

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO E
PATRIMÔNIO SUSTENTÁVEL

Janaina Costa Rezende

**Avaliação do desempenho térmico e acústico em paredes do sistema
light steel framing compostas por manta de lã de PET e placa de
vermiculita**

Belo Horizonte
2023

Janaina Costa Rezende

Avaliação do desempenho térmico e acústico em paredes do sistema *light steel framing* compostas por manta de lã de PET e placa de vermiculita

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, do Programa de pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais.

Linha de Pesquisa: Tecnologia do Ambiente Construído

Orientador: Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

Coorientador: Prof. Dr. Max de Castro Magalhães

Belo Horizonte

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

R467a

Rezende, Janaína Costa.

Avaliação do desempenho térmico e acústico em paredes do sistema light steel framing compostas por manta de lã de PET e placa de vermiculita [manuscrito] / Janaina Costa Rezende. - 2023.

227 p. : il.

Orientador: Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco.

Coorientador: Max de Castro Magalhães.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura.

1. Arquitetura sustentável - Teses. 2. Arquitetura e conservação de energia - Teses. 3. Conforto térmico - Teses. 4. Acústica arquitetônica - Teses. 5. Edifícios sustentáveis - Teses. I. Carrasco, Edgar Vladimiro Mantilla. II. Magalhães, Max de Castro. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Arquitetura. IV. Título.

CDD 720.47

Ficha catalográfica elaborada por Ana Maria Pinheiro Lima - CRB 6/2635.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AMBIENTE CONSTRUÍDO E PATRIMÔNIO SUSTENTÁVEL

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Avaliação do desempenho térmico e acústico em paredes do sistema light steel framing compostas por manta de lã de PET e placa de vermiculita"

JANAÍNA COSTA REZENDE

Tese de Doutorado defendida e aprovada, no dia **vinte e nove de setembro de dois mil e vinte e três**, pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Universidade Federal de Minas Gerais constituída, pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco - Orientador

Escola de Arquitetura/UFMG

Prof. Dr. Eduardo Chahud

Escola de Engenharia/UFMG

Profa. Dra. Eliene Pires Carvalho

CEFET/MG

Prof. Dr. Max de Castro Magalhães - Coorientador

Escola de Engenharia/UFMG

Profa. Dra Roberta Vieira Goncalves de Souza

Escola de Arquitetura/UFMG

Pof. Dr. Roberval José Pimenta

Belo Horizonte, 29 de setembro de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Chahud, Subchefe**, em 02/10/2023, às 09:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Roberta Vieira Goncalves de Souza, Professora do Magistério Superior**, em 02/10/2023, às 12:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eliene Pires Carvalho, Usuário Externo**, em 02/10/2023, às 14:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco, Professor do Magistério Superior**, em 03/10/2023, às 11:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cynara Fiedler Bremer, Subcoordenador(a)**, em 04/10/2023, às 11:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Max de Castro Magalhaes, Professor do Magistério Superior**, em 09/10/2023, às 09:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Roberval José Pimenta, Usuário Externo**, em 19/10/2023, às 10:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2668795** e o código CRC **F975ECE9**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à UFMG pela minha formação acadêmica e pessoal, por me proporcionar uma extensão da minha casa por mais de uma década e por me permitir ser uma profissional mais humana.

Ao Professor Dr. Edgar Mantilla Carrasco pela orientação e por toda a contribuição para que este trabalho fosse realizado.

Ao Professor Dr. Max de Castro Magalhães pelo apoio, paciência com a execução dos ensaios e por me mostrar caminhos possíveis para a construção desta pesquisa.

À FAPEMIG pelo apoio financeiro e à TRISOFT pela doação da manta de lã de PET.

Ao PACPS, PROPEES, LAEES, aos bolsistas de IC, aos colegas, professores e funcionários, em especial ao Daniel, Lucíola, Juliana, José e Heron, pelo suporte físico e técnico para a execução dos ensaios. À banca examinadora, Professores (as) Drs.(as) Roberta, Chahud, Roberval e Eliene, pelas sugestões enriquecedoras.

Aos meus amados pais, Regina e Orlando, pelo amor incondicional, pelo suporte, pelo incentivo constante aos estudos, pelo carinho, pela ajuda com os meus ensaios e, principalmente, pelo exemplo de resiliência, integridade e perseverança.

Ao Hélio, meu companheiro, obrigada pelo apoio, pela ajuda com os ensinamentos de Excel, por me fazer sair da rotina exaustiva e por compreender os meus momentos de ausência.

Àqueles que tornam o meu dia a dia mais prazeroso para além da vida acadêmica. Aos meus queridos tios e tias, padrinhos e primos. Aos amigos de sempre do São Miguel, Betti, Caca, Fe, Helô, Le, Sisa e Nacre. Aos amigos da arquitetura, Damas, Dani, Pedro Igor, Pedro Heliodoro e Thiago. Aos amigos de Mogi, a Carla, Leandro e Riri. Às amigas de Portland, em especial a Rayssa e a Kamilla. Obrigada a todos pela amizade, carinho, pelos momentos de diversão e pela torcida, mesmo sem saber, cada um de vocês contribuíram de certa forma para a realização deste trabalho.

E, finalmente, agradeço a Deus, essa força silenciosa, porém grandiosa, que nos permite ter fé nos nossos sonhos.

“O homem, como um ser histórico, inserido num permanente movimento de procura, faz e refaz constantemente o seu saber.”

(FREIRE, 1983)

RESUMO

O incentivo ao uso de sistemas construtivos de baixo impacto ambiental é um dos elementos-chave diante da atual demanda por edificações mais sustentáveis. Nesse contexto, esta pesquisa tem por objetivo principal uma avaliação do desempenho térmico e acústico de paredes do sistema construtivo Light Steel Framing (LSF), utilizando em seu interior manta de lã de PET e a placa de vermiculita, como materiais de absorção acústica e isolamento térmico, com base na ABNT NBR 15575:2021 - Edificações habitacionais - Desempenho. Para a análise do desempenho térmico, foram feitos ensaios experimentais de transmissão térmica em painel de LSF e; cálculo simplificado de acordo com a ABNT NBR 15220:2022 - Desempenho térmico de edificações. A análise do desempenho acústico foi feita por meio de ensaios experimentais de determinação do coeficiente de absorção sonora e da impedância acústica da manta de lã de PET e da placa de vermiculita; por meio de ensaio de perda de transmissão sonora (PT) em temperatura ambiente e sob aquecimento, em parede de LSF e; por meio do cálculo de estimativa teórica de PT. Os ensaios na parede de LSF foram realizados com placa cimentícia no lado externo e placa de OSB e gesso acartonado no lado interno e com quatro configurações diferentes em sua cavidade interna, sendo: um modelo sem material no interior da parede; o segundo com apenas manta de lã de PET; o terceiro com somente placa de vermiculita e; o último modelo com a manta de lã de PET e a placa de vermiculita. Na análise do desempenho térmico, o painel com os dois materiais obteve a menor temperatura máxima atingida e apresentou aquecimento e resfriamento mais lentos em relação as outras três configurações, enquanto o ensaio sem material absorvente em seu interior, apresentou rápido aquecimento e resfriamento. De acordo com a análise de desempenho acústico, foi possível perceber que o uso em conjunto da manta de lã de PET e da placa de vermiculita na parede de LSF apresentou maior PT em frequências entre 1250 Hz e 4000 Hz, enquanto a parede com apenas placa de vermiculita obteve maior PT em frequências entre 100 Hz e 1000 Hz; o ensaio com apenas lã de PET apresentou a PT mais baixa em relação a todas as configurações, na maior parte das frequências avaliadas. Dessa forma, o conjunto proposto neste trabalho foi capaz de atender os requisitos mínimos estabelecidos pela ABNT NBR 15575:2021. Quanto ao desempenho térmico, é preciso uma avaliação específica para cada clima do país. Contudo, o conjunto atendeu a norma de desempenho em relação a transmitância térmica (U) para as 8 Zonas Bioclimáticas, definidas pela ABNT NBR 15220:2005. Em relação ao desempenho acústico, o conjunto proposto com os dois materiais investigados pode ser utilizado em fachadas externas de edifícios de salas e dormitórios, conforme o valor de R_w . Cada projeto de arquitetura deve levar em conta o clima da região e a classe de ruído em que a edificação se encontra, a fim de atingir um desempenho térmico e acústico, proporcionando bem-estar ao usuário. Por fim, esta pesquisa estimula o debate sobre edificações mais sustentáveis, que contribuem com a redução da demanda energética e econômica; possibilita a difusão de conhecimento acerca de construções racionalizadas e; incentiva o uso da placa de vermiculita, um material não explorado no sistema construtivo LSF.

Palavras-chave: Construção industrializada. Desempenho térmico. Desempenho acústico. Materiais sustentáveis.

ABSTRACT

Encouraging the use of environmentally friendly construction systems is one of the key elements in the face of the current demand for more sustainable buildings. In this context, the main objective of this research is to evaluate the acoustic and thermal performance of walls in the Light Steel Framing (LSF) construction system, using recycled-PET fiber and vermiculite board as sound absorption and thermal insulation materials, based on ABNT NBR 15575-4:2021 - Residential Buildings - Performance. Thermal performance analysis involved experimental tests for thermal transmission in LSF panels and simplified calculations according to ABNT NBR 15220:2022 - Thermal Performance of Buildings. The acoustic performance analysis was conducted through experimental tests to determine: the sound absorption coefficient and acoustic impedance of recycled-PET fiber and vermiculite board; sound transmission loss (STL) tests at ambient temperature and under wall heating conditions in LSF walls; and theoretical estimation of STL. The LSF wall tests were conducted with fiber cement board on the external side and OSB board and gypsum board on the internal side, with four different configurations in the internal cavity: one model without any material inside the wall; the second with only recycled-PET fiber; the third with only vermiculite board; and the last model with recycled-PET fiber and vermiculite board. In terms of thermal performance, the panel with both materials achieved the lowest maximum temperature and exhibited slower heating and cooling compared to the other three panel configurations, whereas the panel without any absorptive material inside experienced rapid heating and cooling. The acoustic performance analysis revealed that the combination of recycled-PET fiber and vermiculite board in LSF walls exhibited higher STL in frequencies between 1250 Hz and 4000 Hz, while the wall with only vermiculite board showed higher STL in frequencies between 100 Hz and 1000 Hz. The test with only recycled-PET fiber presented the lowest STL across most of the evaluated frequencies. Thus, the proposed assembly in this study met the minimum requirements established by ABNT NBR 15575-4:2021. As for thermal performance, specific evaluations for each climate region of the country are necessary, but the assembly complied with the performance standard in terms of thermal transmittance (U) for the eight Bioclimatic Zones, defined by ABNT NBR 15220:2005. Regarding the acoustic performance, the proposed assembly with the two investigated materials can be used in external facades of rooms and bedrooms in buildings, according to the R_w value. Every architectural project must take into account the climate of the region and the noise class in which the building is located, in order to achieve acoustic and thermal performance, providing well-being to the user. Finally, this research stimulates the discussion on more sustainable buildings, which contribute to reducing energy and economic demands, disseminate knowledge about rationalized construction, and promote the use of vermiculite board, a material not widely explored in the LSF construction system.

Keywords: Industrialized construction. Acoustic performance. Thermal performance. Sustainable materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes do sistema LSF.....	35
Figura 2 - Placas de OSB.....	40
Figura 3 - Fechamento da face externa dos quadros estruturais com placa cimentícia.	41
Figura 4 - Chapas de gesso acartonado no sistema LSF.....	41
Figura 5 - Componentes utilizados em uma parede típica em LSF.....	43
Figura 6 - Imagem térmica em uma varanda com temperatura mais elevada no encontro entre a parede e a laje.	45
Figura 7 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro.....	47
Figura 8 - Classificação das construções LSF, dependendo da posição dos materiais de isolamento (Materiais: 1 – Placa de gesso acartonado; 2 - LSF; 3 - Lã mineral; 4 - Ar; 5 - OSB; 6 - EPS; 7 – ETICS- External Thermal Insulation Composite Systems).	52
Figura 9 - Distribuição da temperatura no interior das paredes do LSF.	52
Figura 10 - Ranhuras na alma do perfil para reduzir o fluxo de calor.	54
Figura 11 – Propriedade térmica das paredes de LSF com lã de vidro.....	55
Figura 12 - Propriedade térmica das paredes de LSF com lã de rocha.....	55
Figura 13 - Sistema EIFS.....	57
Figura 14 – Esquema do sistema EAHE.....	58
Figura 15 - Ensaio térmico de transferência de calor.....	59
Figura 16 – Gráfico de temperatura por tempo de parede dupla de madeira.....	59
Figura 17 - Fonte térmica utilizada para o aquecimento da face externa do painel...60	
Figura 18 - Gravidade dos efeitos (ruído).	61
Figura 19 – a) Atividades e lugares do cotidiano e seu respectivo nível de pressão sonora; b) limiares auditivos para o ser humano.	62

Figura 20 - PT média de paredes duplas com diferentes distâncias entre os painéis montados.....	63
Figura 21 - Balanço energético sonoro em uma parede sob incidência de ondas sonoras.....	66
Figura 22 - Isolamento acústico por camadas.	67
Figura 23 – Curva típica de PT em função da frequência do som incidente em paredes/painéis sólidos e homogêneos.	68
Figura 24 – Exemplo do modo de vibrar de um painel.....	69
Figura 25 - Gráfico para estimativa da PT em paredes duplas fixadas em um mesmo perfil metálico.	70
Figura 26 - Mecanismos de dissipação da energia sonora nos materiais: a) material poroso b) material fibroso.....	72
Figura 27 - Características típicas de materiais porosos.	73
Figura 28 - Aparelho e instrumentação do ensaio no tubo de impedância.	74
Figura 29 - Exemplo de um tubo de impedância.....	75
Figura 30 - Representação esquemática das sonoras em um tubo de impedância. .	75
Figura 31- Paredes duplas com lã mineral entre elas. Fonte: Way e Couchman (2008).	76
Figura 32 – Paredes duplas com lã mineral entre os perfis.	77
Figura 33 - Paredes com barras resilientes. Fonte: Way e Couchman (2008)	77
Figura 34 - Paredes com perfis escalonados. Fonte: Way e Couchman (2008).....	77
Figura 35 - Espectro de R_w das três paredes em LSF avaliadas – P1, P2 e P3.....	78
Figura 36 - Influência das cargas térmicas na PT de um painel compósito laminado ortotrópico.	79
Figura 37 – Efeito da temperatura na PT.	80
Figura 38 - Fórmula estrutural do PET.....	81
Figura 39 - Métodos de preparação do PET.....	82

Figura 40 - Corpos de PET reciclado.	82
Figura 41 - Lã de PET.	83
Figura 42 - Comparativo de desempenho acústico de paredes de <i>drywall</i> com lã de PET e paredes de alvenaria.	84
Figura 43 – Gráfico de coeficiente de absorção sonora de diferentes densidades da lã de PET.	85
Figura 44 – Gráfico de PT para as diferentes densidades da lã de PET em parede de <i>drywall</i>	85
Figura 45 - Coeficiente de absorção sonora em incidência normal. Comparação poliéster reciclado e poliéster virgem.	86
Figura 46 - Coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante. Comparação PET-Poliéster.	86
Figura 47 - Condutividades térmicas (λ) da lã de cânhamo, lã de vidro e Lã de PET à temperatura ambiente.	87
Figura 48 - Imagem microscópica da estrutura lamelar da vermiculita expandida ...	88
Figura 49 - Diferentes granulometrias da vermiculita expandida.	89
Figura 50 – Placa de vermiculita	90
Figura 51 - Vermiculita expandida aplicada diretamente em blocos de concreto	91
Figura 52 - Detalhamento interno da parede de ensaio (vista de cima).	94
Figura 53 – Vista esquemática externa e interna do painel móvel para ensaio térmico. a) lado com placa cimentícia. b) lado com placa de gesso acartonado.	94
Figura 54 – Foto da vista externa e interna do painel móvel para ensaio térmico. a) lado com placa cimentícia. b) lado com placa de gesso acartonado.	95
Figura 55 - Manta de lã de PET sendo aplicada no painel de LSF.	95
Figura 56- Amostras da lã de PET.	96
Figura 57 - Amostras da placa de vermiculita.	97
Figura 58 – Sistema com duas camadas: placa de vermiculita e lã de PET.	97

Figura 59 - Vista de cima da parede de ensaio.....	99
Figura 60 - Diferentes configurações da parede de ensaio. a) Parede com manta de lã de PET; b) parede com placas de vermiculita.....	100
Figura 61 - Vista frontal desenho esquemático da parede de ensaio. a) vista frontal; b) corte frontal	101
Figura 62 – Painel móvel de acesso a câmara reverberante. a) vista frontal do painel móvel para o fechamento da parede de LSF; b) vista superior detalhada do painel móvel.....	101
Figura 63 – Fluxograma dos métodos utilizados para a avaliação do desempenho térmico e acústico de paredes de LSF.....	102
Figura 64 – Ensaio para a avaliação do desempenho térmico do LSF.....	104
Figura 65 – Disposição dos termopares no painel de LSF.	104
Figura 66 - Foto dos termopares durante o ensaio.....	105
Figura 67 - Vista de cima do painel dividido em seções para o cálculo simplificado de acordo com a ABNT NBR 15220-2:2022.	107
Figura 68 – Planta do painel dividido em seções para o cálculo simplificado de acordo com a ABNT NBR 15220-2:2022.	107
Figura 69 – Corte visto de frente do painel dividido em seções para o cálculo simplificado de acordo com a ABNT NBR 15220-2:2022.	108
Figura 70 - Configuração do ensaio no tubo de impedância.....	110
Figura 71 - Disposição dos materiais no tubo de impedância.....	111
Figura 72 - Gráfico de coeficiente de absorção sonora no tubo de impedância vazio	115
Figura 73 - Planta baixa LADAE.	116
Figura 74 - Equipamentos utilizados para o cálculo do tempo de reverberação. a) balão para fonte impulsiva. b) medidor de nível de pressão sonora.....	118
Figura 75 – Planta baixa: Posições da fonte sonora e do microfone durante o ensaio de tempo de reverberação no LADAE/UFMG.....	119

Figura 76 - Equipamentos utilizados nos ensaios de PT.	121
Figura 77 – Planta baixa: posições da fonte sonora e do microfone durante o ensaio de PT no LADAE/UFMG.	122
Figura 78 - Curva de valores de referência para ruído aéreo em banda de terço de oitava.	125
Figura 79 - Refletor sobre o tripé durante o ensaio de PT com aquecimento vista da sala reverberante.	131
Figura 80 - Temperatura atingida pelo refletor.....	131
Figura 81 - Gráfico desempenho térmico painel sem material isolante com a temperatura dos quatro termopares.....	134
Figura 82 - Gráfico desempenho térmico painel sem material isolante com a temperatura dos três termopares internos.	135
Figura 83 - Gráfico comparação desempenho térmico por meio da temperatura média dos três.....	136
Figura 84 - Gráfico relação (Calor transferido/Calor incidente) <i>versus</i> tempo.	139
Figura 85 - Gráfico relação (Calor transferido/Calor incidente) x tempo em comparação com outros sistemas estruturais.....	140
Figura 86 - Gráfico curvas de absorção sonora das amostras de lã de PET.....	144
Figura 87 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a média das curvas de absorção acústica das amostras de lã de PET.....	144
Figura 88 - Gráfico curvas de absorção sonora das amostras da placa de vermiculita	145
Figura 89 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a média das curvas de absorção acústica das amostras de vermiculita.....	146
Figura 90 - Gráfico curvas de absorção sonora das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita interna e lã de PET externa.....	147

Figura 91 - Gráfico 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.....	147
Figura 92 – Gráfico curvas de absorção sonora das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita externa e lã de PET interna	148
Figura 93 – Gráfico 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.....	148
Figura 94 - Gráfico comparação das curvas médias de absorção sonora para os ensaios realizados – Amostras de vermiculita, lã de PET e conjunto com duas camadas.....	149
Figura 95 – Gráfico impedância superficial das amostras de lã de PET – Parte imaginária.....	151
Figura 96 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a impedância superficial média das amostras de lã de PET – Parte imaginária.....	151
Figura 97 - Gráfico impedância superficial das amostras de lã de PET – Parte real	152
Figura 98 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a impedância superficial média das amostras de lã de PET – Parte real	152
Figura 99 - Gráfico impedância superficial das amostras da placa de vermiculita – Parte imaginária	153
Figura 100 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a impedância superficial média das amostras das placas de vermiculita – Parte imaginária	153
Figura 101 - Gráfico impedância superficial das amostras da placa de vermiculita – Parte real.....	154
Figura 102 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a impedância superficial média das amostras das placas de vermiculita – Parte real	154
Figura 103 - Gráfico impedância superficial das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita interna e lã de PET externa– Parte imaginária.....	155

Figura 104 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a impedância superficial média das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita interna e lã de PET externa– Parte imaginária	155
Figura 105 - Gráfico impedância superficial das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita interna e lã de PET externa – Parte real	156
Figura 106 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a impedância superficial média das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita interna e lã de PET externa– Parte real.....	156
Figura 107 - Gráfico impedância superficial das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita externa e lã de PET interna – Parte imaginária.....	157
Figura 108 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a impedância superficial média das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita externa e lã de PET interna – Parte imaginária	157
Figura 109 - Gráfico impedância superficial das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita externa e lã de PET interna – Parte real	158
Figura 110 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a impedância superficial média das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita externa e lã de PET interna – Parte real.....	158
Figura 111 - Gráfico comparação das curvas médias de Impedância acústica superficial para os ensaios realizados – Parte imaginária	159
Figura 112 - Gráfico comparação das curvas médias de Impedância acústica superficial para os ensaios realizados – Parte real.....	160
Figura 113 - Gráfico PT: comparação entre as quatro configurações de parede. ...	162
Figura 114 – Gráfico comparação da curva de ensaios experimentais e curva teórica de estimativa de PT em painéis duplos.....	165
Figura 115 - Gráfico comparação da curva de ensaios experimentais e curva teórica de estimativa de PT em painéis duplos sem material absorvente entre os painéis de fechamento.....	166

Figura 116 – Gráfico classificação de valor único - R_w - em parede com lã de PET.	167
Figura 117 – Gráfico classe de transmissão sonora - STC - em parede com lã de PET.	168
Figura 118 – Gráfico classificação de valor único - R_w - em parede sem material absorvedor.	168
Figura 119 – Gráfico classe de transmissão sonora - STC - em parede sem material absorvedor.	169
Figura 120 - Gráfico classificação de valor único - R_w - em parede com placa de vermiculita.	170
Figura 121 – Gráfico classe de transmissão sonora - STC - em parede com placa de vermiculita.	170
Figura 122 – Gráfico classificação de valor único - R_w - em parede com placa de vermiculita e lã de PET.	171
Figura 123 – Gráfico classe de transmissão sonora - STC - em parede com placa de vermiculita e lã de PET.	172
Figura 124 - Gráfico PT: comparação entre as configurações de paredes aquecidas a 120 °C.	176
Figura 125 - Gráfico comparação da curva de ensaios experimentais de paredes aquecidas a 120 °C com a curva teórica de estimativa de PT em painéis duplos...177	
Figura 126 - Gráfico comparação da curva de ensaios experimentais de paredes aquecidas a 120 °C com a curva teórica de estimativa de PT em painéis duplos sem material absorvente entre os painéis de fechamento.....	178
Figura 127 - Gráfico classificação de valor único - R_w - em parede aquecida a 120 °C sem material absorvedor.....	179
Figura 128 - Gráfico classe de transmissão sonora - STC - em parede aquecida a 120 °C sem material absorvedor.....	180
Figura 129 - Gráfico classificação de valor único - R_w - em parede aquecida a a 120 °C lã de PET.....	180

Figura 130 - Gráfico classe de transmissão sonora - STC - em parede aquecida a 120 °C com lã de PET.....	181
Figura 131 - Gráfico classificação de valor único - Rw - em parede aquecida a 120 °C com placa de vermiculita e lã de PET.....	182
Figura 132 - Gráfico classe de transmissão sonora - STC - em parede aquecida a 120 °C com placa de vermiculita e lã de PET.....	182
Figura 133 - Gráfico classificação de valor único - Rw - em parede aquecida a 120 °C com placa de vermiculita.....	183
Figura 134 - Gráfico classe de transmissão sonora - STC - em parede aquecida a 120 °C com placa de vermiculita.....	183
Figura 135 - Comparação entre os ensaios realizados em temperatura ambiente e sob aquecimento a 120 °C na parede sem material absorvente no interior do painel....	185
Figura 136 - Comparação entre os ensaios realizados em temperatura ambiente e sob aquecimento a 120 °C na parede com manta de lã de PET.....	186
Figura 137 - Comparação entre os ensaios realizados em temperatura ambiente e sob aquecimento a 120 °C na parede com placa de vermiculita.....	187
Figura 138 – Comparação entre os ensaios realizados em temperatura ambiente e sob aquecimento a 120 °C na parede com placa de vermiculita e manta de lã de PET.	188

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos e denominações de perfis comerciais.	38
Tabela 2 - Tipo de perfis especiais utilizados no sistema LSF no Brasil.	39
Tabela 3 - Transmitância térmica de referência para paredes externas, onde α é a absorvância à radiação solar da parede.	46
Tabela 4 - Capacidade térmica de referência para paredes externas.	46
Tabela 5 – Valores utilizados para R_{si} e R_{se}	48
Tabela 6 - Resistência Térmica e Condutividade Térmica da lã de vidro.	50
Tabela 7 - Condutividade térmica da lã de rocha, lã de vidro e a lã de PET.	50
Tabela 8 - Visão geral dos valores de transmitância térmica obtidos.	53
Tabela 9 - Recomendações arquitetônicas de paredes conforme o clima.	56
Tabela 10 - Valores de referência de R_w composto de isolamento a ruído aéreo de fachadas (dormitórios e salas) – Nível de desempenho mínimo.	64
Tabela 11 - Valores de referência de R_w , de isolamento a ruído aéreo de vedações verticais internas – Nível de desempenho mínimo.	64
Tabela 12 - Termo de adaptação do espectro pertinente para diferentes tipos de fonte de ruído.	65
Tabela 13 - Classes de transmissão sonora, condições de privacidade e classificações subjetivas associadas.	66
Tabela 14 - Espessura, e densidade de algumas das amostras testadas.	86
Tabela 15 - Desempenho térmico: lã de rocha e manta de lã de PET.	87
Tabela 16 - Dimensões das seções do painel móvel.	108
Tabela 17 - Propriedades térmicas dos componentes que compõem o painel móvel de LSF.	109
Tabela 18 - Resultado do tempo de reverberação T_{20} para a sala receptora, em segundos.	120

Tabela 19 – Valores de referência para ruído aéreo.....	124
Tabela 20 - Espectro de nível sonoro para calcular os termos de adaptação - C e C_{tr}	126
Tabela 21 – Valores de referência para o cálculo de classe de transmissão sonora (STC).....	127
Tabela 22 - Propriedades das placas de fechamento.....	130
Tabela 23 – Síntese do ensaio de desempenho térmico experimental.	138
Tabela 24 – Atraso térmico e amortecimento do painel de LSF.	139
Tabela 25 – Valores determinados por meio do cálculo simplificado para o painel móvel.....	141
Tabela 26 - Coeficiente de redução sonora (NRC) das amostras analisadas	150
Tabela 27 - Frequências críticas dos painéis.....	163
Tabela 28 - Frequências naturais.....	163
Tabela 29 – Pontos da curva de estimativa teórica.	164
Tabela 30 - Pontos da curva de estimativa teórica da parede vazia.....	165
Tabela 31 - Tabela síntese dos valores de R_w , espectro de adaptação C e C_{tr} e STC determinados após a realização dos ensaios de PT na parede de LSF.....	173
Tabela 32 - Valores indicativos do índice de redução sonora ponderado para alguns sistemas de paredes.	174
Tabela 33 – STC de partições feitas de materiais construtivos comumente utilizados.	174
Tabela 34 - Tabela síntese dos valores de R_w , espectro de adaptação C e C_{tr} e STC determinados após a realização dos ensaios de PT na parede aquecida a 120 °C de LSF.....	184
Tabela 35 - Comparação síntese entre os resultados de R_w , C e C_{tr} e STC dos ensaios realizados em temperatura ambiente e sob aquecimento.	189

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APA	The Engineered Wood Association
ASTM	American Society for Testing and Materials
BHET	Demonômero da polimerização
DMT	Éster tereftalato de dimetileno
EAHE	Earth-to-Air Heat Exchangers
EG	Etileno glicol
EIFS	Exterior Insulation and Finish System
ISO	Organização Internacional de Normalização
LADAE	Laboratório de Dinâmica e Acústica Estrutural
LPT	Laboratório de Pesquisa Tecnológica em Materiais e Construção
LSF	<i>Light Steel Framing</i>
NBR	Norma Brasileira
NRC	<i>Noise reduction coefficient</i> (Coeficiente de Redução Sonora)
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial da Saúde
OSB	Oriented Strand Board
PACPS	Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável
PEAD	Polietileno de alta densidade
PET	Politereftalato de etileno
PT	Perda de transmissão sonora

PVA Acetato de polivinila

PVC Policloreto de vinila

STC *Sound transmission class* (Classe de Transmissão Sonora)

TPA Ácido tereftálico

TR Tempo de reverberação

UFMG Universidade Federal de Minas Gerais

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	25
I. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	34
1.1. Propriedades gerais do sistema <i>Light Steel Framing</i> (LSF).....	34
1.1.1 Componentes do sistema <i>Light steel Framing</i> (LSF).....	37
1.2. Desempenho térmico do sistema <i>Light Steel Framing</i> (LSF).....	42
1.3. Desempenho acústico do sistema <i>Light Steel Framing</i> (LSF)	60
1.4. Características da lã de PET	80
1.5. Características da vermiculita	88
II. MATERIAIS E CORPOS DE PROVA.....	93
2.1 Materiais utilizados para a avaliação do desempenho térmico.....	93
2.2 Materiais utilizados para a avaliação do desempenho acústico.	96
III. MÉTODOS	102
3.1 Avaliação do desempenho térmico	103
3.1.1 Ensaio experimental de transferência de calor em painel móvel de <i>Light Steel Framing</i> (LSF)	103
3.1.2 Cálculo simplificado - ABNT NBR 15220-2:2005 e ABNT NBR 15220-2:2022	106
3.2 Avaliação do desempenho acústico.....	109
3.2.1 Ensaio em tubo de impedância para a determinação do coeficiente de absorção sonora e impedância acústica da manta de lã de PET e placa de vermiculita.	110
3.2.2 Ensaio de PT em temperatura ambiente.....	115

3.2.2.1	Classificação de valor único de cada parede (R_w).....	123
3.2.2.2	Espectros sonoros (C e C_{tr}).....	125
3.2.2.3	Classe De Transmissão Sonora (STC).....	126
3.2.2.4	Cálculo da estimativa teórica de Perda de Transmissão Sonora (PT)....	127
3.2.3	Ensaio de PT com a parede aquecida	130
IV.	RESULTADOS.....	133
4.1	Avaliação do desempenho térmico	133
4.1.1	Ensaio experimental de transferência de calor em painel móvel de <i>Light Steel Framing</i> (LSF).....	133
4.1.2	Cálculo simplificado de desempenho térmico.....	140
4.2	Avaliação do desempenho acústico.....	143
4.2.1	Ensaio em tubo de impedância para a determinação do coeficiente de absorção sonora e impedância acústica da manta de lã de PET e placa de vermiculita	143
4.2.2	Ensaio de Perda de Transmissão Sonora (PT) em temperatura ambiente ..	160
4.2.2.1	Comparação da estimava teórica da Perda de Transmissão Sonora (PT) com os ensaios realizados	163
4.2.2.2	Determinação de R_w , C e C_{tr} ; STC	166
4.2.3	Ensaio de Perda de Transmissão Sonora (PT) com a parede aquecida	175
4.2.3.1	Comparação da estimava teórica da Perda de Transmissão Sonora (PT) com os ensaios realizados em paredes aquecidas.....	176
4.2.3.2	Determinação de R_w , C e C_{tr} ; STC	178
4.2.4	Comparação da Perda de Transmissão Sonora (PT); do R_w , de C e C_{tr} ; do STC entre os ensaios realizados na parede em temperatura ambiente e sob aquecimento.....	184

V.	ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS.....	190
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	197
	REFERÊNCIAS.....	199
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORA <i>VERSUS</i> FREQUÊNCIA EM ENSAIOS EM TEMPERATURA AMBIENTE	210
	APÊNDICE B – GRÁFICOS DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORA <i>VERSUS</i> FREQUÊNCIA EM ENSAIOS SOB AQUECIMENTO	219

INTRODUÇÃO

Com o crescimento dos grandes centros urbanos, aumenta também a demanda por recursos naturais, causando impacto ambiental e diminuição da qualidade espacial das cidades (ALBRECHT *et al.*, 2020). Segundo Maturana (2001), a ciência e a tecnologia estão relacionadas ao bem-estar humano. Apesar disso, a sociedade valoriza a ciência e a tecnologia, não porque elas estão conectadas ao bem-estar, mas porque são capazes de controlar a natureza e, dessa forma, fornece uma imagem de que os recursos naturais são infinitos. A sociedade procura uma forma de manipular a natureza sem compreendê-la e a ciência tem um importante papel de fazer o homem refletir sobre como ele é responsável pelos seus atos e os malefícios causados ao meio ambiente. É importante que o ser humano leve em consideração que os recursos da natureza utilizados na construção civil não são infinitos e devem ser usados com parcimônia e sabedoria.

A sociedade tem se preocupado com o meio ambiente e buscado formas de mitigar os impactos causados na natureza, como agendas sustentáveis e pesquisas que visam contribuir com uso de materiais recicláveis na construção civil, a fim de utilizar de maneira mais racional os recursos naturais. Em 2015, foi criada, em uma reunião feita em Nova York, a Agenda 2030, planejada pela Organização das Nações Unidas (ONU), contendo 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) formando um plano de ação para erradicar a pobreza, proteger o planeta e garantir que as pessoas alcancem a paz e a prosperidade. O ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis - apresenta temas relacionados a construções sustentáveis e gestão de resíduos sólidos e saneamento e o ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis - visa assegurar padrões de produção e consumo sustentáveis. Dessa forma, é possível incentivar formas mais viáveis de consumo de recursos naturais, colocando o homem como o principal causador dos danos causados ao meio ambiente. Diante desse contexto, faz-se necessário que a atividade humana seja menos dominadora sobre a natureza, em prol de uma relação mais saudável. E, para isso, é importante que o

homem entenda que ele é responsável pela natureza e pelo impacto ambiental causado devido a intensa exploração de recursos naturais.

O *light steel framing* (LSF) é um sistema construtivo composto por painéis estruturados de perfis de aço galvanizado formados a frio, sua concepção é feita de forma racional, permitindo um sistema construtivo a seco, com poucos resíduos de obra e mais sustentável. O sistema é feito de forma mais rápida, em comparação com as construções em alvenaria (RODRIGUES E CALDAS, 2016). Segundo Olivieri *et al.* (2017), a racionalização do sistema também favorece a redução de custos em canteiros e proporciona melhores condições de gerenciamento de obras e no fluxo de trabalho, devido à melhor organização das atividades laborais.

O LSF começou a ser utilizado no Brasil no início da década de 1990 e seu uso era voltado às classes sociais mais altas (MALTA, ARCIPRESTE E AGUIAR, 2021). De acordo com Duarte e Daltro (2018), hoje, as construções em LSF em larga escala no Brasil ainda estão em crescimento e, segundo os autores, as habitações feitas em LSF no país, principalmente as de interesse social, precisam de melhorias em relação ao seu design, conforto, eficiência energética e conservação de recursos materiais. Além disso, o clima e o contexto social local também devem ser levados em consideração ainda durante a fase de projeto, bem como a avaliação de pós-ocupação do usuário.

Ainda que pouco aproveitado no Brasil, o LSF tem potencial para ser amplamente utilizado e se tornar uma tecnologia social, contribuindo com um dos maiores desafios para o desenvolvimento socioeconômico no país, o déficit habitacional brasileiro. Contudo, há pouco acesso à mão de obra especializada e componentes para o desenvolvimento do sistema LSF em comparação às construções de alvenaria, dificultando à execução e manutenção da edificação (GONÇALVES E BODE, 2015; MALTA, ARCIPRESTE E AGUIAR, 2021).

Um material utilizado no interior das paredes de LSF, para proporcionar desempenho térmico e acústico no sistema, é a manta de lã de PET (Politereftalato de etileno) reciclada. A reciclagem do PET promove benefícios sociais, garantindo trabalho aos profissionais catadores; benefícios econômicos proporcionando a geração de empregos e renda e; benefícios ambientais, uma vez que a reciclagem do material,

economiza recursos naturais, como água e energia e, contribui para a limpeza das cidades. É possível reciclar 35 garrafas PET por m² de rolo de lã de PET de 50 mm de espessura. Além disso, a lã de PET é hipoalergênica, eliminando o risco de contaminação durante a obra; possibilita também a embalagem do material a vácuo, proporcionando o transporte da lã de PET economicamente vantajoso. Outra característica importante, que precisa ser garantida pela empresa que a fabrica, é a capacidade do material em não propagar incêndio, sendo, dessa forma, um material autoextinguível (TRISOFT, 2020).

Outro material, que poderia ser utilizado no LSF, tendo em vista o desempenho térmico e acústico do sistema, é a vermiculita, um material reciclável, não nocivo ao meio ambiente e ao ser humano, insolúvel em água e em outros solventes orgânicos e apresenta estabilidade química no decorrer do tempo. O mineral apresenta um preço acessível, podendo gerar vantagens comerciais e concorrência com outros materiais mais utilizados no país, como a lã de vidro e lã de rocha (CARBAJO *et al.*, 2015). A vermiculita ainda não é empregada no interior das paredes de LSF no Brasil. E, também, o uso em conjunto da lã de PET e da placa de vermiculita não é utilizado, no sistema LSF.

Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, a tomada de decisão em relação aos projetos ainda é fortemente influenciada pelo contexto socioeconômico. Isso resulta em restrições significativas em relação aos critérios de conforto ambiental e bem-estar humano devido, principalmente, às limitações econômicas (ALBRECHT *et al.*, 2020). As habitações de interesse social sofrem ainda mais com a contenção de gastos, pois os projetos são inflexíveis, devido aos sistemas de alvenaria autoportantes comumente utilizados, dificultando adaptações futuras, especialmente às relacionadas ao conforto térmico (BORTOLI E VILLA, 2020a).

A ABNT NBR 16970:2022 (*Light steel framing* - sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço formados a frio, com fechamentos em chapas delgadas), a ABNT NBR 15575:2021 (Edificações habitacionais – Desempenho) e a ABNT NBR 15220:2022 (Desempenho Térmico de Edificações), são algumas das normas técnicas que ajudam a nortear o profissional de arquitetura e engenharia para que o

desempenho térmico e acústico da edificação não seja comprometido e, por isso deve ser priorizado ainda na fase de projeto. De acordo com Albrecht *et al.* (2020), a ABNT NBR 15575:2021 estabelece valor de desempenho para que haja qualidade mínima na habitação. Por isso, a norma de desempenho determina o tipo de clima e ruídos de uma região, a fim de alcançar um melhor desempenho térmico e acústico da edificação, bem como uma maior eficiência energética.

O consumo de eletricidade no Brasil, correspondente ao setor residencial, foi um dos que mais cresceram, entre os anos de 2021 e 2022. Conforme o Balanço de Energia Nacional, BEN (2023), ocorreu um aumento de 3% e, parte dessa demanda, é resultado do uso de iluminação, da refrigeração de ambientes e de eletrodomésticos. Ainda, segundo Souza e Abrahão (2021), em todas as regiões do Brasil, houve um aumento expressivo no consumo de energia elétrica do setor residencial entre os anos de 2005 e 2019, principalmente devido ao uso de ar-condicionado e ventiladores. Ademais, nas regiões de clima quente do país, como o Norte e o Nordeste, foi observado o uso de ar-condicionado ao longo de todo o ano, indicando que os modelos de habitação nessas áreas devem atender a elevados padrões de desempenho térmico. Dessa forma, o setor residencial apresenta grande potencial de implementação de medidas para a otimização do desempenho térmico e, conseqüentemente, para contribuir com a eficiência energética da edificação. A avaliação da transmitância térmica (U) e da capacidade térmica (C) de paredes, aliadas a estratégias de ventilação e sombreamento nas residências, são medidas importantes, para que o consumo de ar-condicionado e ventiladores e, em alguns casos, aquecedores, seja reduzido. Dessa forma, pode-se inferir que o desempenho térmico ideal de uma habitação é determinado pela escolha de materiais e tecnologias construtivas, pelo projeto de arquitetura e pelo tipo de uso e ocupação do espaço, que, conseqüentemente, contribui com o conforto humano e o desempenho energético.

Em relação ao desempenho acústico, ele pode ser alcançado por meio da utilização de materiais de vedação resistentes às pressões sonoras incidentes no interior de um edifício. Assim, é possível resguardar a privacidade do usuário, bem como o seu conforto auditivo, permitindo, dessa forma, a saúde e o bem-estar físico e psíquico dos habitantes ao longo do tempo (BORTOLI E VILLA, 2020b). Conforme Cohen *et*

al. (2019), a qualidade acústica da edificação é resultado da influência das características do ambiente construído. Fatores como tamanho, volume, revestimento e materiais utilizados na vedação de pisos, paredes e coberturas determinam a percepção do som pelo indivíduo.

O ruído proveniente do tráfego urbano também deve ser levado em conta para alcançar o melhor desempenho acústico da edificação. O aumento da frota de veículos e a falta de planejamento territorial, tem contribuído para o agravamento dos ruídos nas grandes cidades. Além da principal fonte de poluição sonora, o ruído de tráfego, os barulhos provenientes das indústrias, das obras de construção civil e do comércio também são fontes de ruídos urbanos. A exposição frequente à poluição sonora tem efeitos negativos para a saúde, como possível aumento de doenças cardiovasculares, podendo impactar a qualidade de vida do indivíduo (BOTTELDOOREN, DEKONINCK E GILLIS, 2011; SURIANO, SOUZA E SILVA, 2015). Dessa forma, fica evidente a necessidade de priorizar também, ainda em fase de projeto, o desempenho acústico das edificações, por meio de materiais construtivos que colaboram com o isolamento acústico e a absorção sonora das paredes e coberturas.

Diante das questões expostas demonstradas nesta Introdução, especialmente àquelas voltadas para busca por materiais construtivos mais sustentáveis e melhorias por edificações com maior desempenho térmico e acústico, o desenvolvimento deste trabalho parte das seguintes **hipóteses**: primeiro, que a placa de vermiculita, um material de baixo impacto ambiental, uma vez que pode ser reciclada e não gera resíduos perigosos para o meio ambiente (CARBAJO *et al.*, 2015), não utilizada no sistema LSF no Brasil, tem características físicas para colaborar com o desempenho térmico e acústico do sistema e; segundo, que o uso da placa de vermiculita e a manta de lã de PET reciclada (material sustentável já empregado no LSF), utilizadas em conjunto, podem se complementar, otimizando o desempenho térmico e acústico em habitações do sistema LSF.

Assim, o **objetivo geral** deste trabalho é avaliar o desempenho térmico e acústico em paredes do sistema construtivo *Light Steel Framing* compostas por lã de PET e placas

de vermiculita, de acordo com a ABNT NBR 15575-4:2021 (Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE).

Dessa forma, os **objetivos específicos** desta pesquisa são:

- Avaliar a transmissão de calor em painéis de *Light Steel Framing* (LSF) com manta de lã de Politereftalato de etileno (PET) e placas de vermiculita;
- Determinar os parâmetros de caracterização térmica das paredes do sistema LSF com manta lã de PET e placas de vermiculita, por meio de cálculo simplificado, conforme a ABNT NBR 15220-2:2005 (Desempenho Térmico de Edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações) e a ABNT NBR 15220-2:2022 (Desempenho Térmico de Edificações. Parte 2: Componentes e elementos construtivos - Resistência, transmitância térmica - Métodos de cálculo);
- Comparar os parâmetros de caracterização térmica das paredes do sistema LSF estabelecidos pelas duas normas, a ABNT NBR 15220-2:2005, que permite o uso do cálculo simplificado no LSF e, a ABNT NBR 15220-2:2022, que não permite o uso do cálculo simplificado em paredes tipo LSF.
- Determinar o coeficiente de absorção sonora e impedância acústica da manta de lã de PET e da placa de vermiculita;
- Avaliar a perda de transmissão sonora (PT) em parede do LSF com manta lã de PET e placas de vermiculita em temperatura ambiente;
- Analisar o efeito do calor na PT em parede do sistema LSF com manta de lã de PET e placas de vermiculita;
- Comparar a PT de paredes de LSF com manta de lã de PET e placas de vermiculita em temperatura ambiente e sob aquecimento;
- Comparar a curva de estimativa teórica de PT de parede de LSF com os resultados dos ensaios experimentais.

Ainda para deixar evidente a **relevância do tema** desta tese, além do que já foi exposto até o momento, como a urgente busca por edificações mais eficientes, materiais construtivos mais sustentáveis e maior desempenho térmico e acústico das edificações, vale ressaltar que com o intuito de diminuir o déficit habitacional brasileiro, a indústria civil busca cada vez mais racionalizar o sistema construtivo para suprir as necessidades habitacionais do país. O uso LSF pode ser uma alternativa para atender tal demanda, devido a racionalidade do sistema, que permite uma construção a seco, com poucos resíduos de obra e, possibilita maior velocidade de execução, em comparação com as edificações em alvenaria (ANGELIS E SERRA, 2014), além de apresentar peso reduzido; estrutura sólida em relação ao peso; estabilidade de forma em caso de umidade; rapidez na pré-fabricação; grande potencial para reciclagem e reutilização dos perfis de aço (SANTOS, MARTINS E SILVA, 2014). Atualmente, o sistema é comumente empregado em países onde a construção civil é predominantemente industrializada. O Brasil ocupa o nono lugar no ranking mundial entre os dez maiores produtores de aço no mundo (GANDRA, 2019). No entanto, as construções feitas em concreto armado ainda são predominantes e o LSF ainda é pouco utilizado no setor construtivo habitacional brasileiro. Contudo, o uso do aço na construção civil vem aumentando consideravelmente nos últimos anos e o país dispõe atualmente de políticas habitacionais, técnicas e normas nacionais que favorecem o emprego deste sistema (GOMES, SOUZA E TRIBESS, 2013; MALTA, ARCIPRESTE E AGUIAR, 2021). Assim, conforme aumenta o número de habitações multifamiliares usando paredes divisórias com estrutura de aço, os arquitetos e engenheiros ficam cada vez mais confrontados com a necessidade de priorizar o desempenho térmico e acústico adequado para as edificações em LSF, seja por meio de soluções projetuais ou técnicas e materiais construtivos apropriados, a depender do local da edificação.

Dito isso, é importante afirmar que o LSF é um sistema construtivo racional que apresenta baixo índice de desperdício durante a obra e seu uso deve ser incentivado. Para isso, este trabalho desenvolve estudos acerca do desempenho térmico e acústico da lã de PET em paredes do sistema LSF, um material reciclado e reciclável, que reutiliza garrafas plásticas e contribui com a redução dos impactos ambientais na construção civil, junto a placas de vermiculita, que apresenta baixa densidade, não

apresenta amianto ou algum componente tóxico; é inodoro, imputrescível, não deteriorável e incombustível, pode ser reciclado e não gera resíduos tóxicos para o meio ambiente (ANM, 2018), além de ser um material ainda não explorado pela indústria de LSF no Brasil.

Ademais, o Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável (PACPS) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) apresenta como uma de suas áreas de pesquisa, a linha denominada de Tecnologia do Ambiente Construído. Essa linha abrange a proposta desta pesquisa, uma vez que um dos objetivos deste trabalho é avaliar o desempenho térmico e acústico de paredes em LSF, utilizando materiais sustentáveis. Este trabalho está relacionado ao Laboratório de Pesquisa Tecnológica em Materiais e Construção (LPT), coordenado pelo orientador desta tese de doutorado, Professor Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco. Também, esta pesquisa é coorientada pelo professor Max de Castro Magalhães, doutor em *Acoustical Engineering and Vibration*.

Por fim, este trabalho de avaliação do desempenho térmico e acústico de paredes do sistema LSF utilizando manta de lã de PET e placas de vermiculita é constituído pela introdução, cinco capítulos e as considerações finais.

Nesta **Introdução** apresentou-se o tema, as hipóteses, o objetivo geral, os objetivos específicos, a justificativa e a relevância da escolha do tema desta pesquisa.

No **Capítulo 1** foi feita uma revisão bibliográfica acerca do LSF com foco no desempenho térmico e acústico do sistema por meio de pesquisas e publicações que orientaram e embasaram este trabalho.

No **Capítulo 2** foram exibidos os materiais utilizados durante os ensaios experimentais realizados.

No **Capítulo 3** foram apresentadas os métodos adotados para a realização dos ensaios experimentais e dos cálculos teóricos.

Os resultados dos ensaios experimentais e dos cálculos teóricos realizados foram apresentados no **Capítulo 4**.

No **Capítulo 5** foi feita a análise global dos resultados. Devido à grande quantidade de resultados coletados por meio de ensaios experimentais, os principais dados determinados nesta pesquisa foram comentados e refletidos novamente.

Nas **Considerações Finais** foram retomadas as ideias centrais da pesquisa por meio de uma visão geral do que foi desenvolvido durante todo o trabalho. Ademais, foram relatadas algumas constatações observadas por meio dos resultados observados e, também, foram feitas sugestões de trabalhos futuros.

Esta tese foi finalizada com o **Levantamento Bibliográfico** utilizado nesta pesquisa e com o **Apêndice** produzido a partir dos ensaios realizados e que complementam o entendimento desta tese.

I. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

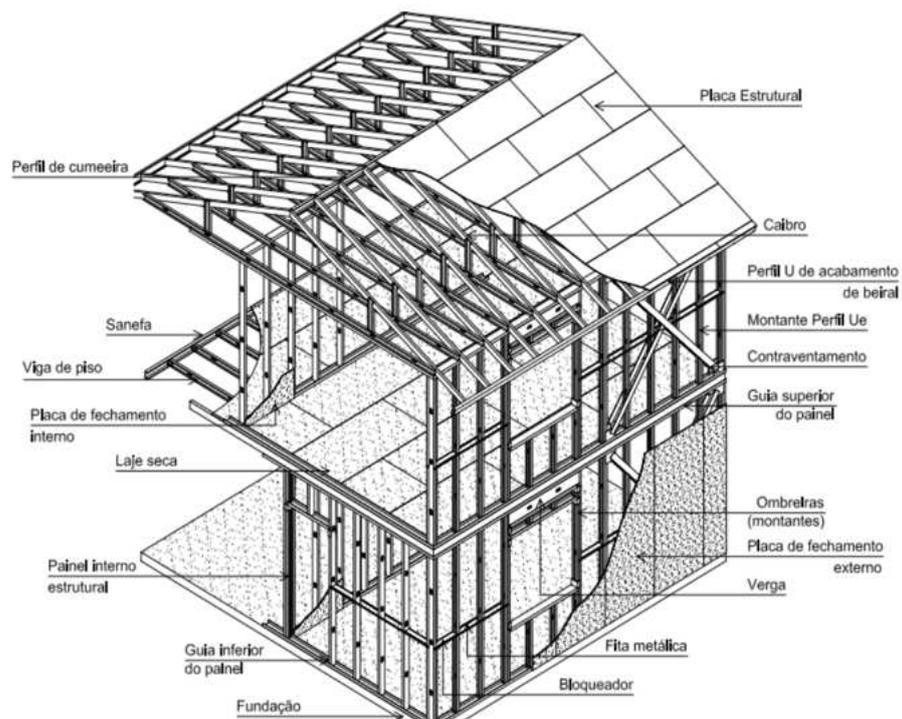
1.1. Propriedades gerais do sistema *Light Steel Framing* (LSF)

As construções em LSF podem proporcionar desempenho térmico e acústico à edificação, além de poder atingir um eficiente desempenho energético. Para isso, alguns aspectos do sistema, como a qualidade e as propriedades dos materiais utilizados, devem ser levados em consideração no início do projeto e durante a obra, para que esses os requisitos de desempenho não sejam comprometidos. Quando tratados de forma correta, esses dois parâmetros contribuem com a sustentabilidade da edificação e conseqüentemente com o bem-estar do usuário (ROQUE, SANTOS E PEREIRA, 2019).

O LSF pode ser dividido em três subsistemas, são eles perfis estruturais de aço galvanizados formados a frio; painéis de revestimento, que podem ser placas de gesso acartonado, placas de OSB ou placas cimentícias e os materiais de absorção sonora e isolamento térmico, como lãs minerais, inseridas dentro das paredes e lajes (SANTOS, 2017). Conforme Crasto, Freitas e Santiago (2012), os perfis formados a frio do LSF são obtidos por dobramento ou por conformação contínua em mesa de roletes. Os perfis mais comercializados no Brasil apresentam alma de 90 mm, 140 mm ou de 200 mm e as seções mais utilizadas nas construções são em formato de “U” e “Ue” enrijecido. Os painéis estruturais verticais são compostos por perfis metálicos denominados de montantes, eles são separados entre si a cada 400 mm ou 600 mm, ajudam a distribuir as cargas estruturais até ao solo e podem ser revestidos por diversos materiais, tanto na parte externa quanto na parte interna (Figura 1). O sistema de fechamento do LSF é feito com placas de vedação na parte externa e interna do edifício. Elas precisam ser leves e racionalizadas com o projeto. No Brasil, os revestimentos mais utilizados são as placas de OSB (*oriented strand board*), as placas cimentícias e o gesso acartonado. Além de tais revestimentos, as placas de compensado também são utilizadas fora do país. Existem algumas opções para o acabamento final das placas, como a argamassa e o *siding*, que pode ser vinílico, em madeira ou cimentício. A placa de OSB é um painel estrutural com tiras de madeira.

A placa cimentícia é composta de cimento Portland e agregados, apresenta alta resistência, permitindo seu uso tanto na parte externa quanto na interna. O gesso acartonado é composto de gesso, água e aditivos, mas só pode ser utilizado na parte interna da edificação e não apresenta função estrutural. Além dos fechamentos internos e externos, existe a possibilidade de utilizar materiais que podem contribuir com o desempenho térmico e acústico no sistema LSF. No Brasil, o preenchimento utilizado entre as placas de revestimento externas e internas geralmente é realizado com lã de vidro ou lã de rocha. As paredes do sistema também podem ser constituídas pelo uso de diferentes materiais utilizados em conjunto ou não, e o seu correto funcionamento depende da sua disposição e características do local da edificação, como o uso de barreiras de vapor na parte externa do sistema, de selantes nos perfis, dentre outros materiais (CONSUL STEEL, 2015). Quando bem conservadas, as paredes externas protegem o aço do sistema, podendo proporcionar uma vida útil de pelo menos 200 anos aos perfis metálicos (BAJAD, 2022).

Figura 1 – Componentes do sistema LSF.



Fonte: Crasto, Freitas e Santiago, 2012

Para que o sistema LSF funcione corretamente, é necessário que os conectores sejam utilizados de maneira apropriada e a montagem seja feita conforme a proposta

arquitetônica. Quanto mais industrializado for o projeto, mais racionalizado será o canteiro de obras. No Brasil, os conectores, como os parafusos auto atarraxantes e os auto perfurantes são os mais comuns nesse tipo de estrutura (RODRIGUES E CALDAS, 2016). Esses parafusos têm uma proteção similar à estrutura galvanizada e devem fixar não só os perfis de aço como também os demais elementos, como as placas de fechamento (CRASTO, FREITAS E SANTIAGO, 2012). Para evitar problemas relacionados à umidade do solo, é recomendado elevar a construção e colocá-la sobre uma base feita de concreto armado (SANTOS, 2017).

As instalações elétricas, hidráulicas e telefônicas devem ser feitas conforme a ABNT NBR 15253:2014 (Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis estruturais reticulados em edificações - Requisitos gerais). Para isso, as dimensões máximas e as distâncias mínimas dos furos dessas instalações são pré-determinadas no projeto, podendo ser nas almas dos perfis U enrijecido, nos painéis estruturais ou nas vigas.

Conforme Santos, Martins e Silva (2014), a taxa de reciclagem e reutilização do aço pode ultrapassar os 95%, no sistema construtivo LSF. Em relação aos impactos econômicos, a velocidade da construção é uma aliada a escala da produção, sem perder a qualidade. No caso de demolição, a desmontagem é rápida e simples devido às conexões aparafusadas do sistema. Ademais, devido à leveza dos elementos construtivos e às técnicas de montagem, os acidentes de trabalho nos canteiros de obra são reduzidos nesse tipo de sistema construtivo.

Santos, Martins e Silva (2014) discorreram acerca das pontes térmicas causadas pela alta condutividade térmica do aço, que podem comprometer o desempenho térmico da edificação e, conseqüentemente a eficiência energética do sistema, se não forem corretamente tratadas por meio do envelopamento do edifício. Esse fenômeno é um problema, principalmente para os climas frios. Além disso, em regiões em que a umidade relativa do ar é elevada, podem ocorrer fenômenos de condensação, devido à queda de temperatura local, que ocorre no interior dos elementos construtivos. Já em locais em que o clima temperado continental é predominante, onde há grandes variações diárias de temperatura, a baixa inércia térmica do LSF pode gerar desconforto para os ocupantes e conseqüentemente, maior consumo energético, por meio de aquecedores e/ou aparelhos de resfriamento. De acordo com Santos (2017),

para que a construção em LSF tenha eficiência energética, o clima do local e o comportamento dos ocupantes, como o tipo de utilização e o horário principal de ocupação da edificação, são fatores que devem ser levados em consideração na fase de concepção do projeto.

Assim como as pontes térmicas, os perfis metálicos também são responsáveis pelas pontes acústicas, que são as vibrações sonoras transmitidas por meio dos perfis de aço dispostos entre o revestimento externo e interno da parede. Elas podem ser mais críticas do que o som aéreo propagado por meio da cavidade de ar existente entre os revestimentos (ROQUE, SANTOS E PEREIRA, 2019). Segundo Paul, Radavelli e Silva (2015), há vários parâmetros a serem considerados no isolamento acústico do sistema LSF, como a massa, a rigidez e o espaçamento do painel, além do preenchimento das cavidades, perfis e tipo de conexões entre os painéis e a estrutura de aço.

1.1.1 Componentes do sistema *Light steel Framing* (LSF)

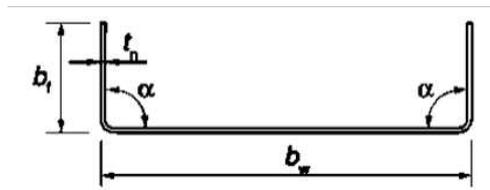
A utilização do aço em estruturas do tipo framing em edifícios familiares começou após a Segunda Guerra Mundial, substituindo a madeira nesse tipo de construção, em um sistema conhecido como *wood framing* (CONSUL STEEL, 2015). O aço galvanizado, comumente usado nos perfis do LSF, é formado por uma chapa de aço laminado coberto por uma camada de zinco fundido nos dois lados da chapa, formando um material resistente à corrosão e dobrável. Os perfis estruturais do LSF são obtidos por meio de prensa dobradeira ou por perfilagem em matrizes rotativas, podendo ser laminados a frio ou a quente (CRASTO, FREITAS E SANTIAGO, 2012).

No país, existem diferentes tipos de perfis comercializados com seções e aplicações distintas (Tabela 1 e Tabela 2), a maioria deles são identificados por uma letra (por exemplo, U). O perfil U (guia) apresenta alma (bw), mesa (bf), também identificada por flange ou aba, espessura (tn) e pode apresentar ou não, o enrijecedor (D). Para evitar a corrosão e aumentar a durabilidade, os perfis de aço geralmente são galvanizados. Eles são utilizados em todos os componentes de construção LSF, como paredes

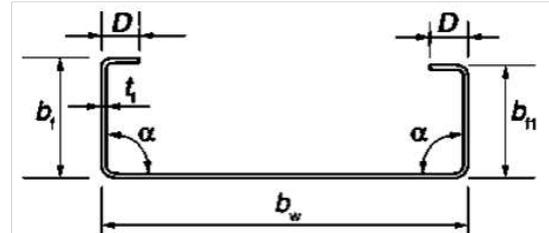
externas e internas, telhados e lajes, exceto nas fundações, que geralmente são feitas em concreto armado. Ademais, a resistência e a rigidez do perfil de aço estão relacionadas com a espessura do aço e do formato da seção transversal (RODRIGUES E CALDAS, 2016).

Tabela 1 - Tipos e denominações de perfis comerciais.

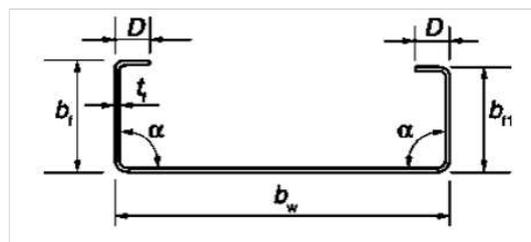
Tipo	Denominação	Descrição	Utilização
Guia	<i>U</i>	Imagem a)	Composição de paredes, lajes secas, coberturas e revestimentos
	<i>Ue</i>	Imagem b)	Composição de paredes, lajes secas, coberturas e revestimentos (sistema de encaixes estampados)
Montante	<i>M</i>	Imagem c)	Composição de paredes, lajes secas, coberturas e revestimentos



a) Perfil do tipo guia U



b) Perfil do tipo guia Ue



c) Perfil do tipo montante M

Fonte: ABNT NBR 15253:2014.

Tabela 2 - Tipo de perfis especiais utilizados no sistema LSF no Brasil.

Seção transversal	Denominação ABNT NBR 6355	Utilização
	U simples $U\ b_w \times b_f \times t_f$	Guia Ripa Bloqueador Guia de entrepiso Terça
	U enrijecido $U_e\ b_w \times b_f \times D \times t_f$	Bloqueador Enrijecedor de alma Montante Verga Viga Terça Guia enrijecida (sistema com encaixes estampados)
	Cartola $Cr\ b_w \times b_f \times D \times t_f$	Ripa
	Cantoneira de abas desiguais $L\ b_{f1} \times b_{f2} \times t_f$	Cantoneira

Fonte: ABNT NBR 16970:2022.

A placa de OSB é um dos materiais mais utilizados para o fechamento do sistema LSF, como em paredes, telhados, pisos e contrapisos (CRASTO, FREITAS E SANTIAGO, 2012; APA, 2017). Ela é composta por tiras de madeira retangulares dispostas em camadas cruzadas entre si, organizadas em esteiras formando um painel, conforme mostra a Figura 2. Essas tiras são coladas com adesivos resistentes à água, assim como as bordas, que recebem um selante para proteger contra a penetração de umidade durante o transporte. A placa de OSB pode ser fabricada com árvores jovens e de pequeno porte e, cerca de 85% a 90% da tora da madeira é utilizada para a fabricação da placa (APA, 2017).

Figura 2 - Placas de OSB.



Fonte: LP BRASIL (2023).

Ainda conforme a APA (2017), os painéis de OSB para uso externo são resistentes à umidade, ao ressecamento e podem ser expostos às variações climáticas a longo prazo. As espessuras comumente encontradas estão entre 9,5 mm e 19,00 mm. Além da sua estabilidade dimensional e estrutural, a placa de OSB pode ser fabricada em dimensões maiores que as tipicamente usadas (2440 mm por 1220 mm), com o intuito de diminuir as juntas durante o fechamento do sistema LSF.

A placa cimentícia é outro componente comumente utilizado no fechamento do sistema LSF. Ela é constituída pela mistura de cimento Portland com agregados e aditivos com reforços que podem ser de fibras, fios, filamentos ou telas, com exceção de fibras de amianto, de acordo com a NBR 16970-1 (2022). Elas são utilizadas tanto no fechamento externo (Figura 3) quanto no interno, como em áreas molhadas e expostas a intempéries. Para pisos e lajes é indicado utilizar outro substrato de apoio, como as placas de OSB, uma vez que as placas cimentícias apresentam baixa resistência à flexão (AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2015). Conforme Zenerato *et. al* (2019), as placas cimentícias mais utilizadas no sistema LSF são feitas com cimento Portland e fibras, vegetais ou minerais. No entanto, em países como a China e os Estados Unidos, há também a produção de placas com óxido de magnésio, conhecidas também por placas planas magnesianas.

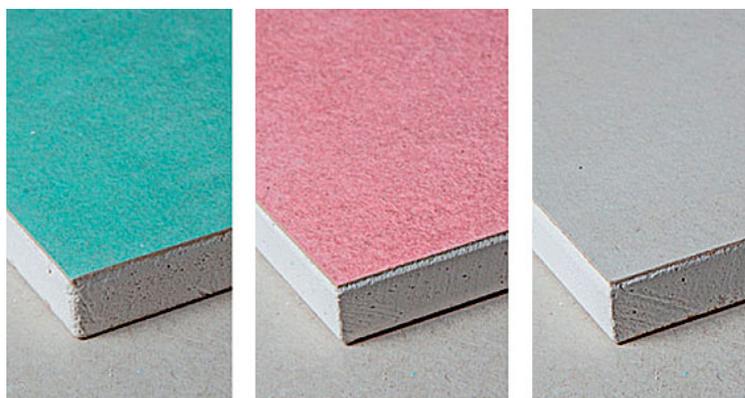
Figura 3 - Fechamento da face externa dos quadros estruturais com placa cimentícia.



Fonte: Instituto De Pesquisas Tecnológicas Do Estado De São Paulo - IPT (2015).

Para o fechamento interno das edificações é comumente usada a placa de gesso acartonado. Elas são compostas por gesso, água e aditivos, revestidas externamente por duas lâminas de papel Kraft, conforme mostra a Figura 4. Elas são muito utilizadas também no sistema *drywall*. Nesse tipo construtivo, os perfis de aço leve galvanizado também constituem o sistema. No entanto, devido à menor espessura da parede e à menor resistência do perfil de aço, o *drywall* é utilizado apenas para vedação, e não apresenta função estrutural (ABNT NBR 16970, 2022; JOHN E CINCOTTO, 2017).

Figura 4 - Chapas de gesso acartonado no sistema LSF.



Fonte: <http://www.placarvestimento.com.br/produtos/gesso-acartonado/>

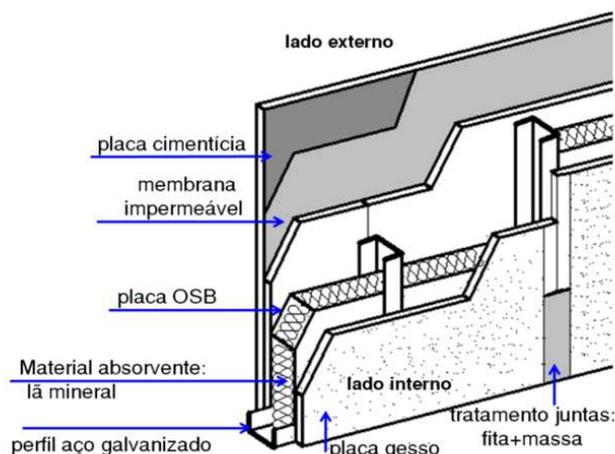
Segundo John e Cincotto (2017), o mercado de gesso acartonado é o que mais cresce na indústria nacional do gesso, devido, principalmente, à velocidade de endurecimento do material e à facilidade de aplicação nos sistemas construtivos. A placa é encontrada no mercado com espessuras entre 9,5 mm e 15 mm e dimensões entre 600 mm por 1200 mm e 1800 mm por 3600 mm. Além disso, em geral, o gesso pode amenizar a propagação da ação de incêndio, uma vez que a partir de 140°C, o gesso começa a liberar água, reduzindo a temperatura de superfície.

Atualmente, no Brasil, existem três tipos de placa: a placa Standard (ST) para aplicação em paredes em áreas secas; a placa resistente à umidade (RU), ou placa verde, para paredes em ambientes sob a ação intermitente e limitada de umidade, e a placa resistente ao fogo (RF), ou placa rosa, para paredes em áreas secas, com exigências especiais em relação à resistência ao fogo (Figura 4) (CRASTO, FREITAS E SANTIAGO, 2012).

1.2. Desempenho térmico do sistema *Light Steel Framing* (LSF)

O sistema comumente utilizado para o desempenho térmico e acústico do LSF, conforme estudos e técnicas atuais, é feito por meio da combinação de placas de revestimento afastadas entre si, preenchendo o espaço entre elas, com as lãs minerais, sendo que as mais utilizadas no Brasil são a lã de vidro e a lã de rocha (CRASTO, FREITAS E SANTIAGO, 2012). Esses dois materiais apresentam alta absorção sonora e baixa condutividade térmica. A Figura 5 mostra a lã mineral no sistema LSF entre as placas de revestimento.

Figura 5 - Componentes utilizados em uma parede típica em LSF.



Fonte: Radavelli (2014).

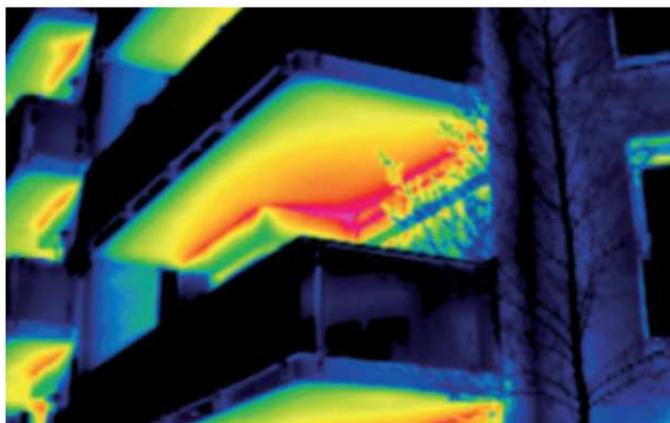
A ligação entre a queima de combustíveis fósseis e a liberação de dióxido de carbono no meio ambiente com o aquecimento global e com eventos climáticos extremos é evidente. Por isso, a redução do consumo energético em novos edifícios é uma das grandes prioridades, atualmente. As soluções projetuais, o clima, as características térmicas e físicas dos materiais da edificação, as peculiaridades de uso e ocupação do solo e a eficiência do sistema construtivo são fatores que contribuem diretamente com a demanda energética de resfriamento ou aquecimento de uma edificação. Além disso, a possibilidade de reaproveitamento e reciclagem dos elementos que compõem a edificação, como acontece com o LSF, colabora para a sustentabilidade da construção (GONÇALVES E BODE, 2015; SANTOS, 2017).

Além da inquestionável necessidade de redução de consumo energético nas edificações, o projeto arquitetônico priorizando o desempenho térmico pode proporcionar ao usuário acesso controlado, ou não, ao sol, aproveitamento da iluminação natural, ar fresco e espaços de transição que permite a integração do meio interior com o exterior. Dessa forma, a redução do consumo de energia é resultado de um projeto pensado no bem-estar do ocupante. Ademais, não existem soluções únicas de projeto, de sistemas e materiais construtivos ou de tecnologias para alcançar um desempenho térmico satisfatório da edificação. Isso se deve aos diversos tipos de clima (GONÇALVES E BODE, 2015). Por exemplo, o uso de edificações com elevada inércia térmica pode não ser uma solução adequada, se não houver

estratégias de ventilação, em determinados climas e estações do ano, no contexto do clima brasileiro (SOUZA, AMPARO E GOMES, 2011). A inércia térmica é a tendência do material de resistir a mudanças de temperatura. Devido à leveza e a quantidade reduzida dos elementos construtivos e ao elevado número de pontes térmicas, as construções em LSF apresentam uma baixa inércia térmica. Na prática, essa característica permite que os edifícios em LSF apresentem maiores flutuações de temperatura interna, sendo ideal para climas amenos. Em climas extremamente frios é necessário verificar as condições de envelopamento da edificação (ROQUE, *et al*; ROQUE, VICENTE E ALMEIDA, 2021a; ROSA, 2018).

Ponte térmica é a excessiva perda ou ganho de calor em determinados pontos de uma estrutura metálica. Este efeito reduz a resistência térmica dos painéis e aumenta os custos de energia para aquecimento do edifício, principalmente em regiões de clima frio na maior parte do ano. No entanto, elas afetam menos a demanda de energia quando há necessidade de resfriamento da edificação. Além disso, painéis verticais apresentam isolantes mais finos do que os painéis horizontais do sistema, por isso os efeitos das pontes térmicas são maiores nas paredes (GOMES, SOUZA E TRIBESS, 2013; MILOVANOVIĆ, B. *et al.*). As pontes térmicas ocorrem principalmente nas interfaces entre paredes, pisos e telhados e onde há varandas e coberturas (Figura 6). É estimado que as pontes térmicas são responsáveis por entre 20 % a 30% das perdas de calor por condução (WAY, LAWSON E SANSOM, 2016). Conforme ABNT NBR 15220-2:2005, a condutividade térmica dos materiais isolantes utilizados no sistema é cerca de 0,04 W/m.K, enquanto para os componentes feitos de aço é cerca de 1000-1500 vezes maior, 50 W/m.K, facilitando, dessa forma, a formação das pontes térmicas.

Figura 6 - Imagem térmica em uma varanda com temperatura mais elevada no encontro entre a parede e a laje.



Fonte: Way, Lawson e Sansom (2016).

A transferência de calor pode ocorrer por meio de três maneiras: condução, convecção e radiação. Na condução, o fluxo de calor ocorre por meio dos materiais, ela é a principal forma de propagação de calor em um edifício e os isolantes térmicos são responsáveis pela resistência do fluxo de calor condutivo. A convecção é o transporte de energia térmica pelo ar e a radiação é a troca de energia térmica por meio de ondas eletromagnéticas. Dessa forma, a radiação na superfície externa de um edifício na forma de ganho de energia solar pode ser muito significativa (AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, 2012).

Uma forma de verificar o desempenho térmico de edifícios em LSF é calculando a transmitância térmica (U) e a capacidade térmica (C) da envoltória da edificação. A transmitância térmica (U) é a transferência de calor por unidade de tempo e área de um elemento construtivo, dada em $W/(m^2 \cdot K)$. A capacidade térmica (C) corresponde à quantidade de calor requerida para alterar a temperatura de um sistema em uma unidade, dada em $kJ/(m^2 \cdot K)$ e a resistência térmica (R) é o resultado da divisão da diferença de temperatura observada entre a superfície de um elemento construtivo e a densidade do fluxo de calor, dada por $(m^2 \cdot K)/W$, de acordo com a ABNT NBR 15575-1:2021 (Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais).

Conforme a ABNT NBR 15575-4:2021, as vedações verticais externas devem apresentar valores de desempenho térmico para a transmitância térmica (U),

conforme a Tabela 3 e, valores de capacidade térmica, conforme a Tabela 4. E, devem atender o Zoneamento Bioclimático Brasileiro (Figura 7) em que a edificação está inserida, de acordo a ABNT NBR 15220-3: 2005 (Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social). E, precisam atender também, a absorvância à radiação solar na superfície externa da parede, dada pela razão da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície sobre a taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície, de acordo com a ABNT NBR 15575-4:2021.

Tabela 3 - Transmitância térmica de referência para paredes externas, onde α é a absorvância à radiação solar da parede.

Transmitância térmica de paredes (U) - W/(m².K)		
Zonas Bioclimáticas 1 e 2	Zonas Bioclimáticas 3 a 8	
$U \leq 2,7$	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$
	$U \leq 3,7$	$U \leq 2,5$

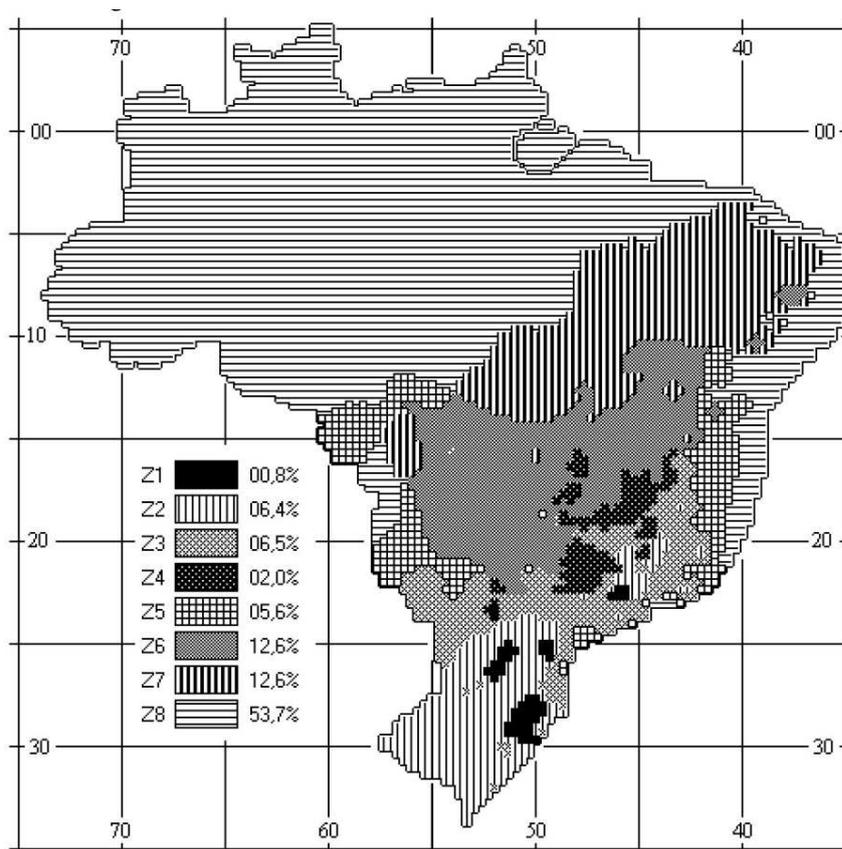
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15575-4:2021.

Tabela 4 - Capacidade térmica de referência para paredes externas.

Capacidade térmica de paredes (CT) - KJ/(m².K)	
Zonas Bioclimáticas 1 a 7	Zona Bioclimática 8
$CT \geq 130$	Sem requisito

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15575-4:2021.

Figura 7 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro



Fonte: ABNT NBR 15220-3:2005.

Ainda conforme a ABNT NBR 15575-1:2021, a condutividade térmica (λ) é a característica física de um material homogêneo e isotrópico, em que se constata um fluxo de calor constante, dada por W/m.K. Conforme a ABNT NBR 16970:2022, os isolantes térmicos de estruturas em LSF, como lã de vidro, lã de rocha ou similares, devem apresentar valores de condutividade térmica (λ) menores que 0,061 W/m.K, a depender do material, e que não afetem a segurança ao fogo.

Conforme a ABNT NBR 15220-2:2022, os valores de resistência térmica (R), transmitância térmica (U) e capacidade térmica (C) podem ser determinados por meio de cálculo simplificado, e então, os resultados encontrados são comparados com os valores estabelecidos pela ABNT NBR 15575-4:2021. A ABNT NBR 15220-2:2022 sugere que não seja utilizado o cálculo simplificado quando o isolamento é conectado por meio de elementos feitos de metal, devido a alta transmitância térmica, como é o

caso das paredes em LSF. No entanto, a norma anterior, a ABNT NBR 15220-2:2005, não menciona essa recomendação.

No cálculo simplificado, a resistência térmica total (R_{tot}) é calculada com base na Equação 1.1, indicada para elementos compostos por camadas termicamente não homogênea, de acordo com a ABNT NBR 15220-2:2022:

$$R_{tot} = \frac{R_{tot;upper} + R_{tot;lower}}{2} \quad (1.1)$$

sendo, R_{tot} a resistência térmica total, em m^2K/W ; $R_{tot;upper}$ é o limite superior da resistência térmica total, em m^2K/W (EQUAÇÃO 1.2); $R_{tot;lower}$ é o limite inferior da resistência térmica total (EQUAÇÃO 1.5).

Para o limite superior ($R_{tot;upper}$), a ABNT NBR 15220-2:2022 sugere que o fluxo de calor seja unidimensional e perpendicular às camadas do componente analisado. Dessa forma, o cálculo de $R_{tot;Upper}$ é dado pela Equação 1.2.

$$\frac{1}{R_{tot;upper}} = \frac{f_a}{R_{tot;a}} + \frac{f_b}{R_{tot;b}} + \dots + \frac{f_q}{R_{tot;q}} \quad (1.2)$$

Onde, $R_{tot;upper}$ é o limite superior da resistência térmica total, em m^2K/W ; $R_{tot;a}$, $R_{tot;b}$, ..., $R_{tot;q}$ são as resistências térmicas de cada seção de uma parede analisada, conforme a Equação 1.3 e, F_a , F_b , ..., F_q são as áreas fracionadas de cada seção.

$$R_{tot} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (1.3)$$

Onde, R_{tot} é a resistência térmica total, em m^2K/W ; R_{si} é a resistência superficial interna, em m^2K/W (Tabela 5); R_1 , R_2 ... R_n são as resistências térmicas de projeto para cada camada, em m^2K/W e; R_{se} é a resistência superficial externa, em m^2K/W (Tabela 5).

Tabela 5 – Valores utilizados para R_{si} e R_{se} .

Resistência superficial - m^2K/W	Direção do fluxo de calor
	Horizontal
R_{si}	0,13
R_{se}	0,04

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15220-2:2022.

O cálculo da resistência térmica é dado pela Equação 1.4 (ABNT NBR 15220-2, 2022):

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (1.4)$$

sendo, R é a resistência térmica, em m^2K/W ; d é a espessura da camada de material do componente, em m e; λ é a condutividade térmica de projeto para o material, em $W/(mK)$.

Para o cálculo do limite inferior ($R_{tot;lower}$), a ABNT NBR 15220-2:2022 admitiu-se que as camadas paralelas à superfície do componente são isotérmicas. Dessa forma, a resistência térmica é calculada em cada camada não homogênea de uma parede, conforme a Equação 1.5:

$$\frac{1}{R_j} = \frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_q}{R_{qj}} \quad (1.5)$$

Sendo, R_j a resistência térmica equivalente, em m^2K/W ; R_{aj} , R_{bj} ... R_{qj} os valores da resistência térmica de cada camada não homogênea para cada seção, em m^2K/W . Dessa forma, o limite mínimo é calculado conforme a Equação 1.3.

A transmitância térmica para o cálculo simplificado, é dada pela Equação 1.6 (ABNT NBR 15220-2, 2022):

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad (1.6)$$

sendo, U a transmitância térmica, em $W/(m^2K)$; R_{tot} a resistência térmica total, em m^2K/W .

Para o cálculo da capacidade térmica (C) de um componente composto por diferentes camadas, é utilizada a Equação 1.7 (ABNT NBR 15220-2, 2022).

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{Tn}}} \quad (1.7)$$

Onde CT_n é a capacidade térmica do componente da seção n , determinada pela Equação 1.8, em $\text{kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ e; A_n é a área da seção n , em m (ABNT NBR 15220-2, 2022).

$$C = \sum_{j=1}^n e_j \times c_j \times \rho_j \quad (1.8)$$

Onde, C é a capacidade térmica, em $\text{kJ}/(\text{m}^2\text{K})$; e_j é a espessura da camada j , em m ; c_j é o calor específico do material da camada j , em $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; ρ_j é a densidade de massa aparente do material da camada j , em kg/m^3 .

A resistência térmica calculada conforme a ABNT NBR 15220-2: 2005 é dada pela Equação 1.9 e é preciso fracionar a parede em seções, assim como no cálculo da resistência térmica total (R_{tot}). A norma de 2005 apresenta as mesmas equações que a norma atual para o cálculo de capacidade térmica e transmitância térmica.

$$R_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (1.9)$$

Dentre os materiais comumente usados no interior das paredes do sistema LSF para contribuir com o isolamento térmico, estão as lãs minerais. Na Tabela 6, pode-se observar a resistência térmica (R) e a condutividade térmica (λ) da lã de vidro. Quanto maior a espessura da lã de vidro, maior a resistência térmica. A Tabela 7 mostra a similaridade entre a condutividade térmica da lã de rocha, lã de vidro e a lã de PET.

Tabela 6 - Resistência Térmica e Condutividade Térmica da lã de vidro.

Espessura da lã de vidro	Condutividade Térmica	Resistência Térmica
50 mm	0,042	1,19
75 mm	0,042	1,78
100 mm	0,042	2,38

Fonte: Isover - Saint Gobain (2005).

Tabela 7 - Condutividade térmica da lã de rocha, lã de vidro e a lã de PET.

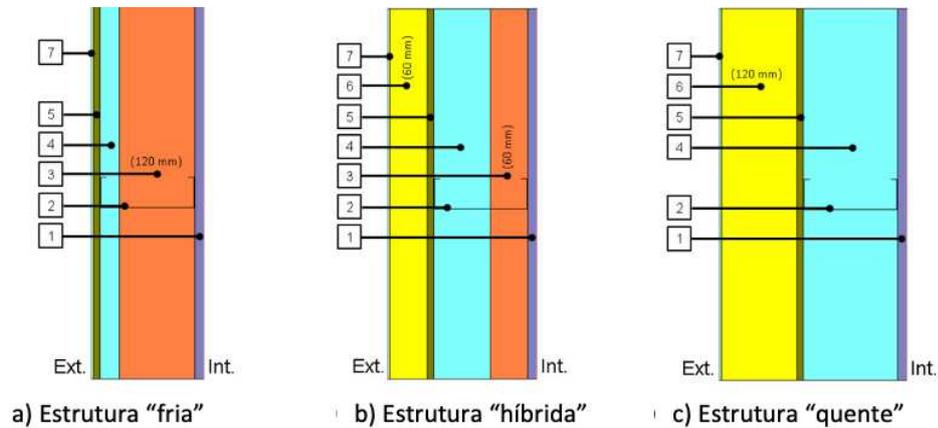
Material	Condutividade Térmica (W/m.K)
Lã de rocha	0,045
Lã de vidro	0,045
Lã de PET	0,038

Fonte: Dias (2017).

A vermiculita também é um mineral que pode contribuir com o desempenho térmico da edificação. Ela pertence a um grupo de minerais denominado silicato de alumínio-ferro-magnésio, apresenta baixa densidade e em altas temperaturas, se expande, criando espaços vazios entre as lamelas de vermiculita, o que a configura como um material isolante (FRANÇA *et al.*, 2016).

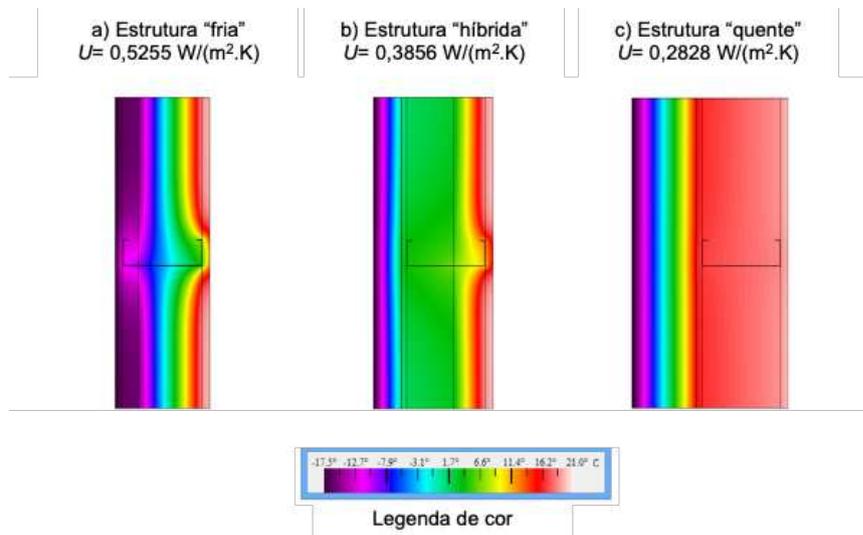
Santos, Martins e Silva (2014) mostraram em sua pesquisa três tipos de configurações de paredes do sistema LSF, a depender da posição dos materiais de isolamento. O primeiro tipo foi chamado de estrutura “fria”, o segundo tipo de “híbrida” e o terceiro tipo de “quente”. No primeiro tipo (fria), Figura 8 (a), todo o material para o isolamento térmico foi inserido na alma do perfil, no entanto essa configuração não é apropriada para climas predominantemente frios, pois pode ocorrer condensação intersticial nos perfis de aço e nas suas proximidades. Esse tipo fenômeno ocorre quando o vapor d’água se condensa no interior dos perfis de aço, pois o interior dos elementos estruturais apresenta uma temperatura mais baixa que o ambiente em sua volta, contribuindo com a deterioração dos materiais presentes; no segundo tipo (híbrida), Figura 8 (b), os autores apresentaram um isolamento na alma do perfil e na sua parte externa e; no terceiro tipo (quente), Figura 8 (c), todo o isolamento foi colocado fora da estrutura de aço. Os autores consideraram a Figura 8 (c) a melhor opção em regiões de clima predominantemente frio, pois ela reduz o risco de condensação intersticial e maximiza a inércia térmica da envoltória do edifício, como mostra a Figura 9.

Figura 8 - Classificação das construções LSF, dependendo da posição dos materiais de isolamento (Materiais: 1 – Placa de gesso acartonado; 2 - LSF; 3 - Lã mineral; 4 - Ar; 5 - OSB; 6 - EPS; 7 – ETICS- External Thermal Insulation Composite Systems).



Fonte: Adaptado de Santos, Martins e Silva (2014).

Figura 9 - Distribuição da temperatura no interior das paredes do LSF.



Fonte: Adaptado de Santos, Martins e Silva (2014).

Roque, Santos e Pereira (2019) corroboraram a pesquisa de Santos, Martins e Silva (2014), segundo a pesquisa realizada pelos autores, foi concluído que as construções do tipo "fria", tipicamente utilizadas no Brasil, foram fortemente afetadas pelas pontes térmicas, conforme mostram os valores de transmitância térmica obtidos na

Tabela 8, em que U_{hom} despreza os perfis de aço; U_{real} considera os perfis de aço e; ΔU é a diferença em porcentagem da transmitância térmica entre os corpos de prova contendo e não contendo os perfis de aço. Na parede tipo "fria", com lã de rocha de

25 mm de espessura no interior da parede considerando os perfis de aço, apresentou 18% de transmitância térmica a mais, em relação ao sistema sem considerar os perfis de aço. Enquanto em estruturas do tipo “quente”, como o material para o isolamento térmico foi colocado apenas na parte externa da parede, não houve exposição dos perfis ao meio externo e, conseqüentemente, houve um melhor envelopamento do sistema, com menor incidência de pontes térmicas. Nas paredes do tipo “híbrida”, apesar do isolamento externo apresentar menor espessura, a camada externa de EPS (poliestireno expandido) permitiu o envelopamento das paredes. Outra maneira de diminuir a transmitância térmica, é por meio de aberturas em formas de fenda nos perfis, dificultando dessa forma, o fluxo de calor (Figura 10) (YANG *et al.*, 2023).

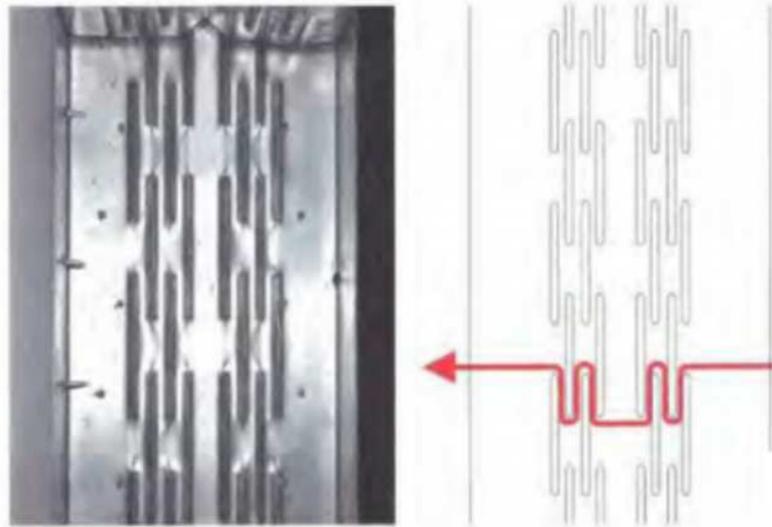
Tabela 8 - Visão geral dos valores de transmitância térmica obtidos.

$d^{(1)}$ [mm]	Estrutura “fria”			Estrutura “híbrida”			Estrutura “quente”		
	U_{hom} [W.m ⁻² .K ⁻¹]	U_{real}	ΔU [%]	U_{hom} [W.m ⁻² .K ⁻¹]	U_{real}	ΔU [%]	U_{hom} [W.m ⁻² .K ⁻¹]	U_{real}	ΔU [%]
25	0.76	0.90	18	0.75	0.81	8	0.75	0.76	1
50	0.50	0.69	38	0.50	0.55	10	0.49	0.50	2
75	0.37	0.57	54	0.37	0.43	16	0.37	0.37	0
100	0.30	0.50	67	0.30	0.35	17	0.29	0.29	0
125	0.25	0.44	76	0.25	0.30	20	0.24	0.24	0
150	0.22	0.40	82	0.21	0.26	24	0.21	0.21	0

(1) Espessura total do
isolamento

Fonte: Adaptado de Roque, Santos e Pereira (2019).

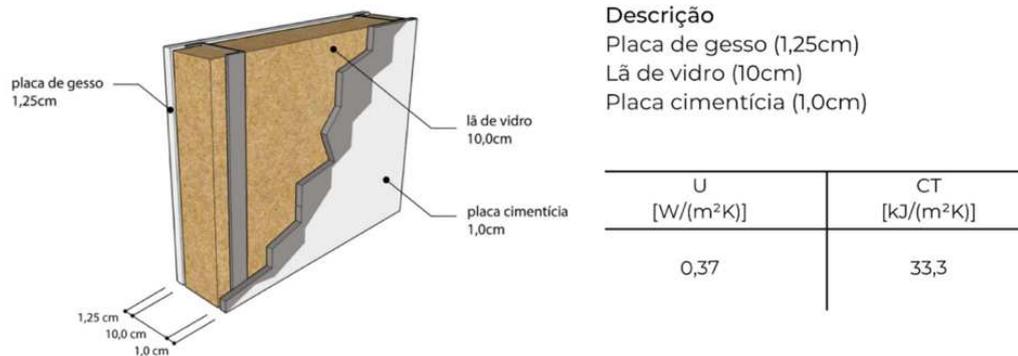
Figura 10 - Ranhuras na alma do perfil para reduzir o fluxo de calor.



Fonte: Adaptado de Santos, Martins e Silva (2014).

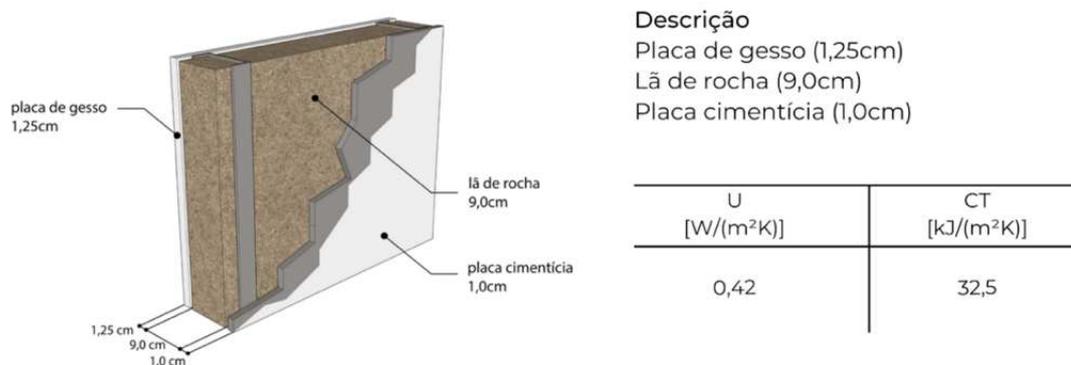
Em configurações tipicamente utilizadas no Brasil, conforme o PROJETEEE (2023), as propriedades térmicas das paredes de LSF, fechadas por placa de gesso acartonado internamente e placa cimentícia externamente, apresentaram transmitância térmica (U) de $0,37 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ e capacidade térmica (C) de $33,3 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, com lã de vidro na cavidade interna do sistema (Figura 11). Com o uso da lã de rocha, o valor foi de $0,42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ para transmitância térmica (U) e de $32,5 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ para capacidade térmica (C) (Figura 12). De acordo com a ABNT NBR 15575-4:2021, em relação a capacidade térmica (C), o sistema não atendeu aos requisitos da norma para as Zonas Bioclimáticas de 1 a 7, mas em relação a transmitância térmica (U), a depender da absorvância à radiação solar na superfície externa, o sistema atendeu a norma. Os parâmetros foram determinados conforme o cálculo simplificado da ABNT NBR 15220-2:2022.

Figura 11 – Propriedade térmica das paredes de LSF com lã de vidro.



Fonte: PROJETEEE (2023).

Figura 12 - Propriedade térmica das paredes de LSF com lã de rocha.



Fonte: PROJETEEE (2023).

Caldas *et al.* (2016) realizaram ensaios em parede de LSF por meio de simulação computacional térmica e por cálculo simplificado da ABNT NBR 15220-2:2005. Segundo os autores, os dados obtidos por meio do cálculo simplificado atenderam a norma de desempenho, somente em relação a transmitância térmica (U). Em relação a capacidade térmica (C), os resultados também ficaram abaixo dos valores exigidos pela norma. Contudo, em relação aos resultados obtidos pela simulação computacional, todas as configurações de parede (com materiais isolantes e sem) atenderam os critérios de temperatura máxima e mínima definidos na norma ABNT NBR 15575-4:2013, para a cidade de Brasília, Zona Bioclimática 4. Assim como Caldas *et al.* (2016), outros autores realizaram simulações computacionais em

paredes de LSF. Gomes (2012), Namur *et al.* (2019), Ribas e Souza (2017) obtiveram resultados satisfatórios para o desempenho térmico por meio de simulação computacional no sistema LSF, de acordo com a norma de desempenho. Dessa forma, por meio do método de simulação computacional, os requisitos de desempenho térmico de paredes de LSF, estabelecidos pela ABNT NBR 15575-4:2021, podem ser atendidos, mesmo quando o método de cálculo simplificado da ABNT NBR 15220-2:2022 não atender a norma de desempenho.

Edificações com alta capacidade térmica são ideais para climas quentes e secos, devido a estabilidade térmica proporcionada pela massa da parede, dificultando o superaquecimento do ambiente interno, bem como para climas com amplitude térmica elevada (clima tropical de altitude). Já para climas quentes e úmidos, recomenda-se o uso de paredes com baixa inércia térmica, junto a estratégias de sombreamento e ventilação (Tabela 9). O atendimento a essas recomendações contribui com a eficiência energética da edificação (GONÇALVES E BODE, 2015). Em climas muito dinâmicos, são necessárias soluções e avaliações específicas para o alcance do desempenho térmico no sistema LSF (ROQUE, VICENTE E ALMEIDA, 2021b).

Tabela 9 - Recomendações arquitetônicas de paredes conforme o clima.

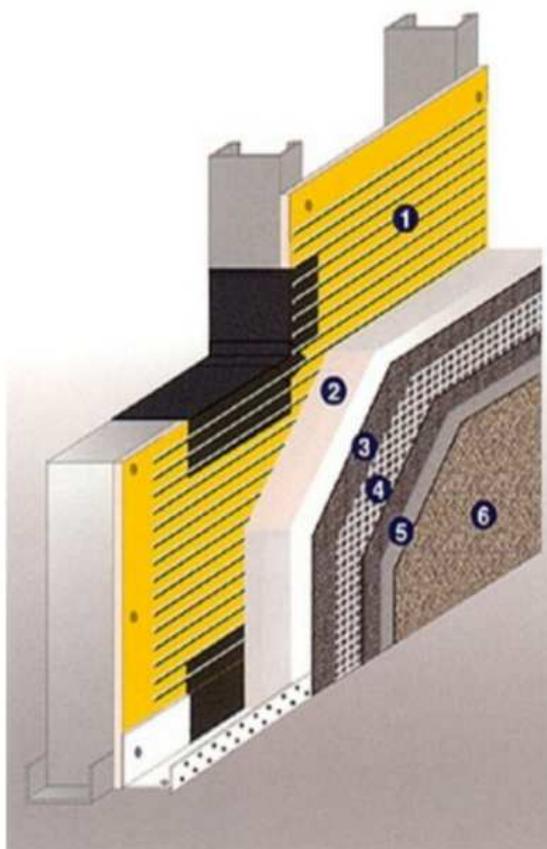
Paredes	Tropical Atlântico	Tropical de Altitude	Tropical	Temperado	Quente e úmido	Quente e seco
Construções leves, baixa inércia térmica	X				X	
Construções maciças, alta inércia térmica		X	X	X		X
Paredes isoladas						
Cores claras	X	X			X	X
Cores médias a escuras				X		

Fonte: Adaptado de Ferreira, Souza e Assis (2014).

Em locais com o clima predominantemente frio, por exemplo, o sistema EIFS (*Exterior Insulation and Finish System*) colabora com o desempenho térmico do LSF, dificultando que os perfis de aço formem pontes térmicas junto ao sistema de vedação. Ele é feito de material isolante e é utilizado na parte externa dos painéis de fechamento junto com as lãs minerais utilizadas no interior dos painéis, conforme mostram Santos, Sá e Pereira (2019), onde o elemento 1 é a fixação ao substrato (placas de

fechamento); 2 são as placas de EPS (Poliestireno Expandido) ou outras placas de isolamento térmico; 3 é a rede em fibra que confere resistência mecânica ao revestimento; 4 é o revestimento base que protege o edifício, garantido a permeabilidade ao vapor e a impermeabilidade à água; 5 é o regulador de fundo; 6 é o revestimento final (Figura 13).

Figura 13 - Sistema EIFS

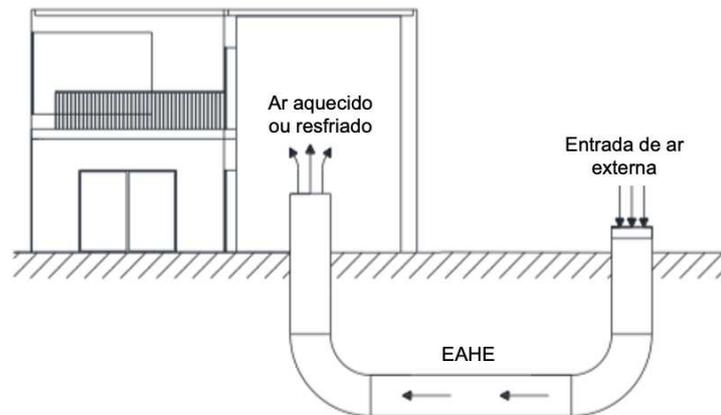


Fonte: Santos, Sá e Pereira (2019)

Além do sistema EIFS, Santos, Martins e Silva (2014) expuseram algumas outras alternativas relacionadas ao aumento da inércia térmica, uma vez que os edifícios em LSF apresentam baixa inércia térmica, que consistem em usar um isolamento térmico externo ao edifício, tal como materiais de construção maciços; além disso, os autores citaram a possibilidade de aproveitamento da grande massa térmica do solo, por meio de um sistema de energia geotérmico, como a utilização de sistemas EAHE (do inglês, *Earth-to-Air Heat Exchangers* ou trocadores de calor terra-ar), o sistema consiste em inserir dutos de ar dentro da terra e, dessa forma, o ar externo é forçado a fluir por

meio de um ventilador e percorrer o canal até chegar no edifício, seja resfriando ou aquecendo o ambiente. Segundo o estudo feito por Rosa (2018), o sistema apresentou melhor desempenho térmico quando o sistema está operando no modo de resfriamento (Figura 14).

Figura 14 – Esquema do sistema EAHE.



Fonte: Adaptado de Rosa (2018).

Para avaliação de desempenho térmico de diferentes sistemas, a simulação de energia solar é comumente feita por meio de lâmpadas. Isso se deve a facilidade de controlar a temperatura e permitir a realização de inúmeros ensaios. Além disso, a imprevisibilidade das condições atmosféricas pode dificultar a realização de ensaios em ambientes externos, devido a insolação inadequada, chuvas, nuvens, dentre outros fatores. Dessa forma, a utilização de simuladores solares por meio de lâmpadas facilita a realização de ensaios, além de apresentar baixo custo de uso (TAWFIK, TONNELIER E SANSOM, 2018).

Carrasco (2005) realizou ensaios de transferência de calor em paredes de madeira, utilizando como fonte de calor uma lâmpada de 500 W, confinada em um refletor em uma área de 15 cm x 25 cm. Na face correspondente ao lado externo da parede, foi colocado um termopar para medição de temperatura da fonte de calor e, no lado oposto, foram colocados três termopares para medir a transferência de calor (Figura 15). Por meio de uma aquisição de dados conectados aos termopares, foi feita a leitura da medição dos termômetros a cada 10 segundos. A fonte de calor ficou ligada por cerca de 6 horas e após esse período, o resfriamento da parede foi medido por 10

horas seguidas. Dessa forma, foi possível avaliar o desempenho térmico de paredes de madeira por meio do gráfico da Figura 16.

Figura 15 - Ensaio térmico de transferência de calor.

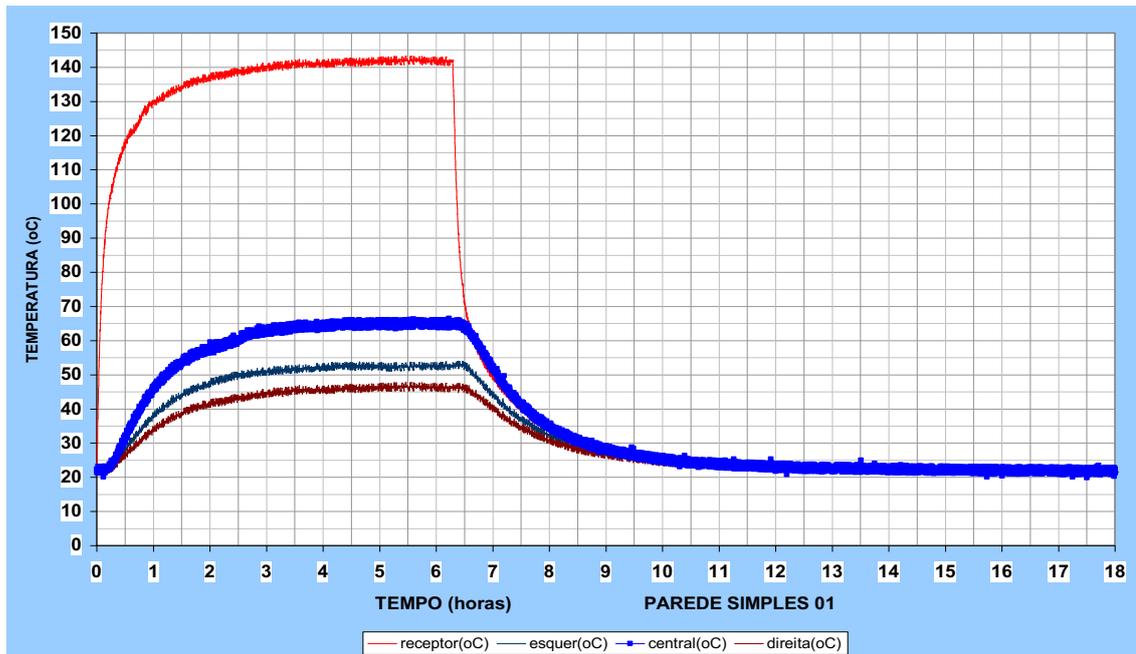


a) Vista externa da parede dupla para ensaio térmico com a fonte térmica utilizada.

b) Vista interna da parede dupla para ensaio térmico.

Fonte: Carrasco (2005).

Figura 16 – Gráfico de temperatura por tempo de parede dupla de madeira.



Fonte: Carrasco (2005).

Franzen (2015) realizou ensaios experimentais relacionados ao desempenho térmico nas vedações externas em paredes de LSF de 120 cm por 178 cm e comparou a diferença entre a camada externa e interna da parede, mantendo uma fonte aquecedora (painel com lâmpadas) a temperatura constante de 80°C por 60 minutos

(Figura 17). A autora utilizou materiais reciclados da construção civil, no miolo do painel de fechamento. Os painéis que apresentaram estuque sintético ou *base coat* (conjunto de massa polimérica hidro-repelente e tela de fibra de vidro) na parte externa, massa látex PVA na parte interna e resíduo industrial de fibra cerâmica no interior da parede, tiveram um aumento 0,3 °C na temperatura do centro do painel. Já o ensaio realizado na parede com nenhum tratamento térmico houve um aumento na temperatura de 17,6 °C na mesma região.

Figura 17 - Fonte térmica utilizada para o aquecimento da face externa do painel

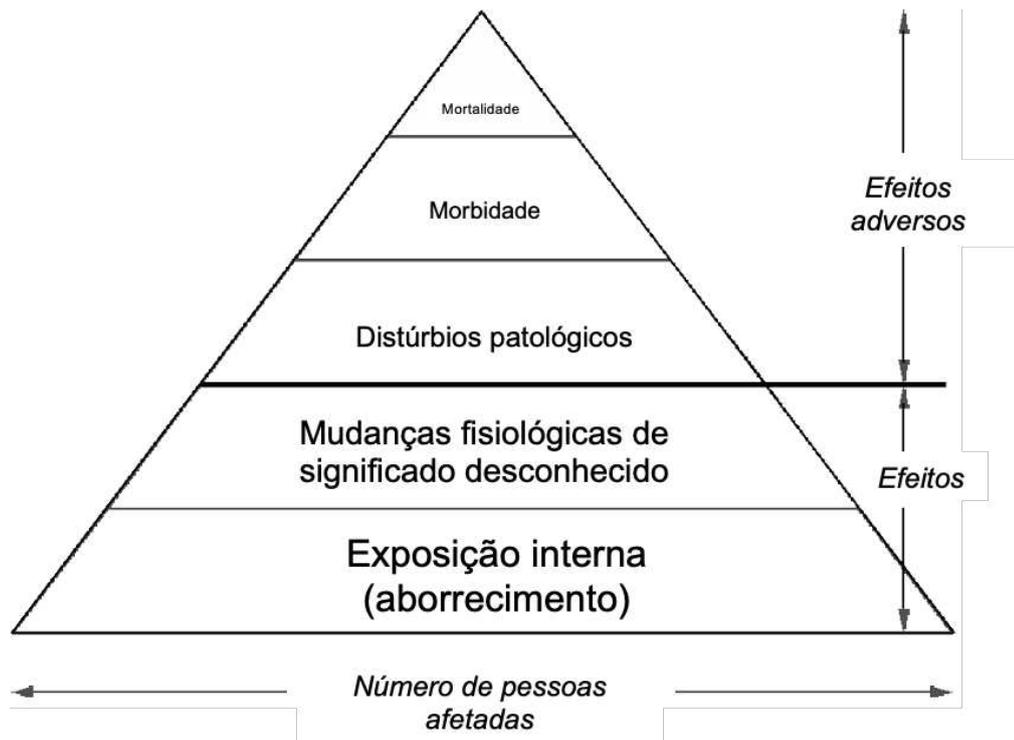


Fonte: Franzen (2015).

1.3. Desempenho acústico do sistema *Light Steel Framing* (LSF)

De acordo com a OMS - Organização Mundial da Saúde (2018), 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 de desenvolver doenças cardiovasculares, além de comprometimento cognitivo, distúrbios do sono e zumbido. Esses ruídos são originados principalmente de automóveis, trens, aeronaves, máquinas e equipamentos industriais. A Figura 18 indica a gravidade dos efeitos sobre a saúde humana devido à poluição sonora *versus* o número de pessoas afetadas.

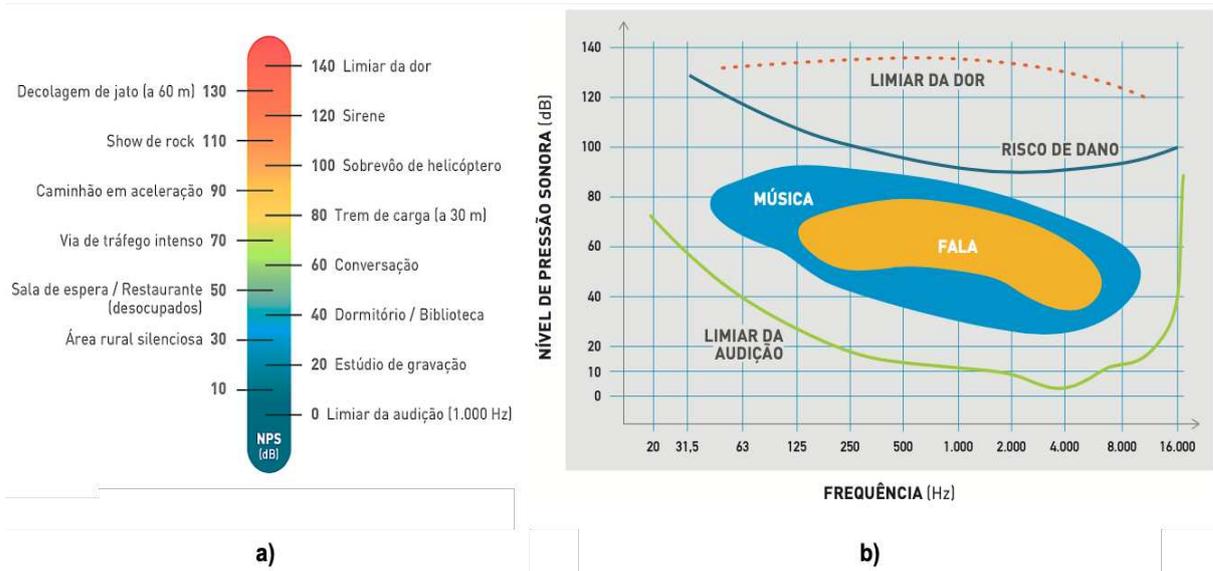
Figura 18 - Gravidade dos efeitos (ruído).



Fonte: Adaptado de Babisch (2002).

Segundo Way e Couchman (2008), o som é o movimento que faz as partículas de ar vibrarem, originando flutuações de pressão detectáveis pelo ouvido. Assim, a pressão acústica é dada pela variação da pressão no ambiente em um certo período de tempo. O ser humano pode detectar duas características do som, o nível ou volume, expressos em decibéis (dB), e o tom ou a frequência, expressos em hertz (Hz). Na Figura 19a é possível identificar o nível de pressão sonora aproximado correspondente às atividades ou locais típicos do cotidiano, a escala logarítmica facilita a representação da pressão sonora. O limiar da audição é próximo de 0 dB na frequência de 1000 Hz e o limiar da dor se aproxima dos 140 dB nas frequências entre 63 Hz e 4000 Hz. Para cada frequência, existem diferentes limiares auditivos (Figura 19b).

Figura 19 – a) Atividades e lugares do cotidiano e seu respectivo nível de pressão sonora; b) limiares auditivos para o ser humano.

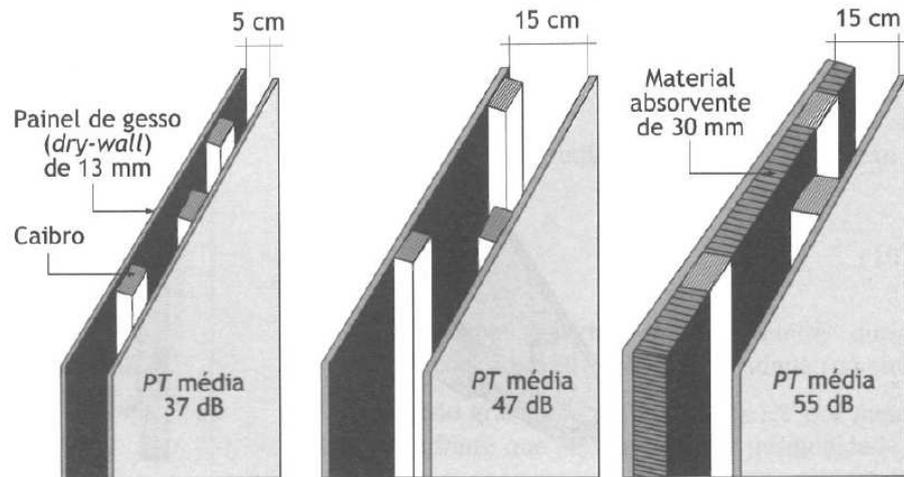


Fonte: ProAcústica (2019).

A capacidade de isolamento acústico de uma parede varia conforme a frequência sonora. Sons de baixa frequência são mais difíceis de atenuar e sons de alta frequência são mais fáceis. Além disso, em um edifício, devem ser considerados dois tipos de sons, o aerotransportado e o de impacto. O som aerotransportado é transmitido pelo ar e tanto as paredes quanto os pisos devem receber tratamento para o correto isolamento, enquanto para o isolamento do som de impacto, conduzido pela estrutura do edifício, geralmente é indicado realizar o tratamento acústico nos pisos (WAY E COUCHMAN, 2008).

No isolamento acústico de paredes, a representação em decibéis (dB) mede a perda de transmissão sonora (PT), ou seja, a redução de um som que está sendo propagado de ambiente para o outro, apresentando a parede como uma barreira, como mostra a Figura 20. O R_w é o índice de redução sonora ponderado único medido em decibéis, adotado no país pela ABNT NBR 15575-4:2021. E a diferença padronizada de nível ponderada ($D_{nT,w}$), adotada no país pela ABNT NBR 15575-4:2021, é a diferença normalizada de nível de pressão sonora entre ambientes separados por uma partição. Dessa forma, a $D_{nT,w}$ ou o R_w é a medida da quantidade de isolamento sonoro que o elemento é capaz de proporcionar, sendo um valor único de classificação.

Figura 20 - PT média de paredes duplas com diferentes distâncias entre os painéis montados.



Fonte: Bistafa (2018).

A diferença entre o R_w e a $D_{nT,w}$ é o local onde são medidos, sendo o primeiro em laboratório e o segundo, em campo. Normalmente, os valores medidos em campo são menores do que os valores medidos no laboratório. Já o Nível de Pressão Sonora de Impacto Padrão Ponderado ($L_{nT,w}$) representa a energia sonora transmitida a um ambiente receptor pelo piso (ABNT NBR 15575-4, 2021).

A Tabela 10 evidencia os valores de referência de R_w para fachadas; R_w composto leva em conta elementos que compõem a fachada, como esquadrias, conforme a ABNT NBR 15575-4:2021 e L_{inc} representa o nível de pressão sonora incidente na fachada da construção, sendo possível, dessa forma, analisar a provável classe de ruído da região no qual a edificação se encaixa. Já a Tabela 11 mostra os valores de referência de R_w para vedações verticais internas.

Tabela 10 - Valores de referência de R_w composto de isolamento a ruído aéreo de fachadas (dormitórios e salas) – Nível de desempenho mínimo.

Classe de ruído	L_{inc} dB	R_w composto (dormitório) dB	R_w composto (sala) dB
I	≤ 60	25 a 29	Não se aplica
II	61 a 65	30 a 34	Não se aplica
III	66 a 70	35 a 39	30 a 34

Fonte: ABNT NBR 15575-4:2021.

Tabela 11 - Valores de referência de R_w , de isolamento a ruído aéreo de vedações verticais internas – Nível de desempenho mínimo.

Elemento	R_w (sistemas pesados) dB	R_w (sistemas leves) dB
Parede entre as unidades habitacionais autônomas (parede de geminação), nas situações em que não haja ambiente dormitório	≥ 43	≥ 45
Parede entre as unidades habitacionais autônomas (parede de geminação), caso pelo menos um dos ambientes seja dormitório	≥ 48	≥ 50
Parede cega de dormitórios entre uma unidade habitacional e as áreas comuns de trânsito eventual, como corredores e escadaria nos pavimentos	≥ 43	≥ 45
Parede cega entre uma unidade habitacional e as áreas comuns de trânsito eventual, como corredores e escadaria dos pavimentos, nas situações em que não haja ambiente dormitório	≥ 33	≥ 35
Parede cega entre o dormitório ou sala de uma unidade habitacional e as áreas comuns de permanência de pessoas, atividades de lazer e atividades esportivas, como <i>home theater</i> , salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas	≥ 48	≥ 50

Fonte: ABNT NBR 15575-4:2021.

A ABNT NBR ISO 717-1:2021 (Classificação de isolamento acústico em edificações e elementos de edificações - Parte 1: Isolamento a ruído aéreo) estabelece um fator de correção de R_w para que seja possível simular diferentes sons incidentes nas paredes de ensaio, por meio de termos de adaptação de espectro. O fator de correção C corresponde ao espectro sonoro nº 1 e é usado para simular atividades cotidianas, tráfego ferroviário de média e alta velocidade, dentre outros. Já o fator de correção C_{tr} normalmente é utilizado para representar o som incidente como o tráfego rodoviário urbano, aviões a jato em longas distâncias, dentre outros e, corresponde ao espectro sonoro nº 2 (Tabela 12). Assim, quando se conhece o tipo de ruído predominante no ambiente, ele pode ser comparado ao da Tabela 12 e, então, o termo de adaptação é

escolhido para ser utilizado como fator de correção. Dessa forma, para elementos de construção ensaiados em laboratório, o índice de redução sonora ponderada é representado como R_w (C; Ctr), por exemplo, 41 (0; -5) dB.

Tabela 12 - Termo de adaptação do espectro pertinente para diferentes tipos de fonte de ruído.

Tipo de fonte de ruído	Termo de adaptação de espectro pertinente
Atividades comuns da vida (conversa, música, rádio, TV) Crianças brincando Tráfego ferroviário em média e alta velocidade ^a Tráfego rodoviário > 80 km/h ^a Aeronaves a jato, curta distância Fábricas emitindo principalmente ruídos de média e alta frequência	C (espectro nº 1)
Tráfego rodoviário urbano Tráfego ferroviário em baixas velocidades ^a Aeronaves, propelidas à hélice Aeronaves a jato, longa distância Música disco (<i>Disco Music</i>) Fábricas emitindo ruídos principalmente de baixa e média frequência	C _{tr} (espectro nº 2)
^a Em vários países europeus existem modelos de cálculo para o ruído do tráfego rodoviário e o ruído ferroviário, que definem os níveis em bandas de oitava; estes poderiam ser utilizados para comparação com os espectros nº 1 e nº 2	

Fonte: ABNT NBR ISO 717-1:2021.

Além de caracterizar a PT das paredes ensaiadas por meio de índice de redução sonora ponderado (R_w), também pode ser determinado um valor de número único, denominado de Classe de Transmissão Sonora (*sound transmission class* - STC) por meio da ASTM E 413:2022 (*Classification for Rating Sound Insulation*). Essa classificação de transmissão sonora também permite uma correlação com ruídos provenientes do som da fala, rádio, televisão, escritórios e edifícios. Bistafa (2018) classificou por meio de associações subjetivas a PT de partições com base na STC, de acordo com a Tabela 13.

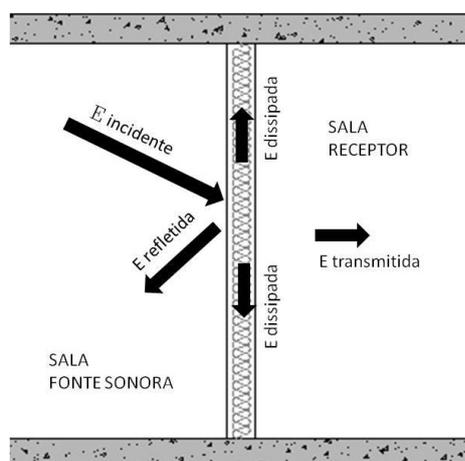
Tabela 13 - Classes de transmissão sonora, condições de privacidade e classificações subjetivas associadas.

STC	Privacidade	Classificação
25	Voz normal facilmente inteligível	Precária
30	Voz elevada razoavelmente inteligível; voz normal pouco inteligível	Fraca
35	Voz elevada pouco inteligível; voz normal não inteligível	Razoável
40	Voz elevada não inteligível; voz normal inaudível	Boa
45	Voz elevada ouvida muito fracamente	Muito boa
50	Voz elevada inaudível	Excelente

Fonte: Bistafa (2018).

A capacidade de isolamento sonoro de uma partição é influenciada pela quantidade de absorção acústica no segundo ambiente, pois quando uma onda sonora atinge uma certa superfície, uma parte dela será refletida de volta para o ambiente de origem, a outra parte continuará em uma nova direção, sendo parcialmente absorvida e dissipada e, outra parte, transmitida para o ambiente adjacente, como mostra a Figura 21. Essa absorção de som no segundo ambiente pode ser estimada medindo o tempo de reverberação (TR), sendo esse o tempo necessário para o ruído reverberante diminuir em 60 dB (T_{60}) em um determinado recinto, após a interrupção da emissão da fonte (WAY E COUCHMAN, 2008).

Figura 21 - Balanço energético sonoro em uma parede sob incidência de ondas sonoras.

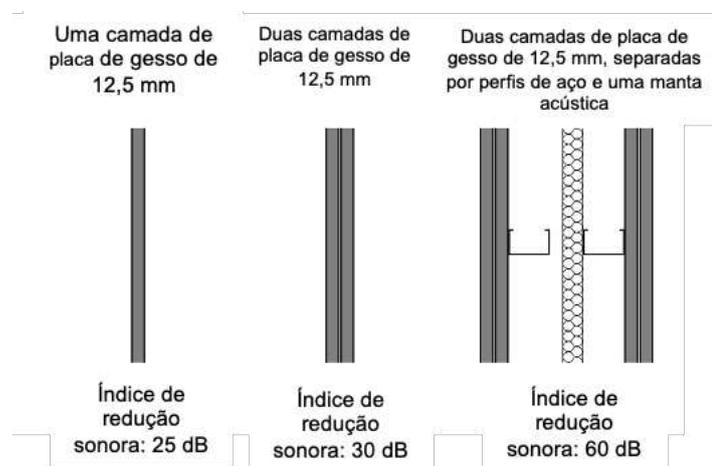


Fonte: Radavelli (2014).

Ainda 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, sendo aplicável em um sistema construtivo entre 10 kg/m^2 e 1000 kg/m^2 ; o isolamento entre as camadas de parede com a presença de ar, contribui com o aumento do índice de redução sonora, assim como ocorre nas paredes do sistema LSF (Figura 22), em que o distanciamento entre as camadas deve ser no mínimo de 40 mm. Além disso, a presença de um material absorvente entre as camadas também contribui para o isolamento; e por fim, a selagem em torno dos pisos e paredes é importante para 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.

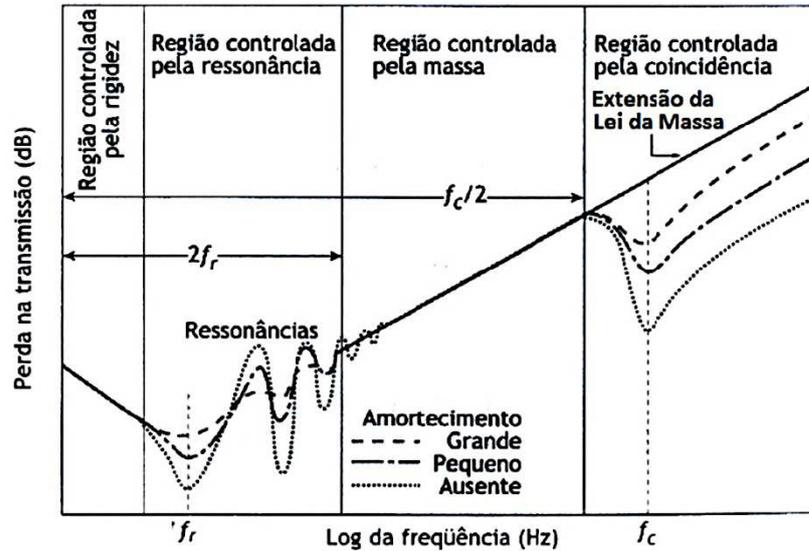
Figura 22 - Isolamento acústico por camadas.



Fonte: Adaptado de Way e Couchman (2008).

Segundo Bies e Hansen (2009) e Bistafa (2018), em uma parede simples e homogênea, como as de alvenaria, a curva teórica da PT típica é apresentada conforme a Figura 23.

Figura 23 – Curva típica de PT em função da frequência do som incidente em paredes/painéis sólidos e homogêneos.



Fonte: Bistafa (2018).

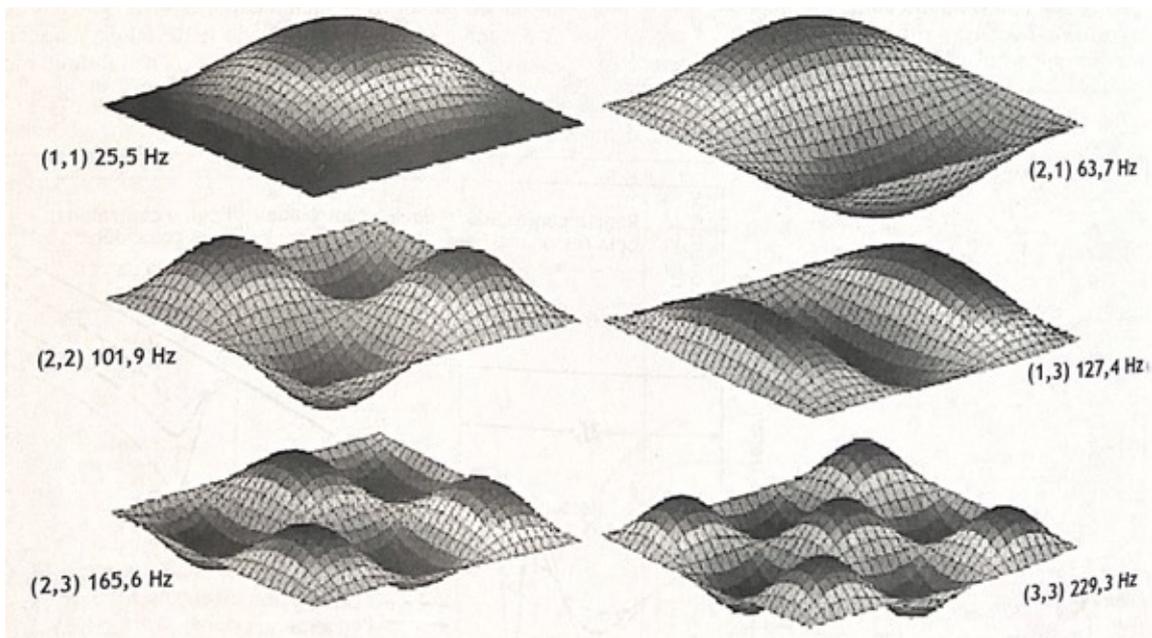
Em baixas frequências, o isolamento sonoro é baixo e controlado pela rigidez da partição. Em seguida, na região controlada pela ressonância, as ondas de flexão se propagam livremente pela partição e ocorre a primeira frequência da ressonância (f_r) do sistema (quando as frequências naturais são excitadas), região na qual há decaimento de PT (EQUAÇÃO 1.10) (BISTAFA, 2018).

$$f_r = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B}{M} \left(\frac{i}{a^2} + \frac{j}{b^2} \right)} \text{ Hz } [i, j = 1, 2, 3, \dots] \quad (1.10)$$

Onde B é a rigidez à flexão da parede, em N.m (EQUAÇÃO 1.11); M é a densidade superficial, em kg/m²; a e b , a largura e o comprimento da parede, respectivamente, em metros; i e j são índices que representam os modos de vibração particular do painel para diferentes combinações. Para uma combinação de vibração do painel no modo (2,1), por exemplo, o valor de i será 2 e j será 1. A Figura 24 demonstra seis modos de vibrar de um painel (BISTAFA, 2018).

$$B = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (1.11)$$

Figura 24 – Exemplo do modo de vibrar de um painel.



Fonte: Lamancusa *apud* Bistafa (2018).

Onde, E é o módulo de elasticidade da parede, em N/m^2 e t é a espessura da parede, dada em metros e ν , o Coeficiente de Poisson.

Posteriormente, na região controlada pela densidade superficial da parede (Lei da Massa), a PT aumenta linearmente de acordo com a Equação 1.12 (BISTAFA, 2018):

$$PT = 20 \log(f \cdot M) - 47 \quad (1.12)$$

sendo, f a frequência do som incidente em Hz e M é a densidade superficial dada em kg/m^2 .

Na região controlada pela coincidência, na qual o comprimento de onda sonora no ar é igual ao comprimento da onda sonora que se propaga no painel, ocorre a frequência crítica (f_c) (menor frequência de coincidência) (EQUAÇÃO 1.13), com queda na PT (BISTAFA, 2018).

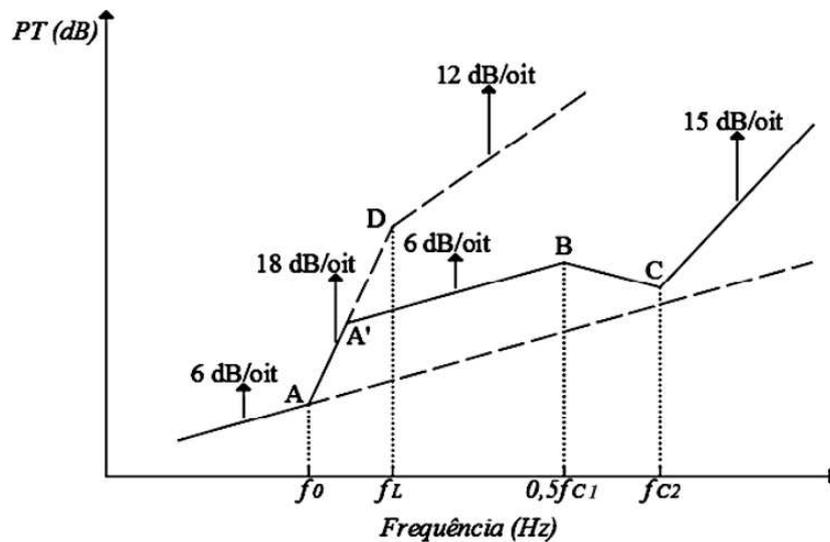
$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{M}{B}} \quad (1.13)$$

Onde, c é a velocidade da onda acústica que propaga no ar m/s; M é a densidade superficial em kg/m² e B é a rigidez à flexão da parede em N.m.

Finalmente, em frequências altas, a PT aumenta novamente e se aproxima da extensão da reta formada na região controlada pela Lei da Massa, conforme mostra a última etapa da Figura 23.

Já, nas paredes duplas, existentes no sistema LSF, a estimativa teórica da PT ocorre conforme a Figura 25. O gráfico apresenta a menor frequência de ressonância estrutural (f_0), sendo esta a mais baixa do conjunto painel-espacamento-painel e; a frequência limite (f_L), relacionada ao espaçamento entre os painéis. Além disso, a frequência crítica, (f_{c1}), corresponde ao painel de menor frequência da parede de LSF e a frequência crítica (f_{c2}) corresponde ao painel de maior frequência crítica, contudo em alguns casos f_{c1} pode ser igual a f_{c2} (BIES E HANSEN, 2009; BISTAFA, 2018).

Figura 25 - Gráfico para estimativa da PT em paredes duplas fixadas em um mesmo perfil metálico.



Fonte: Adaptado de Bies e Hansen (2009).

Ademais, apesar de não estar presente na curva de PT das paredes duplas, a frequência de ressonância da cavidade do ar ($f_{r_{ar}}$) também ocorre em diferentes modos de vibração (EQUAÇÃO 1.14) e, é responsável também pela perda de transmissão da PT da parede (BIES E HANSEN, 2009; GERGES, 2000).

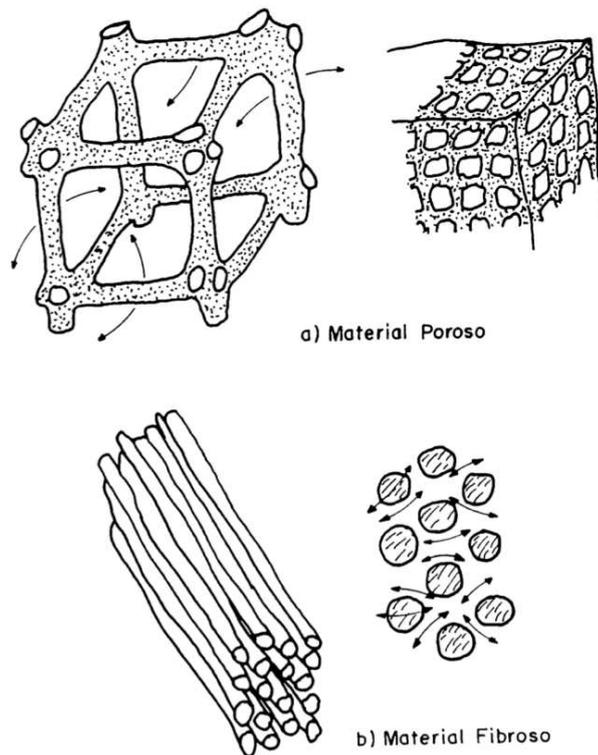
$$f_{r_{ar}} = \frac{cn}{2d} \quad (1.14)$$

Onde, c é a velocidade da onda acústica que propaga no ar m/s; n é o modo de vibração acústico da onda ($n=1$; $n=2$; ...) e d é a distância do espaçamento entre os painéis, em m.

Em relação a absorção sonora, ela contribui com o tempo de reverberação (TR) do ambiente, com o controle da reflexão do som e com a redução dos níveis de pressão sonora. Dessa forma, materiais absorventes são usados frequentemente em superfícies de paredes, pisos e tetos. Esses materiais são pouco densos e sozinhos não desempenham características significativas de isolamento sonoro, porém é possível utilizá-los no interior das paredes de LSF para reduzir as ressonâncias acústicas na cavidade interna das paredes e para contribuir com o isolamento sonoro em associação com outros componentes. Dentre esses materiais frequentemente usados estão, a lã de vidro e a lã de rocha. A lã de vidro é conhecida por ser um ótimo absorvedor acústico, ela é formada por meio de sílica, em forma de areia, e sódio aglutinadas por resinas sintéticas em alto forno. Já a lã de rocha, tem como matéria-prima básica o basalto e seu processo de fabricação se resume na produção de fibras aglutinadas por alguma resina sintética (BISTAFA, 2018; CATAI, PENTEADO E DALBELLO, 2006; MAGALHÃES, 2013).

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. Os materiais porosos como a espuma também são bons absorventes sonoros. Nestes, a energia sonora incide entre os poros, refletindo entre eles repetidas vezes até transformar-se, também, em energia térmica, conforme mostra a Figura 26 (GERGES, 2000). Enquanto o isolamento sonoro impede que um ruído de um ambiente seja transmitido para outro ambiente adjacente, por meio de materiais densos e reflexivos, medido pela PT, os materiais absorventes são responsáveis por absorver a energia sonora, medido pelo coeficiente de absorção e é dado pela razão entre a energia sonora absorvida e a incidente (BISTAFA, 2018).

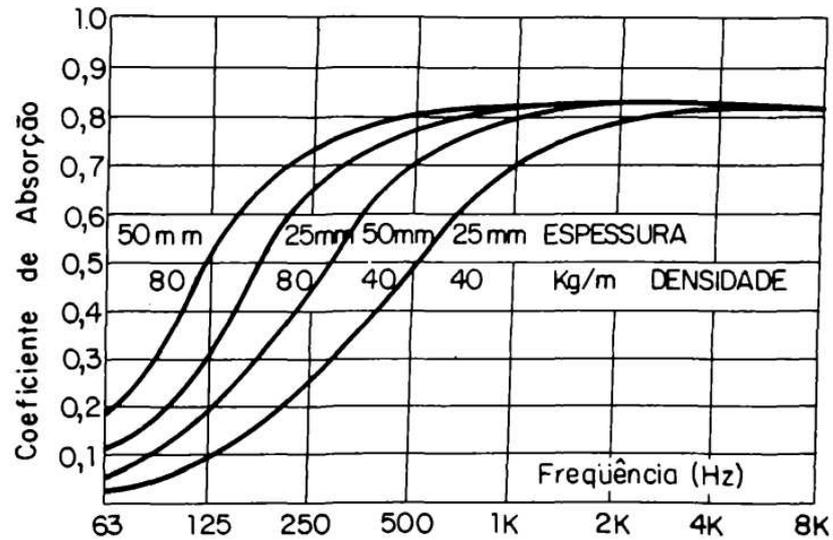
Figura 26 - Mecanismos de dissipação da energia sonora nos materiais: a) material poroso b) material fibroso



Fonte: Gerges (2000).

Conforme, a Associação Brasileira para a Qualidade Acústica - ProAcústica (2019), para caracterizar os materiais absorventes, mede-se o seu respectivo 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, sendo que cada material apresenta valores diferentes para cada frequência, densidade e espessura (Figura 27). O coeficiente de absorção permite que materiais acústicos sejam melhor selecionados com o intuito de diminuir o ruído nos ambientes. De acordo com o Ministério das Cidades (2016), esses materiais absorventes acústicos não devem afetar os demais critérios de desempenho como segurança ao fogo, estanqueidade e vida útil.

Figura 27 - Características típicas de materiais porosos.



Fonte: Gerges (2000).

Outra característica acústica importante do material absorvente é a sua impedância específica (Z), por meio dela é possível calcular a transmissão de ondas acústicas entre diferentes meios e compreender o comportamento da absorção sonora de um material poroso e/ou fibroso. Ela é dada pela razão da pressão sonora e a velocidade das partículas. A impedância característica representa a impedância do meio de propagação do material analisado e; a impedância de superfície normalizada está associada com perdas de energia e reflexões do material, sendo dividida em parte real (resistência), relacionada à dissipação de energia e parte imaginária (reatância), relacionada à rigidez e/ou massa do sistema. Quando há grande absorção sonora, a resistência acústica do material tende a ser 1 e a reatância tende a ser 0. Dessa forma, uma rápida investigação da impedância acústica fornece mais informações sobre as propriedades de absorção de um material do que utilizar apenas o coeficiente de absorção (BISTAFA, 2018; MAGALHÃES, 2013; COX E D'ANTONIO, 2017).

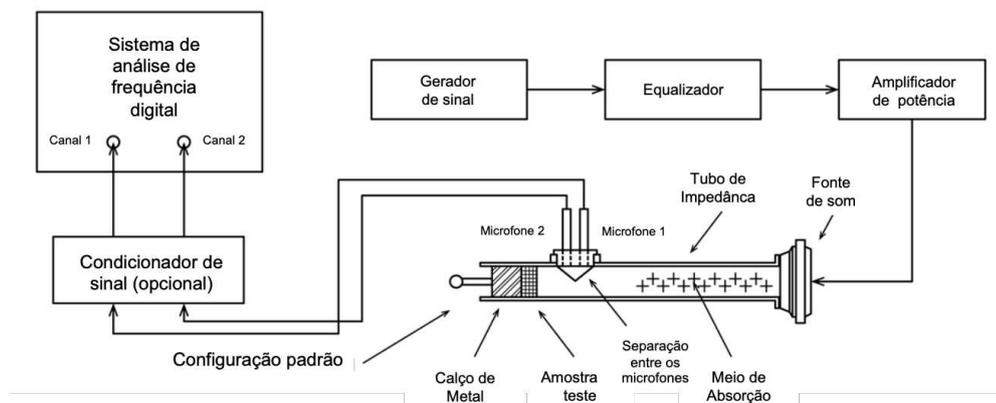
Materiais porosos e fibrosos precisam ter passagem de fluxo de ar para que seja possível a propagação de ondas acústicas entre os poros e fibras do material. Dessa forma, a resistividade ao fluxo mede a capacidade do ar de penetrar nos poros e a resistência que o ar encontra no interior do material. A porosidade pode ser medida pela razão entre volumes vazios e o volume total da amostra. Enquanto a resistência

de movimento do fluido é medida pela viscosidade, que é influenciada pela geometria da estrutura do material e pode estar repleta de poros irregulares. A orientação dos poros tem efeito significativo na propagação do som, pois quanto mais tortuoso o caminho a ser percorrido pela onda sonora, maior a absorção sonora dentro dos materiais (MAGALHÃES, 2013).

O coeficiente de absorção sonora e de impedância acústica podem ser calculados por meio de dois métodos descritos por normas internacionais, pelo tubo de impedância ou por meio de câmara de reverberação. 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, MAIRINK, OLIVEIRA E TEODORO, 2005).

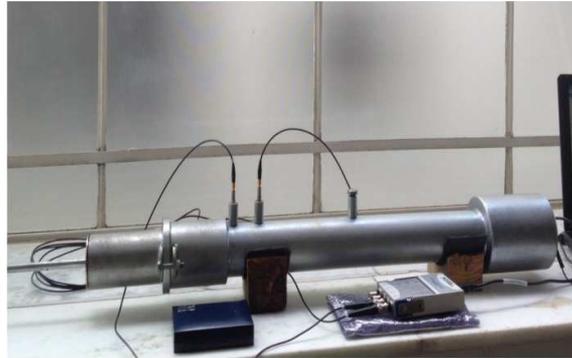
No ensaio com tubo de impedância, recomenda-se utilizar dois microfones, um sistema de análise de frequência digital para a determinação de coeficiente de absorção de som de incidência normal e da impedância acústica específica normal do material. O tubo apresenta de um lado, um alto falante e, no outro lado, o material a ser analisado junto a uma tampa com isolamento acústico, como mostra a Figura 28 e a Figura 29, de acordo com a ASTM E 1050:2019 (*Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two Microphones and A Digital Frequency Analysis System*).

Figura 28 - Aparelho e instrumentação do ensaio no tubo de impedância.



Fonte: Adaptado de ASTM E 1050:2019.

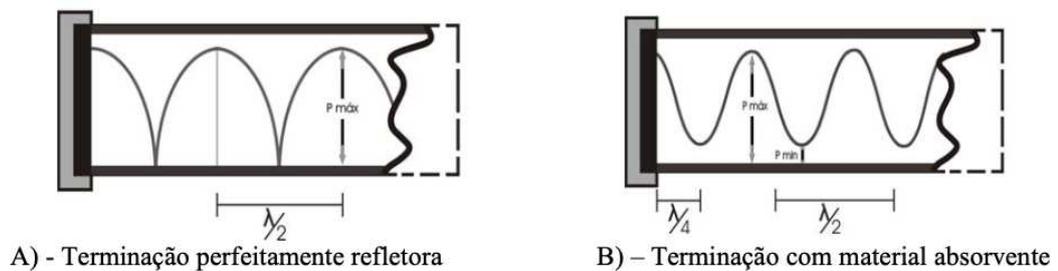
Figura 29 - Exemplo de um tubo de impedância.



Fonte: Gomes (2015).

Conforme 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 30.

Figura 30 - Representação esquemática das sonoras em um tubo de impedância.



Fonte: Oliveira e Teodoro (2005).

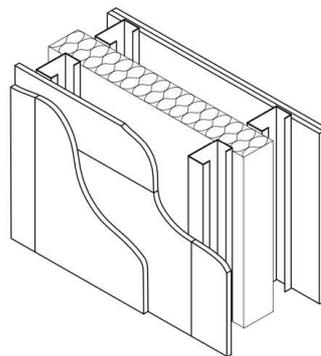
De acordo com a norma ASTM E 1050:2019, o tubo de impedância deve ser suficientemente longo para que as ondas planas sejam totalmente desenvolvidas antes de atingir os microfones e o corpo de prova, as ondas planas são geradas por meio de um sinal de banda larga constante. Esse sinal pode ser denominado de ruído rosa ou branco. Esses dois tipos de sinais sonoros são comumente utilizados em ensaios de acústica, tanto no tubo de impedância, quanto em ensaios de PT. O ruído branco é um sinal aleatório que apresenta uma distribuição de potência uniforme para todas as frequências do espectro. É chamado de "branco" pois assim como a luz

branca, que contém todas as cores, ele também apresenta todas as frequências audíveis. Já o ruído rosa fornece uma ênfase maior nas baixas frequências e uma diminuição gradual à medida que a frequência aumenta e sua resposta em frequência se assemelha à cor vermelha, emitindo mais energia nessa cor quando visualizada em um espectrograma (BISTAFA, 2018).

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, conforme a ASTM E 1050:2019.

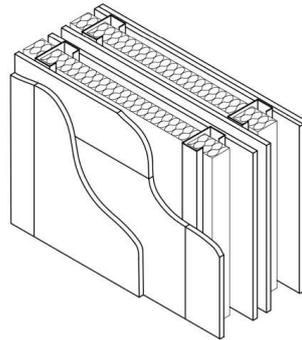
Os autores Way e Couchman (2008) apresentaram algumas opções de construção para otimizar o desempenho acústico do sistema LSF, como paredes duplas com lã mineral entre elas (Figura 31); paredes duplas com lã mineral entre os perfis (Figura 32); paredes com barras resilientes entre os perfis de aço e as placas de fechamento, para reduzir a PT (Figura 33) e paredes com perfis escalonados (Figura 34). Os autores concluíram que as paredes duplas apresentaram índice de redução sonora (R) entre 56 dB a 66 dB, a parede com barra resiliente, entre 59 dB e 62 dB e com perfis escalonados redução entre 57 dB e 63 dB.

Figura 31- Paredes duplas com lã mineral entre elas. Fonte: Way e Couchman (2008).



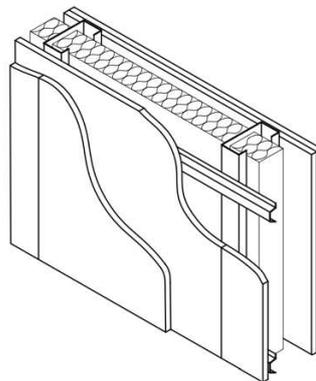
Fonte: Way e Couchman (2008).

Figura 32 – Paredes duplas com lã mineral entre os perfis.



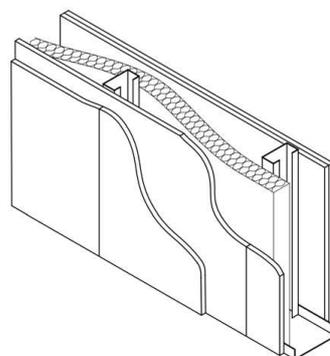
Fonte: Way e Couchman (2008).

Figura 33 - Paredes com barras resilientes. Fonte: Way e Couchman (2008)



Fonte: Way e Couchman (2008).

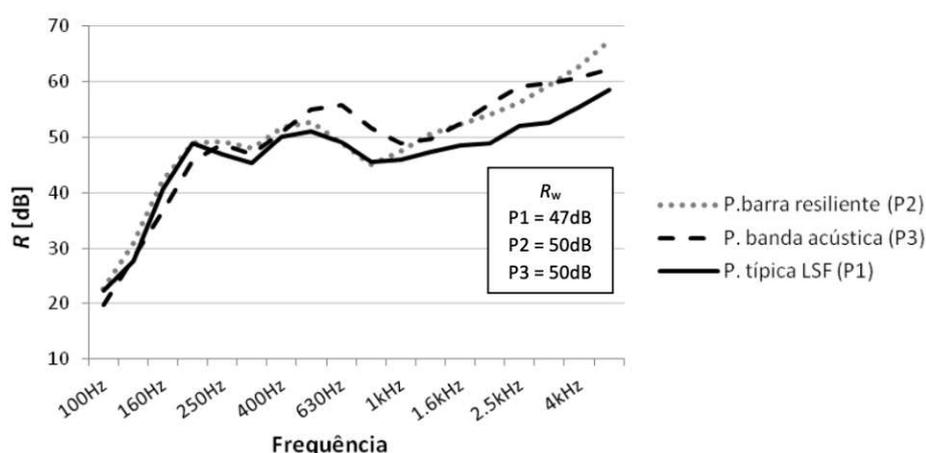
Figura 34 - Paredes com perfis escalonados. Fonte: Way e Couchman (2008)



Fonte: Way e Couchman (2008).

Na pesquisa feita por Radavelli (2018), foram comparadas paredes típicas de LSF (P1), paredes com barras resilientes (P2) e paredes com bandas acústicas, uma fita adesiva de espuma de PVC, que apresenta a função de vedar juntas das paredes de LSF (P3). Segundo a autora, as paredes com barras resilientes e com as bandas acústicas apresentaram o R_w maior em 3 dB, em comparação à parede típica de LSF, conforme mostra a Figura 35. Radavelli (2014) sugeriu que em construções em LSF no Brasil sejam utilizadas as bandas acústicas, uma vez que as barras resilientes, além de serem pouco difundidas no país, são mais caras e difíceis de instalar em relação às bandas acústicas (Figura 35).

Figura 35 - Espectro de R_w das três paredes em LSF avaliadas – P1, P2 e P3.



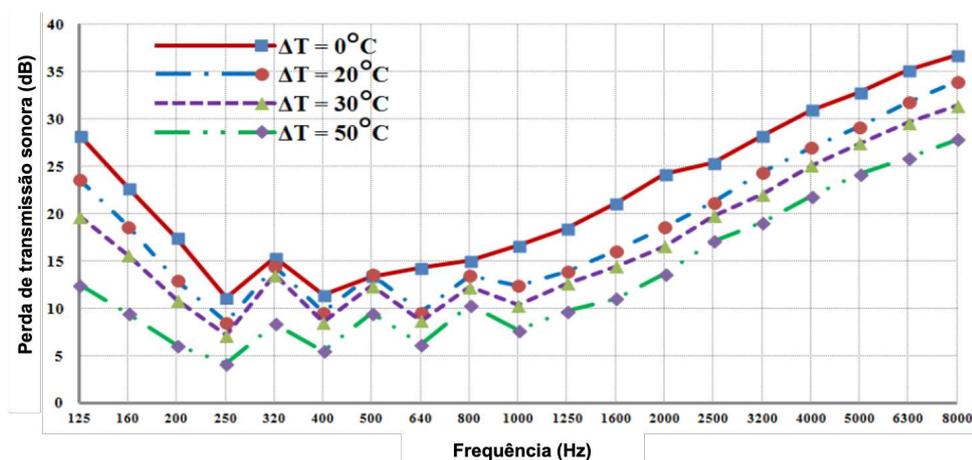
Fonte: Radavelli (2018).

Franzen (2015) realizou ensaios para avaliar o desempenho acústico em vedações externas do LSF, utilizando o método da função de transferência, submetidos à frequências de 20 Hz a 20 kHz, e analisou o resultado, filtrado em bandas de 1/3 oitava. As bandas de 1/3 de oitava e as bandas de oitava são sistemas de divisão de frequência utilizados em análises acústicas e medições de som. As bandas de oitava dividem o espectro de frequência em faixas de igual largura, em que cada banda abrange uma oitava musical. Já as bandas de 1/3 de oitava dividem cada banda de oitava em três sub-bandas menores, essa divisão mais detalhada permite uma análise mais precisa do espectro sonoro (GERGES, 2000). Conforme Franzen (2015), o painel continha apenas lã de vidro e câmara de ar no miolo da parede, revestimento externo com estuque sintético e massa PVA látex na parte interna e apresentou uma diferença de nível de 39 dB, enquanto a parede com nenhum tratamento acústico

apresentou um valor de 36 dB. Franzen (2015) concluiu que a lã de vidro contribuiu com a diminuição da PT em frequências muito baixas e que a camada de ar tem contribuído para o isolamento acústico.

Ainda, a propagação do som pode ser influenciada por diversos fatores como a temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do ar. Dessa forma, o isolamento sonoro das paredes pode ser afetado, devido a temperatura ambiente. A PT pode chegar em até 10 dB em ambientes térmicos (LIPTAI, BADIDA E LUKÁČOVÁ, 2015). De acordo com Thanh, Thinh e Hien, (2022) e Refahati *et al.* (2022), um ambiente com temperatura elevada pode causar tensões internas às estruturas de um elemento construtivo, diminuição na rigidez do material e alteração nas características dinâmicas do sistema. Thanh, Thinh e Hien, (2022) realizaram um estudo, por meio de uma abordagem analítica, da influência da temperatura na capacidade de isolamento acústico de uma placa compósita laminada ortotrópica e concluíram que a PT diminuiu à medida que a carga térmica aumentou, especialmente em baixas frequências (Figura 36).

Figura 36 - Influência das cargas térmicas na PT de um painel compósito laminado ortotrópico.

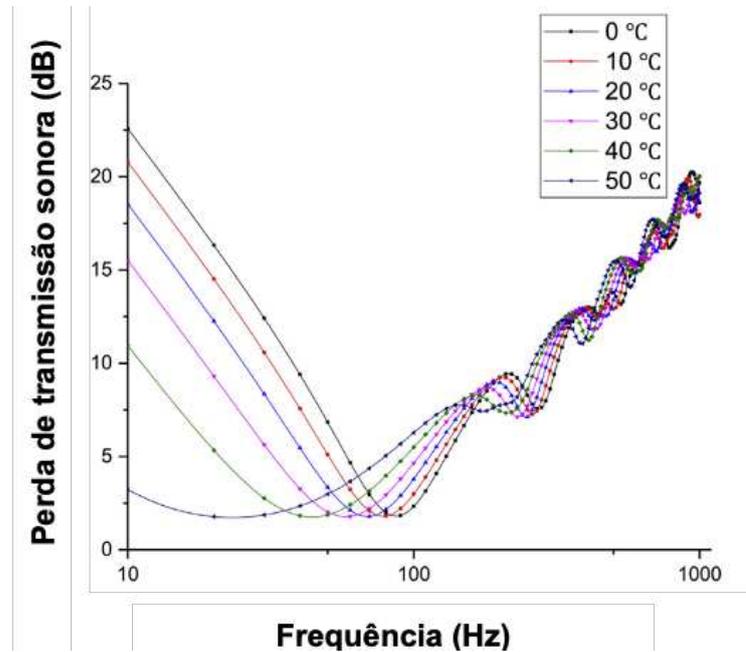


Fonte: Adaptado de Thanh, Thinh E Hien (2022).

Li *et al.* (2018) realizaram ensaios numéricos e experimentais em painéis sanduíches para a avaliação do efeito da temperatura na PT. Os autores também concluíram que em regiões de baixa e média frequência a PT diminuiu com o aumento da temperatura. Também, as quedas e os picos das curvas de PT diminuíram com a elevação da

temperatura (Figura 37) e a absorção sonora dos materiais de painéis sanduíche também diminuiu quando expostos à elevadas temperaturas (TANG, XIN E LU, 2019).

Figura 37 – Efeito da temperatura na PT.



Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2018).

1.4. Características da lã de PET

A lã de PET (Politereftalato de etileno) é um produto desenvolvido a partir da reciclagem de garrafas plásticas e também, assim como as lãs minerais, pode ser utilizada como um material para contribuir com o desempenho térmico e acústico do LSF, na forma de lã. Por apresentar uma característica fibrosa, a lã de PET atende às demandas do condicionamento acústico (KLIPPEL FILHO *et al.*, 2017) e de isolamento térmico.

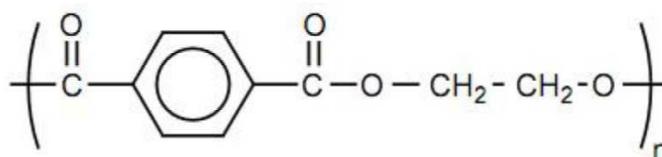
Devido à preocupação com a produção de resíduos sólidos no ambiente, o recipiente de PET tem sido cada vez mais utilizado em processos de reciclagem em todo o mundo. Em 2019, o Brasil reciclou 55% dos resíduos de PET produzidos no país, o que representou 311 mil toneladas do material, 12% acima da quantidade reciclada de PET em 2018, gerando 3,6 bilhões de faturamento (ABIPET, 2019). Grande parte dos materiais plásticos a serem reciclados é contaminado por substâncias indesejadas, por causa disso cerca de 168,8 mil toneladas foram impedidas de serem

recicladas em 2020, sendo o PET o material que mais sofreu perdas durante esse processo (ABIPLAST, 2021).

O PET é comumente usado em embalagens de alimentos e bebidas carbonatadas (MOURA, 2011), mas também é encontrado em fibras têxteis, filmes biorientados e polímeros de engenharia (ROMÃO, SPINACÉ E PAOLI, 2009). Em 2020, 30% do PET reciclado foi aplicado na fabricação de frascos e garrafas. O plástico reciclado mais aproveitado na indústria da construção civil é o PEAD (Polietileno de alta densidade) comumente utilizado em tanques e tubulações (ABIPLAST, 2021).

Conforme Romão, Spinacé e Paoli (2009), o PET foi descoberto por Whinfield e Dickson em 1946, o material apresenta temperatura de fusão, por volta de 256 °C, e estabilidade hidrolítica devido aos anéis aromáticos da cadeia principal, como mostra a Figura 38. A partir da temperatura de fusão, a lã de PET quando utilizada no sistema LSF, não contribui para a proteção térmica do perfil metálico. Contudo, ela não colabora para a propagação das chamas e não libera vapores tóxicos (TORRES FILHO, 2017).

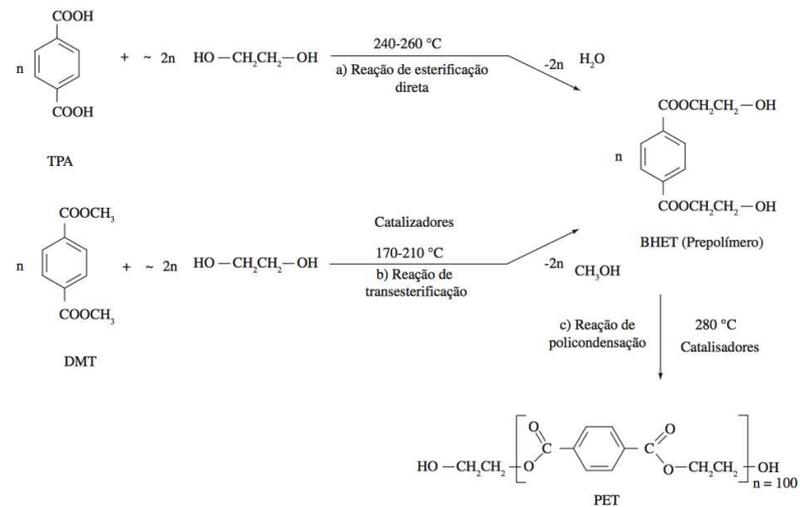
Figura 38 - Fórmula estrutural do PET.



Fonte: Torres Filho (2017).

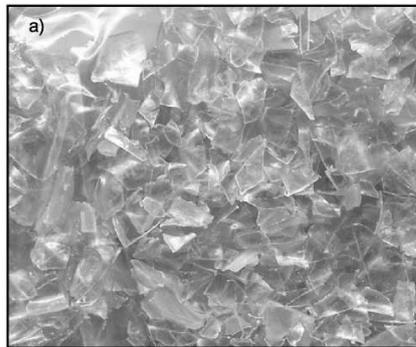
O PET é sintetizado em até três etapas, como mostra a Figura 39, sendo a primeira a pré-polimerização, a segunda a policondensação e a terceira, a polimerização no estado sólido. Na pré-polimerização ocorre a produção do oligômero tereftalato de bis (2-hidroxi-etileno), monômero da polimerização (BHET), por meio da reação de ácido tereftálico (TPA) ou do éster tereftalato de dimetileno (DMT) com o etileno glicol (EG). Na policondensação, o BHET é aquecido até a temperatura de 280°C e, com o intuito de otimizar a qualidade do PET, como ocorre nas embalagens para bebidas carbonatadas, a terceira etapa, é responsável por adicionar aditivos e catalisadores (ROMÃO, SPINACÉ E PAOLI, 2009). A Figura 40 mostra os corpos de PET reciclado.

Figura 39 - Métodos de preparação do PET.



Fonte: Romão, Spinacé e Paoli (2009).

Figura 40 - Corpos de PET reciclado.



Fonte: Rey *et al.* (2011).

Uma das formas de reciclagem desse material acontece por meio da fabricação da lã de PET (Figura 41) processo no qual não há adição de resina. Segundo a empresa TRISOFT (2020), o processo começa com o recolhimento de garrafas de PET, depois disso, há uma seleção, lavagem, moagem e secagem do material, e então um produto denominado *flake* é sintetizado. Ele é fundido a uma temperatura de 300°C e, logo após, é resfriado e granulado. O material é então extrudado, transformando-se em uma pasta, e prensado, para passar por pequenos orifícios, obtendo-se então a forma do fio, que é agrupado, formando uma manta (CAMPOS *et al.*, 2019). Seu desempenho térmico e acústico se assemelha às lãs minerais, enquanto sua densidade é até três vezes menor que da lã de rocha e da lã de vidro (EIRA, 2015). Por causa disso, a quantidade do material necessária para realizar o tratamento

térmico e acústico com a lã de PET é muito menor em comparação ao uso das lãs comumente utilizadas (BUZATU *et al.*, 2020).

Figura 41 - Lã de PET.



Fonte: SULMÓDULOS (2020).

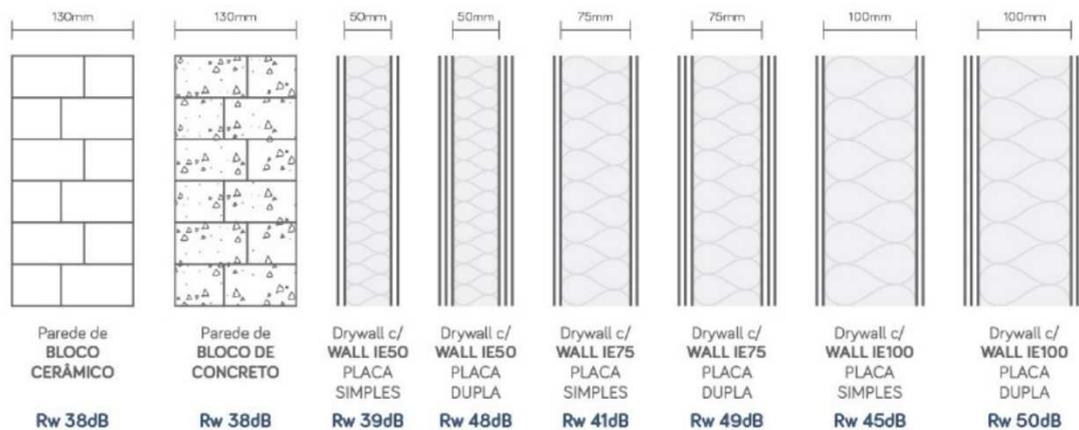
A empresa TRISOFT (2020) publicou em seu catálogo técnico o desempenho acústico da lã de PET em paredes do tipo *drywall*, conforme mostra a Figura 42. De acordo com a empresa, as paredes com a lã de PET apresentaram melhor índice de redução sonora do que as paredes de bloco cerâmico e bloco de concreto. As paredes de *drywall* com lã de PET de 100 mm apresentaram um índice de redução sonora de 50 dB, enquanto as paredes de bloco cerâmico e concreto, com espessura de 130 mm, apresentaram um índice de redução sonora de 38 dB.

Figura 42 - Comparativo de desempenho acústico de paredes de *drywall* com lã de PET e paredes de alvenaria.

Espessura	Frequência (Hz)						Rw
	125	250	500	1000	2000	4000	
50mm	16,7	35,8	48,7	55,7	59,6	47,0	42
75mm	20,9	37,3	48,8	58,7	60,5	46,5	45
100mm	24,2	39,9	54,6	64,7	66,4	53,6	48

● WALL IR50 - Laudo IPT nº 1019893-203
● WALL IR75 - Laudo IPT nº 1019894-203
● WALL IR100 - Laudo IPT nº 1019895-203

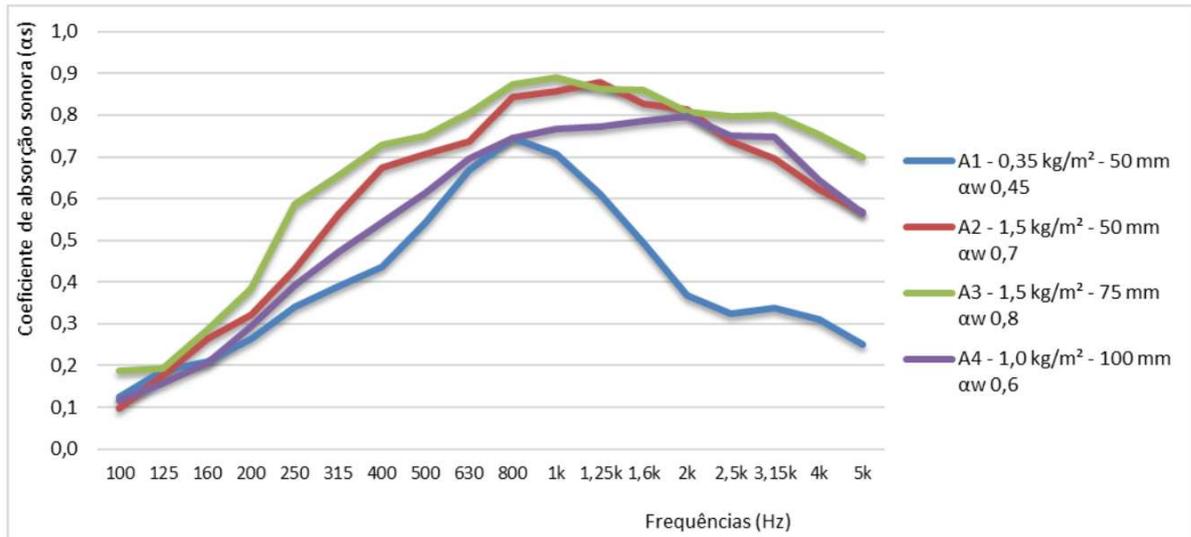
comparativo de desempenho acústico



Fonte: TRISOFT (2020).

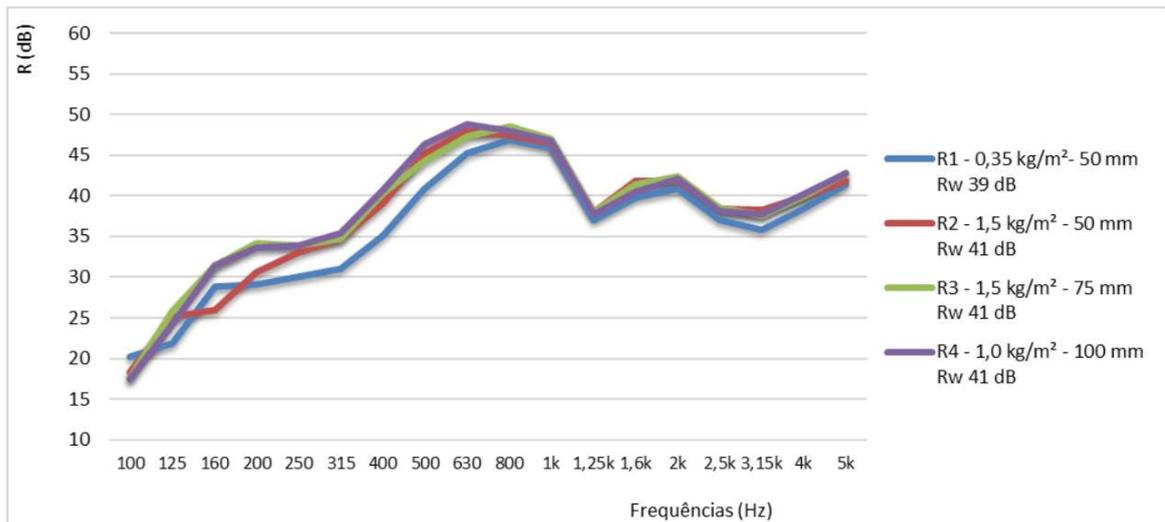
Na pesquisa realizada por Klippel Filho *et al.* (2017), foram realizados ensaios acústicos a fim de caracterizar o desempenho acústico da lã de PET, no sistema *drywall*. Os autores avaliaram o isolamento acústico aéreo (PT) e a absorção sonora da parede, em laboratório, variando a espessura e a densidade do material. Os materiais utilizados no ensaio de PT foram placas de gesso acartonado para o fechamento das paredes e mantas de lã de PET com densidades entre $0,35 \text{ kg / m}^2$ e $1,50 \text{ kg / m}^2$, inseridas no espaçamento entre as placas, em uma parede com área de 10 m^2 ; os ensaios de absorção sonora foram feitos em amostras de lã de PET com a mesma variação de densidade utilizadas no ensaio de PT. Conforme os autores, a absorção sonora da lã de PET apresentou valores típicos de materiais fibrosos, com maior absorção nas bandas de médias (1250 Hz) e altas frequências (2500 Hz e 3150 Hz). Este parâmetro mostrou relação direta com a sua densidade (Figura 43). Ademais, para o isolamento aéreo (PT), o aumento da densidade da lã de PET não apresentou influência significativa na PT (Figura 44).

Figura 43 – Gráfico de coeficiente de absorção sonora de diferentes densidades da lã de PET.



Fonte: Klippel Filho *et al.* (2017).

Figura 44 – Gráfico de PT para as diferentes densidades da lã de PET em parede de *drywall*.



Fonte: Klippel Filho *et al.* (2017).

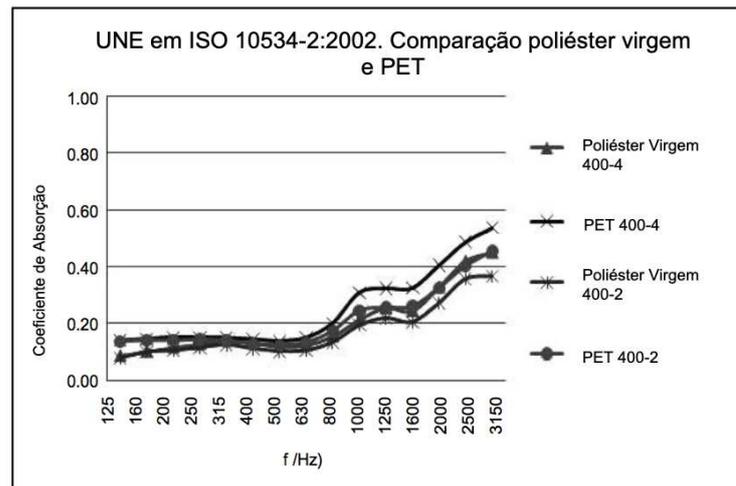
Del Rey *et al.* (2011) compararam os valores do coeficiente de absorção sonora da lã de PET reciclável e das lãs feitas com fibras de poliéster virgem em câmaras de reverberação sonora e em incidência normal, o resultado mostrou-se favorável ao uso do material reciclável como mostra a Figura 45 e Figura 46. As amostras testadas apresentaram espessura e densidade conforme mostra a Tabela 14.

Tabela 14 - Espessura, e densidade de algumas das amostras testadas.

Nome	Espessura (mm)	Densidade (g/m ²)
400-4	40	400
400-2	20	400
1000-4	40	1000

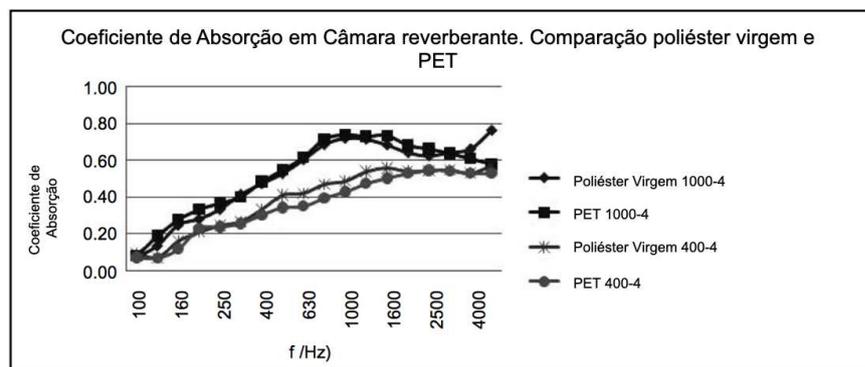
Fonte: Adaptado de Rey et al. (2011).

Figura 45 - Coeficiente de absorção sonora em incidência normal. Comparação poliéster reciclado e poliéster virgem.



Fonte: Adaptado de Rey et al. (2011).

Figura 46 - Coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante. Comparação PET-Poliéster.



Fonte: Adaptado de Rey *et al.* (2011).

Em pesquisa realizada por Buzatu *et al.* (2020), foram realizados ensaios no sistema LSF com o objetivo de comparar o desempenho térmico entre as paredes preenchidas com lã de rocha e lã de PET. Os autores concluíram que, para um valor de transmitância térmica (U) semelhante entre as paredes, foi preciso utilizar quase três quilos a mais de lã de rocha em comparação à parede de lã de PET (Tabela 15),

evidenciando uma importante economia de material ao realizar o isolamento térmico adequado de um edifício.

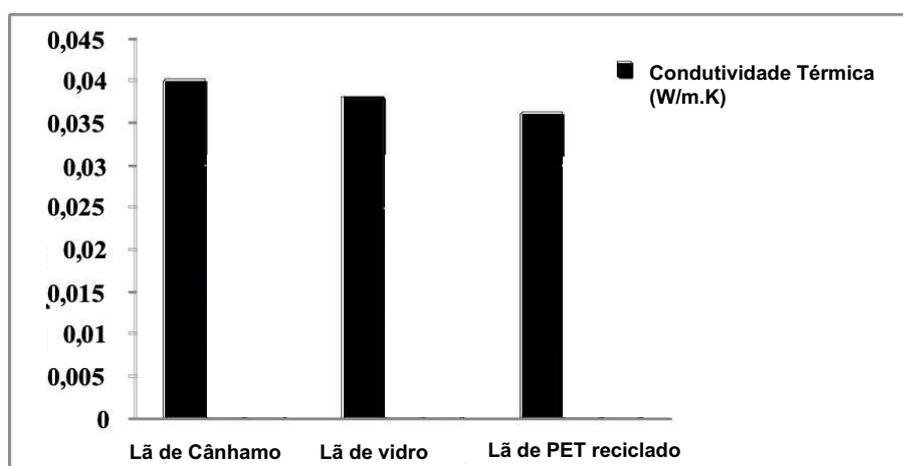
Tabela 15 - Desempenho térmico: lã de rocha e manta de lã de PET.

	Unidade	Lã de Rocha	Lã de PET
Espessura	[mm]	100	150
R	[m ² K/W]	2.50	2.77
U	[W/m ² K]	0.40	0.36
Peso Líquido	[kg/m ²]	9.00	3.20

Fonte: Adaptado de Buzatu *et al.* (2020).

Com o intuito de conhecer melhor as propriedades térmicas de materiais inovadores que podem ser utilizados no isolamento térmico de paredes, como fibras vegetais e PET reciclado, Tilioua *et al.* (2012) realizaram ensaios térmicos experimentais e teóricos em lãs isolantes compostas por fibras de cânhamo e fibras de PET e comparou com a lã de vidro. Conforme os autores, os resultados mostraram que a condutividade térmica (λ) dos três materiais são semelhantes (0,04 W/m.K), como mostra a Figura 47.

Figura 47 - Condutividades térmicas (λ) da lã de cânhamo, lã de vidro e Lã de PET à temperatura ambiente.



Fonte: Tilioua *et al.* (2012)

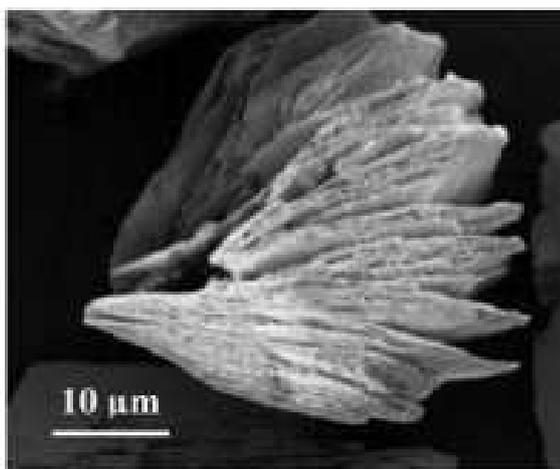
De acordo com as pesquisas mencionadas neste Subitem, pode-se inferir que a lã de PET apresentou um comportamento térmico e acústico satisfatório para substituir e

competir com a lã de rocha e a lã de vidro em paredes de LSF e *drywall*. Dessa forma, faz-se necessário estimular o uso desse material que contribui em diversas esferas para a sociedade, como a social, a econômica e a ambiental.

1.5. Características da vermiculita

A vermiculita é um mineral industrial composto por ferro, magnésio, potássio e alumínio. O mineral apresenta estrutura lamelar e características físicas iguais à mica conforme mostra a Figura 48. As jazidas de vermiculita são encontradas em países como Austrália, Estados Unidos e China; no Brasil, nos estados da Paraíba, Goiás e Piauí. Como não apresenta amianto, esse minério brasileiro apresenta maior valor comercial (FRANÇA *et al.*, 2016). O Brasil é o 3º produtor mundial de vermiculita, sendo responsável por 0,02% da Compensação Financeira pela Exploração dos Recursos Minerais – CFEM, enquanto a África do Sul e os Estados Unidos ocupam o 1º e o 2º lugar do *ranking*, respectivamente (Instituto Brasileiro De Mineração - IBRAM, 2020).

Figura 48 - Imagem microscópica da estrutura lamelar da vermiculita expandida



Fonte: Rashad (2016).

No processo de beneficiamento da vermiculita, o minério é separado das impurezas existentes e da rocha encaixante. Depois da extração, o mineral passa por uma lavagem e então, é homogeneizado, por meio de uma grelha, retirando as partículas maiores. O material é então peneirado, moído para a granulometria adequada e

lavado novamente para a retirada da argila. A secagem acontece primeiramente nos pátios da mineradora e depois em grandes fornos. Assim, ocorre a expedição do produto em recipientes grandes, ou *big bags*, conforme sua respectiva granulometria, apresentando uma cor marrom ou dourada (Figura 49). Os fragmentos com granulometria abaixo de 0,3 mm são encaminhados para o rejeito (SILVA *et al.*, 2015).

Figura 49 - Diferentes granulometrias da vermiculita expandida.



Fonte: Rashad (2016).

A vermiculita 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 isolamento térmico e absorção acústica. Como ela é inodora, atóxica, não se decompõe e absorve até cinco vezes seu peso em água, a vermiculita é comumente usada na construção civil, em indústrias químicas, na agricultura, entre outros, garantindo seu valor comercial. Ademais, ela é retardante de chama e hidrofóbica (ANM, 2018; FRANÇA *et al.*, 2016).

As placas desse mineral são fabricadas com vermiculita expandida e ligantes inorgânicos prensados (Figura 50) 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 420 Kg/m³ (CALDESUL, 2022).

Figura 50 – Placa de vermiculita



Fonte: CALDESUL (2022)

No Brasil, a vermiculita é livre de amianto, mineral comprovadamente cancerígeno, o que a configura como um material de qualidade e seguro. Enquanto, segundo o Instituto Nacional Do Câncer José De Alencar Gomes Da Silva - INCA (2012), algumas fibras especiais de lã de vidro são classificadas como possivelmente cancerígena para humanos e a lã de rocha e a lã de vidro com filamento contínuo não é classificável como cancerígena, mas também não significa que seja uma substância segura, é preciso mais estudos consistentes. Recomenda-se o uso de máscaras, óculos e luvas durante o manuseio dessas lãs.

No início da década de 1990, houve o fechamento da maior mina de vermiculita nos Estados Unidos, devido a contaminação por amianto em Libby, Montana, gerando uma crise mundial no setor. A partir disso, as mineradoras de todo o mundo criaram o certificado denominado de “asbesto-free” e a partir da década de 2000, a produção do mineral voltou a crescer. Quando encontrado amianto em jazidas de vermiculita, é possível que o mineral seja limpo no processo de beneficiamento (REIS, 2002). Durante 70 anos, a vermiculita expandida contaminada de Libby foi utilizada em larga escala nos Estados Unidos de forma solta no interior de paredes e sótãos para o isolamento térmico em edifícios de LSF e *Wood Framing* e, até hoje, o amianto está presente nessas edificações, podendo contaminar o ambiente, em caso de reformas ou climatização mecanizada (SPEAR *et al.*, 2012).

Atualmente, a vermiculita expandida de forma solta é comumente usada em paredes para melhorar o desempenho térmico e acústico das edificações, principalmente como um componente de massa para reboco, concretos e argamassas. Os espaços vazios entre as lamelas do material formados durante seu aquecimento contribui para que a vermiculita seja um bom isolante térmico e absorvente acústico, ela apresenta em sua forma solta uma condutividade térmica em temperatura ambiente de 0,06 (W/m.K). Ademais, pode ser aplicada também em forros, saunas, assoalhos e coberturas de fornos e estufas, devido ao seu elevado ponto de ebulição. Como isolante acústico, aplicado em rebocos de paredes, reduz em até 60% a transmissão do som de um ambiente ao outro (UGARTE, SAMPAIO E FRANÇA, 2008; CALDESUL, 2022), em sua forma solta, a vermiculita expandida apresenta coeficiente de absorção entre 0,7 e 0,8 na frequência de 1000 Hz (SHMURADKO *et al.*, 2012). Em formato de placa, não foram encontrados dados sobre seu comportamento acústico. Conforme Rashad (2016), o isolamento acústico por meio de vermiculita expandida precisa de mais estudos. Contudo, há relatos que confirmam que a inclusão de vermiculita expandida preenchendo os espaços livres em tijolos e na composição de argamassas (Figura 51) contribui com o isolamento acústico, devido sua característica porosa e laminar, responsável por dificultar a transmissão de energia sonora. Carbajo *et al.* (2015) estudaram as propriedades acústicas de concretos com agregado de vermiculita por meio de ensaios em tubo de impedância, apresentando um coeficiente de absorção no valor de 0,9, na faixa de frequência entre 1000 Hz e 1400 Hz. Os resultados mostraram um resultado relativamente alto com a inclusão de vermiculita na amostra.

Figura 51 - Vermiculita expandida aplicada diretamente em blocos de concreto



Fonte: Global Minérios (2022).

Na pesquisa realizada por Rabello e Ribeiro (2021), foram realizados ensaios térmicos em tijolos de vermiculita expandida com resina poliuretana vegetal. A amostra foi inserida dentro de um tubo de PVC sob a emissão de uma fonte de calor a 80°. No final do ensaio a temperatura foi reduzida a 28°C, os autores concluíram que a vermiculita expandida é um excelente isolante térmico, devido a sua alta porosidade que impede a propagação de calor por condução.

Dessa forma, esta pesquisa investiga o uso da placa de vermiculita no sistema LSF, material de baixo impacto ambiental que pode contribuir com o desempenho térmico de uma edificação a depender do clima da região, devido à sua capacidade de isolar o calor e, com o desempenho acústico, por causa da sua característica porosa, capaz de absorver o som.

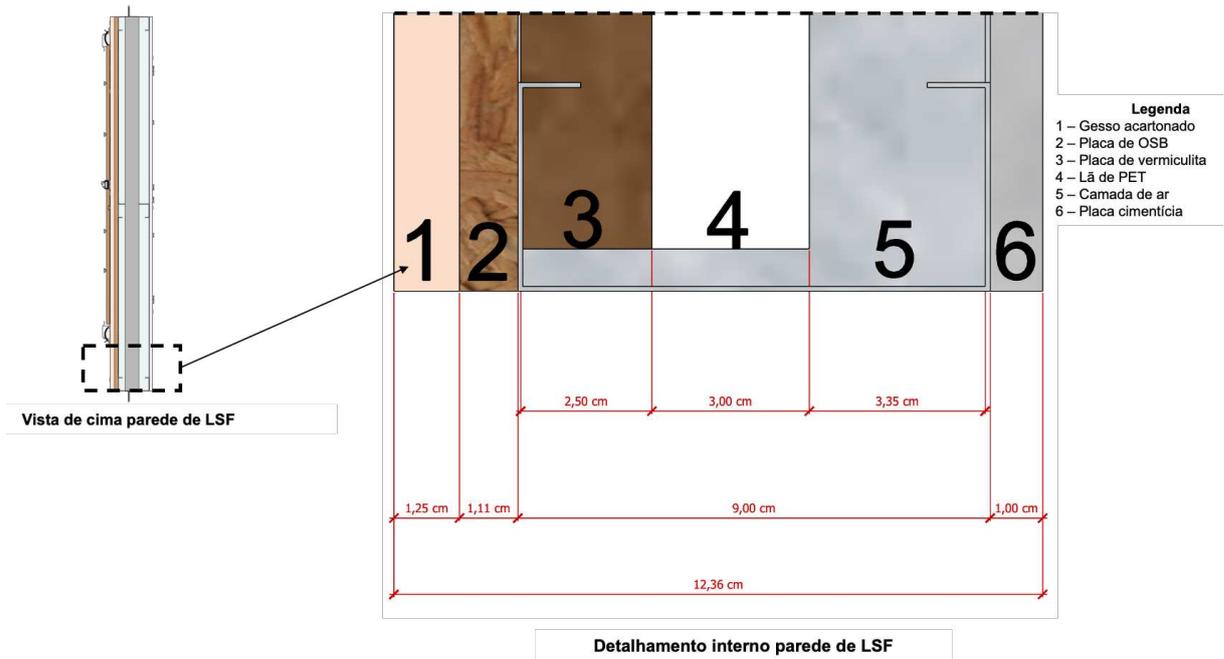
II. MATERIAIS E CORPOS DE PROVA

Para a realização dos ensaios experimentais desta pesquisa foram utilizadas mantas de lã de PET doadas pela empresa TRISOFT com densidade de 7 Kg/m^3 e espessura de 3,0 cm. O rolo desse material apresentou largura 120 cm e 1000 cm comprimento. A placa de vermiculita foi adquirida da empresa CALDESUL com densidade de 420 Kg/m^3 , espessura de 2,4 cm e dimensões de 30 cm por 60 cm. As placas de revestimento utilizadas foram, uma placa cimentícia de 1 cm de espessura da marca BRASILIT; uma placa de OSB do modelo LP OSB APA Plus da marca LP Brasil de 1,11 cm de espessura e; uma placa de gesso acartonado do modelo *standard* branca com espessura de 1,25 cm da marca PLACO. As dimensões das guias e dos montantes utilizados foram de 9 cm de largura e a espessura do aço foi de 0,95 mm, produzidos pela empresa SMART, feitos de aço galvanizado formados a frio e revestidos de alumínio e zinco (275g/m^2) e limite de escoamento de 230 MPa. Os parafusos para fixação das placas foram de ponta broca da marca RUSPER, feitos de aço baixo carbono galvanizado e acabamento zincado, com dimensões de 0,45 cm por 0,32 cm e para parafusar os perfis foram utilizados parafusos de ponta agulha com dimensões de 0,42 cm por 0,13 cm.

2.1 Materiais utilizados para a avaliação do desempenho térmico

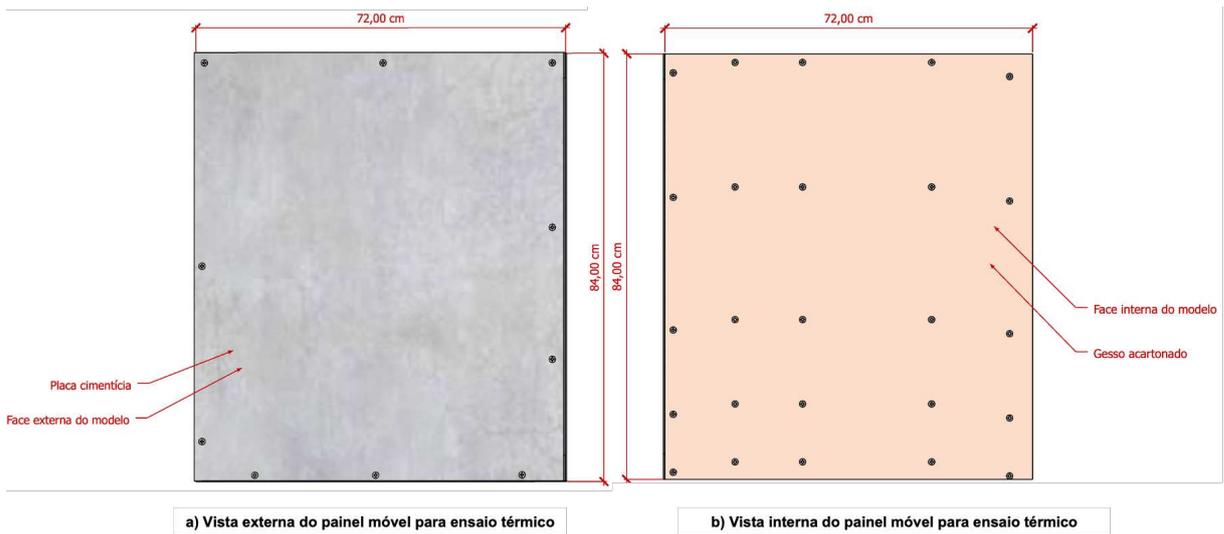
Os ensaios para a avaliação do desempenho térmico foram realizados no painel móvel utilizado para o fechamento da parede de LSF nos ensaios de PT (Figura 62), mas sem a placa de vedação externa de OSB e apresentou detalhamento interno conforme a Figura 52. As dimensões do modelo foram de 72 cm por 84 cm e 12,36 cm de espessura. Na Figura 53 e Figura 54, é possível perceber que a face externa considerada foi o lado com placa cimentícia e a face interna, a superfície com placa de gesso acartonado, assim como são construídas usualmente as paredes de LSF, no Brasil. Por meio da Figura 55, é possível ver a aplicação da manta de lã de PET no interior do painel de LSF.

Figura 52 - Detalhamento interno da parede de ensaio (vista de cima).



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 53 – Vista esquemática externa e interna do painel móvel para ensaio térmico. a) lado com placa cimentícia. b) lado com placa de gesso acartonado



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 54 – Foto da vista externa e interna do painel móvel para ensaio térmico. a) lado com placa cimentícia. b) lado com placa de gesso acartonado



a) Vista externa do painel móvel para ensaio térmico



b) Vista interna do painel móvel para ensaio térmico

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 55 - Manta de lã de PET sendo aplicada no painel de LSF.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

2.2 Materiais utilizados para a avaliação do desempenho acústico.

Neste Subitem, foram apresentados os materiais e corpos de prova utilizados para a realização dos ensaios experimentais para a determinação do coeficiente de absorção sonora e impedância acústica, bem como para a avaliação da PT na parede de LSF.

2.2.1 Materiais utilizados para o ensaio de determinação do coeficiente de absorção sonora e impedância acústica

No ensaio de caracterização acústica, a lã de PET e a placa de vermiculita foram cortadas em seis amostras de diâmetro de 6 cm, de acordo com o tamanho do tubo de ensaio, conforme mostra a Figura 56, Figura 57 e Figura 58. A caracterização da lã de PET e da placa de vermiculita já foi descrita no começo deste Capítulo.

Figura 56- Amostras da lã de PET



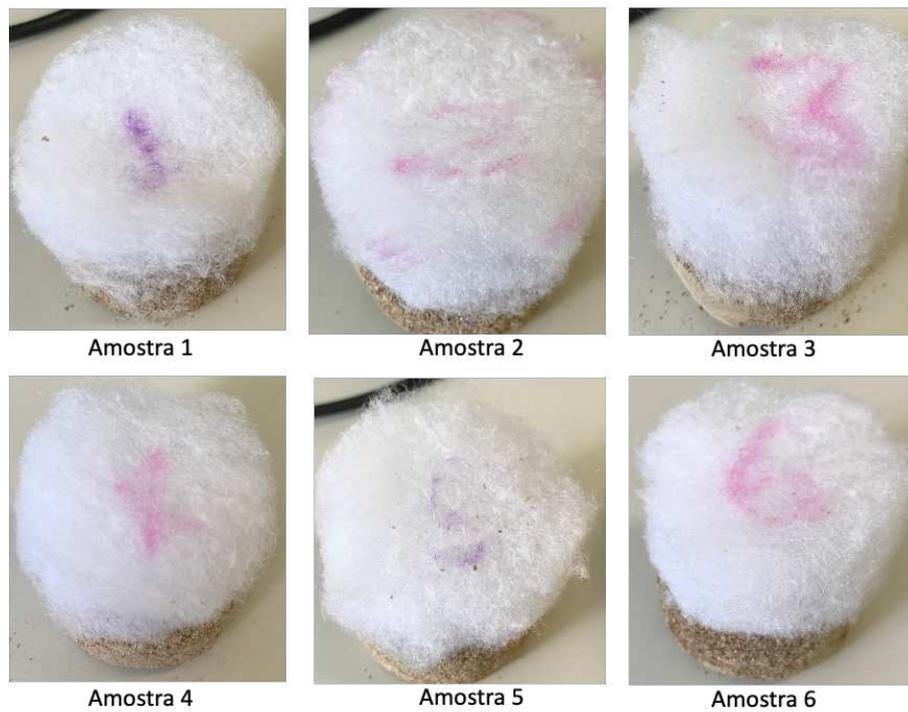
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 57 - Amostras da placa de vermiculita



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 58 – Sistema com duas camadas: placa de vermiculita e lã de PET



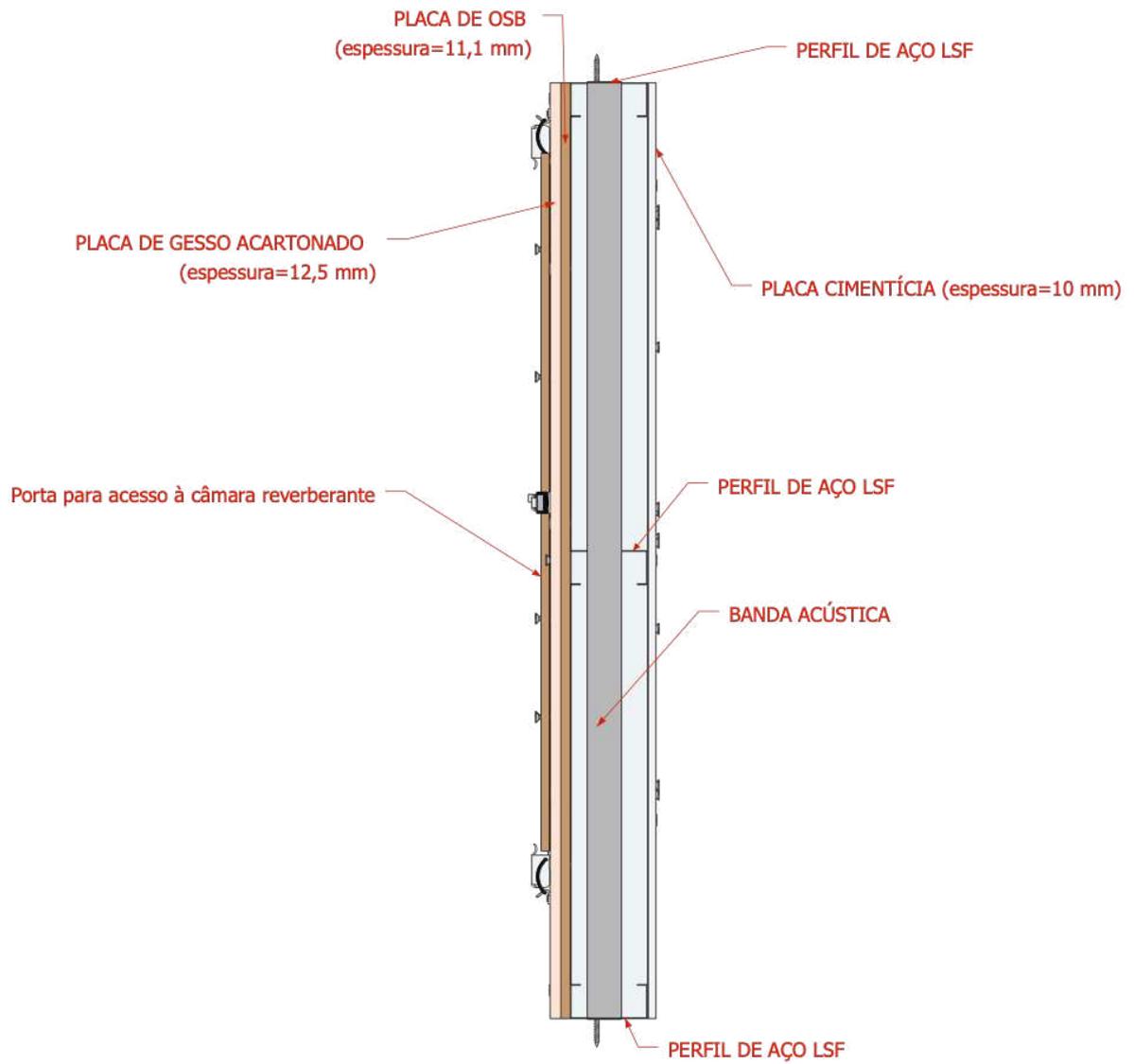
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

2.2.2 Materiais utilizados para o ensaio de Perda de Transmissão Sonora (PT)

Para os ensaios de PT em temperatura ambiente e sob aquecimento em paredes do sistema LSF, foram utilizados materiais tipicamente encontrados em edificações de LSF no Brasil. A parede em LSF foi construída no Laboratório de Dinâmica e Acústica Estrutural (LADAE) da Escola de Engenharia da UFMG, para a realização do ensaio, em um vão com dimensões de 110 cm por 235 cm. A parede foi construída com os mesmos materiais utilizados no ensaio de desempenho térmico. De um lado foi colocada uma placa cimentícia de 1 cm de espessura e com dimensões de 110 cm por 235 cm da marca BRASILIT; do outro lado da parede, foram inseridas duas placas: uma de OSB do modelo LP OSB APA Plus da marca LP Brasil de 1,11 cm de espessura e dimensões de 110 cm por 235 cm e; uma placa de gesso acartonado do modelo *standard* branca com espessura de 1,25 cm e dimensões de 110 cm por 235 cm da marca PLACO (Figura 59 e Figura 52). As placas apresentaram essas dimensões devido às medidas do vão utilizado para inserir a parede de LSF para a realização do ensaio. No interior da parede também foram utilizados os materiais já descritos neste Capítulo, a manta de lã de PET e a placa de vermiculita, assim como o aço e os parafusos empregados na parede, também já apresentados.

Durante a fixação da parede para ensaio, foram inseridas fitas de banda acústica de 0,48 cm por 0,4 cm da marca PLACO entre os perfis externos de LSF e a parede de alvenaria, onde foi fixado o painel de ensaio. As mantas de lã de PET e as placas de vermiculita foram inseridas segundo a Figura 60. A cada realização do ensaio, a parede foi desmontada para a retirada de cada elemento interno.

Figura 59 - Vista de cima da parede de ensaio.



Vista de cima parede de LSF

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 60 - Diferentes configurações da parede de ensaio. a) Parede com manta de lã de PET; b) parede com placas de vermiculita.



a) Inserção da manta de lã de PET na parede de LSF

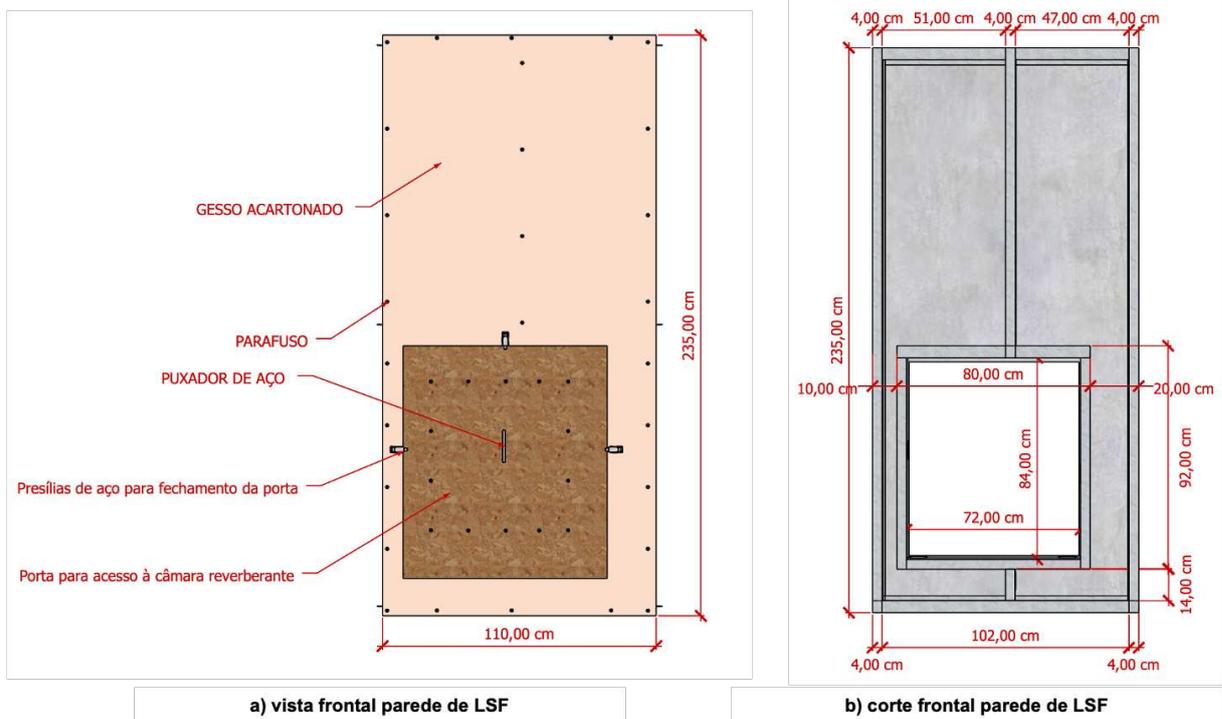


b) Inserção das placas de vermiculita na parede de LSF

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A parede apresentou 110 cm de largura por 235 cm de altura e para acessar a câmara reverberante, foi necessário realizar uma abertura na parede de ensaio com dimensões de 72 cm por 84 cm. Para o fechamento desse espaço, foi feito um pequeno painel móvel com as dimensões da abertura de acesso e com os mesmos componentes utilizados para construir a parede de ensaio e, para garantir a completa vedação do vão, durante a realização dos ensaios acústicos, uma placa de OSB de espessura de 0,95 cm da marca LP Brasil foi sobreposta ao pequeno painel móvel junto às fitas de banda acústica, conforme mostram as Figura 61 e Figura 62.

Figura 61 - Vista frontal desenho esquemático da parede de ensaio. a) vista frontal; b) corte frontal



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 62 – Painel móvel de acesso a câmara reverberante. a) vista frontal do painel móvel para o fechamento da parede de LSF; b) vista superior detalhada do painel móvel.



a) Vista do painel móvel com fechamento com placa de OSB para acesso à câmara reverberante



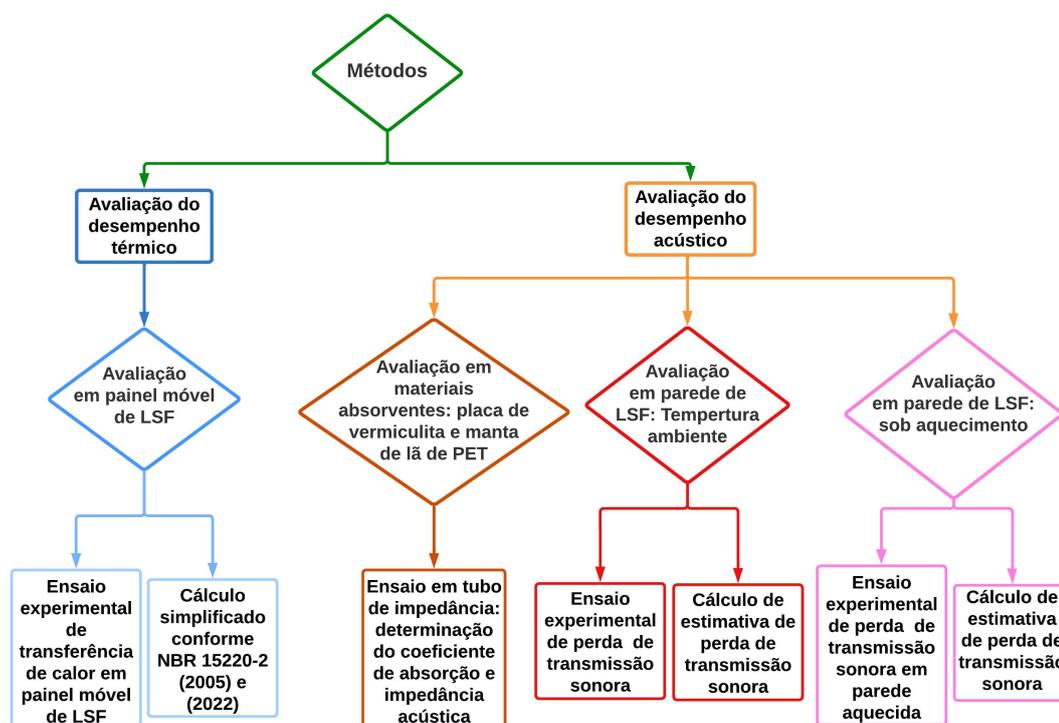
b) Vista superior detalhada do painel móvel

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

III. MÉTODOS

Para a avaliação do desempenho térmico e acústico do sistema LSF, foram empregados os métodos descritos no fluxograma apresentado na Figura 63. Os métodos foram divididos em duas partes principais: avaliação do desempenho térmico e avaliação do desempenho acústico. A primeira parte foi a avaliação do desempenho térmico em um painel de LSF com manta de lã de PET e placa de vermiculita, por meio de um ensaio experimental de transferência de calor e por meio da realização do cálculo simplificado, conforme a ABNT NBR 15220-2:2005 e ABNT NBR 15220-2:2022. A segunda foi composta por três partes, a caracterização acústica dos materiais absorvedores, a manta de lã de PET e a placa de vermiculita, por meio de ensaios em tubo de impedância para a determinação do coeficiente de absorção sonora e da impedância acústica; foi realizada também a avaliação da PT em paredes de LSF, em temperatura ambiente e sob aquecimento e, por fim, foram feitos cálculos teóricos de estimativa de PT.

Figura 63 – Fluxograma dos métodos utilizados para a avaliação do desempenho térmico e acústico de paredes de LSF.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

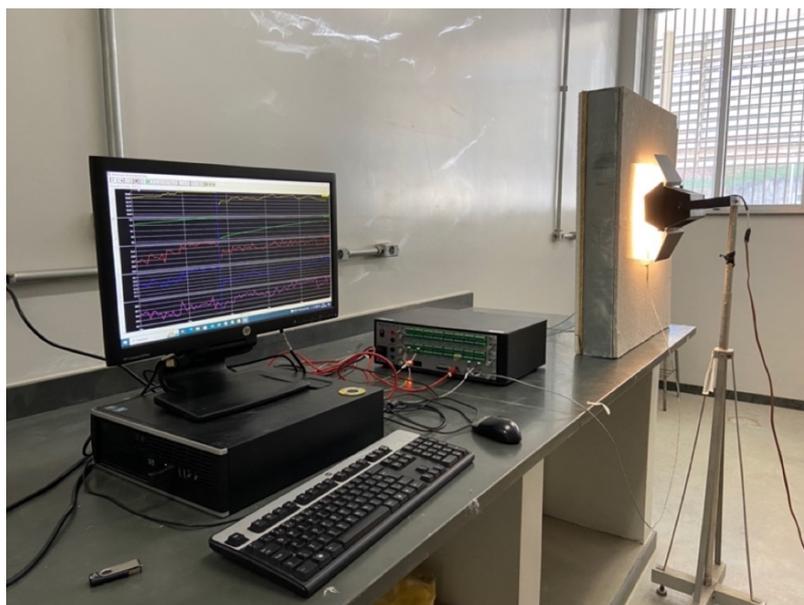
3.1 Avaliação do desempenho térmico

Nesta Seção foi feita a descrição dos ensaios de transferências de calor realizados no painel de LSF para a avaliação do desempenho térmico. Além disso, foram descritos os cálculos simplificados para o cálculo de resistência térmica (R), transmitância térmica (U) e capacidade térmica (C).

3.1.1 Ensaio experimental de transferência de calor em painel móvel de *Light Steel Framing* (LSF)

Para a avaliação do desempenho térmico em painéis de LSF, foi realizado um ensaio experimental de transferência de calor, no LADAE, comparando a diferença de temperatura entre a face externa e interna no painel de LSF, ao longo de um constante aquecimento e durante seu resfriamento. O ensaio foi composto por um refletor da marca COLORTRAN com lâmpada halógena de 300 W e dimensões de 21 cm por 15 cm, responsável pelo aquecimento do sistema, apoiado sobre um tripé; quatro termopares tipo *J* conectados a um sistema de aquisição de dados da LYNX que, por sua vez, estava ligado a um computador, por meio de um cabo de rede, para posterior análise das medições (Figura 64). Este ensaio foi fundamentado com base na pesquisa de Carrasco (2005) e na pesquisa de Franzen (2015), já mencionados no Capítulo 1.

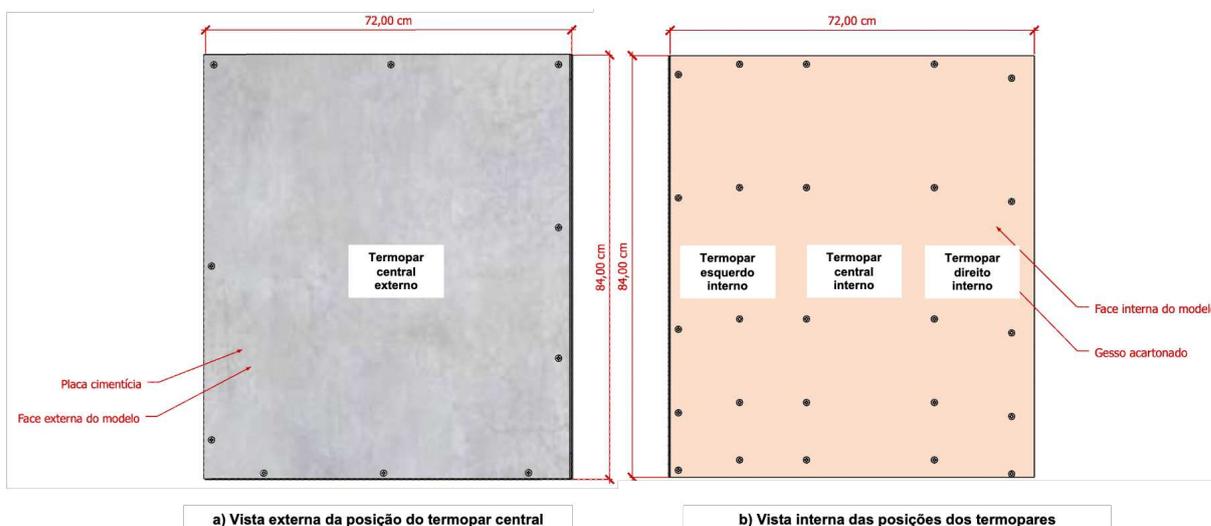
Figura 64 – Ensaio para a avaliação do desempenho térmico do LSF



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

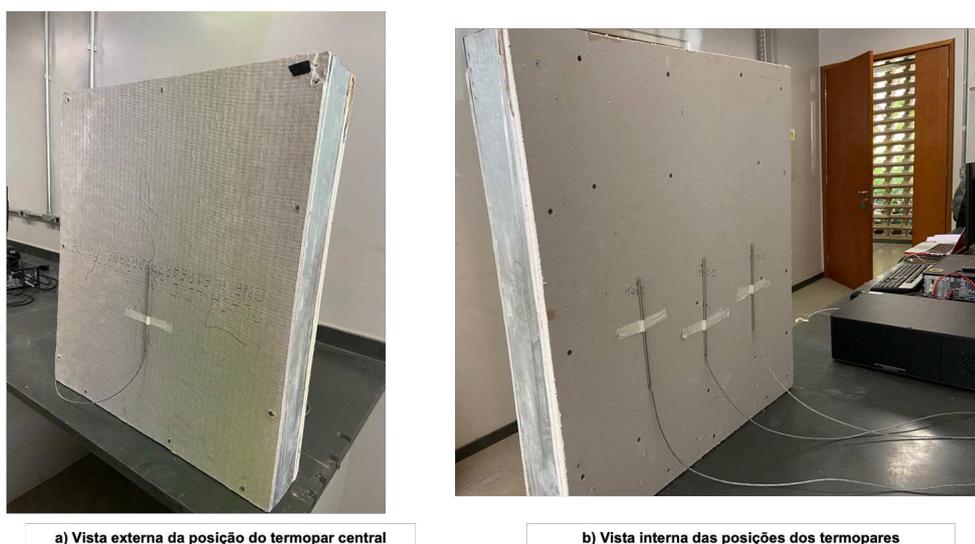
Os termopares ficaram dispostos da seguinte forma: um termopar na parte central da face externa do painel (placa cimentícia) e três termopares na parte interna do painel (placa OSB e gesso acartonado), sendo o termopar central interno oposto ao termopar central externo, e os outros dois, 18 cm equidistantes do termopar central interno, conforme a Figura 65 e Figura 66. A análise de diferença de temperatura foi feita apenas na região diretamente oposta a fonte de calor, uma vez que na parte mais alta do painel e na parte mais baixa não houve diferenças significativas de temperatura.

Figura 65 – Disposição dos termopares no painel de LSF.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 66 - Foto dos termopares durante o ensaio.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A fonte de calor ficou ligada por quatro horas e quando a medição do termopar externo chegava a 140 °C (cerca de meia hora até atingir esse valor), a medição foi controlada para não haver superaquecimento ou quedas bruscas no valor da temperatura. Após as quatro horas, o refletor era desligado e, então, os termopares mediam o resfriamento do painel por sete horas seguidas. Ademais, para as quatro configurações do painel: sem material isolante; com manta de lã de PET; com placa de vermiculita e; painel com dois materiais isolantes, foi realizado um ensaio de desempenho térmico. Os ensaios foram realizados entre os dias 17 a 25 de maio de 2023, a temperatura ambiente no início dos ensaios, por volta das 10 horas da manhã, ficou entre 19 °C e 22 °C. Já a umidade do ar foi em torno de 63%. O refletor era desligado por volta das duas horas da tarde.

Após a realização dos ensaios, foram confeccionados gráficos de temperatura por tempo, ou seja, neles foram demonstradas as curvas da temperatura dos termopares em relação ao tempo de duração do ensaio. Também, foi feito um gráfico da relação (Calor transferido/Calor incidente) por tempo, conforme a Equação 3.1 (CARRASCO, 2005):

$$\frac{\text{Calor transferido}}{\text{Calor incidente}} = \frac{\text{Temperatura do termopar interno}}{\text{Temperatura do termopar externo}} \% \quad (3.1)$$

Ainda, foi calculado o amortecimento térmico dos painéis ensaiados, ou seja, a capacidade de diminuir o aumento da temperatura interna da parede, de acordo com a Equação 3.2 (CARRASCO, 2005):

$$\text{Amortecimento térmico} = 100 - \frac{\text{Temperatura do termopar interno}}{\text{Temperatura do termopar externo}} \% \quad (3.2)$$

O cálculo da Equação 3.2 foi dado no momento exato em que foi desligada a fonte de calor, isso é, após 4 horas do início do ensaio.

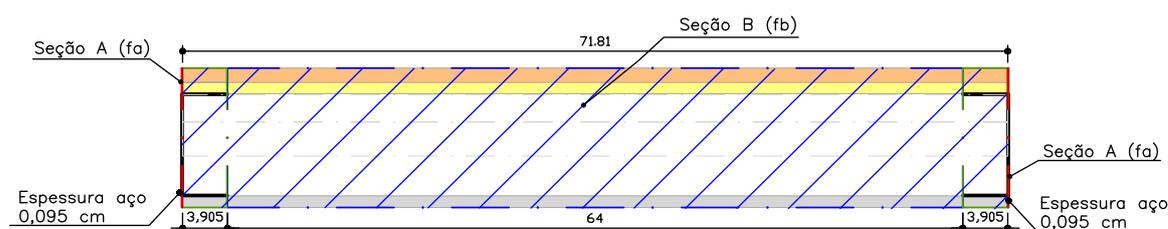
Por fim, foi determinado o atraso térmico por meio do gráfico da relação (Calor transferido/Calor incidente) por tempo. Esse parâmetro foi dado de acordo com o tempo gasto para a curva de Calor transferido/Calor incidente ficar constante durante o resfriamento do painel (CARRASCO, 2005), ou seja, o tempo transcorrido para a temperatura do painel interno parar de subir e se igualar ou se aproximar da temperatura do painel externo.

3.1.2 Cálculo simplificado - ABNT NBR 15220-2:2005 e ABNT NBR 15220-2:2022

O cálculo simplificado foi realizado conforme a ABNT NBR 15220-2:2022 para determinar os valores de resistência térmica (R), transmitância térmica (U) e capacidade térmica (C) do painel móvel de LSF analisado. Logo, os resultados encontrados foram comparados com os valores estabelecidos pela ABNT NBR 15575-4:2021. A ABNT NBR 15220-2:2022 sugere que não seja utilizado o cálculo simplificado quando o isolamento é conectado por meio de elementos feitos de metal, devido a alta transmitância térmica, como é o caso das paredes em LSF. Como a norma anterior, ABNT NBR 15220-2:2005, não menciona essa recomendação, o cálculo simplificado foi feito conforme a norma de 2005 e a atual, para efeitos de comparação.

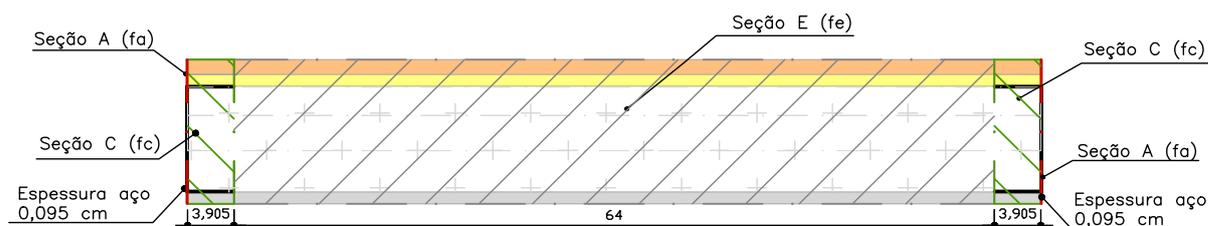
A resistência térmica total (R_{tot}) do painel móvel foi calculada com base na Equação 1.1. Os limites inferior e superior foram calculados dividindo o painel móvel ensaiado em seções, conforme a Figura 67, Figura 68 e Figura 69 e as dimensões da Tabela 16. A seção (A) e a seção (B) apresentaram a espessura do perfil de aço; a seção (C) e a sessão (D) transpassaram pela mesa do perfil e a seção (E) foi seccionada sem passar pelo perfil de aço.

Figura 67 - Vista de cima do painel dividido em seções para o cálculo simplificado de acordo com a ABNT NBR 15220-2:2022.



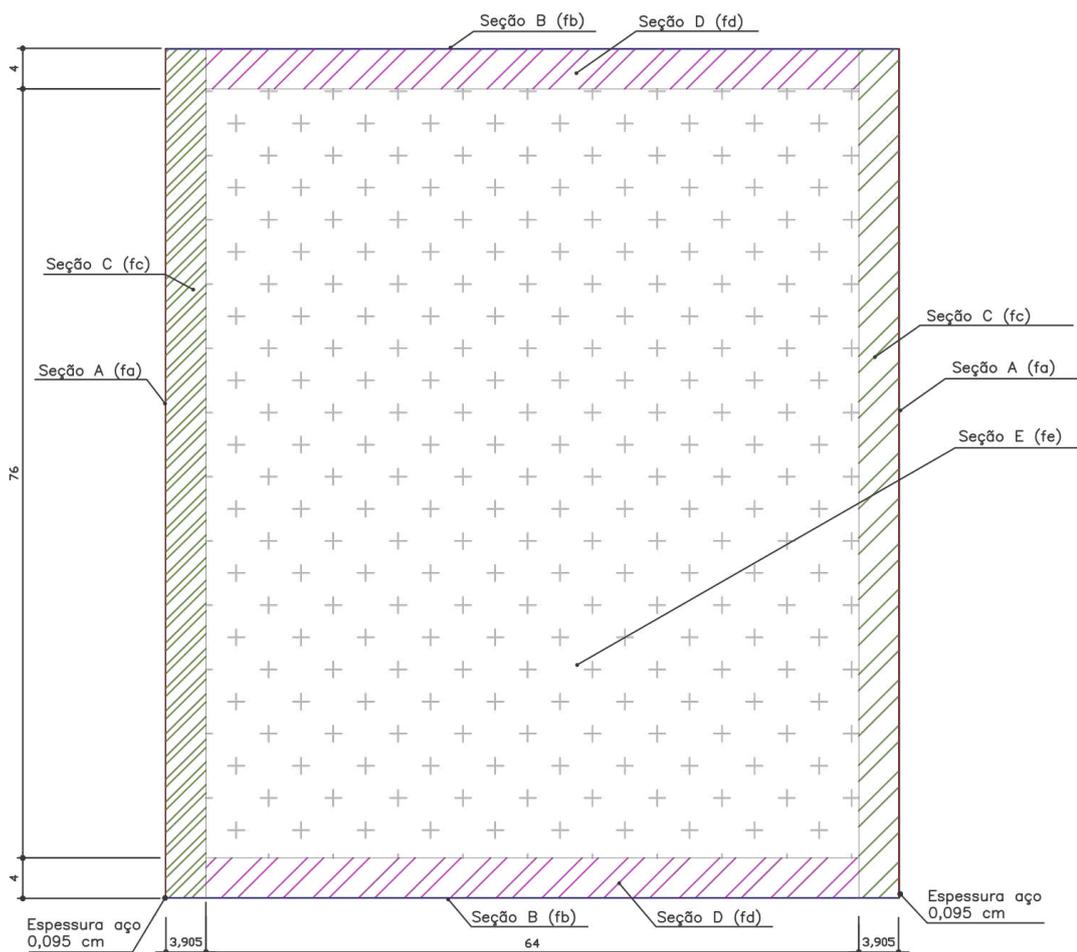
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 68 – Planta do painel dividido em seções para o cálculo simplificado de acordo com a ABNT NBR 15220-2:2022.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 69 – Corte visto de frente do painel dividido em seções para o cálculo simplificado de acordo com a ABNT NBR 15220-2:2022.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 16 - Dimensões das seções do painel móvel

	Largura (m)	Comprimento (m)	Área (m ²)	Repetições	Área total (m ²)
Seção A (fa)	0,00095	0,84	0,000798	2	0,0016
Seção B (fb)	0,7181	0,00095	0,000608	2	0,0012
Seção C (fc)	0,03905	0,8381	0,032802	2	0,0656
Seção D (fd)	0,64	0,03905	0,024992	2	0,0500
Seção E (fe)	0,64	0,76	0,4864	1	0,4864

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

As propriedades térmicas dos materiais utilizados nas paredes foram demonstradas na Tabela 17. Os dados foram retirados de catálogos técnicos das empresas

responsáveis pela fabricação dos materiais utilizados na montagem do painel, quando os dados não foram expostos pela empresa fabricante, as propriedades térmicas foram extraídas de Ribas (2013) e da ABNT NBR 15220-2:2005. A resistência do ar utilizada foi de 0,1 m²K/W e a capacidade térmica do ar foi desconsiderada, conforme a recomendação da ABNT NBR 15220-2:2022.

Tabela 17 - Propriedades térmicas dos componentes que compõem o painel móvel de LSF.

Componente	Espessura (d) - m	Condutividade térmica 25°C (λ) - W/(mK)	Resistência (R) - m ² K/W	Calor específico (c) (kJ/(kg.K))	Densidade massa aparente (ρ) - kg/m ³	Capacidade térmica (C) - kJ/(m ² K)
Placa cimentícia	0,01	0,35	0,03	0,84	1800	15,12
Manta de lã de PET	0,03	0,04	0,79	0,7	7	0,15
Placa de vermiculita	0,024	0,06	0,40	0,84	420	8,47
Placa de OSB	0,011	0,13	0,09	2,3	640	16,19
Placa de gesso acartonado	0,0125	0,25	0,05	0,84	875	9,19
Perfil de aço	0,00095	50	0,000019	0,46	7800	3,41
Camada de ar	0,036	-	0,10	-	-	-

Fonte: BRASLIT (2023); TRISOFT (2020); CALDESUL (2022); LP BRASIL (2023); PLACO (2023).

A resistência térmica calculada conforme a ABNT NBR 15220-2: 2005 foi dada pela Equação 1.9 e utilizou as mesmas seções para o cálculo da resistência térmica total (R_{tot}). A norma de 2005 demonstrava as mesmas equações que a norma atual para o cálculo de capacidade térmica e transmitância térmica. O cálculo simplificado também foi realizado para as quatro configurações de painéis: sem material isolante; com manta de lã de PET; com placa de vermiculita e; painel com dois materiais isolantes.

3.2 Avaliação do desempenho acústico

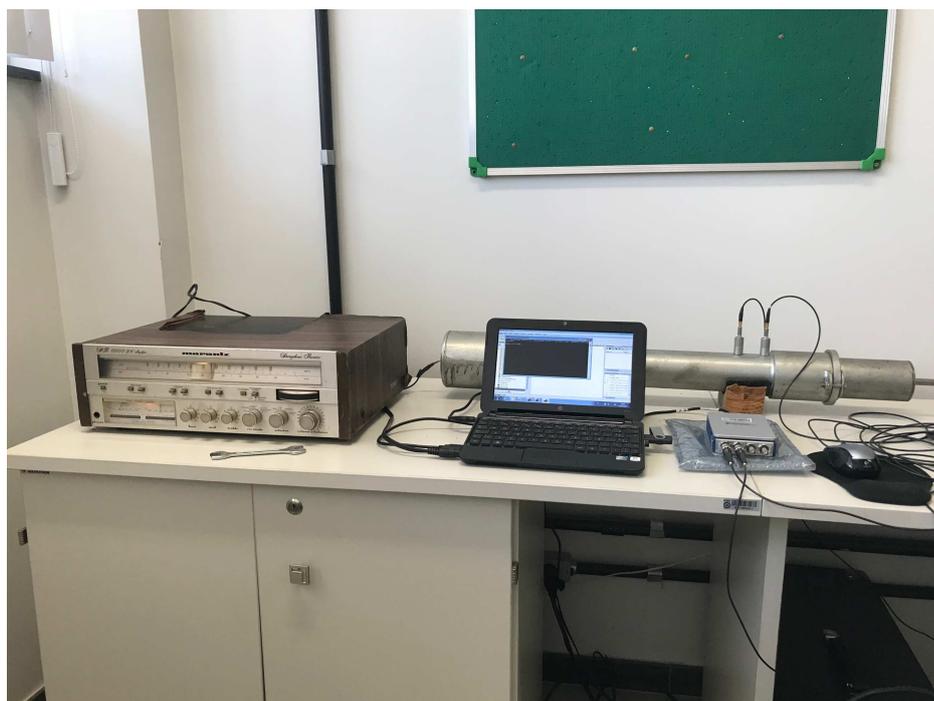
Nesta Seção, foram descritos os métodos utilizados para a avaliação do desempenho acústico da parede de LSF. Primeiro, foi explicado como foi realizado o ensaio para a determinação do coeficiente de absorção sonora e impedância acústica nos materiais absorventes estudados, a manta de lã de PET e a placa de vermiculita e, então, foi

apresentado como foi feita a medição da PT, com e sem aquecimento, na parede de ensaio de LSF.

3.2.1 Ensaio em tubo de impedância para a determinação do coeficiente de absorção sonora e impedância acústica da manta de lã de PET e placa de vermiculita.

Os ensaios foram realizados na Escola de Engenharia da 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 70). O modelo computacional utilizado para a digitalização e análise de sinais 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, 2018).

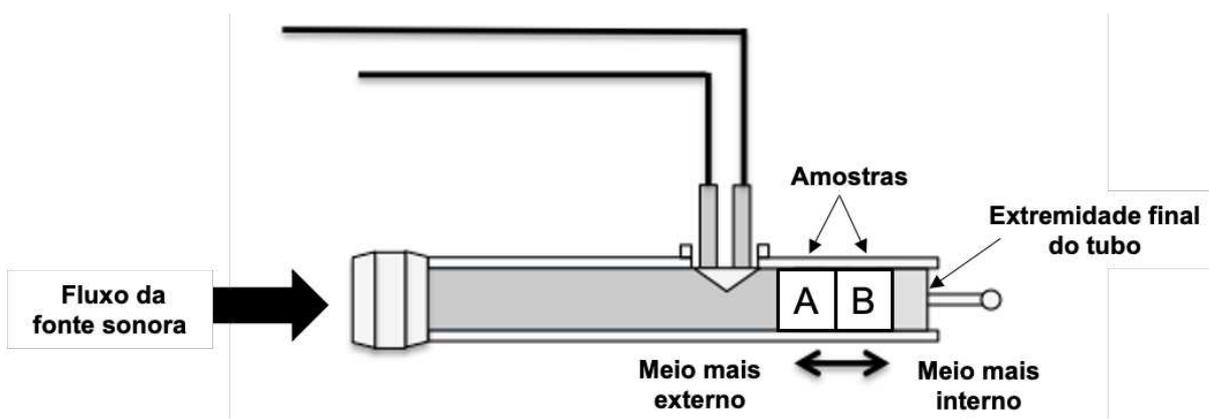
Figura 70 - Configuração do ensaio no tubo de impedância.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Os ensaios acústicos na lã de PET e em placas de vermiculita para a medição do coeficiente de absorção sonora do material por meio de um tubo de impedância foram realizados conforme a ASTM E 1050:2019. Nos ensaios realizados de forma individual, cada amostra de material foi inserida no fundo do tubo. Nos ensaios realizados com a lã de PET e a placa de vermiculita juntas, as amostras foram dispostas no fundo do 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 71. A norma recomenda que haja ao menos duas amostras para cada ensaio sob as mesmas condições de montagem, mas foram feitos 6 ensaios para cada amostra analisada, para melhor avaliação dos resultados.

Figura 71 - Disposição dos materiais no tubo de impedância



Fonte: Adaptado de Gomes (2015).

A faixa de frequência de operação utilizada no ensaio foi dada pela Equação 3.3, onde f_l é o limite mínimo da frequência e f_u é o limite máximo da frequência, em Hz. O f_l depende do espaçamento dos microfones e foi recomendado que essa distância exceda 1% do comprimento de onda correspondente à frequência de interesse mais baixa (ASTM E1050, 2019).

$$f_l < f < f_u \quad (3.3)$$

Assim, f_u e o comprimento de onda dependem do diâmetro do tubo de impedância e da velocidade de propagação do som, e foi dado pela Equação 3.4:

$$f_u < K c/d \quad (3.4)$$

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 apresentou uma potência uniforme na faixa de frequência de interesse e foi isolada do tubo para diminuir a excitação sonora transmitida pela estrutura do tubo de impedância. Os microfones estavam dispostos conforme a Figura 28, foram idênticos e apresentaram o diâmetro inferior a 20% do comprimento de onda em relação a frequência máxima de interesse. Além disso, o espaçamento máximo foi dado de acordo com a Equação 3.5, onde c é a velocidade do som, em m/s e, f_u é o limite máximo da frequência, em Hz (ASTM E 1050, 2019).

$$80 \% (c/2f_u) \quad (3.5)$$

Para a realização do cálculo do coeficiente de absorção sonora e da impedância acústica foi necessário encontrar o valor da velocidade do som e da densidade do ar por meio da Equação 3.6 e Equação 3.7 (ASTM E 1050, 2019):

$$c = 20,047\sqrt{273,15 + T} \quad (3.6)$$

$$\rho = 1,290 \left(\frac{P}{101,325} \right) \left(\frac{273,15}{273,15 + T} \right) \quad (3.7)$$

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 transferência (H) dos sinais dos microfones, para aferir valores de pressão acústica, foi dado pela Equação 3.8. Os microfones receberam a informação gerada pela fonte sonora e um sistema de análise de frequência digital foi responsável por converter o sinal recebido na curva de absorção sonora em função da frequência. A função de transferência foi dada pela razão entre a pressão acústica no microfone 1 e no microfone 2 (MASINI E TEODORO, 2011).

$$H_{12}(\omega) = \left(\frac{P_1(\omega)}{P_2(\omega)} \right) = \frac{[Ae^{-iKz_1} + Be^{iKz_1}]}{[Ae^{-iKz_2} + Be^{iKz_2}]} \quad (3.8)$$

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, foi encontrado o coeficiente de reflexão complexo (R) dado pela Equação 3.9, sendo s , o espaçamento entre os microfones.

$$R = \left(\frac{H_{12}(\omega) - e^{-iKs}}{e^{iKs} - H_{12}(\omega)} \right) e^{2iKz_1} \quad (3.9)$$

Dessa forma, foi possível encontrar o coeficiente absorção sonora e a impedância acústica por meio das Equações 3.10 e 3.11, e a parte resistiva e reativa por meio das Equações 3.12 e 3.13, respectivamente (ASTM, 2019; GOMES, 2015):

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (3.10)$$

$$z = \frac{(1 + r)}{(1 - r)} \rho c \quad (3.11)$$

$$r_n = \frac{\alpha}{[2(1 - R_r) - \alpha]} \quad (3.12)$$

$$x_n = \frac{2R_i}{[2(1 - R_r) - \alpha]} \quad (3.13)$$

Onde R_r e R_i são dados pelas Equações 3.14, 3.15 e 3.16:

$$R_r = \{2H_r \cos[k(2l + s)] - \cos(2kl) - (H_r^2 + H_i^2) \cos[2k(l + s)]\} / D \quad (3.14)$$

$$R_i = \{2H_r \sin[k(2l + s)] - \sin(2kl) - (H_r^2 + H_i^2) \sin[2k(l + s)]\} / D \quad (3.15)$$

$$D = 1 + H_r^2 + H_i^2 - 2[H_r \cos(ks) + H_i \sin(ks)] \quad (3.16)$$

sendo, l a distância entre a amostra e o microfone mais próximo em m e; H_r e H_i a parte real e a imaginária da função de transferência, respectivamente.

A partir dos resultados encontrados foram calculadas as médias aritméticas entre as seis amostras de cada conjunto de ensaio e então, foram calculados os valores de variância, desvio padrão e coeficiente de variação (EQUAÇÕES 3.17, 3.18 E 3.19). Por fim, foi encontrada a distribuição *t-Student* (t), com cinco graus de liberdade, pois o tamanho da amostra é pequeno (EQUAÇÃO 3.20) e o intervalo de confiança de 95% das amostras realizadas, a partir da distribuição de *t-Student* (limite inferior e superior) (EQUAÇÃO 3.21) (BARROS NETO, SCARMINIO E BRUNS, 2001).

$$Var = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)} \quad (3.17)$$

$$Dp = \sqrt{Var} \quad (3.18)$$

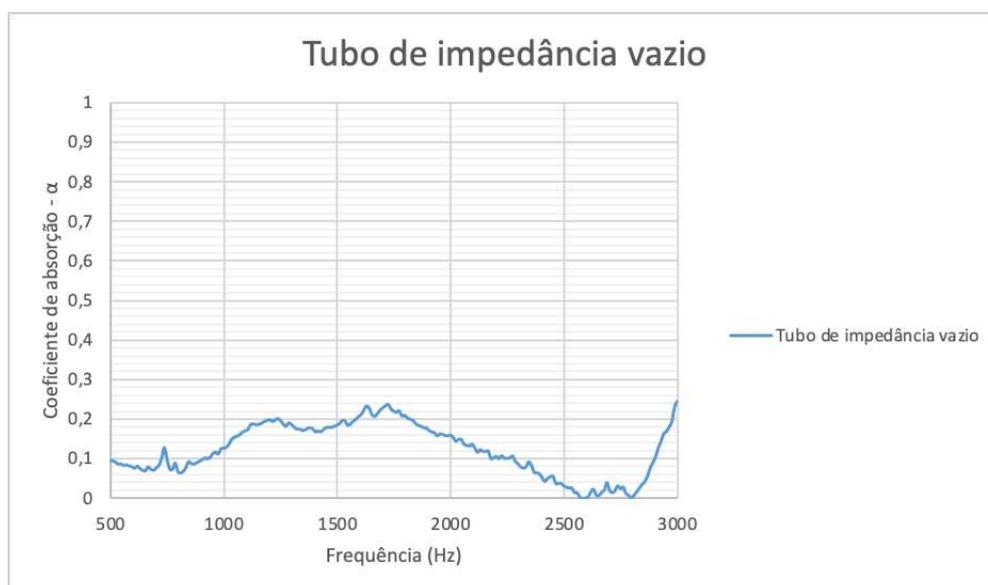
$$Cv = \frac{Dp}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (3.19)$$

$$t = t_{n-1} \frac{Dp}{\sqrt{n}} \quad (3.20)$$

$$\mu = \bar{x} \pm t \quad (3.21)$$

Ademais, antes de iniciar os ensaios com as amostras, realizou-se a caracterização do tubo de impedância vazio, no qual é feito um ensaio sem material absorvente, em seu interior. 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 72).

Figura 72 - Gráfico de coeficiente de absorção sonora no tubo de impedância vazio



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Finalmente, foi calculado o *Noise Reduction Coefficient* (coeficiente de redução sonora - NRC) das amostras analisadas. Para o cálculo de valor único foi utilizada a Equação 3.22 (BIES E HANSEN, 2009):

$$NRC = \frac{(\bar{\alpha}_{250} + \bar{\alpha}_{500} + \bar{\alpha}_{1000} + \bar{\alpha}_{2000})}{4} \quad (3.22)$$

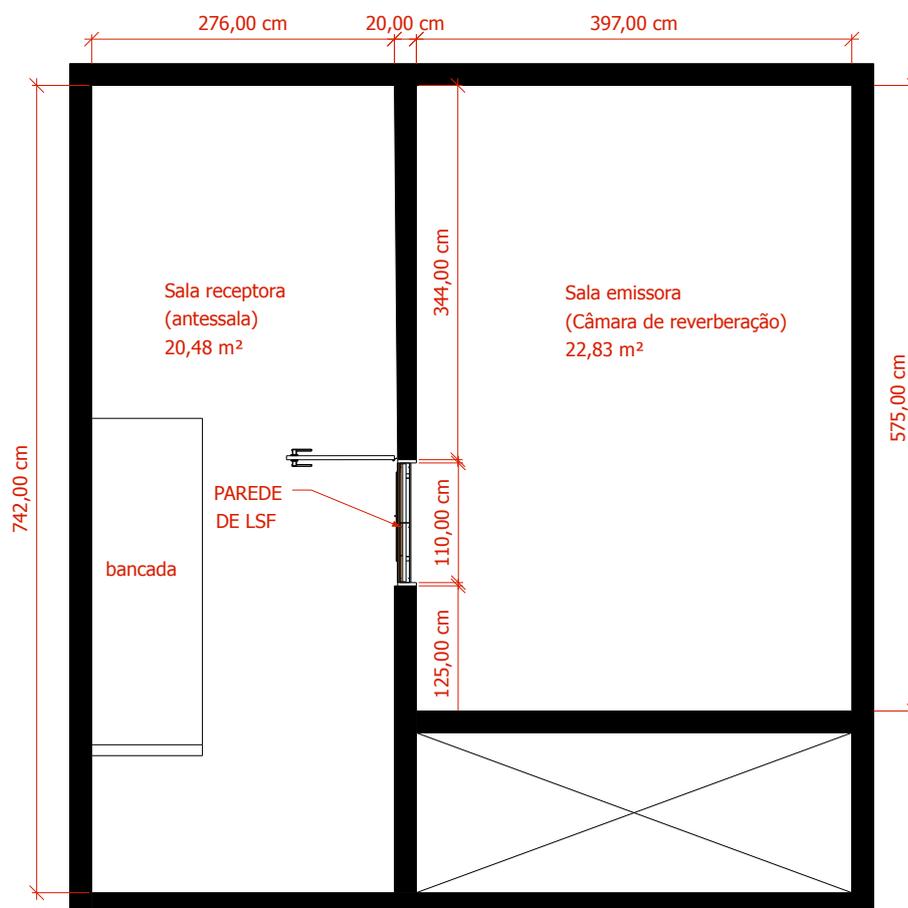
Onde, $\bar{\alpha}$ é a média aritmética dos coeficientes de absorção sonora correspondente às bandas de oitava de 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz.

3.2.2 Ensaio de PT em temperatura ambiente

Os ensaios experimentais acústicos para a determinação da PT em temperatura ambiente foram realizados no LADAE. Os ensaios foram executados seguindo os procedimentos prescritos pelas normas ISO 10140:2021 (*Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements*), ABNT NBR ISO 717-1:2021 e

ABNT NBR 15575-4:2021. A parede de LSF foi inserida entre a câmara de reverberação e a antessala, conforme mostra a Figura 73.

Figura 73 - Planta baixa LADAE.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Segundo a ISO 10140-2:2021 (*Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 2: Measurement of airborne sound insulation*) para medições de laboratório usando pressão sonora, o índice de redução sonora é dado pela Equação 3.23.

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (3.23)$$

Onde, L_1 é o nível médio de pressão sonora na sala de emissão, em dB; L_2 é o nível médio de pressão sonora na sala de recepção, em dB; S é a área da parede ensaiada, em m^2 e; A é a área de absorção sonora equivalente na sala de recepção, em m^2 .

Para determinar o valor de A , foi realizado o ensaio para o cálculo do tempo de reverberação (TR) da sala receptora, conforme as normas ISO 10140-4:2021 (*Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 4: Measurement procedures and requirements*) e ABNT NBR ISO 3382-2:2017 (*Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas - Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns*). Para isso, foi utilizado o Método da Resposta Impulsiva, no qual consiste em emitir uma fonte impulsiva em um ponto da sala receptora, como um estouro de balão ou um tiro, capaz de produzir um nível de pressão sonora suficiente para gerar uma curva de decaimento de 60 dB, conforme recomenda a ABNT NBR ISO 3382-2:2017.

Durante o ensaio, foi utilizado o medidor de nível de pressão sonora XL2 da NTI Áudio, composto por um microfone omnidirecional (Figura 74b), configurado para medir o tempo de reverberação e, posteriormente, os dados coletados pelo equipamento de análise foram exportados para o *Microsoft Excel*. A fonte sonora utilizada foi um balão de número 8, responsável por fornecer uma curva de decaimento do nível de pressão sonora em função do tempo, após o seu estouro (Figura 74a). Devido ao ruído de fundo, o decaimento analisado na antessala foi de 20 dB (T_{20}), onde houve pelo menos 35 dB, gerado pela fonte sonora, acima do som residual em cada banda de frequência, conforme também recomenda a ABNT NBR ISO 3382-2:2017. A faixa de frequência analisada foi entre 100 Hz e 5000 Hz.

Figura 74 - Equipamentos utilizados para o cálculo do tempo de reverberação. a) balão para fonte impulsiva. b) medidor de nível de pressão sonora



a) balão utilizado como fonte impulsiva



b) Medidor de nível de pressão sonora

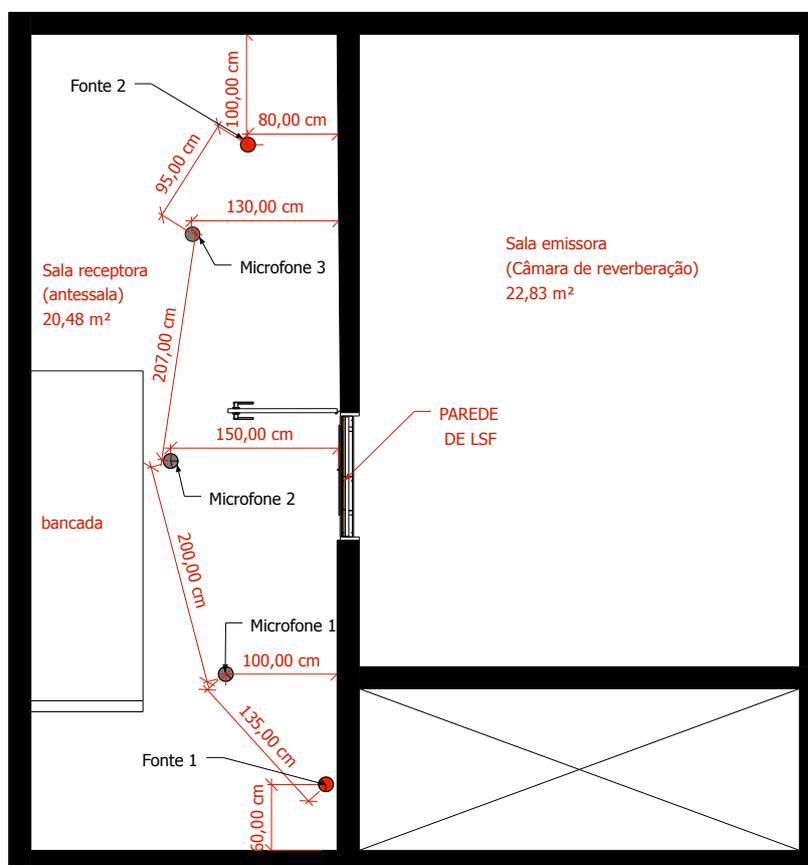
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A distribuição de microfones foi determinada de acordo com o Método de Engenharia, conforme indica as normas ISO 10140-4:2021 e ABNT NBR ISO 3382-2:2017, que consiste em realizar no mínimo seis medições e estabelecer pelo menos uma posição para a fonte sonora e seis posições para um microfone fixo. Nos ensaios realizados nesta pesquisa, foram utilizadas duas posições fixas para a fonte sonora (Fonte 1 e 2) e; três posições fixas de microfone (Microfone 1, 2 e 3) para cada posição da fonte sonora, totalizando seis medições. O microfone ficou a 1,20 m do piso sobre um tripé e a cada medição o microfone foi posicionado no mínimo a 2 m de distância da sua posição anterior, conforme mostra a Figura 75. A distância mínima estabelecida entre a fonte e a posição do microfone, foi de 0,90 m, e calculada conforme a Equação 3.24.

$$d_{min} = 2 \sqrt{\frac{V}{cT}} \quad (3.24)$$

Onde V é o volume da sala, em m^3 ; c é a velocidade do som em m/s e, T a estimativa do tempo de reverberação, em s .

Figura 75 – Planta baixa: Posições da fonte sonora e do microfone durante o ensaio de tempo de reverberação no LADAE/UFMG.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Conforme a ISO 10140-4:2021 é aconselhável que o tempo de reverberação esteja entre 1 s e 2 s. Para frequências entre 100 Hz e 630 Hz, o T_{20} ficou entre 1 s e 2 s e, para frequências acima de 800 Hz, o resultado do tempo de reverberação ficou abaixo de 1 s (Tabela 18).

Tabela 18 - Resultado do tempo de reverberação T_{20} para a sala receptora, em segundos.

Frequência (Hz)	TR média (s)	Frequência (Hz)	TR média (s)
100	1,12	800	0,98
125	1,01	1000	0,94
160	1,02	1250	0,94
200	1,03	1600	0,93
250	1,05	2000	0,93
315	1,05	2500	0,92
400	1,05	3150	0,90
500	1,05	4000	0,88
630	1,02	5000	0,84

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

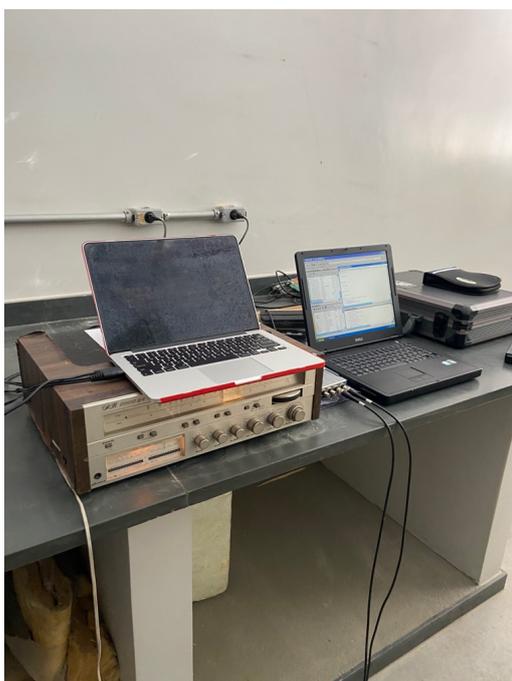
Dessa forma, foi possível determinar a área de absorção sonora equivalente na sala emissora, dada pela Equação 3.25, conforme ISO 10140-4:2021.

$$A = \frac{0,16 V}{T} \quad (3.25)$$

em que V é o volume, em m^3 e T , o tempo de reverberação, em s, encontrado para cada banda de frequência.

Após encontrar o valor de A , a medição da PT foi realizada com um ruído branco e em bandas de um terço de oitava na faixa de frequência entre 100 Hz e 5000 Hz. A câmara de reverberação foi capaz de criar um campo difuso homogêneo permitindo que a energia sonora fosse distribuída no volume da sala (GERGES 2000) e, dessa forma, simulou o meio externo de um edifício e a antessala o meio interno. Na sala emissora o campo sonoro difuso foi gerado por ruído branco e amplificado por um amplificador marca Marantz *SR 6000 Stereophonic Receiver* conectado a um amplificador SHARP com duas posições fixas (Fonte 1 e Fonte 2). O nível de pressão sonora foi medido na sala emissora e na sala receptora por dois microfones da BSWA TECH modelo MP 201 (Microfone 1, 2 e 3), um em cada ambiente conectado a um sistema de aquisição de dados da marca *National Instruments* modelo NI 9234. Para a análise dos dados, utilizou-se um algoritmo implementado no *software* MATLAB e, posteriormente, o *Microsoft Excel* (Figura 76).

Figura 76 - Equipamentos utilizados nos ensaios de PT.



a) Computadores e receptor de áudio utilizados



b) Tripé e microfone utilizados

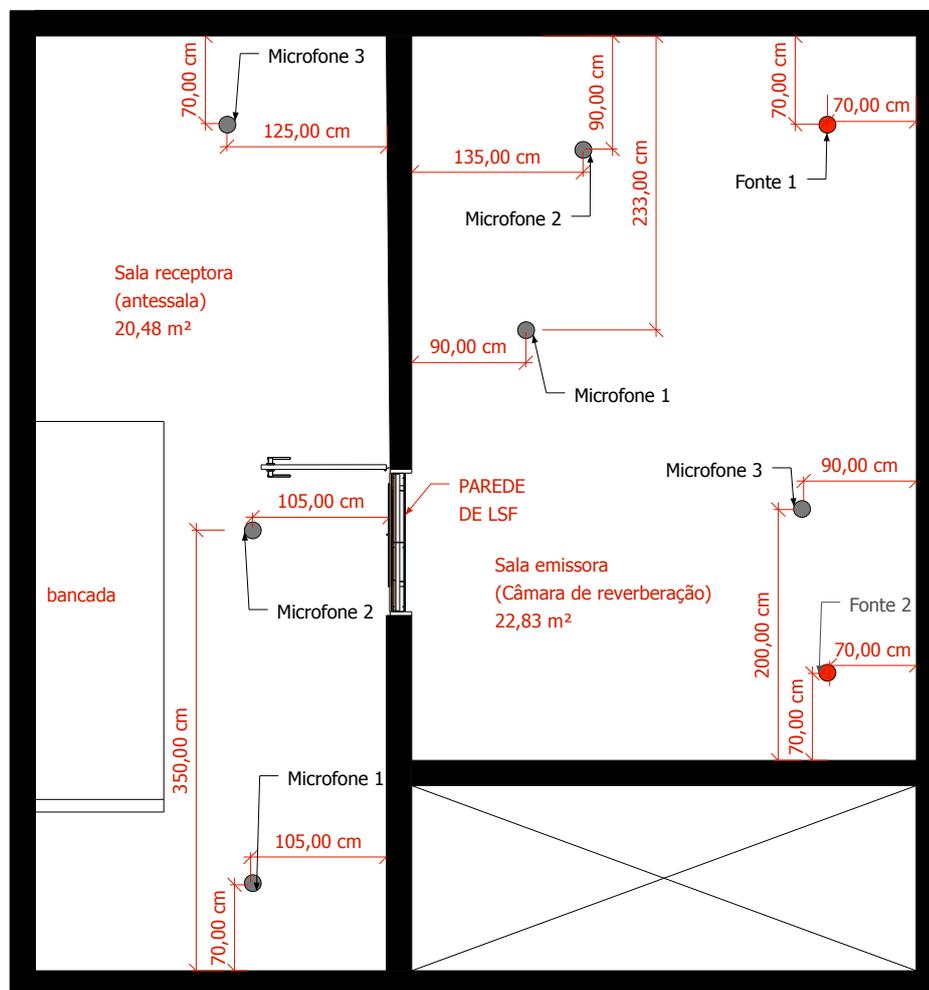
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Os microfones (Microfone 1, 2 e 3) e a fonte (Fonte 1 e 2) foram posicionados conforme a recomendação mínima da norma ISO 10140-4:2021, sendo 0,7 m entre as posições fixas do microfone e entre a posição do microfone e os limites da sala; 1 m entre qualquer posição do microfone e a parede de ensaio e; 1 m entre qualquer posição do microfone e a fonte sonora.

Os ensaios foram executados com quatro configurações diferentes: o primeiro ensaio foi feito sem material no interior do elemento de teste; no segundo ensaio, o painel foi composto somente com lã de PET; no terceiro ensaio, a parede apresentou apenas placas de vermiculita internamente e; no último ensaio, com a parede de LSF composta em seu interior por placas de vermiculita e manta de lã de PET. Dessa forma, cada tipo de composição da parede apresentou, durante os ensaios, três posições fixas de microfone em cada sala para ambas as posições da fonte, totalizando dessa forma, seis ensaios para cada parede e 24 ensaios para todas as quatro composições da parede. Apesar da norma recomendar no mínimo 10 medições para microfones fixos, foram realizadas seis medições. Inicialmente foram executadas

10 medições para o ensaio de PT, mas foi observado que 6 medições foram suficientes e não houve prejuízo nos resultados, devido às menores dimensões da antessala (Figura 77).

Figura 77 – Planta baixa: posições da fonte sonora e do microfone durante o ensaio de PT no LADAE/UFMG.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Após a realização dos seis ensaios para medição dos níveis de pressão sonora em cada sala, um cálculo no nível médio da pressão sonora de cada sala foi realizado conforme a Equação 3.26 (ISO 10140-4, 2021):

$$L = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \quad (3.26)$$

Em que L_1, L_2, \dots, L_n são os níveis de pressão sonora em n posições diferentes do microfone na sala, em dB.

Quando o nível de ruído de fundo não é adequado na sala receptora, a norma ISO 10140-4:2021 sugere uma correção, dada pela Equação 3.27. Ela é usada quando a diferença entre o nível de ruído de fundo e o sinal sonoro emitido para análise estiver entre 6 dB e 15 dB, em todas as bandas de frequência analisadas. Para uma diferença de nível menor ou igual a 6 dB, em qualquer uma das bandas de frequência, a norma recomenda usar a correção de 1,3 dB (ISO 10140-4, 2021).

$$L = 10 \log(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10}) \quad (3.27)$$

Onde L é o nível de ruído de fundo corrigido, L_{sb} é o nível do sinal sonoro combinado com o nível do ruído de fundo e L_b é o nível de ruído de fundo, em dB.

A área da parede utilizada para o ensaio apresentou uma medida 2,56 m², valor inferior ao determinado pela norma, na qual informa um valor mínimo de área do elemento teste, dado por 10 m². Além disso, a diferença entre o valor do volume da sala de emissão e recepção é de 2 %, no entanto a norma recomenda uma diferença de 10%. Ademais, a transmissão pelos flancos, ou seja, a transmissão sonora que ocorre por outros meios além do elemento teste, não foi considerada, uma vez que as paredes da câmara de reverberação, feitas em alvenaria, apresentaram maior massa por unidade de área que o elemento teste (ISO 10140-2, 2021).

3.2.2.1 Classificação de valor único de cada parede (R_w)

A partir dos resultados encontrados, após as medições de acordo com a ISO 10140:2021, foi calculada a classificação de valor único de cada parede, ou seja, o índice de redução sonora ponderado (R_w) em decibéis, conforme a ABNT NBR ISO 717-1:2021. Dessa forma, foi possível realizar comparações com o desempenho

mínimo de isolamento sonoro, exigido pela ABNT NBR 15575-4:2021, como mostram a Tabela 10 e a Tabela 11.

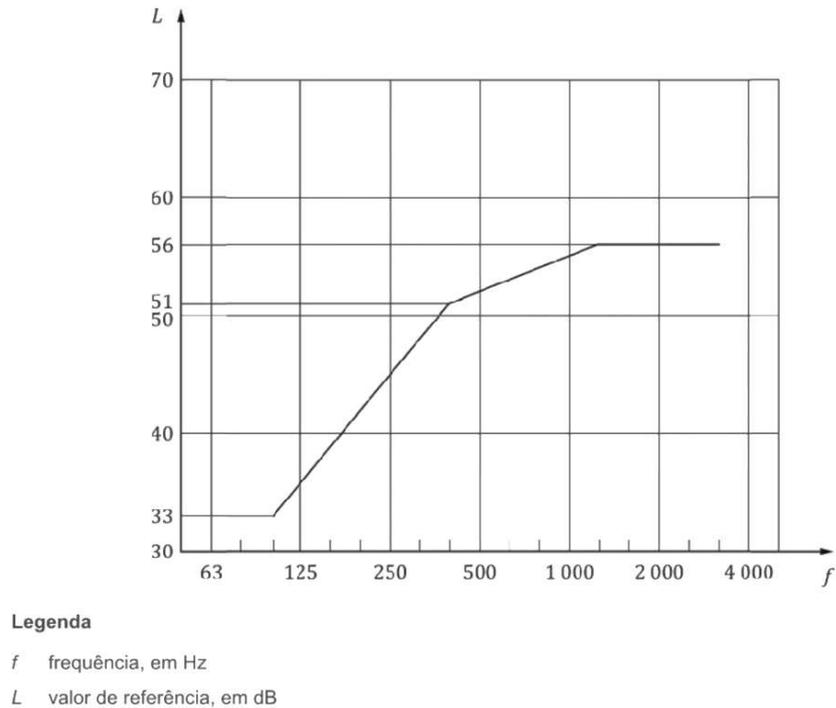
Para calcular o valor de R_w , uma curva de referência (Tabela 19 e Figura 78) foi deslocada até a curva da medição por meio de incrementos de 1 dB. O deslocamento acontece até que a soma dos desvios desfavoráveis (quando o resultado da medição do índice de redução sonora é menor que o valor da curva de referência) apresente um valor o mais próximo possível ou igual a 32 dB. Logo, a partir da determinação da curva deslocada, o valor correspondente ao R_w é encontrado na faixa de frequência de 500 Hz.

Tabela 19 – Valores de referência para ruído aéreo

Frequência	Valores de referência dB	
	Bandas de terço de oitava	Bandas de oitava
100	33	36
125	36	
160	39	
200	42	45
250	45	
315	48	
400	51	52
500	52	
630	53	
800	54	55
1 000	55	
1 250	56	
1 600	56	56
2 000	56	
2 500	56	
3 150	56	

Fonte: ABNT NBR ISO 717-1:2021.

Figura 78 - Curva de valores de referência para ruído aéreo em banda de terço de oitava.



Fonte: ABNT NBR ISO 717-1:2021.

3.2.2.2 Espectros sonoros (C e C_{tr})

A correção de espectro sonoro foi dada por meio da Equação 3.28, conforme a ABNT NBR ISO 717-1:2021.

$$C_j = X_{aj} - X_w \quad (3.28)$$

sendo, j equivalente ao espectro sonoro nº 1 e nº 2; X_w é o valor correspondente ao valor único encontrado (R_w) e; X_{aj} , calculado por meio da Equação 3.29:

$$X_{aj} = -10 \log \sum 10^{(L_{i,j} - X_i)/10} \text{ dB} \quad (3.29)$$

Sendo i a faixa de frequência correspondente as bandas de um terço de oitava (100 Hz a 3150 Hz); $L_{i,j}$ são os níveis do espectro sonoro estabelecidos pela ABNT NBR

ISO 717-1:2021, conforme Tabela 20, na frequência i para o espectro j e; X_i é o valor de R_w correspondente a frequência analisada.

Tabela 20 - Espectro de nível sonoro para calcular os termos de adaptação - C e C_{tr} .

Frequência	Níveis sonoros, L_{ij} dB			
	Espectro nº 1 para calcular C		Espectro nº 2 para calcular C_{tr}	
	Terço de oitava	Oitava	Terço de oitava	Oitava
100	-29		-20	
125	-26	-21	-20	-14
160	-23		-18	
200	-21		-16	
250	-19	-14	-15	-10
315	-17		-14	
400	-15		-13	
500	-13	-8	-12	-7
630	-12		-11	
800	-11		-9	
1 000	-10	-5	-8	-4
1 250	-9		-9	
1 600	-9		-10	
2 000	-9	-4	-11	-6
2 500	-9		-13	
3 150	-9		-15	

NOTA Todos os níveis são ponderados em A e o nível global do espectro é normalizado para 0 dB.

Fonte: ABNT NBR ISO 717-1:2021.

3.2.2.3 Classe De Transmissão Sonora (STC)

Assim como a ABNT NBR ISO 717-1:2021, foi preciso comparar a curva de medição com a curva de referência estabelecida pela ASTM E 413:2022, conforme a Tabela 21, para determinar o valor de STC. Um deslocamento foi feito por meio de incrementos de 1 dB até que o somatório dos desvios desfavoráveis seja o mais próximo possível ou igual de 32 dB, além disso cada desvio desfavorável não pôde ultrapassar 8 dB. A classificação também foi dada por meio do valor encontrado na

curva deslocada na faixa de frequência de 500 Hz. Os resultados obtidos nos ensaios foram comparados com a classificação dada por Bistafa (2018) (Tabela 13).

Tabela 21 – Valores de referência para o cálculo de classe de transmissão sonora (STC).

Frequência (Hz)	Valor de referência (dB)	Frequência (Hz)	Valor de referência (dB)
125	-16	800	2
160	-13	1000	3
200	-10	1250	4
250	-7	1600	4
315	-4	2000	4
400	-1	2500	4
500	0	3150	4
630	1	4000	4

Fonte: Adaptado de ASTM E 413:2022.

3.2.2.4 Cálculo da estimativa teórica de Perda de Transmissão Sonora (PT)

Além dos resultados obtidos a partir de ensaios experimentais, também foi feita a estimativa teórica da PT para a parede de LSF utilizada durante os ensaios no laboratório da UFMG, para que fosse possível comparar a curva do resultado experimental e a curva teórica.

Dessa forma, foi determinado o cálculo de estimativa de PT, de acordo com Bies e Hansen (2009) e Bistafa (2018) (Figura 25). As coordenadas relacionadas ao ponto A (PT_A) e f_0 foram dadas conforme às Equações 3.30 e 3.31:

$$f_0 = 80 \sqrt{\frac{(M_1 + M_2)}{dM_1M_2}} \text{ Hz} \quad (3.30)$$

$$PT_A = 20 \log(M_1 + M_2) + 20 \log f_0 - 48 \text{ dB} \quad (3.31)$$

sendo, f_0 a frequência de ressonância estrutural mais baixa, em Hz; M_1 e M_2 as densidades superficiais em kg/m^2 dos painéis 1 (painel com menor frequência crítica) e 2 (painel com maior frequência crítica); d , o espaçamento entre os painéis em m.

As coordenadas do Ponto A' ($PT_{A'}$) e $f_{A'}$ foram dadas conforme as Equações 3.32 e 3.33 (BISTAFA, 2018, FORTES, 2018):

$$f_{A'} = 10^{\left(\frac{59,794 * \log f_0 - 19,931 * \log \left(\frac{f_{c2}}{2} \right) - PT_A + PT_B}{39,863} \right)} \text{ Hz} \quad (3.32)$$

$$PT_{A'} = 59,794 * \log \frac{f_{A'}}{f_0} + PT_A \text{ dB} \quad (3.33)$$

sendo f_{c2} o painel com maior frequência crítica (placa cimentícia).

Como a parede de LSF utilizada para ensaios apresentou a fixação das placas de fechamento diretamente no perfil metálico e material absorvente na cavidade entre os painéis, o ponto B (PT_B), apresentou coordenadas conforme a Equação 3.34 e a frequência $0,5.f_{c1}$, sendo f_{c1} dada pela Equação 1.13, para o painel 1 (BISTAFA, 2018).

$$PT_B = 20 \log M_1 + 10 \log b + 30 \log f_{c2} + 20 \log \left[1 + \frac{M_2 f_{c1}^{1/2}}{M_1 f_{c2}^{1/2}} \right] - 77 \text{ dB} \quad (3.34)$$

Onde, M_1 e M_2 são as densidades superficiais em kg/m^2 dos painéis 1; f_{c1} e f_{c2} a frequência crítica (EQUAÇÃO 1.13) em Hz dos painéis 1 (placa de OSB e gesso acartonado) e 2 (placa cimentícia), respectivamente e; b o comprimento do painel de fechamento em metros.

Para o ensaio que não apresentou material absorvente no interior da parede, o PT_B foi determinado pela Equação 3.35 (BISTAFA, 2018):

$$PT_B = PT_A + 20 \left(\frac{f_{c1}}{f_0} \right) - 6 \text{ dB} \quad (3.35)$$

Para o Ponto C (PT_C), a coordenada do ponto foi dada por f_{c2} e PT_C , sendo PT_C definido pela Equação 3.36 (BISTAFA, 2018):

$$PT_C = PT_B + 10 \log \eta_2 + 6 \text{ dB} \quad (3.36)$$

sendo η_2 , o fator de amortecimento interno do painel 2.

O ponto D (PT_D) e f_L foi definido pelas seguintes coordenadas, pela frequência limite f_L , dada pela Equação 3.37 (BISTAFA, 2018) e, pelo PT_D por meio da Equação 3.38 (FORTES, 2018):

$$f_L = \frac{55}{d} \text{ Hz} \quad (3.37)$$

$$PT_D = 59,794 \log \left(\frac{f_L}{f_0} \right) + PT_A \text{ dB} \quad (3.38)$$

onde d é a medida do espaçamento da cavidade entre os painéis de fechamento, em m.

No painel composto por duas camadas, placa de OSB e gesso acartonado, foi realizada a soma das duas densidades superficiais para o cálculo de M_1 e, para o cálculo da rigidez à flexão do painel ($B_{1,2}$), foi feito o cálculo conforme a Equação 3.39 e Equação 3.40 (BIES E HANSEN, 2009):

$$B_{1,2} = \frac{E_1 h_1}{12(1 - \vartheta_1^2)} \left[h_1^2 + 12 \left(y - \frac{h_1}{2} \right)^2 \right] + \frac{E_2 h_2}{12(1 - \vartheta_2^2)} \left[h_2^2 + 12 \left(y - \frac{2h_1 + h_2}{2} \right)^2 \right] \quad (3.39)$$

$$y = \frac{E_1 h_1 + E_2 (2h_1 + h_2)}{2(E_1 - E_2)} \quad (3.40)$$

onde E_1 e E_2 são os módulos de elasticidade, em N/m^2 ; H_1 e H_2 , as espessuras, em m e; ϑ_1 e ϑ_2 , o coeficiente de Poisson das placas, sendo o número 1 correspondente à placa de OSB e 2, à placa de gesso acartonado.

A densidade superficial, o módulo de elasticidade (E), o fator de amortecimento (η) e o coeficiente de Poisson (ϑ) das placas de fechamento foram extraídos dos catálogos técnicos das empresas responsáveis pela fabricação dos materiais utilizados na construção da parede para a realização do ensaio e quando não foram determinados pela empresa, tais dados foram retirados de Bies e Hansen (2009), Bistafa (2018) e Ribas e Souza (2017) (Tabela 22).

Tabela 22 - Propriedades das placas de fechamento.

Placas de fechamento	Densidade superficial (kg/m ²)	Módulo de elasticidade (E)(N/m ²)	Fator de amortecimento interno do painel (η)	Coefficiente de Poisson (ν)
Gesso acartonado	8,2	$2,1 \times 10^9$	0,01	0,24
OSB	7,7	$3,7 \times 10^9$	0,03	0,3
Cimentícia	17	7×10^9	0,005	0,2

Fonte: Bies e Hansen (2009); Bistafa (2018); PLACO (2023); LPBRASIL (2023); BRASILIT (2023); Ribas e Souza (2017).

3.2.3 Ensaio de PT com a parede aquecida

Os ensaios de PT com a parede aquecida foram realizados para avaliar o isolamento sonoro do painel e então, comparar seus resultados com os ensaios realizados na parede em temperatura ambiente. Os ensaios foram realizados baseados na avaliação de transmissão de calor desenvolvidos neste trabalho. A fonte de calor responsável pelo aquecimento do painel foi um refletor da marca COLORTRAN com lâmpada halógena de 300 W, apoiado sobre um tripé, como mostra a Figura 79, disposto na câmara de reverberação, frente a placa cimentícia, simulando a face voltada para o lado externo da parede. Após 4 horas de aquecimento dos painéis, momento em que o refletor atingiu uma temperatura de aproximadamente 120 °C, como mostra a Figura 80, a parede foi mantida aquecida e os ensaios acústicos de PT foram realizados. A medição da temperatura foi feita por um termômetro infravermelho da marca AKSO, modelo AK3035new.

Figura 79 - Refletor sobre o tripé durante o ensaio de PT com aquecimento vista da sala reverberante.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 80 - Temperatura atingida pelo refletor



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Assim como os ensaios executados no painel em temperatura ambiente, foram feitos ensaios com quatro tipos de composições diferentes em seu interior: o primeiro ensaio foi realizado sem absorvedor acústico; o segundo ensaio foi realizado somente com manta de lã de PET; o terceiro ensaio com apenas placas de vermiculita e; o último ensaio, foi realizado com a parede composta por placas de vermiculita e manta de lã de PET. Ademais, após a realização do aquecimento em cada configuração de parede, todo o método utilizado nos ensaios de PT em temperatura ambiente, já explicitado ao longo do Subitem 3.2.2, foi aplicado nos ensaios com as paredes aquecidas.

IV. RESULTADOS

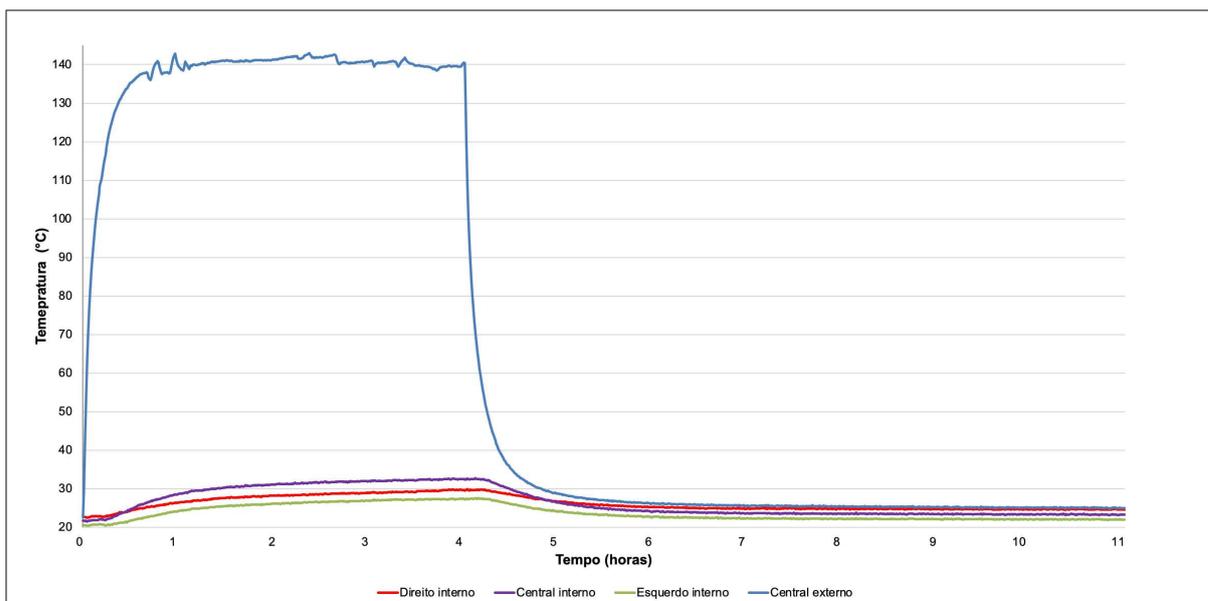
4.1 Avaliação do desempenho térmico

Neste Subitem, foram descritos os resultados dos ensaios de desempenho térmico por meio da análise da diferença de temperatura entre as faces externa e interna do painel de LSF (transferência de calor), bem como o resultado do cálculo simplificado para determinar a resistência térmica (R), transmitância térmica (U) e capacidade térmica (C) do painel de LSF, conforme a ABNT NBR 15220-2:2005 e ABNT NBR 15220-2:2022.

4.1.1 Ensaio experimental de transferência de calor em painel móvel de *Light Steel Framing* (LSF)

Para análise dos resultados do ensaio experimental de transferência de calor no painel de LSF, foi feito um gráfico de desempenho térmico com a temperatura dos quatro termopares, conforme mostra a Figura 81. Todos os modelos de configuração do painel apresentaram um gráfico com as mesmas características, por isso não foram expostos neste trabalho. Para atingir a temperatura média de 140 °C, a face externa levou cerca de meia hora para atingir esse valor. Após o desligamento da fonte de calor, houve uma queda brusca na temperatura do termopar externo, atingindo um valor constante após 6 horas de ensaio, próximo a temperatura dos outros termopares. O termopar central interno apresentou maior temperatura do que os outros dois termopares.

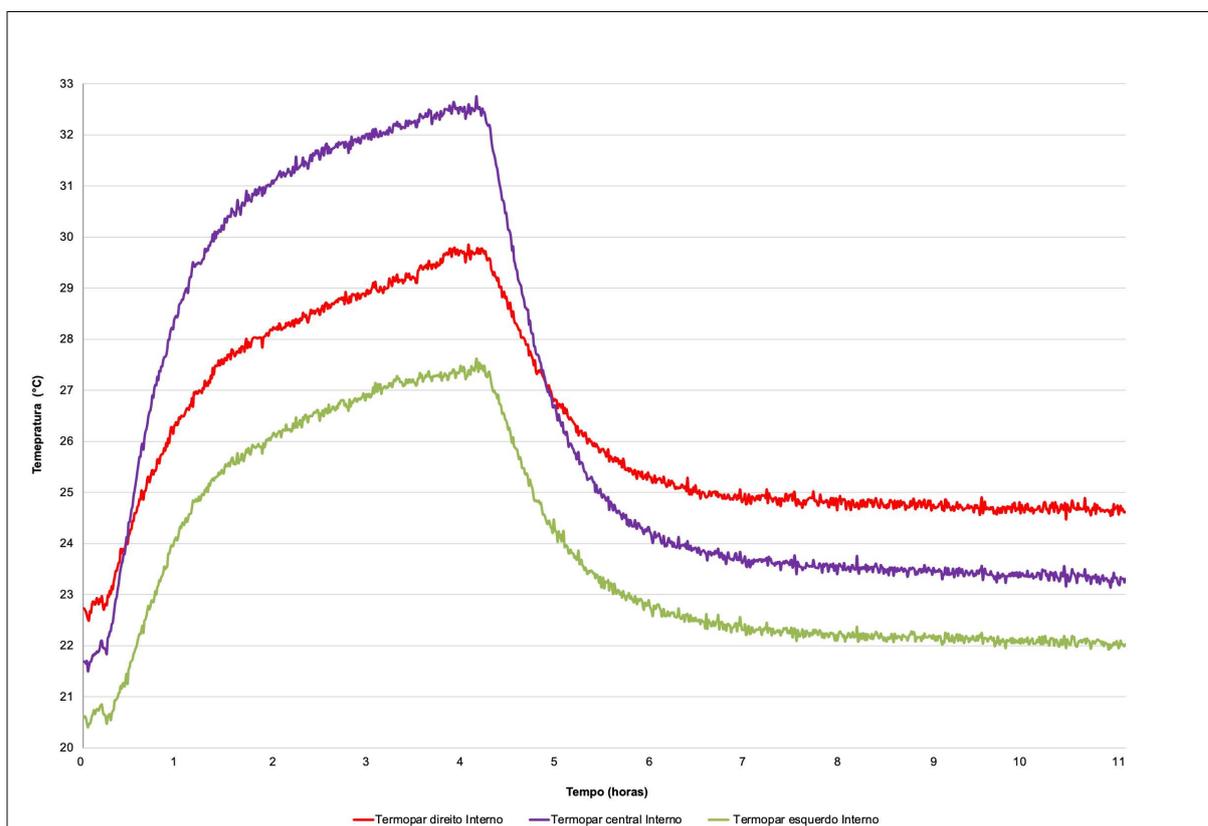
Figura 81 - Gráfico desempenho térmico painel sem material isolante com a temperatura dos quatro termopares.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Uma vez que a temperatura do termopar externo foi de 140 °C, um valor muito superior a face interna do painel, novos gráficos foram confeccionados sem a presença da temperatura do termopar externo. Conforme a Figura 82, pôde-se perceber a diferença de temperatura entre os três termopares, o central apresentou maior temperatura, enquanto os outros dois termopares, por não estarem na posição oposta da fonte de calor, apresentaram uma temperatura menor, assim como mostra o gráfico da parede sem material isolante (Figura 82). As outras três configurações de parede apresentaram as mesmas características entre as curvas analisadas.

Figura 82 - Gráfico desempenho térmico painel sem material isolante com a temperatura dos três termopares internos.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

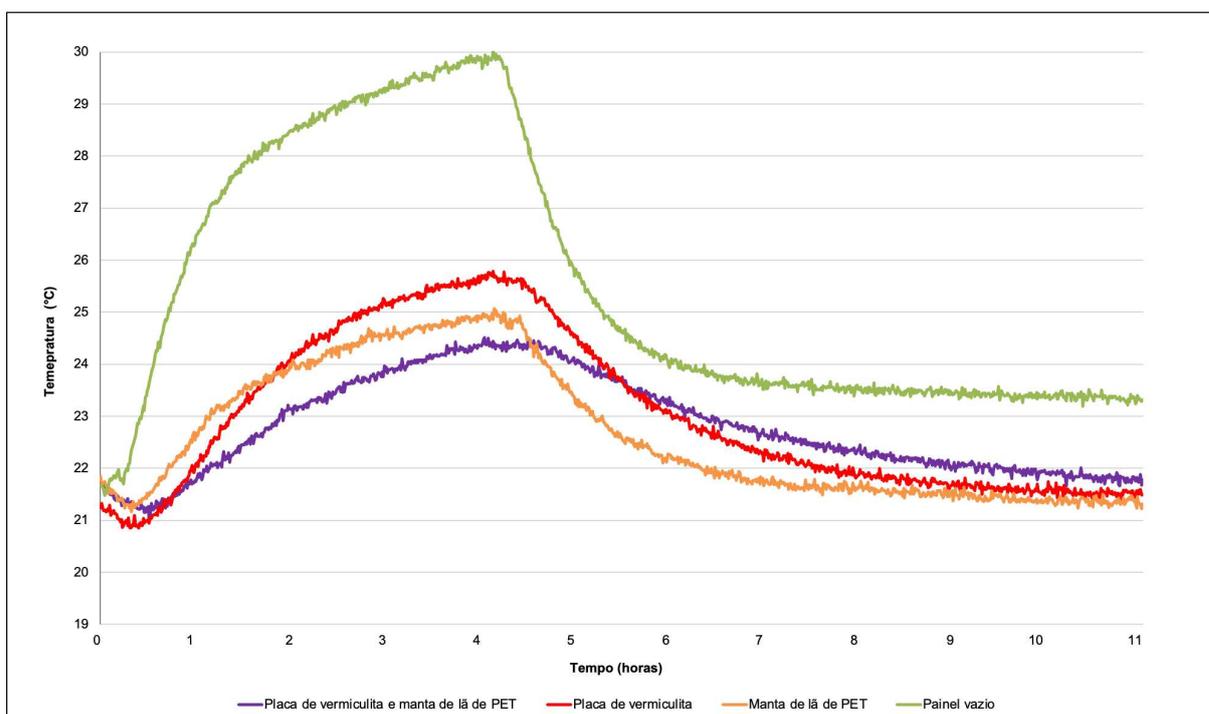
Para que houvesse uma comparação do desempenho térmico entre os quatro modelos de painel, foram feitos gráficos com a temperatura média dos três termopares internos de cada parede *versus* tempo (Figura 83). A maior temperatura média atingida foi a do painel sem material isolante, a inclinação do gráfico na primeira hora de ensaio foi maior do que as curvas dos outros três modelos ensaiados, pois não havia material isolante para atrasar o fluxo de calor para o outro lado do painel. Já a curva do ensaio com a parede completa apresentou a menor temperatura média atingida, bem como a menor inclinação do gráfico nas primeiras horas do ensaio, inferindo que houve maior capacidade térmica (C), do que nos outros painéis, devido ao uso de dois materiais isolantes.

Após o desligamento da fonte de calor, a parede vazia apresentou uma queda brusca, enquanto a parede completa apresentou um resfriamento discreto em relação aos outros ensaios, ou seja, a queda da temperatura ocorreu em um ritmo mais lento.

Ademais, a temperatura média final do painel vazio foi mais alta dentre os ensaios realizados.

O painel completo e também com apenas placa de vermiculita obtiveram a maior capacidade térmica (C), entre os quatro modelos de painéis. O ensaio com placa de vermiculita apresentou uma temperatura máxima atingida maior do que o painel com manta de lã de PET. Também, durante o resfriamento do painel, a queda da temperatura no ensaio com placa de vermiculita mostrou-se mais lenta do que quando utilizada apenas a manta de lã de PET.

Figura 83 - Gráfico comparação desempenho térmico por meio da temperatura média dos três termopares internos de cada parede



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Por meio da Tabela 23, foi feita uma síntese dos valores máximos atingidos pelos termopares, bem como a demonstração das temperaturas do painel no início e no fim de cada ensaio. Além disso, foi demonstrada nessa tabela a variação em porcentagem entre a temperatura máxima e a inicial, como também a variação percentual entre a temperatura final e a inicial. A temperatura analisada também foi feita por meio da média dos três termopares internos de um mesmo painel.

Após quatro horas de aquecimento a 140 °C no painel móvel, o modelo que apresentou a maior elevação de temperatura, na face interna do painel, foi o ensaio realizado sem material isolante. A variação apresentou um aumento de 38,58% em relação a sua temperatura inicial. Já o modelo com os dois materiais isolantes demonstrou a menor variação percentual de elevação de temperatura, o aumento da temperatura foi de 12,77%.

O ensaio realizado no painel com placa de vermiculita obteve um aumento na variação percentual entre a temperatura inicial e a máxima no valor de 21,42%, O ensaio com manta de lã de PET apresentou uma elevação menor na temperatura do que a parede com apenas placa de vermiculita, em que o aumento foi de 14,74%

Em relação a variação percentual da temperatura dos termopares no início e no fim do ensaio, o painel sem material isolante apresentou a maior elevação de temperatura e o ensaio com apenas a manta de lã de PET obteve a menor variação de temperatura. O aumento percentual no painel vazio foi de 7,61%, enquanto no ensaio com manta de lã de PET, houve uma queda na medição no valor de 2,47%. A parede completa obteve um aumento discreto na variação de temperatura, no valor de 0,18%. E, o ensaio com apenas placa de vermiculita obteve um aumento na variação percentual da temperatura, entre o início e o fim do ensaio, no valor de 1,15%.

Dessa forma, pôde-se perceber que o painel com os dois materiais isolantes apresentou a menor variação de temperatura na face interna do painel, após as quatro horas de aquecimento constante na face externa, enquanto o painel sem material isolante obteve a maior variação de temperatura. Quanto ao resfriamento do painel, após a interrupção do aquecimento, o ensaio realizado com manta de lã de PET obteve a temperatura no final do ensaio menor do que a temperatura do início. Já a parede vazia apresentou a maior elevação de temperatura em seus termopares no fim da medição. O painel completo e também o painel com apenas placa de vermiculita apresentaram um resfriamento do sistema de forma mais lenta, mantendo o painel aquecido por mais tempo.

Tabela 23 – Síntese do ensaio de desempenho térmico experimental.

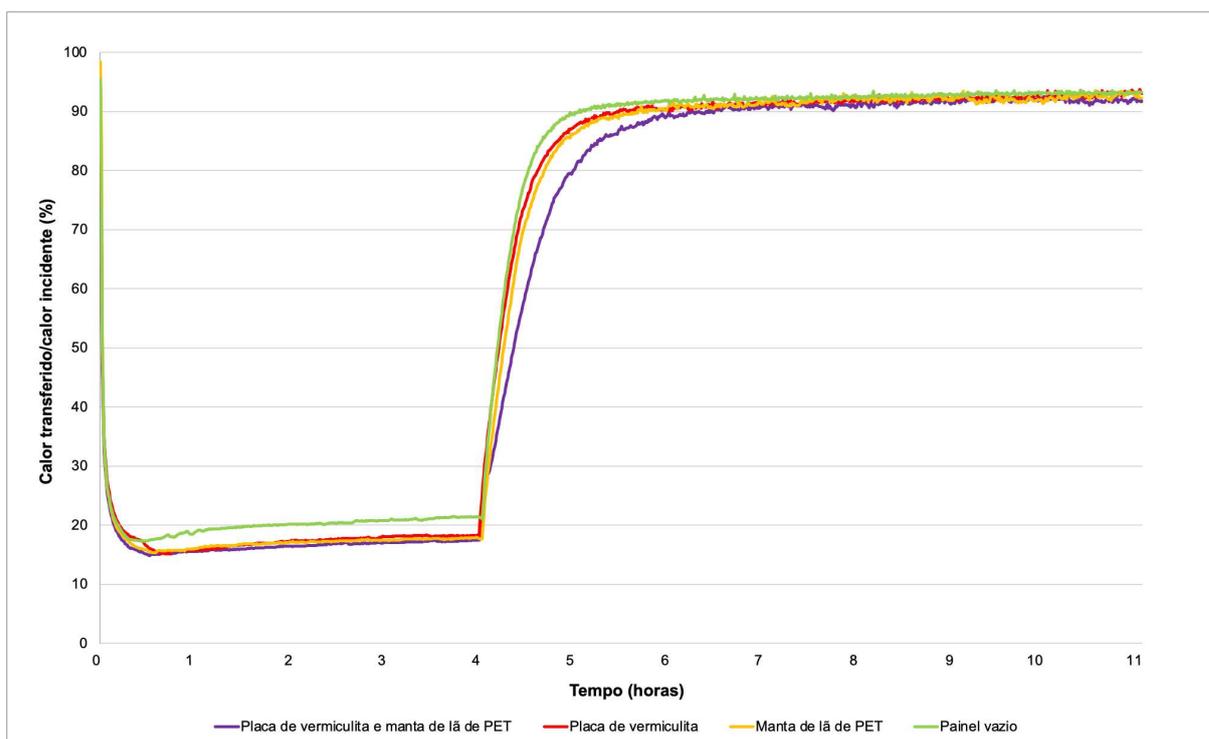
Média da temperatura dos três termopares (face interna)	Sem material isolante	Manta de lã de PET	Placa de vermiculita	Placa de vermiculita e manta de lã de PET
Temp. máx atingida (°C)	30,03	25,07	25,79	24,52
Temp. inicial (°C)	21,67	21,85	21,24	21,74
Temp. final (°C)	23,32	21,31	21,48	21,78
Varição: temp. máx e inicial (°C)	8,36	3,22	4,55	2,78
Varição: temp. máx e inicial (%)	38,58	14,74	21,42	12,77
Varição: temp. final e inicial (°C)	1,65	-0,54	0,24	0,04
Varição: temp. final e inicial (%)	7,61	-2,47	1,15	0,18

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Por meio da divisão entre o calor transferido e o calor incidente no painel, foi confeccionado o gráfico da Figura 84. A partir dele foram determinados dois parâmetros, o atraso térmico e o amortecimento da onda de calor de cada configuração de parede (Tabela 24). Para o atraso térmico, o painel vazio demorou aproximadamente 3,0 horas, para igualar a temperatura entre o seu lado interno e externo, após a interrupção da fonte de calor; no ensaio com manta de lã de PET, o atraso foi de cerca de 4,0 horas; o painel com a placa de vermiculita demorou aproximadamente 5 horas e; o painel completo demorou cerca de 5,5 horas.

Para o amortecimento da onda de calor, ou seja, a capacidade de reduzir a elevação da temperatura interna do sistema, no modelo sem material interno, o valor foi de 78,69%; o painel com apenas placa de vermiculita apresentou um valor de 81,68% e; o painel completo e o ensaio com apenas manta de lã de PET apresentaram os maiores valores, 82,46% e 82,29%, respectivamente. O cálculo do amortecimento térmico foi dado no momento em que foi desligada a fonte de calor (após 4 horas).

Figura 84 - Gráfico relação (Calor transferido/Calor incidente) versus tempo.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 24 – Atraso térmico e amortecimento do painel de LSF.

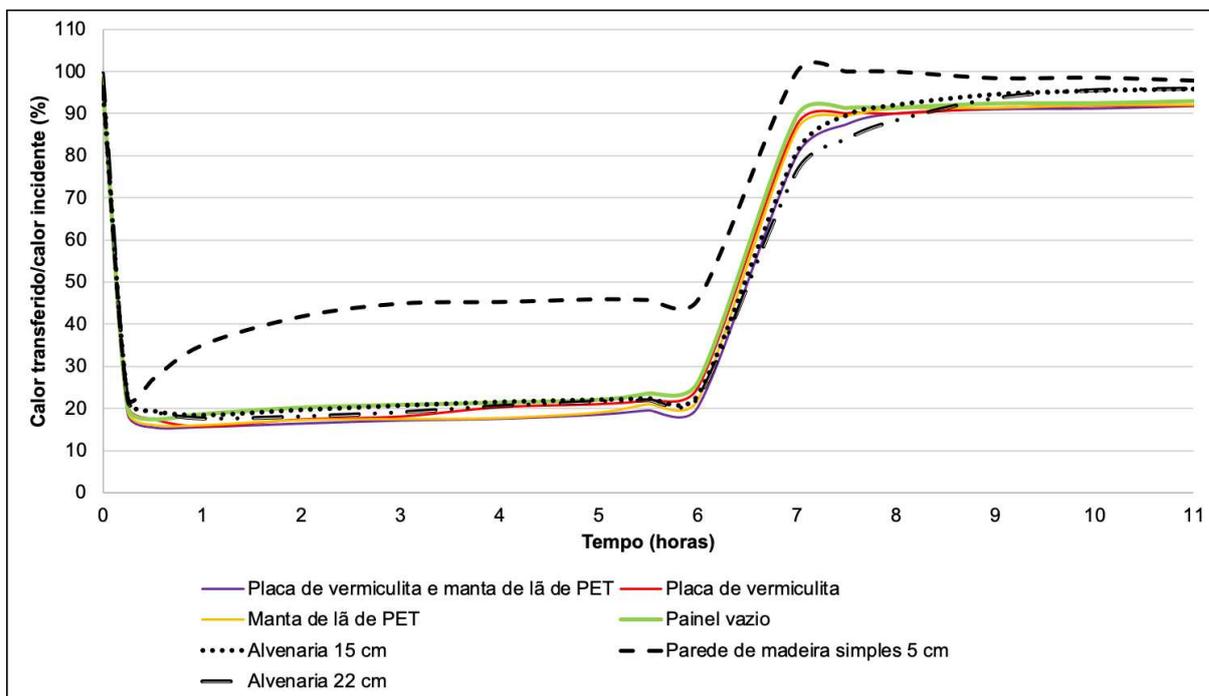
Material isolante	Atraso térmico (horas)	Amortecimento (%)
Painel vazio	3,0	78,69
Manta de lã de PET	4,0	82,29
Placa de vermiculita	5,0	81,68
Placa de vermiculita e manta de lã de PET	5,5	82,46

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Para efeitos de comparação entre os ensaios realizados neste trabalho com outros sistemas construtivos (parede de alvenaria de 15 cm e 22 cm de espessura e parede simples de madeira de 5 cm de espessura), foi feito um gráfico de calor transferido sobre o calor incidente no painel *versus* o tempo, como mostra a Figura 85. Dessa forma, foi possível perceber que o painel completo apresentou uma curva semelhante às paredes de alvenaria comumente usadas no país. As outras configurações de painéis apresentaram uma curva mais próxima a da parede de alvenaria de 15 cm. Enquanto que a parede de madeira simples de 5 cm apresentou a curva mais distante

dos outros sistemas e demonstrou o valor mais alto de calor transferido sobre o incidido. Ademais, os dados foram comparados com a pesquisa de Carrasco (2005) e para os dados deste trabalho, entre a quarta e a sexta hora, os valores de calor transferido sobre o incidido foram interpolados para que fosse possível comparar com os dados de Carrasco (2005).

Figura 85 - Gráfico relação (Calor transferido/Calor incidente) x tempo em comparação com outros sistemas estruturais.



Fonte: Elaborado pela autora (2023) com base nos dados de Carrasco (2005).

4.1.2 Cálculo simplificado de desempenho térmico

Por meio do cálculo simplificado determinado pela ABNT NBR 15220-2:2022, a Tabela 25 foi elaborada com os valores encontrados para o painel móvel estudado. Os parâmetros analisados foram a resistência térmica (R), transmitância térmica (U) e capacidade térmica (C). Como a norma atual sugere que o cálculo simplificado não seja utilizado em paredes em que haja elementos de metal conectando os materiais isolantes, assim como ocorre no sistema LSF, o cálculo simplificado da resistência térmica (R) e transmitância térmica (U) foi realizado também conforme a norma de

2005. Para a capacidade térmica (C), o cálculo simplificado se manteve o mesmo na norma atual.

Tabela 25 – Valores determinados por meio do cálculo simplificado para o painel móvel.

Material interno isolante	Resistência Térmica (R) - $m^2 \cdot K/W$		Transmitância térmica (U) - $W/(m^2K)$		Capacidade térmica (C) - $kJ/(m^2K)$
	ABNT NBR 15220-2:2005	ABNT NBR 15220-2:2022	ABNT NBR 15220-2:2005	ABNT NBR 15220-2:2022	
Painel vazio	0,43	0,58	2,31	1,72	41,66
Manta de lã de PET	1,21	1,22	0,83	0,82	41,80
Placa de vermiculita	0,83	0,91	1,20	1,10	50,10
Placa de vermiculita e manta de lã de PET	1,59	1,55	0,62	0,65	50,25

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

O painel com os dois materiais isolantes apresentou a maior resistência térmica (R) e a capacidade térmica (C) e a menor transmitância térmica (U), dentre os ensaios realizados. Já o painel sem material isolante demonstrou a menor resistência térmica (R) e a capacidade térmica (C) e a maior transmitância térmica (U).

Assim como os ensaios experimentais de desempenho térmico realizados, o cálculo simplificado do painel com apenas placa de vermiculita apresentou capacidade térmica (C) maior do que o painel composto por apenas manta de lã de PET devido a sua maior densidade de massa aparente (ρ). Enquanto a presença da manta de lã de PET contribuiu para a maior resistência térmica (R) e menor transmitância térmica (U), devido a sua menor condutividade térmica (λ).

Em relação à comparação do cálculo simplificado entre as normas de 2005 e a atual a diferença foi menor que 10% nas três paredes com a presença de material isolante. Para a parede sem material isolante a diferença foi de 25% no cálculo de resistência térmica (R) e de 35% para a transmitância térmica (U). Dessa forma, é possível inferir que a alta condutividade térmica (λ) dos perfis metálicos pode interferir nos resultados do cálculo simplificado conforme a NBR atual em painéis que não apresentam materiais isolantes. Já para os painéis com materiais isolantes é possível a utilização

do cálculo simplificado da NBR atual, desde que seja considerada a baixa diferença entre os resultados das duas normas.

Os ensaios experimentais apresentaram desempenho térmico similar ao cálculo simplificado determinado pela ABNT NBR 15220-2:2022. O painel completo apresentou desempenho térmico superior em relação aos outros três modelos de painéis, conforme a ABNT NBR 15575-4:2021, enquanto o painel vazio apresentou o desempenho térmico mais baixo, indicando assim uma validação do cálculo simplificado, principalmente como intuito de comparação de desempenho térmico de diferentes composições de painéis.

Ademais, conforme o desempenho térmico exigido pela ABNT NBR 15575-4:2021, os resultados encontrados para o painel móvel analisado atenderam aos valores recomendados pela norma nos quatro modelos de painel analisados, em relação a transmitância térmica (U). De acordo com a norma, os valores devem ser menores que $2,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ para Zonas Bioclimáticas 1 e 2 e para as Zonas de 3 a 8, os valores devem ser menores que $3,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Pelo método prescritivo, para os valores de capacidade térmica (C), no qual a norma sugere que seja maior que $130 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$, nas Zonas Bioclimáticas de 1 a 7, nenhum painel atendeu os requisitos da norma devido a leveza e a baixa inércia térmica do sistema LSF, sendo necessário usar também o método de simulação computacional, para a determinação desse valor. Na Zona Bioclimática 8, não há restrição para o valor da capacidade térmica (C). Ainda, foi importante a análise desses parâmetros, pois além de simular o comportamento da capacidade térmica (C) e a transmitância térmica (U) de paredes em LSF, o conhecimento desses dados foi essencial para compreender o desempenho térmico do sistema.

Deve-se ressaltar ainda, a necessidade de desenvolver outras estratégias e soluções projetuais específicas para cada edificação levando em conta o clima da região e, também, desenvolver o cálculo do desempenho térmico por meio do método de simulação computacional e não só por meio do método de cálculo simplificado, pois segundo autores mencionados no Capítulo 1, o sistema LSF é capaz de atender aos valores determinados pela norma de desempenho por meio do método de simulação computacional, mesmo quando o método de cálculo simplificado não atende a norma.

4.2 Avaliação do desempenho acústico

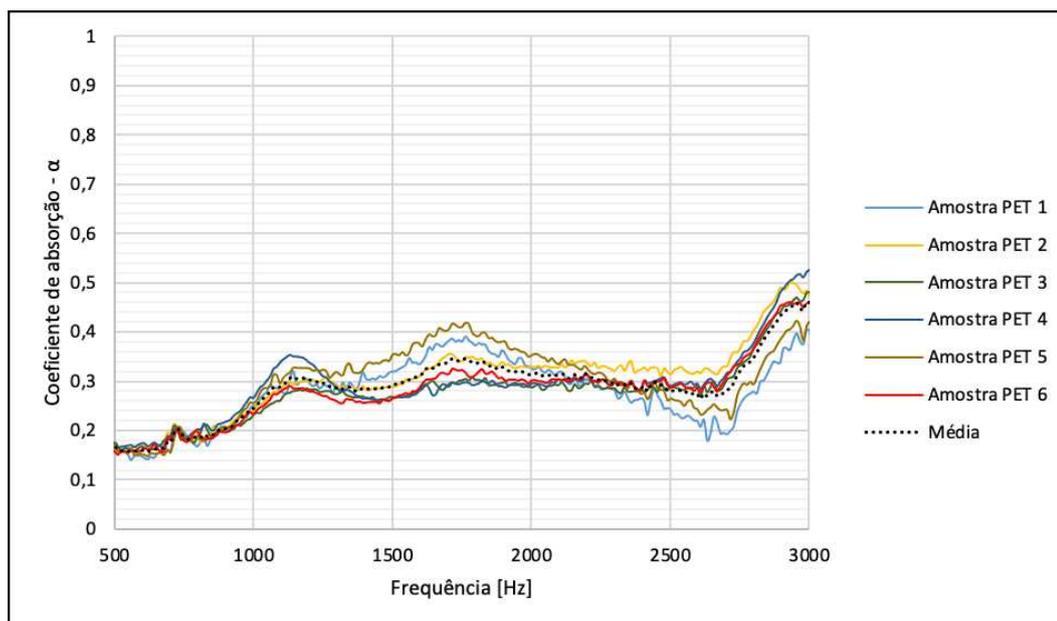
Neste Subitem, foram descritos os resultados acerca dos ensaios realizados no tubo de impedância para a determinação do coeficiente de absorção sonora e impedância acústica; os resultados da avaliação da PT nos ensaios experimentais realizados na parede de LSF e os resultados do cálculo da estimativa teórica da PT, em temperatura ambiente e sob aquecimento.

4.2.1 Ensaio em tubo de impedância para a determinação do coeficiente de absorção sonora e impedância acústica da manta de lã de PET e placa de vermiculita

Para cada material ou conjunto de materiais ensaiados foram feitos gráficos de coeficiente de absorção *versus* frequência, no qual se encontra o resultado de cada ensaio realizado e a média das seis amostras. Além disso, foram feitas as curvas da média do coeficiente de absorção sonora do material/conjunto junto ao seu intervalo de confiança (limite inferior e superior).

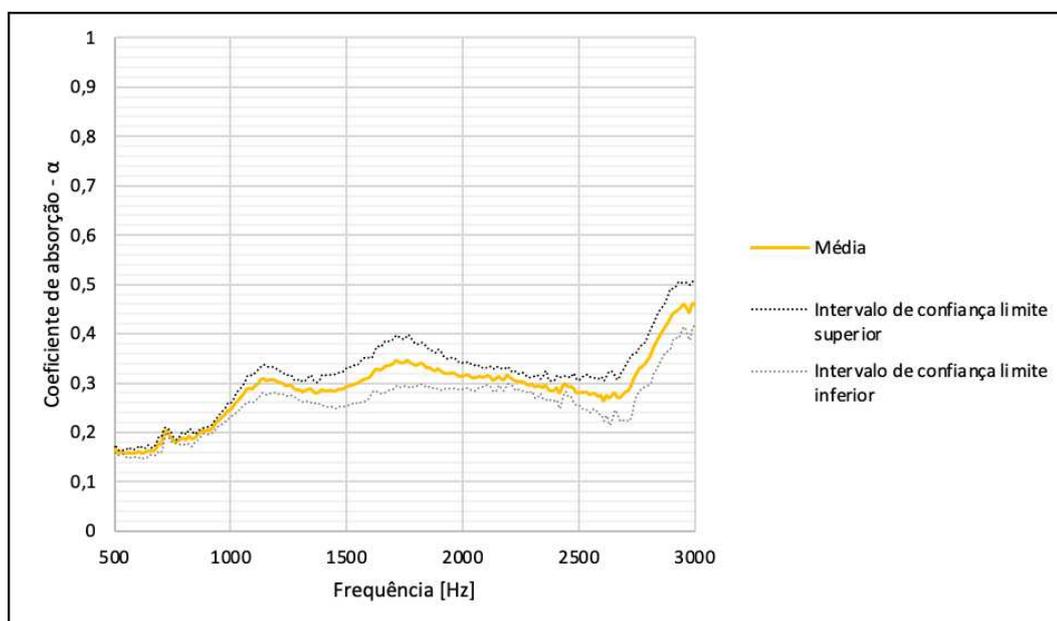
O valor máximo encontrado para o coeficiente de absorção sonora médio da lã de PET foi de 0,46 na frequência de 3000 Hz, o segundo pico médio de absorção máxima foi de 0,35 para a frequência de 1760 Hz. Para as frequências mais baixas analisadas, entre 500 Hz e 1000 Hz, o coeficiente de absorção máximo foi de 0,25 (Figura 86). A média dos resultados mostrou um estreito intervalo de confiança, com amplitudes baixas, menores que 0,09 (Figura 87).

Figura 86 - Gráfico curvas de absorção sonora das amostras de lã de PET



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 87 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a média das curvas de absorção acústica das amostras de lã de PET.

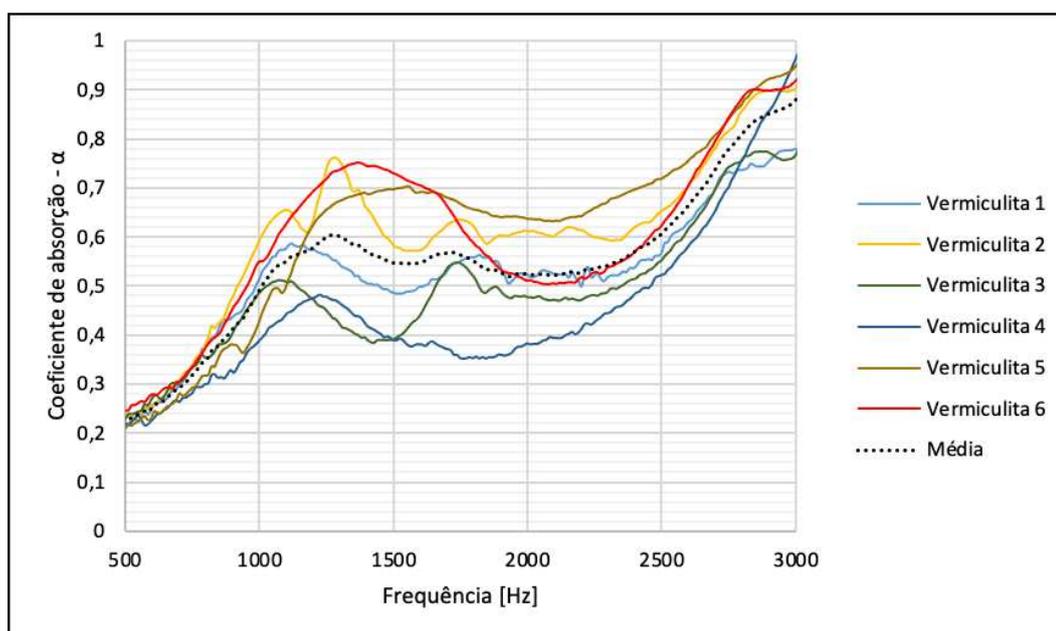


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

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

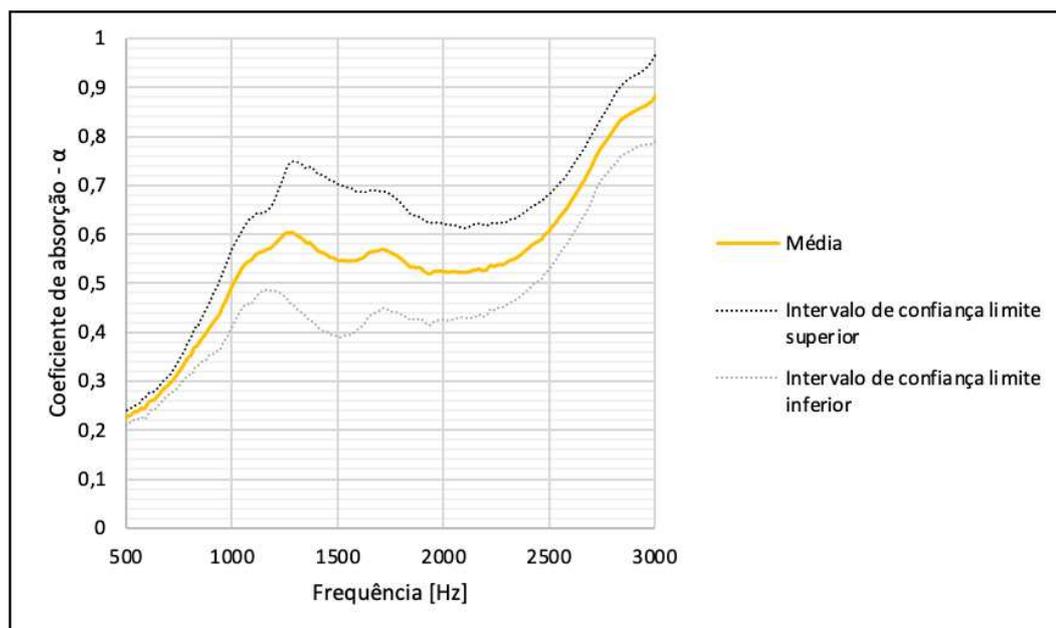
0,49 (Figura 88). Como houve diferenças entre os picos nas curvas das amostras, principalmente entre as frequências correspondentes a 1000 Hz e 2000 Hz, a diferença entre o intervalo de confiança superior e inferior dos ensaios da placa de vermiculita apresentou uma maior amplitude em relação a outras faixas de frequência (Figura 89).

Figura 88 - Gráfico curvas de absorção sonora das amostras da placa de vermiculita



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

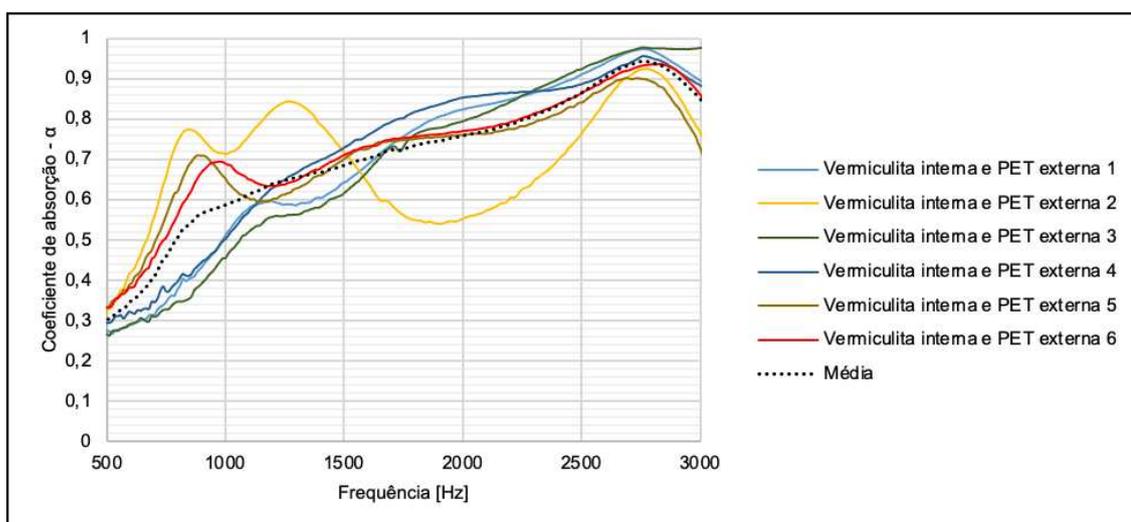
Figura 89 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a média das curvas de absorção acústica das amostras de vermiculita.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

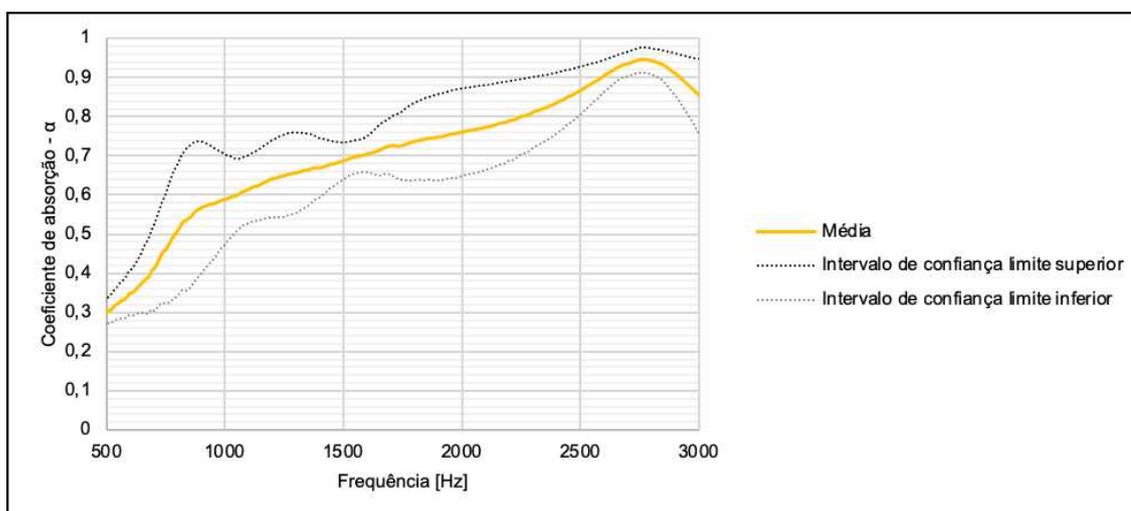
Para os ensaios realizados em amostras com duas camadas, a placa de vermiculita na parte mais interna do tubo e a lã de PET na parte mais externa, os resultados apresentaram valores médios superiores em relação às amostras de camadas únicas em todas as faixas de frequência. O coeficiente de absorção 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 (Figura 90). 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 91.

Figura 90 - Gráfico curvas de absorção sonora das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita interna e lã de PET externa



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 91 - Gráfico 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

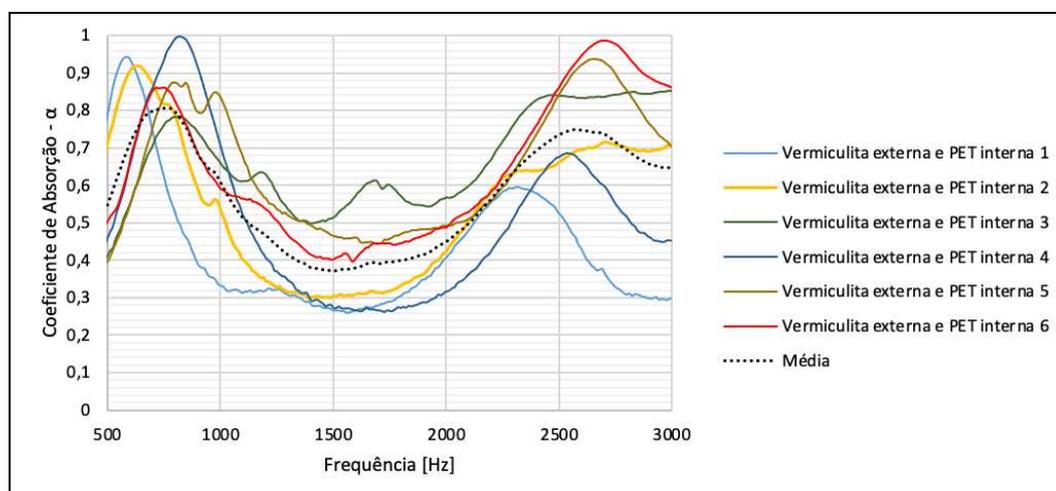


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

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

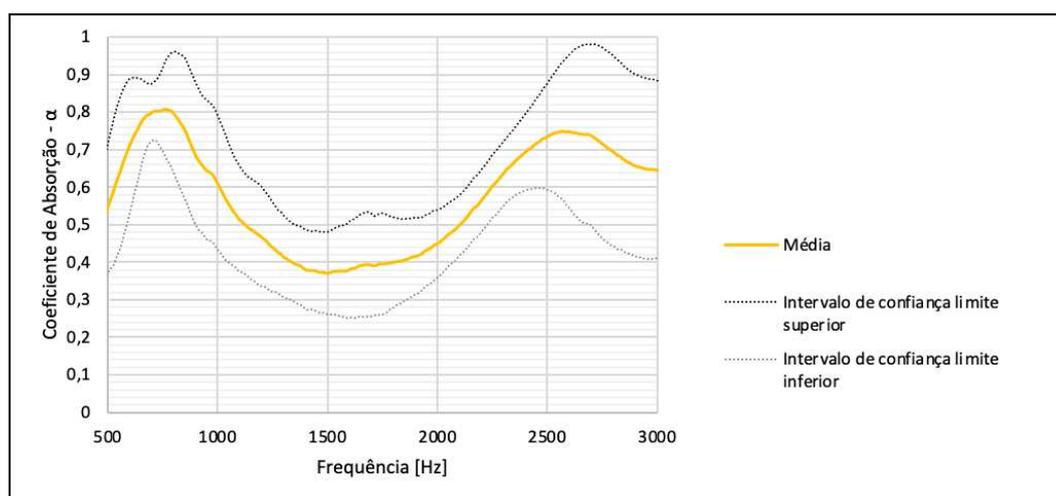
frequência de 2500 Hz e atingiu um valor de 0,75 (Figura 92). Nestes ensaios, os valores do coeficiente de absorção sonora foram mais variados a partir de 2500 Hz, como mostra a Figura 93.

Figura 92 – Gráfico curvas de absorção sonora das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita externa e lã de PET interna



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 93 – Gráfico 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

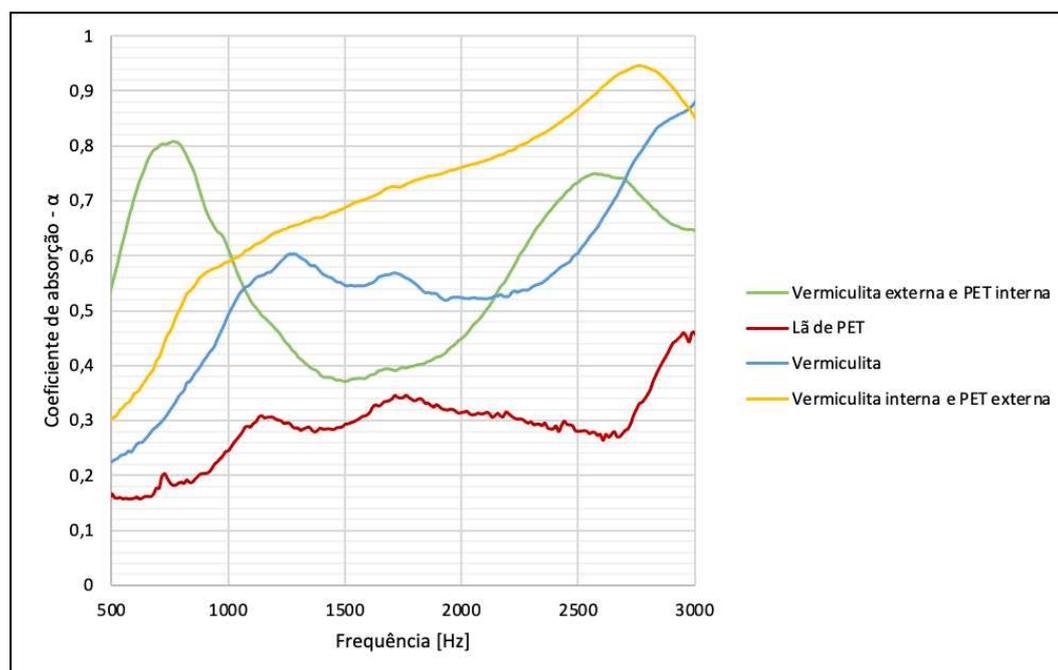


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Por meio da Figura 94 foi 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 obteve o pior desempenho médio, não apresentando

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 maior 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 conjunto em uma parede, em relação ao ruído externo, seria a placa de vermiculita no interior e a lã de PET logo à frente, levando em consideração a maior parte da frequência analisada.

Figura 94 - Gráfico comparação das curvas médias de absorção sonora para os ensaios realizados – Amostras de vermiculita, lã de PET e conjunto com duas camadas.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

De acordo com o NRC das amostras analisadas da Tabela 26, foi possível perceber que o conjunto formado pela amostra com a vermiculita mais à frente no tubo e a lã de PET mais ao fundo apresentou maior valor entre as amostras analisadas. Apesar

desse resultado, o conjunto disposto de forma inversa, com a vermiculita mais ao fundo no tubo e a lã de PET mais à frente, apresentou valores mais altos de absorção sonora na maior parte das frequências observadas.

Tabela 26 - Coeficiente de redução sonora (NRC) das amostras analisadas

Material	Coeficiente de redução sonora (NRC)
Lã de PET	0,22
Vermiculita	0,36
Vermiculita interna e lã de PET externa	0,47
Vermiculita externa e manta de lã de PET interna	0,49

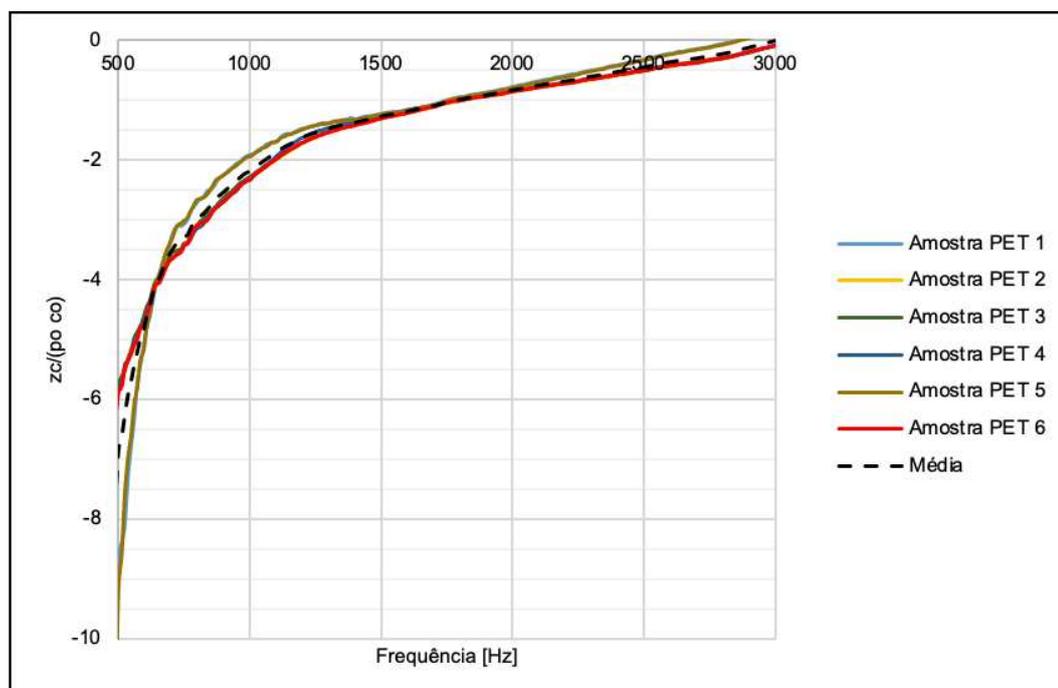
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Para a impedância acústica específica normalizada - $z_c/(p_o c_o)$ - dos materiais ensaiados (impedância acústica específica z_c dividida pela impedância característica do ar $-p_o c_o$), foram feitos gráficos para a parte real (resistiva) e a parte imaginária (reativa) da impedância acústica específica normalizada, impedância *versus* frequência, agrupados conforme os seis ensaios realizados para cada material ou sistema de duas camadas, junto a média das curvas. Ademais, foram feitos outros gráficos com intervalos de confiança de 95% para cada grupo de ensaios, tanto para a parte real da impedância, quanto para a parte imaginária.

De acordo com Cox e D'Antonio (2017), a parte imaginária da impedância acústica específica normalizada quando positiva é regida pela massa do sistema e quando negativa, a parte imaginária da impedância é regida pela rigidez do material poroso. Em baixas frequências, a parte imaginária está relacionada ao comportamento de rigidez e, em frequências mais altas ela é regida pela massa do sistema. Já a parte real da impedância, está relacionada a transferência de calor na absorção sonora.

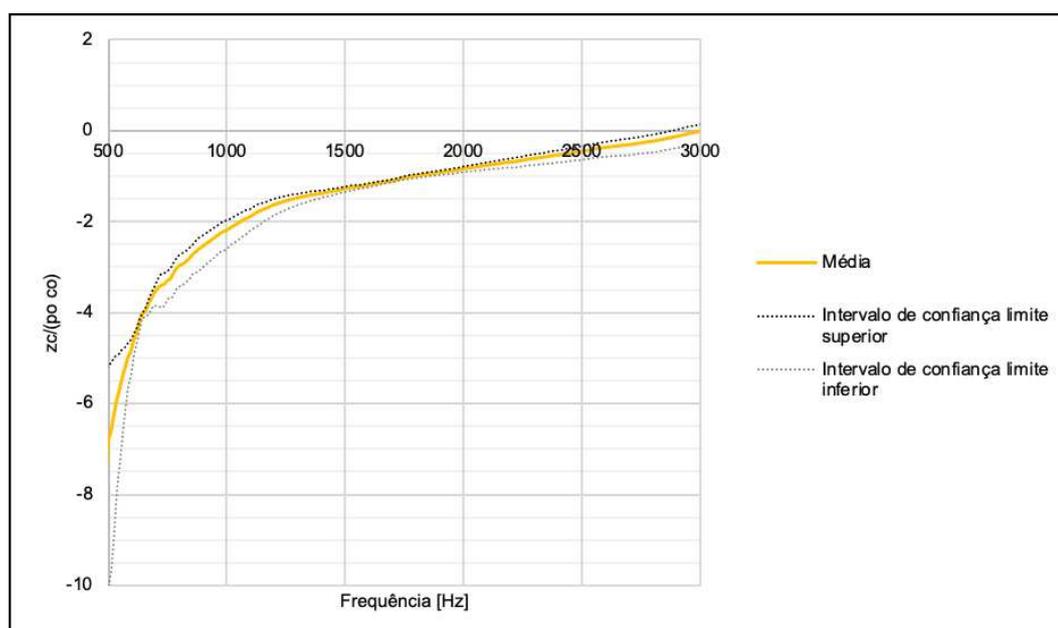
Na Figura 95, a curva média da parte imaginária, associada com a rigidez ou massa do meio sonoro, apresentou uma queda a partir de 500 Hz e um valor próximo a zero em 3000 Hz. Os resultados apresentaram pouca variação, conforme mostra a Figura 96. Apenas na frequência de 500Hz, houve maior variação nos resultados dos ensaios relacionada à parte imaginária da impedância acústica da lã de PET.

Figura 95 – Gráfico impedância superficial das amostras de lã de PET – Parte imaginária



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 96 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a impedância superficial média das amostras de lã de PET – Parte imaginária

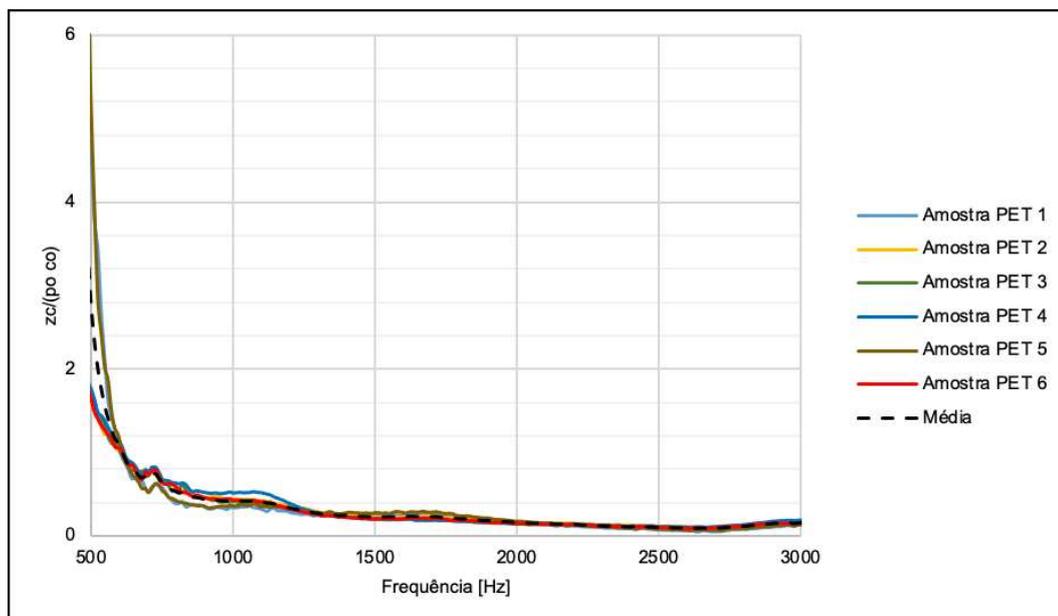


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A parte real da impedância acústica da lã de PET apresentou um pequeno pico na frequência mais baixa, devido a baixa absorção sonora e, a partir de 1000 Hz, o

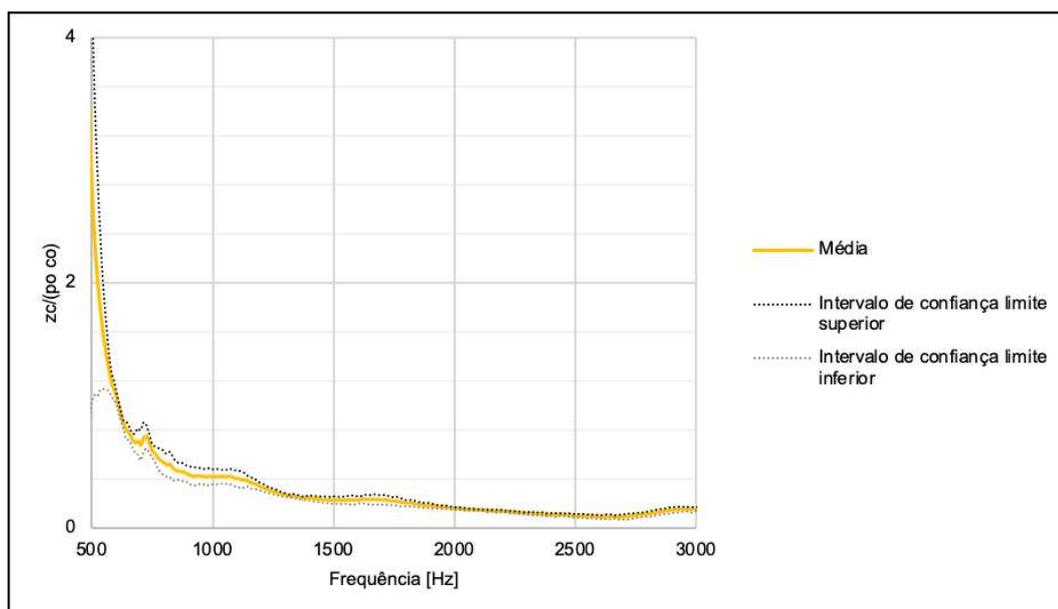
sistema resistivo foi constante próximo a zero (Figura 97). Os resultados obtidos para este ensaio também tiveram pouca variação (Figura 98).

Figura 97 - Gráfico impedância superficial das amostras de lã de PET – Parte real



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 98 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a impedância superficial média das amostras de lã de PET – Parte real

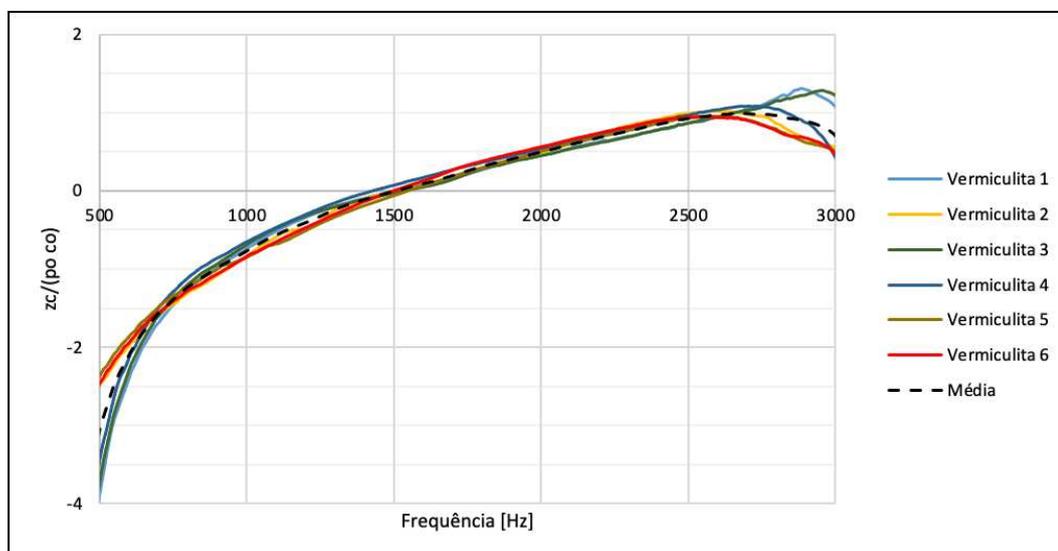


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Nas frequências mais baixas, a parte imaginária da impedância superficial das placas de vermiculita obteve valores regidos pela rigidez do sistema até a frequência de 1500 Hz, a partir desse momento, o sistema passa a ser regido pela massa do material,

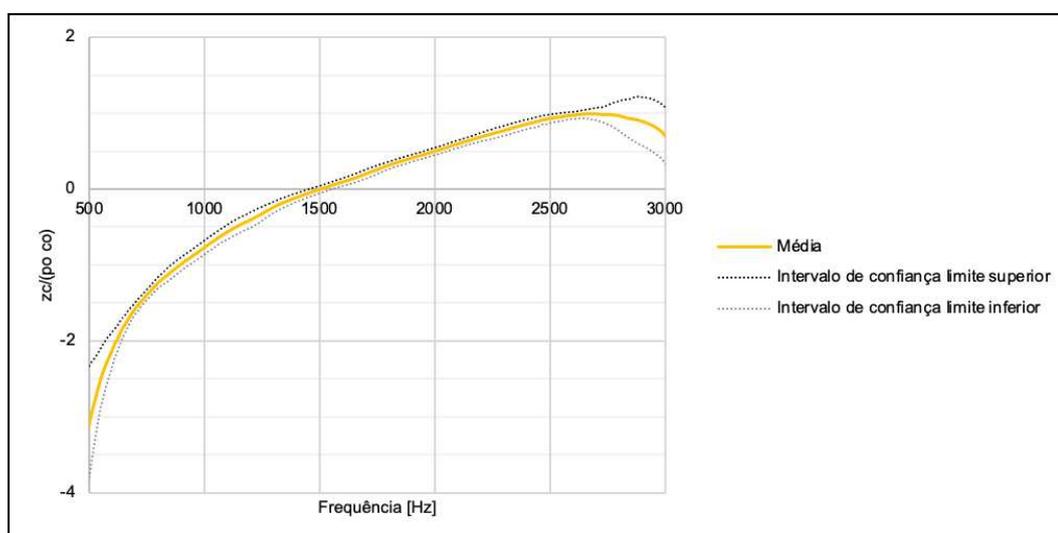
ocorrendo a troca de sinal (Figura 99). Os resultados desse ensaio também apresentaram valores pouco variados, com baixa amplitude no intervalo de confiança (Figura 100).

Figura 99 - Gráfico impedância superficial das amostras da placa de vermiculita – Parte imaginária



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 100 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a impedância superficial média das amostras das placas de vermiculita – Parte imaginária

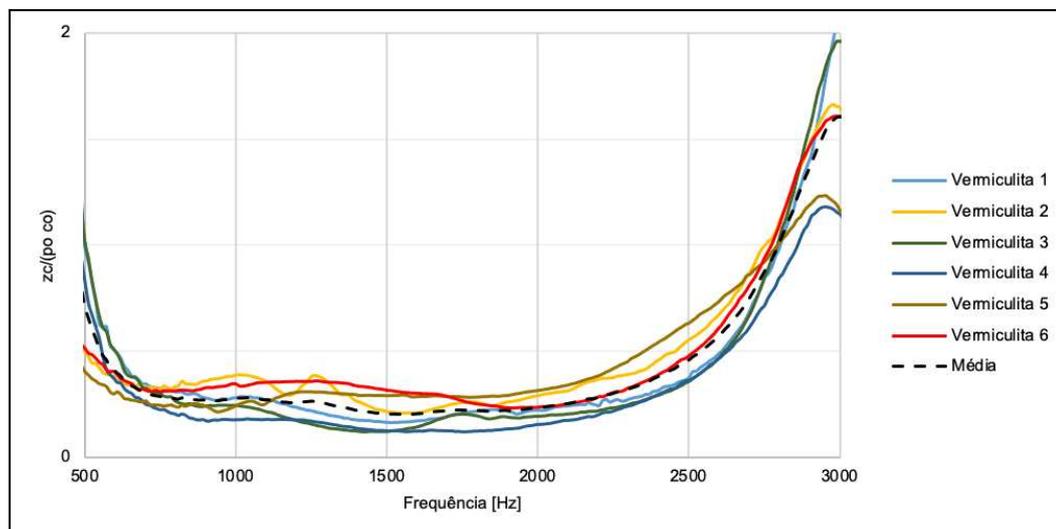


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

O elemento resistivo da impedância superficial da placa de vermiculita apresentou valores constantes próximo a zero, na faixa de frequência entre 500 Hz e 2500 Hz. A partir de 2500 Hz, houve um pequeno aumento indicando maior dissipação de energia

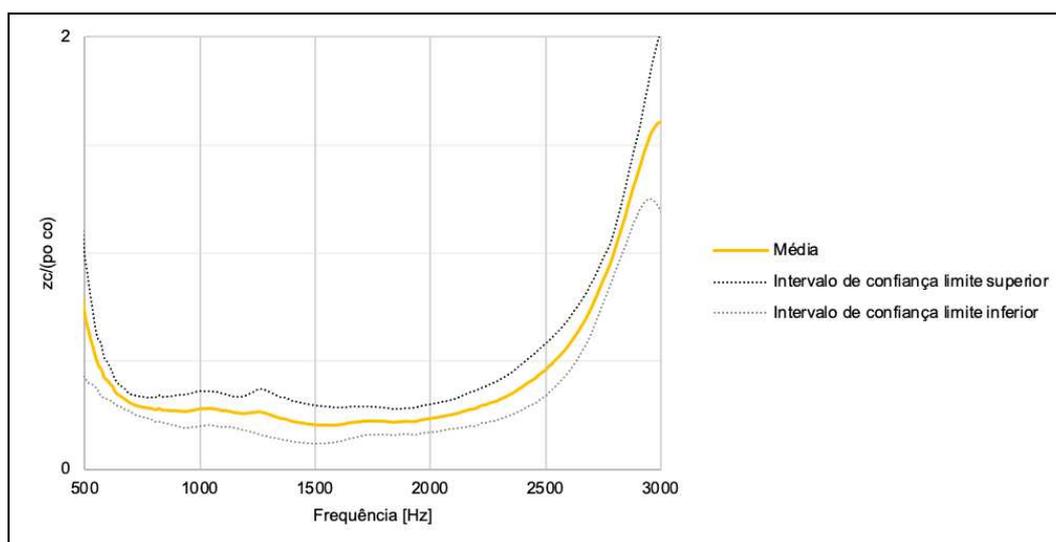
durante a absorção sonora (Figura 101). O intervalo de confiança também apresentou uma pequena variação para os resultados desse grupo ensaio (Figura 102).

Figura 101 - Gráfico impedância superficial das amostras da placa de vermiculita – Parte real



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 102 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a impedância superficial média das amostras das placas de vermiculita – Parte real

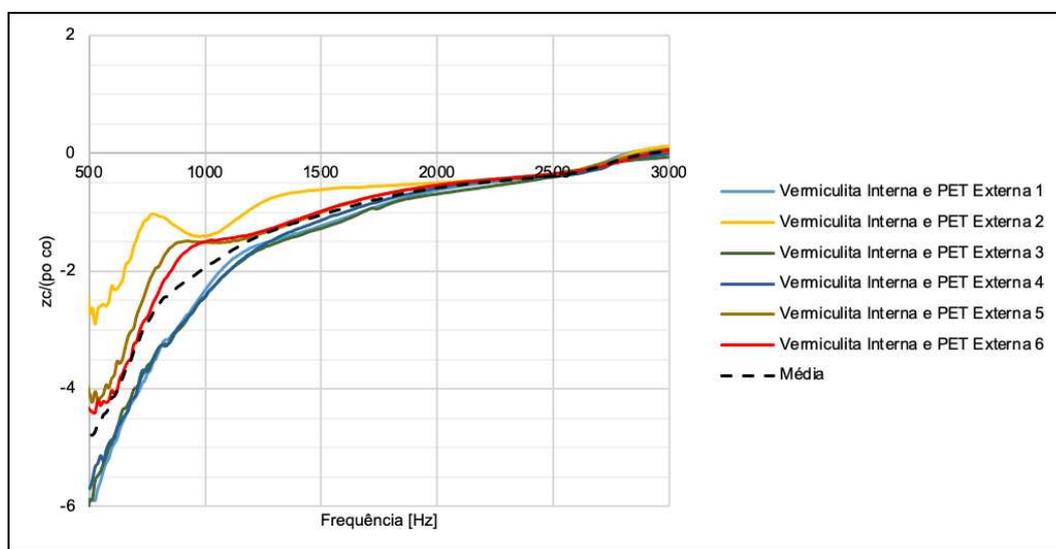


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Nos ensaios realizados com amostras de duas camadas, sendo a placa de vermiculita na posição mais interna e a lã de PET na parte mais externa, a impedância acústica do sistema foi regida pela rigidez. O valor médio máximo foi na frequência de 500Hz e aproximou-se do valor zero na frequência de 3000 Hz (Figura 103). O intervalo de confiança apresentou maior amplitude na faixa de frequência entre 500 Hz e 1000 Hz,

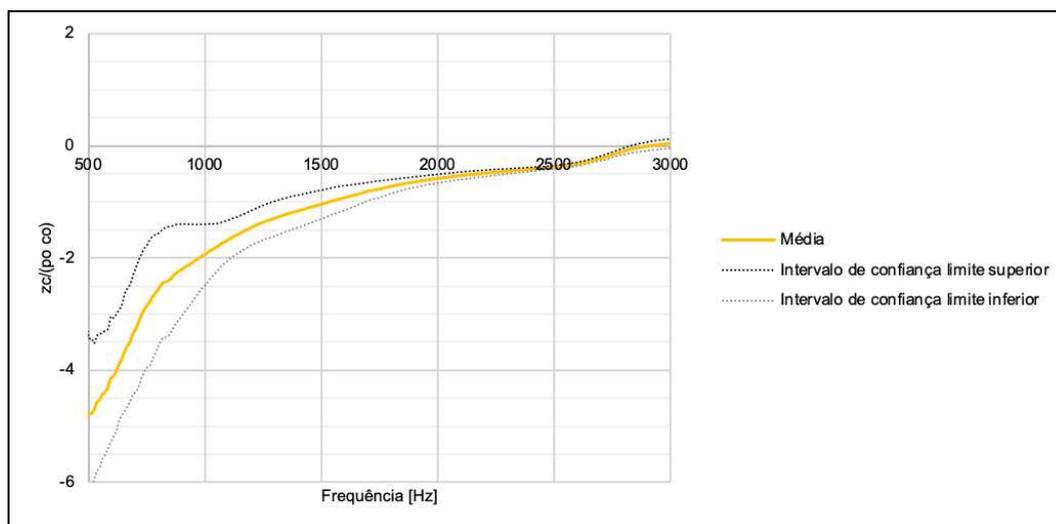
para as outras faixas de frequência os resultados dos ensaios foram pouco variados (Figura 104).

Figura 103 - Gráfico impedância superficial das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita interna e lã de PET externa– Parte imaginária



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 104 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a impedância superficial média das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita interna e lã de PET externa– Parte imaginária

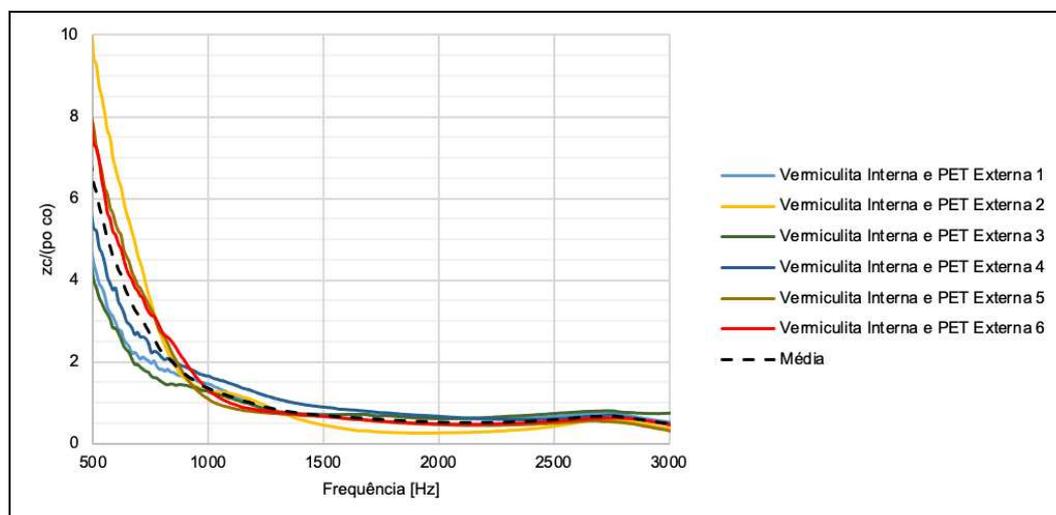


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Para a parte real, do conjunto formado pela placa de vermiculita interna e lã de PET externa, a curva média começou com valores mais altos na frequência de 500 Hz, sugerindo uma menor absorção acústica durante a passagem da onda sonora, e a

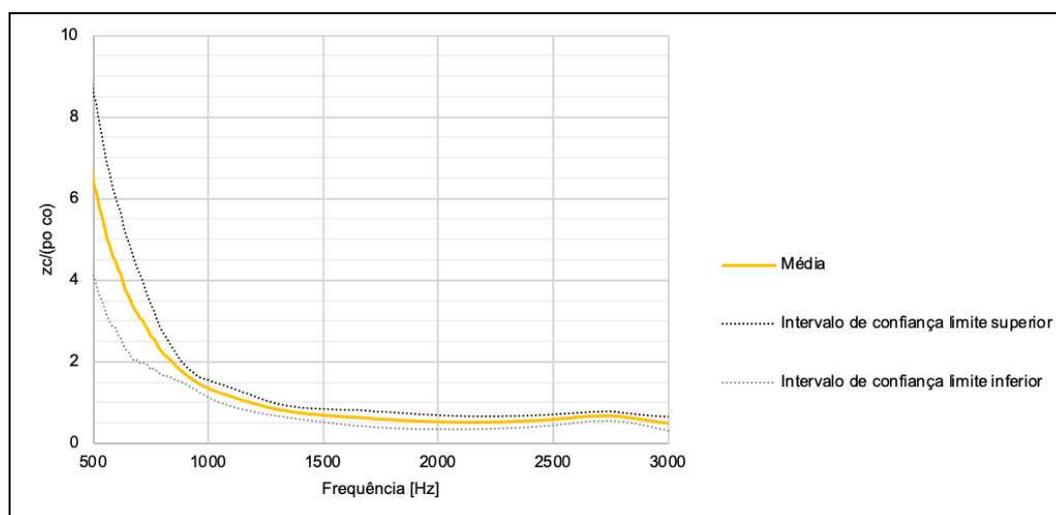
partir da frequência de 1000 Hz houve uma queda e valores constantes até a frequência de 3000 Hz (Figura 105). O intervalo de confiança também apresentou maior amplitude na faixa de frequência entre 500 Hz e 1000 Hz e valores mais constantes para as outras faixas de frequência (Figura 106).

Figura 105 - Gráfico impedância superficial das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita interna e lã de PET externa – Parte real



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 106 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a impedância superficial média das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita interna e lã de PET externa – Parte real

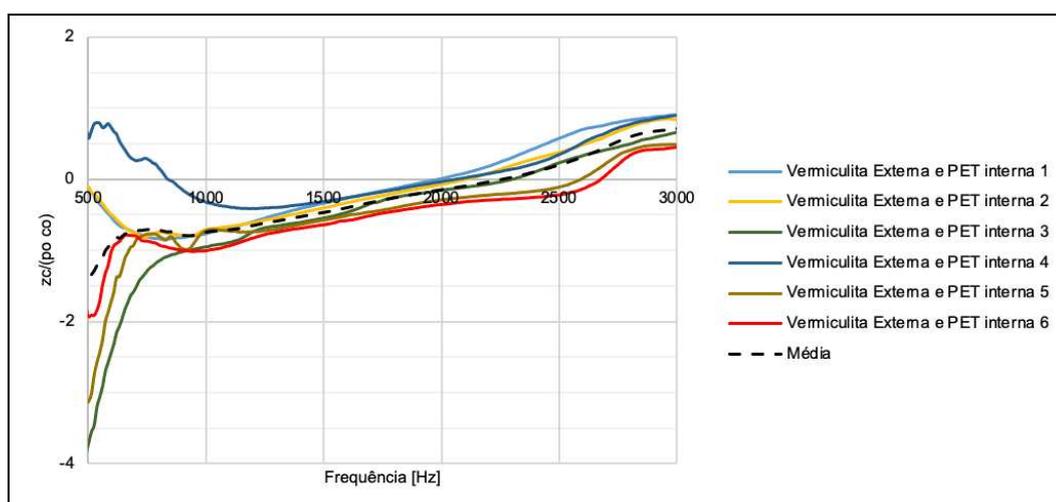


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

O sistema reativo do conjunto formado pela placa de vermiculita externa e lã de PET interna foi regido pela rigidez até a frequência de 2300 Hz e partir disso, houve uma

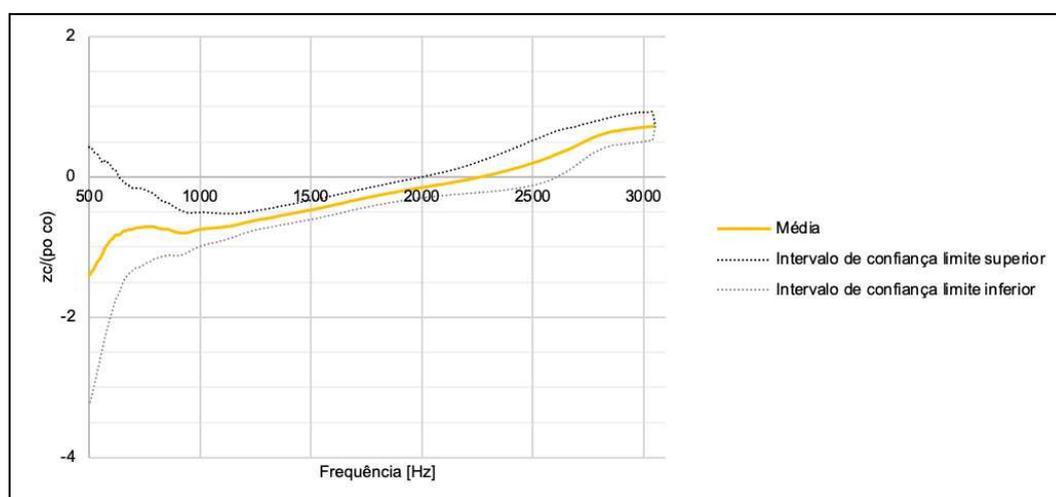
troca de sinal, até a frequência final analisada e o sistema passou a ser regido pela massa (Figura 107). Os resultados dos ensaios apresentaram pouca variação, apenas na faixa de frequência entre 500 Hz e 1000 Hz a amplitude do intervalo de confiança foi maior (Figura 108).

Figura 107 - Gráfico impedância superficial das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita externa e lã de PET interna – Parte imaginária



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 108 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a impedância superficial média das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita externa e lã de PET interna – Parte imaginária

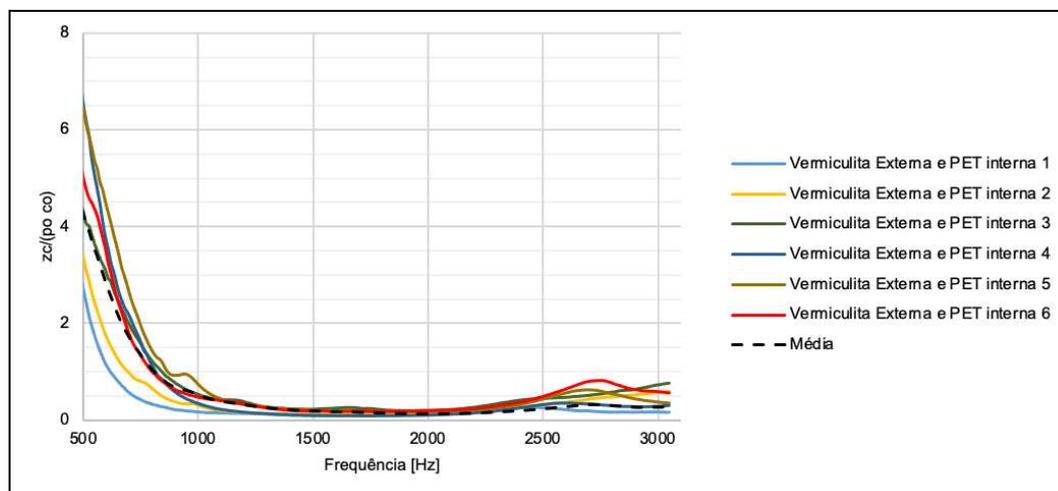


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Para a parte resistiva do sistema, formado pela placa de vermiculita externa e lã de PET interna, também houve uma queda nos valores entre a faixa de frequência de

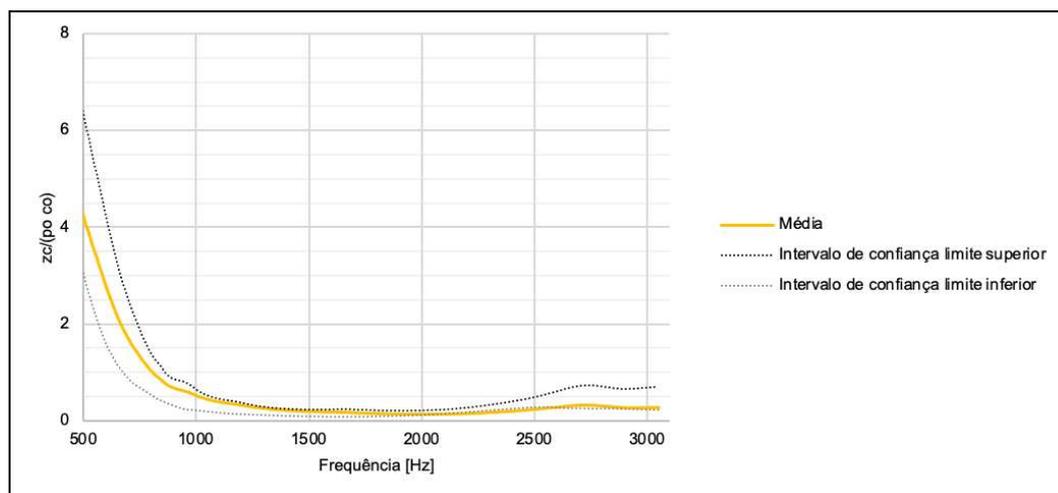
500 Hz e 1000 Hz e, a partir disso, os valores permaneceram constantes até a frequência de 3000 HZ (Figura 109). Para os resultados encontrados, também houve pouca variação entre as amostras testadas (Figura 110).

Figura 109 - Gráfico impedância superficial das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita externa e lã de PET interna – Parte real



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 110 - Gráfico intervalo de confiança de 95% para a impedância superficial média das amostras do conjunto formado pela placa de vermiculita externa e lã de PET interna – Parte real

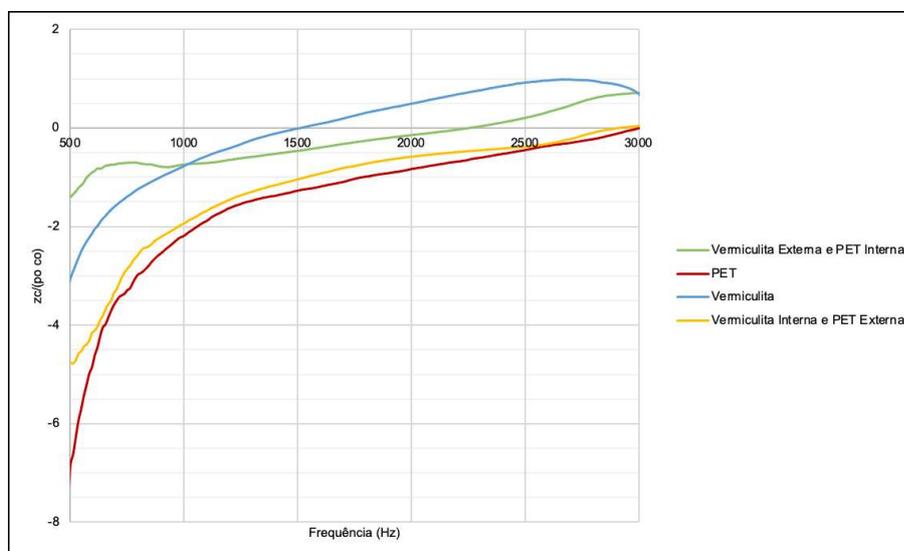


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Na Figura 111, foi feita a comparação entre as curvas médias da parte imaginária da impedância acústica superficial normalizada, a lã de PET apresentou a maior parte da impedância regida pela rigidez e não houve troca de sinal, assim como o conjunto formado pela placa de vermiculita interna e lã de PET externa, enquanto as outras

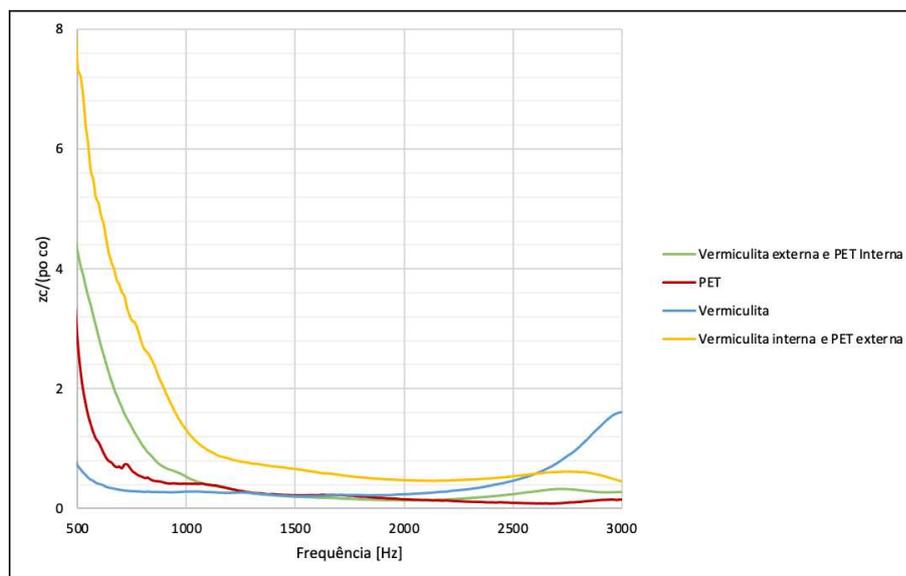
duas amostras, a placa de vermiculita e o sistema formado pela placa de vermiculita externa e lã de PET interna apresentaram uma troca de sinal, a partir de 1500 Hz e 2300 Hz, respectivamente. Na Figura 112, foi comparada a parte real da impedância entre todas as amostras, a placa de vermiculita apresentou valores médios constantes em todas as faixas de frequência e uma pequena elevação próxima a frequência de 3000 Hz. As outras amostras apresentaram uma curva com maior queda entre as frequências de 500 Hz e 1000 Hz, sendo o conjunto formado pela placa de vermiculita interna e lã de PET externa a curva média de maior queda, indicando maiores trocas de calor, principalmente nas frequências mais baixas.

Figura 111 - Gráfico comparação das curvas médias de Impedância acústica superficial para os ensaios realizados – Parte imaginária



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 112 - Gráfico comparação das curvas médias de Impedância acústica superficial para os ensaios realizados – Parte real



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.2 Ensaio de Perda de Transmissão Sonora (PT) em temperatura ambiente

Após a realização dos ensaios experimentais da PT, foram feitos gráficos de nível de pressão sonora *versus* a frequência para as salas emissora e receptora dos seis ensaios realizados em cada modelo de parede e sua respectiva média. As expressões $F1$ e $F2$ representaram as posições da fonte sonora e, $P1$, $P2$ e $P3$, as disposições dos microfones, como já explicado neste trabalho, no Capítulo 3. Assim como nos ensaios no tubo de impedância, foram feitos gráficos das curvas da média da pressão sonora junto ao seu intervalo de confiança de 95% (limite inferior e superior) *versus* a frequência e todos esses gráficos foram dispostos no Apêndice A. Por fim, neste Subitem, foi elaborado um gráfico de comparação entre os valores de PT *versus* frequência dos quatro modelos de parede analisados.

Na Figura 113, foi feita a comparação entre as curvas de PT entre os quatro modelos ensaiados. Em todas as curvas, foi possível perceber que a partir da frequência de 500 Hz houve uma queda acentuada no isolamento sonoro em cada parede, bem como um crescente aumento no isolamento sonoro a partir da frequência de 2000 Hz. Na faixa de frequência entre 100 Hz e 500 Hz, a parede constituída por apenas placa de vermiculita apresentou o maior isolamento com valores entre 62 dB e 56 dB,

enquanto que a parede completa, com placa de vermiculita e manta de lã de PET obteve isolamento menor para essa faixa de frequência, com valores entre 53 dB e 44 dB. Ademais, a parede com apenas a manta de lã de PET apresentou o menor isolamento sonoro entre 100 Hz e 500 Hz, com valores entre 42 dB e 37 dB. Já a parede sem material absorvente, obteve resultados de PT entre 50 dB e 42 dB, na mesma faixa de frequência

A partir frequência de 500 Hz, a parede com placa de vermiculita apresentou uma queda mais acentuada no isolamento do som do que a parede completa, a queda foi de 57 dB para 28 dB em 2000 Hz, na parede com placa de vermiculita, e no ensaio com os dois materiais absorventes, o decréscimo foi de 47 dB para 33 dB. Na parede com apenas lã de PET e no ensaio sem material absorvente a queda na PT foi similar, de 41 dB para 21 dB e de 42 dB para 24 dB, respectivamente, na mesma faixa de frequência.

Nas frequências entre 1250 Hz até 4000 Hz, a parede composta por placa de vermiculita e manta de lã de PET apresentou o maior isolamento entre os ensaios executados, com valores entre 33 dB e 41 dB. Já a parede com apenas placa de vermiculita, apresentou um isolamento sonoro entre 28 dB e 41 dB. Ainda, sobre a mesma faixa de frequência, a parede sem material absorvente apresentou um isolamento sonoro entre 24 dB e 31 dB, ou seja, isolamento maior do que a parede com lã de PET, que apresentou também isolamento mais baixo do som para essa faixa de frequência, com valores entre 21 dB e 27 dB.

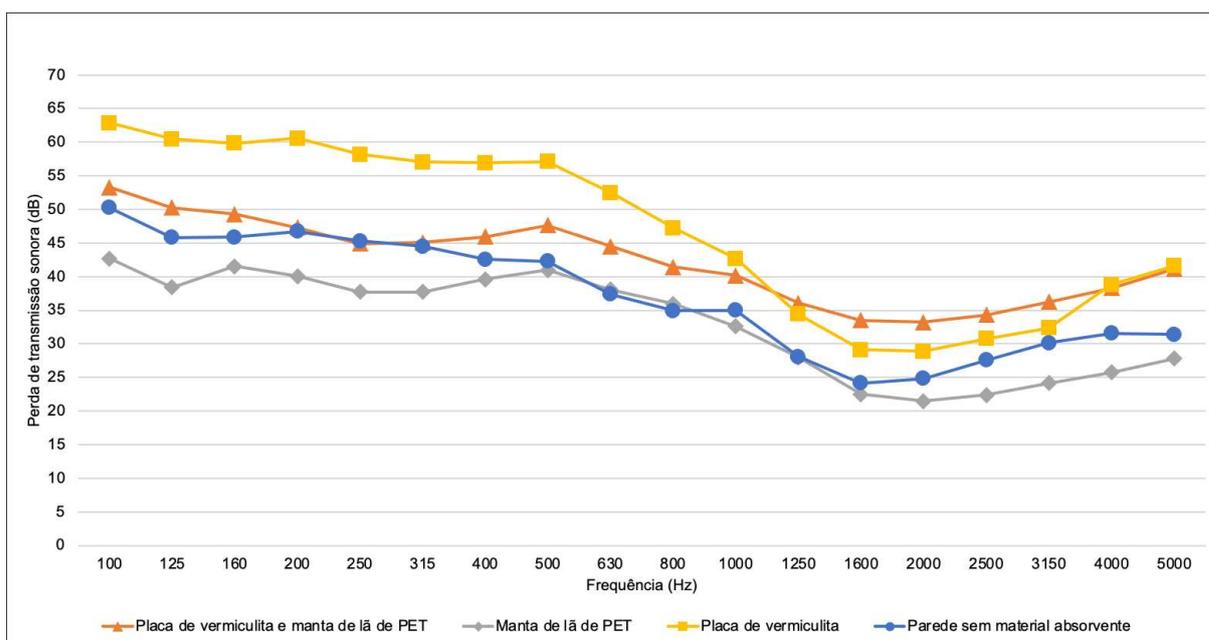
A curva de PT correspondente ao ensaio realizado na parede construída com apenas placa de vermiculita apresentou o desempenho mais alto na faixa de frequência entre 100 Hz e 1000 Hz, enquanto a curva da parede composta pelos dois materiais demonstrou maior isolamento acima de 1250 Hz. O ensaio feito na parede executada com apenas a manta de lã de PET apresentou a menor PT em toda a faixa de frequência analisada, exceto entre 630 Hz e 800 Hz.

Por meio dessa análise, foi possível perceber que para cada faixa de frequência considerada, cada material absorvente que compõe a parede é responsável por um aumento ou diminuição no isolamento sonoro. Dessa forma, é necessário considerar

os ruídos típicos das atividades internas e externas ao empreendimento em que será inserida uma parede de LSF (observar se o som predominante no ambiente apresenta mais ruídos de baixa, média ou alta frequência) para alcançar um melhor desempenho do sistema.

Ademais, foram feitas as Tabela 27 e Tabela 28 para demonstrar as frequências críticas (f_c) (EQUAÇÃO 1.13) dos painéis externo e interno, bem como as frequências de ressonância (f_r) dos painéis externo e interno (EQUAÇÃO 1.10); a frequência de ressonância estrutural do conjunto de ordem mais baixa (f_0) (EQUAÇÃO 3.30) e a frequência de cavidade do ar ($f_{r_{ar}}$) (EQUAÇÃO 1.14), para compreender as quedas na curva de PT. As frequências críticas (f_c) e a frequência de ressonância da cavidade de ar ($f_{r_{ar}}$) coincidiram com a faixa de frequência em que se encontra a PT mais baixa das curvas ensaiadas. Os modos de vibração de frequência natural analisados nas frequências de ressonâncias (f_r) dos painéis externo e interno e a frequência estrutural do conjunto não contribuíram para a queda na PT, elas ficaram abaixo da frequência estudada nos ensaios.

Figura 113 - Gráfico PT: comparação entre as quatro configurações de parede.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 27 - Frequências críticas dos painéis.

Painéis	Frequências críticas (Hz)
Painel externo (placa cimentícia)	3142,42
Painel interno (placa de OSB e gesso acartonado)	1476,31

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 28 - Frequências naturais.

Local da frequência natural	Direção dos modos de vibração	Frequência (Hz)
Frequência natural painel externo (f_r)	(1,1)	9,27
	(1,2)	10,93
	(2,1)	16,86
	(2,2)	18,53
Frequência natural painel interno (f_r)	(1,1)	19,72
	(1,2)	23,27
	(2,1)	35,90
	(2,2)	39,44
Frequência natural cavidade de ar (f_{ar})	(1,1)	1888,89
Frequência natural do conjunto (f_0)	(1,1)	93,03

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

4.2.2.1 Comparação da estimativa teórica da Perda de Transmissão Sonora (PT) com os ensaios realizados

Além da comparação entre as curvas de PT dos ensaios realizados, foram feitos gráficos comparativos entre as curvas dos ensaios experimentais com a curva de estimativa teórica de paredes duplas com e sem material absorvente e com a curva da Lei da Massa. As expressões utilizadas nos gráficos foram: para a frequência de ressonância estrutural, f_0 ; para a frequência limite, f_L ; para a metade da frequência crítica 1 (placa de gesso acartonado e de OSB), $0,5 \cdot F_{C1}$ e; para a frequência crítica 2 (placa cimentícia), F_{C2} . A curva teórica foi composta pelos pontos PT_A , $PT_{A'}$, PT_B , PT_C e PT_D . Logo, as coordenadas de PT_A foram dadas por 93,03 Hz e 22 dB; $PT_{A'}$ por 211,86 Hz e 43 dB; PT_B por 738,16 Hz e 60 dB; PT_C por 3142,42 Hz e 43 dB e; PT_D por 611,11 Hz e 70 dB (Tabela 29).

Tabela 29 – Pontos da curva de estimativa teórica.

Pontos	Frequência (Hz)	PT (dB)
PT _A	$f_0 = 93,03$	22
PT _{A'}	$f_{A'} = 211,86$	43
PT _B	$0,5 * f_{c1} = 738,16$	60
PT _C	$f_{c2} = 3142,42$	43
PT _D	$f_L = 611,11$	70

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Na Figura 114, foi possível perceber que a curva do ensaio executado na parede com placa de vermiculita se aproximou mais da estimativa teórica de PT, entre os pontos de PT_D e PT_B e a partir do ponto de PT_C. Enquanto que a curva de isolamento do som da parede com placa de vermiculita e manta de lã de PET apresentou-se mais próxima da curva de estimativa teórica entre os pontos de PT_B e PT_C. Já nas frequências mais baixas, entre os pontos de PT_A e PT_{A'}, a curva do ensaio da parede feita com manta de lã de PET obteve um isolamento mais próximo da curva teórica.

A menor frequência de ressonância estrutural do sistema (f_0) foi dada por 93,03 Hz, e a PT foi de 22 dB em PT_A, enquanto os resultados dos ensaios experimentais apresentaram valores entre 43 dB e 63 dB, para a mesma frequência. As quedas acentuadas no isolamento sonoro ocorreram na frequência próxima de 500 Hz no ensaio experimental e na curva teórica, o declínio aconteceu na frequência limite, em 611,11 Hz.

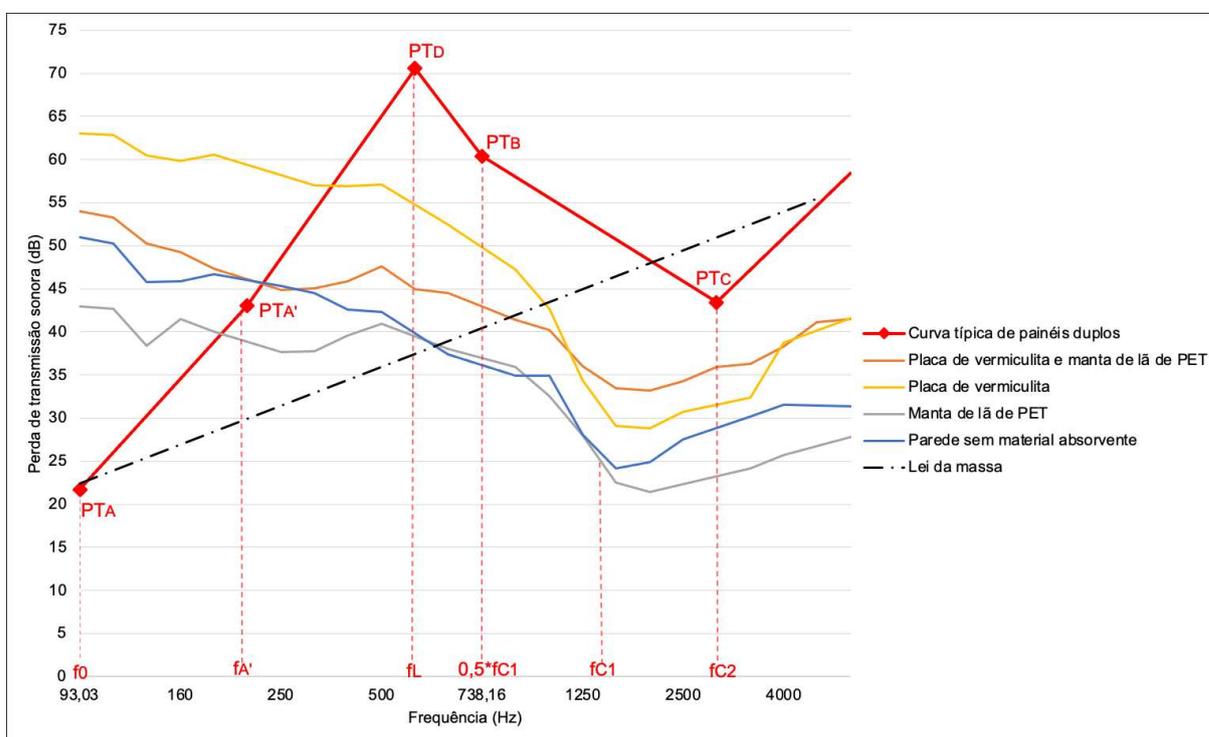
A frequência crítica (f_{c1}) da placa de OSB e gesso acartonado coincide com o ponto de inflexão das curvas experimentais, na frequência de 1476,31 Hz, momento em que as curvas teóricas começaram a aumentar novamente o seu isolamento sonoro. Na curva teórica, esse ganho volta a acontecer somente em 3142 Hz.

Os ensaios experimentais mostraram maior isolamento sonoro em relação a curva teórica nas frequências mais baixas analisadas e a partir da frequência de 315 Hz, o isolamento sonoro de todas as paredes ensaiadas apresentou menor valor em relação a estimativa teórica.

Em comparação com a Lei da Massa, os ensaios experimentais apresentaram maior PT em frequências de até 1000 Hz, a partir desse valor todas os dados experimentais obtiveram valores de PT menor do que a curva da Lei da Massa. Isso se deve à leveza do sistema LSF, uma vez que a Lei da Massa está diretamente relacionada à

densidade superficial da parede. Em maiores frequências a Lei da Massa apresenta maior isolamento sonoro. Nos ensaios experimentais realizados nas paredes de LSF, a PT foi menor em frequências maiores.

Figura 114 – Gráfico comparação da curva de ensaios experimentais e curva teórica de estimativa de PT em painéis duplos.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Já para a estimativa teórica de isolamento sonoro de paredes sem materiais absorventes (Figura 115), a curva experimental apresentou valores próximos de PT em PT_A , PT_B e PT_C , em comparação a curva teórica para paredes sem material absorvedor, para a mesma faixa de frequência analisada. Em PT_B o isolamento sonoro foi de 40 dB e em PT_C foi de 23 dB, conforme mostra a Tabela 30.

Tabela 30 - Pontos da curva de estimativa teórica da parede vazia.

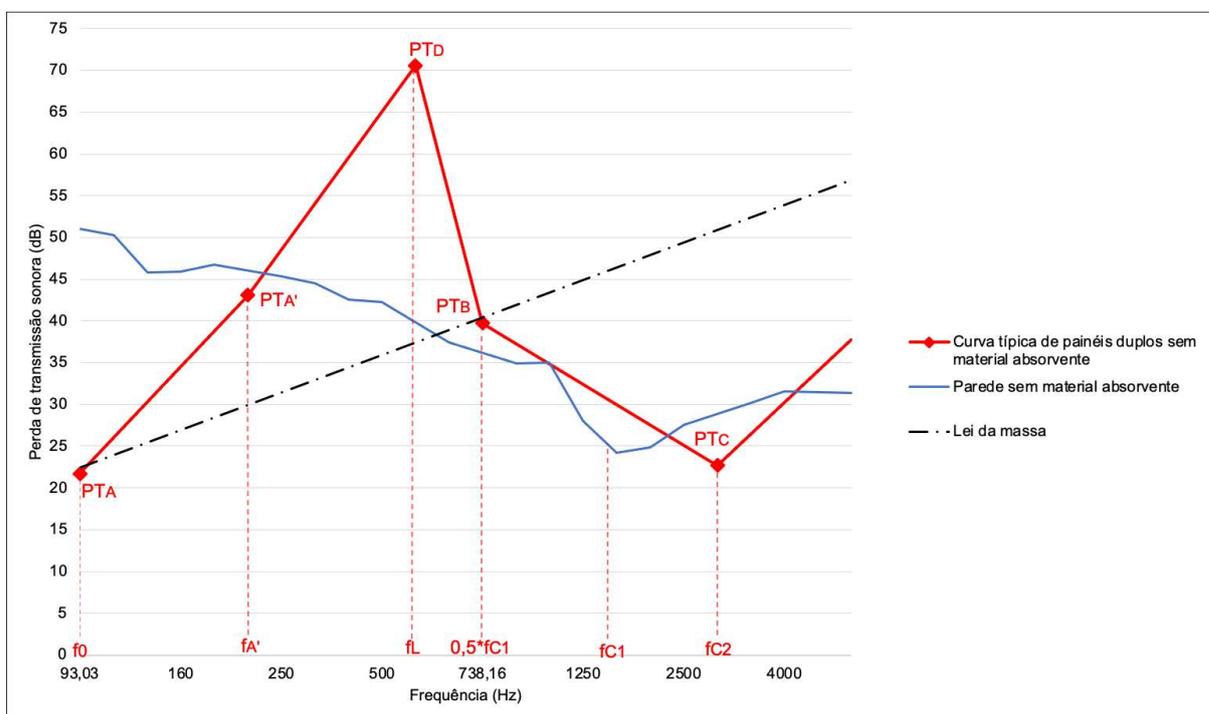
Pontos	Frequência (Hz)	PT (dB)
PT_A	$f_0 = 93,03$	22
$PT_{A'}$	$f_{A'} = 211,86$	43
PT_B	$0,5 * f_{c1} = 738,16$	40
PT_C	$f_{c2} = 3142,42$	23
PT_D	$f_L = 611,11$	70

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Entre os pontos PT_A e PT_D houve um ganho no isolamento sonoro na curva teórica, enquanto a curva experimental ocorreu uma queda no isolamento sonoro, entre as frequências de 93,03 Hz e 611,11 Hz. A partir do ponto PT_B , houve uma queda acentuada na curva teórica, bem como na curva experimental. O último aumento na PT aconteceu a partir da frequência crítica 1 (f_{c1}) em 1476,1 Hz, nos dados experimentais e em 25 dB. Enquanto que na curva teórica o ultimo ponto de inflexão ocorreu em 3142,42 Hz e em 23 dB.

A curva da Lei da Massa apresentou menor isolamento sonoro até a frequência de 700 Hz e 37 dB, a partir deste ponto a Lei da Massa apresentou maior isolamento chegando a 57 dB em 5000 Hz, já a curva experimental apresentou um valor de 31 dB para a mesma frequência. Isso também se deve à leveza do sistema LSF.

Figura 115 - Gráfico comparação da curva de ensaios experimentais e curva teórica de estimativa de PT em painéis duplos sem material absorvente entre os painéis de fechamento.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

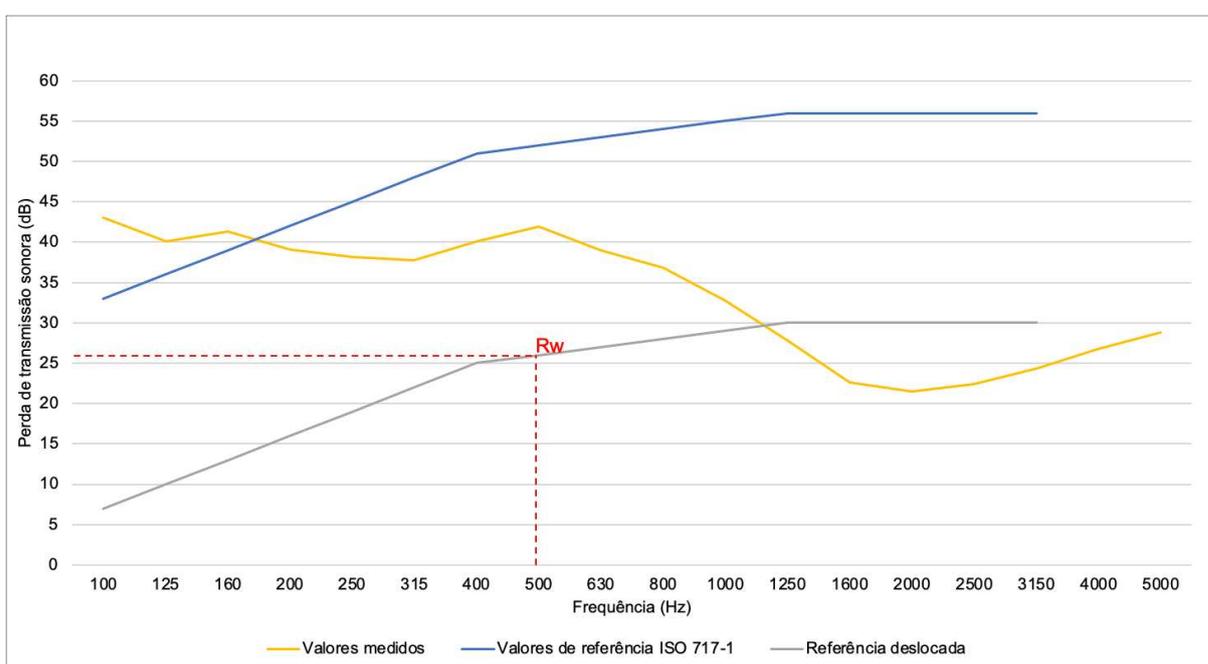
4.2.2.2 Determinação de R_w , C e C_{tr} e; STC

Para cada resultado da PT dos quatro modelos de parede, foram feitos gráficos correlacionando a curva experimental, a curva de referência fornecida pela ABNT NBR

ISO 717-1:2021 ou pela ASTM E 413:2022 e; a curva de ajuste para determinar a classificação de valor único (R_w) ou a classe de transmissão sonora (STC) na frequência de 500 Hz.

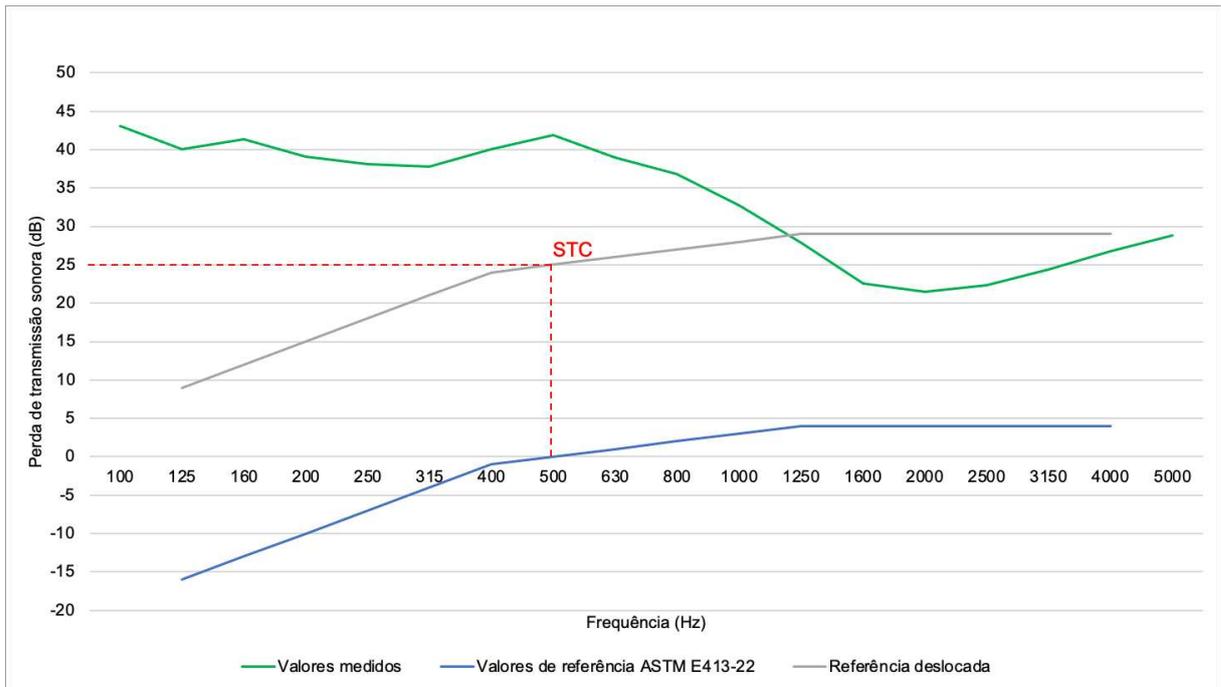
Os valores de R_w e STC, encontrados para as paredes ensaiadas com manta de lã de PET (Figura 116 e Figura 117) e para as paredes sem material absorvedor (Figura 118 e Figura 119), apresentaram valores para R_w de 26 dB e 29 dB e para STC valores de 25 dB e 28 dB, respectivamente. Tanto a parede com manta de lã de PET, quanto a vazia (sem material absorvedor) atendem apenas o requisito mínimo para o isolamento aéreo de fachadas de dormitórios, na classe de ruído I, e de fachadas de salas, nas classes I e II e; não cumprem o desempenho exigido para o isolamento de vedações verticais internas (ABNT NBR 15575-4, 2021). Para o valor de STC, as duas paredes se enquadram em uma classificação entre precária e fraca, no qual uma voz normal é facilmente compreendida, de acordo com Bistafa (2018).

Figura 116 – Gráfico classificação de valor único - R_w - em parede com lã de PET.



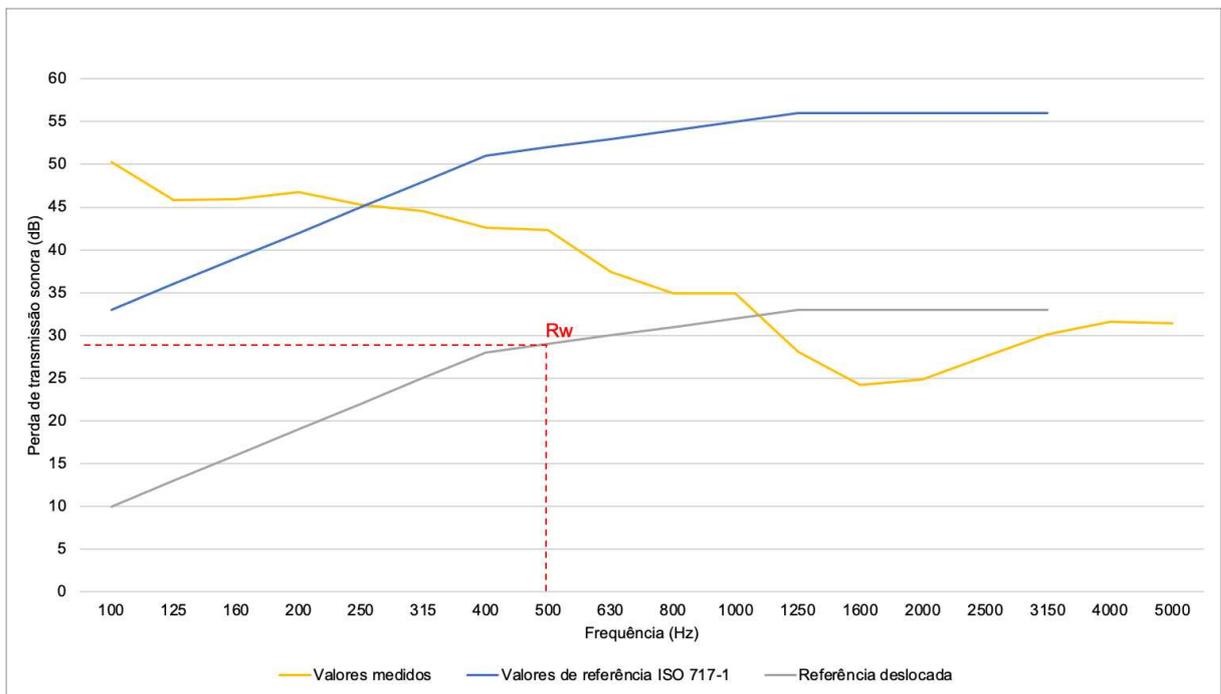
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 117 – Gráfico classe de transmissão sonora - STC - em parede com lã de PET.



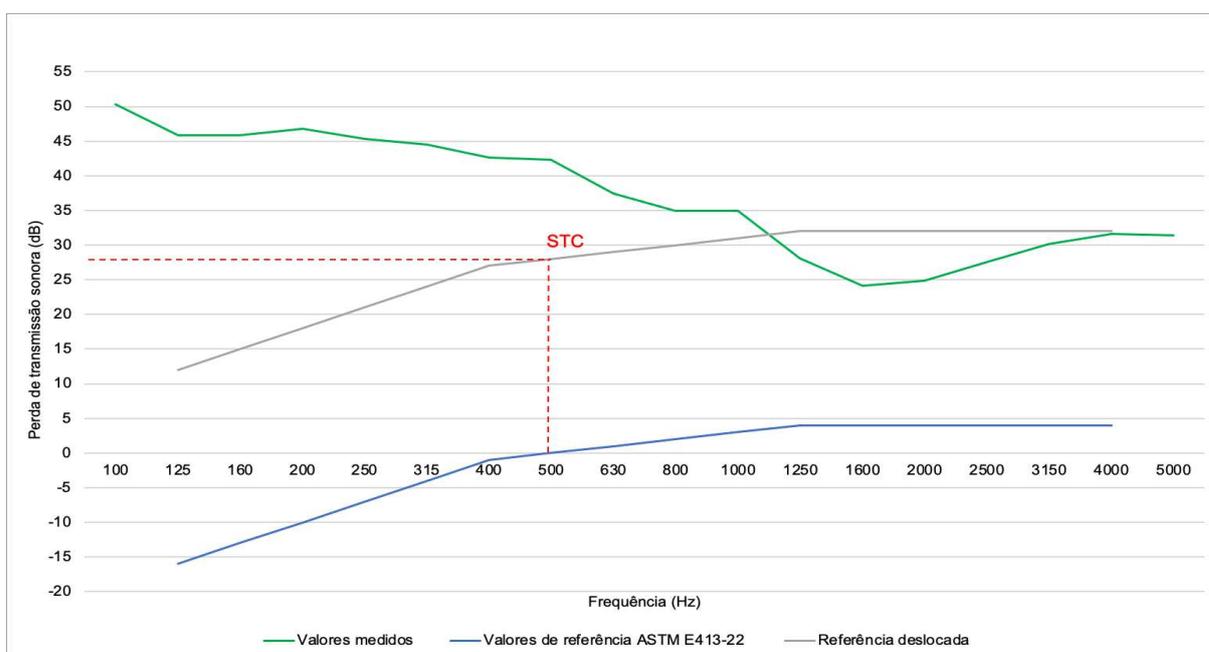
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 118 – Gráfico classificação de valor único - R_w - em parede sem material absorvedor.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

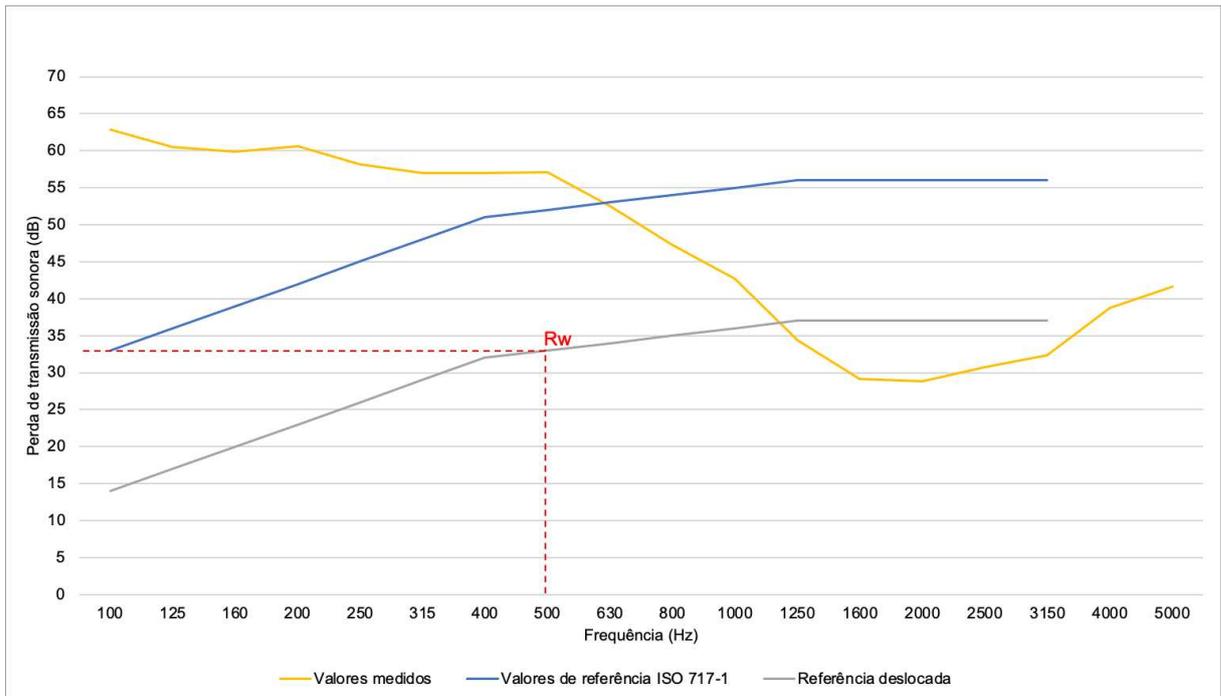
Figura 119 – Gráfico classe de transmissão sonora - STC - em parede sem material absorvedor.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

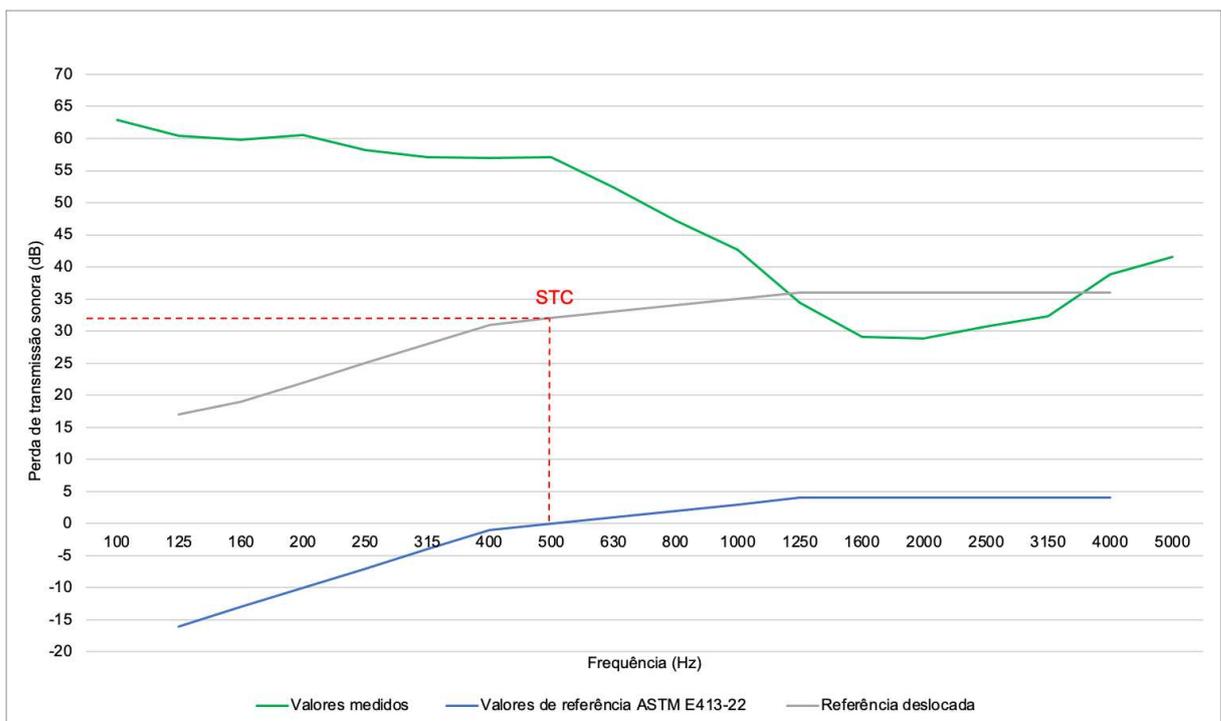
O ensaio realizado na parede composta por apenas placa de vermiculita apresentou R_w no valor de 33 dB (Figura 120). Conforme a ABNT NBR 15575-4:2021, é possível que haja utilização dessa parede em fachadas aéreas de dormitórios, em classes de ruído I e II, e de salas sob qualquer tipo de classe de ruído e; para paredes de vedação interna, o valor de referência obtido não atinge os requisitos mínimos da norma para nenhuma situação. Para o STC, foi encontrado um valor de 32 dB (Figura 121), isolamento suficiente para que uma voz elevada seja razoavelmente inteligível e uma voz normal pouco compreensível, sendo seu isolamento classificado entre fraco e razoável, conforme Bistafa (2018).

Figura 120 - Gráfico classificação de valor único - R_w - em parede com placa de vermiculita.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

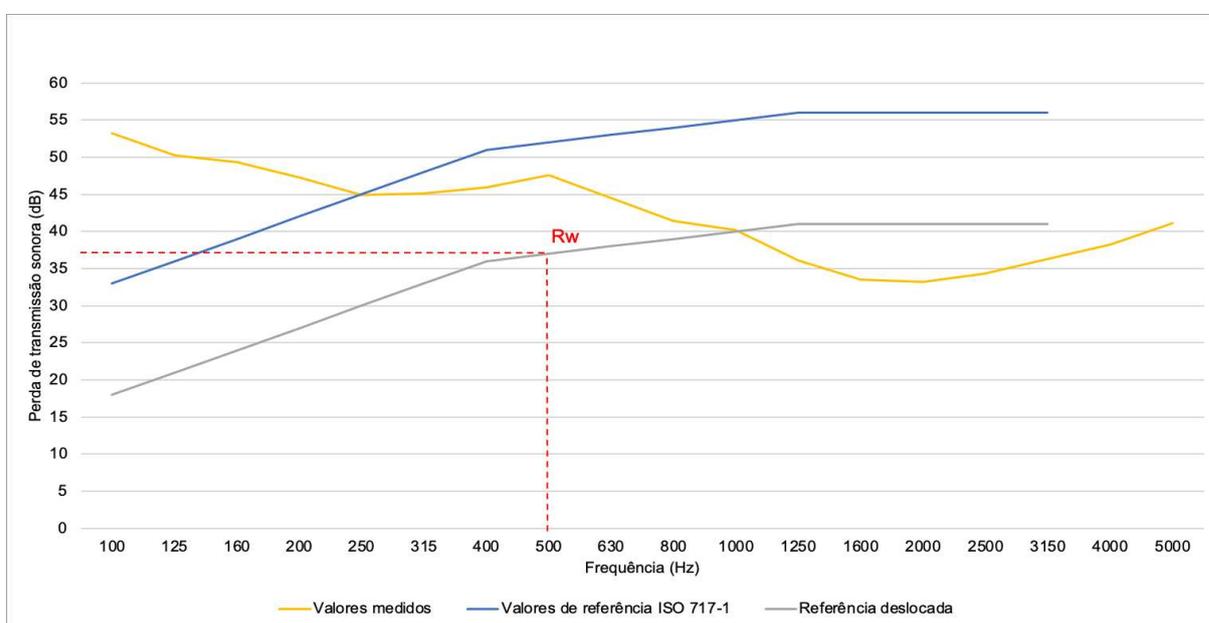
Figura 121 – Gráfico classe de transmissão sonora - STC - em parede com placa de vermiculita.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

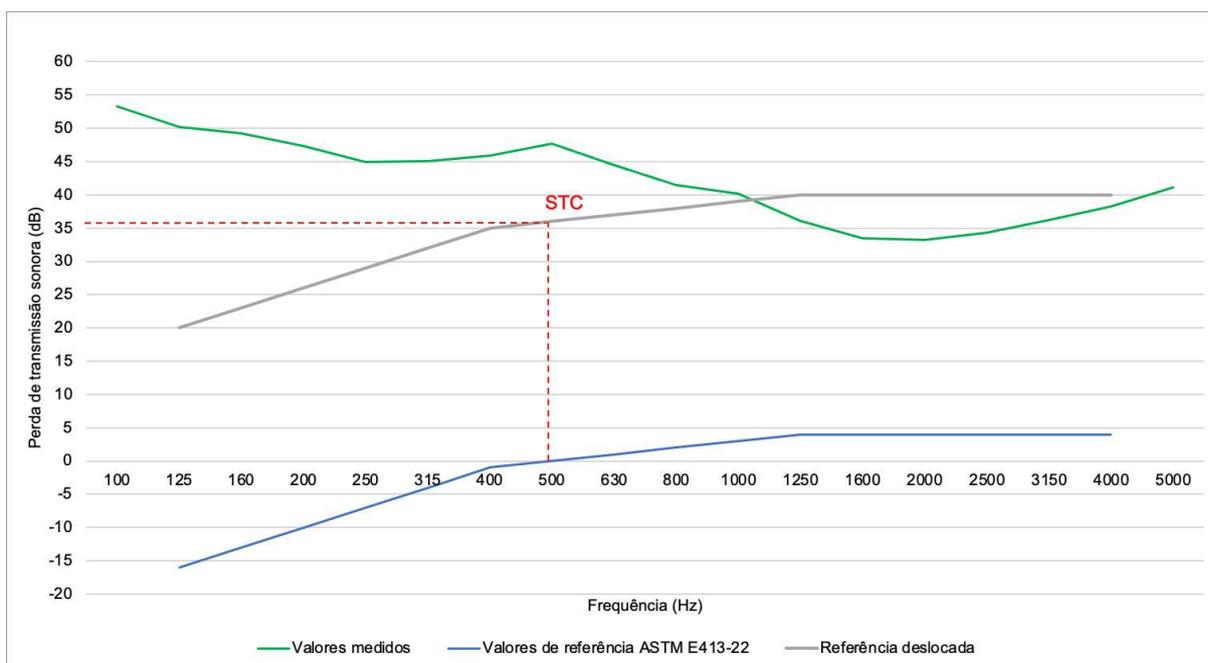
Na Figura 122 e na Figura 123, estão os gráficos de PT medidos em laboratório da parede com placa de vermiculita e manta de lã de PET, para o cálculo de R_w e STC, respectivamente. O R_w obtido foi de 37 dB, indicando um possível uso em paredes de fachadas, tanto para salas quanto para dormitórios, enquanto que para vedações verticais internas, seu uso poderia ser indicado em paredes cegas entre unidades habitacionais e de áreas comuns, como corredores e escadas, de acordo com a norma de desempenho ABNT NBR 15575-4:2021. Já o STC foi de 36 dB e de acordo com Bistafa (2018), essa parede pode ser classificada como um isolamento entre razoável e bom, pois ela é capaz de proporcionar pouca inteligibilidade em uma voz elevada e nenhuma compreensão em uma voz normal.

Figura 122 – Gráfico classificação de valor único - R_w - em parede com placa de vermiculita e lã de PET.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 123 – Gráfico classe de transmissão sonora - STC - em parede com placa de vermiculita e lã de PET.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Conforme a Tabela 31, por meio de uma síntese dos resultados de R_w e STC, foi possível fazer uma comparação entre os valores de classificação das paredes e também associá-la à Tabela 10 e à Tabela 11. A parede com manta de lã de PET e a vazia apresentaram o R_w mais baixo, sendo possível utilizá-las apenas em fachadas de dormitórios de classe I e em fachadas de salas, das classes I e II, não permitindo algum tipo de isolamento proveniente de uma voz normal. A parede com placa de vermiculita apresentou menor R_w em relação a parede completa, sendo possível sua aplicação em paredes de fachadas nas classes I e II para dormitórios, e para todas as classes de ruídos em fachadas de salas e, ainda, permite uma perda da inteligibilidade de vozes elevadas e normais. Para os valores de R_w e STC, a parede com os dois materiais absorvedores apresentou melhor isolamento acústico, sendo possível utilizá-la em vedações verticais de fachadas aéreas em qualquer classe de ruído e ambiente e, também, em vedações verticais internas, como em paredes divisórias de unidades habitacionais e corredores, bem como proporcionar a perda de clareza de uma voz elevada e a não inteligibilidade de uma voz normal. (BISTAFA, 2018; ABNT NBR 15575-4, 2021).

Ademais, o espectro de adaptação C e C_{tr} foram determinados a partir do cálculo de R_w , como mostra a Tabela 31. O espectro de adaptação C é um fator de correção de R_w para sons de médias e altas frequências e, para todos os ensaios, não houve correção de R_w para essa faixa de frequência. Entretanto, para o espectro de adaptação C_{tr} , feitos para ruídos de baixas a médias frequências, houve uma melhora em todos os ensaios realizados, sendo o valor de +1 para as paredes: vazia; com manta de lã de PET e; completa. E valor de +2 para o ensaio realizado com placa de vermiculita, indicando, dessa forma, um melhor desempenho das paredes ensaiadas quando expostas a ruídos de baixa frequência.

Tabela 31 - Tabela síntese dos valores de R_w , espectro de adaptação C e C_{tr} e STC determinados após a realização dos ensaios de PT na parede de LSF.

Material interno absorvedor	R_w (dB)	Espectro de adaptação $C; C_{tr}$	STC (dB)
Sem material absorvedor	29	29 (0; +1)	28
Manta de lã de PET	26	26 (0; +1)	25
Placa de vermiculita	33	33 (0; +2)	32
Placa de vermiculita e manta de lã de PET	37	37 (0; +1)	36

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Por meio da Tabela 32 e da Tabela 33 foi possível comparar o valor de R_w e o STC, respectivamente, de partições comumente utilizadas, com os resultados dos valores experimentais determinados nesta pesquisa. Em relação a R_w , a parede completa apresentou um valor próximo ao bloco vazado de cerâmica de 9 cm de espessura com 1,5 cm de argamassa de revestimento em cada face e, também, valor próximo ao da parede maciça de concreto armado de 5 cm de espessura sem revestimento. Quanto ao STC, a parede completa de LSF, com os dois materiais, apresentou valor superior a parede dupla de *drywall* com placas de 12 mm de espessura. É importante ressaltar que os valores únicos de classificação facilitam em um primeiro instante a comparação entre as paredes com diferentes materiais e auxiliam no atendimento aos requisitos de desempenho mínimo estabelecidos em normas, mas não são capazes de detalhar a redução sonora de uma parede em uma faixa de frequência. Para uma análise específica, recomenda-se a análise da curva de isolamento sonoro em altas, baixas e médias frequências e, se possível, analisar os espectros de adaptação ($C; C_{tr}$).

Tabela 32 - Valores indicativos do índice de redução sonora ponderado para alguns sistemas de paredes.

Tipo de parede	Largura do bloco / tijolo	Revestimento	Massa aproximada	R _w (dBA)
Blocos vazados de concreto	9 cm	argamassa 1,5 cm em cada face	180 kg/m ²	41
	11,5 cm		210 kg/m ²	42
	14 cm		230 kg/m ²	45
Blocos vazados de cerâmica	9 cm	argamassa 1,5cm em cada face	120 kg/m ²	38
	11,5 cm		150 kg/m ²	40
	14 cm		180 kg/m ²	42
Tijolos maciços de barro cozido*	11 cm	argamassa 2cm em cada face	260 kg/m ²	45
	15 cm		320 kg/m ²	47
	11 + 11 cm**		450 kg/m ²	52
Paredes maciças de concreto armado	5 cm	sem revestimento	120 kg/m ²	38
	10 cm		240 kg/m ²	45
	12 cm		290 kg/m ²	47
Drywall	2 chapas + lã de vidro	sem revestimento	22 kg/m ²	41
	4 chapas		44 kg/m ²	45
	4 chapas + lã de vidro		46 kg/m ²	49

(*) Valores indicados pela Universidade de Coimbra.
(**) Parede dupla 11 + 11 cm, com espaço interno de 4 cm preenchido com manta de lã de rocha 70 kg/m³.

Fonte: Unicamp, SOBRAC, Universidade de Coimbra apud Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2013).

Tabela 33 – STC de partições feitas de materiais construtivos comumente utilizados.

Partição	STC
Vidro de 6 mm de espessura	26
Chapa de madeira compensada de 18 mm de espessura	28
Parede dupla de chapas <i>dry-wall</i> de 12 mm de espessura, fixadas em caibros de 5 × 10 cm	33
Chapa de aço de 6 mm de espessura	36
Parede de tijolos de 10 cm de espessura	41
Parede de blocos de cimento de 15 cm de espessura	42
Parede de concreto armado de 30 cm de espessura	56
Parede dupla: tijolos de 20 cm, cavidade de 5 cm, tijolos de 10 cm de espessura	65

Fonte: Bistafa (2018).

4.2.3 Ensaio de Perda de Transmissão Sonora (PT) com a parede aquecida

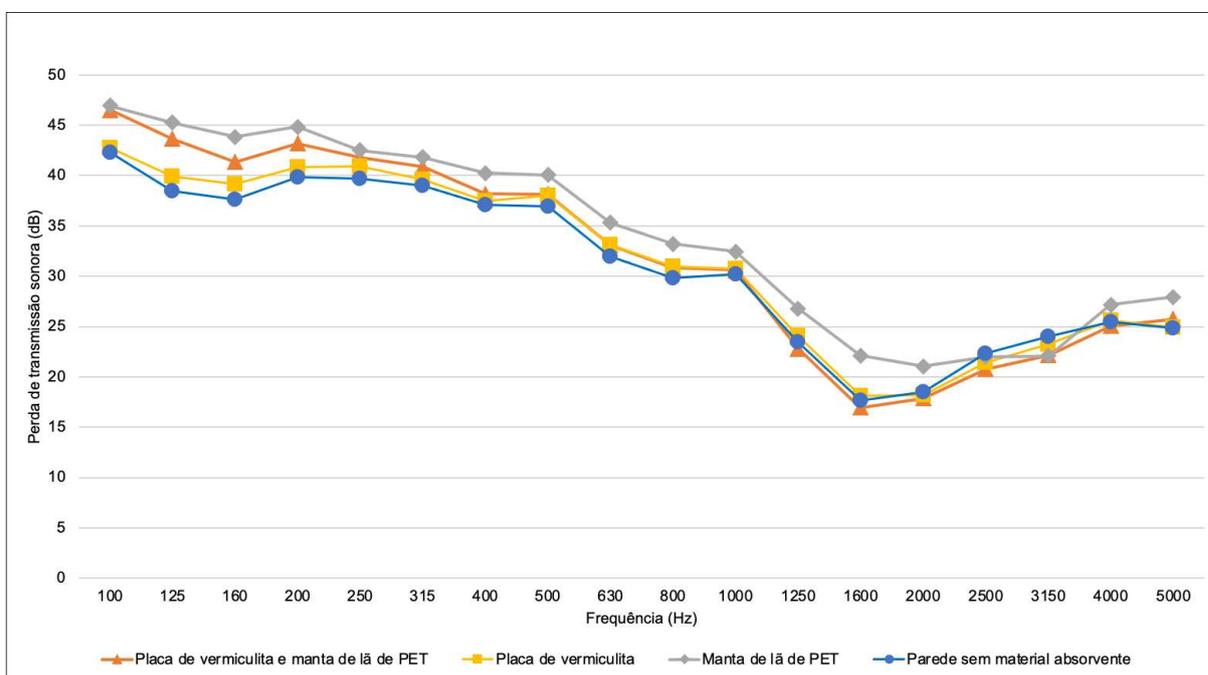
Assim como foram feitos os gráficos dos ensaios em temperatura ambiente de PT, os gráficos de isolamento sonoro *versus* frequência dos ensaios em paredes aquecidas foram dispostos neste Subitem. Os ensaios foram executados após um aquecimento constante de quatro horas consecutivas, chegando a uma temperatura média de 120 °C, como já explicitado no Capítulo 3. Também foram produzidos gráficos de média de pressão sonora da sala emissora e receptora, junto ao seu intervalo de confiança de 95%, dispostos no Apêndice B.

Na comparação entre os valores da PT nos ensaios com a parede aquecida, na Figura 124, foi possível perceber que a parede com a manta de lã de PET apresentou o maior isolamento sonoro dentre os ensaios realizados, na maior parte da faixa de frequência analisada, com valores entre 46 dB e 22 dB, exceto entre as frequências de 2500 Hz a 4000 Hz. Já a curva da parede sem material absorvente apresentou o isolamento sonoro mais baixo entre 100 Hz e 1000 Hz, com valores entre 42 dB e 30 dB. Enquanto que, entre 2500 Hz e 4000 Hz, o isolamento foi o mais alto (22 dB a 25 dB) do que as outras curvas. Em relação a parede completa e a parede com placa de vermiculita, elas demonstraram um comportamento intermediário entre os ensaios realizados entre 100 Hz e 1000 Hz e, entre 400 Hz e 1000 Hz, os valores de PT foram iguais entre os dois ensaios, de 38 dB a 30 dB. A partir 1000 Hz, a parede completa obteve o isolamento sonoro mais baixo e atingiu um valor de 16 dB, em 1600 Hz, sendo o menor valor em relação a todas as curvas.

Todas as curvas apresentaram valores mais altos entre 100 Hz e 500 Hz, uma queda mais acentuada após essa faixa de frequência, bem como um isolamento mais baixo entre 1600 Hz e 2000 Hz e, em seguida, um ganho de isolamento. Ademais, pôde-se inferir que o aquecimento da manta de lã de PET apresentou o melhor desempenho acústico em temperaturas elevadas na maior parte da frequência analisada. Já a parede sem material absorvente obteve isolamento sonoro mais baixo, entre 100 Hz e 1000 Hz e, a partir dessa frequência, de 1000 Hz a 5000 Hz, o ensaio com os dois materiais absorventes foi àquele que apresentou desempenho mais baixo em

temperaturas elevadas. Ainda, a frequência crítica (f_c) do painel interno e a frequência de ressonância da cavidade de ar (f_{ar}) coincidiram com a faixa de frequência em que se encontra a PT mais baixa das curvas ensaiadas (Tabela 27 e Tabela 28).

Figura 124 - Gráfico PT: comparação entre as configurações de paredes aquecidas a 120 °C.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.3.1 Comparação da estimativa teórica da Perda de Transmissão Sonora (PT) com os ensaios realizados em paredes aquecidas

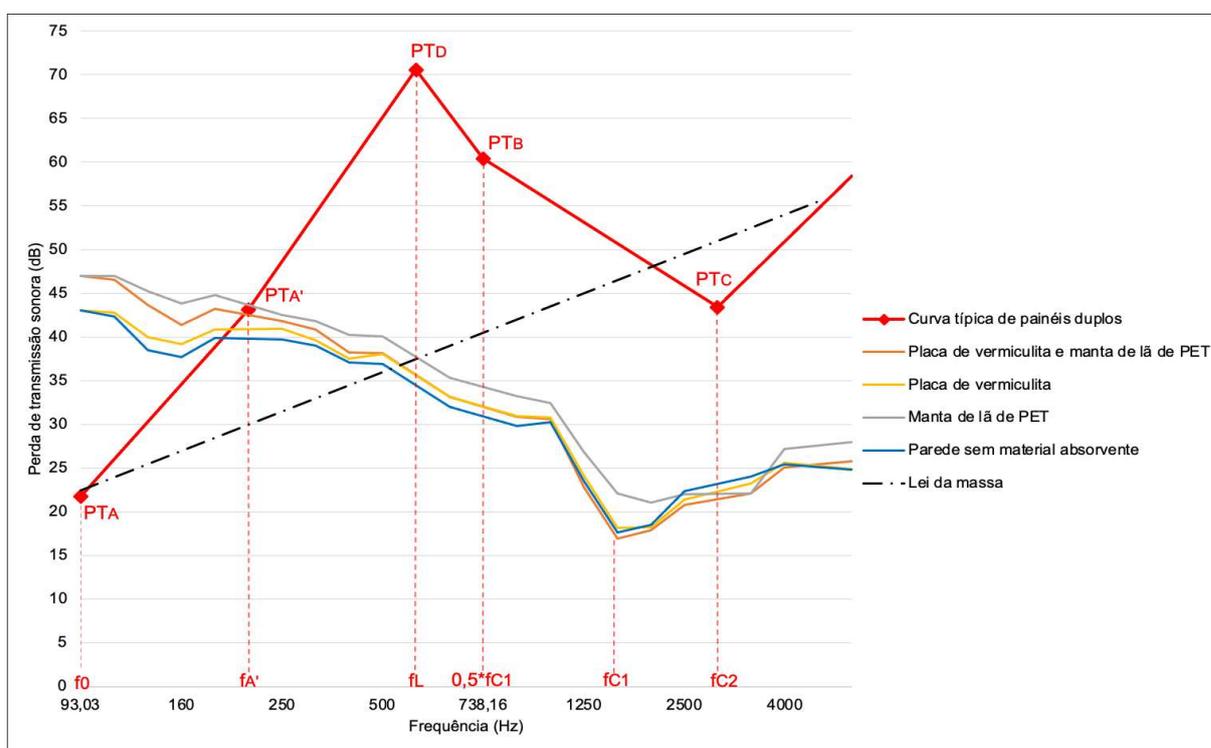
Assim como foi feito nos ensaios realizados em temperatura ambiente, as curvas provenientes dos ensaios experimentais em paredes aquecidas também foram comparadas com o gráfico de estimativa teórica de PT. Os pontos da curva teórica são os mesmos já descritos no Subitem 4.2.2.1.

Conforme a Figura 125, foi possível analisar que a curva teórica entre os pontos PT_D até o PT_C apresentou valores muito superiores em comparação às curvas experimentais. Enquanto PT_D o valor foi de 70 dB, na curva experimental com maior isolamento, com manta de lã de PET, na mesma frequência, esse valor foi de aproximadamente 37 dB e, no ponto PT_B , o valor foi de 60 dB e no ensaio experimental para essa mesma curva, o valor foi de 34 dB. O PT_C apresentou um valor de 43 dB,

enquanto a curva experimental com maior isolamento nesta mesma frequência o valor foi de 23 dB.

Os ensaios experimentais executados em paredes aquecidas demonstraram valores superiores a curva de estimativa teórica em frequências mais baixas, entre os pontos PT_A e $PT_{A'}$. Além disso, a primeira queda acentuada na perda do isolamento ocorreu em torno de 500 Hz nos ensaios experimentais, antes da frequência limite (611,11 Hz). O ponto mais baixo da curva experimental ocorreu próximo a frequência crítica 1 (f_{c1}) da curva teórica, em 1476,31 Hz, momento no qual as curvas experimentais começaram a aumentar o valor de isolamento sonoro, esse ganho ocorreu apenas na frequência de 3142,42 Hz no PT_C da curva teórica. Já a Lei da Massa apresentou valores de isolamento menores até, aproximadamente, 500 Hz e, a partir desse momento, as curvas experimentais mostraram menor PT do que a Lei da Massa.

Figura 125 - Gráfico comparação da curva de ensaios experimentais de paredes aquecidas a 120 °C com a curva teórica de estimativa de PT em painéis duplos.

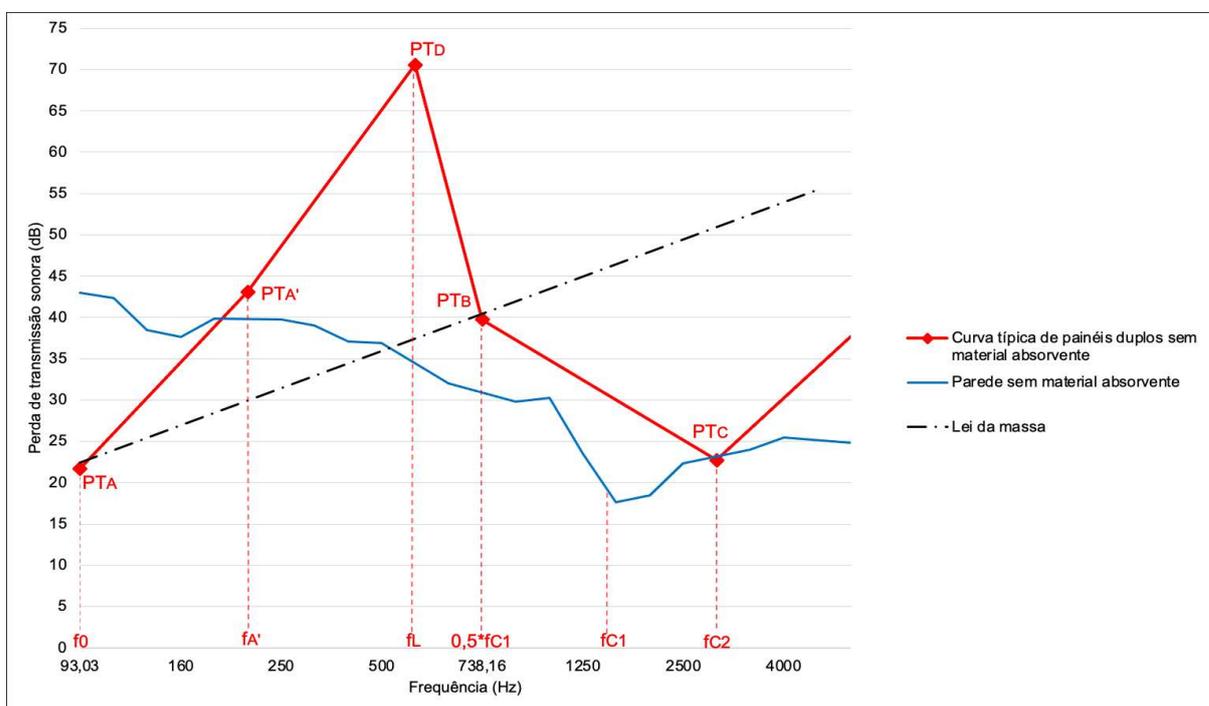


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Para a curva teórica de estimativa de PT em paredes sem material absorvente, representada na Figura 126, houve maior aproximação de isolamento com a curva

experimental entre os pontos PT_B (39 dB) e PT_C (22 dB), para a mesma frequência os valores medidos foram de 31 dB e 23 dB, respectivamente. Entre os pontos PT_A e $PT_{A'}$, a curva experimental apresentou valores mais altos na maior parte dessa faixa de frequência. Em $PT_{A'}$ o isolamento foi próximo ao valor da curva medida, sendo 43 dB e 39 dB, respectivamente. Já entre os pontos $PT_{A'}$ e PT_B a estimativa teórica demonstrou pontos mais altos do que a curva medida, em PT_D o isolamento foi de 70 dB e para a mesma frequência o valor medido foi de 34 dB. A Lei da Massa também apresentou valores mais baixos até 500 Hz e, após essa frequência, o isolamento do som foi maior do que a curva medida.

Figura 126 - Gráfico comparação da curva de ensaios experimentais de paredes aquecidas a 120 °C com a curva teórica de estimativa de PT em painéis duplos sem material absorvente entre os painéis de fechamento.



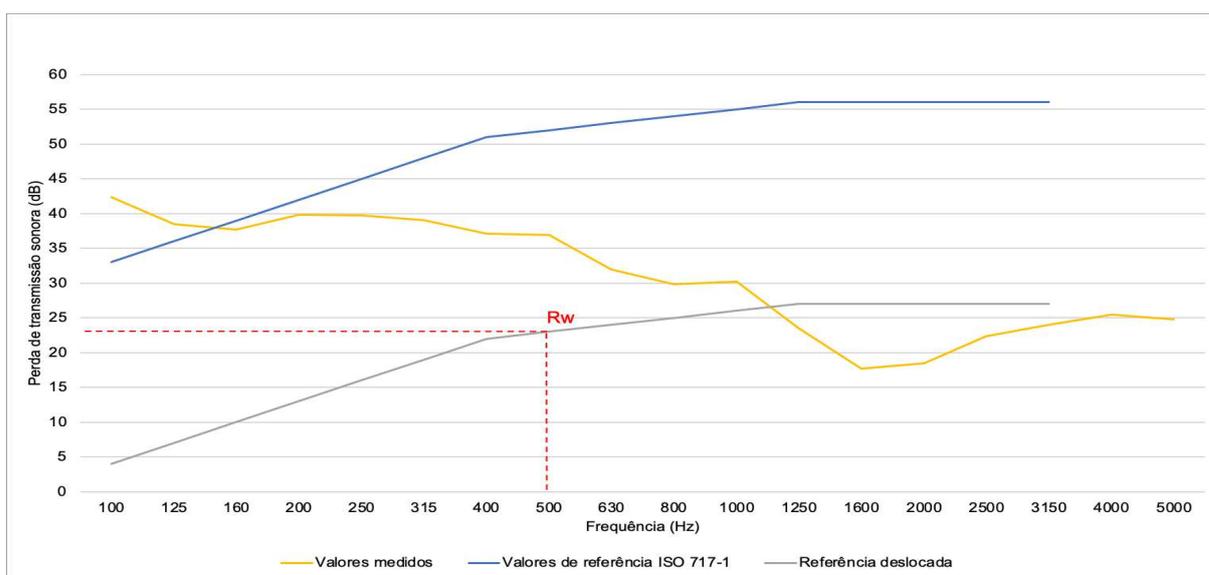
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.3.2 Determinação de R_w , C e C_{tr} e; STC

Para cada resultado da PT dos quatro modelos de parede, foram feitos gráficos correlacionando a curva de medição, a curva de referência fornecida pela ABNT NBR ISO 717-1:2021 ou STC ASTM E 413:2022 e; a curva de ajuste para determinar a

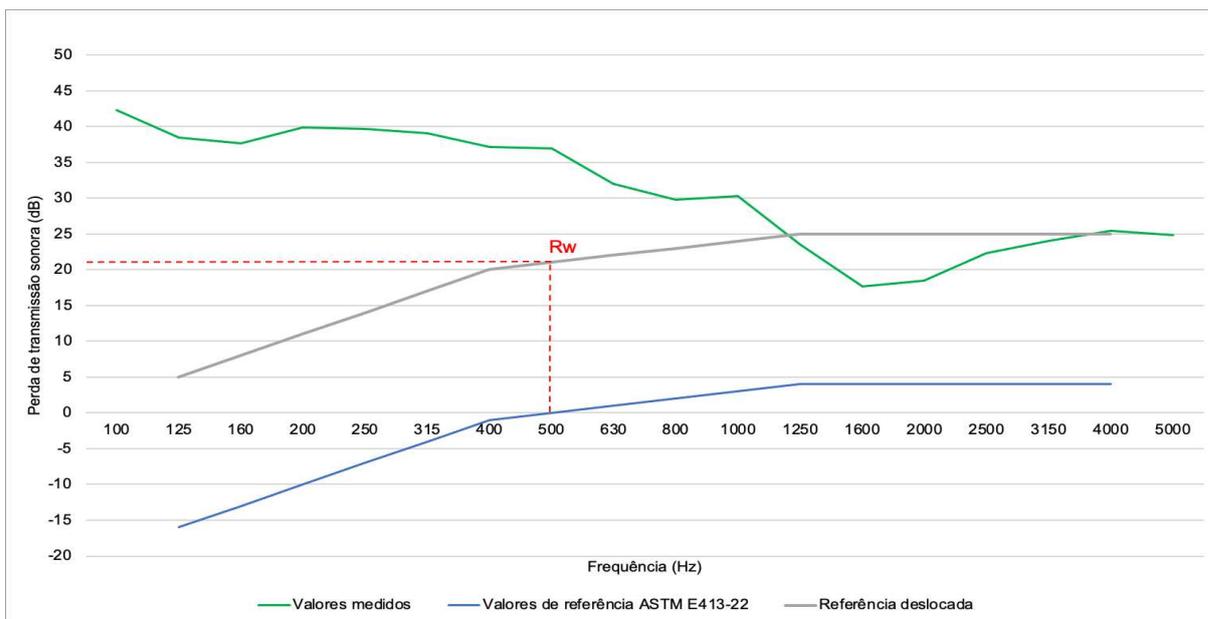
classificação de valor único (R_w) ou a Classe de Transmissão Sonora (STC), na frequência de 500Hz. O R_w da parede sem material absorvente foi de 23 dB (Figura 127) e apresentou um desempenho igual ao da parede com dois materiais absorventes e com placa de vermiculita, podendo ser utilizada apenas em fachadas de salas nas classes de ruído I e II (ABNT NBR 15575-4, 2021) e para o STC (Figura 128), o valor foi de 21 dB e foi classificada como vedação de isolamento precário (BISTAFA, 2018).

Figura 127 - Gráfico classificação de valor único - R_w - em parede aquecida a 120 °C sem material absorvedor.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

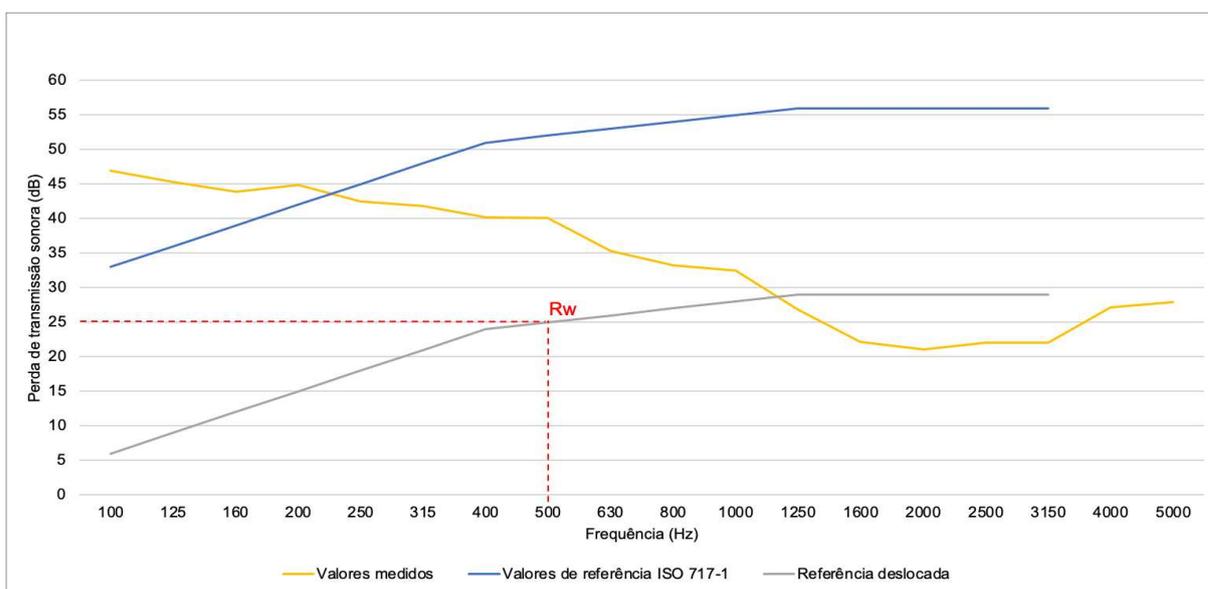
Figura 128 - Gráfico classe de transmissão sonora - STC - em parede aquecida a 120 °C sem material absorvedor.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

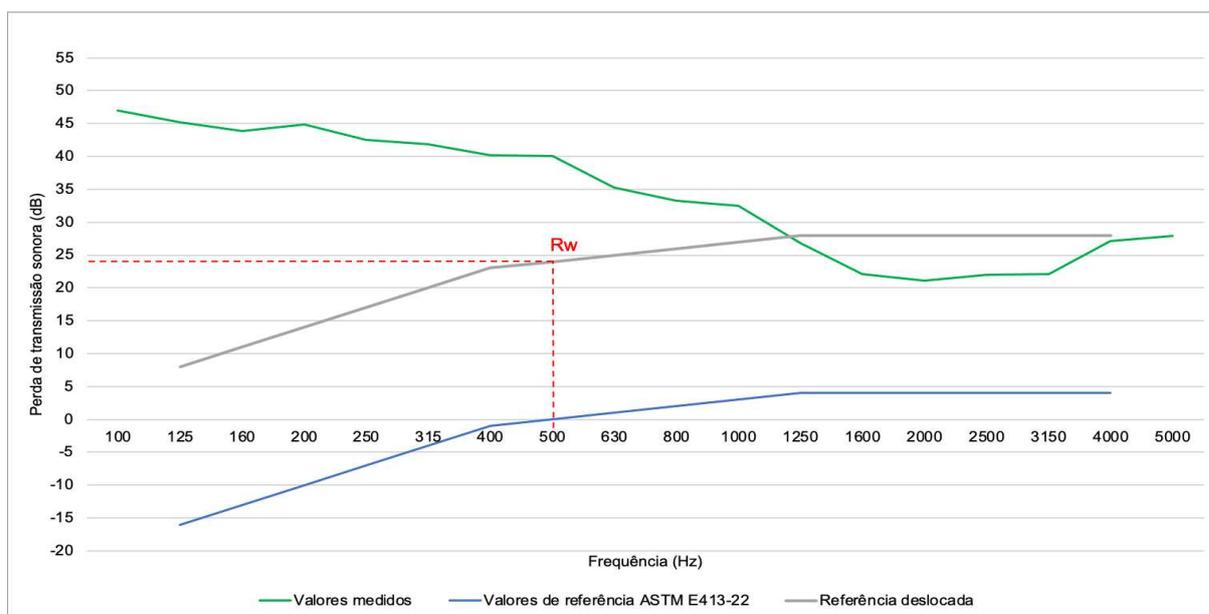
No ensaio realizado em parede com manta de lã de PET, o R_w foi de 25 dB (Figura 129), inferindo um possível emprego dessa parede em fachadas de dormitórios, para níveis de ruído de classe I e, para fachadas de salas, em níveis de ruído da classe I e II (ABNT NBR 15575-4, 2021). Para o STC (Figura 130), a classificação também foi precária, 24 dB, indicando que há facilidade na transmissão do som de uma voz normal (BISTAFA, 2018).

Figura 129 - Gráfico classificação de valor único - R_w - em parede aquecida a a 120 °C lã de PET.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

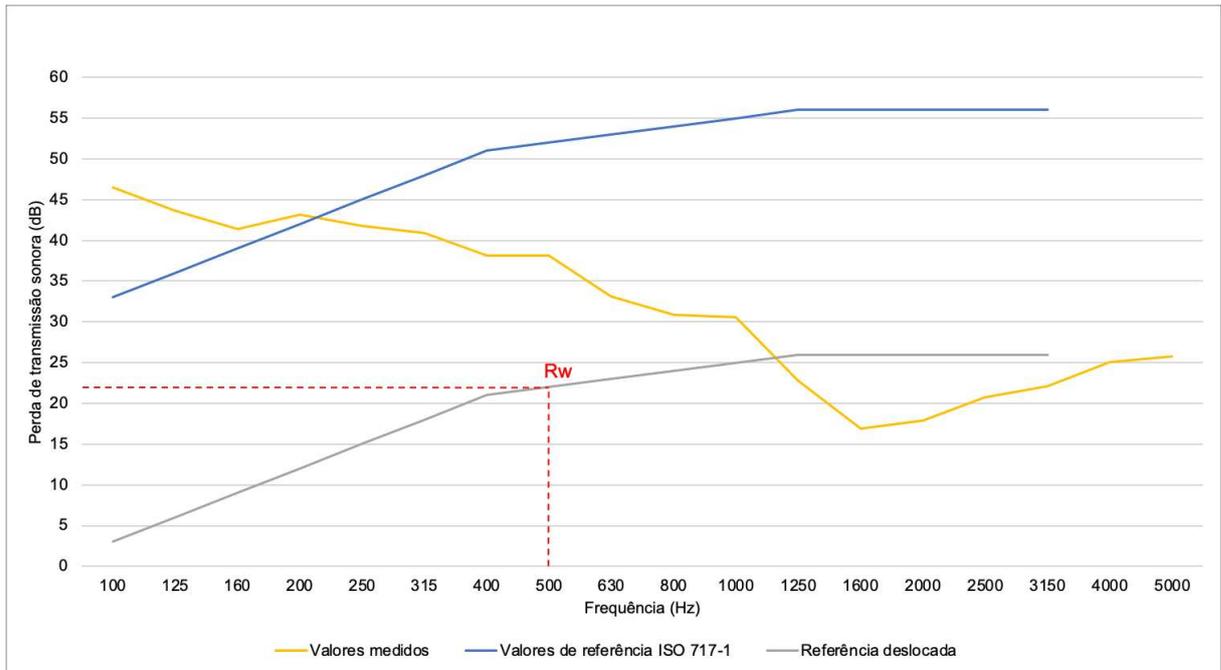
Figura 130 - Gráfico classe de transmissão sonora - STC - em parede aquecida a 120 °C com lã de PET.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

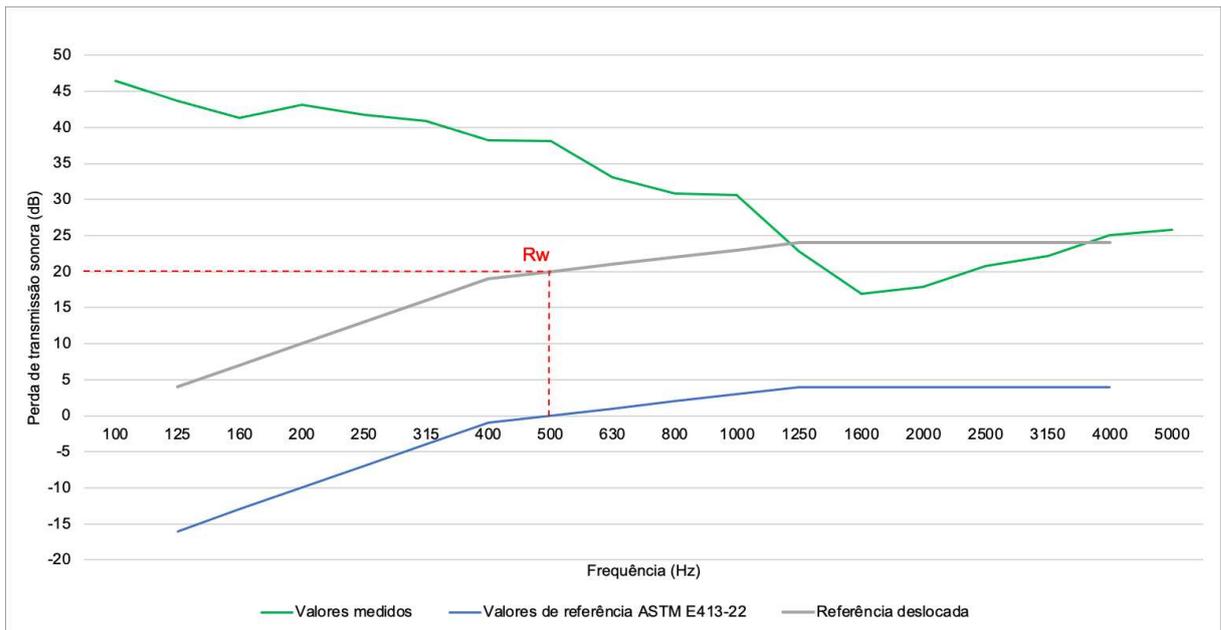
Os ensaios com aquecimento realizados na parede completa e com apenas placa de vermiculita apresentaram R_w de 22 dB e 23 dB, respectivamente, conforme mostram a Figura 131 e Figura 133. De acordo com a ABNT NBR 15575-4:2021, tais valores estão abaixo do nível de desempenho mínimo recomendado para vedações internas nas edificações, mas em fachadas de salas podem ser utilizadas nas classes de ruído I e II. Para os valores de STC, demonstrados nas Figura 132 e Figura 134, valores foram de 20 dB e 22 dB, respectivamente, indicando um tipo de vedação precário, no qual uma voz normal é facilmente inteligível (BISTAFA 2018).

Figura 131 - Gráfico classificação de valor único - R_w - em parede aquecida a 120 °C com placa de vermiculita e lã de PET.



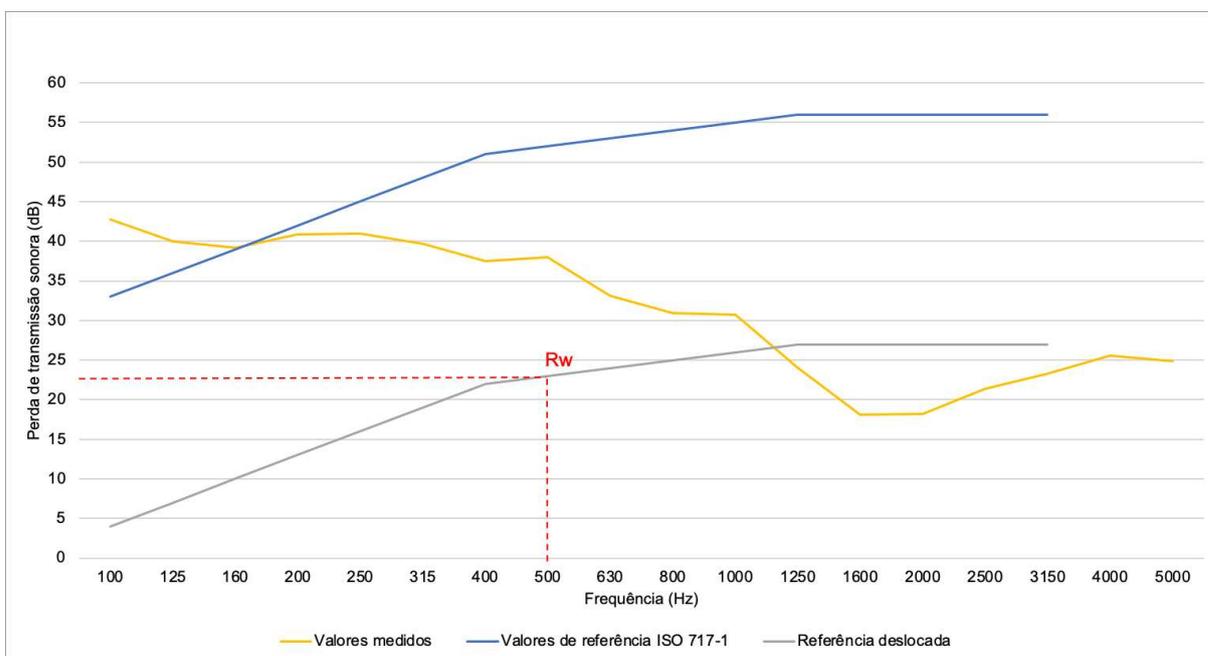
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 132 - Gráfico classe de transmissão sonora - STC - em parede aquecida a 120 °C com placa de vermiculita e lã de PET.



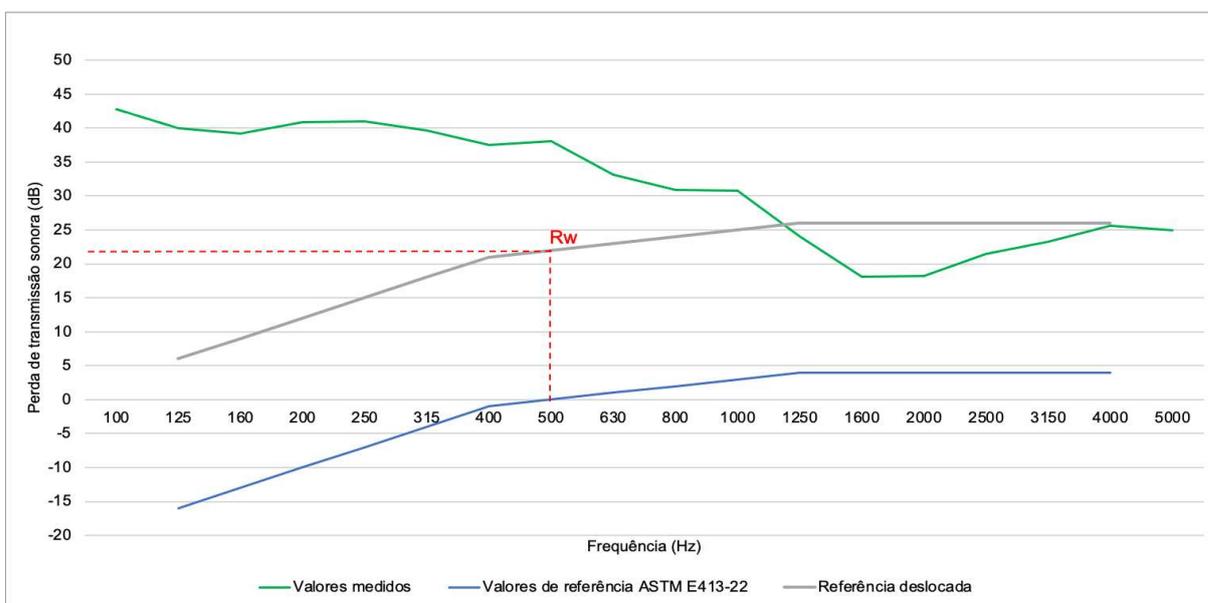
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 133 - Gráfico classificação de valor único - R_w - em parede aquecida a 120 °C com placa de vermiculita.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 134 - Gráfico classe de transmissão sonora - STC - em parede aquecida a 120 °C com placa de vermiculita.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

De acordo com a síntese da Tabela 34, todas as paredes aquecidas, exceto a parede com manta de lã de PET, apresentaram um valor de R_w suficiente apenas para serem utilizadas no isolamento de fachadas de salas, nas classes de ruído I e II. Já o ensaio

executado com manta de lã de PET, além das fachadas de salas, essa parede também pode ser utilizada em fachadas de dormitórios, em áreas com ruídos classificados com o nível I (ABNT NBR 15575-4, 2021). Para o STC, todas as paredes foram classificadas como isolamento precário, ou seja, de acordo com Bistafa (2018), uma voz normal pode ser entendida com clareza.

Em relação aos espectros de adaptação, todos os modelos de parede não apresentaram correção para sons de baixas e altas frequências, fator C . Enquanto para o espectro C_{tr} , ruídos de baixas e médias frequências, a parede com manta de lã de PET apresentou a correção no valor de +2 e, para todos os outros ensaios o fator de correção foi +1, demonstrando que as paredes aquecidas apresentaram melhor desempenho em sons de baixas e médias frequência do que para médias e altas.

Tabela 34 - Tabela síntese dos valores de R_w , espectro de adaptação C e C_{tr} e STC determinados após a realização dos ensaios de PT na parede aquecida a 120 °C de LSF.

Material interno absorvedor	R_w (dB)	Espectro de adaptação $C;C_{tr}$	STC (dB)
Sem material absorvedor	23	23 (0; +1)	21
Manta de lã de PET	25	25 (0; +2)	24
Placa de vermiculita	23	23 (0; +1)	22
Placa de vermiculita e manta de lã de PET	22	22 (0; +1)	20

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

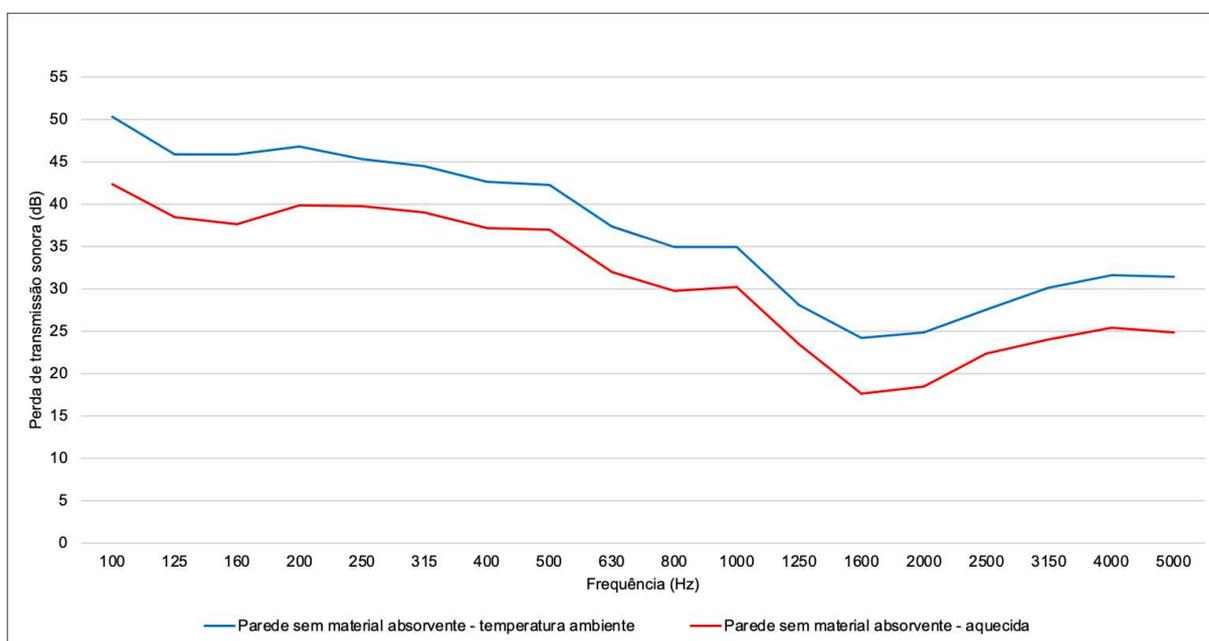
4.2.4 Comparação da Perda de Transmissão Sonora (PT); do R_w , de C e C_{tr} e; do STC entre os ensaios realizados na parede em temperatura ambiente e sob aquecimento

Para a mesma configuração de parede (sem material absorvente no interior do painel; somente com lã de PET; apenas com vermiculita ou; completa) foram feitos gráficos comparando o resultado de cada modelo de parede na temperatura ambiente e sob aquecimento. Além disso, uma tabela síntese como os valores de R_w , C e C_{tr} e STC,

também foi feita, comparando tais valores em ensaios realizados na parede em temperatura ambiente e com aquecimento.

Nos ensaios realizados na parede sem material absorvente (Figura 135), o isolamento sonoro foi maior em toda a faixa de frequência avaliada nos ensaios sem aquecimento. A diferença entre as curvas ficou entre 8 dB e 4 dB em toda a análise, sendo 8 dB em 160 Hz e 4 dB em 1250 Hz. Dessa forma, é possível inferir que houve uma diferença uniforme entre as curvas com e sem aquecimento em cada frequência. Além disso, os dois ensaios também obtiveram maior isolamento entre 100 Hz e 500 Hz e menor PT a partir de 630 Hz.

Figura 135 - Comparação entre os ensaios realizados em temperatura ambiente e sob aquecimento a 120 °C na parede sem material absorvente no interior do painel.

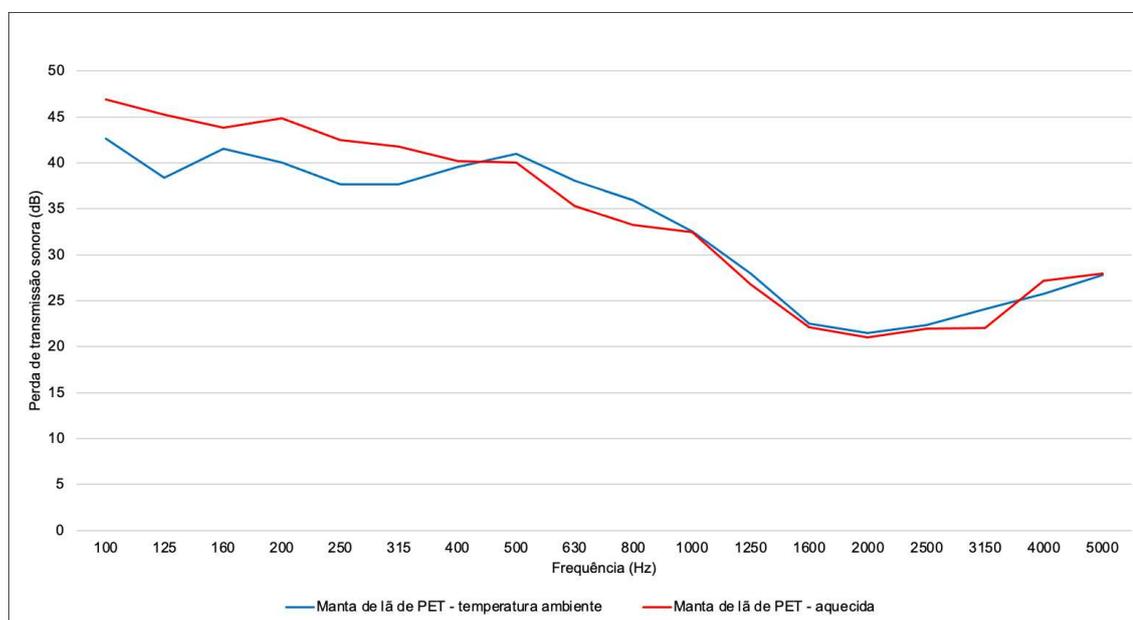


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Na comparação entre os ensaios com e sem aquecimento na parede com manta de lã de PET (Figura 136), a parede aquecida apresentou melhor desempenho entre as frequências de 100 Hz a 400 Hz e entre 4000 Hz a 5000 Hz, sendo a maior diferença foi de 6 dB e a menor diferença foi menos de 1 dB. A parede sem aquecimento apresentou maior isolamento entre 500 Hz e 3150 Hz, com diferenças entre 2 dB e menos de 1 dB. As duas curvas demonstraram pequena desigualdade em relação a

PT, indicando que a manta de lã de PET não alterou seu desempenho sob aquecimento.

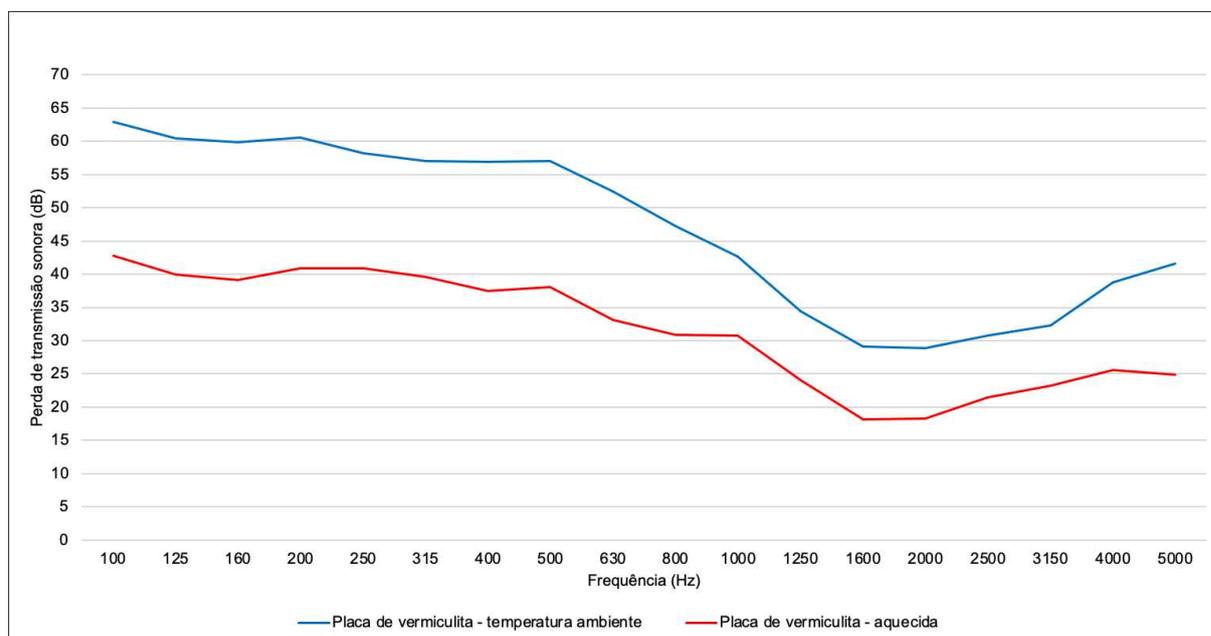
Figura 136 - Comparação entre os ensaios realizados em temperatura ambiente e sob aquecimento a 120 °C na parede com manta de lã de PET.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Nos ensaios na parede com placa de vermiculita também foi possível analisar que a PT foi maior na parede sem aquecimento na faixa de frequência analisada (Figura 137). Para essa configuração da parede, a desigualdade entre o isolamento sonoro foi maior entre 100 Hz e 800 Hz e em 5000 Hz, com valores de diferença entre eles de 20 dB a 16 dB. Já nas frequências entre 1000 Hz e 4000 Hz, a diferença ficou entre 9 dB e 13 dB. Entre 100 Hz e 500 Hz as duas curvas apresentaram isolamento maior do que nas frequências acima de 630 Hz.

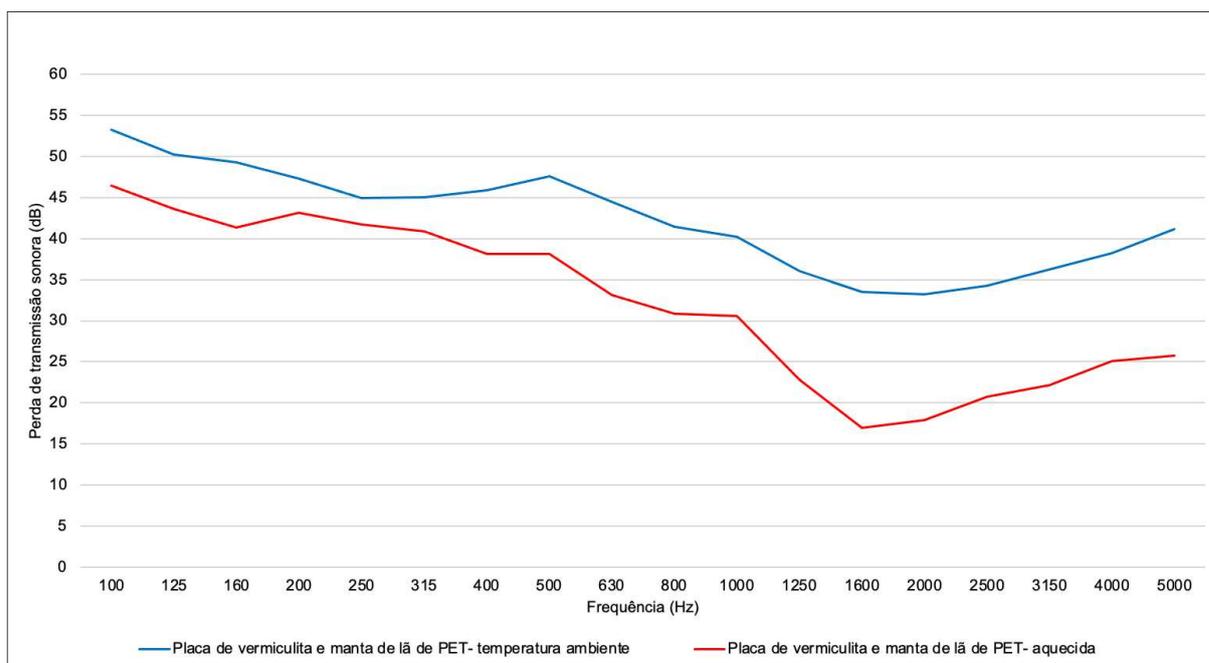
Figura 137 - Comparação entre os ensaios realizados em temperatura ambiente e sob aquecimento a 120 °C na parede com placa de vermiculita.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Na Figura 138, foi possível perceber que o ensaio realizado na parede com os dois materiais absorventes em temperatura ambiente apresentou maior isolamento em toda a faixa de frequência analisada do que o ensaio realizado após o aquecimento da parede. Nas frequências entre 100 Hz e 1000 Hz, a diferença foi entre 3 dB e 11 dB e, a partir de 1250 Hz a diferença entre o isolamento aumentou e ficou entre 13 dB e 16 dB. As curvas apresentaram quedas e ganhos de isolamento em frequências semelhantes, como em 500 Hz e em 1600 Hz. Ademais, as duas curvas demonstraram maior isolamento entre 100 Hz e 500 Hz do que em frequências a partir dessa faixa.

Figura 138 – Comparação entre os ensaios realizados em temperatura ambiente e sob aquecimento a 120 °C na parede com placa de vermiculita e manta de lã de PET.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Na Tabela 35, foi feita uma síntese comparando R_w , C e C_{tr} e STC dos ensaios com e sem aquecimento, para cada configuração de parede. Nas paredes aquecidas sem material absorvente o R_w obteve um decréscimo de 21%, o espectro de adaptação não apresentou diferença, e o STC diminuiu 25% em comparação ao ensaio sem aquecimento. No entanto, na parede aquecida com manta de lã de PET, o R_w e o STC apresentaram um decréscimo de apenas 4% e para C_{tr} houve um aumento de +1 no fator de correção. No ensaio com placa de vermiculita a queda no isolamento sonoro na parede aquecida foi de 30% para o R_w , para o C_{tr} houve uma queda de +1 no espectro da correção e, para o STC, a queda foi de 31%. Por fim, para R_w da parede completa, o isolamento sonoro apresentou uma queda de 41% após o aquecimento do painel, em relação ao espectro sonoro não houve alteração e o STC apresentou uma queda de 44% nos ensaios com aquecimento.

Assim, pôde-se observar que a parede com manta de lã de PET quando aquecida apresentou a menor alteração em seu isolamento sonoro em comparação ao ensaio realizado em temperatura ambiente, enquanto as outras três configurações de paredes, sob aquecimento, diminuíram consideravelmente o seu desempenho acústico, não só em relação ao R_w e STC, mas também em toda a faixa de frequência

analisada. Dessa forma, é possível concluir que as altas temperaturas pioraram o desempenho da PT da maior parte das configurações de paredes duplas, devido as alterações nas dinâmicas internas dos componentes da parede. Enquanto que para a parede com manta de lã de PET não houve alterações significativas no isolamento sonoro devido a temperatura dos ensaios, mostrando, dessa forma, maior estabilidade sobre temperaturas elevadas. Além disso, pôde-se perceber que a presença da placa de vermiculita contribuiu para uma maior queda na PT nos ensaios realizados sob aquecimento, em comparação às paredes que não utilizaram a placa de vermiculita.

Tabela 35 - Comparação síntese entre os resultados de R_w , C e C_{tr} e STC dos ensaios realizados em temperatura ambiente e sob aquecimento.

Material interno absorvedor	R_w (dB)		Espectro de adaptação $C; C_{tr}$		STC (dB)	
	Temperatura ambiente	Com aquecimento 120 °C	Temperatura ambiente	Com aquecimento 120 °C	Temperatura ambiente	Com aquecimento 120 °C
Sem material absorvedor	29	23	29 (0; +1)	23 (0; +1)	28	21
Manta de lã de PET	26	25	26 (0; +1)	25 (0; +2)	25	24
Placa de vermiculita	33	23	33 (0; +2)	23 (0; +1)	32	22
Placa de vermiculita e manta de lã de PET	37	22	37 (0; +1)	22 (0; +1)	36	20

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

V. ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS

Esta pesquisa avaliou de forma abrangente o comportamento do desempenho térmico e acústico do sistema de LSF utilizando a manta de lã de PET e a placa de vermiculita, materiais com capacidade de absorção sonora e isolamento térmico. Em forma de placa, a vermiculita expandida não foi encontrada sendo empregada no LSF na literatura analisada. E, também, não foram encontrados, os dois materiais investigados, utilizados em conjunto, na indústria da construção civil. Ademais, por meio do levantamento bibliográfico, foi possível inferir que o uso a manta de lã de PET no LSF, está em crescimento desde o início da última década, competindo com a lã de vidro e lã de rocha, materiais comumente empregados no LSF, contribuindo, dessa forma, com a economia sustentável e a reciclagem de materiais. Já as placas de vermiculita, são amplamente utilizadas em usinas, principalmente em alto forno; na sua forma solta, em flocos, é aplicada no interior de tijolos e lajes, devido ao seu bom desempenho térmico e acústico e também, em miolos de placas de gesso acartonado ou projetada para combate ao incêndio. No sistema LSF e *wood framing*, até o início da década de 1990, ela era utilizada, na sua forma solta, nas paredes e sótãos nos Estados Unidos como material térmico e acústico.

Ainda, pôde-se perceber, que os materiais capazes de colaborar com o desempenho térmico e acústico da edificação, como a lã de rocha, lã de PET, lã de vidro, vermiculita, etc., são conhecidos e vendidos como isolantes termoacústico. Apesar de contribuírem para o isolamento da parede de LSF, o mais adequado para a nomenclatura desses materiais seria, isolantes térmicos e absorventes acústicos, devido a suas características fibrosas e/ou porosas capazes de reter o ar e dificultar a passagem do calor, absorvendo o som.

Para a avaliação do desempenho térmico, a análise foi feita por meio de ensaios experimentais de transmissão de calor e cálculo simplificado para determinação de propriedades térmicas da parede de LSF, conforme a ABNT NBR 15220-2:2022 e; para avaliação do desempenho acústico foram realizados ensaios para a determinação do coeficiente de absorção e impedância acústica nos materiais

absorventes, ensaios de PT em paredes em temperatura ambiente e sob aquecimento, cálculo de estimativa de PT, em parede de LSF.

Na avaliação do desempenho térmico, por meio do ensaio experimental de transmissão de calor, pôde-se observar que o painel completo, com os dois materiais isolantes, obteve o melhor desempenho. O painel vazio, sem material isolante, demonstrou temperatura máxima maior do que os outros ensaios e rápido aquecimento e resfriamento. A parede com apenas placa de vermiculita apresentou a temperatura máxima maior do que a manta de lã de PET e seu aquecimento e resfriamento foram mais lentos do que o ensaio com a manta de lã de PET. O painel completo obteve a temperatura máxima atingida menor e o aquecimento e o resfriamento do sistema ocorreram de forma mais lenta do que nos outros ensaios. Além disso, os painéis ensaiados apresentaram um desempenho térmico semelhante às paredes de alvenaria de 15 cm e 22 cm de espessura. O cálculo simplificado, determinado pela ABNT NBR 15220-2:2005 e ABNT NBR 15220-2:2022, corroboraram os ensaios experimentais realizados. No painel vazio, os parâmetros analisados obtiveram o menor valor para capacidade térmica (C) e maior valor para transmitância térmica (U), entre os ensaios realizados. O painel completo e o painel com apenas manta de lã de PET, de acordo com a ABNT NBR 15575-4:2021, apresentaram melhor desempenho em relação aos valores de transmitância térmica (U). Isso se deve a menor condutividade térmica da lã de PET (λ) em relação a placa de vermiculita. Já, com relação a capacidade térmica (C), os ensaios com o painel completo e com o painel com placa de vermiculita tiveram os valores mais altos, devido a maior densidade de massa aparente (ρ) da placa de vermiculita. Os painéis de LSF atenderam os requisitos exigidos pela ABNT NBR 15575-4:2021, em relação a transmitância térmica (U). Os valores de capacidade térmica (C), de acordo com o cálculo simplificado, não corresponderam a norma de desempenho, nas Zonas Bioclimáticas de 1 a 7, em razão da leveza do sistema LSF. O conhecimento desses parâmetros auxiliou na análise do desempenho térmico do painel e servirá de comparação com resultados elaborados por uma simulação computacional. Ademais, o cálculo da capacidade térmica (C) em paredes de LSF, determinados por

modelagem numérica, atende todos os requisitos da norma de desempenho, conforme ensaios realizados por outros autores, já explicitados neste trabalho.

Na comparação entre as duas versões da norma, a ABNT NBR 15220-2:2005 e ABNT NBR 15220-2:2022, o cálculo simplificado atual em paredes de LSF mostrou-se viável apenas naquelas com materiais isolantes, pois a diferença entre os resultados foi menor que 10%. Enquanto que paredes vazias demonstraram valores discrepantes entre a norma de 2005 e a atual e apresentaram uma diferença maior que 25%. A comparação foi feita, visto que a norma atual não recomenda a utilização do cálculo simplificado nos casos em que há conexão entre os elementos por meio de materiais metálicos, devido a alta transmitância térmica (U) dos perfis de aço.

Na avaliação do desempenho acústico, nos ensaios realizados em tubos de impedância para a determinação do coeficiente de absorção sonora e impedância acústica, foi possível conhecer como ocorre a propagação do som nos materiais absorventes analisados. No ensaio realizado com a manta de lã de PET o coeficiente de absorção sonora foi menor do que a da placa de vermiculita, em toda a faixa de frequência analisada. Quando utilizadas em conjunto, o coeficiente de absorção sonora apresentou valores mais altos do que em ensaios realizados em cada material de forma isolada. Com a lã de PET posicionada de forma mais externa no tubo de impedância e a placa de vermiculita posicionada mais ao fundo, o coeficiente de absorção apresentou valores mais altos do que a posição invertida desses materiais nas frequências acima de 1000 Hz. Na posição invertida, lã de PET posicionada mais ao fundo do tubo de impedância e a placa de vermiculita na frente, o coeficiente de absorção sonora foi maior entre todos os ensaios realizados, nas frequências entre 500 Hz e 1000 Hz. Para a determinação da impedância acústica, o conjunto formado por placa de vermiculita na parte mais interna do tubo e a manta lã de PET na parte mais externa apresentou maior absorção sonora na maior parte da faixa de frequência analisada. No entanto, para o cálculo de NRC, o valor mais alto foi o do conjunto formado pela placa de vermiculita na posição externa e a PET na parte mais interna do tubo, demonstrando que valores únicos são úteis numa análise comparativa superficial entre materiais. A análise do coeficiente de absorção realizada em cada banda de frequência possibilita uma escolha mais específica para cada ambiente,

como em situações em que são exigidos materiais com maior absorção sonora em frequências mais baixas ou mais altas.

No ensaio de PT realizado na parede em LSF, em temperatura ambiente, o modelo que utilizou apenas placa de vermiculita apresentou o maior isolamento sonoro entre as frequências de 100 Hz e 1000 Hz, enquanto a parede completa, com dois materiais absorventes, demonstrou maior isolamento sonoro nas frequências entre 1000 Hz e 4000 Hz. Entre 4000 Hz e 5000 Hz, o isolamento sonoro foi o mesmo para esses dois modelos de parede. Já o ensaio realizado com apenas lã de PET apresentou isolamento sonoro maior apenas na frequência entre 630 Hz e 800 Hz, em relação a parede sem material absorvente. A parede com apenas manta de lã de PET obteve o desempenho mais baixo, em comparação a todos os modelos analisados. A curva de PT obtida por meio do cálculo teórico demonstrou valores mais baixos de isolamento sonoro entre 93 Hz e 250 Hz, em comparação com a curva experimental e, acima dessa faixa de frequência, os valores foram mais altos na curva teórica. Em relação aos valores únicos de R_w e STC, a parede com somente manta de lã de PET e o ensaio sem material absorvente apresentaram valores mais baixos, podendo ser empregadas em fachadas de dormitórios de classe I e em fachadas de salas de classes de ruído I e II; a parede com apenas placa de vermiculita obteve um valor único que permite seu uso em fachadas de salas para qualquer classe de ruído e para dormitórios em determinadas situações e; a parede com os dois materiais absorventes apresentou valores mais altos em relação às outras configurações, sendo possível a sua utilização em fachadas de qualquer classe de ruído de salas e dormitórios, e em determinadas vedações verticais internas, de acordo com a ABNT NBR 15575-4:2021. Para o espectro de correção C e C_{tr} , todas as paredes obtiveram uma correção positiva para frequências médias e baixas, indicando que quando expostas a esse tipo de frequência apresentam um melhor desempenho do que quando sujeitas a médias e altas frequências. Cabe ressaltar, que o vão feito na parede para acessar a câmara de reverberação, bem como o contato direto dos perfis do painel móvel com a estrutura de aço da parede, contribuíram para a redução de valores de PT. Isso se deve às pontes acústicas, ou seja, a transmissão sonora por meio do ruído estrutural foi potencializada devido ao maior contato entre os perfis metálicos na região do vão

da parede. Ademais, a impossibilidade de realizar a vedação completa da parede e aplicar acabamentos externos, também colaboraram para a menor PT da parede de LSF.

Para os ensaios de PT realizados em paredes de LSF sob aquecimento, a configuração da parede utilizando apenas manta de lã de PET apresentou o maior isolamento sonoro na maior parte da frequência verificada, em comparação a todas as outras configurações de parede. Entre as frequências de 100 Hz e 1000 Hz, a parede sem material absorvente apresentou a PT mais baixa e, acima de 1000 Hz, a parede completa obteve o menor isolamento sonoro. Em relação a curva de estimativa sonora, os valores de PT foram maiores do que as curvas medidas, exceto entre frequências de 93 Hz e 160 Hz, em que as curvas medidas apresentaram valores maiores do que a curva teórica. Para os valores únicos de R_w e STC, todas as paredes indicam possibilidade de uso apenas em fachadas de salas em classes de ruídos I e II, exceto a parede com manta de lã de PET, que além de fachadas de salas, pode ser usada em fachadas de dormitórios de classe de ruído tipo I, conforme recomendações da ABNT NBR 15575-4:2021. O fator de correção C e C_r também apresentaram valores de adaptação positiva para situações em que há frequências médias e baixas. Os ensaios de PT realizados sob aquecimento indicaram uma queda acentuada no isolamento, piorando o desempenho acústico da parede em comparação aos ensaios executados sob temperatura ambiente, com exceção da parede com manta de lã de PET, em que o isolamento sonoro foi maior em temperaturas elevadas, nas frequências entre 100 Hz e 400 Hz, em comparação ao ensaio realizado em temperatura ambiente. Dessa forma, pôde-se inferir que a manta de lã de PET apresentou estabilidade em seu isolamento sonoro nas temperaturas elevadas avaliadas, cerca de 120 °C e, a presença da placa de vermiculita na parede foi responsável pela maior queda na PT sob aquecimento, em comparação às paredes sem a presença do material.

Em relação ao desempenho térmico, o painel completo apresentou o melhor desempenho, de acordo com a ABNT NBR 15575-4:2021. A manta de lã de PET empregada de forma isolada obteve melhor desempenho para resistência térmica (R) e transmitância térmica (U) em relação a placa de vermiculita usada isoladamente, que em contrapartida apresentou melhor capacidade térmica (C) em relação ao ensaio

com manta de lã de PET. Já a parede completa de LSF demonstrou desempenho acústico satisfatório, o uso dos dois materiais em conjunto pode se complementar em cada tipo de situação. No ensaio de PT, a parede com apenas placa de vermiculita apresentou maior isolamento em frequências de até 500 Hz e, acima desse valor, a parede completa apresentou melhor desempenho. O uso isolado da manta de lã de PET, tanto no ensaio no tubo de impedância quanto no isolamento sonoro, apresentou desempenho menor em comparação aos outros ensaios realizados. Apenas no ensaio de PT com aquecimento, a manta de lã de PET obteve melhor comportamento em comparação às outras configurações.

Dessa maneira, pode-se concluir que o painel completo foi capaz de aquecer e resfriar o sistema de forma mais lenta, em comparação aos outros ensaios, podendo ser indicado, por exemplo, para ambientes com altas amplitude térmicas, permitindo então o atraso da onda de calor, assim como ocorreu no uso do painel com somente placas de vermiculita. Isso se deve a maior capacidade térmica (C) desse tipo de configuração. Já o painel sem material na cavidade interna, devido ao seu rápido resfriamento e maior transmitância térmica (U), pode ser indicado, por exemplo, em fachadas de climas constantemente quentes e úmidos, junto a estratégias de ventilação. Além disso, para ambientes nos quais há predominância de frequências entre 100 Hz e 1000 Hz, recomenda-se o uso de parede de LSF apenas com placa de vermiculita em seu interior e, para frequências superiores, é indicado o uso da parede com os dois materiais absorventes. No geral, pode-se dizer que o uso da placa de vermiculita pode complementar o desempenho térmico e acústico da lã de PET, contudo não foi observada relação direta entre as propriedades térmicas e acústicas de cada material. Por isso elas devem ser analisadas de forma isolada, diante do contexto que serão empregadas, como o clima e a classificação de ruído da região.

Finalmente, a utilização da placa de vermiculita em conjunto com a lã de PET ou seu uso de forma isolada apresentou desempenho acústico satisfatório e, para o desempenho térmico, o sistema proposto na pesquisa também se mostrou adequado e deverá ser avaliado de forma detalhada, a depender do clima. Para climas quentes e úmidos (Zona Bioclimática 8), por exemplo, o sistema proposto atendeu todos os

requisitos da norma de desempenho, de acordo com o cálculo simplificado. Portanto, o uso de placas de vermiculita deve ser incentivado no sistema LSF, assim como ocorre com a lã de rocha e a lã de vidro.

Além da avaliação do desempenho térmico e acústico, é importante uma análise dos custos dos materiais investigados nesta pesquisa, durante a concepção de um projeto. A placa de vermiculita da empresa CALDESUL apresenta em 2023 um custo de aproximadamente 389 reais por m^2 e para a manta de lã de PET da empresa TRISOFT, o valor é de 18 reais o m^2 . Enquanto que o preço médio da lã de vidro apresenta um valor de 13 reais o m^2 e o da lã de rocha o valor é de 25 reais o m^2 . O incentivo ao uso de diferentes materiais construtivos no sistema LSF pode contribuir com a diversificação de produtos no mercado e com a redução do preço da placa de vermiculita.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Hoje, uma das principais preocupações do setor da construção civil é a diminuição da exploração de recursos minerais e a redução de consumo energético após a conclusão da edificação. Para isso, são necessárias, por exemplo, pesquisas em materiais reciclados ou com baixo impacto ambiental e foco em estratégias para diminuir o uso de ar condicionado, ventiladores e aquecedores nas edificações. Tais medidas contribuem não só com um desenvolvimento de um ambiente mais sustentável, mas também com um espaço com maior desempenho térmico e acústico e com qualidade espacial.

Assim, esta pesquisa proporcionou um estudo a cerca do comportamento térmico e acústico do LSF, um sistema construtivo mais sustentável, devido a fatores como a reciclabilidade do aço, menor geração de resíduos e rapidez de construção, fator que pode contribuir com o desenvolvimento de habitações sociais, devido a urgente demanda do país por moradias. Os materiais investigados nesta pesquisa, além de apresentarem baixo impacto ambiental, são capazes de colaborar com o desempenho energético da edificação, pois se utilizados com estratégias de sombreamento e ventilação em projetos de arquitetura, a depender da região, o uso de ar-condicionado e/ou aquecedores pode ser diminuído ou até evitado, devido ao desempenho térmico desses materiais.

Ademais, deve-se levar em consideração que o desempenho térmico de um sistema construtivo é o resultado da interação de paredes, pisos, coberturas, dentre outros elementos que compõem o sistema, bem como o clima da região em que está inserida a edificação. E para o desempenho acústico de uma parede, devem ser levadas em conta as condições de ruído e frequência do em torno para uma melhor escolha de materiais absorventes.

Este estudo contribuiu para o avanço do conhecimento científico sobre o desempenho térmico e acústico em paredes de LSF, apresentando informações relevantes para profissionais da área de construção civil e pesquisadores científicos. O desempenho térmico e acústico dos materiais ensaiados deve ser analisado de forma isolada, pois

não foi percebida relação direta entre o desempenho térmico e acústico dos materiais investigados, ou seja, se um determinado material satisfaz os critérios estabelecidos para o desempenho acústico em uma região específica, é possível que esse mesmo material não seja adequado para atender o desempenho térmico no mesmo local.

Por fim, esta pesquisa demonstrou que a placa de vermiculita é promissora como material de absorção acústica e isolamento térmico para ser usada no interior de paredes de LSF, podendo ser utilizada ou não junto à manta de lã de PET, bem como empregada em outros sistemas construtivos ou ainda como componente de painéis acústicos absorvedores nas superfícies externas de paredes. O sistema proposto atendeu às recomendações mínimas determinadas pela ABNT NBR 15575-4:2021. Para isso, deve ser feita uma análise específica para cada ambiente, levando em consideração o clima e a classificação de ruído da região, para que haja atendimento às normas técnicas de desempenho. Desse modo, os resultados obtidos neste trabalho são capazes de contribuir com soluções construtivas mais eficientes e sustentáveis, colaborando com o aumento do número de edificações com menor impacto ambiental.

Sugestões de trabalhos futuros:

- Analisar o desempenho térmico e acústico em paredes de LSF com placas de vermiculita e manta de lã de PET, utilizando modelagem computacional;
- Avaliar o uso de placas de vermiculita junto à manta de lã de PET em outros sistemas construtivos;
- Avaliar de forma detalhada os custos do sistema;
- Investigar a PT em paredes de LSF em diferentes condições de temperatura, umidade e espaço.
- Simular paredes de LSF com placas de vermiculita e manta de lã de PET em situação de incêndio.
- Investigar a causa da perda de isolamento sonoro com o aquecimento da vermiculita.

REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, K. C. de F. J.; SOUZA, R. G. V. de. Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 21, n. 2, p. 383–408, 2021.
- AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Manual Da Construção Industrializada: Conceitos E Etapas - Estrutura e Vedação**. Brasília, V. 1, 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - ANM. **Sumário Mineral Brasileiro 2018 - vermiculita**. Brasília: ANM, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/vermiculita_sm_2018. Acesso em: 10 abr. 2022.
- AGENDA 2030. **Plataforma Agenda 2030**. 2020. Disponível em <http://www.agenda2030.com.br/>. Acesso em: 12 out. 2020.
- ALBRECHT, C. F. *et al.* International transdisciplinary approach to sustainability research related to place: sustainable, affordable homes and ecosystem services in the U.S. and Brazil. In: LEAL FILHO, W.; TORTATO, U.; FRANKENBERGER, F. (ed.). **Universities and sustainable communities: meeting the goals of the Agenda 2030**. Cham: Springer, 2020. World Sustainability Series.
- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION - AISC. **Thermal bridging solutions: minimizing structural steel's impact on building envelope energy transfer**. Structural Engineering Institute (SEI) /American Institute of Steel Construction (AISC). Chicago, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM E 413-22**. Classification for Rating Sound Insulation. 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM E 1050-19**. Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two Microphones and A Digital Frequency Analysis System. 2019.
- ANGELIS, E.; SERRA, E. Light Steel-frame Walls: Thermal Insulation Performances and Thermal Bridges. **Energy Procedia**. Oxford, v. 45, p. 362-371, 2014.
- APA - The Engineered Wood Association. **Qualified OSB facing materials for structural insulated panels (PR-N610)**. Tacoma, WA. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET – ABIPET. **Censo da reciclagem do PET no Brasil**, 2019. Disponível em:

<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>. Acesso em: 22 set. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO – ABIPLAST. **Estudo aponta que 23,1% dos resíduos plásticos pós-consumo foram reciclados em 2020 no Brasil**, 2021. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/noticias/estudo-aponta-que-231-dos-residuos-plasticos-pos-consumo-foram-reciclados-em-2020-no-brasil/>. Acesso em: 17 jan. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 717-1**: Classificação de isolamento acústico em edificações e elementos de edificações - Parte 1: Isolamento a ruído aéreo. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 3382-2**: Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas - Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15220-2**: Desempenho Térmico de Edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15220-3**: Desempenho Térmico de Edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15220-2**: Desempenho Térmico de Edificações. Parte 2: Componentes e elementos construtivos - Resistência, transmitância térmica - Métodos de cálculo. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15253**: Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis estruturais reticulados em edificações — Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15575-4**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16970**: Light Steel Framing. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA - PROACÚSTICA. **Manual ProAcústica de Acústica Básica**. São Paulo, 2019.

BABISCH, W. The noise/stress concept, risk assessment and research needs. **Noise & Health**, v. 4(16), p. 1–11, 2002.

BAJAD, M. Superstructures development with frame of light steel by fusion techniques. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 7, 2022.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E.; **Como fazer experimentos : pesquisa e desenvolvimento na ciencia e na industria**. São Paulo: Bookman, 2001.

BEN – **Balanco Energético Nacional, 2022**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 9 jul. 2023.

BIES, D.A.; HANSEN, C.H. **Engineering Noise Control: Theory and Practice**. 4a edição. CRC Press, 2009.

BISTAFA, S. R. **Acústica Aplicada ao Controle de Ruído**. 3a edição. São Paulo: Edgar Blücher, 2018.

BORTOLI, K. C. R. de; VILLA, S. B. Adequação ambiental como atributo facilitador da resiliência no ambiente construído em Habitações de Interesse Social. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 1, p. 391-422, jan./mar. 2020a.

BORTOLI, K. C. R. de; VILLA, S. B. Conforto ambiental como atributo para a resiliência em habitações de interesse social brasileiras. **Revista Projetar - Projeto e Percepção do Ambiente**, [S. l.], v. 5, n. 3, p. 126–140, 2020b.

BOTTELDOOREN, D.; DEKONINCK, L.; GILLIS, D. The influence of traffic noise on appreciation of the living quality of a neighborhood. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 777–798, 2011.

BRASILIT. **Guia de sistemas: produtos planos. Placas cimentícias, painéis e acessórios para construção industrializada**. Grupo Saint-Gobain. 2023.

BRITO-PEÑA, R.; VILLA-ENDERICA, D.; ZALAMEA-LEÓN, E. Comparative analysis of thermal comfort of a single-family house in LSF and brick masonry. **Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología**, n. 28, pp. 100-124.

BUZATU, R.; MUNTEAN, D.; CIUTINA, A.; UNGUREANU, V. Thermal Performance and Energy Efficiency of Lightweight Steel Buildings: a Case-Study. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. Praga. 2020.

CALDAS, L.; SPOSTO, R.; LOPES, A.; TAVARES, W. Avaliação do ciclo de vida energético (ACVE) e do desempenho térmico de uma habitação de light steel framing com o uso de diferentes tipos de isolantes térmicos. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 11, n. 2, p. 1-14, 2016.

CALDESUL. **Placas de vermiculita**, 2022. Disponível em: <https://loja.caldesul.com.br/produtos/placas-de-vermiculita/>. Acesso em: 10 abr. 2022.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO - CBIC. **Desempenho De Edificações Habitacionais: Guia Orientativo Para Atendimento à Norma ABNT NBR 15575/2013**. (Gadioli Cipolla Comunicação, Ed.) (2nd ed.). Fortaleza, 2013.

CARBAJO, J.; ESQUERDO-LLORET, T. V.; RAMIS, J.; NADAL-GISBERT, A. V.; DENIA, F. D. Acoustic properties of porous concrete made from arlite and vermiculite lightweight aggregates. **Materiales de Construcción**, [S. l.], v. 65, n. 320, p. e072, 2015.

CARRASCO, E. V. M. Pré-Casa - Casas de Madeira; Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola da Engenharia da UFMG. **Relatório da consultoria: Ensaio de Transferência de calor das Paredes de madeira do Sistema PRECASA**. Belo Horizonte, 2005.

CATAI, R. E.; PENTEADO, A.P.; DALBELLO, P. F. Materiais, técnicas e processos para isolamento acústico. *In*: 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu, 2006.

COHEN, S. C. *et al.* Habitação saudável e biossegurança: estratégias de análise dos fatores de risco em ambientes construídos. **Saúde em Debate**, v. 43, n. 123, p. 1194–1204, out. 2019.

CONSUL STEEL. **Construcción Con Acero Liviano: manual de procedimiento**. Buenos Aires: Consul Steel, 2015. Disponível em: <http://consulsteel.com/wp-content/themes/csteel-def/images/paneles/manual/Paneles-pdf.zip>. Acesso em: 12 jul. 2021.

COX, T. J., D'ANTONIO, P. **Acoustic Absorbers and Diffusers, theory, design and application**. 3a edição, Oxônia e Nova Iorque: Taylor & Francis. Boca Raton, 2017.

CRASTO, R. C. M.; FREITAS, A. M. S.; SANTIAGO, A. K. **Steel Framing: Arquitetura**. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia - Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), 2012. 151p.

DEL REY, R.; ALBA, J.; RAMIS, J.; SANCHÍS, V. J. Nuevos materiales absorbentes acústicos obtenidos a partir de restos de botellas de plástico. **Materiales de Construcción**. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Madrid, v. 61, p. 547-558, 2011.

DIAS, C. O.; MAZZURANA, M. M.; PIOVESAN, T. R. Lã de pet como material alternativo em prol do desempenho térmico de edificações. *In*: 2017: Salão do Conhecimento UNIJUÍ. **Anais [...]**. Ijuí, 2017.

DUARTE, D.R.; DALTRO, A.T. Light Steel Framing Social Housing as a Sustainable Construction Proposal. *In*: 2017: Proceedings of the 1st International Congress on Engineering and Sustainability in the XXI Century. Springer, Cham, 2018.

EIRA, A. **Lã de PET substitui com eficiência Lã de Rocha e de Vidro em isolamento térmico e conforto acústico**, 2015. Disponível em: <http://www.trisoft.com.br/blog/la-de-pet-substitui-la-de-rocha-vidro-isolamento-termicoacustico/>. Acesso em: 10 out. 2020.

FERREIRA, C.; SOUZA, H. A. D.; ASSIS, E. S. D. Estudo do clima brasileiro: reflexão sobre a adaptação climática e recomendações arquitetônicas e construtivas para edificações residenciais. *In*: XV Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. ENTAC. **Anais** [...]. Maceió, 2014.

FORTES, R. C. **Modelo computacional com interface gráfica para análise de perda na transmissão sonora em painéis de fechamento simples e duplos**. Dissertação (Mestrado em Construção Metálica) - Programa de Pós- Graduação em Construção Metálica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F.A.; COUTO, H. J. B; GONÇALVES, C. C. Vermiculita, mais que um mineral termo acústico. *In*: V Simpósio De Minerais Industriais Do Nordeste. **Anais** [...]. João Pessoa, 2016,

FRANZEN, F. P. **Análise do desempenho térmico e acústico de vedações verticais externas executadas em light steel framing**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

GANDRA, A. **Produção de aço bruto chega a 34,7 milhões de toneladas em 2018**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2019-01/producao-de-aco-bruto-chega-347-milhoes-de-toneladas-em-2018>. Acesso em: 20 out. 2019.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. 2. ed. Florianópolis, 2000.

GLOBAL MINÉRIOS. **Vermifloc Acústico**. Joinville, 2022. Disponível em: <https://www.globalminerio.com.br/vermiculita-vermifloc>. Acesso em: 30 abr. 2022.

GOMES, A. P. **Método de avaliação do desempenho térmico de edifícios comerciais e residenciais em Light Steel Framing**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

GOMES, A. P., SOUZA, H.A., TRIBESS, A. Impact of thermal bridging on the performance of buildings using Light Steel Framing in Brazil. **Applied Thermal Engineering**. Oxford, v. 52, p.84-89, 2013.

GOMES, C.V.S. **Comportamento acústico de materiais absorvedores em multicamadas**. 2015. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K (Organizadores). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Informações sobre a economia mineral brasileira – 2020 – Ano base 2019**. 1 ed. Brasília: IBRAM, 2020.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S/A - IPT. Sistema Construtivo a seco Saint-Gobain - Light Steel Frame. **DATEC Nº 014**. São Paulo. IPT, 2015.

INSTITUTO NACIONAL DO CÂNCER JOSÉ DE ALENCAR GOMES DA SILVA. Coordenação Geral de Ações Estratégicas. Coordenação de Prevenção e Vigilância do Câncer Relacionado ao Trabalho e ao Ambiente. **Diretrizes para a vigilância do câncer relacionado ao trabalho**. Rio de Janeiro: INCA, 2012. Disponível em: http://www1.INCA.gov.br/INCA/Arquivos/diretrizes_cancer_ocupa.pdf. Acesso em: 29 abr. 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 10140:2** Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 2: Measurement of airborne sound insulation. Geneva, Switzerland, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 10140:4** Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 4: Measurement procedures and requirements. Geneva, Switzerland, 2021.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Gesso de Construção Civil. *In*: Geraldo C Isaia. (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 727-760, 2017.

KLIPPEL FILHO, S. LABRES, H. S.; PACHECO, F.; CHRIST, R.; PIRES, J. R.; HEISLER, R. F.; OLIVEIRA, M. F. Uso da lã de PET para a absorção sonora e o isolamento acústico. **Acústica e Vibrações**, UFSM, Santa Maria, n. 49, p. 59–69, dez. 2017.

LI, X.; YU, K.; ZHAO, R.; Han, J.; SONG, H. Sound transmission loss of composite and sandwich panels in thermal environment. **Composites Part B: Engineering**, v. 133, p. 1–14, 2018.

LIPTAI, P.; BADIDA, M.; LUKÁČOVÁ, K. Influence of Atmospheric Conditions on Sound Propagation - Mathematical Modeling. **Óbuda University e-Bulletin**, v. 5, n. 1, p. 127-134, 2015

LP BRASIL. **Catálogo Técnico: Placa OSB com Certificação APA**. LP Brasil. 2023.

MAGALHÃES, M. D. C. **Fundamentos de Acústica Estrutural**. Editora All Print, São Paulo, 2013.

MALTA, G. S; ARCIPESTE, C. M; AGUIAR, T. F. R. Habitação de interesse social e light steel framing no Brasil. **CADERNOS DE ARQUITETURA E URBANISMO (PUCMG)**, v. 28, p. 241-279, 2022.

MASINI, H. F., TEODORO, E. B. **Medição automática do coeficiente de absorção acústica de materiais**. Horizonte Científico. Uberlândia, v. 5, n. 2, 2011.

MATURANA, H. **Cognição, ciência e vida cotidiana**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2001.

MILOVANOVIĆ, B. *et al.* Case Study in Modular Lightweight Steel Frame Construction: Thermal Bridges and Energy Performance Assessment. **Applied Sciences**, v. 12, n. 20, p. 10551, 19 out. 2022.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço zincado conformados a frio, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo "Light Steel Framing"). **Diretrizes para Avaliação Técnica de Produtos. DIRETRIZ SINAT nº 003 - Revisão 2**. Brasília, mai. 2016.

MOURA, M. C. S. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos poli(tereftalato de etileno) reciclado (PET reciclado) com flocos de vidro**. 2011. 140 f. Tese (Doutorado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos; Processamento de Materiais a part.) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

NAMUR, R. B.; SATO, L.; PETRECHE, J. R. D.; LEITE, B. C. C. Avaliação de horas de conforto em residência unifamiliar localizada em são paulo, considerando diferentes sistemas construtivos. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2019. **Anais [...]**. [S. l.], 2019.

OLIVEIRA, E. C.; TEODORO; E. B. Método para medição do coeficiente de absorção sonora. In: 15º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU. **Anais [...]**. Uberlândia, 2005.

OLIVIERI, H. *et al.* A utilização de novos sistemas construtivos para a redução no uso de insumos nos canteiros de obras: Light Steel Framing. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v.17, n. 4, p. 45-60, out./dez. 2017.

PAUL, S; RADAVELLI, G. F.; SILVA, A. R. Experimental evaluation of sound insulation of light steel frame façades that use horizontal inter-stud stiffeners and different lining materials. **Building and Environment**, v. 94(2), p. 829-839, 2015.

PLACO. **Guia de produtos: por dentro do universo das soluções PLACO**. Grupo Saint-Gobain. 2023.

PROJETANDO EDIFICAÇÕES ENERGETICAMENTE EFICIENTES. PROJETEEE. **Componentes construtivos**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/componentes-construtivos/>. Acesso em: 15 jul. 2023.

RABELLO L. G.; RIBEIRO, R. C. C. A novel vermiculite/ vegetable polyurethane resin-composite for thermal insulation eco-brick production. **Composites Part B: Engineering**. v. 221, 2021.

RADAVELLI, G. F. **Avaliação experimental da perda de transmissão sonora em paredes externas de Light Steel Frame**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal De Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2014.

RADAVELLI, G. F; PAUL, S.; BARBOSA, A. Banda acústica fixada em guias e montantes promove aumento do isolamento sonoro em parede de light steel frame. **Revista Conversas Interdisciplinares**. Torres, v. 14, n.1, 2018.

RASHAD, A. M. Vermiculite as a construction material – a short guide for Civil Engineer. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 53–62, 2016.

REFAHATI, N. *et al.* Sound transmission loss of double-walled sandwich cross-ply layered magneto-electro-elastic plates under thermal environment. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, 2022.

REIS, E. **Vermiculita no Brasil – Situação Atual**. Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) / Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), p. 1-19, 2002.

RIBAS, R. A. J. **Metódo para avaliação do desempenho térmico e acústico de edificações aplicado em painéis de fechamento industrializado**. 2013. 222 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

RIBAS, R. A. J.; SOUZA, H. A. Acoustical and thermal performance of multilayer closing panels used in steel-structured buildings. **REM - International Engineering Journal**, v. 70, p. 149-156, 2017.

RODRIGUES, F.C.; CALDAS, R.B. **Steel Framing: Engenharia**. 2.ed. revisada. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia - Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), 2016. 224p.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. DE. Poli (Tereftalato de Etileno), PET: Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 2, p. 121-132, 2009.

ROQUE, E. *et al.* The Impact of Thermal Inertia on the Indoor Thermal Environment of Light Steel Framing Constructions. **Energies**, v. 15, n. 9, p. 3061, 22 abr. 2022

ROQUE, E.; SANTOS, P.; PEREIRA, A. Thermal and Sound Insulation of Lightweight Steel Framed Façade Walls. **Science and technology for the Built Environment**. Georgia, v.25, n. 2, p. 156-176, 2019.

ROQUE, E.; VICENTE, R.; ALMEIDA, R. M. S. F. Indoor Thermal Environment Challenges of Light Steel Framing in the Southern European Context. **Energies**, v. 14, n. 21, p. 7025, 27 out. 2021a.

ROQUE, E.; VICENTE, R.; ALMEIDA, R. M. S. F. Opportunities of Light Steel Framing towards thermal comfort in southern European climates: Long-term monitoring and comparison with the heavyweight construction, **Building and Environment**, v. 200, 2021b.

ROSA, N. C. F. **Study of Structural and thermal performance of light weight steel framing (LSF) modular construction**. Tese (PhD thesis in Steel and Composite Construction) - Faculty of Sciences and Technology University of Coimbra, Coimbra, 2018.

SALVO, R. V. MAIRINK, M. T. F. OLIVEIRA, E. C. TEODORO, E. B. Construção de um tubo de impedância. In: 15o POSMEC – Simpósio do Programa de PósGraduação em Engenharia Mecânica da UFU. **Anais [...]**. Uberlândia 2005.

SANTOS, J.; SÁ, M.; PEREIRA, C. **ETICS (External Thermal Insulation Composite Systems)**. Disponível em: <http://www.futureng.pt/etics>. Acesso em: 16 set. 2019.

SANTOS, P. Energy Efficiency of Lightweight Steel-Framed Buildings, **Energy Efficient Buildings**, London, 2017.

SANTOS, P.; MARTINS, C.; SILVA, L. S. Thermal performance of lightweight steel-framed construction systems. **Metallurgical Research & Technology**. Cambridge University Press, Cambridge, v. 111, n. 6, p. 329-338, set. 2014.

SHMURADKO, V.T.; PANTELEENKO, F.I.; REUT, O.P. *et al.* Composition, structure, and property formation of heat insulation fire- and heat-reflecting materials based on vermiculite for industrial power generation. **Refractories and Industrial Ceramics**. v. 53, n. 4, p. 254–258, 2012.

SILVA, A. C.; SILVA, E. M. S.; VAZ, J.; SILVA, T. M. TESTES DE SEDIMENTAÇÃO COM FINOS DE VERMICULITA. **HOLOS**, [S. l.], v. 5, p. 44–51, 2015.

SOUZA, H. A. de; AMPARO, L. R.; GOMES, A. P. Influência da inércia térmica do solo e da ventilação natural no desempenho térmico: um estudo de caso de um projeto residencial em light steel framing. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 11, n. 4, p. 113–128, 2011.

SPEAR, T. M., *et al.* The presence of asbestos-contaminated vermiculite attic insulation or other asbestos-containing materials in homes and the potential for living space contamination. **Journal of Environmental Health**, v. 75, n. 3, p. 24-29, 2012.

SULMÓDULOS. **Conheça os tipos de lãs mais eficientes para isolamento acústico em construções**. *Sulmódulos*. Porto Alegre. Disponível em: <https://www.sulmodulos.com.br/conheca-tipos-las-eficientes-isolamento-acustico-construcoes/>. Acesso em: 24 fev. 2021.

SURIANO, M.; SOUZA, L.; SILVA, A. Ferramenta de apoio à decisão para o controle da poluição sonora urbana. **Ciência & Saúde Coletiva**, [S. l.], v. 20, n. 7, p. 2201–2210, 2015.

TANG, Y.; XIN, F.; LU, T.J. Sound absorption of micro-perforated sandwich panel with honeycomb-corrugation hybrid core at high temperatures. **Composite Structures**, v. 226, 2019.

TAWFIK, M.; TONNELIER, X.; SANSOM, C. Light source selection for a solar simulator for thermal applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 802–813, 2018.

THANH, P. N.; THINH, T. I.; HIEN, T. T. Effect of temperature on sound transmission loss of laminated composite plate. **Vietnam Journal of Mechanics**, Hanoi, Vietnam, v. 44, n. 4, p. 405–417, 2022.

TILIOUA, A.; LIBESSART, L.; JOULIN, A.; LASSUE, S.; MONOD, B.; JEANDEL, G.; Determination of physical properties of fibrous thermal insulation. **EPJ Web of Conferences**. Paris, v.33, 2012.

TORRES FILHO, R. J. A. **Análise térmica de estruturas de aço utilizadas no sistema light steel framing**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

TRISOFT. **Catálogo Lã de Pet Isosoft: Isolamento termoacústico**. Itapevi, 2020.

UGARTE, J. F. O, SAMPAIO, J. A, FRANÇA, S. C. A. Vermiculita. In: LUZ, A. B., LINS, F. F. (Org.) **Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações**. 2. Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 677-698, 2008.

WAY, A. G. J.; COUCHMAN, G. H. **Acoustic Detailing for Steel Construction**. Ascot: The Steel Construction Institute - SCI publication, 2008.

WAY, A. G. J.; LAWSON, R. M.; SANSOM, M. R. **Thermal Bridging in Steel Construction**. Ascot: The Steel Construction Institute - SCI publication, 2016.

WORLD HEALTH ORGANIZATION; BROWN, **Lex. Environmental Noise Guidelines for the European Region**. World Health Organization. Copenhagen, 2018.

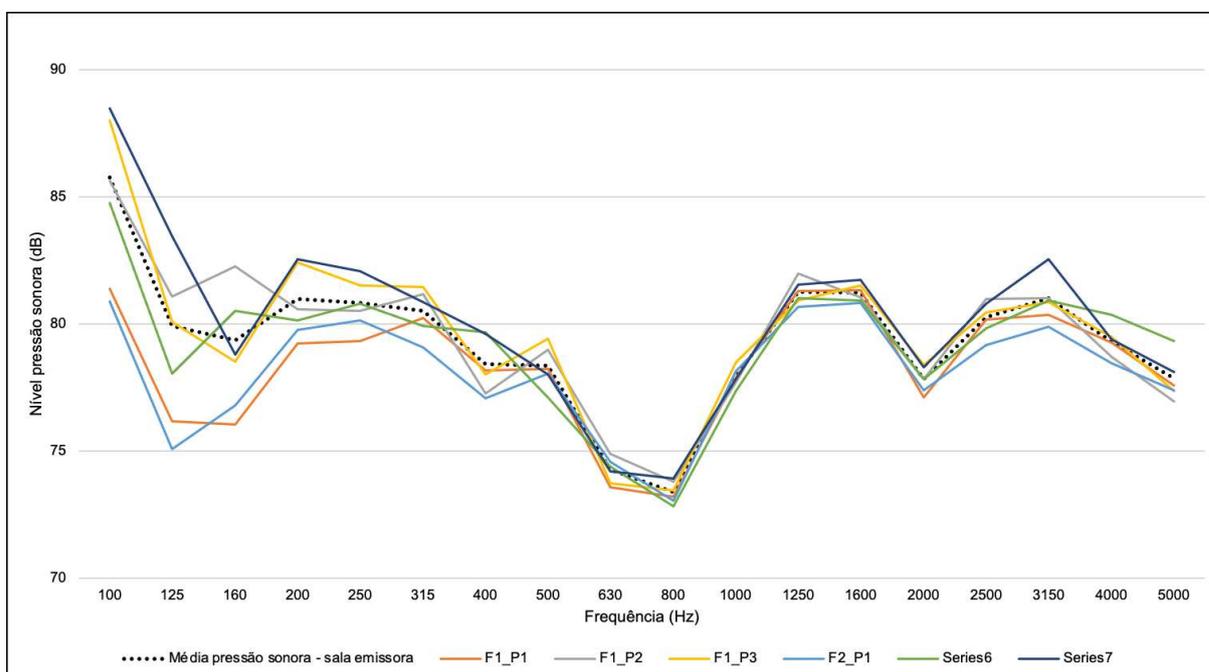
YANG, Z. *et al.* Thermal Performance of Slotted Light Steel-Framed Composite Wall. **Energies**, v. 16, n. 5, p. 2482, 5 mar. 2023.

ZENERATO, T. S. *et al.* Análise Acústica de Fachadas de Light Steel Frame e Placas Cimentícias. **Matéria**. Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, 2019.

APÊNDICE A – GRÁFICOS DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORA VERSUS FREQUÊNCIA EM ENSAIOS EM TEMPERATURA AMBIENTE

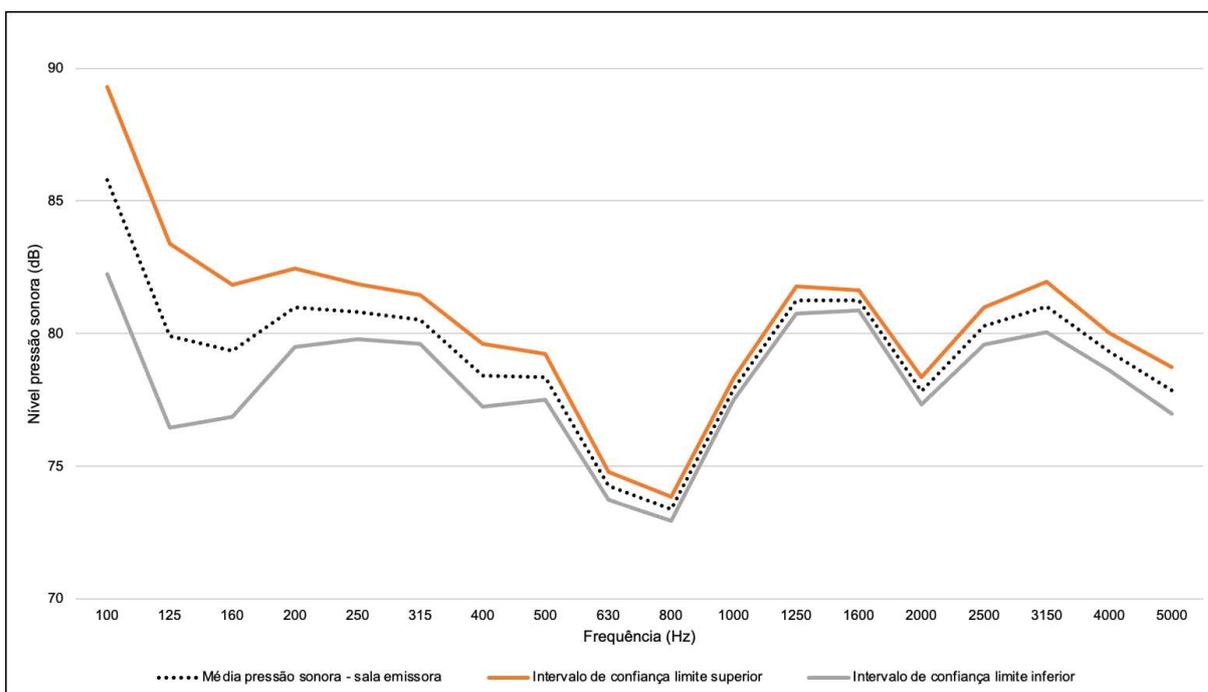
Os gráficos de nível de pressão sonora *versus* a frequência para as salas emissora e receptora dos seis ensaios realizados em cada modelo de parede e sua respectiva média, obtidos por meio de ensaio de PT em temperatura ambiente, foram dispostos neste apêndice. As expressões *F1* e *F2* representaram as posições da fonte sonora e, *P1*, *P2* e *P3*, as disposições dos microfones. Também, foram demonstrados nesta Seção, gráficos das curvas da média da pressão sonora junto ao seu intervalo de confiança de 95% (limite inferior e superior) *versus* a frequência.

Figura 1 - Gráfico média da pressão sonora (sala emissora - L1): ensaios em parede sem material absorvedor.



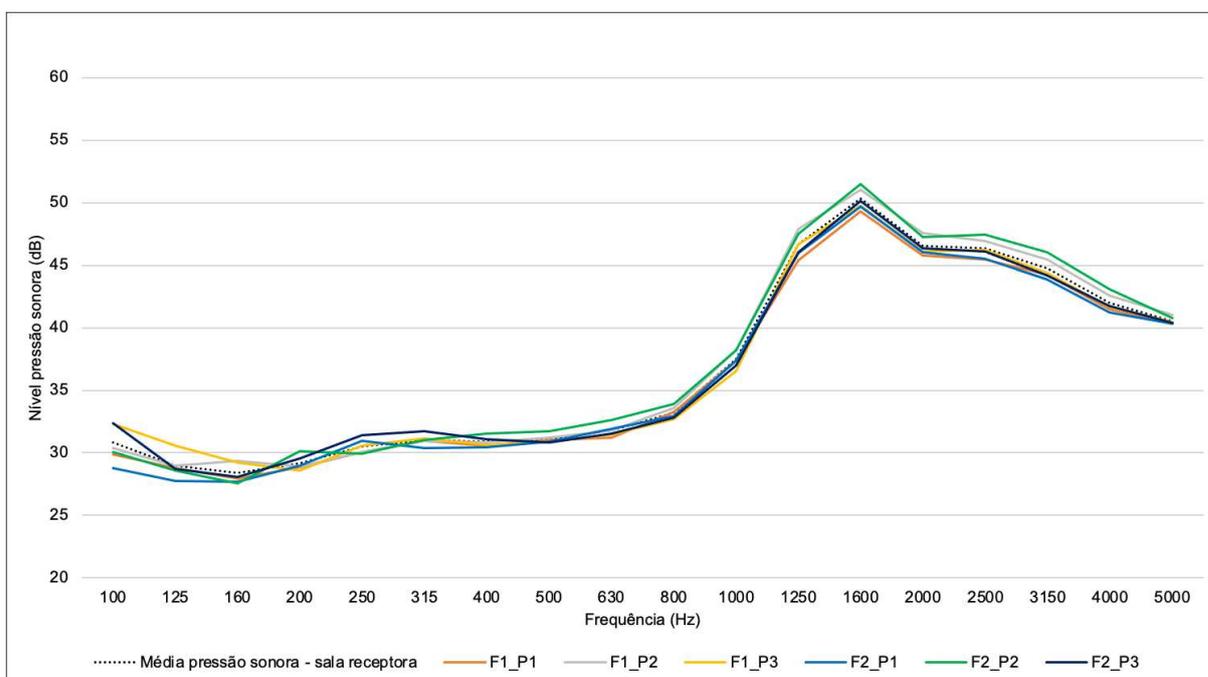
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 2 - Gráfico intervalo de confiança de 95% da média da pressão sonora (sala emissora - L1): ensaios em parede sem material absorvedor.



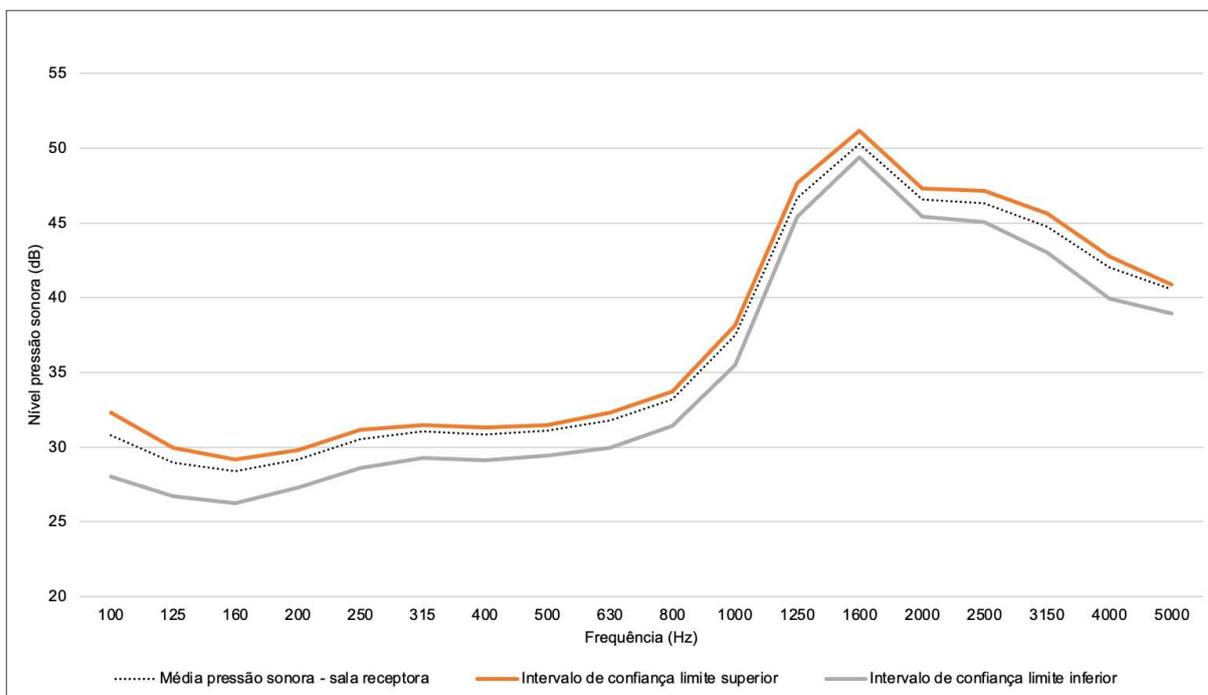
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 3- Gráfico média da pressão sonora (sala receptora - L2): ensaios em parede sem material absorvedor.



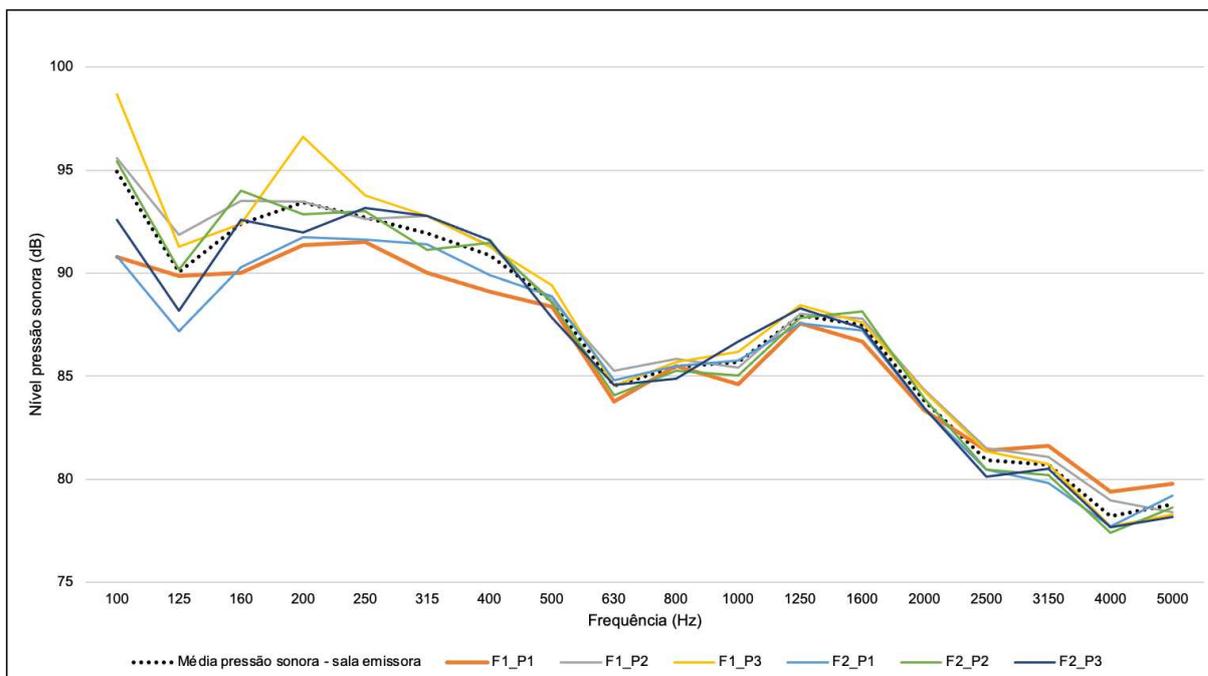
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 4 - Gráfico intervalo de confiança de 95% da média da pressão sonora (sala receptora - L2): ensaios em parede sem material absorvedor.



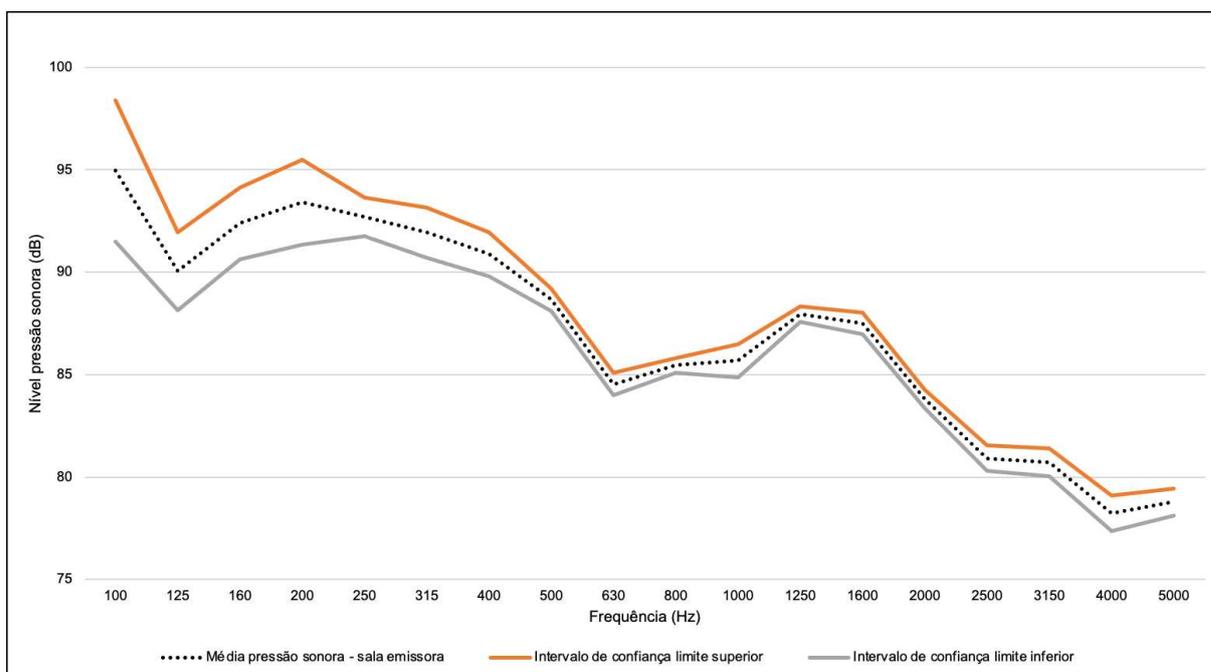
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 5 - Gráfico média da pressão sonora (sala emissora - L1): ensaios em parede com lã de PET.



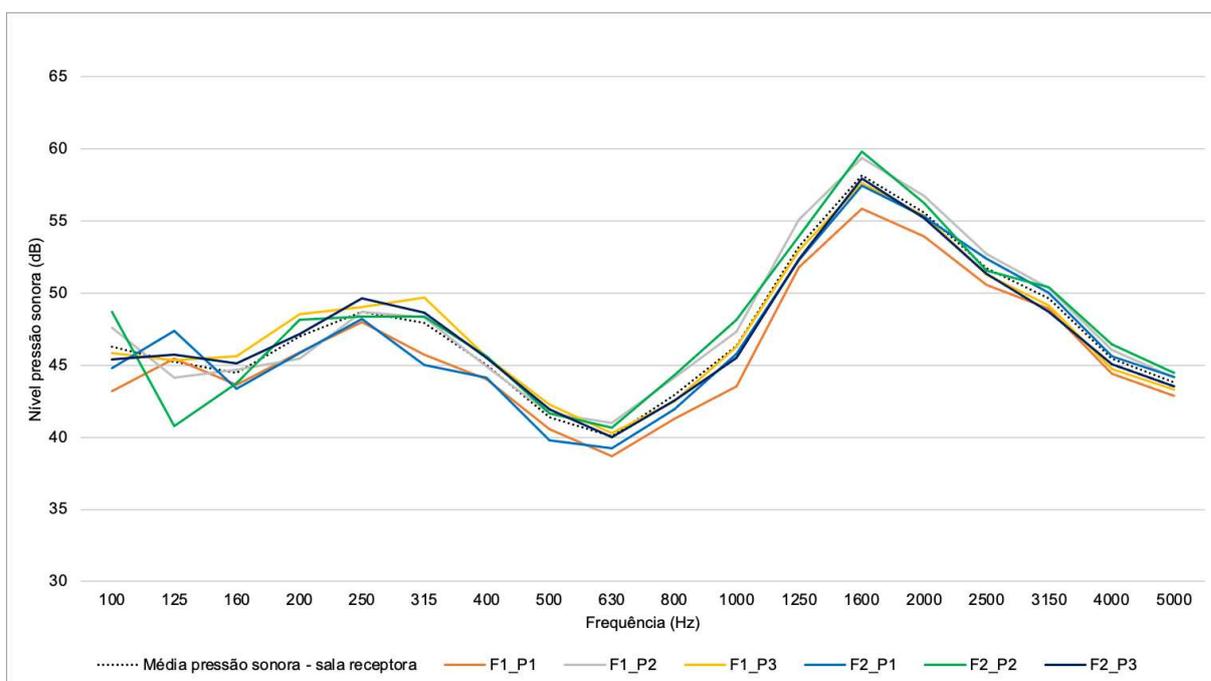
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 6 - Gráfico intervalo de confiança de 95% da média da pressão sonora (sala emissora - L1): ensaios em parede com lã de PET.



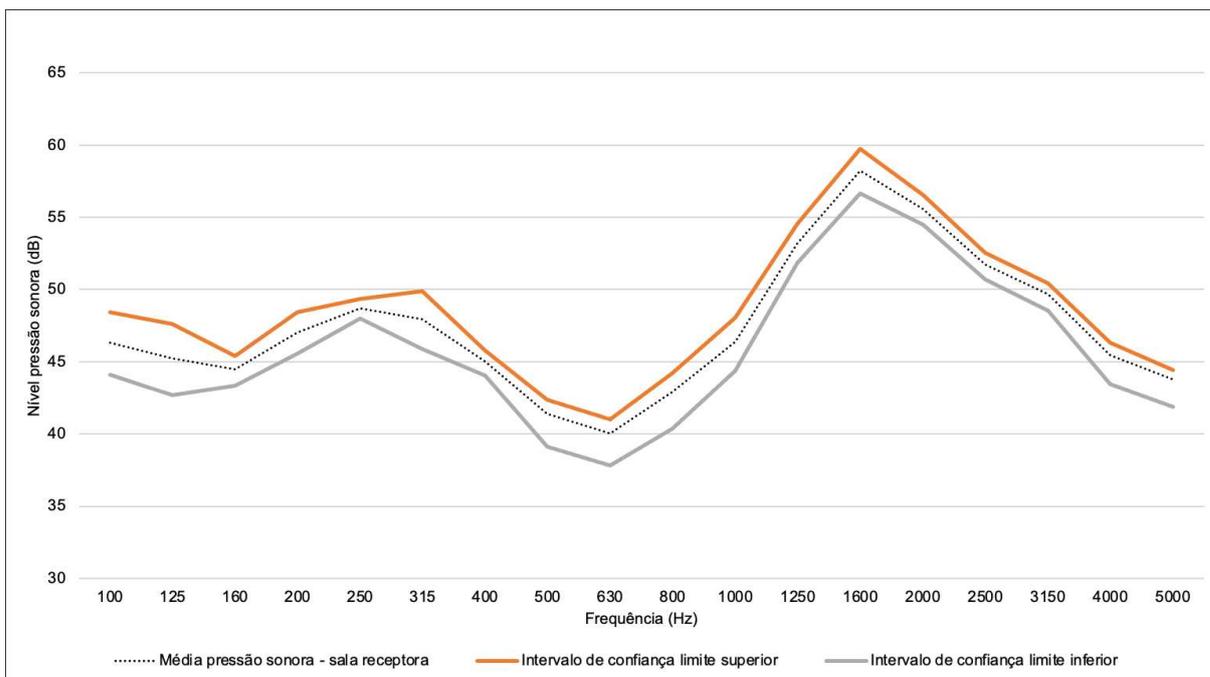
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 7 - Gráfico média da pressão sonora (sala receptora - L2): ensaios em parede com lã de PET.



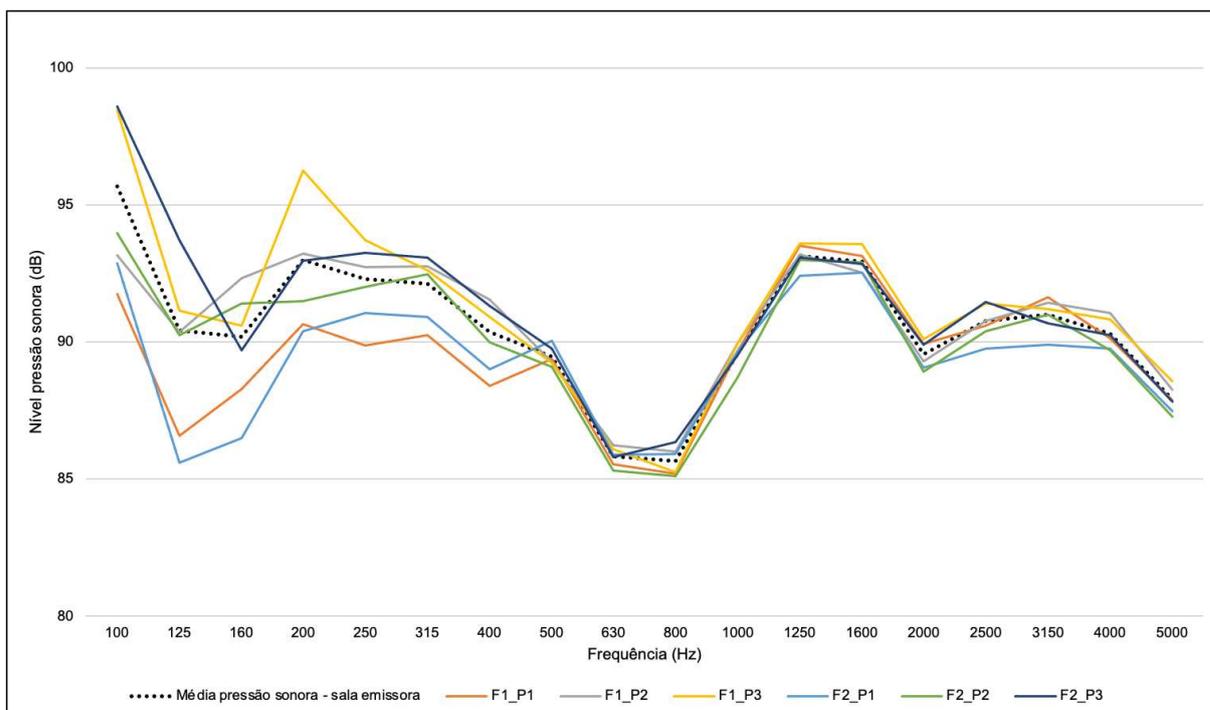
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 8 - Gráfico intervalo de confiança de 95% da média da pressão sonora (sala receptora - L2): ensaios em parede com lã de PET.



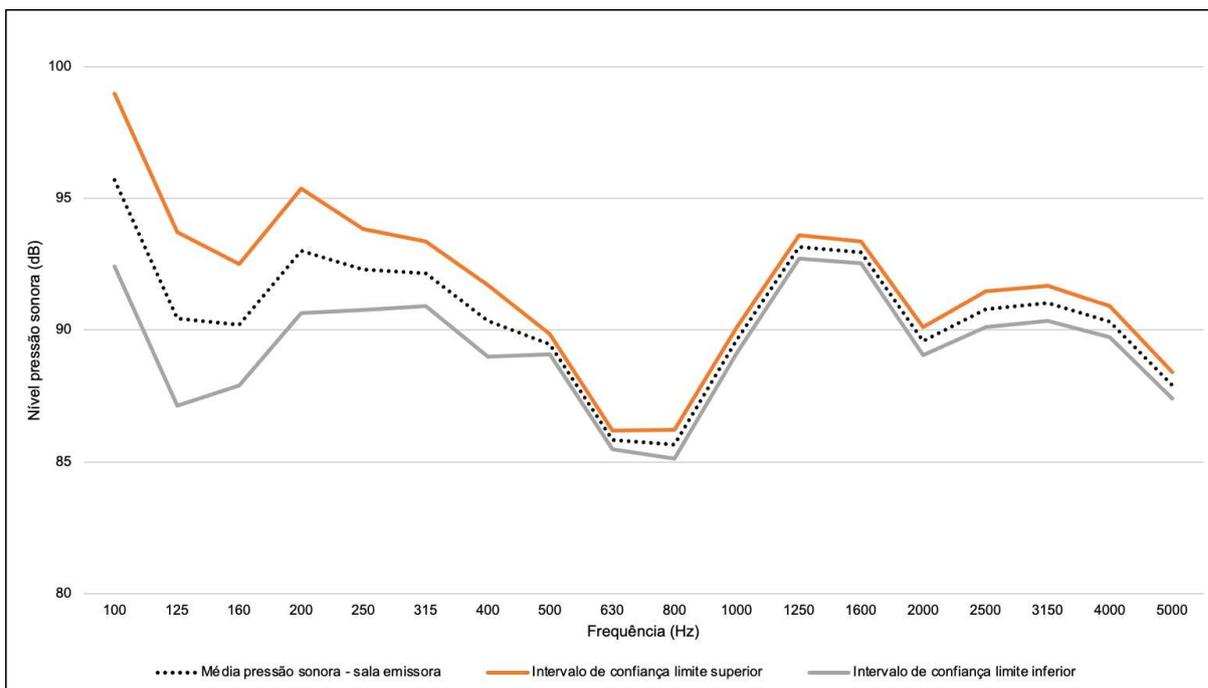
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 9 - Gráfico média da pressão sonora (sala emissora - L1): ensaios em parede com placa de vermiculita.



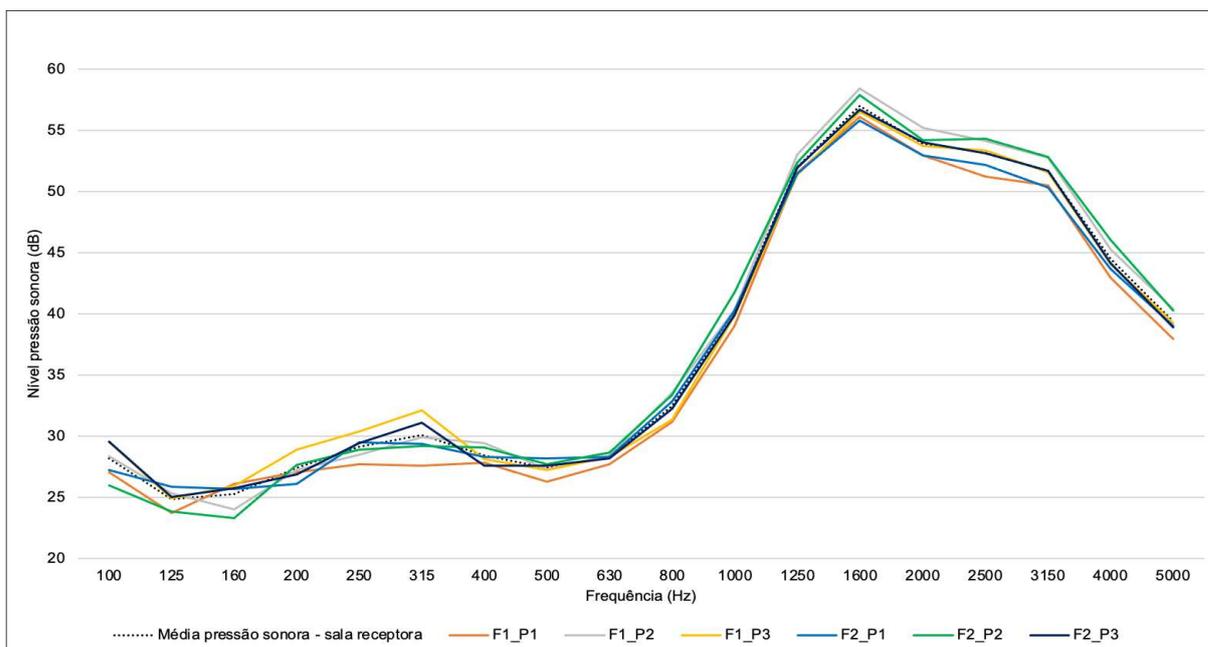
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 10 - Gráfico intervalo de confiança de 95% da média da pressão sonora (sala emissora - L1): ensaios em parede com placas de vermiculita.



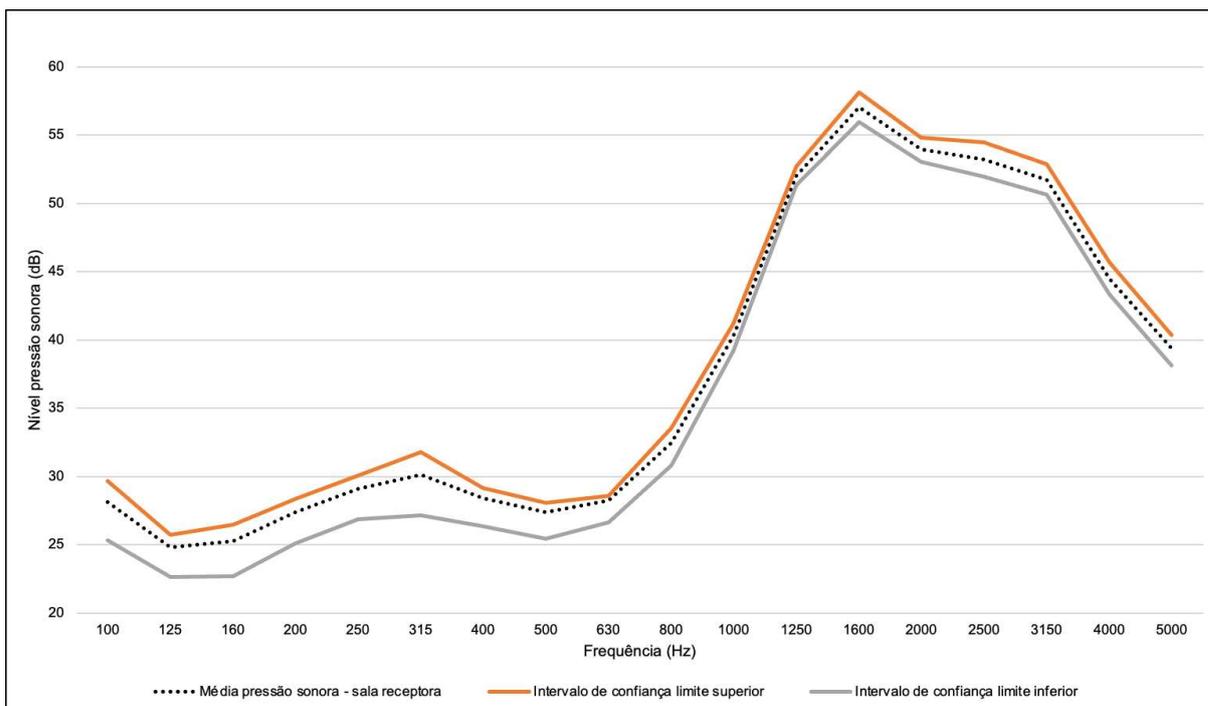
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 11 - Gráfico média da pressão sonora (sala receptora - L2): ensaios em parede com placa de vermiculita.



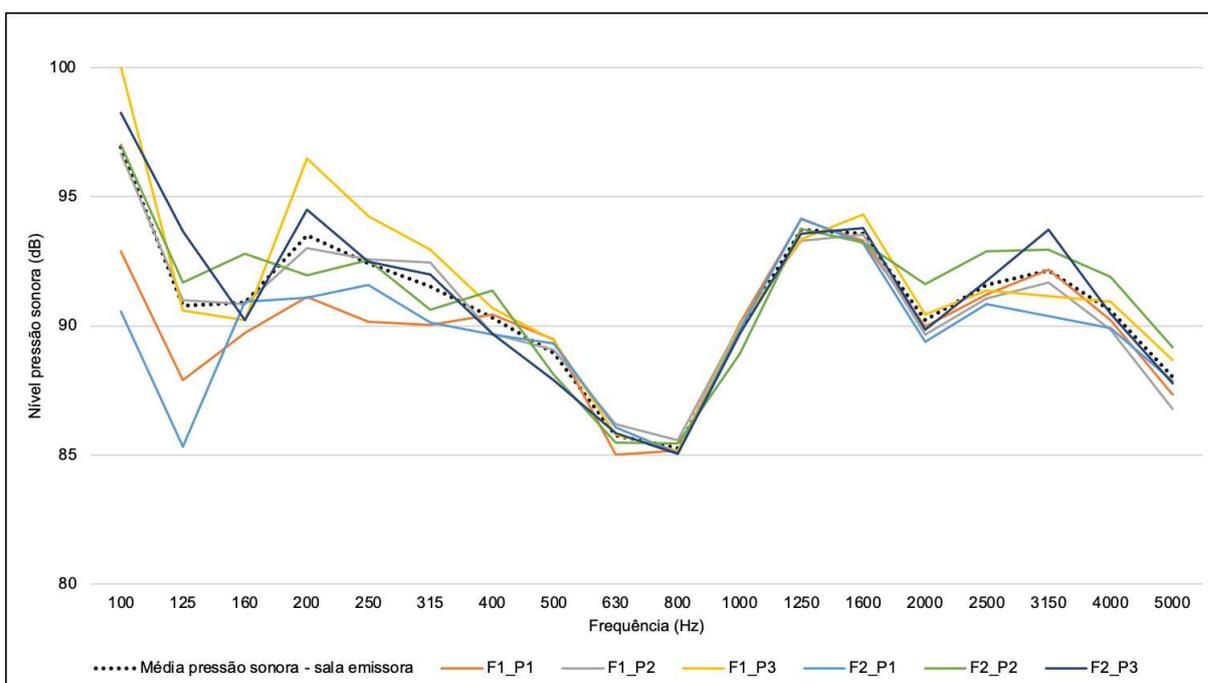
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 12 - Gráfico intervalo de confiança de 95% da média da pressão sonora (sala receptora - L2): ensaios em parede com placa de vermiculita.



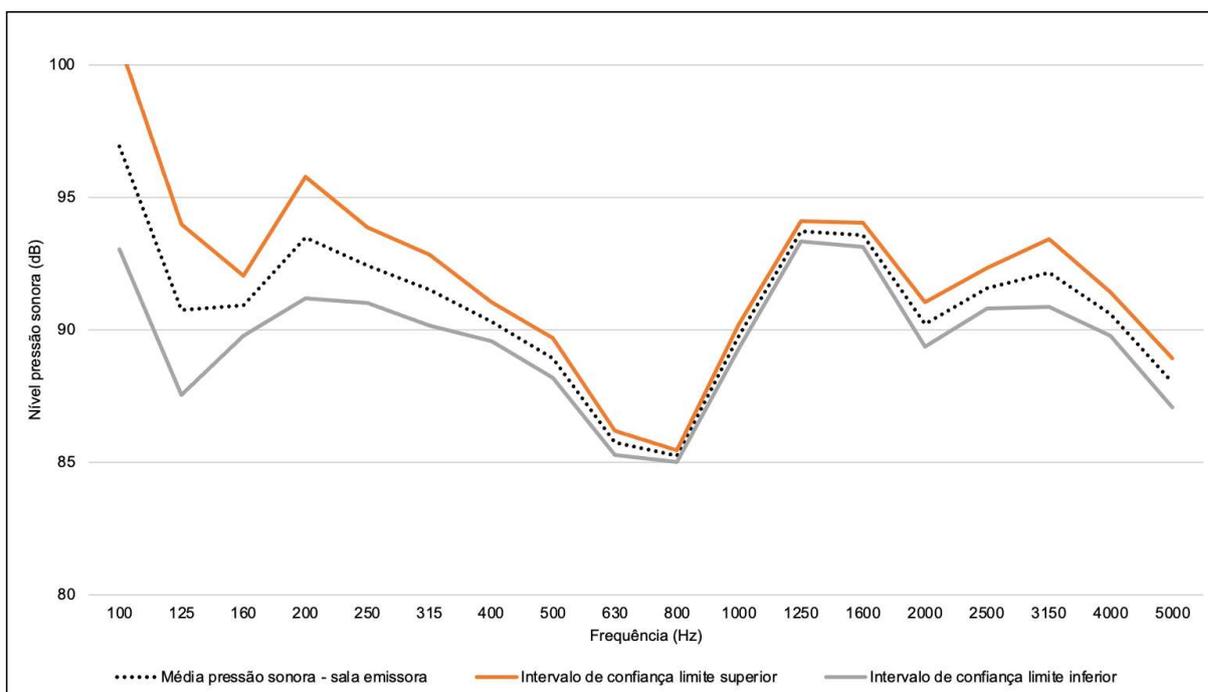
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 13 - Gráfico média da pressão sonora (sala emissora - L1): ensaios em parede com placa de vermiculita e lã de PET.



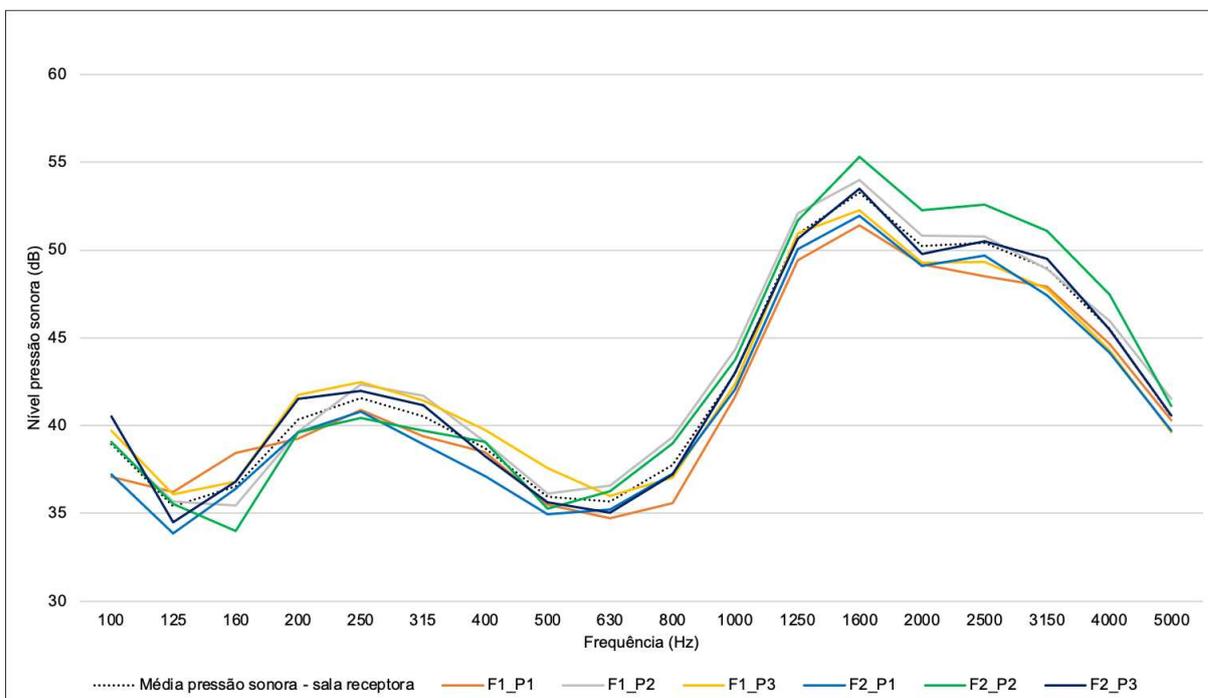
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 14– Gráfico intervalo de confiança de 95% da média da pressão sonora (sala emissora - L1): ensaios em parede com placas de vermiculita e lã de PET



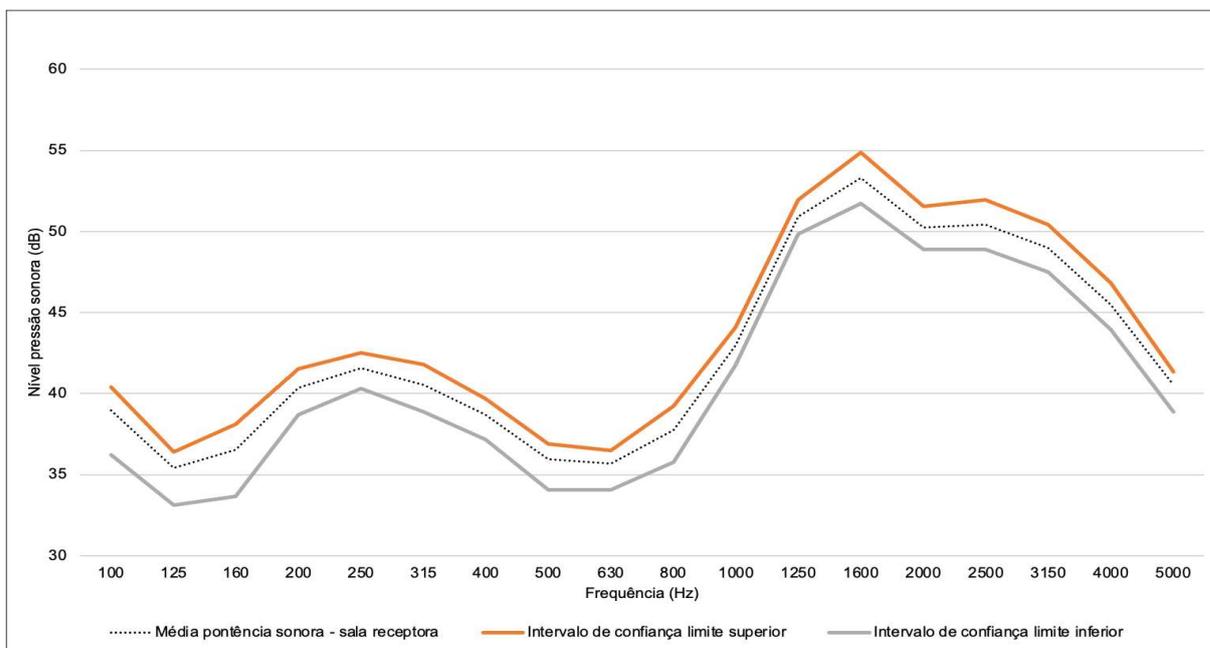
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 15 - Gráfico média da pressão sonora (sala receptora - L2): ensaios em parede com placa de vermiculita e lã de PET.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 16 - Gráfico intervalo de confiança de 95% da média da pressão sonora (sala receptora - L2): ensaios em parede com placa de vermiculita e lã de PET.

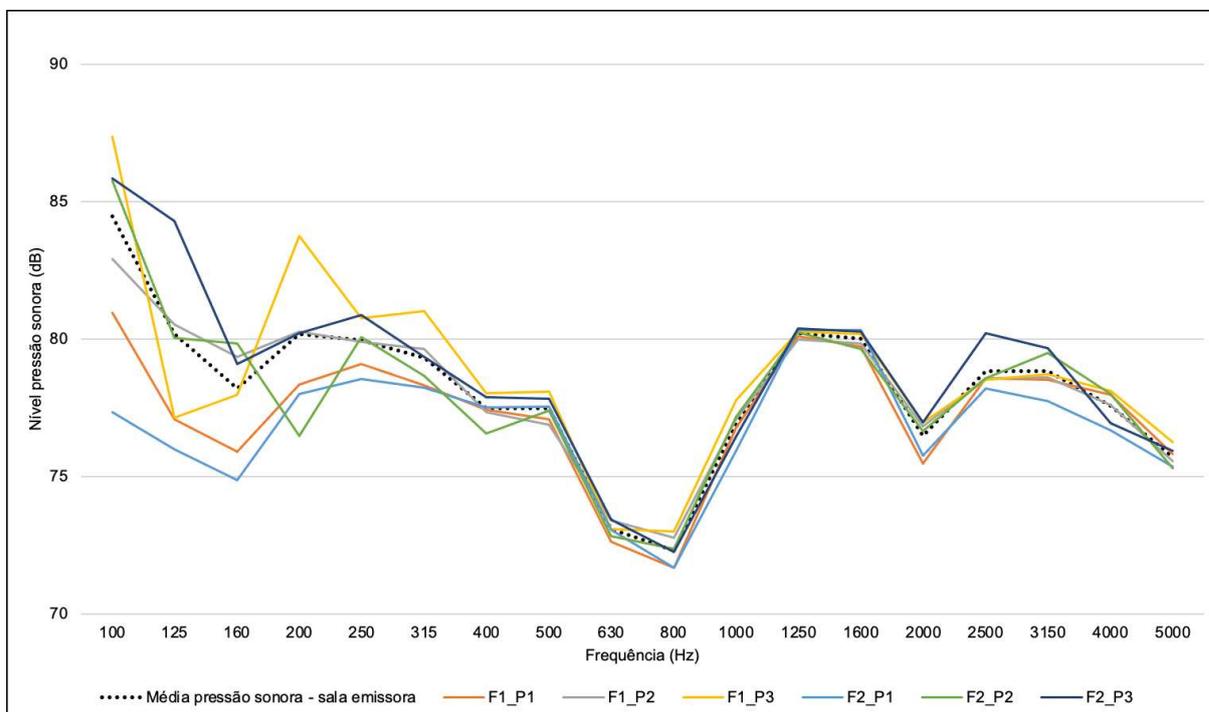


Fonte: Elaborado pela autora (2023).

APÊNDICE B – GRÁFICOS DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORA VERSUS FREQUÊNCIA EM ENSAIOS SOB AQUECIMENTO

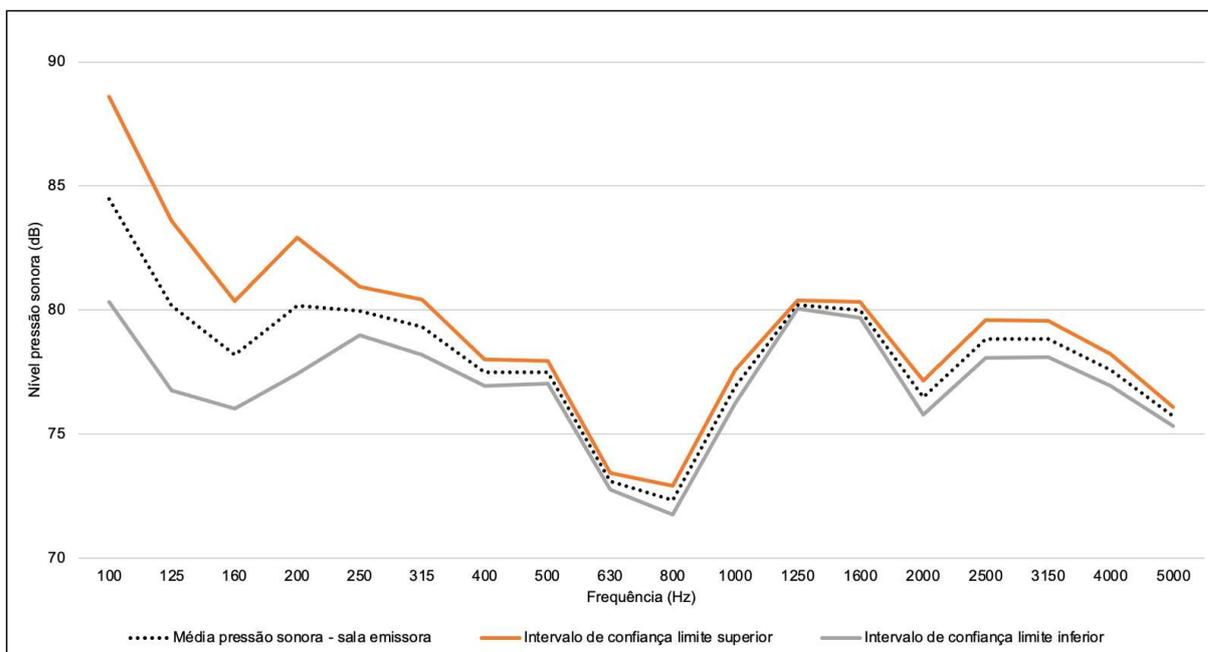
Os gráficos de nível de pressão sonora *versus* a frequência para as salas emissora e receptora dos seis ensaios realizados em cada modelo de parede e sua respectiva média, obtidos por meio de ensaio de PT sob aquecimento, foram dispostos neste apêndice. As expressões *F1* e *F2* representaram as posições da fonte sonora e, *P1*, *P2* e *P3*, as disposições dos microfones. Também, foram demonstrados nesta Seção, gráficos das curvas da média da pressão sonora junto ao seu intervalo de confiança de 95% (limite inferior e superior) *versus* a frequência.

Figura 1 - Gráfico média da pressão sonora (sala emissora - L1): ensaios em parede aquecida sem material absorvedor.



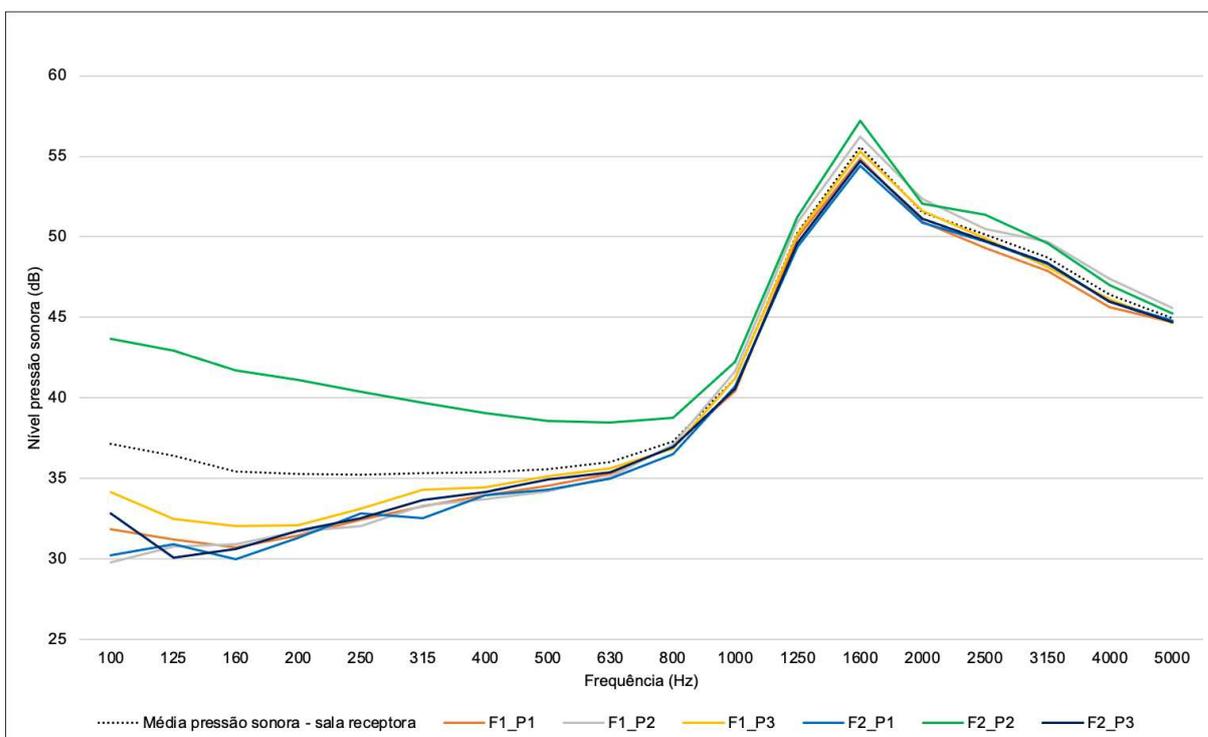
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 2 - Gráfico intervalo de confiança de 95% da média da pressão sonora (sala emissora - L1): ensaios em parede aquecida sem material absorvedor.



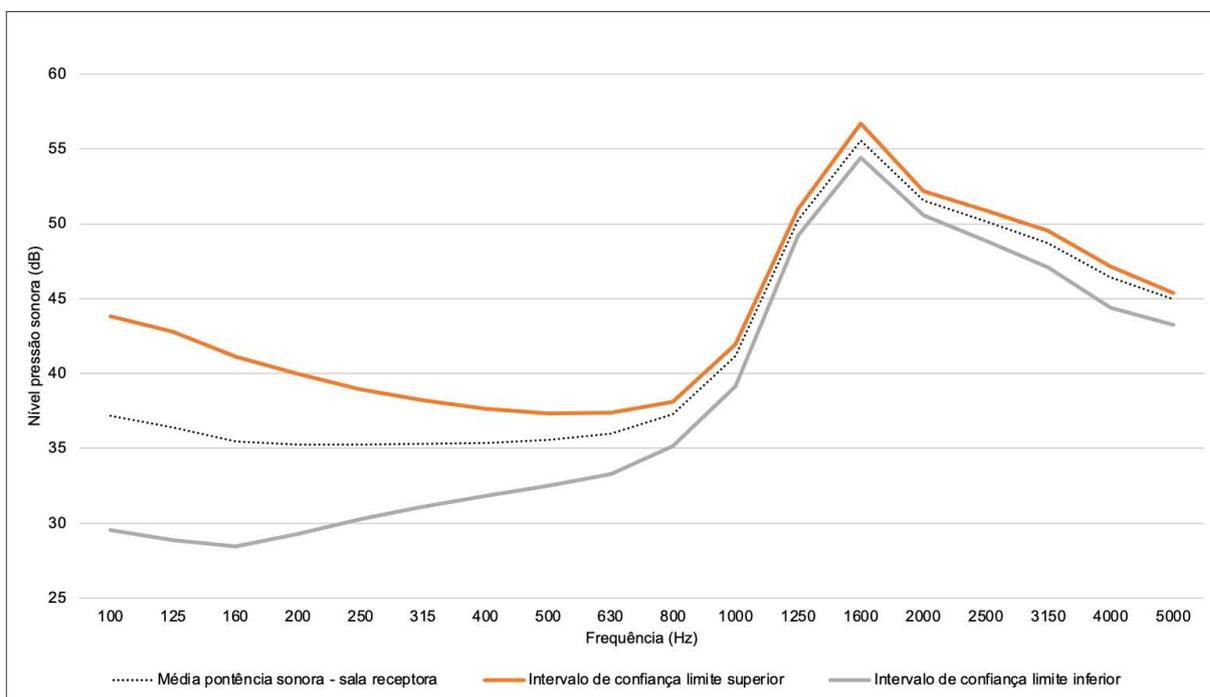
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 3 - Gráfico média da pressão sonora (sala receptora - L2): ensaios em parede aquecida sem material absorvedor.



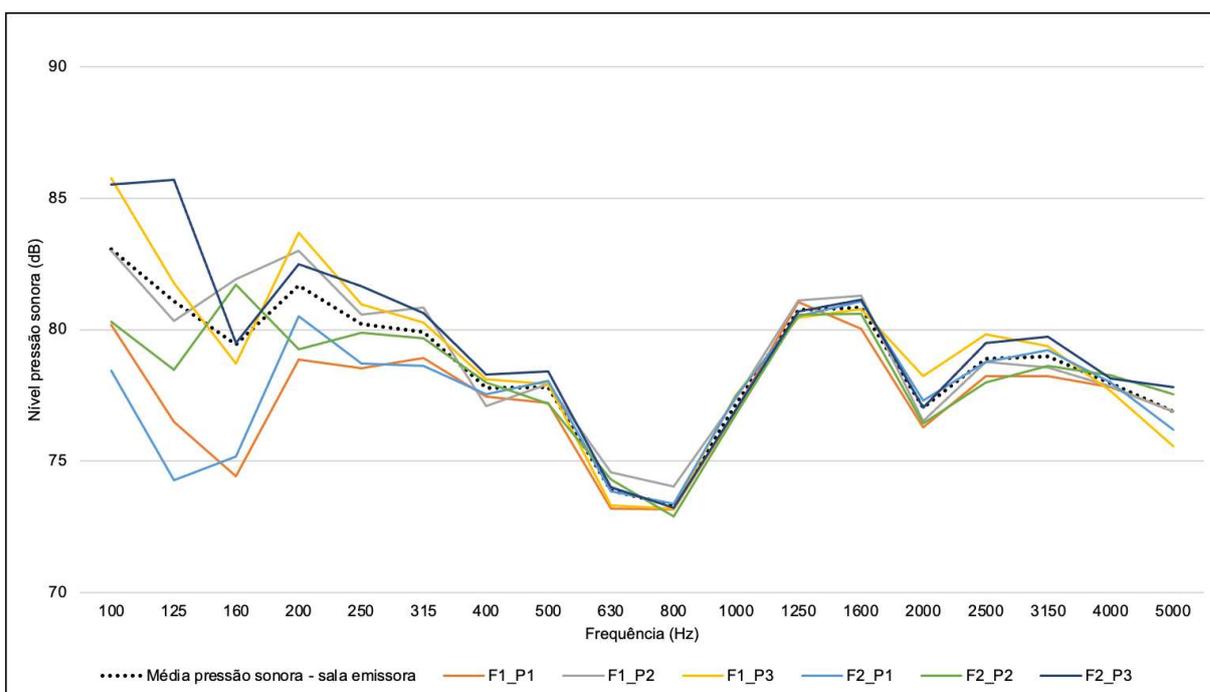
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 4 - Gráfico intervalo de confiança de 95% da média da pressão sonora (sala receptora - L2): ensaios em parede aquecida sem material absorvedor.



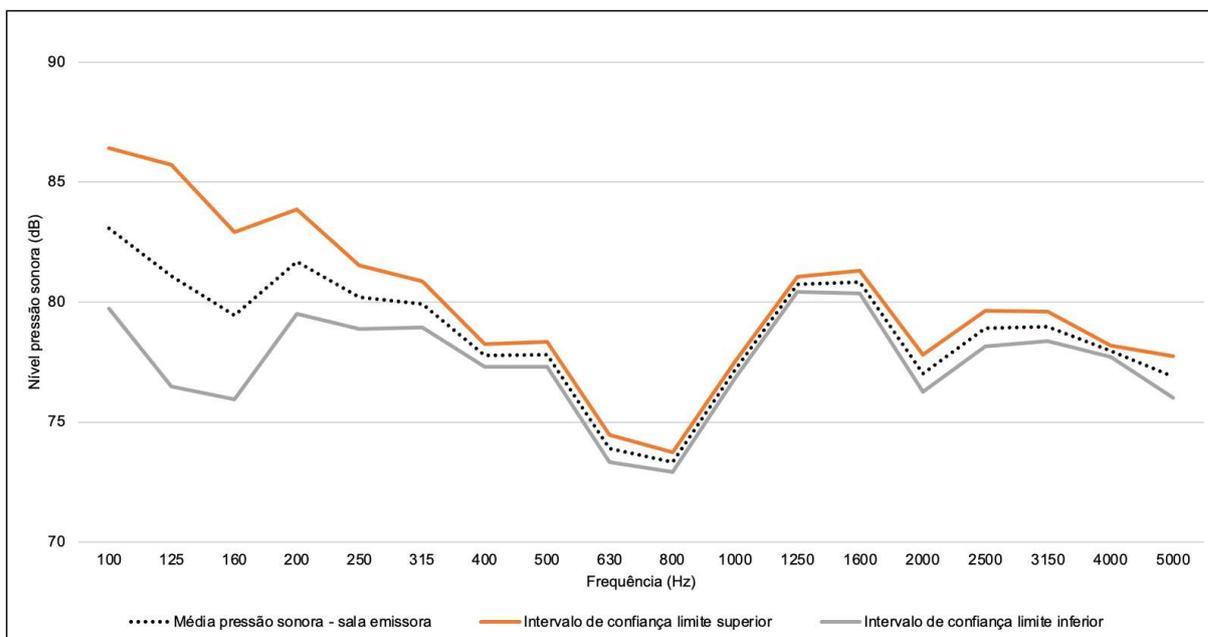
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 5 - Gráfico média da pressão sonora (sala emissora - L1): ensaios em parede aquecida com lâ de PET.



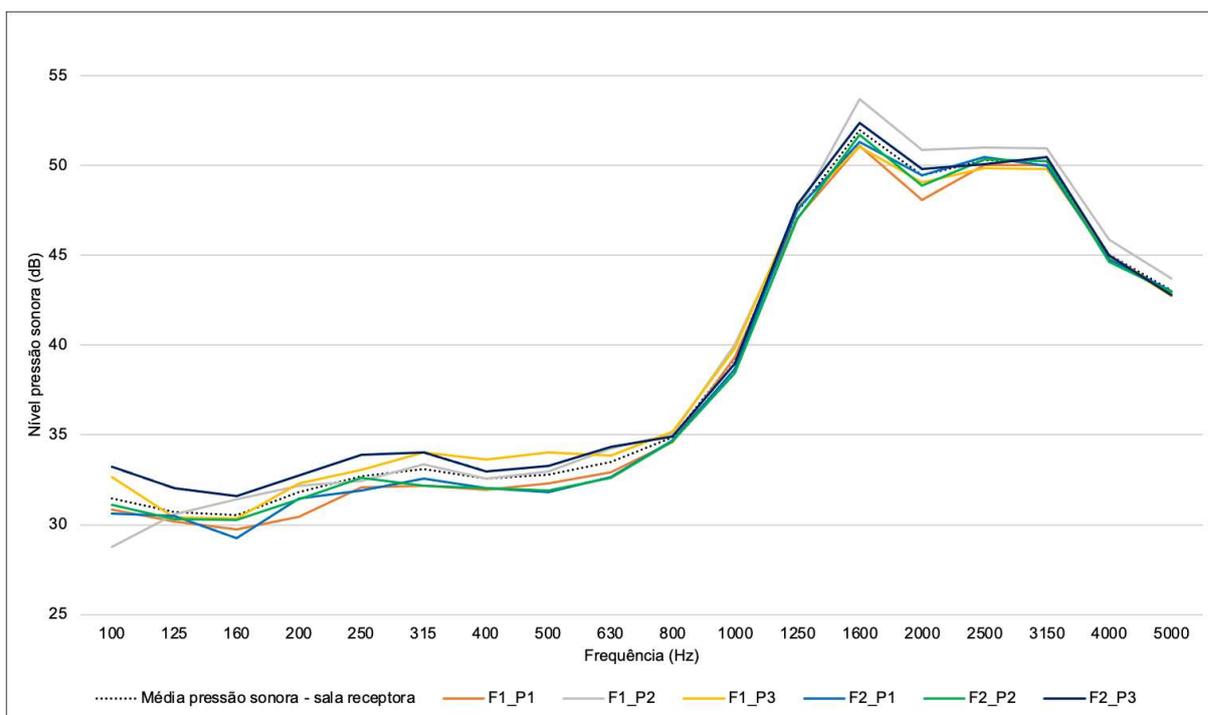
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 6 - Gráfico intervalo de confiança de 95% da média da pressão sonora (sala emissora - L1): ensaios em parede aquecida com lã de PET.



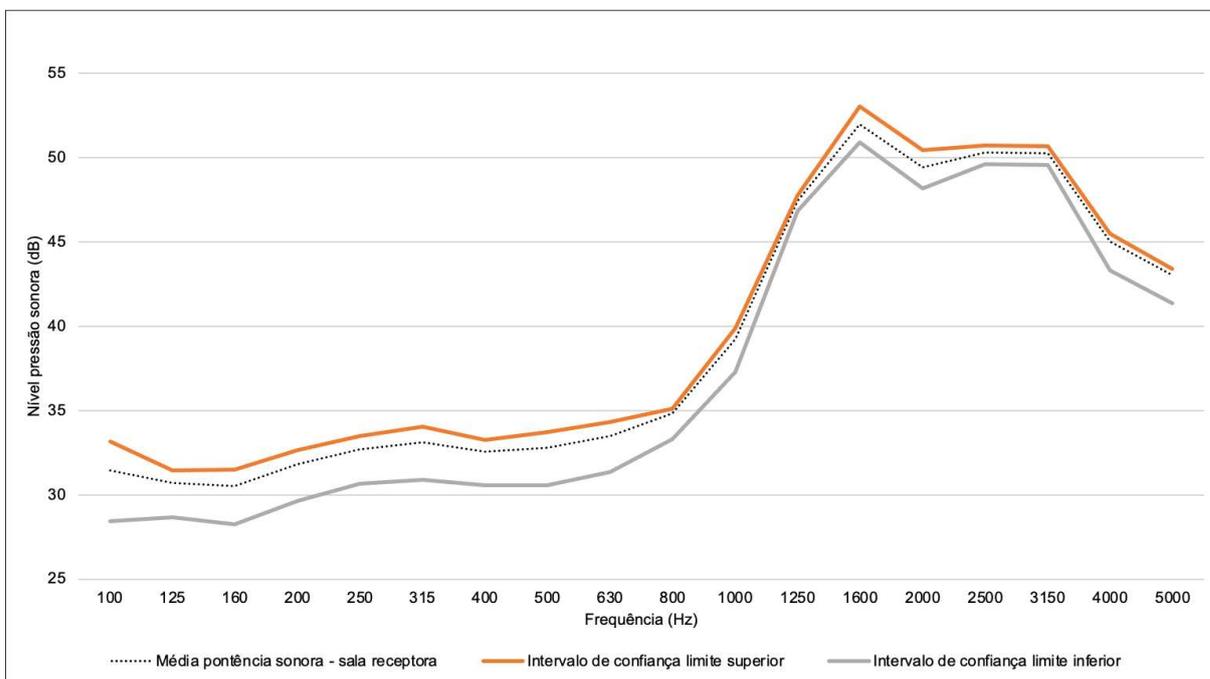
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 7 - Gráfico média da pressão sonora (sala receptora - L2): ensaios em parede aquecida com lã de PET.



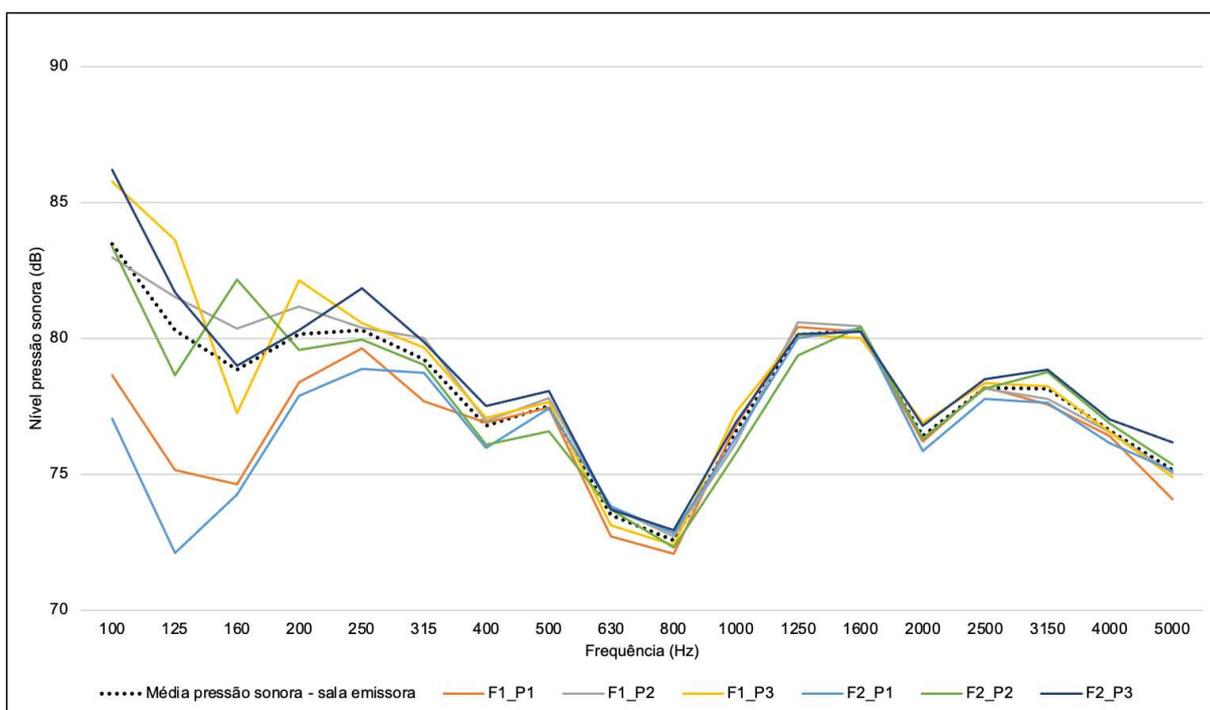
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 8 - Gráfico intervalo de confiança de 95% da média da pressão sonora (sala receptora - L2): ensaios em parede aquecida com lã de PET.



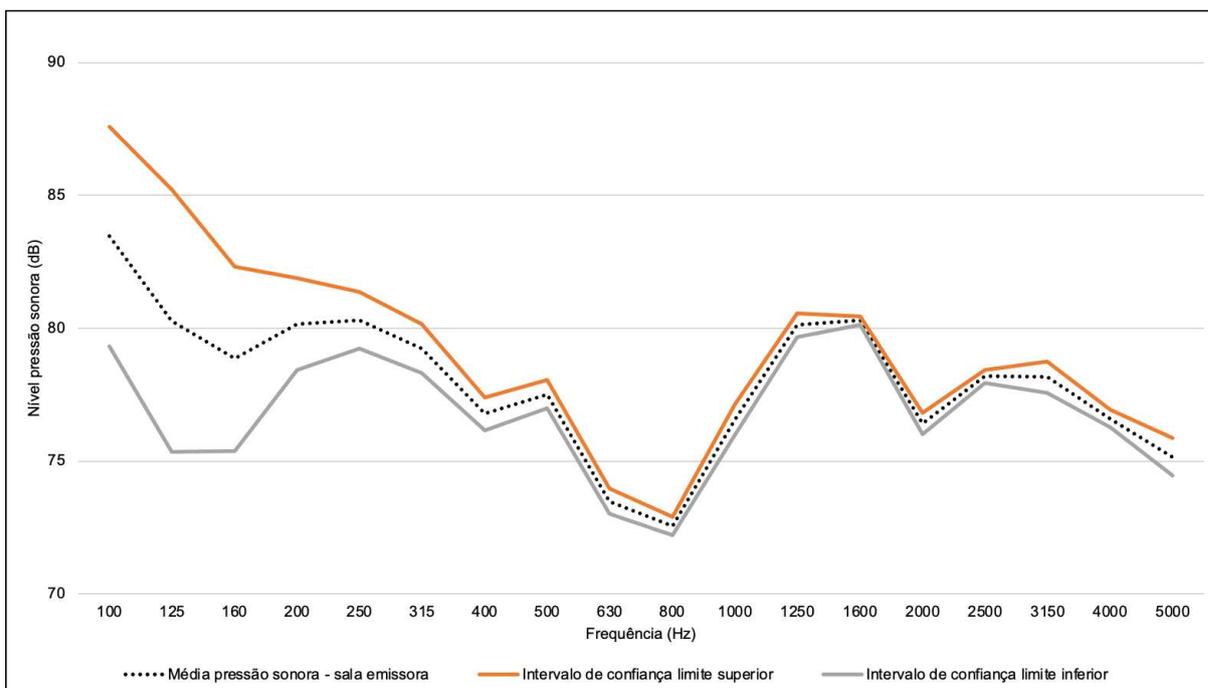
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 9 - Gráfico média da pressão sonora (sala emissora - L1): ensaios em parede aquecida com placa de vermiculita.



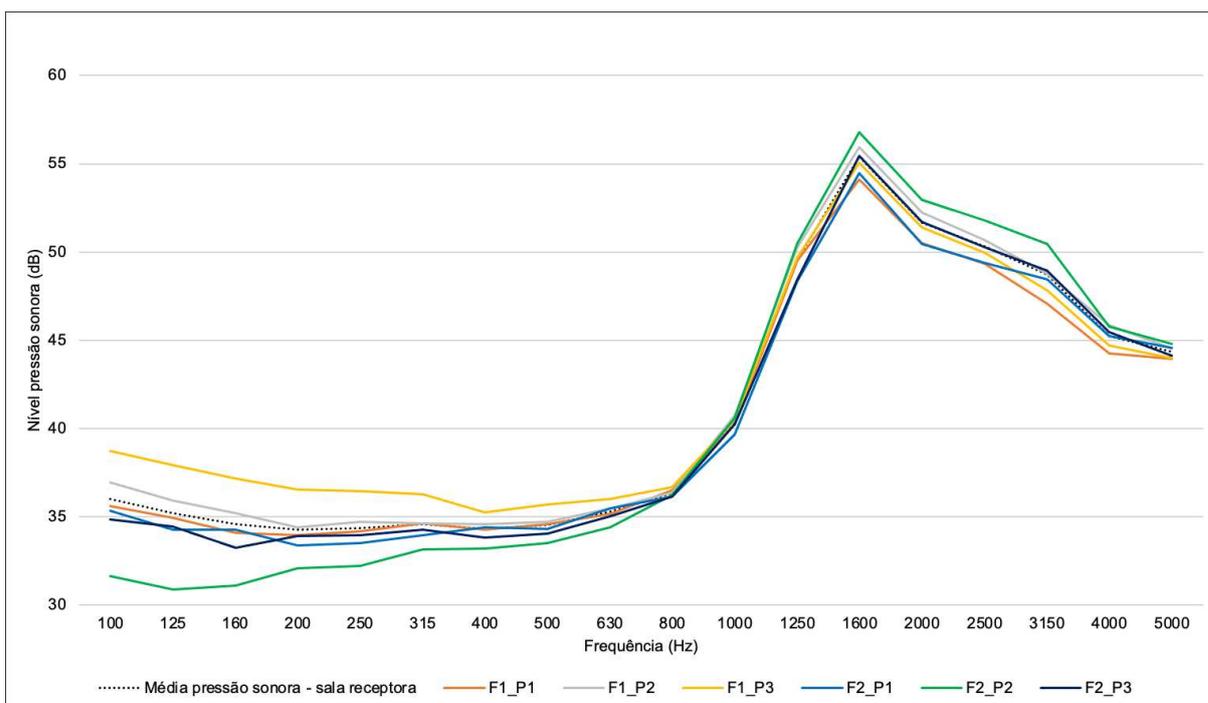
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 10 - Gráfico intervalo de confiança de 95% da média da pressão sonora (sala emissora - L1): ensaios em parede aquecida com placas de vermiculita.



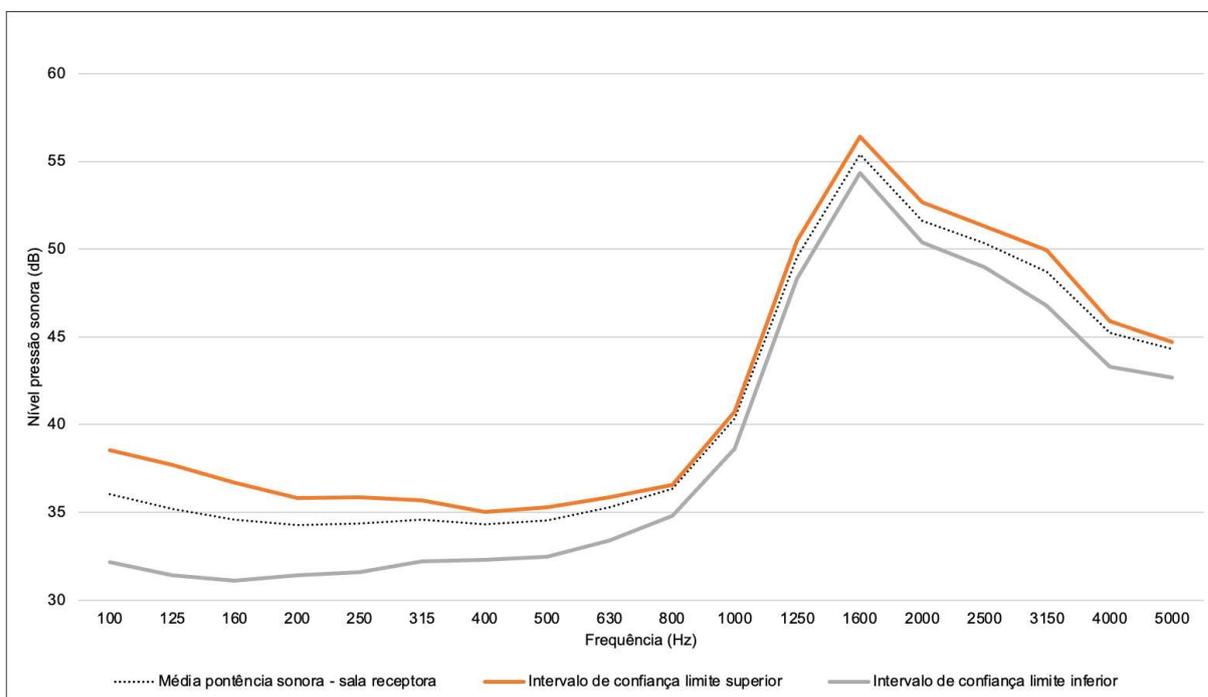
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 11 - Gráfico média da pressão sonora (sala receptora - L2): ensaios em parede aquecida com placa de vermiculita.



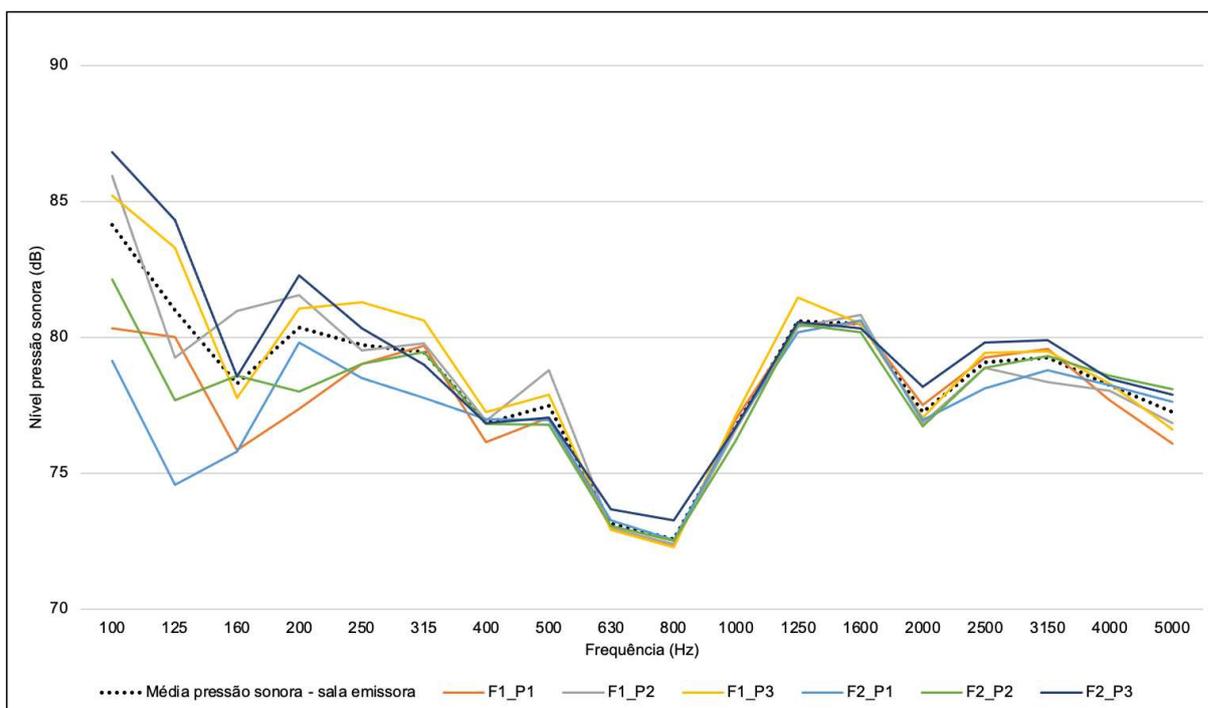
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 12 - Gráfico intervalo de confiança de 95% da média da pressão sonora (sala receptora - L2): ensaios em parede aquecida com placa de vermiculita.



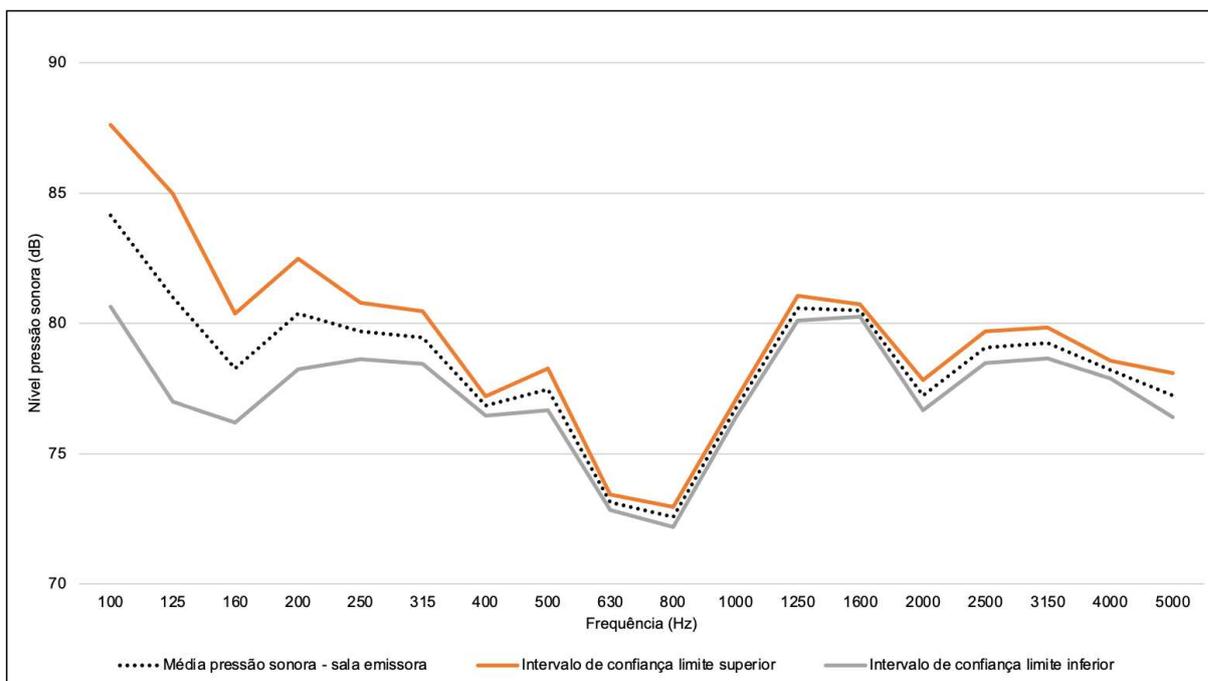
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 13 - Gráfico média da pressão sonora (sala emissora - L1): ensaios em parede aquecida com placa de vermiculita e lã de PET.



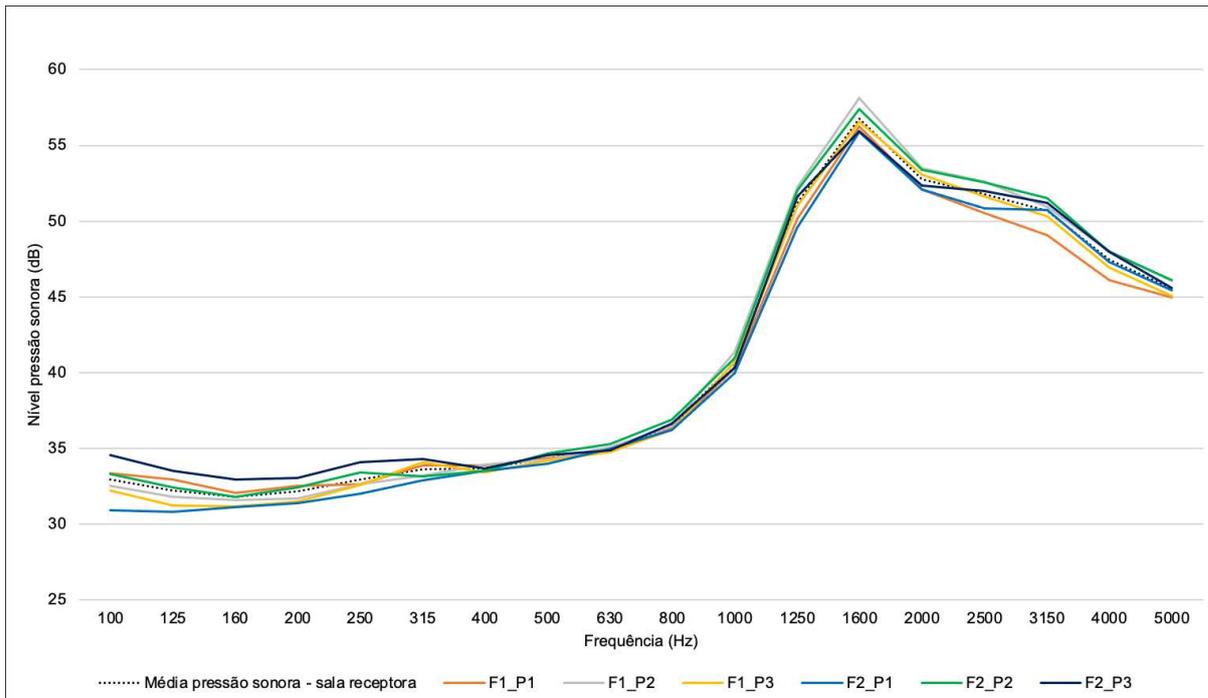
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 14 - Gráfico intervalo de confiança de 95% da média da pressão sonora (sala emissora - L1): ensaios em parede aquecida com placas de vermiculita e lã de PET.



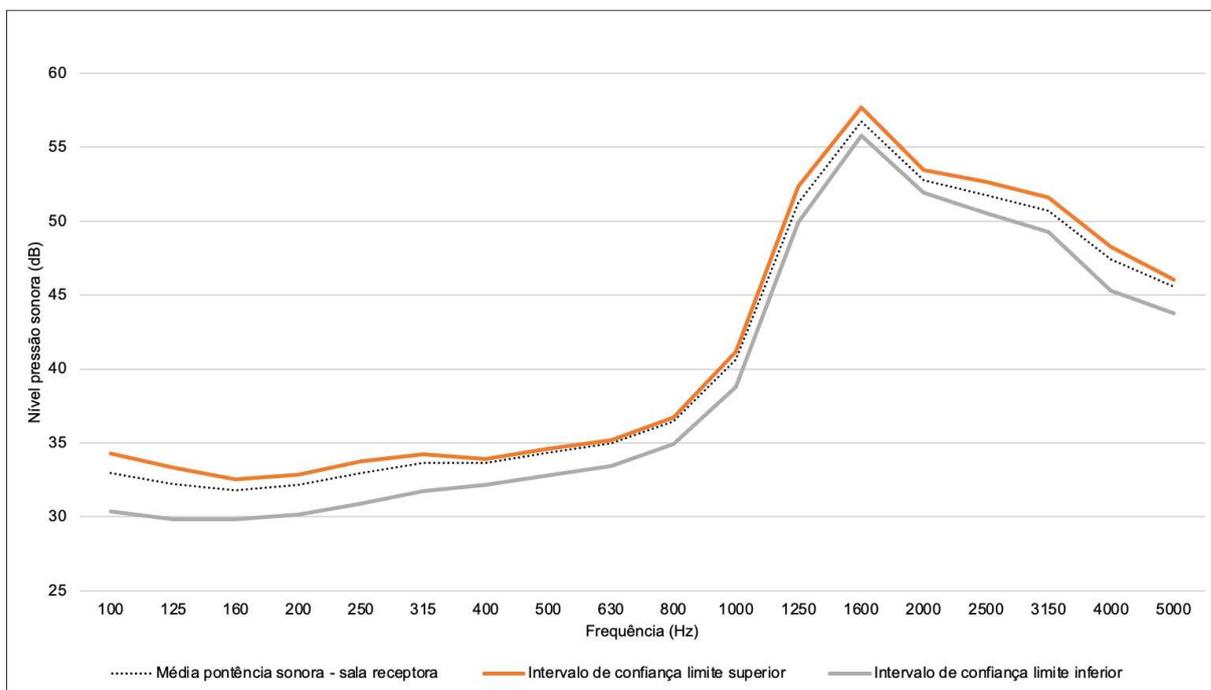
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 15 - Gráfico média da pressão sonora (sala receptora - L2): ensaios em parede aquecida com placa de vermiculita e lã de PET.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Figura 16 - Gráfico intervalo de confiança de 95% da média da pressão sonora (sala receptora - L2): ensaios em parede aquecida com placa de vermiculita e lã de PET.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).