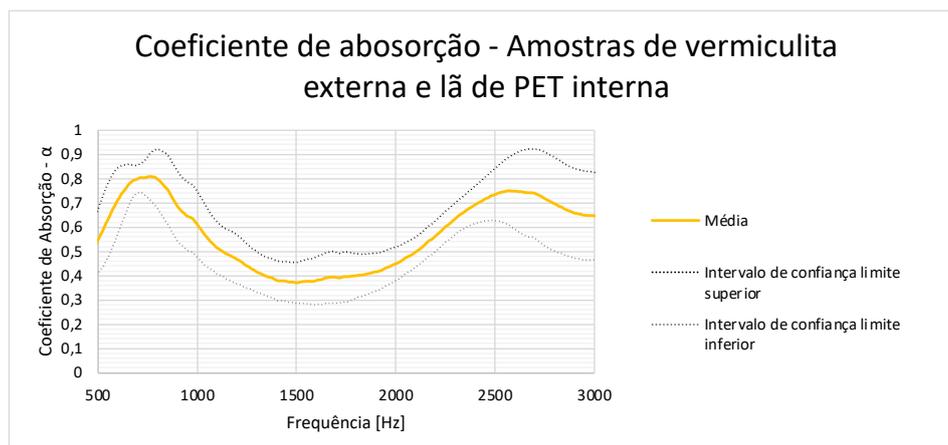
Figura 13 - Intervalo de confiança de 95% para a média das curvas de absorção acústica das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita interna e lã de PET externa.



Fonte: Autores (2022).

Outro ensaio realizado em amostras com duas camadas foi feito com a lã de PET na parte mais interna do tubo e a placa de vermiculita na parte mais externa, ou seja, a posição dos materiais foi invertida em relação ao outro ensaio realizado com duas camadas de materiais. O resultado mostrou um pico para o coeficiente de absorção sonora médio em frequências menores que 1000 Hz e outro pico para frequências maiores que 2000 Hz. Entre as frequências de 1000 Hz e 2000 Hz, ocorreu uma queda na absorção sonora. O pico máximo ocorreu na frequência de 750 Hz e apresentou o valor de 0,81 para o coeficiente de absorção sonora. O segundo pico máximo foi na frequência de 2500 Hz e atingiu um valor de 0,75. Neste ensaio, os valores do coeficiente de absorção sonora foram mais variados a partir de 2500 Hz, como mostra a Figura 14. A impedância característica de um material está em função de sua densidade e do módulo de Bulk. A configuração de um material multicamadas, ou seja, a posição relativa de uma camada em relação à outra e à onda sonora incidente tem influência direta no coeficiente de absorção sonora. Em geral, a absorção sonora está principalmente relacionada à dissipação viscosa que depende da velocidade do ar nos poros de uma determinada camada de material (GERGES & BALVEDI, 1999). Os picos da Figura 14 correspondem às ressonâncias (em torno de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda) do esqueleto do material poroso (e/ou fibroso) e do fluido (ar) dentro dos poros. Alternativamente, pode-se dizer que a posicionamento dos picos depende da espessura e da disposição de cada camada.

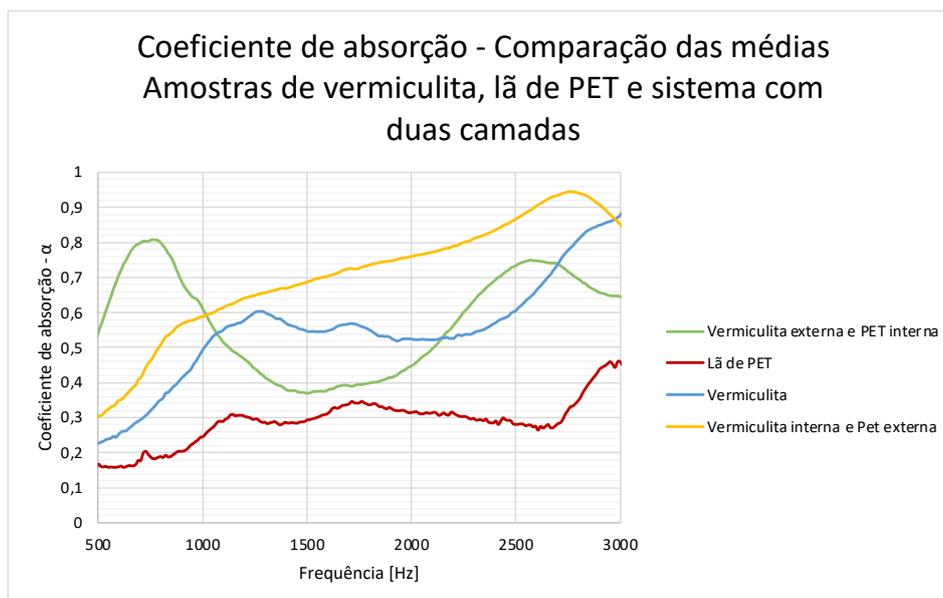
Figura 14 - Intervalo de confiança de 95% para a média das curvas de absorção acústica das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita externa e lã de PET interna.



Fonte: Autores (2022).

Por meio da Figura 15 é possível perceber que o melhor desempenho para absorção sonora para frequências acima de 1000 Hz foi o sistema com duas camadas, sendo a vermiculita na parte mais interna do tubo e a lã de PET na parte mais externa. A lã de PET utilizada de forma isolada apresentou o pior desempenho médio, não apresentou valores superiores a 0,5. Para o sistema de duas camadas, sendo a placa de vermiculita na parte mais externa e a lã de PET colocada logo atrás, os resultados mostraram valores superiores para frequências menores que 1000 Hz, em relação aos outros sistemas. Nos ensaios realizados nas amostras da placa de vermiculita de forma isolada, entre as frequências de 1200 Hz e 2000 Hz e acima de 2700 Hz, a absorção sonora apresentou o segundo melhor desempenho. Quando a placa de vermiculita foi posicionada de forma mais externa e a lã de PET de forma mais interna, no sistema de duas camadas, ocorreu uma piora na absorção sonora entre 1200 Hz e 2000 Hz, em relação a placa de vermiculita utilizada de forma isolada, indicando que a melhor forma para o posicionamento desse sistema em uma parede seria a placa de vermiculita no interior e a lã de PET logo à frente.

Figura 15 - Comparação das curvas médias de absorção sonora para os ensaios realizados.



Fonte: Autores (2022).

Os resultados mostrados nesta pesquisa corroboraram com os valores da pesquisa de Del Rey *et al.* (2011) em que foi apresentado o coeficiente de absorção sonora, em incidência normal, valores acima de 0,4 para a manta de lã de PET em frequências acima de 2500 Hz, para espessuras entre 20 mm e 40 mm, bem como a pesquisa de Klippel Filho *et al.* (2017), em que a manta de lã de PET apresentou maior absorção sonora nas bandas de médias e altas frequência, para espessuras entre 50 mm e 100 mm. Não foram encontrados dados acerca do comportamento de absorção acústica de placas de vermiculita, em sua forma expandida apresentou o coeficiente de absorção entre 0,7 e 0,8 na frequência de 1000 Hz (SHMURADKO *et al.*, 2012). De acordo com Silva (2018), em sua pesquisa as mantas de lã de rocha e lã de vidro, materiais tipicamente utilizados no sistema LSF, apresentaram valores acima de 0,87 para frequências acima de 1000 Hz, para espessuras em torno de 50 mm.

4. Conclusões

A crescente busca por edificações em LSF com melhor desempenho acústico e materiais mais sustentáveis é uma preocupação da indústria da construção civil. Dessa forma, esta pesquisa avaliou a utilização de materiais recicláveis e com baixo impacto ambiental para serem utilizados em paredes de edificações em LSF como absorvedores acústicos. Como relatado nos ensaios de absorção acústica no tubo de impedância, a utilização em conjunto da placa de vermiculita com a manta de lã de PET mostrou-se adequada para ser utilizada como absorvedor acústico no sistema LSF, bem como a placa de vermiculita utilizada de forma isolada. A lã de PET sobreposta a placa de vermiculita apresentou a melhor sequência para a absorção sonora para a maior parte da faixa de frequência analisada. Assim, é possível a utilização desse conjunto em paredes de LSF para a otimização do desempenho acústico do sistema, contribuindo então com o conforto do usuário e com a sustentabilidade do sistema. Recomenda-se ainda a avaliação experimental do material multicamadas em paredes do sistema.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, e a doação da manta de lã de PET feito pela empresa TRISOFT.

Referências

- Associação Brasileira da Indústria do PET – ABIPET. *Censo da reciclagem do PET no Brasil, 2019*. (2020). <http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>
- Associação Brasileira para a Qualidade Acústica - PROACÚSTICA. (2019). *Manual ProAcústica de acústica básica*.
- ASTM (2019). *ASTM E1050-19: Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system*.
- Bistafa, S. R. (2011). *Acústica Aplicada ao Controle de Ruído*. (2. ed.). São Paulo: Edgar Blücher.
- CALDESUL. (2022). *Placas de vermiculita*. <https://loja.caldesul.com.br/produtos/placas-de-vermiculita/>
- Carbajo, J., Esquerdo-Lloret, T. V., Ramis, J., Nadal-Gisbert, A. V., & Denia, F. D. (2015). Acoustic properties of porous concrete made from arlite and vermiculite lightweight aggregates. *Materiales de Construcción*, 65(320), e072. <https://doi.org/10.3989/mc.2015.01115>.
- Crasto, R. C. M., Freitas, A. M. S., & Santiago, A.K. (2012). *Steel Framing: Arquitetura*. (2. ed.). Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia - Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA).
- Del Rey, R., Alba, J., Ramis, J., & Sanchís, V. J. (2011). Nuevos materiales absorbentes acústicos obtenidos a partir de restos de botellas de plástico. *Materiales de Construcción*, 61, 547-558.
- França, S. C. A., Braga, P. F. A., Couto, H. J. B & Gonçalves, C. C. (2016). Vermiculita, mais que um mineral termo acústico. In: *Anais V Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste*. João Pessoa, Brasil.
- Gerges, S. N. Y. (2000). *Ruído: Fundamentos e controle*. (2. ed.). Florianópolis.
- Gerges, S. N.Y., & Balvedi, A. M. (1999). Numerical simulation and experimental tests of multilayer systems with porous materials. *Applied Acoustics*, 58 (4), 403-418.
- Gomes, A. P., Souza, H. A. de, & Tribess, A. (2013). Impact of thermal bridging on the performance of buildings using light steel framing in Brazil. *Applied Thermal Engineering*, 84-89. [10.1016/j.applthermaleng.2012.11.015](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.11.015).
- Gomes, C. V. S. (2015). *Comportamento acústico de materiais absorvedores em multicamadas*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Klippel Filho, S., Labres, H. S., Pacheco, F., Christ, R., Pires, J. R., Heissler, R. F., & Oliveira, M. F. (2017). Uso da lã de PET para a absorção sonora e o isolamento acústico. *Acústica e Vibrações*, 49, 59–69.
- Magalhães, M. D. C. (2013). *Fundamentos de acústica estrutural*. São Paulo: All Print.
- Masini, H. F., & Teodoro, E. B. (2011). Medição automática do coeficiente de absorção acústica de materiais. *Horizonte Científico*, 5(2).
- Oliveira, E. C., & Teodoro, E. B. (2005). Método para medição do coeficiente de absorção sonora. In: *Anais 15º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU*. Uberlândia, Brasil.
- Roque, E., Santos, P. & Pereira, A. (2019). Thermal and sound insulation of lightweight steel framed façade walls. *Science and Technology for the Built Environment*. 25. 156-176.
- Rukavina, M., Skejic, D., Kralj, A., Ščapec, T., & Milovanović, B. (2022). Development of lightweight steel framed construction systems for nearly-zero energy buildings. *Buildings*. 12. 929. [10.3390/buildings12070929](https://doi.org/10.3390/buildings12070929).
- Santos, P. (2017). Energy efficiency of lightweight steel-Framed buildings. In (Ed.), *Energy Efficient Buildings*. IntechOpen.
- Salvo, R. V, Mairink, M. T. F. Oliveira, E. C., & Teodoro, E. B. (2005). Construção De Um Tubo De Impedância. In: *Anais 15o Posmec – Simpósio Do Programa De Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFU*. Uberlândia, Brasil.
- Shmuradko, V. T., Panteleenko, F. I., Reut, O. P., Panteleenko, E. F., & Kirshina, N. V. (2012). Composition, structure, and property formation of heat insulation fire- and heat-reflecting materials based on vermiculite for industrial power generation. *Refractories and Industrial Ceramics*, 53(4), 254+.
- Silva, D. (2018). Fibras naturais como isolamento Acústico. *Revista de Ciências Exatas e Tecnologia*, 12 (12), 41-44.
- SULMÓDULOS. (2021). Conheça os tipos de lãs mais eficientes para isolamento acústico em construções. <https://www.sulmodulos.com.br/conheca-tipos-las-eficientes-isolamento-acustico-construcoes/>
- Terrados-Cepeda, F. & Lizana, J. (2020). Advanced lightweight steel floor towards high sound insulation and fire resistance. *Journal of Constructional Steel Research*. 169. 106023.
- Venkatesan, V. & Ganesan, R. (2021). A General Study of Light Gauge Steel Building – Case Study. *Journal of Physics: Conference Series*. 1964.
- Wang, W., Wang, J., Zhao, P., Ja, L. & Pan, G. (2020). Axial compressive experiments and structural behaviour estimation of CFS composite walls sprayed with LPM. *Journal of Building Engineering*. 30.
- Way, A. G. J. & Couchman G. H. (2008). *Acoustic detailing for steel construction*. SCI Publication 372. Ascot, Steel Construction Institute.
- World Health Organization. Regional Office for Europe. (2018). *Environmental noise guidelines for the European Region*. World Health Organization. Regional Office for Europe.