

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS  
MESTRADO PROFISSIONAL

MIRNA OLIVEIRA FREIRE

**OBTENÇÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADOS COM  
VERMICULITA E FIBRA DE COCO PARA A ABSORÇÃO DE RUÍDOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

SALVADOR - BA

2024

MIRNA OLIVEIRA FREIRE

**OBTENÇÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADOS COM  
VERMICULITA E FIBRA DE COCO PARA A ABSORÇÃO DE RUÍDOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais como requisito para a obtenção do grau de Mestre Profissional em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Integridade Estrutural, Processamento e Caracterização de Materiais.

Linha de Pesquisa: Processamento de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Luciene Santos Carvalho

Coorientadora: Profa. Dra. Tharsia Cristiany de Carvalho Costa

SALVADOR - BA

2024

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO IFBA, COM OS  
DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

F866o Freire, Mirna Oliveira

Obtenção de compósitos de matriz polimérica reforçados com vermiculita e fibra de coco para absorção de ruídos: / Mirna Oliveira Freire; orientadora Luciene Santos Carvalho; coorientadora Tharsia Cristiany de Carvalho Costa -- Salvador, 2024.

67 p.

Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais) -- Instituto Federal da Bahia, 2024.

1. Acústica. 2. Ruído. 3. Absorção sonora. 4. Eletrodomésticos. I. Carvalho, Luciene Santos, orient. II. Costa, Tharsia Cristiany de Carvalho, coorient. III. TÍTULO.

CDU 534



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA  
R. Emídio dos Santos - Bairro Barbalho - CEP 40301-015 - Salvador - BA - [www.portal.ifba.edu.br](http://www.portal.ifba.edu.br)

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGEM**

**OBTENÇÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADOS COM  
VERMICULITA E FIBRA DE COCO PARA A ABSORÇÃO DE RUÍDOS**

**MIRNA OLIVEIRA FREIRE**

Produto(s) Gerado(s): Dissertação

Orientador: Profa. Dra. Luciene Santos Carvalho – PPGEM/IFBA

Coorientador: Profa. Dra. Tharsia Cristiany de Carvalho Costa – PPGEM/IFBA

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Luciene Santos Carvalho

Orientadora do PPGEM – Instituto Federal da Bahia – IFBA

Profa. Dra. Mirtânia Antunes Leão

Examinadora Interna ao PPGEM – Instituto Federal da Bahia – IFBA

Prof. Dr. Aldemiro José Rocha Palma

Examinador Externo ao PPGEM – Instituto Federal da Bahia – IFBA

Profa. Dra. Doris Polett Ruiz Vásquez

Examinadora Externa – Universidad de Concepción – UdeC

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela Banca Examinadora  
em 11/07/2024.

---



Documento assinado eletronicamente por **LUCIENE SANTOS CARVALHO, Professor Efetivo**, em 11/07/2024, às 18:46, conforme decreto nº 8.539/2015.

---



Documento assinado eletronicamente por **Doris Polett Ruiz Vasquez, Usuário Externo**, em 11/07/2024, às 23:19, conforme decreto nº 8.539/2015.

---



Documento assinado eletronicamente por **MIRTANIA ANTUNES LEAO, Professor Efetivo**, em 12/07/2024, às 11:54, conforme decreto nº 8.539/2015.

---



Documento assinado eletronicamente por **ALDEMIRO JOSE ROCHA PALMA, Professor(a) do Magistério Superior**, em 18/07/2024, às 09:12, conforme decreto nº 8.539/2015.

---



A autenticidade do documento pode ser conferida no site [http://sei.ifba.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&acao\\_origem=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ifba.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&acao_origem=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0) informando o código verificador **3597796** e o código CRC **799995CB**.

---

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família que sempre me apoiou e acreditou em mim. Mas, em especial, ao meu Avô Alírio, que tinha como apelido dado por quem o conhecia, Mestre Alírio. Sempre fui curiosa com este título que, de algum modo, me instigava a buscar o conhecimento, para que um dia eu pudesse ser associada àquilo que aprendi. Ao meu avô, que achava que ser Engenheira Mecânica não era uma boa ideia para uma mulher, mostro que hoje sigo para mais uma etapa do meu caminho: Mestra em Engenharia de Materiais.

## AGRADECIMENTOS

À fé que tenho em Deus e em Nossa Senhora, e por estarem sempre comigo. Aos meus pais, Conça e Nalvo, que sempre colocaram os nossos estudos, meu e das minhas irmãs em primeiro lugar, e nos ensinaram que esse era o melhor caminho, talvez o único, para vencer na vida. Às minhas irmãs, Malú e Nara, pelo exemplo e inteligência. À toda minha família que me incentivou e acreditou em mim.

À minha namorada, Émile, pelo incentivo e cobrança diária para que eu não desistisse do meu sonho.

À minha orientadora, Luciene, que muito mais do que o seu papel, segurou na minha mão e me puxou nos momentos mais difíceis. Me ensinou em grande estilo o que é uma pesquisa acadêmica, e o quanto esse mundo de conhecimento infinito tem a nos oferecer.

Aos meus amigos, em especial, à Paty que sempre vibrou e me incentivou a cada conquista. Também aos amigos que fiz nesse mestrado, que me apoiaram e me acolheram, Bruna e Catarina. E a todos os professores, pela dedicação e ensinamentos.

## RESUMO

O ruído tem sido um componente muito presente nos grandes centros urbanos nos dias atuais. Diante desta problemática, com o objetivo de controlar o nível de ruído gerado por equipamentos, veículos e pessoas, têm sido desenvolvidos diversos materiais fibrosos e porosos, com capacidade de absorção e de redução do ruído na fonte e no receptor. O objetivo deste trabalho consiste na síntese e caracterização de compósitos com matriz polimérica de resina de poliuretano (PU) com adição de diferentes proporções de cerâmica vermiculita expandida e particulados de fibra de coco, no sentido de avaliar a atenuação da potência acústica em eletrodomésticos. Foram obtidas três composições distintas, com variações nos teores em massa: compósito 1 (vermiculita 5%, fibra de coco 3%), compósito 2 (vermiculita 10%, fibra de coco 5%) e compósito 3 (vermiculita 13%, fibra de coco 7%). Esses compósitos foram caracterizados por calorimetria diferencial de varredura, microscopia eletrônica de varredura, difratogramas de raios-X, espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier e ensaio de impedância acústica. A presença de estruturas desordenadas e porosas decorrentes da adição de vermiculita e fibra de coco atenuaram a propagação do ruído decorrente da absorção de energia das ondas sonoras dos materiais. Essa atenuação foi evidenciada pelo ensaio de impedância acústica, em que se observou os maiores valores de coeficiente de absorção para os dois compósitos com mais altos teores de vermiculita e fibra de coco, na faixa de frequência estudada de 80 a 6300 Hz. Os resultados obtidos demonstraram que o aumento do teor de vermiculita e de fibra de coco melhorou a estabilidade térmica e a capacidade de absorção sonora dos compósitos, devido à formação de poros que contribuem com uma maior retenção do ar. Portanto, conclui-se que compósitos à base de resina de poliuretano, reforçados com vermiculita e fibra de coco, são promissores para uso como absorvedores de ruído, e quanto maior é a quantidade desses componentes no material, melhor é a sua capacidade de absorção sonora. O compósito sintetizado com 26% de vermiculita e 13% de fibra de coco seco foi o que apresentou melhor desempenho, com potencial para aplicações como absorvedor de ruído, inclusive de eletrodomésticos.

**Palavras-chave:** acústica; ruído; absorção sonora; eletrodomésticos.





## ABSTRACT

Noise has been a very present component in large urban centers today. Faced with this problem, with the aim of controlling the level of noise generated by equipment, vehicles and people, several fibrous and porous materials have been developed, with the capacity to absorb and reduce noise at the source and receiver. The objective of this work is the synthesis and characterization of composites with a polymeric matrix of polyurethane resin (PU) with the addition of different proportions of expanded vermiculite ceramic and coconut fiber particles, in order to evaluate the attenuation of acoustic power in household appliances. Three different compositions were obtained, varying in weight: composite 1 (vermiculite 5%, coconut fiber 3%), composite 2 (vermiculite 10%, coconut fiber 5%) and composite 3 (vermiculite 13%, coconut fiber 7%). These composites were characterized by differential scanning calorimetry, scanning electron microscopy, X-ray diffractograms, Fourier transform infrared spectroscopy and acoustic impedance testing. The presence of disordered and porous structures resulting from the addition of vermiculite and coconut fiber attenuated the propagation of noise resulting from the absorption of sound wave energy by the materials. This attenuation was evidenced through an acoustic impedance test, where the highest absorption coefficient values were obtained for the two composites with the highest percentages of vermiculite and coconut fiber, in the studied frequency range of 80 to 6300 Hz. The results obtained demonstrated that the increase in vermiculite and coconut fiber content improved the thermal stability and sound absorption capacity of the composites due to the formation of pores with greater air retention.

**Keywords:** acoustics; noise; sound absorption; household appliances.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático dos fenômenos de propagação das ondas sonoras de um meio material para o outro.....	20
Figura 2 - Variação típica do coeficiente de absorção sonora, em função da frequência, de materiais porosos e fibrosos.....	23
Figura 3 - Reação de síntese do poliuretano.....	25
Figura 4 - Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos. ....	30
Figura 5 - Fluxograma resumido da metodologia experimental. ....	32
Figura 6 – Imagem da vermiculita expandida superfina. ....	33
Figura 7 - Imagem da fibra de coco seco <i>in natura</i> . ....	33
Figura 8 - Resina de poliuretano CST-47 (A) à esquerda, e endurecedor (B) à direita. ....	34
Figura 9 – Cascas de coco limpas e desfiadas (a), e secas em estufa (b). ....	34
Figura 10 - Moinho de facas utilizado no processamento da fibra de coco seco. ....	35
Figura 11 - Fibra de coco seco após moagem. ....	35
Figura 12 - Pesagem dos materiais (a) e mistura com espátula (b) para obter o compósito. ....	37
Figura 13 - Secagem do compósito no molde, em temperatura ambiente, dentro da capela. ....	37
Figura 14 - Amostras dos compósitos após secagem e retirada do molde: V10F5, V20F10 e V26F13, da esquerda para a direita. ....	38
Figura 15 - Imagens da etapa de metalização da amostra (a), efetuada antes dos experimentos de MEV, e do metalizador empregado (b).....	39
Figura 16 - Imagens das amostras metalizadas (a) e sendo acopladas ao microscópio (b). ....	39
Figura 17 - Equipamento utilizado nas análises de FTIR. ....	40
Figura 18 - Equipamentos de análises térmicas: DSC e TG.....	40
Figura 19 - Desenho esquemático do tubo de impedância.....	42
Figura 20 - Imagens dos equipamentos usados nas medidas de impedância acústica. ....	42
Figura 21 – Micrografia da amostra V10F5, com ampliação de 25x (a), e micrografia entre as cavidades, com magnificação de 1.000x (b), mostrando a aglomeração dos reforços.....	43

Figura 22 - Medição dos poros da amostra V10F5: imagens com ampliação de 150x (a) e ampliação de 50x (b). .....	44
Figura 23 - Micrografia da amostra V20F10, com ampliação de 25x (a) e 200x (b)..	45
Figura 24 - Amostra V20F10 com distintas magnificações: (a) 1.000x e (b) 44x, em que foi efetuada a medida do tamanho dos poros.....	47
Figura 25 - Imagens de MEV da amostra V26F13, com ampliação de 25x (a), e da microestrutura da fibra de coco, com ampliação de 500x (b). .....	47
Figura 26 - Imagem da amostra V26F13 demonstrando a presença dos reforços, ampliada em 1.000x (a), e medida dos poros ampliados em 63x (b).....	47
Figura 27 - Curvas de fluxo de calor dos três compósitos. ....	49
Figura 28 - Espectro de FTIR da amostra V10F5.....	51
Figura 29 - Espectro de FTIR da amostra V20F10.....	52
Figura 30 - Espectro de FTIR da amostra V26F13.....	52
Figura 31 - Perfil de DRX para a amostra V10F5. ....	53
Figura 32 - Perfil de DRX da amostra V20F10. ....	55
Figura 33 - Difratoograma de DRX da amostra V26F13.....	55
Figura 34 – Identificação dos picos representativos da vermiculita, comparados com as cartas cristalográficas.....	56
Figura 35 - Pressão sonora do liquidificador, em função da frequência. ....	57
Figura 36 – Coeficiente de absorção, $\alpha$ , em função da frequência para os compósitos. ....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição em massa e em percentual das amostras. ....	37
Tabela 2 - Coeficiente de absorção sonora, por faixas de frequência, para as amostras avaliadas.....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformadas de Fourier
DRX	Difração de Raios-X
PU	Poliuretano

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	16
<b>1.1 Objetivo geral</b> .....	<b>18</b>
<b>1.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>19</b>
2 REFERENCIAL TEÓRICO .....	19
<b>2.1 Ruído</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2 Materiais absorvedores de ruído</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3 Resina de poliuretano</b> .....	<b>25</b>
<b>2.4 Vermiculita</b> .....	<b>26</b>
<b>2.5 Fibras naturais</b> .....	<b>28</b>
<b>2.6 Materiais compósitos</b> .....	<b>29</b>
3 Metodologia experimental .....	31
<b>3.1 Preparação dos compósitos</b> .....	<b>32</b>
3.1.1 Materiais .....	32
3.1.2 Métodos .....	34
3.1.2.1 Processamento da fibra de coco.....	34
3.1.2.2 Obtenção dos compósitos .....	36
<b>3.2 Caracterização das amostras</b> .....	<b>38</b>
3.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	38
3.2.2 Espectroscopia no infravermelho com transformadas de Fourier (FTIR)....	39
3.2.3 Calorimetria diferencial de varredura (DSC).....	40
3.2.4 Difração de raios-X (DRX) .....	41
<b>3.3 Determinação de impedância acústica</b> .....	<b>41</b>
3.3.1 Ensaio de impedância acústica.....	41
4 RESULTADOS E Discussão .....	42
<b>4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</b> .....	<b>43</b>
<b>4.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)</b> .....	<b>48</b>
<b>4.3 Espectroscopia na região do infravermelho (FTIR)</b> .....	<b>50</b>
<b>4.4 Difração de Raios-X (DRX)</b> .....	<b>53</b>

<b>4.5 Avaliação das propriedades acústicas .....</b>	<b>57</b>
4.5.1 Medida da pressão sonora de um liquidificador .....	57
4.5.2 Ensaio de impedância acústica .....	58
5 CONCLUSÕES .....	60
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
REFERÊNCIAS .....	63



## 1 INTRODUÇÃO

O conforto ambiental, sobretudo nas residências, é essencial para o bem-estar das pessoas. Entretanto, nas últimas décadas, tem-se observado o uso crescente de eletrodomésticos que, se por um lado facilitam a execução das atividades diárias, contribuindo com a otimização do tempo e a melhoria da qualidade de vida das pessoas, em contrapartida produzem elevado nível de ruído. O uso frequente desses aparelhos compromete, portanto, o conforto acústico, e não apenas de quem compartilha o mesmo ambiente, mas também de quem reside nas proximidades.

Em prédios e condomínios existem diversas regras que regem o convívio de seus moradores, visando à manutenção da ordem. Dentre elas, é comum a preocupação com a subsistência do silêncio. Além de normas internas de condomínios, existem leis que visam o controle de ruídos.

A resolução do CONAMA nº 20, de 7 de dezembro de 1994, que tem como uma de suas determinações o atendimento ao Programa Nacional de Educação e Controle de Poluição Sonora – SILÊNCIO, instituiu o Selo de Ruído, o qual indica o nível de potência sonora (NR), em decibel - dB(A), de uso obrigatório, para aparelhos eletrodomésticos, como secadores de cabelo, liquidificadores e aspiradores de pó, ou equipamentos semelhantes que exerçam a mesma função.

O órgão responsável pela fiscalização e emissão do Certificado de Conformidade de Potência Sonora de Produtos Eletrodomésticos é o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), por meio da Portaria nº 6, de 5 de janeiro de 2022. O INMETRO estabelece, em seus anexos, quais os níveis de potência sonora para as classificações de 1 até 5 em função dos níveis de pressão sonora em dB (A), que deverão ser indicados no Selo de Ruído do aparelho. Por exemplo, para obter classificação 1, ou seja, o nível mais silencioso, um liquidificador deverá obter nível de potência sonora (NR) igual ou inferior a 85 dB (A). Mesmo atingindo a classificação 5, e NR igual ou superior a 95 dB (A), os aparelhos não são impedidos de serem fabricados e comercializados, sendo exigido pela fiscalização que contenham apenas a indicação no Selo de Ruído, com intuito de alertar aos consumidores.

Outra recomendação técnica para conforto acústico é a estabelecida na Norma NBR 10152, de março de 2020, na qual são indicados os procedimentos técnicos a serem adotados na execução de medições de níveis de pressão sonora em ambientes

internos a edificações, bem como os valores de referência para avaliação dos resultados em função da finalidade de uso do ambiente.

Neste contexto, há uma variedade de materiais comumente utilizados na construção civil com o intuito de melhorar o conforto acústico em alguns ambientes como escritórios, bibliotecas e estúdios, no sentido de atendimento aos requisitos normativos contidos na Norma ABNT NBR 15575, Edificações habitacionais — Desempenho, no seu requisito de habitabilidade/conforto acústico, onde se estabelece que a edificação habitacional deve apresentar isolamento acústico adequado das vedações externas, no que se refere aos ruídos aéreos provenientes do exterior e isolamento acústico adequado entre áreas comuns e privativas de unidades autônomas. Das propriedades necessárias para esses materiais utilizados como isolantes, Tang e Yan (2017) apontaram que os fibrosos podem ser amplamente usados para a absorção de energia sonora, e que o mecanismo de atenuação do ruído se deve à fricção entre as ondas sonoras e as camadas das fibras.

De maneira análoga, materiais porosos também possuem capacidade absorvedora acústica, devido às imperfeições em sua estrutura. Cao *et al.* (2018) definiram os materiais porosos para a absorção sonora como aqueles compostos por canais, rachaduras ou cavidades, que permitem a entrada das ondas sonoras na estrutura do material. Dessa maneira, a energia sonora é dissipada pela perda térmica causada pelo atrito das moléculas de ar com as paredes dos poros.

Considerando estes aspectos, a porosidade se torna uma característica relevante pois, além de aumentar a capacidade de absorção sonora, pode contribuir com a redução da densidade do material. Este é um requisito importante quando se avalia sua aplicação em um eletrodoméstico, que é o objeto deste estudo.

Desse modo, Cao *et al.* (2018) complementam que é necessário estabelecer alguns critérios ao se projetar absorvedores porosos de som, tais como: número considerável de poros (como cavidades, canais ou interstícios); tamanho adequado de poros e interconexões entre si, para promoverem a propagação das ondas sonoras; além de canais contínuos entre os poros internos e a superfície externa dos materiais. Cao *et al.* (2018) também destacaram a ampla aplicação de materiais à base de fibras de vidro para absorção acústica, nas áreas de transporte, construção civil e aeroespacial, por apresentarem alta rigidez, resistência ao calor e aos altos níveis de pressão. Entretanto, apesar da elevada eficiência de absorção sonora, as fibras de vidro apresentam como desvantagens a fragilidade e a nocividade dos

fragmentos para os seres humanos, o que limita bastante sua aplicação.

Além das propriedades acústicas e da baixa densidade, outra característica indispensável, que deve ser estudada antes da aplicação de materiais absorvedores de ruído em eletrodomésticos, é a sua capacidade de dissipação da energia térmica, o que é muito importante para evitar danos ao motor elétrico. Vivaldini *et al.* (2014) afirmaram que, quanto maior a porosidade total, e maior a concentração de defeitos na porção sólida, menor é a condutividade térmica.

Nigmatullina *et al.* (2020), em seus estudos sobre materiais absorvedores para aplicações em construção civil, compararam o coeficiente de absorção sonora de alguns materiais, como pó de madeira de duas granulometrias diferentes, vermiculita, um tipo de argila comercial e a vermiculita expandida, e afirmaram que a melhor capacidade de absorção sonora foi apresentada pela vermiculita expandida.

Outro material conhecido por sua aplicação na absorção sonora é a espuma de poliuretano, amplamente empregada na fabricação de abafadores e protetores auditivos. O Boletim Técnico 3M Peltor X (2018) afirma que, para o modelo X4A, o nível de ruído atenuado chega a 24 dB, sendo considerado um bom absorvedor no mercado de equipamentos de proteção individual.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi preparar compósitos de matriz polimérica, para serem utilizados como materiais absorvedores de ruído em eletrodomésticos. Para obter os compósitos, foram misturadas quantidades pré-definidas de vermiculita expandida, resina de poliuretano e fibra de coco seco, pelo baixo custo e abundância deste rejeito na região nordestina. Embora a maioria dos estudos envolvendo esses materiais utilizem o poliuretano em forma de espuma durante a etapa de síntese, neste trabalho será empregada a resina do polímero como suporte para os reforços na obtenção do compósito.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver compósitos de matriz de resina de poliuretano, reforçado com vermiculita expandida e fibra natural, para a redução do nível de ruído em eletrodomésticos, por meio da absorção acústica.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar compósitos, a partir de resina de poliuretano, vermiculita e fibra de coco, variando-se o percentual em massa de cada material constituinte.
- Caracterizar as amostras obtidas, a fim de conhecer sua composição elementar e suas propriedades estruturais e morfológicas.
- Comparar a eficiência dos compósitos produzidos na absorção de ruído, a partir de medidas de impedância acústica.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 RUÍDO

Uma das definições encontradas no dicionário Michaelis sobre ruído é: “Som constituído por uma série de vibrações diversas sem que haja relações harmônicas entre elas”. Borges e Rodrigues (2017) definem o som como ondas sonoras produzidas pelas vibrações de corpos materiais, necessitando de um meio material para se propagar. Para que essas ondas sejam percebidas pelo ouvido humano é necessário que estejam em uma frequência aproximada entre 16 e 25.000 hertz. Desse modo, o ruído será tratado aqui como um tipo de som indesejado, que provoca desconforto ao ser captado pelo aparelho auditivo humano.

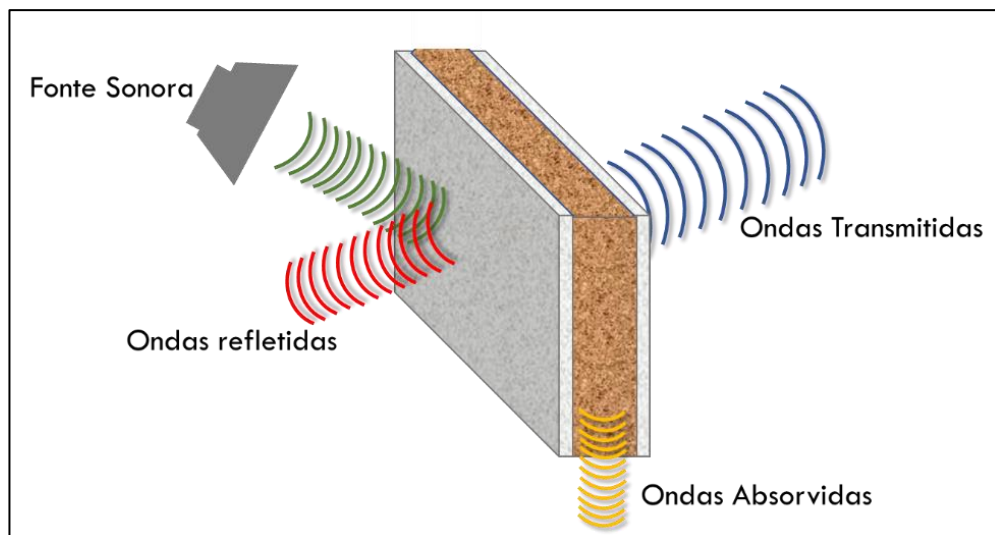
Lacerda *et al.* (2005) realizaram uma pesquisa com moradores da cidade de Curitiba, para determinar quais as fontes de ruído que mais lhes incomodavam em suas ruas residenciais. Eles encontraram que, em primeiro lugar, estava o trânsito, com 66,8% das respostas. Em segundo lugar, com 33,1%, estavam os vizinhos, seguidos de sirenes (23,3%), animais (21,4%) e construção civil (20,9%). A partir desses dados, foi possível detalhar quais eram os ruídos produzidos pelos vizinhos, que foram identificados como sendo a utilização de aparelhos eletrodomésticos e eletrônicos, conversas, ruídos de animais e de reformas residenciais.

As ondas geradas por essas fontes sonoras se propagam em meio material, conforme mencionado anteriormente, e estão sujeitas a três fenômenos físicos, ao se depararem com algum obstáculo: reflexão, absorção ou transmissão (refração) das ondas sonoras. Nicolau e Toledo (1998) definem que a reflexão ocorre quando a onda incide em um obstáculo e retorna ao meio original de propagação, podendo ocasionar

eco ou reverberação. Quando ocorre o eco, o som é refletido após a extinção total do som original. Já na reverberação o som é refletido antes da extinção total do som emitido, provocando o seu reforço.

A refração de uma onda sonora ocorre quando ela passa de um meio para o outro, variando sua velocidade de propagação e comprimento de onda. Já a absorção ocorre pela dissipação da energia sonora na forma de calor, por meio da fricção na superfície interna do material, conforme exemplo esquemático dos fenômenos de propagação da onda, representados na Figura 1 (Borges e Rodrigues, 2018).

Figura 1 – Desenho esquemático dos fenômenos de propagação das ondas sonoras de um meio material para o outro.



Fonte: Própria autora, 2022.

Além das propriedades das ondas sonoras já citadas, como velocidade, frequência e comprimento, a característica que melhor representa matematicamente essa percepção, quando se trata da interação das ondas com o ouvido humano, é a intensidade da onda. Assim, a intensidade ou nível sonoro representa a quantidade de energia, por unidade de área, absorvida por determinada superfície, comumente medida em decibel (dB), que é a escala logarítmica utilizada para comparar a intensidade de um som com a menor intensidade capaz de ser percebida pelo ser humano (Halliday, Resnick e Krane, 2010).

Em se tratando de ouvido humano, ainda é possível encontrar a medida de pressão sonora, em dB (A). Nesse caso, ela é ponderada em frequência e reflete a sensibilidade do ouvido humano. Segundo a NBR 10151, de 2020, o nível de pressão

sonora obtido com a ponderação em A, no espectro global, determinado diretamente na medição, ou calculado pela média logarítmica, deve ter seu resultado escrito com referência ao símbolo  $L_{Aeq,T}$ , medido em (dB).

A Norma Regulamentadora número 15 (2021), que trata sobre a definição de atividades insalubres, indica que a exposição de trabalhadores a um ruído contínuo, ou intermitente, de 85 dB (A), não deve exceder 8 horas por dia de trabalho. Cita ainda que o trabalhador não deve ser exposto a ruídos superiores a 115 dB (A), sem a devida proteção, por nenhum período, sendo considerado risco grave e iminente à saúde. Embora a norma trate do assunto de exposição para efeitos trabalhistas, pode-se considerar tal referência para mensurar os impactos negativos do ruído à saúde humana. Ladeia *et al.* (2019), a partir de seus estudos sobre os efeitos nocivos da poluição sonora, concluíram que vários problemas estão associados à exposição ao ruído. Dentre as patologias e incômodos podem ser citados cefaleia, irritabilidade, instabilidade emocional, ansiedade, nervosismo, perda de apetite, insônia, fadiga e redução da produtividade.

Outra Norma Regulamentadora inerente assunto a de Ergonomia (NR 17), publicada pela Portaria/MTP nº 423, de 7 de outubro de 2021, que visa estabelecer as diretrizes e os requisitos que permitam a adaptação das condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores, de modo a proporcionar conforto, segurança, saúde e desempenho eficiente no trabalho. No seu item 17.8 - condições de conforto no ambiente de trabalho, a norma estabelece que o nível de ruído de fundo para o conforto deve respeitar os valores de referência para ambientes internos, de acordo com sua finalidade de uso, estabelecidos em normas técnicas oficiais. Além disso, determina que, para os demais casos, o nível de ruído de fundo aceitável, para efeito de conforto acústico, será de até 65 dB(A), nível de pressão sonora contínuo equivalente, ponderado em A e no circuito de resposta Slow (S).

Justi *et al.* (2021), em seu estudo sobre a relação entre qualidade de vida e ruído ocupacional, reforçaram a conclusão de Ladeia *et al.* (2019), apontando que a exposição ao ruído, de modo direto, causa perda auditiva. Essa incapacidade de perceber os sons ambientais limita o funcionamento psicossocial do indivíduo, o que manifesta dificuldades na convivência familiar e social, interferindo diretamente na qualidade de vida do indivíduo. Neste contexto, é importante ressaltar que, embora fabricados com foco no uso residencial, muitos eletrodomésticos também são utilizados em ambientes de trabalho, a exemplo de secadores de cabelo, em salões

de beleza, aspiradores de pó, em lava jatos, e liquidificadores em cozinhas industriais, sendo importante observar a exposição a esses tipos de aparelho.

Estudos sobre os efeitos do ruído ambiental no organismo humano relatam que, além de diversos, os danos podem ser irreversíveis. Há o efeito fisiológico direto, e o efeito não fisiológico, como respostas a um alerta sonoro. Além da perda auditiva direta, alguns dos transtornos neurológicos que podem surgir, quando os indivíduos estão submetidos a elevados níveis de ruído (acima de 70 dB), são tremores, aparecimento de vertigem e náusea, e entre os transtornos cardiovasculares, estão a taquicardia e a variação na pressão arterial. É importante ressaltar que inclusive nas horas de lazer as pessoas podem estar expostas a ruídos desse nível (Gannouni, et al. 2024; Pimenta et al., 2021; Do Carmo, 1999).

Visando minimizar essas consequências da elevada intensidade de ruído no ouvido humano, a Norma Regulamentadora número 09 (NR-09) (2020), para o controle da exposição ao ruído ocupacional, cita as seguintes possibilidades: controlar a fonte, quando possível, optando, durante a fase de projeto de construção ou produção, pelo uso de máquinas e equipamentos com menor geração de ruído. Quando não for possível, pode-se ainda controlar o meio onde as fontes geradoras de ruído estão instaladas, com a instalação de materiais absorvedores, para que sejam capazes de absorver parte do ruído gerado pelos equipamentos. Quando, ainda assim, essas ações não forem suficientes, para os níveis de exposição estabelecidos na NR-15 (2021), deve-se adotar medidas para controle no indivíduo, ou seja, o uso de equipamento de proteção individual (EPI), como os abafadores e protetores auriculares.

## 2.2 MATERIAIS ABSORVEDORES DE RUÍDO

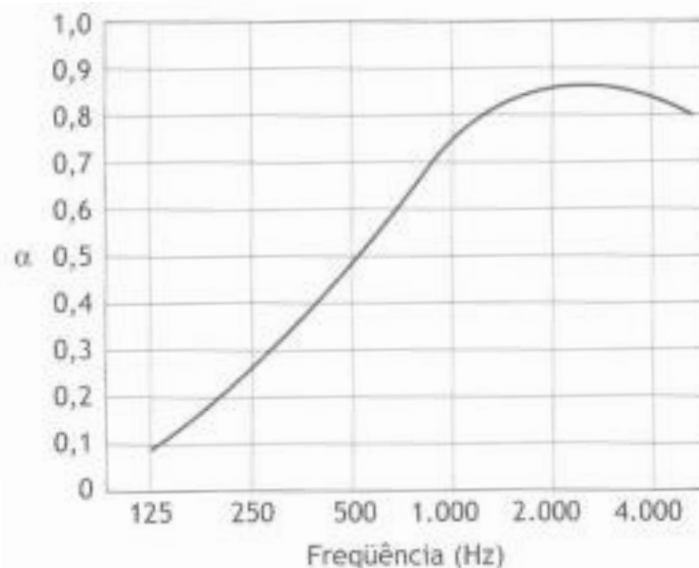
Uma forma de controlar o excesso de ruído, seja na fonte ou no receptor, é por meio da utilização de materiais com propriedades absorvedoras de som, que criam uma espécie de barreira entre a onda sonora e o receptor. Como exemplo, tem-se aplicações na construção civil, em que essa redução é efetuada de modo mais coletivo, ou seja, em um cômodo, sala ou prédio inteiro. Já na indústria é comum usar revestimentos atenuadores ao redor dos equipamentos com nível de intensidade sonora mais elevado ou, quando isso não é possível, utiliza-se esses materiais absorvedores na fabricação de equipamentos de proteção individual, protegendo

diretamente o receptor. Conforme demonstrado na Figura 1, o conceito utilizado para medir a capacidade de dissipação da energia sonora incidente de um material é o coeficiente de absorção sonora, comumente representado pela letra grega  $\alpha$ . Este coeficiente  $\alpha$  pode variar de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 for o valor, melhor será a capacidade de absorção sonora do material (Borges e Rodrigues, 2016).

A definição do material a ser utilizado como absorvedor dependerá da faixa de frequência do som a ser absorvido, das características do ambiente ou do equipamento gerador de som, e dos requisitos estéticos da aplicação. Os materiais comumente utilizados neste tipo de aplicação são os fibrosos e os porosos. Um exemplo de material poroso é a espuma de poliuretano, usada em muitos abafadores de ruído. Dentre os materiais fibrosos, além das fibras naturais e sintéticas, estão as fibras minerais, como a lã de rocha e lã de vidro, amplamente empregadas na construção civil, para isolamento de cômodos, e na indústria, para atenuar o ruído dos equipamentos (Tang e Yan, 2017).

Bistafa (2018) demonstrou que o coeficiente de absorção sonora dos materiais porosos e fibrosos varia em função da frequência, conforme a Figura 2, e é uma propriedade relacionada à resistência ao fluxo de ar. Além de ser afetado pela frequência, no caso dos materiais sólidos está diretamente relacionado à rugosidade superficial. Desta maneira, para um mesmo valor de frequência, quanto mais rugosa for a superfície, maior será seu coeficiente de absorção.

Figura 2 - Variação típica do coeficiente de absorção sonora, em função da frequência, de materiais porosos e fibrosos.



Fonte: Gonzales, 1980, apud BISTAFA, 2006.



O valor de  $\alpha$  (coeficiente de absorção sonora) pode ser calculado pela Equação (1), proposta por Bistafa (2018), conhecendo-se a intensidade sonora absorvida ( $I_{\text{absorvida}}$ ), determinada pela diferença entre a intensidade do som incidente ( $I_{\text{incidente}}$ ) e a intensidade do som refletida ( $I_{\text{refletida}}$ ), ambas medidas experimentalmente com um tubo de impedância contendo a amostra do material em avaliação:

$$\alpha = \frac{I_{\text{absorvida}}}{I_{\text{incidente}}} = \frac{I_{\text{incidente}} - I_{\text{refletida}}}{I_{\text{incidente}}} = 1 - \frac{I_{\text{refletida}}}{I_{\text{incidente}}} \quad (1)$$

Dentre os mecanismos físicos de transformação da energia sonora em calor, a perda de energia por fricção é bastante usual. De modo geral, conforme explica Borges e Rodrigues (2018), ao incidir sobre um material poroso, a onda sonora provoca vibração do ar presente nesses poros e, por meio do atrito, transforma parte dessa energia em calor. Mareze (2013) especifica que os materiais porosos são constituídos pela fase sólida, referente à estrutura do material, e por uma fase fluida, contida no interior dos poros. Na maioria dos materiais absorvedores de uso comum, em condição atmosférica padrão, a fase fluida é formada pelo ar contido nos poros do material. Segundo Bistafa (2018), o processo de atenuação em função do ar atmosférico se divide em dois processos: o macroscópico e o microscópico. O primeiro se refere à condução do calor e ao atrito viscoso entre o ar e a onda sonora. Já o segundo, diz respeito à relaxação térmica molecular, que ocorre quando cada molécula, em estado de desequilíbrio da energia vibracional interna, possui uma tendência a absorver parte da energia da onda, distribuindo-a entre seus modos energéticos até alcançar o equilíbrio.

Já nos materiais fibrosos são levadas em consideração, dentre algumas características, a densidade, a porosidade e a espessura e tamanho da fibra. A maneira como as fibras são arranjadas permite que a onda sonora se propague em direções aleatórias. Tang e Yan (2017), em seu estudo sobre a capacidade de absorção sonora dos materiais fibrosos, afirmaram que a absorção ocorre devido à vibração das fibras. Sendo assim, a energia da onda sonora é dissipada em forma de movimento, reduzindo sua energia e capacidade de propagação.

Há uma ampla gama de materiais, cujas características se enquadram em uma dessas duas categorias mencionadas: os fibrosos e os porosos. Além disso, pode-se variar o modo de aplicação para um mesmo material base. Por exemplo, o poliuretano

(PU), que possui porosidade inerente, pode ser aplicado em sua forma rígida, ou em sua forma mais maleável, como é o caso das espumas utilizadas nos abafadores auriculares.

### 2.3 RESINA DE POLIURETANO

Dentro do conjunto de possibilidades de emprego de materiais porosos, este trabalho utiliza a resina de poliuretano como matriz para a obtenção do compósito. Segundo Silva (2003), os poliuretanos foram desenvolvidos em 1937, por Otto Bayer, patenteados pela atual companhia Bayer de Leverkusen (Alemanha). Desde então, vem sendo desenvolvidas pesquisas sobre as diferentes formas de comercialização e aplicação desses materiais como espumas rígidas, adesivos, tintas, elastômeros, espumas flexíveis, entre outras.

As resinas de poliuretano tanto podem ser produzidas a partir do petróleo, como de óleos vegetais. Este tipo de resina pode ser comercializado na forma bicomponente, em que um deles é o pré-polímero (isocianato), e o outro, um polioliol. A

Figura 3 ilustra um exemplo de reação de obtenção do poliuretano. Ao realizar a mistura dos dois componentes, é iniciada a reação de polimerização. A concentração de polioliol definirá se o poliuretano resultante será mais ou menos rígido.

Figura 3 - Reação de síntese do poliuretano.



Fonte: Cangemi, Santos e Claro, 2009, p.160.

Oliveira (2021) chamou à atenção para uma reação que pode ocorrer em paralelo à reação de polimerização. Se trata da reação do isocianato com água, que libera dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), criando poros e possibilitando a expansão do material. A depender da finalidade da resina, esses poros podem ser prejudiciais para o desempenho, como no caso de aplicações em que os materiais sofrerão esforços mecânicos, pois isso pode causar a formação de zonas frágeis (Dias *et al.*, 2023). A mesma autora reforça que a resina de PU não é nociva ao ser humano nem ao meio ambiente.

Dentre as aplicações da resina de poliuretano bicomponente, Miranda (2016) destacou sua utilização para a fabricação de moldes e protótipos em geral, devido à

sua estabilidade dimensional e à sua rápida cura, em temperatura ambiente. O poliuretano também é empregado como isolante térmico para ambientes, em função do seu baixo valor de condutibilidade térmica.

Em seu estudo utilizando resina de poliuretano bicomponente para reparo em dormentes de concreto, Dias *et al.* (2023) observaram, durante as análises termogravimétricas, que a temperatura de início de degradação do material era 355,37°C. Isso mostrou que há uma ampla faixa de condições térmicas em que o material poderia ser aplicado, sem sofrer deterioração. Por outro lado, apesar da boa resistência térmica, os resultados de resistência à abrasão não foram satisfatórios, segundo os autores.

Rabello *et al.* (2019), em seu estudo sobre a produção de tijolos a partir de vermiculita e poliuretano, verificou que, quanto maior a concentração em massa da vermiculita, maior a capacidade de absorção sonora, chegando a reduzir 56% do som emitido, em concentrações de 80%, em massa, de vermiculita. Além disso, a adição da vermiculita proporcionou maior estabilidade térmica ao compósito, o que foi identificado por análise termogravimétrica.

## 2.4 VERMICULITA

Ainda em relação aos materiais porosos, um importante material cerâmico, com uma diversidade de aplicações, inclusive para absorção de ruído, é a vermiculita expandida. Um mineral hidratado, formado por silicato de alumínio, magnésio e ferro, de estrutura química  $[(Mg, Fe^{+2}, Al)_3 (Al, Si)_4 O_{10}(OH)_2 4H_2O]$ , conforme descrito por Carvalhaes (2015). Quando submetida ao aquecimento, as moléculas de água se desprendem, dando origem a uma estrutura micáceo-lamelar e clivagem basal, característica de minerais que possuem sua estrutura cristalina separada em camadas paralelas, que é um aspecto comum na família das micas. Como resultado, obtém-se um produto com baixa densidade, capacidade de isolamento acústica, térmica e elétrica. Outras características importantes da vermiculita englobam o fato de não ser nociva à saúde e nem se decompor com facilidade (Carvalhaes, 2015). O termo vermiculita é utilizado comercialmente para classificar cerca de 19 variedades de silicatos hidratados de magnésio e alumínio, contendo também outros elementos.

A vermiculita é extraída em zonas de complexos máficos-ultramáficos, aqueles onde são predominantes os elementos químicos pesados, como o ferro e o

mangânês, e pobres em sílica. Além das zonas de carbonatitos, rochas compostas predominantemente de carbonáticos. O Brasil abriga 10% da reserva mundial de vermiculita. Esses 10% estão distribuídos nos estados de Goiás, Paraíba, Bahia, Piauí e Pernambuco, segundo dados do sumário mineral publicado por Cavalhaes (2014), sendo que o processo de extração é executado a céu aberto, ocorrendo maior produção nos meses mais secos. Sobre os dados mundiais, o mesmo autor destacou a produção de vermiculita na África do Sul, classificada como a maior produtora em 2014, seguida dos Estados Unidos, China, Índia e Rússia.

Ritz, Zdrávková e Valášková (2014), afirmam que a vermiculita pode ser encontrada em quatro tipos de rochas, sendo as ultramáficas e máficas as jazidas comerciais mais comuns, podendo aparecer também em rochas de gnaiss e xisto, rochas de carbonato e rochas graníticas, tendo cada uma variação de características. Após extração da rocha, o processo de lavra é, geralmente, realizado na própria mina, e o material é encaminhado para etapa de escarificação por esteiras, para em seguida ser transportado às usinas de processamento. Nesta última etapa, o mineral é tratado com base em sua concentração de vermiculita, e peneirado conforme granulometria desejada. Após esse processo, o mineral é aquecido a cerca de 900°C, em que sofrerá o processo de expansão térmica, devido à evaporação das moléculas de água presentes entre as camadas, transformando-se em vermiculita expandida. Os vazios formados pelas moléculas de água evaporadas são responsáveis pela porosidade, e conferem baixa densidade ao produto (De Oliveira, 2017).

Conforme destacado no estudo realizado por França *et al.* (2016), a vermiculita expandida é usualmente empregada como material absorvente na agricultura, material isolante termoacústico, como adsorvente no tratamento de efluentes, em siderurgia e fundição e, em estudos mais recentes, na fabricação de elementos de fricção. Cavalhaes (2015) reforça que as propriedades físicas da vermiculita, que permitem essa ampla gama de aplicações são decorrentes de sua estrutura cristalina. Além do fato de ser um material que não se decompõe ou deteriora, sendo inodoro, e não prejudicial à saúde. Em 2014, o principal consumo de vermiculita no Brasil foi na agricultura, seguido pelo uso na construção civil, fabricação de isolantes térmicos e de isolantes acústicos.

Em seus estudos sobre isolantes acústicos, Rezende *et al.* (2022) utilizou a vermiculita, em forma de placas, para a aplicação como absorvente de som em paredes. Empregando placas de 24 mm de espessura, obtiveram um valor de

coeficiente de absorção sonora de até 0,87, para uma frequência de 3000 Hz. Neste mesmo estudo, foram comparadas amostras de lã de PET e amostras combinadas de camada de lã de PET com vermiculita. De acordo com os resultados de absorção, a vermiculita apresentou um desempenho superior ao da lã de PET. Por outro lado, a combinação das duas placas também apresentou bom desempenho de absorção sonora.

## 2.5 FIBRAS NATURAIS

No que se refere aos materiais fibrosos, as fibras minerais, amplamente conhecidas, como o amianto, lã de vidro e outras, têm como limitadores o descarte, a nocividade à saúde humana e a maior densidade, quando comparadas às fibras naturais (Taiwo *et al.*, 2019). Neste contexto, surgiram diversos estudos para aplicação de fibras vegetais em substituição às funções das fibras minerais como absorvedores de som. Dentre suas vantagens, está o fato de a maioria das fibras naturais serem subprodutos agrícolas, o que tornam seu baixo custo bastante atrativo.

Da Silva *et al.* (2019), em seus estudos sobre as fibras de sisal, coco e cana-de-açúcar, relataram que, embora possuam estruturas microscópicas diferentes, as fibras de coco e sisal apresentaram coeficientes de absorção semelhantes. A fibra da cana-de-açúcar, por sua vez, apresentou valor de coeficiente de absorção mais elevado, para uma faixa de frequência mais ampla, em relação às outras duas. Taiwo *et al.* (2019) compararam as características de diversas fibras naturais e descobriram que a fibra do cânhamo possui melhores propriedades acústicas do que a fibra de vidro.

Por ser uma planta que se desenvolve em climas tropicais, o coqueiro é encontrado de maneira abundante no Brasil, especialmente no litoral da Bahia. Uma vez que é uma matéria-prima fácil de encontrar na cidade de Salvador, e de baixo custo, a fibra de coco foi a fibra natural escolhida para produção do compósito neste trabalho. Bhingare e Prakash (2021) encontraram que a fibra de coco apresentou boa capacidade de absorção sonora para faixas de frequência em torno de 2700-3100 Hz. Apesar de apresentarem baixa capacidade de absorção em baixas frequências, de modo geral a fibra de coco se mostrou efetiva para absorção acústica.

Pesquisando sobre fibras vegetais, Da Silva *et al.* (2019) identificaram como ponto negativo a dificuldade de generalização das propriedades acústicas das fibras

estudadas, devido à falta de homogeneidade das amostras. Isso ocorre normalmente com materiais de origem vegetal, que costumam sofrer variações nas propriedades de acordo com a estação do ano, características do solo e do clima de onde foram plantados. A densidade é mais um fator que não é constante, pois uma fibra vegetal de mesma espécie biológica pode ter maior teor de óleo do que outra de safra diferente. Taiwo *et al.* (2019), destacou como desvantagens a maior capacidade de absorção de umidade, menor resistência ao fogo e menor resistência mecânica, quando comparadas às fibras minerais. Além disso, alguns tipos de fibra estão sujeitos ao ataque de insetos e roedores, como os cupins.

Olukunle *et al.* (2018) utilizaram a fibra de coco combinada com concreto para aplicações acústicas na construção civil. O concreto foi utilizado como matriz ligante e a fibra de coco como reforço, que além da propriedade absorvedora de som, serve para evitar a ocorrência de rachaduras no concreto. Sempre que necessário suprir a deficiência de um material ou melhorar suas propriedades, é comum utilizar materiais de maneira combinada. Assim, a fibra natural é, geralmente, combinada com algum tipo de ligante. Uma vez sintetizados, esses materiais combinados tornam-se materiais compósitos.

## 2.6 MATERIAIS COMPÓSITOS

O avanço da Engenharia de Materiais possibilitou estudos para solucionar problemas de aplicações quando não é possível a utilização de um único material para o alcance das propriedades necessárias. Dessa maneira, são realizadas combinações de diferentes materiais e técnicas de processamento, para melhorar as propriedades e o desempenho do produto desejado. Essa combinação de materiais insolúveis entre si é conhecida como compósito.

Na estrutura do compósito as fases de reforço normalmente são mais rígidas e resistentes, enquanto a outra fase, menos rígida e menos resistente, responsável por envolver os reforços, é a matriz. Os reforços, do ponto de vista de característica estrutural, devem suportar os carregamentos transmitidos pela matriz, e a esta, deve atuar como ligante para manter os reforços unidos e transferir a tensão de um para o outro (Da Silva e Cavalcante, 2016). Os materiais compósitos podem ser estruturados como aglomerados, revestimentos superficiais ou materiais reforçados. É comum a utilização de fibras como reforço em matrizes que permitam a sustentação dessas

fibras. A mistura de vários materiais também pode ser feita por aglomeração de partículas, como é o caso do concreto. Enriquecendo a definição, Santiago (2002, apud Bernardi, 2003), define materiais compósitos como aqueles formados pela combinação de dois ou mais materiais de qualquer natureza, de modo que as propriedades do material resultante são superiores às de seus constituintes de origem.

Em concordância com Santiago (2022), Callister e Rethwisch (2018) descrevem que, em se tratando de materiais multifásicos, os compósitos geralmente são formados por dois ou mais constituintes, onde uma fase é a matriz, definida como sendo a fase contínua que envolve o outro constituinte, que é conhecido como reforço ou fase dispersa. Acrescentam, ainda, que há quatro principais classificações para os compósitos: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras, compósitos estruturais e nanocompósitos, além de suas subclassificações, como esquematizado na Figura 4. Para as classificações destacadas na Figura 4, o reforço por partículas do tipo grande, é utilizado quando as interações da partícula e da matriz não podem ser tratadas a nível molecular ou atômico. Neste tipo de interação as partículas, geralmente, são mais duras e rígidas o que, além de restringir o movimento da matriz, confere aumento da resistência mecânica, quando comparado à matriz pura (Callister e Rethwisch, 2018).

Figura 4 - Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos.



Fonte: Callister e Rethwisch, 2018, p.584.

Smith e Hashemi (2013) ressaltam que se as partículas utilizadas como reforço

possuírem geometria circular e uniforme, não é possível o preenchimento de todo o recipiente utilizado como molde, restando espaços vazios, que dão origem a certa porosidade no material. Para a absorção acústica, a porosidade formada por estes vazios é desejada. Além disso, as partículas de vermiculita possuem microestrutura porosa, que deverá ser mantida após a ligação com a matriz polimérica. Lima, Feitosa e Ricardo (2008) desenvolveram um nanocompósito, à base de poliácridamida e vermiculita, em que foi verificada a grande capacidade de absorção de água pela presença da vermiculita, mantendo sua estrutura interna microporosa.

Em relação à utilização das fibras como reforço, é comum fazê-lo em compósitos com matrizes poliméricas. No caso da aplicação das fibras curtas, orientadas aleatoriamente, Silva (2003) evidenciou que, embora os compósitos com fibras contínuas possuam melhores propriedades mecânicas, as fibras curtas, aleatórias, são mais fáceis de processar, além de despender menos. Como o compósito desenvolvido neste trabalho não será submetido a esforços mecânicos durante a aplicação pretendida, que é a de absorção de ruídos em eletrodomésticos, optou-se pelo método de fibras curtas, facilitando o processamento e a formação de poros.

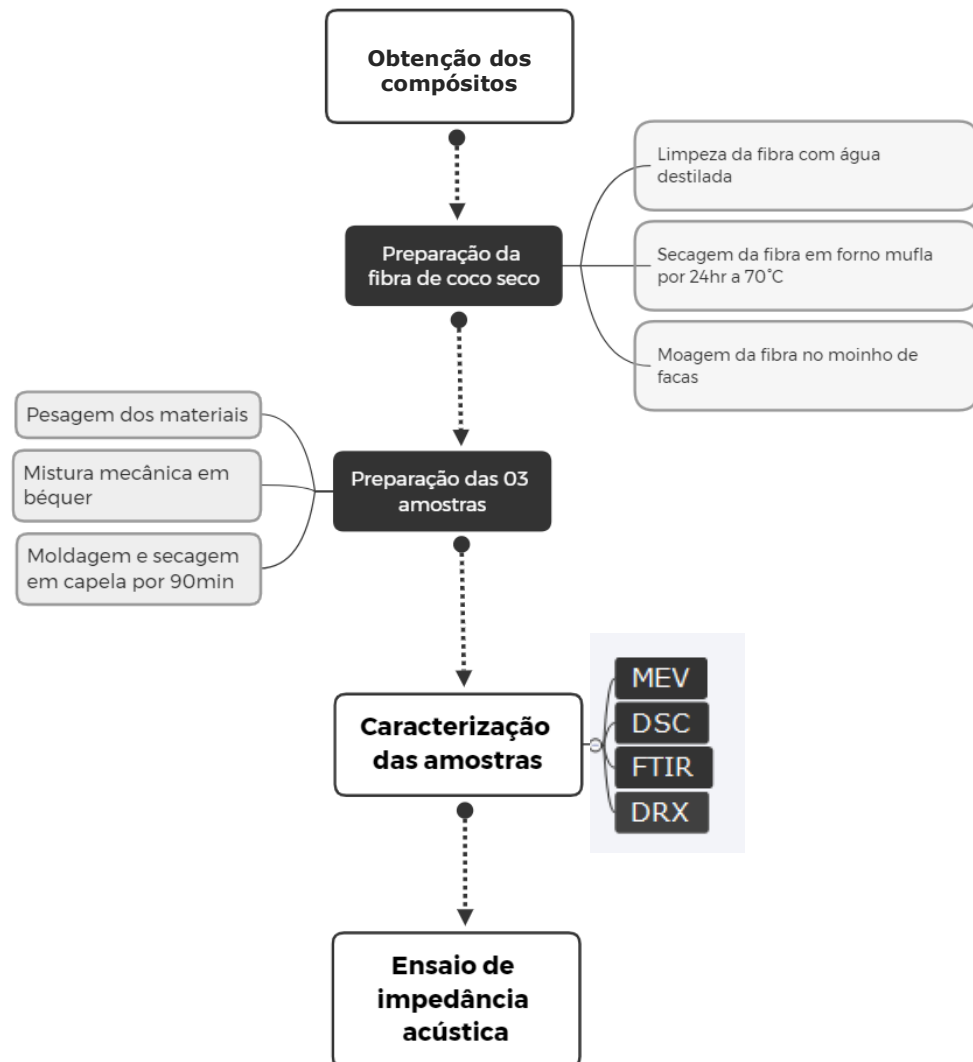
Embora o poliuretano já possua propriedades de absorção acústica, será necessário aumentar o tamanho dos poros formados no compósito, de modo a possibilitar a absorção sonora em outras faixas de frequência de interesse, além de aumentar a resistência térmica, com o intuito de estender a aplicação do material desenvolvido a outros eletrodomésticos, além do liquidificador.

### **3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

Neste capítulo, será apresentada a descrição detalhada dos materiais utilizados e das etapas seguidas para a síntese dos compósitos, bem como das técnicas empregadas na caracterização das amostras, visando posterior comparação dos resultados obtidos com a capacidade de absorção sonora dos materiais. As etapas da metodologia, que envolvem a síntese, caracterização e ensaios de impedância acústica dos compósitos, estão sumarizadas no fluxograma da Figura 5.



Figura 5 - Fluxograma resumido da metodologia experimental.



Fonte: Própria Autora, 2022.

### 3.1 PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS

#### 3.1.1 Materiais

Para a síntese dos compósitos, utilizou-se como precursores: vermiculita expandida superfina, fibra de coco seco e resina de poliuretano. A vermiculita expandida, com granulometria classificada como superfina (diâmetro médio dos grãos - entre 0,30 mm e 2,40 mm), escolhida como reforço particulado do compósito, pode ser vista na Figura 6, na forma em que foi utilizada nas preparações.

Figura 6 – Imagem da vermiculita expandida superfina.



Fonte: Própria Autora, 2022.

A fibra de coco seco foi utilizada como reforço por fibras, orientadas aleatoriamente. Na Figura 7 pode ser observada a imagem da fibra de coco *in natura*, que foi coletada na região da Costa do Dendê, no litoral do sul da Bahia.

Figura 7 - Imagem da fibra de coco seco *in natura*.



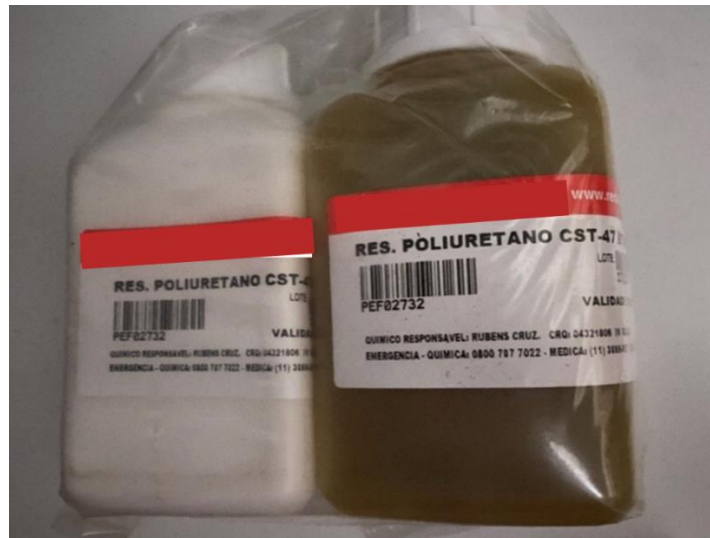
Fonte: Própria Autora, 2022.

A resina de poliuretano que foi utilizada como matriz do compósito, mostrada na imagem da Figura 8, é do tipo CST-47. Trata-se de um sistema à base de poliuretano modificado, que possibilita alta dureza e baixa emissão de calor durante a cura, além da estrutura microporosa. É composta pela Resina (A) e o Endurecedor (B), sendo a proporção da mistura de 80% de resina para 20% de endurecedor. A resina foi colocada nas proporções correspondentes, conforme detalhado mais adiante, na

Tabela 1. Os componentes da resina foram misturados mecanicamente, junto

com os demais materiais do compósito.

Figura 8 - Resina de poliuretano CST-47 (A) à esquerda, e endurecedor (B) à direita.



Fonte: Própria Autora, 2022.

### 3.1.2 Métodos

#### 3.1.2.1 Processamento da fibra de coco

As cascas de coco coletadas foram desmembradas manualmente em partes menores, como na Figura 9a, e foram, então, mergulhadas em um recipiente com água destilada suficiente para cobrir todo o material. Após esse processo, a água destilada foi escoada e os pedaços das cascas de coco foram dispostos em 2 béqueres, e secos em estufa (Figura 9b), a 70°C, por 24 horas. As cascas dos cocos secas foram, posteriormente, processadas em um moinho de facas (Figura 10), obtendo-se fibras de tamanhos menores, como mostrado na imagem da Figura 11.

Figura 9 – Cascas de coco limpas e desfiadas (a), e secas em estufa (b).



Fonte: Própria Autora, 2022.

Figura 10 - Moinho de facas utilizado no processamento da fibra de coco seco.



Fonte: Própria Autora, 2022.

Figura 11 - Fibra de coco seco após moagem.



Fonte: Própria Autora, 2022.

### 3.1.2.2 Obtenção dos compósitos

Neste trabalho, será utilizada uma matriz polimérica de resina de poliuretano, e dois reforços: a vermiculita expandida superfina, como reforço particulado, e a fibra de coco seco, como reforço por fibras, conforme circulos em amarelo na Figura 4, como classificação macro. Em vermelho, na Figura 4, estão as classificações dos tipos de reforços, definidos para os compósitos deste trabalho, em que, no reforço por partículas, estas são consideradas grandes.

Foram preparadas três amostras diferentes: V10F5, V20F10 e V26F13, contendo os três materiais, a vermiculita, a fibra de coco e a resina de poliuretano, em proporções mássicas distintas, como mostrado na Tabela 1, mas mantendo-se a massa total constante. A quantidade inicial de reforço foi escolhida com base em trabalhos similares, que utilizaram reforços de fibra e minerais em matrizes poliméricas. Como exemplos, podem ser citados os estudos de Sousa *et al.* (2019) que, ao sintetizar compósitos, variou o percentual de reforço entre 10 e 20%, em massa, e de Liu *et al.* (2014), que avaliaram a influência da adição de 5 a 20%, em massa, de vermiculita nos coeficientes de absorção sonora de compósitos à base de espuma de poliuretano.

Nesta etapa, os materiais de partida foram pesados, como mostrado na Figura 12a, e transferidos para um béquer de vidro, a fim de obter cada um dos compósitos nas proporções indicadas na Tabela 1. Em seguida, misturou-se os precursores manualmente com auxílio de uma espátula metálica, onde ocorreu a reação química do poliuretano, de acordo com a Figura 12b. Cada uma das amostras foi disposta em um molde de aço carbono de 2" de diâmetro por 20 mm de espessura, e mantida em

capela para secagem na temperatura ambiente, como na Figura 13. Os compósitos permaneceram em repouso para secagem por 90 min e, então, foram desmoldados (Figura 14), identificados e reservados para posterior caracterização.

Tabela 1 - Composição em massa e em percentual das amostras.

Amostra Material	V10F5		V20F10		V26F13	
	Massa (g)	Teor (%)	Massa (g)	Teor (%)	Massa (g)	Teor (%)
Vermiculita	10	5%	20	10%	26	13%
Fibra de coco seco	5	3%	10	5%	13	7%
Poliuretano A	100	51%	92	48%	87	44%
Poliuretano B	80	41%	74	38%	69	36%
Total	195	100%	195	100%	195	100%

Fonte: Própria Autora, 2024.

Figura 12 - Pesagem dos materiais (a) e mistura com espátula (b) para obter o compósito.



(a)

(b)

Fonte: Própria Autora, 2022.

Figura 13 - Secagem do compósito no molde, em temperatura ambiente, dentro da capela.



Fonte: Própria Autora, 2022.

Figura 14 - Amostras dos compósitos após secagem e retirada do molde: V10F5, V20F10 e V26F13, da esquerda para a direita.



Fonte: Própria Autora, 2022.

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

### 3.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Um microscópio eletrônico de varredura, marca Tescan, modelo LMU – Vega 3 foi utilizado para a avaliação da microestrutura dos compósitos sintetizados, no Laboratório de Caracterização de Materiais do IFBA, Campus Salvador. As amostras foram cortadas em tamanhos menores, de acordo com o padrão do porta amostras do equipamento. Como os materiais utilizados na síntese dos compósitos não são condutores, foi necessário realizar a metalização das amostras antes de levá-las ao microscópio (Figura 15 e Figura 16).

O ensaio de MEV foi realizado em 15 kV, e as imagens das amostras foram gravadas com ampliações diversas, variando entre 25 e 5.000 vezes. Foi realizada a medição do tamanho de alguns poros, nas imagens com magnificações de cerca de 50 vezes, para uma avaliação qualitativa do efeito da variação da composição na porosidade do material compósito obtido.

Figura 15 - Imagens da etapa de metalização da amostra (a), efetuada antes dos experimentos de MEV, e do metalizador empregado (b).



(a)

(b)

Fonte: Própria Autora, 2022.

Figura 16 - Imagens das amostras metalizadas (a) e sendo acopladas ao microscópio (b).



(a)

(b)

Fonte: Própria Autora, 2022.

### 3.2.2 Espectroscopia no infravermelho com transformadas de Fourier (FTIR)

Os experimentos de FTIR foram realizados em um equipamento da Perkin Elmer, modelo *Spectrum Two*, Figura 17, disponível no laboratório de química do



Instituto Federal da Bahia, campus Salvador. Os espectros foram obtidos por medidas de transmitância, utilizando-se a técnica de pastilhamento com KBr. Antes das análises, uma pequena fração da amostra foi raspada, e o pó diluído em um almofariz com KBr (brometo de potássio), em uma proporção de, aproximadamente, 1:100 em massa. Após a confecção da pastilha, efetuou-se a gravação dos espectros no equipamento, na região entre 400 e 4000  $\text{cm}^{-1}$ , conforme capacidade do equipamento e com 32 varreduras para cada amostra.

Figura 17 - Equipamento utilizado nas análises de FTIR.



Fonte: Própria Autora, 2022.

### 3.2.3 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

Análises de DSC dos compósitos obtidos foram realizadas no laboratório de caracterização de materiais do IFBA, Campus Salvador, com o objetivo de avaliar o comportamento termo analítico e as variações de entalpia dos compósitos produzidos. O equipamento utilizado, um DSC-60, da Shimadzu, pode ser visto na

Figura 18.

Antes dos experimentos, as amostras foram cortadas em pedaços pequenos, maceradas em um almofariz, e colocadas em recipientes devidamente identificados. Cerca de 2 mg de amostra foram dispostos em um cadinho de alumínio, e analisados, sob fluxo de gás nitrogênio ( $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ), taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ , e intervalo de temperatura de 25 até  $500^\circ\text{C}$ .

Figura 18 - Equipamentos de análises térmicas: DSC e TG.



Fonte: Própria Autora, 2022.

### 3.2.4 Difração de raios-X (DRX)

As análises de difração de raios-X foram realizadas pela Dra. Doris Ruiz, Universidad de Concepción - UDEC, Concepción, Chile. O ensaio consiste na emissão de raios-X sobre a amostra do material em estudo, de modo que a rede cristalina do material provocará a difração desses raios. Cada estrutura sólida possui um padrão característico, o que permite determinar a(s) fase(s) cristalina(s) presentes no material, por meio da comparação com fichas catalográficas, ou comparar os perfis de materiais com composições similares.

Os experimentos foram realizados em um equipamento Bruker (D4 Endeavor). Antes das análises, os sólidos foram triturados, a fim de homogeneizar o tamanho dos grãos. A varredura foi efetuada à temperatura ambiente, 45 kV e 100 mA, em uma faixa de  $2\theta$  de  $2^\circ$  a  $90^\circ$ . A velocidade de aquecimento foi de  $10^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , realizando-se 0,02 contagens por segundo. Foi utilizada a radiação  $K\alpha$  de Cu ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ).

## 3.3 DETERMINAÇÃO DE IMPEDÂNCIA ACÚSTICA

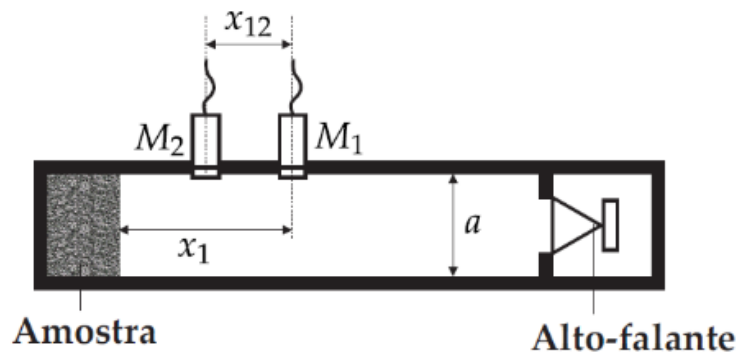
### 3.3.1 Ensaio de impedância acústica

Por meio do ensaio de impedância acústica é possível avaliar a capacidade de absorção, ou seja, determinar o coeficiente de absorção sonora de cada compósito, em cada frequência estudada. A partir desses valores, pode-se comparar o desempenho das amostras e analisar a influência da variação da composição na capacidade de absorção de ruído.

Os experimentos de impedância acústica foram realizados pelo Dr. Paulo Mareze, no laboratório de acústica da Universidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul, empregando um tubo de impedância, conforme ISO 10534-2, que está esquematizado na Figura 19. Para o ensaio, as amostras foram reduzidas em torno mecânico, até 28 mm de diâmetro, que é a medida padrão do tubo utilizado.

Durante as análises, cada uma das três amostras foi posicionada em uma extremidade do tubo, enquanto na outra ficava localizada a fonte sonora (alto-falante), conforme ilustrado na Figura 20, onde um ruído de banda larga era fornecido. O alto-falante era o responsável por excitar o campo acústico no interior do tubo até a amostra. As amostras dos três compósitos foram submetidas ao ensaio, sob as mesmas condições: frequência de 80 a 6300 Hz, temperatura ambiente (26,8°C) e umidade relativa de 49%.

Figura 19 - Desenho esquemático do tubo de impedância.



Fonte: ENGENHARIA ACÚSTICA UFSM, 2020.

Figura 20 - Imagens dos equipamentos usados nas medidas de impedância acústica.



Fonte: Própria Autora, 2023.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados encontrados nos ensaios de caracterização dos compósitos, bem como sua discussão e correlação com os dados dos ensaios de absorção sonora por impedância acústica. Isso torna possível associar as características microestruturais e propriedades físicas (como ponto de fusão, coloração e aspectos morfológicos, e as químicas (como a presença dos elementos da reação de cura do poliuretano), dos materiais à sua capacidade de absorção sonora, bem como permite entender as limitações para a aplicação desejada, de absorção de ruído de eletrodomésticos.

#### 4.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A partir das micrografias obtidas pelas análises de MEV, e respectivas ampliações das imagens de 25 a 4.000 vezes, foi possível observar a microestrutura porosa dos compósitos e de cada material componente, bem como realizar a medição dos tamanhos de alguns dos poros formados.

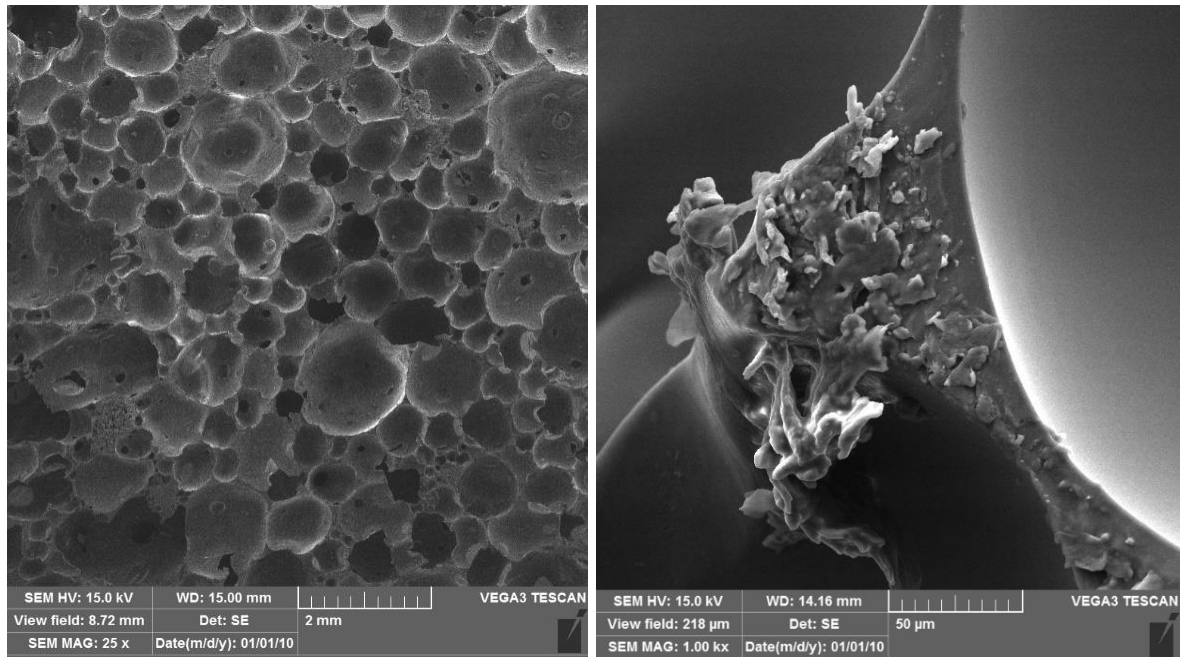
Observou-se que a amostra V10F5, Figura 21a e Figura 22a e b, apresentou uma estrutura superficial predominantemente uniforme, formada por cavidades circulares, devido à liberação de CO<sub>2</sub> durante a cura do poliuretano. Este fenômeno, característico da liberação dos gases, também foi observado por Marinho *et al.* (2013), ao estudar compósitos de poliuretano com partículas de bambu. A morfologia desse compósito demonstrou o acúmulo dos reforços entre as cavidades de poliuretano, conforme demonstrado na ampliação da

Figura 21b.

Na Figura 22 estão destacadas as medidas de alguns dos poros formados entre as cavidades de poliuretano, com tamanho médio de 101,8µm. Com o aumento do teor de vermiculita e de fibra de coco na matriz de poliuretano, para a obtenção dos compósitos V20F10 e V26F13, observou-se que parte da estrutura porosa superficial, identificada na amostra V10F5,

Figura 21a e Figura 22a e b, é modificada, dando origem a arranjos mais desordenados, típicos dos materiais usados como reforço.

Figura 21 – Micrografia da amostra V10F5, com ampliação de 25x (a), e micrografia entre as cavidades, com magnificação de 1.000x (b), mostrando a aglomeração dos reforços.

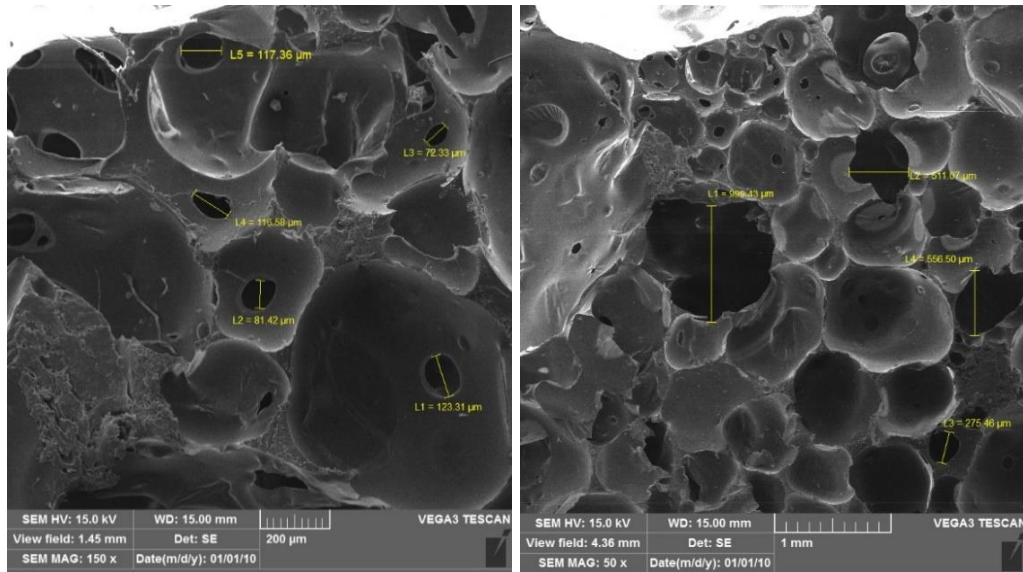


(a)

(b)

Fonte: Própria Autora, 2023.

Figura 22 - Medição dos poros da amostra V10F5: imagens com ampliação de 150x (a) e ampliação de 50x (b).



(a)

(b)

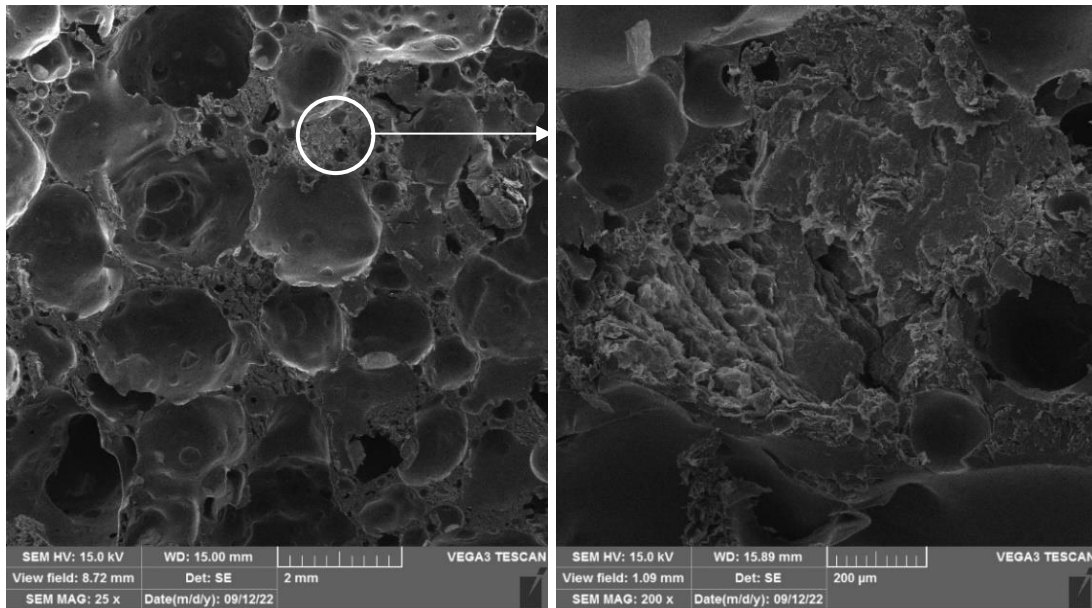
Fonte: Própria Autora, 2023.

A partir de uma ampliação de 25 vezes, Figura 23a, já foi possível notar indícios da estrutura lamelar, sanfonada e vermiforme da vermiculita na amostra V20F10, o que se tornou ainda mais clara com uma magnificação de 200x, Figura 23b. As evidências morfológicas da presença de vermiculita na estrutura foram identificadas em todos os três compósitos produzidos, Figuras 21 a 26, e, possivelmente, esse é um importante atributo para a capacidade de absorção sonora.

As imagens com morfologia típica da vermiculita, obtidas nesse trabalho, foram comparadas com as imagens obtidas por Teodoro, Parabocz e Rocha (2020), ao analisarem a vermiculita expandida pura. Eles descobriram que, após a etapa de cura, as características individuais de cada material do compósito são preservadas.

Na Figura 24a pode ser vista a imagem da fibra de coco seco, ampliada 1000x. Embora haja uma semelhança com a estrutura da vermiculita, na fibra ampliada as faces não apresentam as lâminas, como na vermiculita, mas sim uma heterogeneidade superficial. Aspecto similar foi encontrado por Antunes (2019), ao caracterizar a fibra de coco pura, também com ampliação de 1000x.

Figura 23 - Micrografia da amostra V20F10, com ampliação de 25x (a) e 200x (b).



(a)

(b)

Fonte: Própria Autora, 2023.

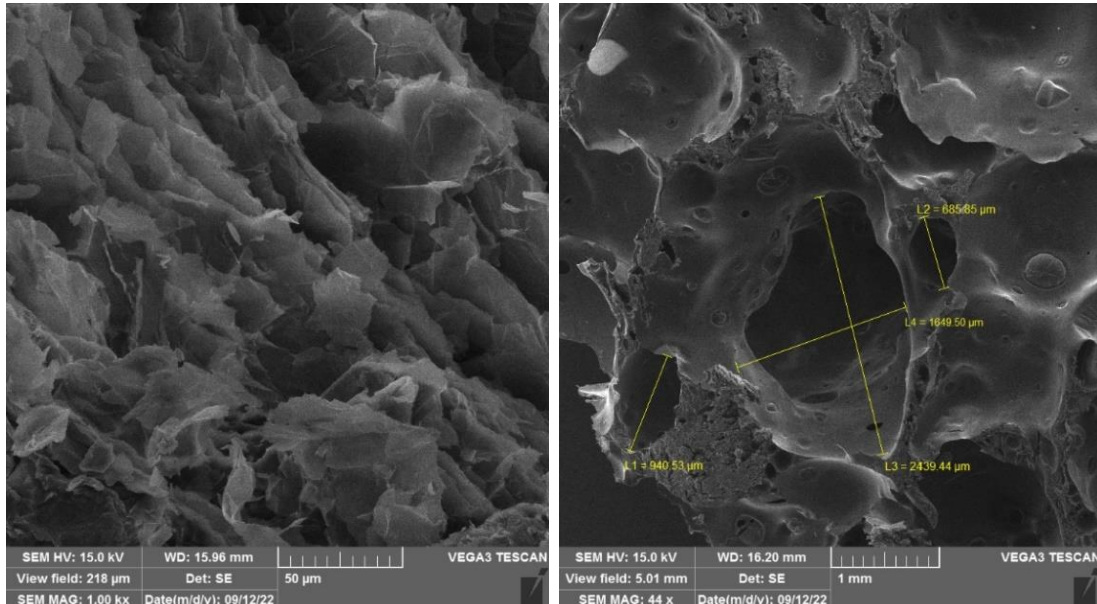
Os tamanhos dos poros medidos pelas imagens da Figura 24b e da figura 26b, variaram bastante em relação ao padrão mais uniforme do compósito V10F5, apresentando valores entre 58 e 2439  $\mu\text{m}$ . A presença de estruturas desordenadas, neste caso, é um aspecto positivo, pois favorece a perda de energia das ondas sonoras, que entram em contato com a superfície do material.

Nas imagens de MEV da amostra V26F13, Figura 25a, não foi possível observar as cavidades circulares uniformes, típicas da expansão do poliuretano, que são formadas durante o processo exotérmico de cura do compósito. Notou-se a presença de uma estrutura desordenada, e a extensão do poliuretano mostrou-se de forma mais plana, diferente do padrão apresentado para a amostra V10F5. Essa diferença na estrutura se deve ao aumento da massa de vermiculita e fibra de coco, e à necessidade de o ligante reajustar a forma de expansão para acomodar toda a quantidade de partículas adicionadas. Este fenômeno também pode ter sido o causador de poros muito pequenos observados apenas nessa amostra, conforme Figura 26b.

Na Figura 25a e b é possível distinguir claramente a fibra de coco seco com seus filamentos típicos, uma característica que é favorável à absorção de ruído. Além de dissipar o movimento através da vibração das fibras, na ampliação da Figura 25b, nota-se que as fibras também possuem sua rugosidade superficial preservada, efeito potencializador da absorção, conforme destacado por Bistafa (2018). Antunes (2019),

fortalece esse conceito, quando cita que a estrutura heterogênea identificada na superfície das fibras, pode beneficiar a dissipação das ondas sonoras.

Figura 24 - Amostra V20F10 com distintas magnificações: (a) 1.000x e (b) 44x, em que foi efetuada a medida do tamanho dos poros.

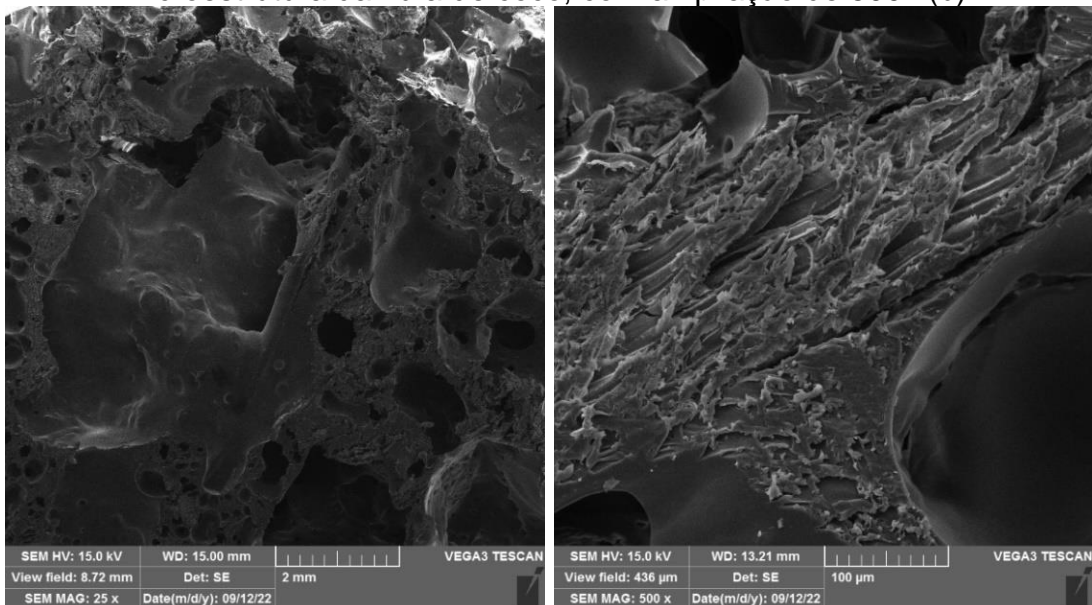


(a)

(b)

Fonte: Própria Autora, 2023.

Figura 25 - Imagens de MEV da amostra V26F13, com ampliação de 25x (a), e da microestrutura da fibra de coco, com ampliação de 500x (b).



(a)

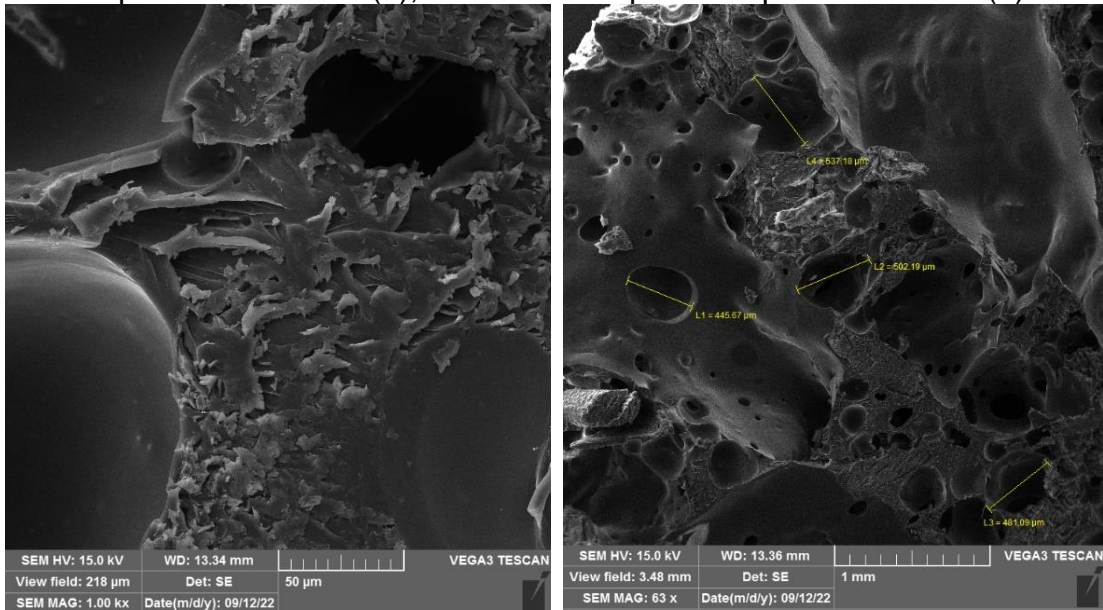
(b)

Fonte: Própria Autora, 2023.

Figura 26 - Imagem da amostra V26F13 demonstrando a presença dos reforços,



ampliada em 1.000x (a), e medida dos poros ampliados em 63x (b).



(a)

(b)

Fonte: Própria Autora, 2023.

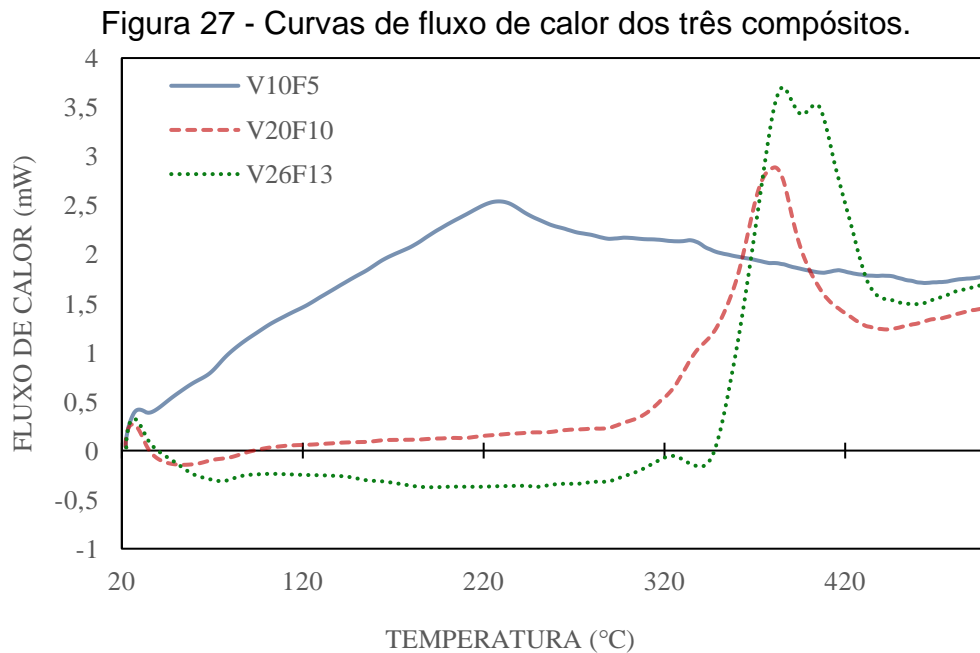
#### 4.2 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)

As curvas de fluxo de calor, em função da temperatura, obtidas dos experimentos de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) com as amostras, são apresentadas na Figura 27.

Elas retratam o comportamento térmico dos três compósitos, ao serem submetidos ao aumento de temperatura. Essa análise foi realizada com o objetivo de determinar a temperatura limite para a aplicação dos compósitos, sem que estes sofram transições de fase ou alterações químicas durante seu uso.

O termograma de DSC para o compósito V10F5 mostrou uma curva sem picos bem definidos durante toda a faixa de temperatura do ensaio (25 a 500°C). Embora o ensaio não tenha sido conclusivo para esta amostra, a inclinação da curva até o pico de 230°C sugere que nessa temperatura ocorre a degradação do material ou possíveis alterações em sua composição química. Entretanto, por demonstrar uma curva instável já a partir de 29°C, não indica uma confiabilidade em utilizar este compósito (V10F5), em temperatura superior a este valor. Provavelmente, foi formada uma estrutura amorfa ou com baixa cristalinidade para o compósito V10F5, o que pode ser atribuído à predominância da matriz de poliuretano, em relação à quantidade dos reforços adicionada. Isso está em concordância com os resultados de Frick e Rochman (2008), que encontraram perfis de DSC similares aos da amostra V10F5

para o poliuretano termoplástico.



Fonte: Própria Autora, 2023.

No caso das amostras V20F10 e V26F13, o comportamento térmico durante o aquecimento foi semelhante, sem variação significativa do fluxo de calor até em torno de 300°C. Embora haja um pequeno deslocamento entre as curvas das duas amostras, ambas apresentaram um deslocamento endotérmico entre 50 e 100°C, referente à evaporação de água na amostra. Esse comportamento para os compósitos com maior teor dos reforços já era esperado, devido à vermiculita se tratar de um mineral estável, e a fibra de coco, conforme observado por Senthilkumar *et al.* (2020) em análises dessa fibra pura e processada, também apresentar estabilidade térmica até 220°C. A amostra V20F10 foi a que apresentou menor presença de umidade, indicada pelo discreto pico endotérmico, no início da curva.

A partir de 245°C, se inicia a formação de um pico exotérmico no termograma da amostra V20F10, indicativo da degradação da amostra, e tendo o seu ponto máximo atingido em 370°C. O termograma do compósito V26F13 apresenta um pico exotérmico de degradação aos 330°C, com ponto máximo aos 380°C. Este compósito foi o que apresentou maior pico de energia de degradação, devido à presença de maior quantidade de matéria orgânica, em relação aos demais compósitos, referente ao mais alto teor de fibra de coco. A temperatura de degradação dos compósitos está

de acordo com a que foi observada por Dias *et al.* (2023) para o início da degradação do poliuretano.

Em comparação com os resultados obtidos por Oliveira *et al.* (2017), em seus estudos sobre uma resina elastomérica de poliuretano pura e compósitos com teor de vermiculita mais baixo do que os utilizados neste trabalho, observou-se que, para os compósitos V20F10 e V26F13, houve um aumento significativo dos valores de temperatura onde se inicia o pico da fusão cristalina e o início da degradação dos materiais. No entanto, esses processos térmicos só acontecem acima de 250°C, o que torna viável a aplicação dos compósitos produzidos para fins em que sejam aquecidos até esse limite.

#### 4.3 ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO (FTIR)

Os ensaios de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foram importantes para identificar os grupos funcionais presentes nas amostras e outros aspectos que permitem conhecer mais sobre sua estrutura química. Desta maneira, pôde-se comparar os compósitos produzidos e avaliar o efeito dos distintos teores das fases dispersas (reforços) em suas características finais.

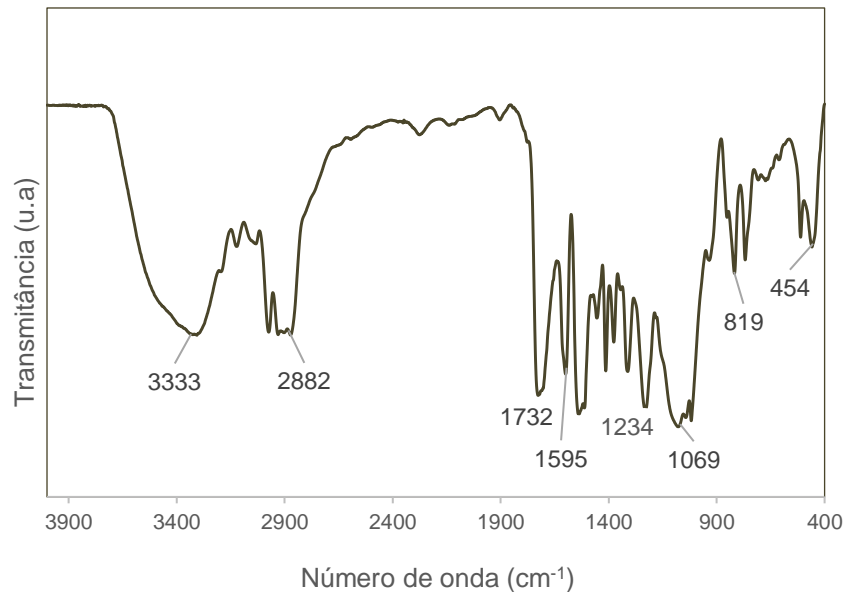
O poliuretano que pode ser produzido a partir da reação de polimerização de isocianatos e polióis, e sua estrutura é formada pela repetição de cada ligação unitária de uretano (-NHCOO-). No espectro de FTIR do compósito V10F5 mostrado na Figura 28, que possui o maior percentual de poliuretano, foi encontrada uma banda larga, em torno de 3333  $\text{cm}^{-1}$ , referente às vibrações de alongamento de N-H e outra banda em 1595  $\text{cm}^{-1}$ , devido à vibração de flexão de N-H; ambas são características do poliuretano. O pico de 1234  $\text{cm}^{-1}$ , representa a vibração do alongamento assimétrico de C-O (do N-CO-O), o que confirma a presença do monômero uretano. Resultados similares foram encontrados por Jiao *et al.* (2013), ao estudar a espuma de poliuretano rígida. Não foram identificados picos em torno de 2269  $\text{cm}^{-1}$ , característicos do isocianato NCO, o que indica que a cura do poliuretano, para a formação do compósito, foi completa.

A banda que aparece em torno de 1069  $\text{cm}^{-1}$ , no perfil de FTIR da V10F5, pode ser devida ao estiramento dos grupos Si-O-Si e Si-O-Al, que são típicos da vermiculita, um mineral à base de aluminossilicato (Teodoro, Parabocz e Rocha, 2020).

Além disso, foi identificada uma banda em 1595  $\text{cm}^{-1}$ , referente a ligações

duplas C=C e estiramentos de carbonilas C=O, também encontrada por Antunes (2019), ao caracterizar a fibra de coco seco *in natura*. Essa banda indica, portanto, a presença dos grupos típicos de compostos de origem vegetal, matéria orgânica, que estão presentes na fibra de coco, tais como a lignina e a celulose.

Figura 28 - Espectro de FTIR da amostra V10F5.



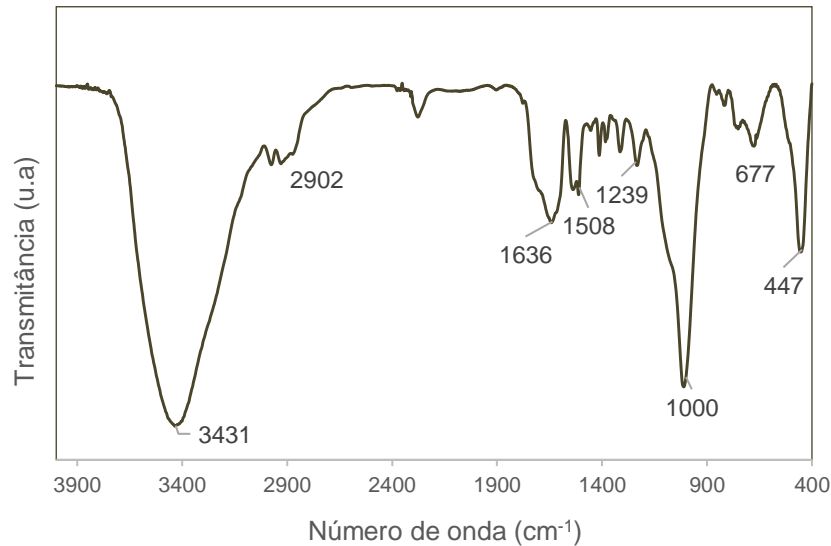
Fonte: Própria Autora, 2023.

Nos espectros dos compósitos V20F10 e V26F13, mostrados nas Figuras 29 e 30, foram identificadas bandas em  $3431\text{ cm}^{-1}$  e  $3401\text{ cm}^{-1}$ , respectivamente, que são características da deformação axial dos grupos O-H. Estes grupos O-H indicam a presença de água nas amostras, o que também foi apontado por Teodoro, Parabocz e Rocha (2020), em seu estudo de caracterização da vermiculita expandida pura. Isso pode ser devido à absorção de umidade pelo material, o que pode ocorrer durante as etapas de cura e armazenamento dos compósitos, em condições normais de temperatura e umidade. Este fato também destaca uma importante característica da vermiculita expandida, relacionada à sua capacidade adsorvente.

O ombro e a banda intensa em torno de  $1000\text{ cm}^{-1}$ , identificados nos espectros de ambos os compósitos, V20F10 e V26F13, foram associados ao modo vibracional de estiramento do grupo Si-O. Do mesmo modo, as bandas em torno de  $677\text{ cm}^{-1}$  e  $669\text{ cm}^{-1}$ , indicadas nas Figuras 29 e 30, e a banda intensa em  $447\text{ cm}^{-1}$  e  $448\text{ cm}^{-1}$ , foram relacionadas, respectivamente, às deformações angulares de grupos Al-O-Si e

Si-O-Si, também oriundos da vermiculita expandida (Chimielarz *et al.*, 2012).

Figura 29 - Espectro de FTIR da amostra V20F10.



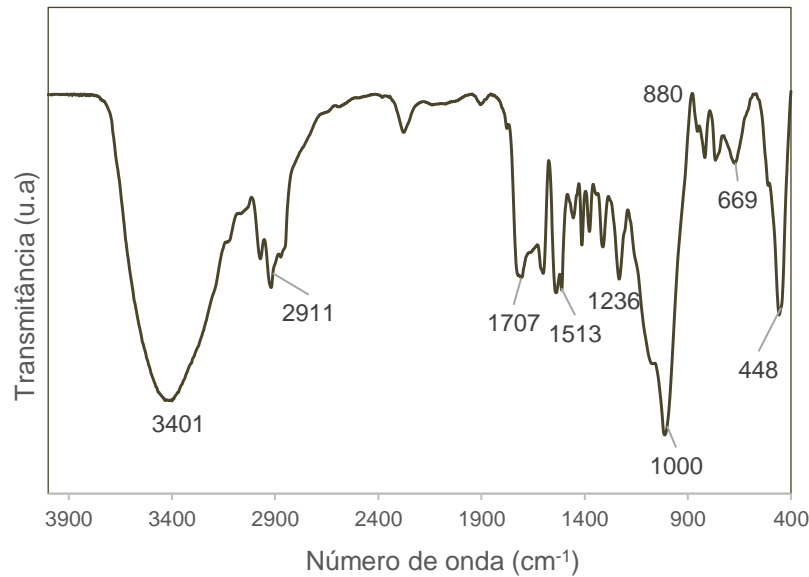
Fonte: Própria Autora, 2023.

Assim como para o compósito V10F5, foi possível identificar, nos espectros das outras duas amostras, as bandas em  $1508\text{ cm}^{-1}$  e  $1513\text{ cm}^{-1}$ , para a V20F10 e a V26F13, respectivamente, relacionadas às ligações duplas de carbono C=C, típicas de anéis aromáticos da lignina, o que pode ser um indício da presença da fibra de coco seco. O estiramento da ligação C-H, representado pelas bandas em  $2902\text{ cm}^{-1}$  e  $2911\text{ cm}^{-1}$ , também encontrados por Souza (2013) ao estudar o espectro do poliuretano. Por fim, a banda relativa ao estiramento da ligação C-O, também do poliuretano, pode ser observada entre  $1234\text{-}1239\text{ cm}^{-1}$  (Melo, 2013).

Em relação à presença do poliuretano, pôde-se observar bandas próximas à região de  $1239\text{ cm}^{-1}$ , para o compósito V20F10, e de  $1236\text{ cm}^{-1}$ , para o compósito V26F13, relacionadas à vibração de estiramento de ésteres, C=O, e à vibração de alongamento assimétrico de C-O, do N-CO-O (Jiao *et al.*, 2013).

As amostras V20F10 e V26F13 apresentaram perfis de FTIR muito parecidos, e a presença de água observada foi relacionada ao maior teor de vermiculita e à sua capacidade adsorvente. De modo geral, foi possível identificar nos três compósitos o comportamento característico da vermiculita, da fibra de coco e do poliuretano, bem como verificar que a resina de poliuretano teve sua cura completa nos três compósitos.

Figura 30 - Espectro de FTIR da amostra V26F13.



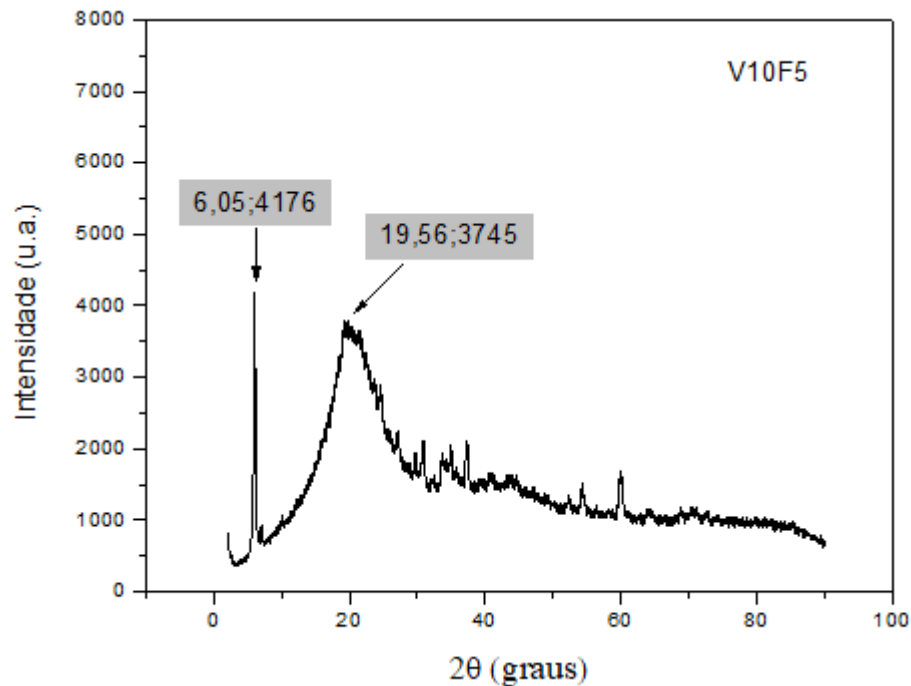
Fonte: Própria Autora, 2023.

#### 4.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

As partir das análises de Difração de Raios-X foi possível avaliar a estrutura cristalina dos compósitos estudados, observando as similaridades ou diferenças entre os compósitos sintetizados para, posteriormente, associar essas características às suas capacidades de absorção sonora.

O difratograma da amostra V10F5, que pode ser visto na Figura 31, apresenta um pico estreito e bem definido, em  $2\theta = 6,05^\circ$ , característico da vermiculita, conforme encontrado por Teodoro, Parabocz e Rocha (2020), ao caracterizar a vermiculita pura, que é um material de cristalinidade elevada. Já o segundo pico, de base mais larga, que aparece no gráfico em valor de  $2\theta$  próximo a  $20^\circ$ , representa a porção cristalina do PU, bem como da fibra de coco, representada pelo seu percentual de celulose. Um comportamento similar foi encontrado por Fonseca *et al* (2015), ao estudar a fibra de coco bruta, e Negrão (2023) ao avaliar a estrutura da casca de laranja, composto orgânico também formado por lignina e celulose. A base larga e o pico menos acentuado, demonstra um menor percentual de cristalinidade quando comparado à vermiculita. A fase amorfa, a partir de  $2\theta = 40^\circ$ , região sem a presença de picos de alta intensidade, pode ser associada à porção amorfa do PU, da celulose e ao alto teor de lignina, presente na fibra de coco (Foncesa *et al*, 2015).

Figura 31 - Perfil de DRX para a amostra V10F5.

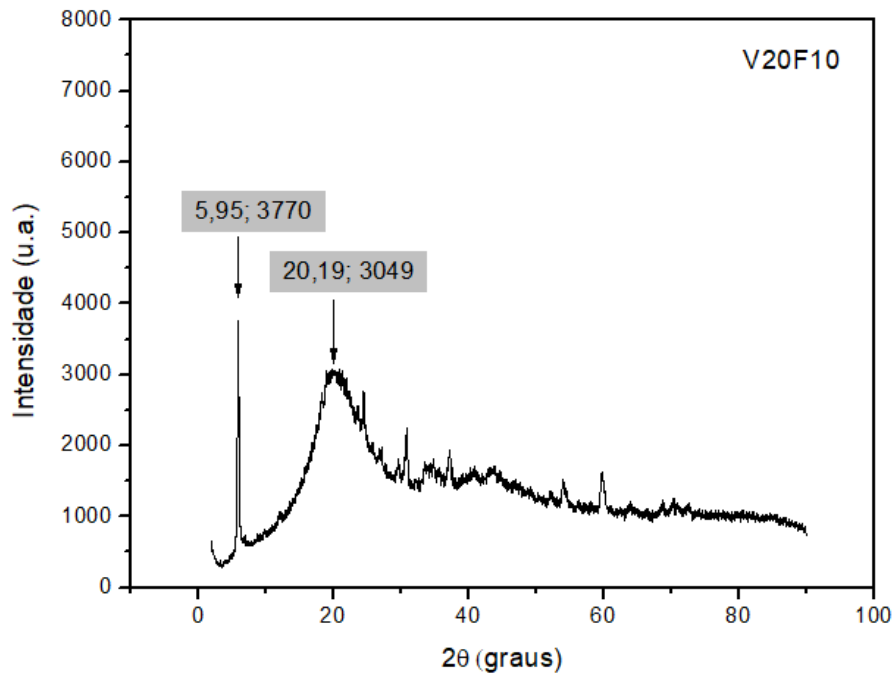


Fonte: Própria Autora, 2023.

Para o compósito V20F10, o difratograma, na Figura 32 mostrou que o pico referente à vermiculita, que surgiu em cerca de  $2\theta = 6^\circ$ , teve sua intensidade relativamente reduzida em relação ao difratograma do V10F5. Esperava-se que, com o aumento do teor em massa da vermiculita, a intensidade desse pico também aumentasse, em relação àquele do compósito V10F5. Em contrapartida, o segundo pico, em  $2\theta$  próximo a  $20^\circ$ , apresentou menor intensidade em relação ao V10F5, e base larga característica da presença da porção não cristalina da celulose. Esse comportamento sugere que, para a amostra V20F10, a porção de amostra coletada para o ensaio, provavelmente, continha uma quantidade menor de vermiculita do que os demais compósitos. Uma vez que os reforços estão distribuídos de forma aleatória na matriz, pode ter sido utilizada uma região com menos vermiculita.

Soeiro (2017), em seu estudo sobre compósitos formados por poliuretano e pó de macambira, ao avaliar o difratograma de raios-X do PU puro e de seus compósitos, encontrou picos de base larga, na região  $2\theta$  igual a  $20^\circ$ , referentes à cristalinidade do material e à formação de interações de segmentos rígidos. Esse comportamento, evidencia a natureza predominantemente amorfa do PU confirmado pela ausência de picos estreitos de difração nesta região. Essa porção amorfa foi identificada nos três compósitos estudados, conforme visto pelos gráficos das Figuras 31, 32 e 33, para ângulos acima de  $2\theta = 30^\circ$ .

Figura 32 - Perfil de DRX da amostra V20F10.

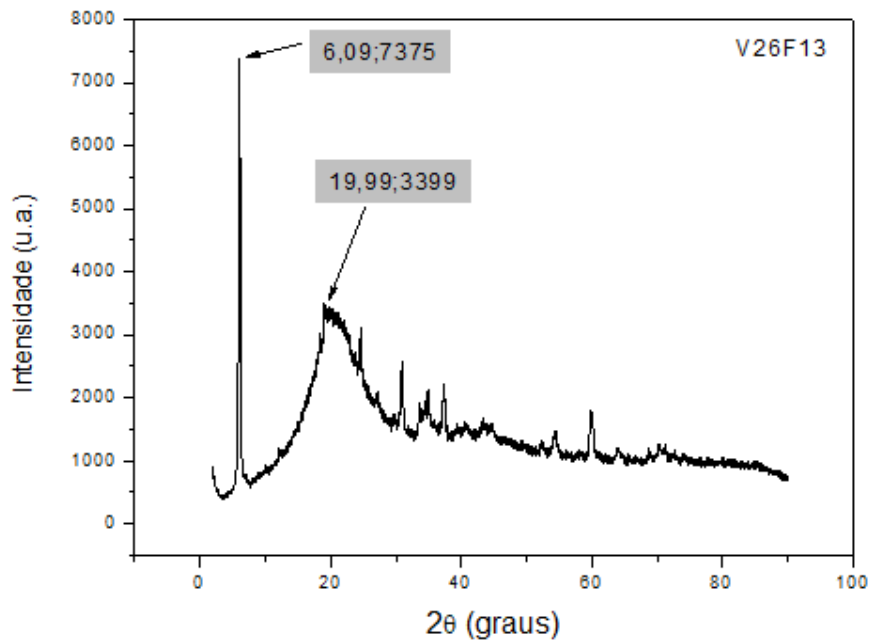


Fonte: Própria Autora, 2023.

Embora tenha apresentado um resultado muito similar aos dos outros dois compósitos, a intensidade do primeiro pico no perfil da amostra V26F13, da Figura 33, que é característico da vermiculita, foi maior em relação às demais, o que já esperado, por se tratar do compósito com mais alto teor em massa de vermiculita. Esse resultado está de acordo com o trabalho de Teodoro, Parabocz e Rocha (2020) que, ao analisarem a estrutura da vermiculita pura, encontraram um pico em posição similar, com intensidade de 7500 u. a., conforme aparece na Figura 33, enquanto De Oliveira (2017), em seu estudo com a vermiculita bruta, observou o mesmo comportamento, identificando um pico em  $2\theta = 6,21^\circ$ . Por outro lado, o segundo pico, de base larga, que ocorre em região de  $2\theta$  próximo a  $20^\circ$ , foi o de menor intensidade em relação aos outros dois compósitos, provavelmente devido à menor quantidade de poliuretano presente. Nessa mesma região, de  $2\theta$  entre  $16$  e  $22^\circ$ , também ocorrem os picos de difração relacionados à porção cristalina da fibra de coco, conforme apontado por Fonseca *et al* (2015). Desta maneira, pode-se considerar que, dentre os três compósitos avaliados, o V26F13 foi o que, aparentemente, apresentou o maior caráter cristalino.

Figura 33 - Difratoograma de DRX da amostra V26F13.

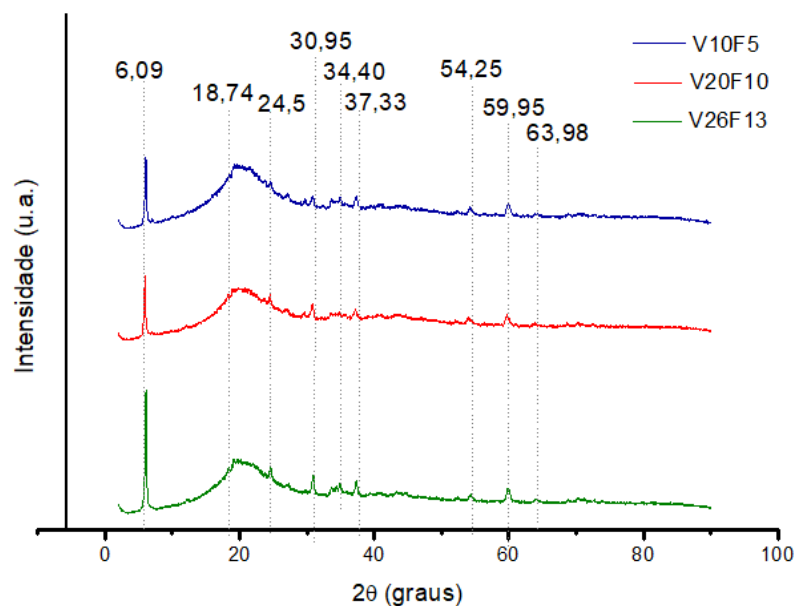




Fonte: Própria Autora, 2023.

No caso da vermiculita, por se tratar de um mineral, foram identificados os valores de  $2\theta$  dos picos que representam suas fases cristalinas, utilizando as fichas cristalográficas de números 98-003-7442, 98-003-4812 e 01-077-0022, obtidas no programa X'Pert High score. Uma comparação dos difratogramas dos três compósitos, com a localização dos picos inerentes à vermiculita, pode ser vista na Figura 34.

Figura 34 – Identificação dos picos representativos da vermiculita, a partir de fichas cristalográficas do programa X'Pert High score.



Fonte: Própria Autora, 2024.

De modo geral, em todas as três amostras estudadas foram encontrados

indícios característicos da presença dos três materiais componentes dos compósitos: poliuretano (matriz), vermiculita e fibra de coco (reforços). Também foi possível identificar porções cristalinas e amorfas nos três compósitos.

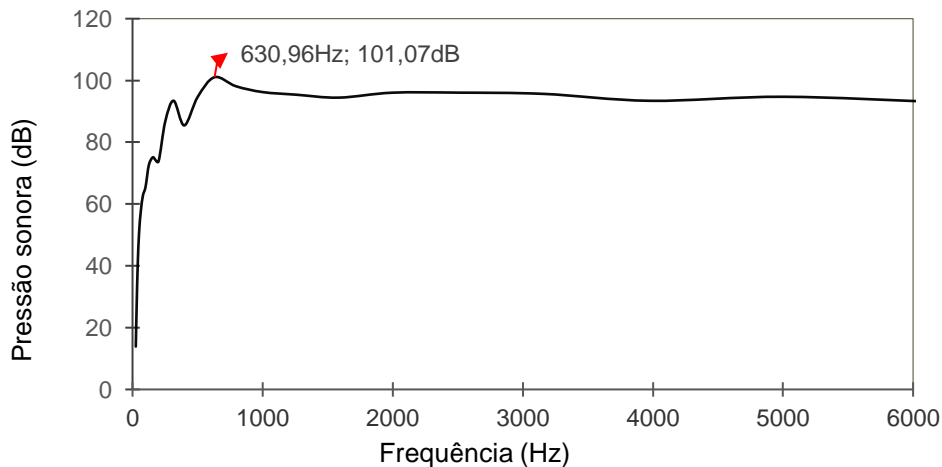
#### 4.5 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS

##### 4.5.1 Medida da pressão sonora de um liquidificador

Visando a verificar a aplicabilidade dos compósitos produzidos na absorção de ruído de eletrodomésticos, foi realizada uma medição da pressão sonora emitida por um liquidificador. Essa informação foi utilizada para comparar o pico de pressão e a frequência do ruído emitido pelo equipamento, com a faixa de frequência de absorção sonora mais elevada, identificadas pelos resultados dos ensaios de impedância acústica.

O gráfico da Figura 35 foi obtido a partir do tratamento dos dados de medição de pressão sonora de um liquidificador da marca BLACK&DECKER, modelo LE420BR, e com 420 W de potência, utilizando o aplicativo MATLAB, versão 2015. O liquidificador foi ligado na velocidade 1, preenchido apenas com água, e seu som foi capturado pelo gravador de celular com duração de 41 segundos, a uma distância média de 25 cm do eletrodoméstico. Pode-se observar que o pico de pressão sonora (dB), próximo da frequência de 631 Hz, atinge o valor de 101,07 dB. Também é possível notar que houve a estabilização da pressão sonora, em torno de 93-96 dB, para valores de frequência superiores a 1000 Hz.

Figura 35 - Pressão sonora do liquidificador, em função da frequência.

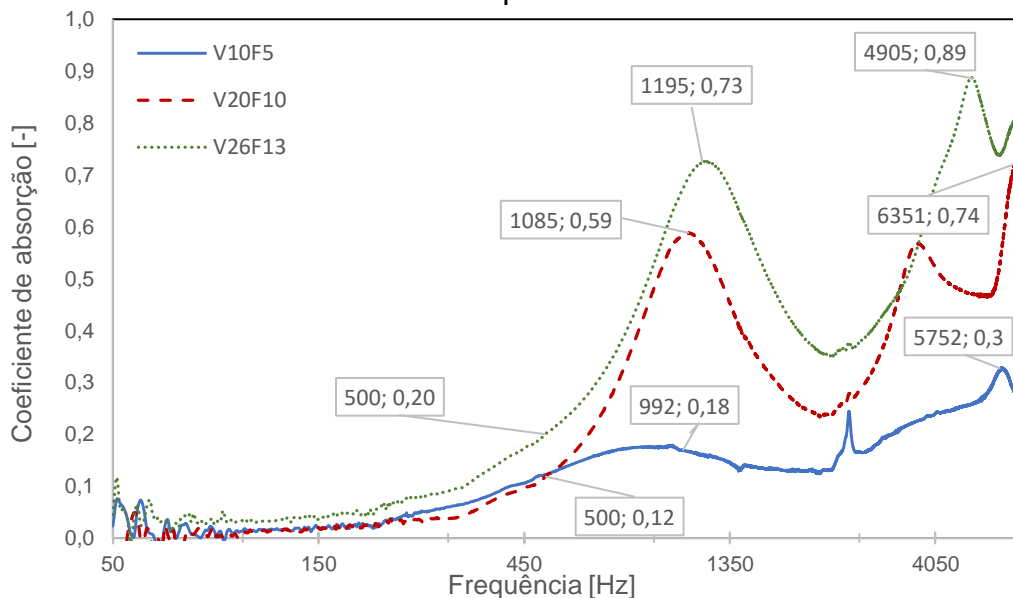


Fonte: Própria Autora, 2023.

#### 4.5.2 Ensaio de impedância acústica

O ensaio de impedância acústica foi realizado para determinar os coeficientes de absorção sonora de cada compósito, em uma faixa de frequência de 50 a 6300 Hz. A Figura 36 mostra as curvas de coeficiente de absorção sonora, em função da frequência, para os três compósitos estudados, em que o valor 1 para o coeficiente representa que toda a energia sonora emitida foi absorvida pelo material. Por outro lado, na Tabela 2 são apresentados os valores máximos dos coeficientes de absorção sonora, para cada amostra analisada, organizados por faixa de frequência, e variando entre 0 e 1.

Figura 36 – Coeficiente de absorção,  $\alpha$ , em função da frequência para os compósitos.



Fonte: Própria Autora, 2023.

Analisando o comportamento de cada compósito, em relação à absorção sonora na faixa de frequência estudada (80-6300 Hz), notou-se que, embora o compósito V26F13 tenha mostrado um pico com valor 0,89 para o coeficiente de absorção, em frequências elevadas, os compósitos V20F10 e V26F13, apresentaram um declínio na região de frequência entre 1500 e 3500 Hz, indicando uma redução do coeficiente de absorção para este intervalo de frequência. Por outro lado, o compósito V10F5 não apresentou valores de coeficiente de absorção significativos em nenhuma faixa de frequência analisada, o que pode ser explicado pela predominância da fase de poliuretano em relação aos reforços, à menor quantidade de poros, e à sua baixa

crystalinidade, como observado pelos resultados de FTIR, MEV e DRX, respectivamente.

De fato, o valor de coeficiente de absorção sonora da espuma de poliuretano é menor que 0,35, em frequências abaixo de 1300 Hz, conforme determinado por Dib, Bouhedja e Amrani (2015), tornando-se significativo apenas em frequências sonoras muito elevadas, acima de 2200 Hz até 10000 Hz, como identificado por esses autores. Portanto, a inserção dos reforços contribuiu para que houvesse uma diminuição da faixa de frequência em que ocorriam os maiores valores de coeficiente de absorção sonora do poliuretano. Além disso, outros pesquisadores já haviam detectado que a fibra de coco apresentava boa capacidade de absorção sonora em baixas e médias frequências (600 a 2000 Hz), a depender da espessura do corpo de prova (Berardi e Iannace, 2015; Yang *et al.*, 2020), enquanto valores de coeficiente de absorção sonora mais elevados foram obtidos em médias e altas frequências (2600 a 6400 Hz) com a vermiculita expandida (Vašina *et al.*, 2016). Investigando o efeito da adição de vermiculita nos valores de coeficiente de absorção sonora de compósitos com matriz de espuma de poliuretano, Liu *et al.* (2014) encontraram valores de coeficiente de absorção, para teores de vermiculita de 5 e 15%, em massa, de no máximo 0,5, para a faixa de frequência de 500-6000 Hz; esse valor foi mais baixo do que aqueles observados para as amostras V20F10 e V26F13. Portanto, os resultados de impedância acústica obtidos neste trabalho mostraram que houve um efeito conjunto de ambos os reforços empregados em quantidades mais elevadas, na melhoria da capacidade de absorção sonora dos compósitos produzidos, em frequências mais baixas que aquelas identificadas por outros autores para a espuma de poliuretano.

Os coeficientes de absorção sonora, determinados para algumas das faixas de frequências avaliadas, podem ser visualizados na Tabela 2. Com base nas classificações de baixa, média ou alta frequência, fica nítido que os três compósitos apresentaram melhores capacidades de absorção sonora em média e alta frequência. Uma vez que o liquidificador utilizado no estudo apresentou o pico máximo de pressão sonora em alta frequência, com tendência à estabilização a partir da média frequência, possivelmente os compósitos V20F10 e V26F13 poderiam atuar como absorvedores de ruídos em eletrodomésticos, como os liquidificadores, sendo o desempenho do V26F13 ligeiramente superior. Esses materiais também apresentariam maior resistência térmica, ao contrário do compósito V10F5, como visto pelos termogramas de DSC, podendo ser aplicados em ambientes submetidos até 300°C.

Tabela 2 - Coeficiente de absorção sonora, por faixas de frequência, para as amostras avaliadas.

Faixa de Frequência	V10F5		V20F10		V26F13	
	$\alpha$	Frequência (Hz)	$\alpha$	Frequência (Hz)	$\alpha$	Frequência (Hz)
Baixa: 50~500Hz	0,12	500	0,12	500	0,20	500
Média: 501~1500Hz	0,18	992	0,59	1085	0,73	1195
Alta: > 1501Hz	0,33	5752	0,74	6351	0,89	4905

Fonte: Própria Autora (2024).

## 5 CONCLUSÕES

Em consonância com os objetivos propostos, foi possível estabelecer uma relação entre a capacidade de absorção sonora dos três compósitos desenvolvidos e suas características estruturais, físicas e de processamento. Desta maneira, foi possível concluir desta análise que:

- É possível obter compósitos à base de poliuretano, reforçado com vermiculita e fibra de coco, com propriedades adequadas ao uso como absorvedores de ruído. Quanto maior é o teor de vermiculita e de fibra de coco presentes no compósito, melhor é a sua capacidade de absorção sonora, de modo que o melhor desempenho foi obtido com a amostra contendo 26% de vermiculita e 13% de fibra de coco, em massa.
- O formato das cavidades, o tamanho e a quantidade de poros dos compósitos variaram com o teor de vermiculita e de fibra de coco presentes. Esses efeitos foram mais pronunciados nos materiais com mais alta quantidade de reforços adicionada, para os quais a distribuição dos poros na estrutura do compósito mostrou-se mais assimétrica, favorecendo a atividade de absorção sonora.
- Os compósitos que apresentaram melhor resistência à degradação térmica foram aqueles contendo os mais altos teores de vermiculita e de fibra de coco. Isso demonstrou a maior estabilidade térmica de ambos, e a possibilidade de aplicações que demandem temperaturas elevadas, de até 300°C, quando

comparados à amostra de mais baixo teor dos reforços.

- O método de preparação empregado foi eficaz na combinação dos materiais de partida utilizados, de modo a promover a cura completa do poliuretano e a preservação das características de cada material componente. Por meio das análises realizadas identificou-se na estrutura de todos os compósitos produzidos a presença dos três componentes precursores: o poliuretano, a vermiculita e a fibra de coco.
- Por fim, os ensaios de impedância acústica mostraram que o compósito com maior teor dos dois reforços foi o que apresentou o melhor desempenho para absorção sonora e emprego em eletrodomésticos. Esse aumento no coeficiente de absorção sonora pode ser atribuído ao maior caráter cristalino e quantidade de poros identificados na amostra com 26% de vermiculita e 13% de fibra de coco, comparada aos demais.

Recomenda-se, portanto, a utilização do compósito sintetizado com 26% de vermiculita e 13% de fibra de coco seco, para aplicações como absorvedores de ruído, inclusive com potencial favorável à utilização em eletrodomésticos. Desta maneira, conclui-se que o aumento do teor de vermiculita e de fibra de coco melhora a estabilidade térmica e a capacidade de absorção sonora dos compósitos estudados, em frequências na faixa de 400 a 6300 Hz.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Diante do estudo apresentado, dois dos compósitos produzidos demonstraram potencial para a aplicação em eletrodomésticos, como absorvedor de ruído. Uma vez que os percentuais de vermiculita e fibra de coco foram acrescidos proporcionalmente ao mesmo tempo, é interessante realizar a análise com cada reforço separadamente, para avaliar a contribuição de cada um. Além disso, seria importante verificar os efeitos da obtenção do compósito em temperaturas mais altas do que a temperatura ambiente, com o objetivo de tornar o poliuretano mais fluido e, assim, possibilitar a elevação dos teores dos reforços.

Dessa maneira, a sugestão é que seja aplicado em um liquidificador, o compósito V26F13, com espessura de 10 a 20 mm e realizado ensaio de ruído ambiente, com decibelímetro, antes e depois da aplicação do compósito, para avaliação da variação de potência sonora percebida no medidor. É importante também

realizar a avaliação da dissipação de calor na carcaça, antes e depois, com o termovisor, garantindo que o compósito aplicado não reduza a vida útil do equipamento.

Embora a aplicação final seja em eletrodomésticos, para se obter uma análise e caracterização completa do compósito produzido, será importante também a realização de ensaios de resistência mecânica e de absorção de água, de modo a avaliar a estabilidade e desempenho funcional dos mesmos.

## REFERÊNCIAS

3M. **Boletim Técnico 3M Peltor (A, P3E e P5E)**. Revisão de agosto de 2018.

ANTUNES, Lorena Alves. Caracterização das cascas de coco seco (Cocos nucifera L) “in natura” como adsorvente natural na remoção de íons metálicos em águas. *In: V Congresso de Ensino, Pesquisa e Extensão da UEG. Anais [...]* Anápolis, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Níveis de ruído para conforto acústico: NBR 10152**. ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 10151 – **Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas Visando o Conforto da Comunidade**, Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 15575 – **Edificações habitacionais – Desempenho**, Rio de Janeiro, 2024.

BERARDI, Umberto; IANNACE, Gino. **Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications**. *Building and Environment*, v. 94, p. 840e852, 2015.

BERNARDI, Stefania Tesi. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**. 2003. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BISTAFA, Sylvio R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. Editora Blucher, 2018. 436 p.

BHINGARE, Nirmala H.; PRAKASH, S. **An experimental and theoretical investigation of coconut coir material for sound absorption characteristics**. *Materials Today: Proceedings*, v. 43, p. 1545-1551, 2021.

BORGES, Antônio Newton; RODRIGUES, Clóves Gonçalves. **Introdução à física acústica**. São Paulo: Editora Livraria Física, 2017.

BRASIL, **Resolução CONAMA nº20**, de 7 de dezembro de 1994. Instituição do Selo de Ruído de uso Obrigatório para aparelhos eletrodomésticos que geram ruído no seu funcionamento. Publicado no D.O.U. nº 248 de 30 dezembro de 1994.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora NR-09 – Programa de Prevenção de Riscos Ambientais**. Portaria SEPRT nº 6.735, de 10 de março de 2020.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora NR-15 – Atividades e Operações Insalubres**. Portaria MTP nº 426, de 07 de outubro de 2021.



BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora NR-17 – Ergonomia**. Portaria MTP n.º 423, de 07 de outubro de 2021.

CALLISTER JR, William D, RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais – uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CANGEMI, José Marcelo; SANTOS, AM dos; CLARO, N. S. Poliuretano: de travesseiros a preservativos, um polímero versátil. **Química Nova na Escola**, v. 31, n. 3, p. 159-164, 2009.

CAO, Leitao et al. Porous materials for sound absorption. **Composites Communications**, v. 10, p. 25-35, 2018.

CARVALHAES, C. Vermiculita. In: **Sumário Mineral**. Departamento Nacional de Produção Mineral, 2015. v. 35, p. 116–117.

CHMIELARZ, Lucjan et al. Acid-activated vermiculites as catalysts of the DeNOx process. **Catalysis today**, v. 191, n. 1, p. 25-31, 2012.

DA SILVA, Alex Oliveira; CAVALCANTE, Márcio André Araújo. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADOS POR FIBRAS LONGAS UNIDIRECIONAIS EMPREGANDO MODELOS DA MICROMECAÂNICA. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia**, v. 2, n. 26, p. 73-82, 2016.

DA SILVA SOUZA, Debora Rosa. Síntese e caracterização de poliuretano à base de Poli (-Caprolactona) reforçado com nanocristais de celulose. 2013.

DE OLIVEIRA, Luís Humberto. **Vermiculitas modificadas com derivados orgânicos contendo grupo mercaptopropil aplicadas como agentes antimicrobianos**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba.

DIAS, Letícia Andreolli et al. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TERMOMECAÂNICAS DE UMA RESINA DE POLIURETANO PARA O REPARO DE ABRASÃO EM DORMENTES DE CONCRETO. In: **ANAIS DO VI SIMPÓSIO DE ENGENHARIA FERROVIÁRIA**, 2023, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2023.

DIB, Lyes, BOUHEDJA, Samis, AMRANI, Hamza. Mechanical Parameters Effects on Acoustic Absorption at Polymer Foam. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2015, ID 896035, 10 p, 2015.

DO CARMO, LÍVIA ISMÁLIA CARNEIRO. Efeitos do ruído ambiental no organismo humano e suas manifestações auditivas. **Monografia de conclusão do Curso de Especialização em Audiologia Clínica**. Goiânia, 1999.

ENGENHARIA ACÚSTICA UFSM. **Absorção sonora (ISO 10534-2 e ISO 354)**. 2020. Disponível em: <<https://www.eac.ufsm.br/ensaios/ensaios-acusticos>> Acesso em: 15 out. 2023.

FONSECA, H. et al. XRD and SEM/EDS characterization of coconut fibers in raw and treated forms used in the treatment of strontium in aqueous solution. **In: International Nuclear Atlantic Conference**, 2015.

FRANÇA, Sílvia CA et al. Vermiculita, mais que um mineral termoacústico. V SIMPÓSIO DE MINERAIS INDUSTRIAIS DO NORDESTE. **Anais [...]**. João Pessoa, 2016.

FRICK, Achim & ROCHMAN, Arif. **Characterization of TPU-elastomers by thermal analysis (DSC)**. *Polymer Testing*, v. 23, p. 413–417, 2004.

GANNOUNI, N., WANG, J., RHOUMA, K. B., MHAMDI, A. **Human health effects associated with occupational and environmental acoustic trauma**. *Health Sciences Review*, v. 12, p. 100181, 2024.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. **Physics, Volume 2**. John Wiley & Sons, 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO, **Portaria nº 430**, de 16 de agosto de 2012. Publicado no D.O.U nº 161, de 20 de agosto de 2012.

JIAO, Lingling et al. Thermal degradation characteristics of rigid polyurethane foam and the volatile products analysis with TG-FTIR-MS. **Polymer Degradation and Stability**, v. 98, n. 12, p. 2687-2696, 2013.

JUSTI, Jadson; JUSTI, Jamson; JUSTI, Edrilene Barbosa Lima. QUALIDADE DE VIDA, RUÍDO OCUPACIONAL E SAÚDE'. **Saber Científico** (1982-792X), v. 6, n. 2, p. 78-89, 2021.

LACERDA, Adriana Bender Moreira de et al. Ambiente urbano e percepção da poluição sonora. **Ambiente & Sociedade**, v. 8, p. 85-98, 2005.

LADEIA, Gabrielly Lima. POLUIÇÃO SONORA: uma ameaça à saúde? **Revista Saúde e Meio Ambiente**, v. 9, n. 3, p. 34-40, 2019.

LIMA, A. P., FEITOSA, J. P., & RICARDO, N. M. (2008). Compósitos a base de poliácridamida/vermiculita: síntese e caracterização. 9º Congresso Brasileiro de Polímeros - 9º CBPol. **Anais [...]**. Campina Grande, Paraíba, 2016.

LIU, Y. C. et al. **Effect of Vermiculite and Bulk Density in the PU Foam composite Board for the Absorption Coefficient and Acoustic Impedance**. *Advanced Materials Research*, v. 910, p. 82-85, 2014.

MAREZE, Paulo Henrique. **Análise da influência da microgeometria na absorção sonora de materiais porosos de estrutura rígida**. 2013. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2013.

MELO, Luiz Flávio Luciano de. **Extração, caracterização e utilização da lignina da casca do coco verde em poliuretano**. 2013. Dissertação (Mestrado em química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2013.

MIRANDA, Rossana Martins et al. **Desenvolvimento de uma estrutura sanduíche de base polimérica, produzida com resíduos das indústrias de mineração e metalurgia, para aplicação como painel divisório de ambientes internos na construção civil**. 2016. Tese de Doutorado. UFPA.

NEGRÃO, Tobias Cabral. **Preparação e caracterização de espuma rígida de poliuretano com casca de laranja visando à remoção de bisfenol A em meio aquoso**. 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

NICOLAU, Gilberto F.; TOLEDO, Paulo A. **Física Básica**. São Paulo: Editora. Atual, 1998.

NIGMATULLINA, A. I. et al. Sound-Absorbing Polymer Composite Materials for Construction Purposes. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2020. p. 052027.

OLIVEIRA, Ana Karla Freire de. **Estudo da viabilidade técnica de utilização do compósito poliuretano de resina de mamona e fibra de ubuçu na fabricação de pisos e revestimentos**. 2011. Tese de Doutorado. PUC-Rio. \_\_\_\_p

OLIVEIRA, Jose et al. Investigação das propriedades dos compósitos formados por resina uretânica elastomérica e vermiculita processada. **14º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS**, 2017, Água de Lindóia, SP. Anais [...].

OLUKUNLE, Bamigboye Gideon et al. **Data on acoustic behaviour of coconut fibre-reinforced concrete**. Data in brief, v. 21, p. 1004-1007, 2018.

PIMENTA, S., ROQUE A., FONNEGRA, J., MARTINHO T. **Efeitos Extra-Auditivos do Ruído na Saúde**. Revista Portuguesa de Saúde Ocupacional online, v. 11, p. 1-13, 2021.

PUTRA, Azma et al. Sound absorption of extracted pineapple-leaf fibres. Applied Acoustics, v. 136, p. 9-15, 2018.

RABELLO, L. G., RIBEIRO, R. C. D. C., BARROS, M. M., & DE OLIVEIRA, M. G. (2019). Produção de tijolos ecológicos contendo vermiculita e poliuretano. **CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS**, 15., 2019, Bento Gonçalves, RS. Anais [...].

RAJAGOPAL, Raghu Raman; RAJARAO, Ravindra; SAHAJWALLA, Veena. Synthesis of glass fiber-nano silicon carbide composite by using waste printed circuit boards and compact discs as resources. **Composites Communications**, 2017, 5: 19-22.

REZENDE, Janaina Costa; CARRASCO, Edgar Vladimiro Mantilla; DE CASTRO MAGALHAES, Max. Avaliação do desempenho acústico da lã de PET e placa de vermiculita no sistema construtivo light steel framing. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, p. e527111335630-e527111335630, 2022.

RITZ, Michal; ZDRÁLKOVÁ, Jana; VALÁŠKOVÁ, Marta. Vibrational spectroscopy of acid treated vermiculites. **Vibrational spectroscopy**, v. 70, p. 63-69, 2014.

SANTOS, Paula Roberta dos. **Investigação das propriedades mecânicas e termomecânicas de materiais cerâmicos refratários produzidos com sílica residual da casca de arroz e fibra de aço**. 86 p. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2017.

SOUSA, Jokdérlea Correa et al. Crystallization kinetics of poly (butylene adipate terephthalate) in biocomposite with coconut fiber. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, p. e12419, 2019.

SENTHILKUMAR, Thambiannan et al. Fibrillation of coconut fibers by mechanical refining to enhance its reinforcing potential in epoxy composites. **Fibers and Polymers**, v. 21, p. 2111-2117, 2020.

SILVA, Rosana Vilarim da. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. Amgh Editora, 2013.

SOEIRO, Eduardo Campelo. **Análise da viabilidade na utilização como isolante térmico de um compósito de poliuretano/pó de macambira**. 2017. Tese de Doutorado. UFRN, Natal, Rio Grande do Norte.

TAIWO, Esan Martins; YAHYA, Khairulzan; HARON, Zaiton. **Potential of using natural fiber for building acoustic absorber: A review**. In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019. p. 012017.

TANG, Xiaoning; YAN, Xiong. Acoustic energy absorption properties of fibrous materials: a review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 101, p. 360-380, 2017.

TEODORO, Luisa; PARABOCZ, Cristiane Regina Budziak; ROCHA, Raquel Dalla Costa da. Caracterização da argila vermiculita expandida: avaliação dos padrões físico-químicos e mineralógicos para aplicação como adsorvente. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, p. e-12851, 2020.

UGARTE, J. F. O, SAMPAIO, J. A, FRANÇA, S. C. A. Vermiculita. In: LUZ, A. B., LINS, F. F. ed. **Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações**. 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005, 992p. cap 38, p. 866-887.

VAŠINA, Martin, et al. **Sound absorption study of raw and expanded particulate vermiculites**. Applied Physics A, v. 122, n. 998, 2016.

VIVALDINI, D.O. et al. Revisão: fundamentos e materiais para o projeto da microestrutura de isolantes térmicos refratários de alto desempenho. **Cerâmica**, v. 60, p. 297-309, 2014.

YANG, Tao, et al. **Sound Absorption Properties of Natural Fibers: A Review**. *Sustainability*, v. 12, n. 8477, 2020.

YANG, Yong, et al. Sound insulation of glass fiber felt composite structure via the flame blowing process. **Fibers and Polymers**, 2017, 18.12: 2410-2416.