

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINE RODRIGUES PEREIRA DE PAULA

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE COMPÓSITOS
VERDE DE ESPUMA RÍGIDA DE PU DE ÓLEO VEGETAL COM SERRAGEM DE
Pinus taeda E FIBRAS DE *Agave sisalana***

CURITIBA

2024

CAROLINE RODRIGUES PEREIRA DE PAULA

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE COMPÓSITOS
VERDE DE ESPUMA RÍGIDA DE PU DE ÓLEO VEGETAL COM SERRAGEM DE
Pinus taeda E FIBRAS DE *Agave sisalana***

**EVALUTION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GREEN
COMPOSITES OF VEGETABLE OIL PU RIGID FOAM WITH *Pinus taeda*
SAWDUST AND *Agave sisalana* FIBERS**

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia – Área de concentração: Engenharia de Materiais/ Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva

Coorientadora: Profa. Dra. Elaine Cristina de Azevedo

CURITIBA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba



CAROLINE RODRIGUES PEREIRA DE PAULA

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE COMPÓSITOS VERDE DE ESPUMA
RÍGIDA DE PU DE ÓLEO VEGETAL COM SERRAGEM DE PINUS TAEDA E FIBRAS DE AGAVE SISALANA.**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como
requisito para obtenção do título de Doutor Em Engenharia
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Engenharia De Materiais.

Data de aprovação: 04 de Março de 2024

Dra. Ana Paula De Moura Nardi, Doutorado - Faculdade Cristo Rei (Faccrei)

Dra. Elaine Cristina De Azevedo, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Lucas Freitas Berti, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Pedro Henrique Gonzalez De Cademartori, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 03/04/2024.

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e sabedoria para conduzir o doutorado.

Ao meu professor orientador, Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva por todo suporte oferecido.

À minha coorientadora Prof^a.Dra. Elaine Azevedo, por ter permanecido sendo essencial mesmo após sua aposentadoria.

À minha família, pelo apoio e incentivo para a conclusão desta etapa.

Ao meu esposo, Caio, pelo incentivo, paciência e companheirismo de sempre.

À minha filha, Lívia, por cada sorriso lindo com o qual me presenteava quando eu falava “mamãe está terminando o trabalho e já vai brincar com você, Lili”.

A todos os alunos do Laboratório de Polímeros e Compósitos da UTFPR, em especial ao Felipe Hermenegildo de Souza pelo suporte.

Ao Lucas Franco Wrege, técnico de laboratório de mecânica da UTFPR Guarapuava e à empresa EMA-Jr/UEPG pelo apoio nas análises de flexão.

Ao Prof. Dr. Paulo Rodrigo Stival Bittencourt da UTFPR Medianeira pelo suporte nas análises de TGA.

À Ma. Claudia Bittencourt da PUCPR, pelo apoio nas análises de absorção acústica.

Ao Dr. Alessandro Ellemberger pelo apoio nas análises de perfuração.

Aos meus amigos Me. Lucas Durand, Ederson Souza e Otávio Neto por todo apoio, auxílio com análise de dados e traduções.

Ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais – UTFPR, em especial ao técnico Alexandre José Gonçalves, pelos dias disponibilizados para realização de análises.

Aos professores do DAMEC envolvidos no trabalho.

A todos do PPGEM, em especial à coordenação que sempre foi solícita aos requerimentos feitos.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a efetivação desse trabalho.

Ao CNPq e Fundação Araucária pelo auxílio financeiro necessário para o desenvolvimento do trabalho.

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

A persistência é o caminho do êxito
(CHARLES CHAPLIN).

RESUMO

Materiais poliméricos provenientes do petróleo podem causar impactos negativos ao meio ambiente e à saúde devido à sua origem não renovável e à presença de solventes prejudiciais. Por outro lado, a espuma de poliuretano derivada de óleos vegetais é biodegradável, proveniente de fontes renováveis e isenta de solventes prejudiciais à saúde em sua composição. A serragem de *Pinus taeda*, um dos principais resíduos do setor madeireiro, e a fibra de sisal proveniente da planta *Agave sisalana*, cultivada no Brasil, são materiais que podem ser empregados na fabricação de compósitos. O objetivo deste trabalho foi analisar física e mecanicamente compósitos de espuma rígida com serragem de *Pinus taeda* e fibras de *Agave sisalana*, produzidos com diferentes parâmetros de produção, com base no estudo realizado por Paula (2017). A partir dos resultados obtidos pelas análises dos parâmetros de prensagem da espuma rígida, foram avaliados os parâmetros de fabricação de 16 combinações diferentes dos compósitos produzidos com espuma rígida, serragem e sisal. A espuma rígida e os compósitos foram caracterizados por densidade, micrografias de MEV e resistência à flexão. Sendo a composição com maior resistência à flexão reproduzida e avaliada por análises de densidade, absorção de água e inchamento em espessura, absorção acústica, análise termogravimétrica, resistência à flexão pós-irradiação com UVA, flamabilidade e perfuração. Todos os dados foram analisados estatisticamente. Não foram encontradas na literatura análises de parâmetro de prensagem de espuma similares com a mesma abordagem feita nesse trabalho. Espumas rígidas de poliuretano derivado de óleos vegetais produzidas sob pressão de 4 MPa, durante 20 minutos em temperatura ambiente, tiveram densidade média de 249 kg/m³ e tensão máxima em ensaio de flexão de 3,07MPa. Compósitos com 50% de espuma rígida, 45% de serragem e 5% de sisal com prensagem a 25°C durante 20 minutos apresentaram densidade média de 767 kg/m³ e resistência à tensão de flexão de 19,76MPa, valores superiores aos encontrados por Paula (2017), sugerindo que o empacotamento e o recobrimento das fibras foram adequados, favorecendo a transmissão de tensões. Além disso, esses compósitos mostraram-se resistentes ao inchamento causado pela água, sendo indicados para uso estrutural e não estrutural.

Palavras-chave: espuma de poliuretano; compósito; propriedades físicas; propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Polymeric materials made from petroleum can have a negative impact on the environment and health due to their non-renewable origin and the presence of harmful solvents. On the other hand, polyurethane foam derived from vegetable oils is biodegradable, comes from renewable sources and is free of solvents that are harmful to health. Pinus taeda sawdust, one of the main waste products from the timber sector, and sisal fiber from the Agave sisalana plant, grown in Brazil, are materials that can be used to make composites. The aim of this work was to physically and mechanically analyze rigid foam composites with Pinus taeda sawdust and Agave sisalana fibers, produced with different production parameters, based on the study carried out by Paula (2017). Based on the results obtained from the analysis of the rigid foam pressing parameters, the manufacturing parameters of 16 different combinations of composites produced with rigid foam, sawdust and sisal were evaluated. The rigid foam and composites were characterized by density, SEM micrographs and flexural strength. The composite with the highest flexural strength was reproduced and evaluated by density analysis, water absorption and swelling in thickness, acoustic absorption, thermogravimetric analysis, flexural strength after UVA irradiation, flammability and perforation. All data was statistically analyzed. No similar analyses of foam pressing parameters were found in the literature with the same approach as in this work. Rigid polyurethane foams derived from vegetable oils produced under a pressure of 4 MPa for 20 minutes at room temperature had an average density of 249 kg/m³ and a maximum flexural stress of 3.07MPa. Composites with 50% rigid foam, 45% sawdust and 5% sisal pressed at 25°C for 20 minutes had an average density of 767 kg/m³ and a flexural stress resistance of 19.76MPa, values higher than those found by Paula (2017), suggesting that the packing and covering of the fibers were adequate, favoring the transmission of stresses. In addition, these composites were resistant to swelling caused by water and are suitable for structural and non-structural use.

Keywords: polyurethane foam; composite, physical properties; mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de classificação de materiais compósitos	18
Figura 2 - Estruturas dos isocianatos; (a) tolueno diisocianato (TDI); (b) difenilmetano diisocianato (MDI)	24
Figura 3 - Formação do poliuretano através do método “one shot”	26
Figura 4 - Formação do pré-polímero de uretano por meio da reação de um diisocianato e de um poliol, como parte do método “two steps”	27
Figura 5 - Formação do poliuretano a partir de um pré-polímero e um poliol, como parte do método “two steps”	27
Figura 6 - Planta <i>Agave sisalana</i>	30
Figura 7- Floresta de <i>Pinus taeda</i>	32
Figura 8 - Representação esquemática do ensaio de flexão de três pontos	41
Figura 9 - Fluxograma do processo de obtenção e caracterização das amostras de compósito	43
Figura 10 – Etapas de produção das amostras de espuma rígida. (a) Mistura dos componentes; (b) Fôrma; (c) Mistura em expansão; (d) Prensagem; (e) Amostra após prensagem; (f) Corpos de prova da amostra	48
Figura 11 - Dimensões e geometria dos corpos de provas de espuma rígida para o ensaio de flexão, dimensões em mm	48
Figura 12- Etapas da produção dos compósitos (a) Pesagem dos componentes, (b) Pré-prensagem, (c) Colchão, (d) Prensagem, (e) Compósito; (f) Corpos de prova cortados para ensaio de flexão	49
Figura 13 - Etapas do ensaio de absorção de água e inchamento em espessura (a) Corpo de prova marcado para medição da espessura; (b) Pesagem do corpo de prova; (c) Medição da espessura com micrômetro; (d) corpos de prova imersos em água	52
Figura 14 -Tubo de impedância SCS 9020B/K	54
Figura 15 -Corpos de prova de flexão. (a) Sem envelhecer; (b) Envelhecimento por UVA durante 500h de cada lado; (c) Envelhecimento por UVA durante 1000h de cada lado	55
Figura 16 -Representação dos aparatos para o ensaio de flamabilidade vertical	57
Figura 17 -Representação esquemática para o ensaio de queima horizontal. ..	58
Figura 18 - Fixação do compósito para furações na fresadora CNC	60
Figura 19 - Sisal sendo cortado com cortador de <i>patchwork</i>	61
Figura 20 – (a) Fibras de sisal cortadas e secas; (b) serragem classificada e seca	62
Figura 21 -Curva de perda de massa (%) e DTG (%/°C) em função da temperatura (°C) da espuma rígida	63
Figura 22 - Curva de perda de massa (%) e DTG (%/°C) em função da temperatura (°C) da serragem	64
Figura 23 - Curva de perda de massa (%) e DTG (%/°C) em função da temperatura (°C) da serragem	65
Figura 24 – Micrografia de MEV dos materiais (a) serragem; (b) sisal	67

Figura 25 -Imagens de corte transversal de espuma rígida. (a) Combinação E1; (b) Combinação E2; (c) Combinação E3.....	69
Figura 26 - Imagens da superfície das amostras. (a) Combinação E1; (b) Combinação E2; (c) Combinação E3.	70
Figura 27 - Superfície da combinação E3 de espuma rígida	71
Figura 28 - Imagens de corte transversal de espuma rígida. (a) Combinação E4; (b) Combinação E5; (c) Combinação E6.....	72
Figura 29 - Defeito de fabricação corpo de espuma rígida combinação E3.....	73
Figura 30 -Tensão máxima (MPa) versus combinação de parâmetros de prensagem da espuma rígida.....	74
Figura 31 - Micrografia Eletrônica de Varredura da fratura do teste de flexão das amostras de espuma rígida. (a) E6; (b) E3	75
Figura 32 -Tensão máxima versus combinação em função do tempo de prensagem	79
Figura 33 -Tensão máxima versus composição em função da temperatura de prensagem	80
Figura 34 -Tensão máxima <i>versus</i> composição em função da proporção de espuma rígida:fibras	82
Figura 35 -Tensão máxima por composição em função da proporção serragem:sisal.	83
Figura 36 -Tensão máxima (MPa), desvio padrão e Teste de Tukey HDS* <i>versus</i> composição	84
Figura 37 -Micrografia de fratura após teste de flexão da Composição C4	86
Figura 38 -Micrografia de fratura após teste de flexão da Composição C8	87
Figura 39 -Micrografia de fratura após teste de flexão da Composição C7	88
Figura 40 -Micrografia de fratura após teste de flexão da Composição C10	88
Figura 41 -Micrografia de fratura após teste de flexão da Composição C9	89
Figura 42 -Micrografia de fratura após teste de flexão da Composição C1	90
Figura 43 - Resultados médios e desvio padrão de variação de massa (%) e variação em espessura (%) após 2h e 24h de imersão em água	93
Figura 44 - Corpos de prova de absorção acústica. (a) Corte em fresadora CNC; (b) Corpos de prova prontos para análise	96
Figura 45 -Curva do Coeficiente de absorção em função da frequência para amostra individual.....	97
Figura 46 -Coeficiente de absorção (a) de acordo com a frequência com amostras associadas	98
Figura 47 -Curva de perda de massa (%) e DTG (%/°C) em função da temperatura (°C) da serragem	101
Figura 48 -Gráfico de tensão máxima (MPa) versus tempo de irradiação UVA dos compósitos	103
Figura 49 - Curvas de tensão (MPa) versus deformação (mm/mm); (a) Corpos de prova irradiados por 500h; (b) Corpos de prova irradiados por 1000h	104
Figura 50 -Ensaio de flamabilidade vertical (UL 94V): (a) Aplicação da chama; (b) Retirada da chama após 10 s; (c) Autossustentação da chama no compósito	106
Figura 51 - Ensaio de flamabilidade horizontal (UL 94HB): (a) Aplicação da chama; (b) Chama a 25 mm do local de aplicação da chama; (c)	

Autossustentação da chama no compósito; (d) Chama a 100 mm do local de aplicação da chama.	107
Figura 52–Imagem da perfuração de entrada com a broca helicoidal utilizando $V_c=56,5$ m/min e avanço de 0,2 mm/rot.....	112
Figura 53 - Aparência da perfuração com a broca helicoidal utilizando $V_c=56,5$ m/min e avanço de 0,3 mm/rot: (a) entrada do furo e (b) saída	112
Figura 54 - Protótipo de porta-canetas (a) Visão lateral (b) Visão superior (c) Vista frontal (d) Vista posterior	114
Quadro 1 - Parâmetros de perfuração e aparência na face de entrada e saída dos furos realizados no compósito.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades da madeira de <i>Pinus taeda</i>	33
Tabela 2-Fatores e níveis do planejamento fatorial da espuma rígida	44
Tabela 3– Combinações com seus respectivos parâmetros de prensagem.....	45
Tabela 4–Fatores e níveis do planejamento fatorial dos compósitos	45
Tabela 5 - Composição, Tempo, Temperatura, Proporção em massa de espuma rígida: fibras e Proporção em massa de serragem:sisal utilizados na confecção dos compósitos.....	46
Tabela 6 –Densidade média (kg/m ³) e desvio padrão das combinações de espuma rígida	68
Tabela 7 - Valores médios de densidade das composições e teste de Tukey HDS.....	77
Tabela 8 - Requisitos de inchamento em espessura e resistência à flexão para uso de painéis de partículas de média densidade – NBR 14810-2:2018	95
Tabela 9 - Requisitos de inchamento em espessura e resistência à flexão para uso de painéis de fibras de média densidade – NBR 15316-2:2015	95

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Compósitos poliméricos.....	16
2.1.1	Classificação	17
<u>2.1.1.1</u>	<u>Compósitos reforçados com partículas</u>	<u>18</u>
2.1.1.1.1	<i>Reforço com partículas grandes.....</i>	<i>18</i>
2.1.1.1.2	<i>Reforço por dispersão</i>	<i>19</i>
<u>2.1.1.2</u>	<u>Compósitos reforçados com fibras</u>	<u>19</u>
2.1.1.2.1	<i>Fibras contínuas</i>	<i>19</i>
2.1.1.2.2	<i>Fibras descontínuas</i>	<i>20</i>
<u>2.1.1.3</u>	<u>Compósitos estruturais.....</u>	<u>20</u>
2.1.1.3.1	<i>Painéis laminados</i>	<i>20</i>
2.1.1.3.2	<i>Painéis sanduíche</i>	<i>21</i>
<u>2.1.1.4</u>	<u>Nanocompósitos.....</u>	<u>21</u>
2.2	Espuma de poliuretano	21
2.2.1	Matérias-primas utilizadas na produção das espumas de PU	23
<u>2.2.1.1</u>	<u>Poliol derivado de óleos vegetais</u>	<u>23</u>
<u>2.2.1.2</u>	<u>Isocianatos</u>	<u>24</u>
<u>2.2.1.3</u>	<u>Catalisadores.....</u>	<u>24</u>
<u>2.2.1.4</u>	<u>Surfactantes</u>	<u>25</u>
<u>2.2.1.5</u>	<u>Agentes de expansão.....</u>	<u>25</u>
2.2.2	Reações de Síntese	26
2.2.3	Usos da espuma de Poliuretano.....	28
2.3	Fibras de sisal.....	29
2.4	Madeira de <i>Pinus taeda</i>.....	32
2.5	Compósitos em mobiliário e artesanato	34
2.6	Sustentabilidade.....	35
2.7	Técnicas de caracterização	37
2.8	Considerações finais	42
3	EXPERIMENTAL	42
3.1	Fluxograma	42

3.1.1	Materiais utilizados na produção dos compósitos	43
3.2	Planejamento fatorial	43
3.2.1	Parâmetros de prensagem da espuma rígida	44
3.2.2	Parâmetros de produção dos compósitos	45
3.3	Confecção das amostras	47
3.3.1	Amostras de espuma rígida.....	47
3.3.2	Amostras de compósitos	49
3.4	Caracterização das amostras	50
3.4.1	Caracterização da espuma rígida.....	50
3.4.2	Caracterização dos compósitos.....	50
4	RESULTADOS.....	61
4.1	Caracterização dos materiais	61
4.2	Caracterização da espuma rígida.....	68
4.3	Caracterização dos compósitos.....	77
4.4	Caracterização física do compósito C4.....	91
4.4.1	Densidade	92
4.4.2	Absorção de água e inchamento em espessura	92
4.4.3	Absorção acústica	96
4.4.4	Análise termogravimétrica	100
4.4.5	Resistência à flexão após absorção UVA.....	102
4.4.6	Flamabilidade	105
4.4.7	Perfuração	108
4.5	Protótipo	113
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
	REFERÊNCIAS.....	117
	ANEXO A - Relatório técnico do material KT1106 – Indústria Kehl	133

1 INTRODUÇÃO

Diante da urgência em enfrentar as mudanças climáticas e reduzir as emissões de gases do efeito estufa, é fundamental desenvolver materiais ecologicamente corretos, biodegradáveis e de fontes renováveis. Materiais não renováveis são irreversivelmente desperdiçados, causando permanente poluição ambiental (CALEGARI & OLIVEIRA, 2016).

Diversos setores têm buscado alternativas no sentido de diminuir os impactos ambientais decorrentes dos processos produtivos, bem como do uso dos produtos fabricados e seu descarte (HOVEN & SCHILD, 2016). O desenvolvimento e a aplicação de materiais renováveis de baixo custo e de reduzido consumo de energia na engenharia, visando a sustentabilidade, tornam-se exigências básicas.

Com o objetivo de reduzir os impactos ambientais, as empresas têm procurado incorporar em seus produtos materiais ecologicamente sustentáveis, como os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais (ALVES et al., 2010; QUINTANA et al., 2018; EL BANNA, 2014. JOHN & THOMAS, 2008).

As fibras naturais apresentam-se como alternativa e como possíveis substitutas, mesmo que parciais, das fibras sintéticas no desenvolvimento de compósitos poliméricos (FERNANDES, 2012) devido ao baixo custo de produção e sustentabilidade (DE JESUS et al, 2019; QUINTANA et al., 2018).

Paula (2017) desenvolveu compósitos de espuma rígida de poliuretano derivado de óleo vegetal reforçados por fibras de sisal e *Pinus taeda*. Foi observada interação adequada entre a fibra/matriz e recobrimento das fibras pela espuma, com índice de absorção de água em 24h de 30% e inchamento em espessura em 24h de 2,5%. O compósito com proporções em massa de 12,5 % de sisal, 37,5% de pinus e 50% de espuma rígida apresentou valores de resistência mecânica à flexão de $11,31 \pm 1,66$ Mpa, indicando que podem ser uma alternativa para substituir, com benefício ambiental e de resistência, as peças feitas de compósitos poliméricos convencionais utilizados em mobiliário e artesanato.

Seu uso na substituição a materiais compósitos produzidos com materiais derivados do petróleo pode trazer benefícios à natureza, à saúde, e à construção civil com seu possível uso em locais susceptíveis à umidade e sem os inconvenientes do uso de resinas (ELANCHEZHIAN, et al, 2018), que são derivadas do petróleo e contém solventes tóxicos que podem causar diversos problemas de saúde (CELONI et al, 2023).

As condições de fabricação do compósito, temperatura, pressão e tempo de prensagem influem nos valores de resistência mecânica do compósito (GAY E HOA, 2007; PROTZEK, 2017) e na formação de poros fechados (VILAR, 2004), que influenciam os resultados de densidade, absorção de água e inchamento.

Ao se pensar nas possibilidades de uso do material, é importante analisar propriedades relacionadas à usinagem, como no quesito perfuração, na qual as condições adequadas de entrada da broca, tipo de broca e velocidade determinam a qualidade do produto final (ELLEMBERG et al, 2022).

Em uso externo ou uso interno de compósitos, podem ter incidência de radiação ultravioleta, UV, que afetam o desempenho mecânico (AZEVEDO, 2009), sendo interessante a análise de resistência dos compósitos após radiação UV.

Além disso, materiais poliméricos quando em contato com uma fonte de calor tem rápida liberação de calor, baixos tempos de ignição e altas quantidades de CO liberados (FERRARINI, 2019) sendo relevante o estudo da queima para avaliação da necessidade de utilização de antichamas de acordo com o uso estabelecido. Considerando-se a possível utilização dos compósitos como divisória de ambiente implica-se no conhecimento da capacidade de absorção sonora.

Objetivo geral

Avaliar os parâmetros de produção de compósitos de espuma rígida com serragem de *Pinus taeda* e fibras de *Agave sisalana*.

Objetivos específicos

Avaliar a interação dos parâmetros de prensagem da espuma rígida de poliuretano derivada de óleos vegetais;

Analisar a interação dos parâmetros de prensagem, proporção de serragem:sisal e proporção espuma rígida:fibras na produção de compósitos verdes;

Estabelecer a composição cujos parâmetros promoveram a maior resistência à flexão dentre as composições estudadas;

Avaliar propriedades físicas da composição com maior resistência à flexão;

Elencar as possibilidades de uso desse compósito com base nos resultados obtidos.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: a seção II contém revisão da literatura sobre compósitos poliméricos, espuma de poliuretano, fibras de sisal, madeira de *Pinus taeda*, compósitos em mobiliário e artesanato, sustentabilidade e técnicas de caracterização. Na seção III são detalhados os materiais e a metodologia utilizada. Na seção IV são apresentados os resultados experimentais e discussões. Na seção V são feitas as conclusões dos resultados obtidos e sugeridas propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa seção são apresentados conceitos de materiais compósitos poliméricos, espuma rígida de poliuretano derivado de óleo de vegetal, fibras de sisal, madeira de *Pinus taeda* e técnicas de caracterização a serem utilizadas nos compósitos de espuma rígida de poliuretano derivado de óleo vegetal com sisal e serragem.

2.1 Compósitos poliméricos

Os compósitos poliméricos são materiais oriundos de matérias-primas insolúveis entre si e constituídos por uma matriz polimérica reforçada com fibras, partículas ou outros insumos (CALLISTER & RETHWISCH, 2016; MANO; MENDES, 2004). Esses materiais combinam as propriedades mecânicas e de processamento do polímero com a resistência e rigidez do material da fase dispersa (GIBSON, 2012; CHAWLA, 2012). Como vantagem da utilização destes compostos, há possibilidade de melhora das propriedades que os constituintes dos compósitos apresentam individualmente, como resistência à corrosão, peso, resistência à fadiga, condução térmica e elétrica, resistência ao desgaste, entre outros fatores (JONES, 1975; VENTURA, 2009).

Gutiérrez e colaboradores (2014) apontam que esses materiais são utilizados no setor da engenharia de maneira documentada desde o início do século XX. No entanto, o uso dos compósitos poliméricos teve um grande aumento após a descoberta da fibra de carbono no Reino Unido em 1964, inicialmente visando aplicações de uso militar e, posteriormente, devido aos benefícios observados, os compósitos também passaram a ser utilizados em áreas focadas no transporte de cargas (LORANDI, CIOFFI & ORNAGHI JR, 2016).

Materiais poliméricos são empregados na indústria automotiva, uma vez que possibilitam a diminuição do peso total do veículo, proporcionam maior segurança aos passageiros e diminuem a manutenção dos carros, além da mitigação dos custos de toda cadeia de produção (GUTIÉRREZ et al., 2014). Ainda, são

amplamente utilizados na indústria aeroespacial, automotiva, construção civil, naval e esportiva (JONES, 1975).

As duas fases que constituem os compósitos são denominadas matriz e fase dispersa. De modo geral, a matriz tende a proporcionar mais aderência e flexibilidade à fase dispersa, induzindo o aprimoramento das propriedades do insumo com base no princípio de ação combinada (SILVA & NASCIMENTO, 2022).

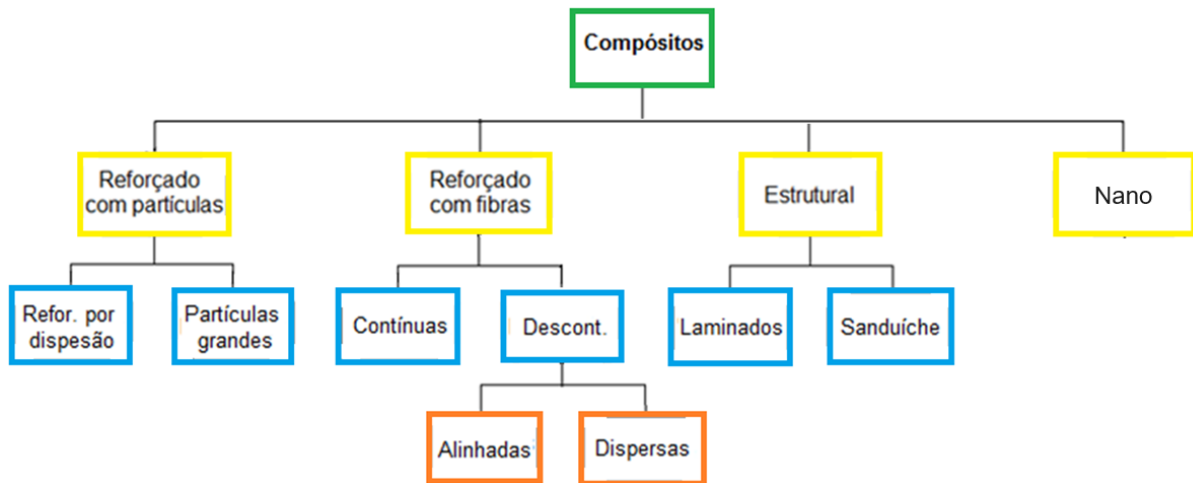
A matriz é responsável por envolver a outra fase, é contínua e polimérica, cerâmica ou metálica, escolhida com base nas propriedades desejadas para o compósito final (CHAWLA, 2012). A matriz atua como um meio de transferência de carga entre as fibras ou partículas da fase dispersa, protegendo também as fibras contra danos ambientais e mecânicos, além de alinhá-las e estabilizá-las (AMADO & REIS, 2019). A matriz também desempenha papel na resistência química e térmica do compósito (CALLISTER & RETHWISCH, 2016; CHAWLA, 2012).

A fase dispersa pode ser de partículas, lâminas, fibras naturais, fibras de vidro, carbono ou aramida, entre outros materiais (CALLISTER & RETHWISCH, 2016). Ela é incorporada à matriz para aumentar as propriedades mecânicas do compósito, como resistência à tração, rigidez e tenacidade (REZENDE & BOTELHO, 2000). O arranjo, a orientação, o volume, a proporção entre matriz e fase dispersa, e o tamanho das fibras ou partículas da fase dispersa também afetam as propriedades do compósito (CALLISTER & RETHWISCH, 2016; CHAWLA, 2012).

2.1.1 Classificação

Uma das classificações usuais de compósitos poliméricos consiste em dividi-los em três principais categorias: reforçados com partículas, reforçado com fibras e compósitos estruturais, como apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Esquema de classificação de materiais compósitos



Fonte: Adaptado de Callister & Rethwisch (2016)

2.1.1.1 Compósitos reforçados com partículas

Compósitos reforçados com partículas são comumente produzidos utilizando-se da combinação de uma matriz dúctil e tenaz com partículas consideradas duras e resistentes (HIGGINS, 1982) e podem ser divididos em duas categorias: compósitos reforçados com partículas grandes e compósitos reforçados por dispersão (CALLISTER & RETHWISCH, 2016).

2.1.1.1.1 Reforço com partículas grandes

A terminologia “grande” é utilizada a fim de indicar que as relações entre partículas e a matriz são consideradas pela mecânica do contínuo, ao invés das interações em nível atômico ou molecular (ARANTES, 2014). Nestes compósitos, as partículas, geralmente mais duras que a matriz, restringem o movimento desta, enquanto as tensões são transmitidas da matriz para as partículas, sendo necessária uma ligação forte na interface entre as duas fases. Ademais, objetivando um reforço eficiente, as partículas devem estar distribuídas uniformemente pela matriz, considerando também como a fração volumétrica impacta o comportamento dos materiais (RUCHERT, 2022). Além disso, necessita-se que elas tenham um tamanho uniforme ao longo dos eixos (CALLISTER & RETHWISCH, 2016).

2.1.1.1.2 Reforço por dispersão

Nestes compósitos, as partículas são pequenas, geralmente entre 10nm e 100nm (RUCHERT, 2022), e as interações entre a matriz e a fase dispersa ocorrem em escala molecular. As partículas atuam de forma a impedir o movimento de discordâncias, conseqüentemente aumentando a dureza e a resistência mecânica, diminuindo também a deformação plástica (CALLISTER & RETHWISCH, 2016).

2.1.1.2 Compósitos reforçados com fibras

Fibras são caracterizadas pelo seu pequeno diâmetro em relação ao comprimento. Um material na forma de fibra possui melhores propriedades que sua versão em forma maciça, pois as fibras costumam ter menos defeitos e menos discordâncias comparadas ao material maciço (JONES, 1975). Além disso, no caso de uma trinca, sua propagação se resume ao tamanho da fibra, conferindo mais resistência ao material comparado à matriz pura (HIGGINS, 1982).

Compósitos reforçados por fibras têm suas características mecânicas modificadas não apenas por conta das propriedades das fibras, mas também a partir do arranjo e orientação das fibras entre si, a concentração destas e a distribuição das mesmas pela matriz (PEIXOTO, 2019). Fibras orientadas de maneira uniforme tendem a proporcionar melhoria das propriedades mecânicas dos compósitos comparadas às orientadas aleatoriamente devido à anisotropia do material (CALLISTER & RETHWISCH, 2016).

2.1.1.2.1 Fibras contínuas

Conforme Peixoto (2019) aponta, nos compósitos em que são utilizadas fibras contínuas como reforço, a resposta mecânica ocorre a partir do comportamento de tensão-deformação entre as fases fibra e matriz, das frações volumétricas das fases e, também, de acordo com o direcionamento da tensão aplicada em relação ao modo como as fibras estão posicionadas. Ainda, cabe notar

que os compósitos cujas fibras são contínuas e alinhadas são considerados anisotrópicos.

Para obter-se uma maior resistência mecânica, oriunda da ligação interfacial fibra-matriz, é necessário o uso desse reforço com a aplicação da força no sentido paralelo das fibras, o que também promove a isodeformação, visto que a deformação das fibras e da matriz é a mesma (CALLISTER & RETHWISCH, 2016; PEIXOTO, 2019).

2.1.1.2.2 Fibras descontínuas

Os reforços de fibras descontínuas são separados em fibras alinhadas e fibras aleatórias. Quando alinhadas, os compósitos podem chegar a valores de módulo de elasticidade e de limite de resistência à tração de até 90% e 50%, respectivamente, comparados aos de fibras contínuas (GUIMARÃES, 2018). Por sua vez, quando aleatórias, há menor eficiência mecânica em relação aos de fibras contínuas, contudo, possuem menor custo de produção e maior facilidade de fabricação em relação às contínuas (CALLISTER & RETHWISCH, 2016) e, geralmente, são utilizadas quando as tensões aplicadas são multidirecionais (VENTURA, 2009).

2.1.1.3 Compósitos estruturais

Compósitos estruturais possuem elevada resistência mecânica específica, considerando a razão entre resistência e densidade, e módulo de elasticidade específico (módulo/densidade), quando comparados a materiais de origem metálica (PARDINI & PERES, 2013). Portanto, costumam ser mais utilizados em projetos nos quais o peso é um fator crucial, como no âmbito aeroespacial, em que sua utilização é feita a fim de reduzir o peso de aeronaves (REZENDE & BOTELHO, 2000).

2.1.1.3.1 Painéis laminados

Compósitos laminados consistem em duas ou mais camadas de dois materiais diferentes, que se ligam por meio da laminação, combinando as propriedades dos materiais envolvidos. As diversas combinações de orientação,

espessura e material das lâminas utilizadas no laminado possibilitam que esses painéis tenham comportamentos distintos das lâminas individualmente (DIACENCO, 2010). Dentre os aspectos que podem ser melhorados pela laminação estão a resistência mecânica, rigidez, resistência à corrosão, diminuição de peso, entre outros (JONES, 1975).

2.1.1.3.2 Painéis sanduíche

Painéis sanduíche são compósitos que possuem uma combinação de duas lâminas exteriores finas, oriundas de insumos rígidos e resistentes, além de um material de enchimento no interior que tenha densidade, resistência e rigidez menores (ALLEN, 1969; CALLISTER & RETHWISCH, 2016). Este tipo de painel costuma ser utilizado na indústria naval, automobilística e aeroespacial por conta de sua elevada rigidez e resistência, além do isolamento térmico proporcionado, redução do peso total e elevada durabilidade comparando-se a outros tipos de painéis (ALMEIDA et al., 2011).

2.1.1.4 Nanocompósitos

São compósitos formados por nanopartículas inseridas em uma matriz frequentemente polimérica. Esses compósitos utilizam as propriedades não usuais de partículas com nanodimensões. As nanopartículas incluem nanocarbonos, nanoargilas e nanocristais particulados que devem ser distribuídas de maneira uniforme e homogênea na matriz (CALLISTER & RETHWISCH, 2016)

2.2 Espuma de poliuretano

O poliuretano, PU, é um polímero obtido por meio da reação entre um poliol e um isocianato (VILAR, 2004). O nome “poliuretano” é derivado da ligação uretânica que se forma entre suas moléculas (THOMSON, 2005). Segundo Santos (2016), a primeira utilização reportada do poliuretano se deu pela reação de um composto hidroxílico com isocianato, realizada por Wurtz e Hoffman. Os poliuretanos

foram produzidos inicialmente por Otto Bayer em 1937 a partir de uma mistura de um di-álcool com um di-isocianato (SANTOS, 2016).

Este é um polímero que possui grande versatilidade, pois, com a variação dos monômeros e dos catalisadores, pode ser obtida uma variedade extensiva de materiais, com textura maciça ou celular, como as espumas de PU (MANO & MENDES, 2004; ZHANG et al., 2019; KURANSKA et al., 2020). Utilizando-se polióis de funcionalidade entre 1,8 e 3,0 e massa molecular entre 1000 e 6000 g/mol, é possível obter espumas flexíveis e elastômeros. Já os polióis de funcionalidade entre 3 e 12 e massa molecular entre 250 e 1000 dão origem a espumas rígidas e tintas de alto desempenho (MONTEAVARO, 2005).

As espumas de poliuretano podem ser divididas entre flexíveis e rígidas, e são caracterizadas por serem materiais de células abertas ou fechadas, que são introduzidas por meio da reação entre água, isocianatos e compostos com hidrogênio reativo (VILAR, 2004). A variação desses reagentes permite obter diferentes propriedades (SILVA, 2011).

As espumas flexíveis de poliuretano possuem amplo uso industrial. Com o passar dos anos, elas avançaram em termos tecnológicos e atualmente possuem diversos tipos, tais como as espumas convencionais – utilizadas em estofados e colchões –, espumas de alta resiliência (HR), empregadas para suportar grandes cargas, e espumas semiflexíveis. Propriedades como maciez, resiliência e rigidez variam em grande faixa, assim, as espumas podem ser produzidas de acordo com a necessidade do produto final (VILAR, 2004).

As espumas rígidas de poliuretano são usadas em estruturas de painéis sanduíche, como em portas e janelas, e para fins de isolamento térmico, devido a propriedades como baixa condutividade térmica, tenacidade ao impacto, baixa densidade e resistência ao desgaste (GUO et al., 2000). Apresentam alta resistência à fadiga, estabilidade dimensional e capacidade de suportar cargas, bem como a aptidão de ajuste de sua dureza (LI et al., 2020; XIANG et al., 2020). São altamente reticuladas e com células fechadas, podendo ter grande variação de densidade.

Estas espumas podem ser fabricadas por derramamento, injeção, entre outras técnicas (VILAR, 2004).

2.2.1 Matérias-primas utilizadas na produção das espumas de PU

O processo de produção das espumas flexíveis e rígidas consiste na mistura de um poliol, isocianatos, um agente tensoativo (surfactantes), agentes de expansão como água e acetona, retardantes de chama, pigmentos, entre outros componentes (VILAR, 2004; SHARMIN & ZAFAR, 2012). Para a fabricação de espumas rígidas, após a reação química do poliol e os demais reagentes, os componentes são expandidos em uma forma moldada, assim criando o produto final a ser utilizado.

Além disso, a espuma rígida de poliuretano é produzida a partir de um isocianato, cuja funcionalidade varia entre 2,7 e 3,0, e um poliol com funcionalidade igual ou superior a 3. Essa funcionalidade refere-se ao número de grupos de isocianato ou hidroxila presentes em cada molécula do composto. Tais aspectos permitem que a espuma de poliuretano forme uma estrutura polimérica tridimensional reticulada. Ademais, na formulação da espuma rígida, também é adicionado um agente reticulador de cadeia de baixa massa molar, com funcionalidade maior que 3, com o objetivo de melhorar a estabilidade dimensional, resistência química e mecânica do material (CARMO, 2020).

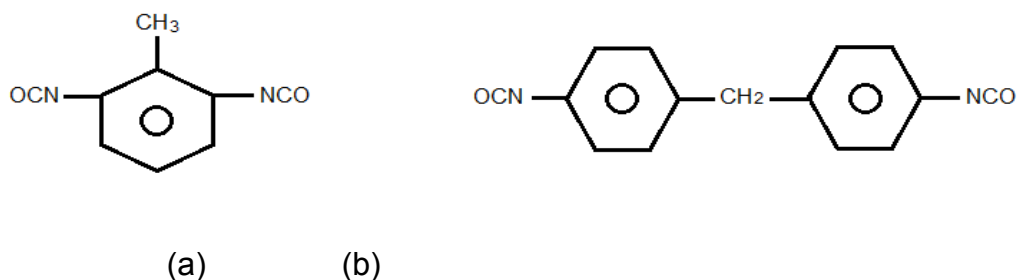
2.2.1.1 Poliol derivado de óleos vegetais

A substituição de produtos derivados de fontes não-renováveis é uma tendência global. Nesse contexto, os polióis derivados de óleos vegetais, que substituem o poliol convencional oriundo do petróleo, são uma alternativa viável. Devido à versatilidade destes materiais, a taxa de crescimento de uso anual é próxima a 4% nos países da América Latina, sendo o Brasil responsável por aproximadamente 50% dessa utilização (SAVIOLI, 2022). Os polióis de origem vegetal, como a lignina (YANG et al., 2012), o óleo de mamona (VILAR, 2004; GURGEL et al., 2021), óleo de soja (VILAR, 2004) e os taninos (KURANSKA et al., 2020) são utilizados para produzir a espuma rígida de poliuretano em substituição aos polióis derivados do petróleo.

2.2.1.2 Isocianatos

Os isocianatos são insumos orgânicos com reatividade de velocidade alta responsáveis pela parte rígida do poliuretano e são considerados como insumos importantes por conta de sua funcionalidade ser superior a 1 (SAVIOLI, 2022). Podem ser divididos entre alifáticos ou aromáticos (TDI e MDI) (MANO & MENDES, 2004), sendo que o isocianato mais utilizado para espumas flexíveis em bloco é o tolueno diisocianato (TDI); já para espumas flexíveis moldadas e espumas rígidas, o uso mais frequente é do difenilmetano diisocianato (MDI) (VILAR, 2004; THOMSON, 2005). As estruturas do MDI e do TDI podem ser vistas na Figura 2.

Figura 2 - Estruturas dos isocianatos; (a) tolueno diisocianato (TDI); (b) difenilmetano diisocianato (MDI)



Fonte: Adaptado de Thomson (2005) e Vilar (2004)

Além da reação com a substância hidroxilada, os isocianatos podem reagir de forma secundária. Um exemplo é a reação entre o isocianato e a água presente até mesmo no ar, formando ácido carbônico que se decompõe em gás carbônico e amina primária, provocando a expansão do polímero (CLARO NETO et al., 2008).

2.2.1.3 Catalisadores

Os catalisadores são usados para obter propriedades que dependem das reações de expansão, velocidade de cura e gelificação. Para a catálise da reação de polimerização, os catalisadores mais utilizados são os compostos organometálicos, dentre eles o dioctoato de estanho II.

Na catálise da reação de expansão da espuma e formação da poliureia, os catalisadores mais empregados são as aminas terciárias. As proporções dos

catalisadores são essenciais para as características finais da espuma (VILAR, 2004), a fim de promoverem de maneira adequada o aprisionamento do gás dentro do polímero e, conseqüentemente, o aumento da força das paredes celulares para evitar o colapso de suas estruturas (MOTTA, 2011).

2.2.1.4 Surfactantes

Os surfactantes, ou agentes tensoativos, são substâncias que apresentam afinidade por óleos, gorduras e superfícies de solução com sólidos, líquidos ou gases. Essa propriedade torna os surfactantes agentes conciliadores de fases imiscíveis, formando emulsões e espumas (DALTIM, 2012).

Os agentes tensoativos são essenciais na formação da espuma de poliuretano, pois promovem a estabilização das paredes celulares, reduzindo a concentração de tensão e impedindo que as células coalesçam, evitando que a espuma colapse (VILLAR, 2004; MOTTA, 2011). Os surfactantes de silicone são usados nas espumas de poliuretano e agem diminuindo as tensões superficiais da mistura, permitindo a entrada do ar, o controle de abertura da célula e a regulação do tamanho desta (VILAR, 2004).

2.2.1.5 Agentes de expansão

Os agentes de expansão são necessários para obter os poliuretanos celulares. Nas espumas de poliuretano, tanto flexíveis como rígidas, o mais usado é a água, que reage com os isocianatos formando CO_2 e segmentos rígidos de poliureia, que conferem dureza à espuma. Ainda, nota-se que a quantidade de água utilizada no processo determina a densidade final da espuma (VILAR, 2004).

Também podem ser utilizados agentes de expansão auxiliares visando diminuir a densidade e a dureza da espuma de acordo com as necessidades do produto final. Dentre os agentes estão o cloreto de metileno, a acetona e o dióxido de carbono líquido (VILAR, 2004). Pontua-se ainda que substâncias como clorofluorcarbonetos (CFC) já foram muito utilizadas como agentes de expansão, porém, após o Protocolo de Montreal em 1987 sobre substâncias que destroem a

camada de ozônio, esses elementos foram substituídos por hidrofluorcarbonetos (HCFC), visto que são menos danosos à natureza (BOLSONI, 2008).

2.2.2 Reações de Síntese

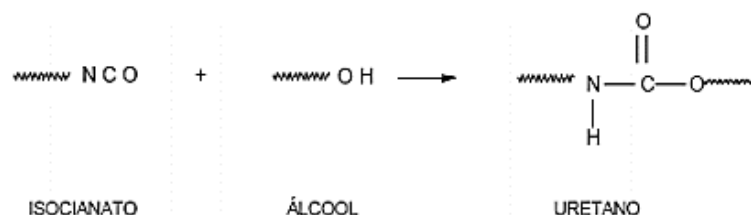
A formação da espuma rígida de poliuretano é um processo químico que envolve a reação entre um poliol e um isocianato. Esta reação química pode ser descrita como uma reação de poliadição entre um poliol e um isocianato (VILAR, 2004; CARMO, 2020).

Durante a reação, o grupo isocianato (-NCO) reage com os grupos hidroxila (-OH) do poliol para formar ligações uretânicas (-NH-CO-O-) e liberar dióxido de carbono (CO₂) como subproduto. Esta interação é denominada como polimerização por adição de isocianato (VILAR, 2004; CARMO, 2020).

A reação química deste processo é exotérmica, ou seja, libera calor como resultado da formação das ligações químicas entre os dois componentes e, como observado por Ribeiro (2010), a média de calor liberado é de 24kcal/mol. Esse calor é responsável por fazer a mistura de poliol e isocianato expandir e endurecer, formando, assim, a espuma rígida de poliuretano (CARMO, 2020).

É possível utilizar duas técnicas distintas para a formação do poliuretano. A primeira é o processo “*one shot*”, ou batelada (MACEDO et al., 2017), Figura 3, que consiste na mistura do poliol e do isocianato sem a formação da fase intermediária, ocorrendo, assim, apenas uma etapa com a formação de um poliuretano monocomponente que é colocado em um molde de acordo com o formato desejado (THOMSON, 2005; JESUS, 2000; MACEDO et al., 2017).

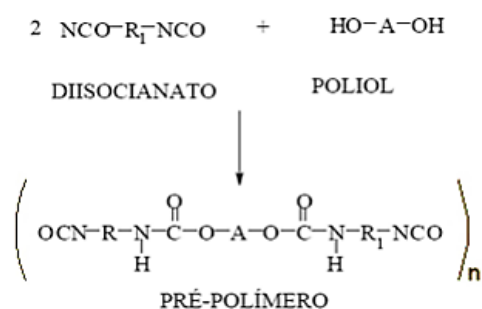
Figura 3 - Formação do poliuretano através do método “*one shot*”



Fonte: Azevedo (2009)

Outra técnica de formação do poliuretano é o processo “two steps”, que consiste na formação de um pré-polímero, Figura 4. Durante esse procedimento, uma fase intermediária para a formação do poliuretano ocorre por meio da reação do isocianato e do polioli.

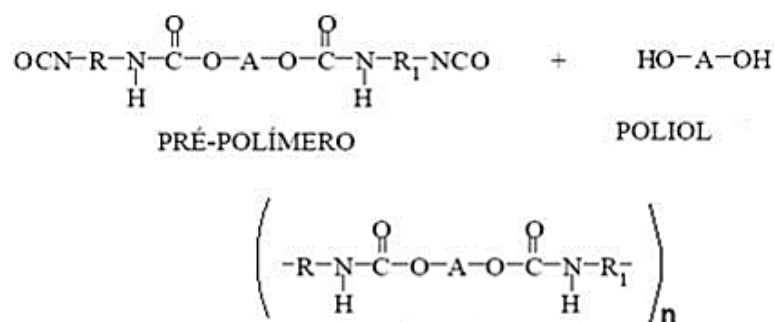
Figura 4 - Formação do pré-polímero de uretano por meio da reação de um diisocianato e de um polioli, como parte do método “two steps”



Fonte: Azevedo (2009)

Após a formação do pré-polímero, acontece uma nova reação desse componente com o polioli, completando, assim, a reação, e dando origem a um polímero bicomponente, Figura 5.

Figura 5 - Formação do poliuretano a partir de um pré-polímero e um polioli, como parte do método “two steps”



Fonte: Azevedo (2009)

2.2.3 Usos da espuma de Poliuretano

Com a evolução da tecnologia e da indústria, diversas aplicações da espuma de poliuretano foram testadas e posteriormente adotadas nos mais variados âmbitos, tanto domésticos quanto industriais.

Assim, mostra-se necessário analisar estudos que abordem essa questão, os quais serão apresentados na sequência, a fim de melhor elaborar as vantagens da utilização e notar possíveis aplicações deste material.

Galvão et al. (2021) estudaram a produção e a caracterização de um compósito de matriz de espuma rígida de poliuretano e reforço de pó de vidro, um resíduo não utilizado pela indústria recicladora, buscando o uso como isolante térmico. O reforço não diminuiu a propriedade de isolante térmico da espuma de PU, podendo então ser utilizado e assim contribuir econômica e ambientalmente por meio da redução do descarte do resíduo de pó de vidro no meio ambiente.

Cardoso et al. (2011) caracterizaram a espuma rígida de poliuretano produzida a partir do óleo de mamona para uso como isolante térmico em forros usados em sistemas de coberturas. A espuma foi considerada adequada para essa aplicação, pois a espuma apresentou temperatura inicial de decomposição próxima a 170 °C e tempo de vida de aproximadamente 14 anos quando mantida a temperatura constante de 81 °C. O valor de condutividade térmica classificou-a como um material muito isolante, além de ser um material biodegradável e advindo de fontes renováveis.

Oliveira (2010) pesquisou o desenvolvimento de um material compósito de matriz de espuma rígida de poliuretano derivado do óleo de mamona e reforço de fibras provenientes de pneus inservíveis, objetivando o uso como isolante térmico. A partir das experimentações, concluiu que o compósito possui propriedade de isolante térmico superior aos isolantes comerciais.

Borges (2009) analisou o desempenho de um compósito de matriz de espuma de poliuretano derivado de óleo de mamona com reforço de vermiculita, um mineral não-metálico, como isolante térmico. Como resultado, chegou-se à

conclusão de que o compósito possui propriedades de isolamento térmico semelhantes aos isolantes comerciais, além de ter maior versatilidade de aplicações pela espuma ser um material moldável.

Paula et al. (2020) estudou compósitos de matriz de espuma rígida de poliuretano, derivado de óleos vegetais, reforçados por serragem e sisal. Compósitos com 50% de espuma, 37,5% de serragem e 12,5% de sisal (proporções em massa) apresentaram densidade média de 644,76 kg/m³, perfil de densidade homogêneo, 55% de absorção de água após 2 horas de imersão e 60% após 24h com inchamento em espessura de 2,75%, e resistência média à flexão de 11,31 MPa. Os autores concluíram que esse compósito pode ser utilizado em artesanato e móveis.

Diversas fibras naturais foram testadas como fase dispersa na matriz de poliuretano rígido, como juta (WANG et al., 2015), linho (QU et al., 2021), bagaço de cana (OLIVEIRA et al., 2019), entre outras fibras. Nesses estudos, foi observado que as propriedades mecânicas finais foram aprimoradas em relação às obtidas em espuma pura.

2.3 Fibras de sisal

As fibras vegetais são cultivadas comercialmente em dezenas de países que estão envolvidos na logística de comercialização. Isso é possível por conta da capacidade de armazenamento desses materiais, durabilidade e propriedades mecânicas (TOWNSEND, 2020). Ademais, como observado por Spinacé et al. (2011) e Ramesh et al. (2013), por serem matérias-primas oriundas de fontes renováveis, terem alta disponibilidade, baixo custo e serem menos abrasivas do que fibras de vidro e carbono, comumente utilizadas na indústria, seu uso vem sendo impulsionado nos últimos anos.

O sisal (*Agave sisalana*) é uma planta de folhas pontiagudas e grandes, apresentando até 10 cm de largura e 250 cm de comprimento, organizadas em forma de roseta (ROSÁRIO et al., 2011), apresentada na Figura 6. A planta é

originária do México e é resistente à aridez e sol intenso, se adaptando bem ao clima semiárido.

O Brasil é o maior produtor mundial de fibras de sisal, tendo sua produção concentrada na região Nordeste (SANTOS, 2006; EMBRAPA, 2006). Esta é uma fibra de grande importância no setor artesanato e na indústria de cordearia (MATTOSO et al., 2011), correspondendo a aproximadamente 70% da produção nacional de todas as fibras duras (SPINACÉ et al., 2011).

Figura 6 - Planta *Agave sisalana*



Fonte: FUNDAJ (2019)

Para o beneficiamento e obtenção das fibras contidas nas folhas, ocorrem os processos de desfibramento, lavagem, secagem, batimento, prensagem e enfardamento (SANTOS, 2006).

A constituição majoritária das fibras vegetais são a celulose, hemicelulose e lignina. A fibra de sisal possui teor de celulose entre 67-78%, cerca de 8-12% de lignina, por volta de 10-14% de pectina, aproximadamente 2% de cera e em torno de 11% de água. Apresenta densidade próxima de 1450 kg/m^3 , diâmetro das fibras de 50-200 μm , resistência à tração entre 468-640 MPa e Módulo de Elasticidade próximo a 9,4-22 GPa (MOHANTY et al., 2000). Ademais, como outras fibras vegetais, possui característica hidrofílica (BLEDZKI et al., 1996).

Pela sua pequena seção transversal de cerca de 450 μm (MARTIN et al., 2009), as fibras de sisal não podem ser usadas diretamente como material de engenharia, sendo seu uso destinado à produção de compósitos, impulsionada por grandes indústrias, como a automobilística. A partir de sua utilização em compósitos com matriz proveniente de um biopolímero derivado de celulose, amido, entre outros insumos similares, obtém-se um biomaterial (biocompósito) (MISRA et al., 2000; ROGOVIN & GALBRAYKH, 1979).

Quando utilizadas em compósitos como reforço, as fibras de sisal possuem diversas vantagens se comparadas às características de reforços sintéticos, tais como: baixa densidade, custo diminuído, natureza não abrasiva e biodegradabilidade. Essas propriedades dependem de alguns fatores, como: idade da planta, origem, constituintes químicos, entre outros (RAMESH et al., 2013).

De Oliveira et al. (2020) produziram compósitos de poliuretano, com poliol proveniente de lignina, reforçados por fibras de sisal, e obtiveram materiais com propriedades para uso em aplicações como peças de veículos automotivos e náuticos, além de materiais de construção e revestimentos.

Rosário et al. (2011) estudaram o desenvolvimento de um compósito de matriz de polipropileno virgem e reciclado, utilizando como reforço as fibras de sisal. Concluiu-se que a adição destas na matriz aumentou a resistência à tração, módulo de Young e, de maneira expressiva, a resistência ao impacto – por volta de 140%.

Carvalho (2005) analisou o desenvolvimento de um compósito de matriz de epóxi e poliuretano, derivado de óleo de mamona, reforçado com fibras de sisal, objetivando a utilização em reforços de estruturas de madeira. O compósito de resina epóxi e sisal foi considerado adequado para este uso, visto que apresentaram melhor desempenho mecânico, maior resistência e variabilidade.

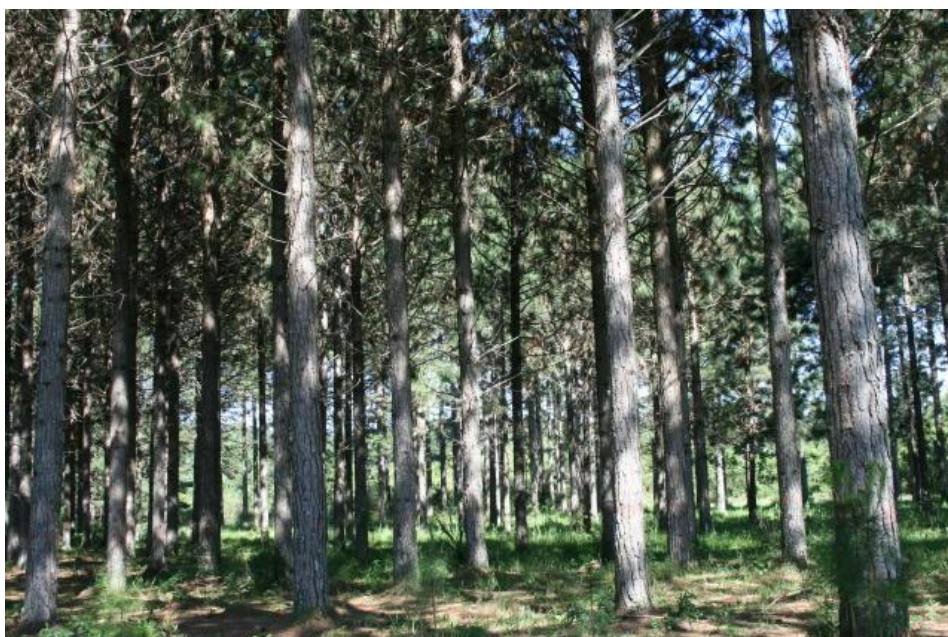
Lima et al. (2007) estudaram a caracterização mecânica de um compósito de laminado de cimento reforçado com fibras longas de sisal. Concluiu-se que a adição de fibras aumentou em 20 vezes a tenacidade da matriz isolada, diminuindo a

fragilidade do material. Ainda, observou-se que o compósito também apresentou elevada resistência à flexão.

2.4 Madeira de *Pinus taeda*

O *Pinus taeda*, Figura 7, é a espécie de pinus de maior importância comercial nos Estados Unidos, compreendendo cerca de 11,7 milhões de hectares de áreas de plantio. No Brasil, árvores do gênero *Pinus* têm seu primeiro registro datando próximo de 1880, sendo que a silvicultura de *Pinus taeda* teve seu início em 1936 (SHIMIZU, 2006). Atualmente, a espécie *P. taeda* é a mais plantada desse gênero, compreendendo cerca de 1,8 milhões de hectares, próximo de 33% da totalidade de florestas plantadas brasileiras (HIGA et al, 2008). A maior concentração dessas plantações nacionais se encontra nos estados de Santa Catarina e Paraná (ROCHA et al., 2005; EMBRAPA, 2014).

Figura 7– Floresta de *Pinus taeda*



Fonte: Jaques, L. C. apud Embrapa (s.d)

O *Pinus taeda* é matéria-prima para a produção de celulose, papel, madeira serrada, chapas e madeira constituída, além de apresentar bom desempenho na captura de carbono da atmosfera (EMBRAPA, 2014).

A madeira proveniente de coníferas apresenta dois tipos de células: as de raio (5 a 10% da composição) e os traqueídeos axiais (90 a 95%), que influenciam as propriedades da madeira (SHIMOYAMA, 2005). Além disso, a idade do lenho é outro importante fator, uma vez que em relação ao lenho adulto, o juvenil apresenta menor densidade, paredes celulares mais finas, maior conteúdo de lignina e menor resistência (BENDTSEN, 1978; GARCIA et al., 2012).

Os valores médios das propriedades da madeira de *Pinus taeda* estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades da madeira de *Pinus taeda*

Propriedades da madeira de <i>Pinus taeda</i>	Valor
Densidade aparente a 12% de umidade [kg/m ³] (TRIANOSKI, 2010)	495
Resistência a compressão paralela da fibra [MPa] (KLOCK, 2000)	24,80
Resistência à flexão [MPa] (SANTINI, et al (2000))	54,52
Módulo de Elasticidade [MPa] (SANTINI, et al (2000))	5941

Rodolfo (2005) sugere a viabilidade do uso dessa madeira em forma de serragem em compósitos. Segundo Mattos et al (2008), o aproveitamento da madeira bruta em indústrias brasileiras varia entre 36% e 68%, ou seja, a partir da matéria-prima bruta podem ser gerados até 64% de resíduo.

A serragem de *Pinus taeda* é proveniente do resíduo do processamento da matéria-prima da indústria madeireira. Os processos de fabricação, como usinagem, geram perdas significativas de material, e esses resíduos gerados não possuem valor comercial (RODOLFO, 2005; HILLIG et al., 2008). Uma alternativa para o uso

deste insumo se encontra nos materiais compósitos, dentre eles, principalmente, os constituídos por matriz polimérica e reforço de madeira (HILLIG et al., 2008).

Hillig (2006) estudou a produção de compósitos de polietileno reforçado com variadas serragens, entre elas a de *Pinus taeda* e, como resultado, foi concluído que as maiores proporções de serragem oferecem maior resistência ao compósito, e confirmou-se a viabilidade de produção de compósitos polímero-madeira para as diferentes serragens.

Protzek et al. (2016) analisaram as propriedades físicas de compósitos de matriz de adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona e reforço proveniente de serragem de *Pinus taeda*. O compósito com 30% de adesivo e 70% de serragem apresentou densidade média de 961,76 kg/m³, absorção de água de 3,70% e inchamento em espessura de 2,45% após 2 horas de imersão; já após 24 horas de imersão houve 9,31% de absorção de água e 9,29% de inchamento em espessura. Em relação a essas características, os compósitos foram considerados adequados para substituir materiais usados na indústria moveleira e de construção civil, além da vantagem de a matriz polimérica ser derivada de fontes renováveis.

Rodolfo (2005) estudou as propriedades de um compósito de matriz de PVC com reforço de resíduos de *Pinus taeda* e *Pinus elliotti*. Concluiu-se que proporções de até 50% de resíduo aumentaram o Módulo de Elasticidade do compósito.

2.5 Compósitos em mobiliário e artesanato

Compósitos utilizados em mobiliário e artesanato, como painéis OSB – *Oriented Strand Board*, compensados, *honeycomb* e MDF, são produzidos utilizando-se madeira proveniente de plantios florestais, em forma de partículas, lâminas, celulose e fibras. Usualmente, é aderida por adesivos como ureia-formaldeído e fenol-formaldeído (OLIVEIRA, 2010), que são derivados do petróleo, fonte não renovável (PAULA, 2017).

O formaldeído livre é um Composto Orgânico Volátil (COV) existente nos adesivos e tem a função de induzir a reação de endurecimento. No entanto, a sua emissão durante o processamento do material e a sua aplicação pode ser prejudicial

à saúde (SILVA, 2003). De acordo com Norback et al. (1995), COVs são emitidos na forma de gases e facilmente vaporizados em temperatura e pressão ambiente, sendo que a concentração de formaldeído no ar em interior de imóveis é cerca de dez vezes superior à existente no ar exterior.

Em estudo realizado por Alvim et al. (2011) sobre a quantificação de COVs na cidade de São Paulo, foi revelado que um dos compostos presentes em maior quantidade na cidade foi o formaldeído, com 5,00 ppbv.

Coelho (2014), ao analisar cozinhas escolares de Lisboa, Portugal, constatou que entre os COVs a que os trabalhadores estão sujeitos encontram-se o benzeno, tolueno, etilbenzeno, formaldeído e o acetaldeído, que são liberados por fontes existentes no interior do local, como móveis de madeira prensada.

Em junho de 2004, a Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer passou a classificação do formaldeído de grupo 2, substância provavelmente cancerígena, para o grupo 1, substância comprovadamente cancerígena, em especial o câncer de nasofaringe (SOLAL et al., 2008; IARC, 2004).

Ao se levar em conta a importância da utilização de uma matéria-prima oriunda de fontes renováveis, bem como os riscos à saúde apresentados pelos formaldeídos, observa-se a necessidade da substituição desses materiais no processo de produção de compósitos. A utilização da espuma rígida de poliuretano derivado de óleos vegetais se mostra como uma excelente alternativa visto que o poliol utilizado é biodegradável e atóxico.

2.6 Sustentabilidade

O aumento da atividade industrial deu origem a sérios desafios ambientais. A consciência global sobre os riscos associados a esses problemas e seu impacto na sustentabilidade da vida humana no planeta cresce constantemente (DA SILVA, 2019).

Segundo Cavalcanti et al. (2020), o Brasil é um dos maiores produtores de resíduos agroindustriais e florestais do mundo. O estilo de vida atual da sociedade,

juntamente com seus padrões de produção, distribuição e consumo, é o principal responsável pela degradação ambiental do nosso planeta.

Essa degradação resulta em poluição atmosférica, emissão de gases prejudiciais à saúde e ao meio ambiente, acúmulo de resíduos e lixo, desencadeando uma série de problemas adicionais, como desequilíbrios climáticos, ocorrência de enchentes e secas em diferentes regiões, além do efeito estufa que está relacionado ao derretimento das calotas polares (NUNES, 2021).

Para Santos (2023), o papel da ciência dos materiais é crucial na busca por soluções sustentáveis visando atender as crescentes demandas sem comprometer os recursos naturais e o meio ambiente. Na ciência de materiais, a sustentabilidade abrange a concepção, desenvolvimento e aplicação de materiais que não apenas minimizam os impactos ambientais, mas também promovem a eficiência no uso de recursos e demonstrem responsabilidade social. Essa abordagem torna-se indispensável para enfrentar desafios globais como as mudanças climáticas e a escassez de recursos.

Pesquisas na área de compósitos reforçados com fibras naturais são uma prática estabelecida em instituições de ensino e pesquisa. O foco desses estudos é explorar o potencial desses materiais como alternativas sustentáveis à substituição de materiais sintéticos, por causarem poluição e terem origem não renovável (JUNIOR et al. 2020).

Graedel e Allenby (2017) argumentam que a concepção de materiais deve considerar não apenas suas propriedades durante o uso, mas também sua reciclabilidade e a viabilidade de reintegrá-los ao ciclo produtivo, uma vez que a reciclagem e o reuso de materiais são componentes vitais da sustentabilidade.

Ali (2018) destaca a importância de projetar materiais com base na "ecoeficiência," otimizando o desempenho com o menor consumo possível de recursos naturais. Isso envolve a escolha de matérias-primas renováveis, recicláveis e de baixo impacto ambiental.

A pesquisa em materiais verdes, como polímeros biodegradáveis e compósitos sustentáveis, é evidenciada por Fratzl (2007). Esses materiais minimizam os impactos ambientais ao longo de seu ciclo de vida, desde a produção até o descarte.

Klöpffer (2006) destaca que a sustentabilidade na ciência dos materiais não se limita apenas aos aspectos ambientais. A responsabilidade social, incluindo condições de trabalho justas e práticas éticas, é parte integrante da abordagem sustentável na produção de materiais.

2.7 Técnicas de caracterização

A caracterização de materiais tem com finalidade a compreensão dos aspectos relacionados à composição e à estrutura dos materiais e estabelecer parâmetros de uso. As propriedades medidas foram: densidade, absorção de água, inchamento em espessura, flexão em 3 pontos, tração perpendicular, micrografia de MEV, flamabilidade e isolamento acústico.

Densidade

A razão entre a massa e o volume de um material é a sua densidade, conforme equação 1. Essa característica afeta as propriedades mecânicas do compósito, pois quanto maior a densidade de um compósito, melhor as suas propriedades mecânicas (CANEVAROLO, 2003). A densidade influencia na escolha da aplicação do compósito, uma vez que materiais com densidades a partir de 1000 kg/m³ são utilizados com finalidade estrutural, enquanto densidades menores são utilizadas em móveis, entre outros.

$$\rho = m/v \quad \text{Eq.(1)}$$

Onde ρ (kg/m³) é a densidade, m (kg) é a massa do corpo de prova e V (m³) é o volume do corpo de prova.

Para o cálculo, foram cortados 6 corpos de prova de espuma rígida e 6 corpos de prova de cada compósito, com serra circular, na medida 50 x 50 mm. Foram considerados apenas os corpos de prova que apresentavam superfície plana a olho nu, sem defeitos aparentes.

Absorção de água e inchamento em espessura

A grande capacidade de absorção de água das fibras e partículas naturais pode trazer falta de estabilidade dimensional e alteração nas propriedades mecânicas dos compósitos (OLIVEIRA, 2010). No ensaio de absorção de água e inchamento em espessura o corpo de prova é imerso em água para simular situação de uso externo do material, no qual estaria suscetível à chuva, por exemplo. A partir dos resultados obtidos é possível classificar o compósito como material de uso interno ou externo.

Absorção acústica

A análise de absorção acústica em compósitos refere-se à avaliação sistemática das propriedades de absorção sonora de materiais compósitos. Essa análise visa compreender como os compósitos reagem à incidência de ondas sonoras, especialmente em termos de absorção e dissipação da energia acústica (MAMTAZ et al., 2016).

Segundo Mamtaz et al. (2016), a absorção acústica em compósitos é influenciada por fatores como a composição dos materiais, a geometria da superfície, a densidade, a porosidade e as propriedades mecânicas. A avaliação desses parâmetros é crucial para o projeto eficiente de materiais compósitos em aplicações onde o controle do ruído é essencial, como em revestimentos de interiores de veículos e imóveis, painéis arquitetônicos, entre outros.

Análise termogravimétrica

Segundo Denari e colaboradores (2012), a TGA é “a técnica termoanalítica que acompanha a variação da massa da amostra, em função da programação de temperatura”. O equipamento é composto por uma termobalança, que permite a pesagem do material conforme ocorre a alteração de temperatura a que a amostra está sendo submetida. Nesta análise, obtêm-se informações sobre o comportamento térmico do material, como o início de perda de massa, que fornece parâmetros de uso em situações de exposição ao calor.

Micrografia eletrônica de varredura

O Microscópio Eletrônico de Varredura, MEV, é um equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação e resolução, permitindo a obtenção de informações sobre a morfologia e identificação dos elementos químicos de uma amostra (DEDAVID et al., 2007). O princípio de funcionamento consiste na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30 KV, o que permite a variação da aceleração dos elétrons e provoca o aquecimento do filamento (DEGEO, 2016). A correção do percurso dos feixes é realizada pelas lentes condensadoras que alinham os feixes em direção à abertura da objetiva, que por sua vez ajusta o foco dos feixes de elétron antes deles atingirem a amostra analisada (DEGEO, 2016). A partir das imagens obtidas é possível analisar a adesão, a compatibilidade da interface, o tipo de fratura ocasionada em ensaio de flexão e a distribuição dos componentes dos compósitos.

Flamabilidade

Em eventos envolvendo incêndios, é comum que apenas uma pequena parcela das vítimas esteja relacionada a queimaduras, visto que as principais causas de fatalidades são atribuídas à fumaça e aos gases liberados (AIRCRAFTFIRE, 2014).

Os impactos da fumaça e dos gases provenientes de materiais poliméricos sobre os seres humanos incluem: perda de orientação e lacrimogênese; toxicidade dos gases liberados (CO, HCl, HBr, HCN, NOx, organohalogenados, etc.); sufocação devido à diluição do oxigênio; e o pânico resultante da combinação desses efeitos (AIRCRAFTFIRE, 2014; GALLO, 1998; VILAR, 2004).

O monóxido de carbono constitui o principal composto tóxico liberado durante a combustão de materiais, sejam eles naturais ou sintéticos. A decomposição térmica do poliuretano pode resultar na produção de CO, óxidos de nitrogênio e pequenas quantidades de HCN. Em experimentos envolvendo animais e diversos materiais, constatou-se que 92% das fatalidades decorrentes da decomposição térmica são atribuídas ao CO, 2% ao HCl, 2% a causas desconhecidas e 4% ao efeito combinado de HCN e CO (VILAR, 2004).

A análise de flamabilidade em compósitos envolve a avaliação das propriedades de combustão e reação ao fogo dos materiais utilizados em diversos contextos.

Com ela é possível obter o tempo decorrido desde a exposição do compósito ao ponto de ignição até o início da combustão efetiva; a velocidade com que a chama se propaga pela superfície do compósito durante a combustão; a quantidade de fumaça e a quantidade total de calor produzida durante a combustão da espuma. Além disso, é possível avaliar os gases tóxicos liberados durante a combustão.

O ensaio de flamabilidade consiste em proporcionar o contato de uma pequena chama com um corpo de prova disposto em angulação de 45° durante 10 segundos de exposição. Após esse tempo a chama é afastada e o tempo até que o fogo apague no corpo de prova é cronometrado (UL94). O ensaio é feito em uma câmara específica. Como os polímeros são suscetíveis à chama é importante conhecer especialmente a velocidade de propagação da chama dos compósitos para classificá-los de acordo com seu uso.

Radiação com UVA

Raios UVA podem afetar o poliuretano causando sua degradação (MOAD; WINZOR, 1998), iniciando a polimerização (PIZZI, 1994), o rearranjo das moléculas do material (BIK et al., 2003) ou outras reações (PIERPOINT et al., 2001).

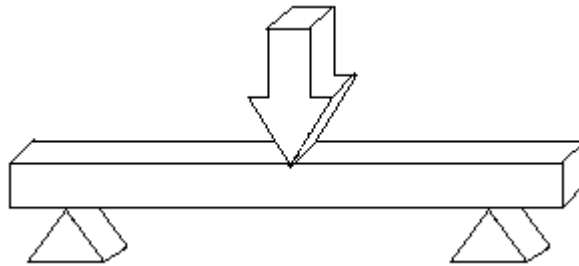
Quando o poliuretano é utilizado com exposição direta ou indireta à radiação solar, podem ter a qualidade mecânica afetada, sendo necessária a exposição dos compósitos sob lâmpadas que liberam UVA e posterior análise mecânica.

Flexão de três pontos

O ensaio de flexão de três pontos é utilizado em materiais rígidos e semirrígidos e consiste na aplicação de uma força no centro do corpo de prova apoiado a uma distância L que varia de acordo com a espessura do corpo de prova, Figura 8. A carga é aplicada lentamente até a ruptura do corpo de prova ou deformação máxima de 5%. Por meio do ensaio é obtida a máxima tensão

suportada pela superfície do corpo de prova (resistência à flexão) e a razão entre a tensão e a deformação no regime elástico (módulo de elasticidade) (GARCIA et al., 2012). A obtenção da resistência do compósito permite a definição do modo de utilização do material.

Figura 8 - Representação esquemática do ensaio de flexão de três pontos



Fonte: Adaptado de Canevarolo (2003)

Perfuração

As operações de usinagem são aquelas que conferem à peça forma, dimensão ou acabamento, produzindo cavaco, o qual é uma porção do material da peça retirada pela ferramenta e que se caracteriza pela forma irregular (ELLEMBERGER, 2018).

A operação de perfuração é amplamente empregada no processamento de compósitos poliméricos, caracterizando-se pela criação de furos ou perfurações nesses materiais. Essa técnica é empregada com o propósito de estabelecer aberturas destinadas à fixação de componentes, simplificação da instalação ou montagem de estruturas, além de atender a outros propósitos específicos (JONES, 1975).

Jones (1975) afirma que a perfuração em compósitos poliméricos é uma operação crítica, pois pode afetar a integridade estrutural do material. Deve-se considerar o tipo de compósito, o método de furação, a distribuição de fibras e a preservação das propriedades mecânicas, além do acabamento.

2.8 Considerações finais

Quando comparadas às fibras sintéticas, as fibras naturais apresentam algumas vantagens: são recicláveis, de fonte renováveis, biodegradáveis, não são tóxicas, apresentam baixo custo, isolamento térmico e algumas vezes exibem melhores propriedades mecânicas, como a resistência à tração e o módulo de elasticidade.

A matriz polimérica de espuma rígida de poliuretano derivada do óleo vegetal tem por objetivos, além da busca por uma matriz de origem vegetal em substituição às sintéticas, melhorar as propriedades relacionadas à interação fibra/matriz nos compósitos (VASCO, 2014), pois não há necessidade de utilizar agentes de acoplamentos ou realizar tratamentos químicos na fibra para melhorar a compatibilidade da fibra natural com a espuma de poliuretano.

Com base na pesquisa de Paula (2020) é esperado que compósitos de serragem e sisal com espuma rígida de poliuretano derivado de óleos vegetais possam ser aplicados em usos estruturais, na confecção de mobiliários e na confecção de artesanatos com pouca utilização de energia para produção, agregando valor a materiais que seriam descartados causando poluição ambiental.

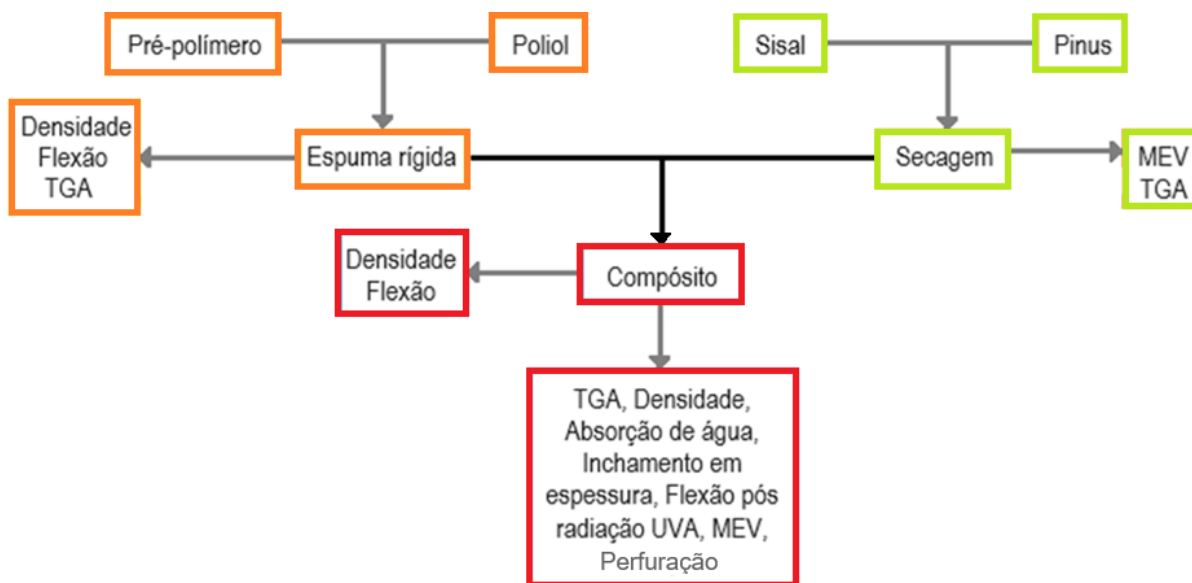
3 EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados o fluxograma de atividades, os materiais e os métodos utilizados para o desenvolvimento dessa pesquisa.

3.1 Fluxograma

Na Figura 9 é apresentado o fluxograma do processo de obtenção e caracterização das amostras de compósito.

Figura 9 - Fluxograma do processo de obtenção e caracterização das amostras de compósito



Fonte: Autoria própria (2024)

3.1.1 Materiais utilizados na produção dos compósitos

As fibras de Sisal, *Agave sisalana*, *in natura* foram adquiridas em mercado local. A serragem de *Pinus taeda* foi obtida de residual de marcenarias da região de São Paulo.

Espuma rígida de poliuretano derivado de óleos vegetais, código KT-1106, fabricada pela empresa Kehl Indústria e Comércio, Araraquara-SP, na forma de solução bicomponente resultante da reação de poliol com pré-polímero. Foi utilizada a proporção de pré-polímero:polioli de 1:1 de acordo com as informações técnicas da fabricante Kehl, conforme Anexo A.

3.2 Planejamento fatorial

Nesse tópico são apresentados os planejamentos fatoriais utilizados na avaliação dos parâmetros da espuma rígida e dos compósitos. Na avaliação do planejamento fatorial, empregou-se a análise de variância (ANOVA) com teste de normalidade de Shapiro-Wilk, análise multifatorial e regressão múltipla para examinar as interações entre as variáveis, além de teste de Tukey para a

comparação de médias. Todas as análises foram realizadas considerando um intervalo de confiança de 95%.

3.2.1 Parâmetros de prensagem da espuma rígida

O planejamento fatorial, no qual se avaliaram as interações entre as variáveis, foi utilizado com o intuito de avaliar a influência da temperatura e do tempo de prensagem na espuma rígida, uma vez que o polímero é o componente mais afetado por temperatura, tempo e pressão no compósito devido à reação química ocasionada pela mistura dos seus componentes.

Os fatores de controle de prensa definidos foram temperatura e tempo de prensagem. Cada fator possui 3 níveis, ao qual atribuiu-se 1 para o nível inferior, 0 para o valor médio e +1 para o nível superior, Tabela 2. Sendo assim, a quantidade de combinações foi de $3^2 = 9$ totalizando 27 amostras, uma vez que todas as combinações foram feitas em triplicata. A variável resposta do processo foi a resistência à flexão de três pontos.

Tabela 2-Fatores e níveis do planejamento fatorial da espuma rígida

Fator	Nível (-1)	Nível (0)	Nível (+1)
Temperatura (°C)	25°C	35°C	45°C
Tempo (min)	20	30	40

Fonte: Autoria própria (2020)

A variação de temperatura foi estabelecida de acordo com a amplitude da controladora de temperatura utilizada, partindo da temperatura ambiente (25°C).

O tempo foi estabelecido de acordo com estudo anterior (PAULA, 2017), no qual se verificou que a prensagem de 20 minutos foi suficiente para formação do compósito, contudo ainda houve aumento da espessura após a prensagem, sendo assim, foram estabelecidos dois tempos de prensagem superiores ao já estudado.

A pressão (4MPa) foi estipulada com base em estudo de Paula (2017) e mantida constante devido a expansão não controlada ocasionada pelo aumento da pressão de prensagem.

As amostras produzidas foram nomeadas de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3– Combinações com seus respectivos parâmetros de prensagem

Combinação	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Pressão (MPa)
E1	20	25	4
E2	30	25	4
E3	40	25	4
E4	20	35	4
E5	30	35	4
E6	40	35	4
E7	20	45	4
E8	30	45	4
E9	40	45	4

Fonte: Autoria própria (2020)

3.2.2 Parâmetros de produção dos compósitos

Com base nos melhores resultados de temperatura e tempo de prensagem obtidos no planejamento fatorial da espuma rígida, variou-se a proporção de componentes dos compósitos. Para isso, foi estabelecido um planejamento fatorial, no qual se avaliaram as interações entre os fatores tempo e temperatura de prensagem, proporção espuma rígida:fibras e proporção serragem:sisal.

Cada fator possui 2 níveis para os quais atribuiu-se -1 para o nível inferior e +1 para o nível superior, Tabela 4, a quantidade de combinações foi de $2^4 = 16$. A variável resposta utilizada foi a resistência à flexão de três pontos.

Tabela 4–Fatores e níveis do planejamento fatorial dos compósitos

Fator	Nível (-1)	Nível (1)
--------------	-------------------	------------------

Tempo	20	30
Temperatura	25	35
Espuma rígida:fibras	40:60	50:50
Serragem:sisal	38:12	45:5

Fonte: Aatoria própria (2020)

A escolha das proporções de espuma rígida e de serragem:sisal foram estipuladas com base no trabalho de Paula (2017), no qual as proporções em massa que promoveram a maior resistência à flexão foram de 37,5:12,5 serragem:sisal e 50:50 espuma rígida:fibras.

Considerando a proporção de espuma rígida:fibras, considerou-se que a redução da quantidade de espuma reduziria o custo de produção com compósito. Sendo assim, propôs-se o estudo da proporção 40:60 de espuma rígida:fibras. Em relação à proporção serragem:sisal, também foi proposta a redução da quantidade de sisal e aumento da serragem pensando na redução de custo de produção, uma vez que a serragem é residual de serrarias e marcenarias enquanto a fibra de sisal deve ser adquirida em comércio.

A Tabela 5 apresenta a composição das amostras e parâmetros de fabricação.

O compósito cujos parâmetros de fabricação proporcionaram maior resistência à flexão foram submetidos às análises de densidade, absorção de água, inchamento em espessura, absorção acústica, flexão após radiação UVA, análise termogravimétrica, MEV, flamabilidade e perfuração, além da produção de um protótipo.

Tabela 5 - Composição, Tempo, Temperatura, Proporção em massa de espuma rígida: fibras e Proporção em massa de serragem:sisal utilizados na confecção dos compósitos

Composição	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Espuma rígida:fibras	Serragem:Sisal
C1	20	25	40:60	38:12
C2	20	25	40:60	45:5

C3	20	25	50:50	38:12
C4	20	25	50:50	45:5
C5	20	35	40:60	38:12
C6	20	35	40:60	45:5
C7	20	35	50:50	38:12
C8	20	35	50:50	45:5
C9	30	25	40:60	38:12
C10	30	25	40:60	45:5
C11	30	25	50:50	38:12
C12	30	25	50:50	45:5
C13	30	35	40:60	38:12
C14	30	35	40:60	45:5
C15	30	35	50:50	38:12
C16	30	35	50:50	45:5

Fonte: Autoria própria (2020)

3.3 Confeção das amostras

Nesse item são descritos os procedimentos de confecção das amostras de espuma rígida e dos compósitos.

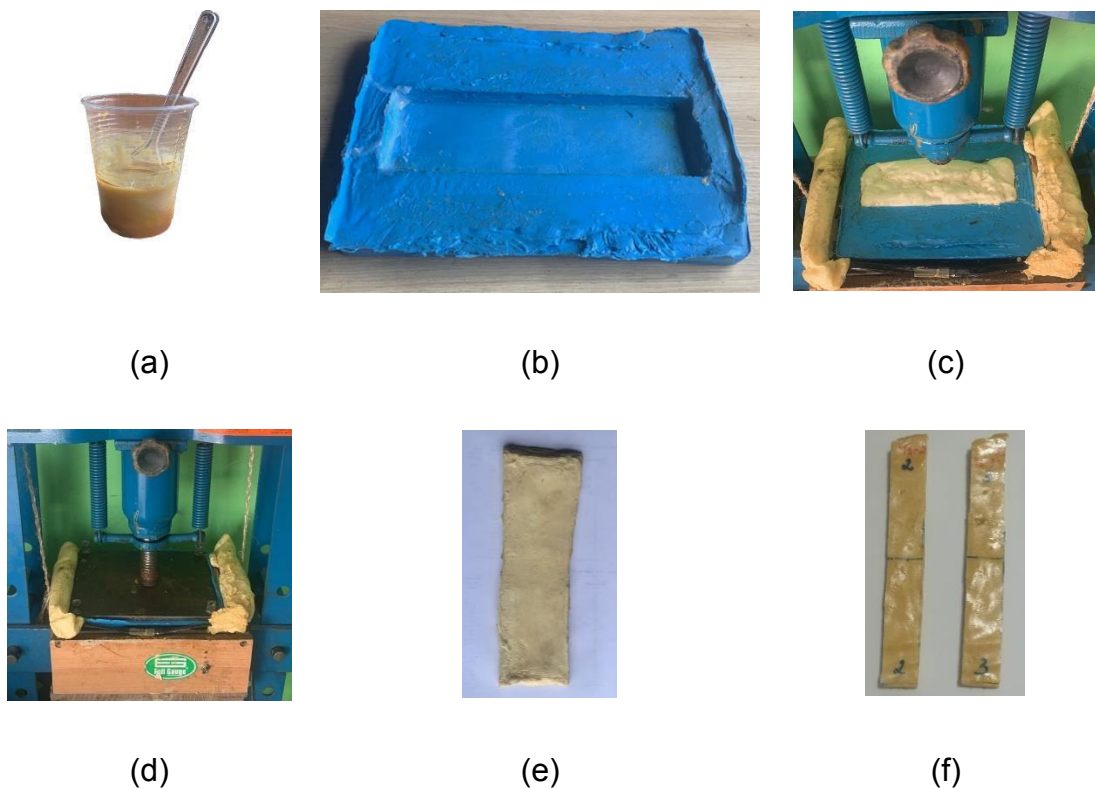
3.3.1 Amostras de espuma rígida

Para a confecção das amostras puras de espuma rígida o ambiente permaneceu climatizado a 60% de umidade relativa e 25°C de temperatura. Foram pesados 27g de pré-polímero e 27g de polioli em balança de cozinha, mantendo-se a proporção 1:1, como sugerido pela fabricante (Anexo A1). Após pesados, os componentes foram homogeneizados levemente com espátula durante 20 segundos.

Em seguida a mistura foi transferida para uma fôrma de silicone e submetida à pressão. A variação da pressão, do tempo de prensagem e da temperatura de prensagem seguiram o planejamento fatorial (seção 3.2.1). Fotografias da produção das amostras de espuma rígida podem ser vistas na Figura 10. Após a prensagem,

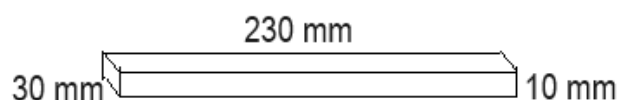
as amostras foram mantidas em ambiente não climatizado durante 7 dias sem aplicação de pressão e então foram cortados 2 corpos de prova na medida 230x30x10mm (Figura 11) de cada amostra para posterior ensaio de flexão. Esta etapa seguiu a norma ISO1209-2/2006 e foram produzidas 5 amostras de cada combinação do planejamento fatorial.

Figura 10 – Etapas de produção das amostras de espuma rígida. (a) Mistura dos componentes; (b) Fôrma; (c) Mistura em expansão; (d) Prensagem; (e) Amostra após prensagem; (f) Corpos de prova da amostra



Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 11 - Dimensões e geometria dos corpos de provas de espuma rígida para o ensaio de flexão, dimensões em mm



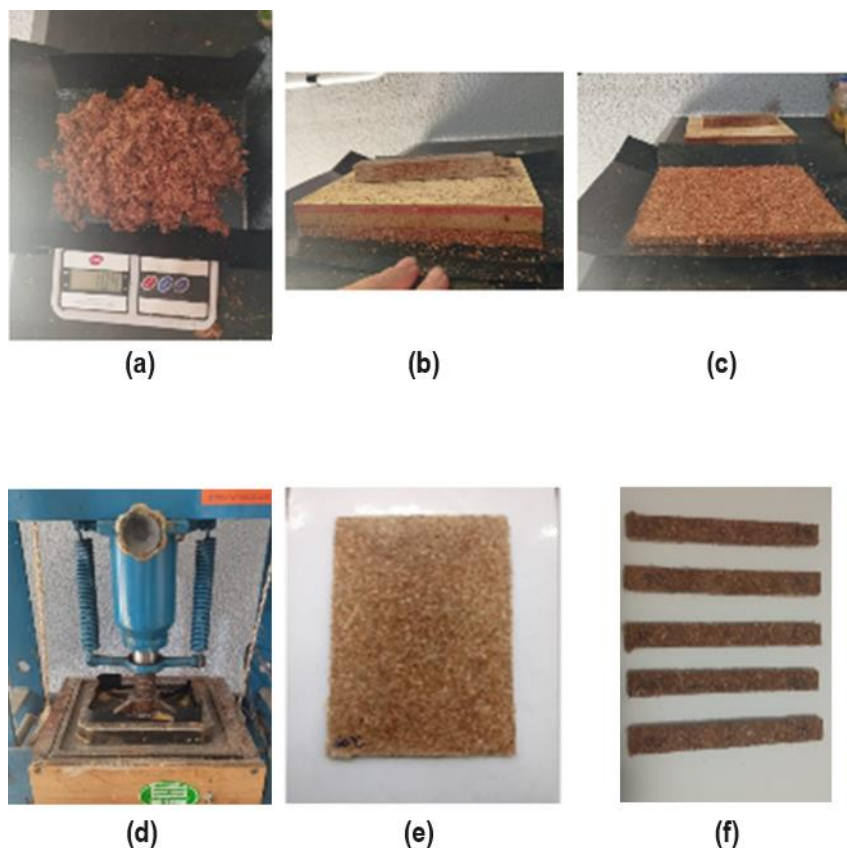
Fonte: Autoria própria (2020)

3.3.2 Amostras de compósitos

Para produção dos compósitos foram estabelecidos parâmetros por meio de planejamento fatorial considerando os parâmetros de prensagem da espuma rígida e dos demais componentes do compósito.

Os compósitos foram produzidos em local com temperatura ambiente de 25°C e umidade de 60%. Os componentes foram pesados em balança de cozinha e a mistura foi feita de forma mecânica com uso de uma batedeira doméstica. Após a mistura dos componentes, o material foi pré-prensado para formação de colchão e levado à prensa sob pressão de 4MPa, como mostrado na Figura 12.

Figura 12- Etapas da produção dos compósitos (a) Pesagem dos componentes, (b) Pré-prensagem, (c) Colchão, (d) Prensagem, (e) Compósito; (f) Corpos de prova cortados para ensaio de flexão



Fonte: Autoria própria (2023)

Após a prensagem os compósitos foram mantidos sob prensa manual durante uma semana em local fechado, não climatizado, com base na metodologia utilizada por Paula (2017) a qual afirmou que os compósitos após prensagem permaneceram expandindo nos dias seguintes.

Posteriormente foram cortados 5 corpos de prova de cada composição, totalizando 80 corpos de prova, com uso de serra circular, nas medidas 120 mm x 12 mm. A espessura nominal dos compósitos foi de 5 mm.

3.4 Caracterização das amostras

Nesse item são apresentados os métodos utilizados na caracterização das amostras de espuma rígida e dos compósitos.

3.4.1 Caracterização da espuma rígida

A espuma rígida foi caracterizada por meio de análise de densidade e flexão de três pontos.

Densidade: análise de densidade foi realizada conforme norma ISO845/2006.

Flexão de três pontos: realizada em Máquina Universal de Ensaio marca EMIC DL10000 na UTFPR-Curitiba seguindo a norma ISO1209/2-2016.

Após a análise dos resultados obtidos no ensaio de flexão, fez-se a interpretação dos parâmetros utilizando-se o programa estatístico R.

3.4.2 Caracterização dos compósitos

Para a caracterização dos compósitos foram realizadas análises de densidade, flexão, análise termogravimétrica (TGA), absorção de água e inchamento em espessura, Micrografia de MEV, Radiação UVA e furação.

Densidade: A análise de densidade foi realizada conforme norma EN323:2002.

Flexão de três pontos: Realizada com base na norma ASTM D790-03 no DEMA/UEPG em máquina Shimadzu modelo AG-IA. A análise estatística foi feita utilizando-se o programa estatístico R.

Análise termogravimétrica: A análise termogravimétrica foi feita no Laboratório de análise térmica e espectrometria de combustíveis e materiais - LATECOM - UTFPR Medianeira/PR em Analisador Térmico STA6000-PerkinElmer, utilizando-se as seguintes condições:

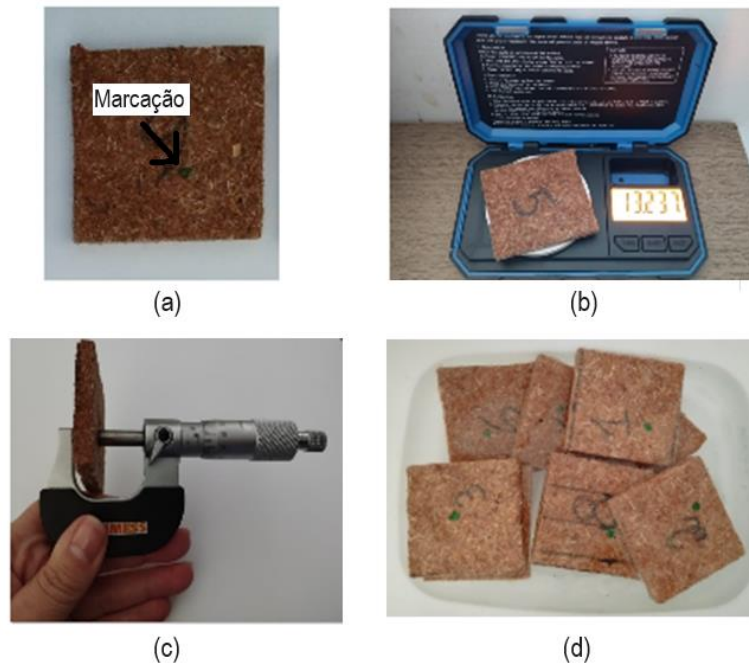
- Massa da amostra: 10,0 mg.
- Faixa de temperatura: 50 °C a 550 °C.
- Razão de aquecimento: 20 °C/min.
- Atmosfera de N₂: 20 ml/min.

Sua finalidade foi avaliar a variação de massa da amostra em função da variação de temperatura com o intuito de se classificar o material de acordo com sua composição.

Absorção de água e inchamento em espessura: Análises de absorção de água e inchamento em espessura foram realizadas de acordo com a norma ASTM D570 no Laboratório de Polímeros e Compósitos – UTFPR Curitiba.

Foram cortados corpos de prova com 50 mm x 50 mm x 5 mm. A espessura foi medida com uso de micrômetro na marcação feita em cada corpo de prova, uma vez que a variação de espessura é uniforme e corpos de prova com defeitos de fabricação foram retirados do espaço amostral. A massa foi medida por meio de balança digital com precisão de 0,001g (Figura 13).

Figura 13 - Etapas do ensaio de absorção de água e inchamento em espessura (a) Corpo de prova marcado para medição da espessura; (b) Pesagem do corpo de prova; (c) Medição da espessura com micrômetro; (d) corpos de prova imersos em água



Fonte: Autoria própria (2023)

Para a análise de absorção de água calculou-se a porcentagem de aumento de peso que as amostras tiveram após 2h e 24h de imersão em água por meio da Equação (1).

$$ab = \frac{Mf - Mi}{Mi} * 100 \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

ab = Variação de massa (%)

Mf = Massa final (g)

Mi = Massa inicial (g)

Para a avaliação de inchamento em espessura, calculou-se a porcentagem de aumento da espessura que as amostras tiveram após 2 horas e 24 horas de imersão em água. O cálculo foi realizado por meio da Equação (2).

$$ie = \frac{Esp f - Esp i}{Esp i} * 100 \quad \text{Eq. (2)}$$

ie = Variação da espessura (%)

$Esp f$ = Espessura final (mm)

$Esp i$ = Espessura inicial (mm)

Estas análises foram feitas para classificação dos compósitos para uso externo ou interno, sendo ou não suscetível à ação da água.

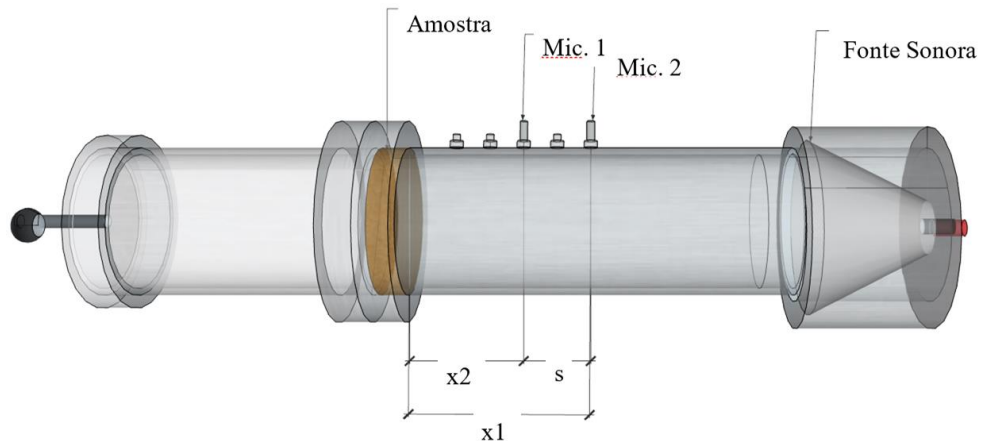
Absorção acústica: A absorção acústica dos compósitos foi realizada com base na norma ASTM 1050/2019 no Laboratório de Dinâmica da engenharia mecânica – PUCPR.

O experimento consistiu no uso do tubo de impedância contendo uma fonte sonora em uma extremidade e um pistão na outra extremidade. O pistão auxilia o posicionamento das amostras a serem medidas.

Os microfones posicionados ao longo do tubo são separados por uma distância “s” entre si, em uma posição x_1 e x_2 da face frontal da amostra a ser medida, com uma pressão incidente P_i e pressão refletida P_r . Na Figura 14 é demonstrada a configuração do tubo de impedância.

O tubo de impedância utilizado é da marca SCS 9020B/K com 100 mm de diâmetro interno. O analisador e gerador de sinais é da marca Brüel & Kjær Type 3160-A-042 de seis canais, sendo quatro canais de entrada e dois canais de saída. Os microfones utilizados para a aquisição dos sinais foram o Brüel & Kjær Type 4935 de 1/4”, pré-polarizados, com pré-amplificadores e transdutores de identificação. Sua sensibilidade nominal é de 5,6 mV/Pa (SILVA et al., 2023).

Figura 14 -Tubo de impedância SCS 9020B/K



Fonte: Silva et al. (2023)

Para analisar a capacidade de absorção dos compósitos, foi determinado de cada amostra o coeficiente de absorção alfa (α). Este coeficiente varia de 0,00 a 1,00, indicando a quantidade da energia sonora que o material absorve em cada reflexão, por frequência, em 125, 250, 500, 1.000, 2.000 e 4.000 Hz.

Para classificar o material foram utilizados os seguintes parâmetros:

$\alpha = 0,01$ significa absorção de 1% da energia do raio sonoro e devolução de 99% para o ambiente.

$\alpha = 1,00$ significa absorção de 100% da energia do raio sonoro e devolução de 0% para o ambiente.

Segundo Allard e Atalla (2009) o coeficiente de redução sonora (NRC) é definido como sendo a razão entre a energia acústica absorvida e a energia acústica incidente.

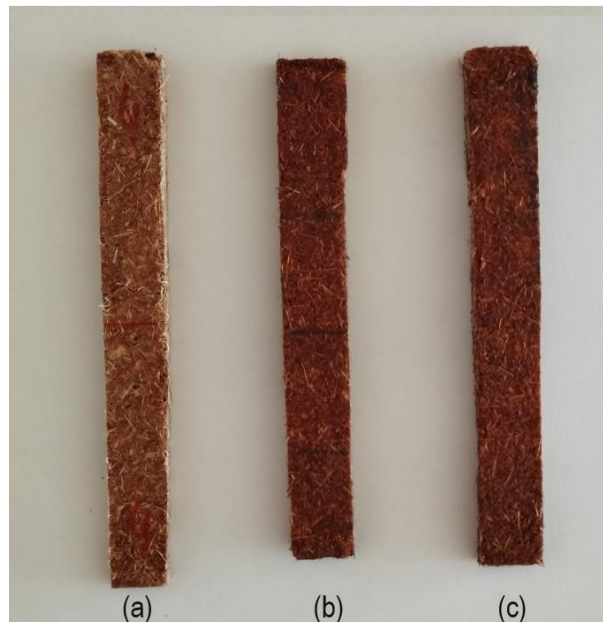
Os parâmetros do ensaio foram estabelecidos seguindo a metodologia de Silva, et al. (2023). Esta técnica foi utilizada com finalidade de determinar as propriedades acústicas do material por meio de medições de pressão nas amostras de duas fases, em dois pontos distintos, dentro do tubo com dois microfones com o intuito de definir os compósitos como apropriados para uso como divisórias do ponto de vista de dissipação de som.

Os corpos de prova para análise mediam 100 mm de diâmetro e foram cortados em fresadora CNC3 eixos, fabricante Vetor CNC, modelo FR2012, utilizando uma fresa de 3 mm de metal duro sem revestimento, com velocidade de avanço de 400 mm/min e velocidade de fuso de 2000 rpm.

Envelhecimento com radiação UVA: Corpos de prova do compósito foram cortados medindo 120 mm x 12 mm x 5 mm e submetidos à radiação UVA durante 500 horas e 1000 horas de cada lado, Figura 15. Foi utilizada lâmpada de UVA da marca Sylvania 15W-350L, com pico de radiação a 350 nm.

Após este período, foi realizado teste de flexão de três pontos de acordo com a norma ASTM D790-03 em Máquina Universal de Ensaio marca EMIC DL10000 na UTFPR-Guarapuava.

Figura 15 -Corpos de prova de flexão. (a) Sem envelhecer; (b) Envelhecimento por UVA durante 500h de cada lado; (c) Envelhecimento por UVA durante 1000h de cada lado



Fonte: Autoria própria (2024)

MEV: Foram utilizadas imagens de Microscópio Eletrônico de Varredura da marca ZEISS modelo EVO MA 15, do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais - UTFPR Curitiba com o intuito de se observar a interface polímero/fibras na região da ruptura por flexão de três pontos, uma vez que a qualidade das interfaces está relacionada à transmissão de tensões ocasionadas por esforços mecânicos.

Flamabilidade: O ensaio de flamabilidade foi feito no Laboratório de Polímeros e Compósitos – UTFPR Curitiba com base nas especificações da norma UL94 com intuito de simular situações de incêndio e verificar como o compósito se comporta em ocasiões como essa.

Foram preparados dez corpos de prova medindo 150x12x6 mm, sendo cinco para queima vertical e 5 para queima horizontal. Para a realização do ensaio UL 94 vertical os corpos de prova foram marcados 6 mm da extremidade para serem fixados verticalmente à chama.

Na outra extremidade, foram marcados 10 mm que ficaram em contato com a chama quando o ensaio foi iniciado. Foi colocado algodão na base do bico de Bunsen para avaliação em caso de gotejamento proveniente da queima. Inicialmente a chama é colocada por 10 segundos na extremidade livre do corpo de prova. Após esse tempo, a chama foi removida e observou-se a chama extinguir-se.

Caso a chama seja autossustentada não será possível classificá-la segundo a UL94 vertical, sendo necessária a análise UL94 horizontal, porém, caso a chama extinguir-se, ela é recolocada por mais 10 segundos, e o material é caracterizado de acordo com as seguintes classificações:

Classificação V0 – quando a soma dos tempos de duração da chama não for superior a 50 segundos, e a camada de algodão não incendiar por gotejamento do material.

Classificação V1 - quando a soma dos tempos de combustão não for superior a 250 segundos e sem queima do algodão por gotas ou fagulhas emitidas;

Classificação V2 - quando a soma dos tempos de combustão não for superior a 250 segundos, mas a camada de algodão incendeia pelo gotejamento do material. Na Figura 16 é mostrado o esquema para o ensaio de flamabilidade vertical.

Figura 16 -Representação dos aparatos para o ensaio de flamabilidade vertical



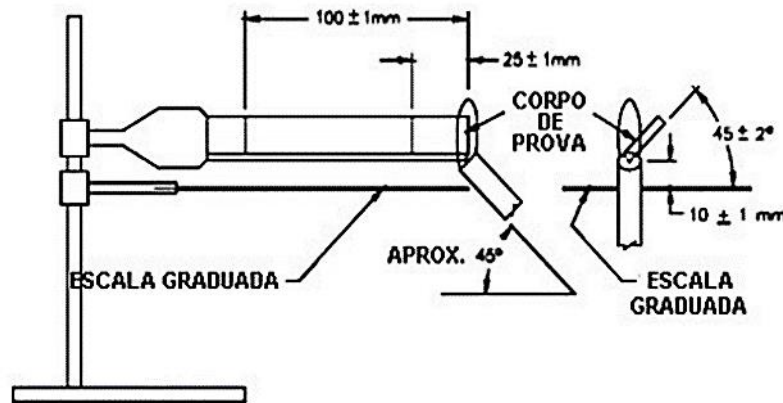
Fonte: Ribeiro et al. (2013)

O ensaio de queima na horizontal, Figura 17, é aplicado para materiais que continuam a queimar e propagar a chama mesmo após a retirada da chama inicial. Esta análise é utilizada com o objetivo de classificar o material por meio da velocidade de queima.

Neste teste, o corpo de prova deve ser fixado pela extremidade livre de marcação. O bico de Bunsen deve estar inclinado a um ângulo de 45° e ajustado de modo a produzir uma chama de comprimento igual a 20 mm na posição vertical e que fique em contato 6 mm com o material. O corpo de prova deve ser marcado a 25mm e a 100 mm da extremidade livre.

A chama deve ser aplicada na extremidade livre da amostra por um período de 30 segundos. Se o corpo de prova continuar a queimar após a remoção da chama, o tempo que a “frente de queima” levou, a partir da marca de 25 mm, para atingir a marca de 100 mm, deve ser marcado em segundos, assim como o comprimento que foi danificado em mm.

Figura 17 -Representação esquemática para o ensaio de queima horizontal.



Fonte: Ribeiro et al. (2013)

O ensaio de flamabilidade UL 94 horizontal (UL 94HB) tem o objetivo de determinar a taxa de queima linear “V” em milímetros/minuto para cada corpo de prova, usando a Equação 6.

$$V = \frac{L}{t} * 60 \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

V = Taxa de queima linear em mm/minuto;

L = Comprimento danificado no corpo de prova, em milímetros;

t = Tempo em segundos.

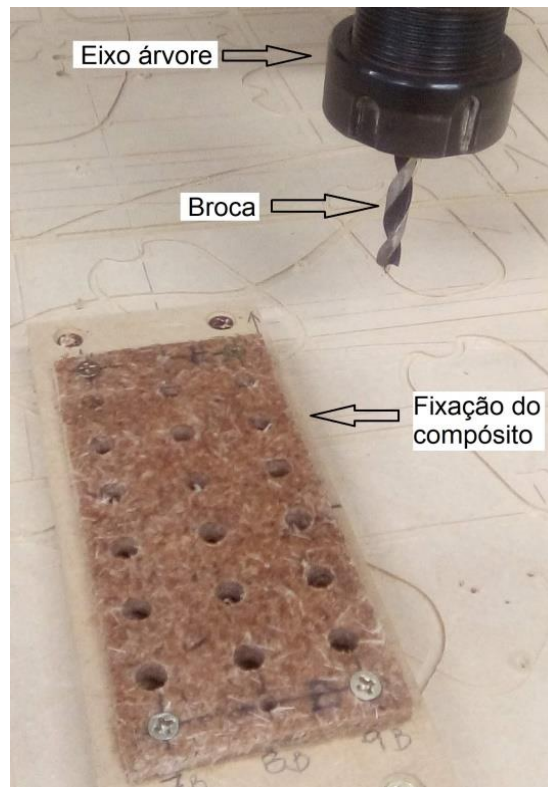
Perfuração: Análise de perfuração foi realizada no Laboratório de Design – UTFPR Curitiba com a finalidade de simular perfuração por broca e estabelecer qual a melhor opção dentre as bocas e suas respectivas velocidades de avanço, pensando em seu possível uso moveleiro.

As operações de perfuração foram executadas em uma fresadora CNC modelo FR2012 Vetor. Na Figura 18 é mostrada a fixação do compósito na fresadora CNC para realização das furações.

O planejamento das furações foi realizado nos softwares *Autocad 2016 Student* e *ArtCam* com valores de velocidade de corte (v_c) e do avanço (f) baseados no trabalho de Ellenberger et al. (2022). As análises dos furos foram feitas visualmente com registro de fotografias.

Foram utilizadas a broca modelo helicoidal com 6 mm de diâmetro, material aço rápido com ângulo de ponta 118° , duas arestas de corte e ângulo de hélice 30° , fabricante *Collins*, e a broca modelo três pontas (*brad point*) com 6 mm de diâmetro, material aço rápido e ângulo de hélice 30° , fabricante *Collins*. As perfurações foram passantes, ou seja, atravessaram o material, e a operação foi realizada a seco para não comprometer as propriedades do material pelos meios lubri-refrigerantes. A avaliação foi feita de modo visual.

Figura 18 - Fixação do compósito para furações na fresadora CNC



Fonte: Autoria própria (2024)

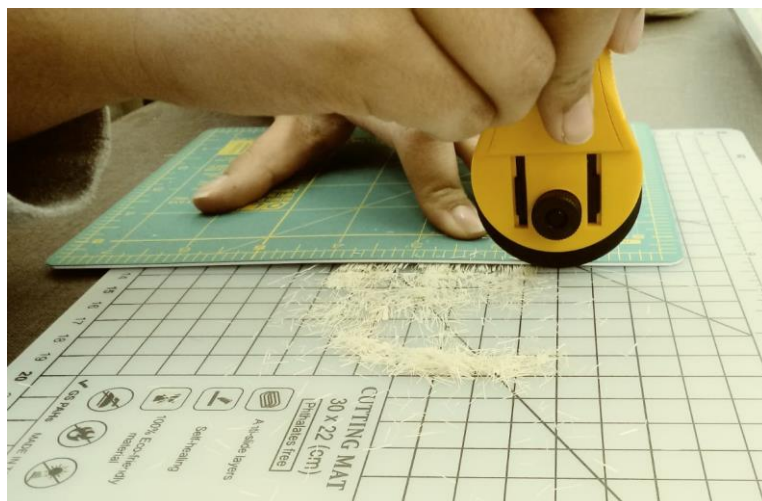
4 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos na análise do sisal, da serragem, da análise fatorial da espuma rígida e dos compósitos. São também apresentados e discutidos resultados das análises de densidade, absorção de água e inchamento em espessura, absorção acústica, análise termogravimétrica, resistência à flexão pós-irradiação com UVA, flamabilidade e perfuração, bem como apresentação de um protótipo fabricado com o material produzido nessa pesquisa.

4.1 Caracterização dos materiais

As fibras de sisal foram cortadas com aproximadamente 5 mm de comprimento, Figura 20 a, com cortador de *patchwork* marca Olfa com lâmina de 45mm, Figura 19, e secadas em estufa marca Med-Clave Mod 1 a 60° C durante 24h.

Figura 19 - Sisal sendo cortado com cortador de *patchwork*



Fonte: Autoria própria

A serragem, Figura 20 b, foi classificada em peneira com granulometria de 16 mesh e seca em estufa marca Med-Clave Mod 1 à 100° C durante 24h.

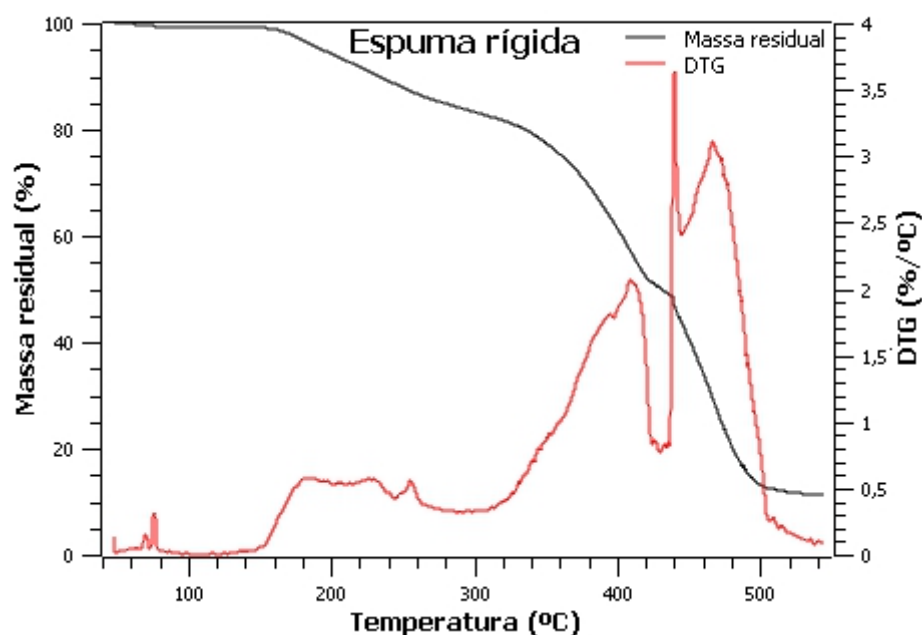
Figura 20 – (a) Fibras de sisal cortadas e secas; (b) serragem classificada e seca



Fonte: Autoria própria (2023)

Os materiais foram caracterizados por meio de análise termogravimétrica e MEV. As curvas de perda de massa de espuma rígida, serragem e sisal resultantes da TGA e suas respectivas derivadas estão apresentadas nas Figuras 21, 22 e 23.

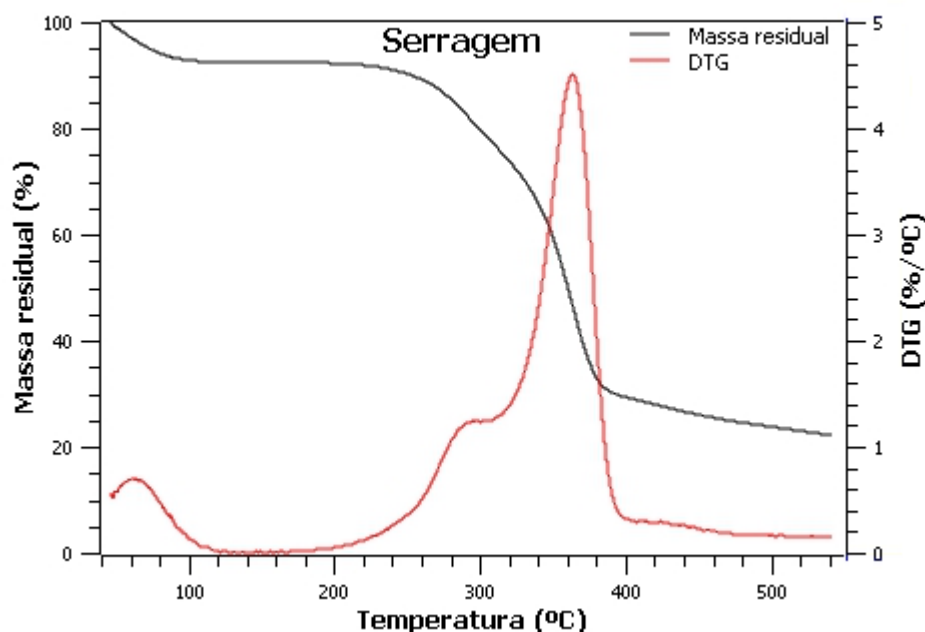
Figura 21 -Curva de perda de massa (%) e DTG (%/°C) em função da temperatura (°C) da espuma rígida



Fonte: Autoria própria (2023)

A decomposição da espuma rígida se divide em três etapas. A primeira ocorre entre 145 °C e 260°C, correspondente à perda de 15% de massa da amostra a qual pode ser atribuída ao início da quebra das ligações uretânicas que tem seu ápice na segunda etapa, entre 310°C a 420°C, com perda de massa em torno de 30% correspondente à despolimerização do uretano (REINERTE et al, 2020). A terceira etapa ocorre em um intervalo de temperatura de 440 °C a 510°C, com uma perda de massa de 37,5% referente à degradação do poliol e do isocianato, em eventos consecutivos, decompondo-se os grupos ésteres presentes no material (CANGEMI, 2006; TROVATI et al., 2010; REINERTE et al, 2020).

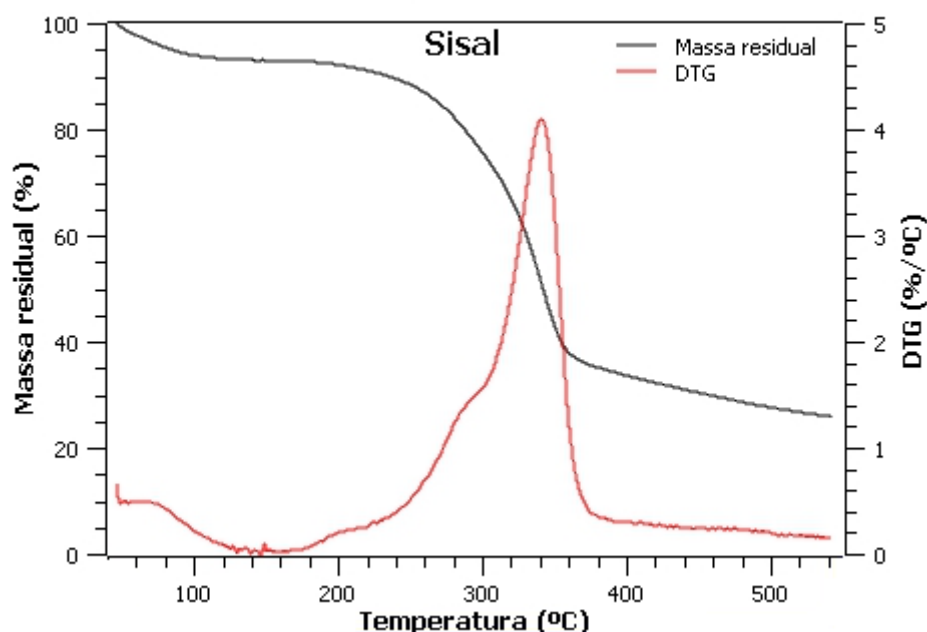
Figura 22 - Curva de perda de massa (%) e DTG (%/°C) em função da temperatura (°C) da serragem



Fonte: Autoria própria (2023)

A serragem apresentou curva de perda de massa com duas etapas de decomposição. A primeira etapa refere-se à perda de água correspondente a 9% de massa com pico aos 60°C sugerindo que a serragem estava com aproximadamente 9% de umidade no momento da produção dos compósitos. A segunda etapa iniciou-se em 210 °C com dois eventos consecutivos, sendo o primeiro com pico aos 280°C com degradação térmica da hemicelulose, na qual a hemicelulose é pirolisada para produzir produtos voláteis (ZHENG, et al 2023), e o evento seguinte com pico aos 360°C e término em 400 °C com a degradação da celulose e redução de massa de 61%. Nessa etapa também se inicia a decomposição do lado alifático da cadeia de lignina (BORTOLUZ, et al 2019) que apresenta degradação lenta numa ampla faixa de temperatura, sendo o componente mais difícil de ser decomposto (YANG, et al. 2007). A partir de 400 °C restou aproximadamente 30% de massa de serragem devido à condensação dos componentes da lignina e de sua aromatização em atmosfera de nitrogênio a altas temperaturas, além da presença de cinzas.

Figura 23 - Curva de perda de massa (%) e DTG (%/°C) em função da temperatura (°C) da serragem



Fonte: Autoria própria (2023)

A curva de sisal apresentou-se semelhante à da serragem. A primeira etapa apresentou perda de massa de aproximadamente 8% com pico à 50°C referente à perda de água. A etapa seguinte apresentou dois eventos consecutivos, iniciando-se em 220°C com primeiro pico à 280°C, referente à degradação da hemicelulose, e segundo pico à 340°C com degradação da celulose (PEREIRA, et al 2020), encerrando-se à 380°C com redução de massa de aproximadamente 53%.

Considerando os resultados obtidos, a temperatura máxima na qual os componentes possuem estabilidade térmica é de 145°C para a espuma, 210°C para a serragem e 220°C para o sisal. Sendo assim, sabe-se que as temperaturas de trabalho para a confecção dos compósitos não devem ser

superiores àquelas temperaturas, uma vez que, se superiores, podem causar degradação nos componentes.

Além disso, a umidade presente na serragem e no sisal pode favorecer o surgimento de bolhas na espuma devido a reações químicas do poliuretano com a água (VILAR, 2004).

Ao avaliar espumas de poliuretano derivado de óleo de palma, soja e linhaça, Miranda et. al. (2023) obtiveram curva de perda de massa de espuma de poliuretano derivado de óleo de palma semelhante à observada na curva de espuma rígida desta pesquisa.

Bianchi et. al. (2010) analisaram a estabilidade térmica de madeira de *Pinus sp.* por meio da variação da taxa de aquecimento em atmosfera de nitrogênio (50 ml/min). Em taxa de aquecimento de 5 °C/min, a curva mostrou-se semelhante à obtida nesta pesquisa, com máxima velocidade de decomposição até 375 °C.

Martin et. al. (2009) em estudo sobre a caracterização da fibra de *Agave sisalana* obtiveram resultados semelhantes às perdas de massa obtidas nesta pesquisa.

A Figura 24 refere-se à micrografia por microscopia eletrônica de varredura da serragem (a) e do sisal (b).

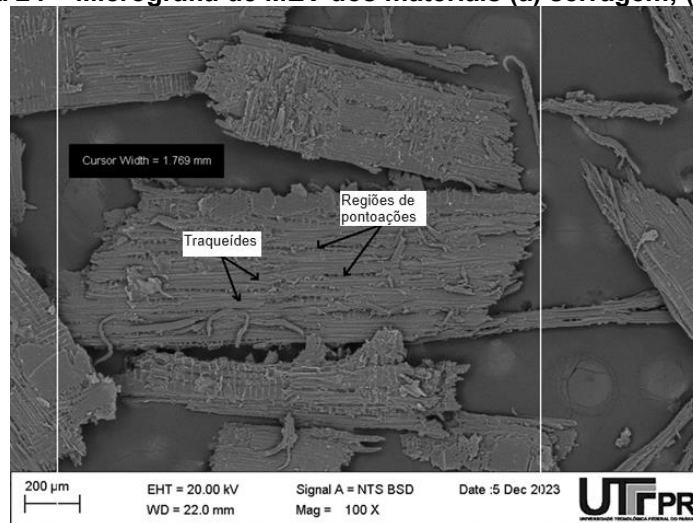
Na Figura 24 (a) pode-se observar o comprimento aproximado de 1,769 mm da serragem bem como seu formato próximo ao retangular. Pode-se observar a presença de traqueídes e de regiões de pontoações que são características da madeira de *Pinus* (PHILLIPS, 1963; HEINS, 2005).

Na Figura 24 (b) nota-se que o sisal tem formato alongado por se tratar de uma fibra e sua medida aproximada foi de 4,95 mm. Sendo assim, o tamanho ficou próximo ao estipulado para corte.

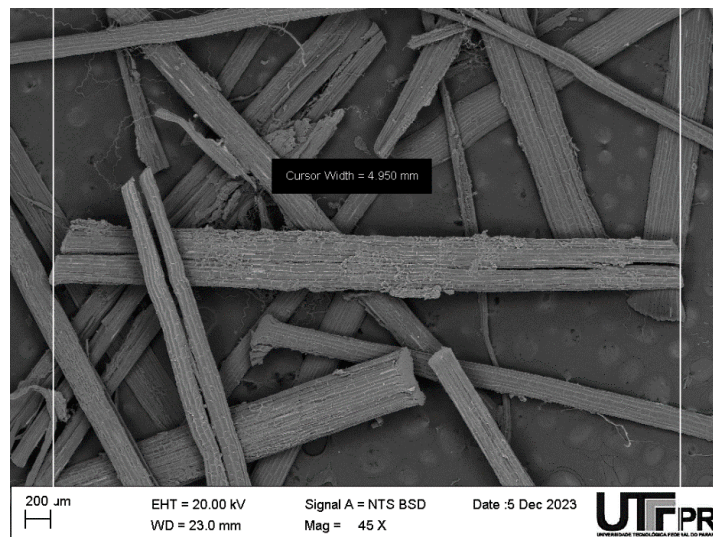
Paula et al (2019) avaliaram tipos de corte da fibra de sisal e sua influência em compósitos poliméricos com serragem e espuma de poliuretano derivado de óleos vegetais. Os cortes analisados foram com uso de tesoura, guilhotina e

cortador de *patchwork*. Concluíram que o corte mais indicado para a fibra de sisal é o realizado com cortador de *patchwork*, uma vez que não ocasiona o achatamento das pontas das fibras, não as desfibrando. Essa característica também pode ser observada na Figura 24(b), uma vez que as pontas aparentam não terem sido prejudicadas pelo corte realizado.

Figura 24 – Micrografia de MEV dos materiais (a) serragem; (b) sisal



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 24 (b) também é possível observar que a fibra de sisal possui superfície particularmente lisa, sugerindo que em seu processo de beneficiamento para comercialização as fibras podem ter sido submetidas a tratamentos químicos não divulgados pelo fornecedor.

Esses possíveis tratamentos químicos podem influenciar na formação dos compósitos, contudo essa avaliação não fez parte do escopo dessa pesquisa.

4.2 Caracterização da espuma rígida

Na Tabela 6 apresentam-se os valores de densidade média para as diversas combinações de espuma rígida, descritas na seção 3.2.1.

Tabela 6 –Densidade média (kg/m³) e desvio padrão das combinações de espuma rígida

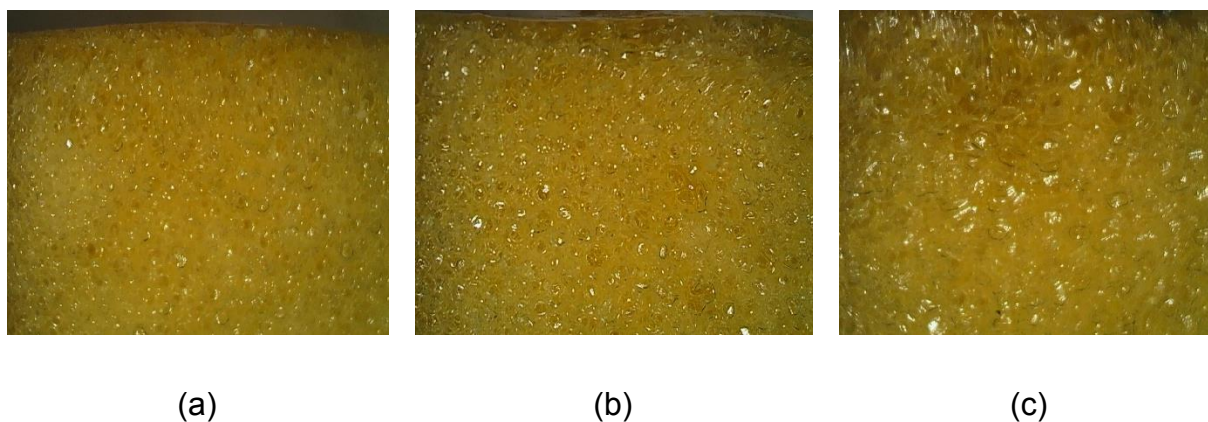
Combinação	Densidade média (kg/m ³)
E1	249,16 ± 25,52
E2	207,57 ± 21,50
E3	181,88 ± 12,78
E4	187,79 ± 24,06
E5	232,50 ± 18,05
E6	303,52 ± 21,02

Fonte: Autoria própria (2022)

Para avaliar a superfície nas amostras de espuma rígida foram feitas imagens em Microscópio Digital Portátil 1-1200x, marca Mustool, com aumento de 5x.

Na Figura 25 podem-se observar imagens de microscópio em mesma resolução de corte transversal de amostra de espuma das combinações E1 (a), E2 (b) e E3 (c).

Figura 25 -Imagens de corte transversal de espuma rígida. (a) Combinação E1; (b) Combinação E2; (c) Combinação E3.



Fonte: Autoria própria (2022)

As combinações E1, E2 e E3 foram submetidas à temperatura de 25 °C e tempo de prensagem de 20, 30 e 40 minutos. Relacionando os resultados da Tabela 6 com a Figura 25, pode-se notar que o aumento do tempo de prensagem em temperatura ambiente (25°C) promoveu a redução da densidade das espumas rígidas.

Comparando-se as imagens da Figura 25 pode-se notar que na Figura 25 (a) as bolhas são pequenas e homogêneas; já na Figura 25 (b) as bolhas são mais visíveis, enquanto na Figura 25 (c) as bolhas são grandes e menos homogêneas comparadas às demais imagens.

Considerando que a formação de bolhas é inerente ao produto utilizado, ao se aumentar o tempo de prensagem as bolhas formadas na superfície das amostras permanecem fechadas, mantendo-se o gás formado dentro delas (Figura 25 (c)). Com isso, a densidade é reduzida, uma vez que não há fuga de gás dessas bolhas. Com menor tempo de prensagem nesse conjunto de dados, após serem retiradas as amostras da prensa pode ter ocorrido fuga de gases pela superfície das amostras, que, por consequência, podem ter ocasionado o encolhimento das bolhas até o término da cura da espuma.

Na Figura 26 são apresentadas imagens da superfície de contato com a prensa das espumas rígidas das composições com prensagem a 25 °C.

Figura 26 - Imagens da superfície das amostras. (a) Combinação E1; (b) Combinação E2; (c) Combinação E3.



(a)

(b)

(c)

Fonte: Autoria própria (2022)

Comparando-se as imagens da Figura 26, podemos notar que a superfície da combinação E1, Figura 26(a), apresenta-se com mais regiões lisas em comparação às demais. Na Figura 26 (b) existem mais áreas de rugosidade comparada a Figura 26 (a), porém com menos áreas que na Figura 26 (c), que, por sua vez, é totalmente rugosa. Com o intuito de verificar essa rugosidade, foi feita uma imagem da superfície de forma inclinada e aumentada que pode ser vista na Figura 27.

Figura 27 - Superfície da combinação E3 de espuma rígida

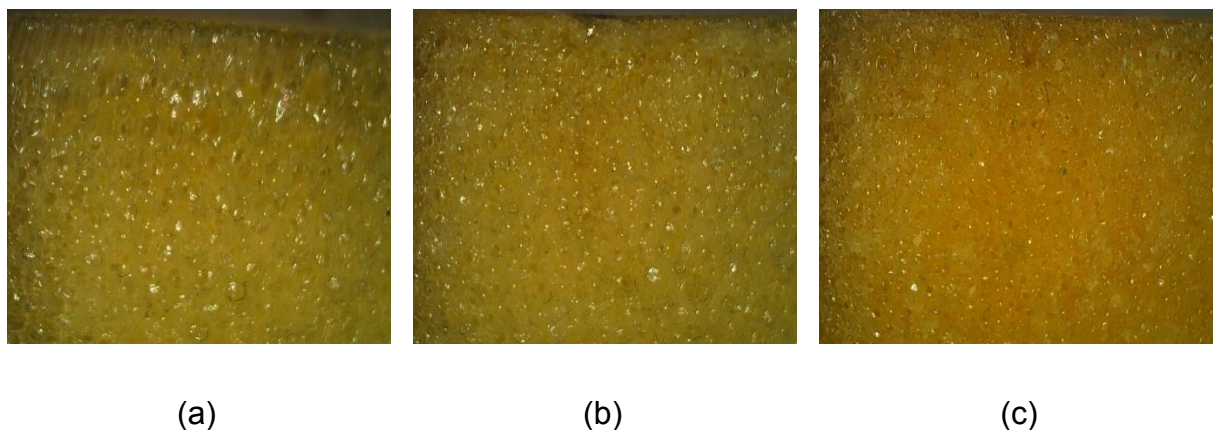


Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 27 pode-se observar que a superfície contém diversas microbolhas cheias de gás, o que corrobora a suposição feita em relação ao motivo da diferença de densidade das combinações de espuma, na qual o aumento do tempo de prensagem nas amostras produzidas a 25 °C pode ter provocado a manutenção do gás inerente ao processo nas células fechadas da espuma, reduzindo-se a densidade da amostra.

Na Figura 28 podem-se observar imagens de microscópio, em mesma resolução e aumento, de corte transversal de amostra de espuma das combinações E4 (a), E5 (b) e E6 (c).

Figura 28 - Imagens de corte transversal de espuma rígida. (a) Combinação E4; (b) Combinação E5; (c) Combinação E6.



Fonte: Autoria própria (2022)

As combinações E4, E5 e E6 foram submetidas à temperatura de 35 °C e tempo de prensagem de 20, 30 e 40 minutos, respectivamente.

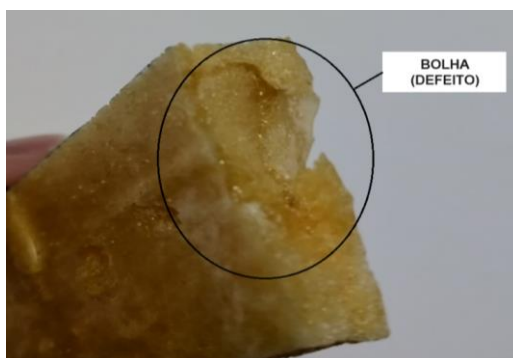
Comparando-se as imagens da Figura 28 pode-se notar que na Figura 28 (a) as bolhas são grandes, fato esperado uma vez que a temperatura provoca o aumento das bolhas da espuma (VILAR, 2004) que podem ter continuado crescendo após a retirada do material da prensa com 20 minutos de prensagem. Na Figura 28 (b) as bolhas são visíveis, porém menores do que as presentes na Figura 28 (a), uma vez que o tempo de prensagem foi de 30 minutos. Na Figura 28 (c) as bolhas são menores e mais homogêneas comparadas às demais imagens, sugerindo que mesmo com temperatura a 35°C, o tempo de prensagem de 40 minutos foi adequado para contenção da expansão da espuma.

Relacionando os resultados da Tabela 6 com a Figura 28 pode-se observar que o aumento do tempo de prensagem conteve a expansão e o crescimento das bolhas formadas no interior das amostras pelo aumento da temperatura, fazendo com que a maior densidade fosse obtida pela composição E6 nesse conjunto de dados.

As combinações E7, E8 e E9 não foram passíveis de análise, pois a alta temperatura de prensagem favoreceu a criação de grandes bolhas internamente que se juntaram e deixaram as amostras ocas, o que pode ser explicado segundo Vilar (2004), que afirma que o aumento da temperatura durante a cura da espuma favorece a criação de bolhas, inerentes ao processo de expansão da espuma, devido ao aumento da liberação de gases no processo, formando células fechadas que podem se juntar.

Na Figura 29 nota-se a presença de uma bolha na região do rompimento de um corpo de prova da combinação E3, indicando defeito de fabricação. Durante a cura da espuma rígida pode haver a presença incontrolada de bolhas formadas por células fechadas que se aglutinam formando uma grande bolha com paredes finas como a descrita por Vilar (2004) provocando redução da resistência do material.

Figura 29 - Defeito de fabricação corpo de espuma rígida combinação E3

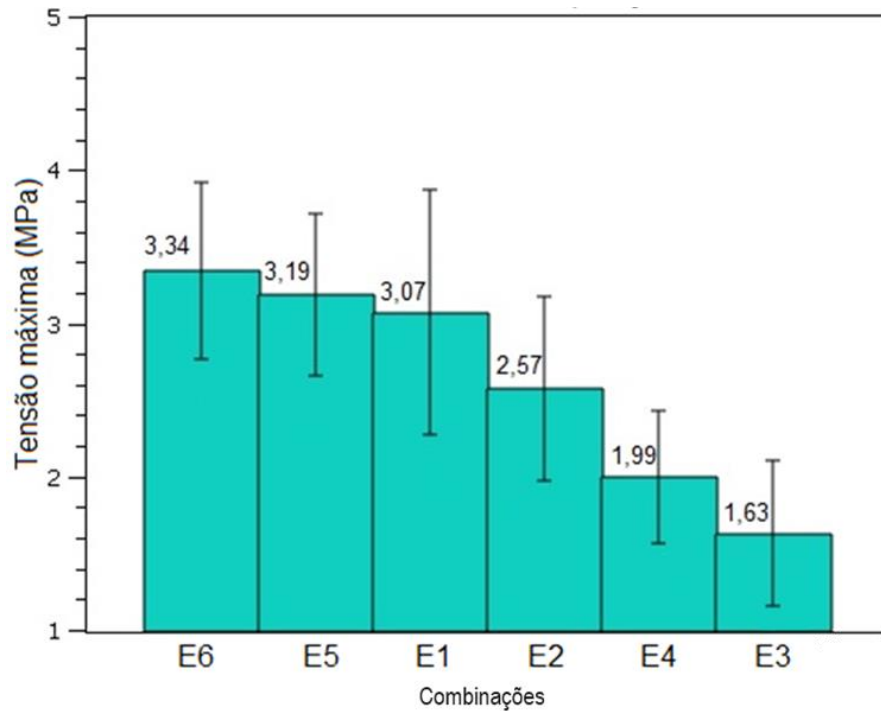


Fonte: Autoria própria (2022)

Considerando que a produção das amostras foi manual e passível de defeitos como o observado na Figura 29, os corpos de prova cujo rompimento no ensaio de flexão foi facilitado pela presença de grandes bolhas foram retirados do espaço amostral da análise estatística, mantendo-se, no mínimo, 5 corpos de prova por combinação.

Na Figura 30 são apresentados os resultados do ensaio de flexão, desvio padrão e teste de Tukey para todas as composições de espuma rígida.

Figura 30 -Tensão máxima (MPa) versus combinação de parâmetros de prensagem da espuma rígida

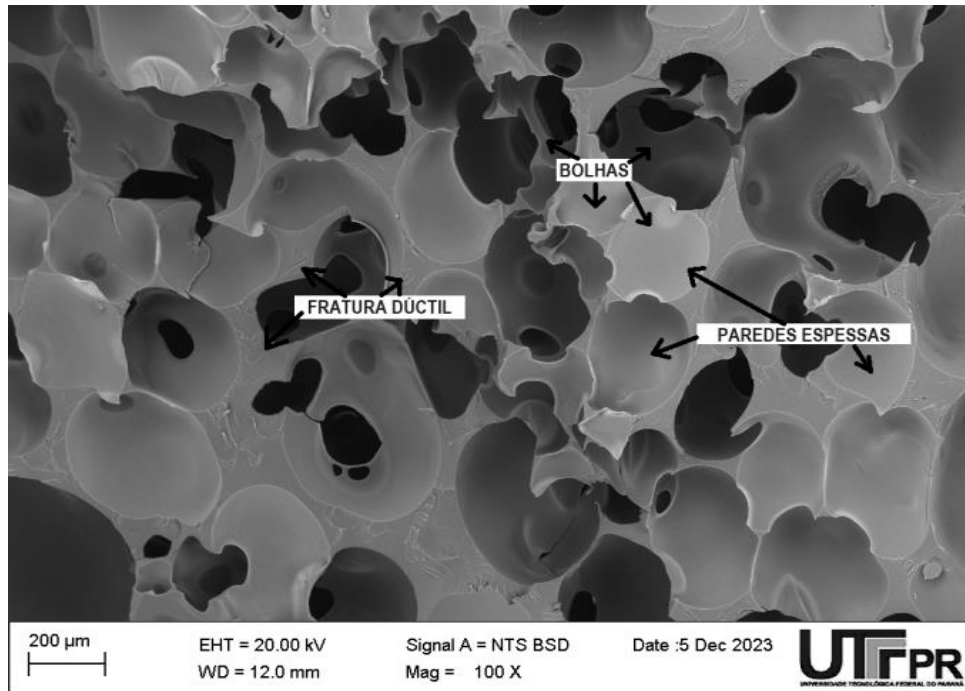


Fonte: Autoria própria (2022)

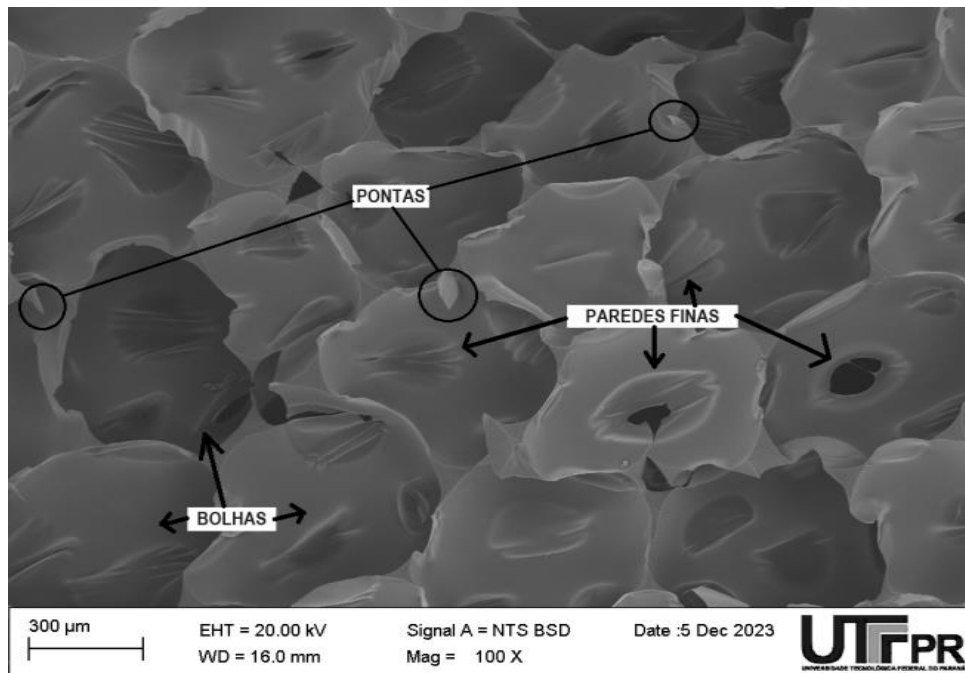
Relacionando os resultados de densidade com os de resistência à flexão estática, pode-se perceber que as menores resistências foram obtidas pelas combinações de menores densidades, o que era esperado para as análises.

Na Figura 31 apresentam-se micrografias de Microscópio Eletrônico de Varredura da fratura do teste de flexão das amostras de espuma rígida E6 e E3, sendo a combinação E6 a que apresentou maior resistência à flexão e a combinação E3 a que apresentou menor resistência à flexão.

Figura 31 - Micrografia Eletrônica de Varredura da fratura do teste de flexão das amostras de espuma rígida. (a) E6; (b) E3



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2023)

Observam-se na Figura 31 indícios de que houve a coalescência de bolhas no processo de cura da espuma, uma vez que na Figura 31 (a) as bolhas estão separadas por paredes espessas, enquanto na Figura 31 (b) elas estão próximas umas das outras, separadas apenas por finas paredes, reduzindo a densidade do material e apresentando estiramento das paredes das bolhas, que por sua vez são finas e assemelham-se ao aspecto de bexiga murcha. Além disso, a fratura dúctil não é visível na fratura da combinação E3 (Figura 31 (b)) e nota-se a presença de pontas proveniente do rompimento das paredes das bolhas.

Da Silva (2020), em sua pesquisa com espuma rígida de poliuretano derivada de óleos vegetais da marca Kehl-KT1106 com proporção de 1,2:1 de pré-polímero:poliol, com mistura mecânica à 3000 RPM. obteve tensão máxima de aproximadamente 1,6 MPa em amostra de espuma rígida com densidade de 180 kg/m³, semelhante ao resultado obtido na combinação E3.

Souza et al (2023) estudaram espuma rígida de poliuretano com polióis poliésteres obtidos pelo processo de despolimerização parcial do politereftalato de etileno (PET) e do policarbonato (PC). A densidade das espumas obtidas pelos pesquisadores foi de 212,83 kg/m³ em espuma produzida com poliol-PET e MDI, e de 171,43 kg/m³ em espuma produzida com poliol-PC e MDI.

Araújo (2022) sintetizou e analisou a densidade de espuma rígida de poliuretano derivado de óleo de mamona e obteve espumas com densidade de 142±8,2 kg/m³.

Não foram encontrados trabalhos na literatura com mesma abordagem referente aos parâmetros de prensagem para comparação dos resultados obtidos.

Considerando que na análise da espuma rígida não há interação com outros componentes dos compósitos que podem interferir na cura da espuma, foram

escolhidos para a produção dos compósitos os dois melhores níveis de cada fator com base nos resultados de resistência à flexão.

Sendo assim, para a produção das composições dos compósitos descritos no planejamento fatorial, seção 3.2.2, foram estabelecidos tempos de prensagem de 20 e 30 minutos e temperatura de 25°C e 35°C.

O tempo de prensagem de 40 minutos foi descartado da produção dos compósitos, pois reflete em maior gasto de energia e tempo para sua fabricação sem promover o aumento da resistência. A temperatura de prensagem de 45 °C não foi utilizada na produção dos compósitos devido aos corpos de prova de espuma produzidos nessa temperatura não serem passíveis de análise.

4.3 Caracterização dos compósitos

O resultado da análise de densidade dos compósitos está apresentado na tabela 7. Pode-se observar na Tabela 7 que todas as composições tiveram densidade semelhante pelo teste de Tukey HDS, ou seja, não houve diferença significativa entre as médias.

Tabela 7 - Valores médios de densidade das composições e teste de Tukey HDS.

Composição	Densidade média (kg/m ³)	Teste de Tukey HDS
C1	697,24	A
C2	686,83	A
C3	725,95	A
C4	767,58	A
C5	672,77	A
C6	737,92	A
C7	722,79	A
C8	781,44	A
C9	721,46	A
C10	706,36	A
C11	736,94	A

C12	752,13	A
C13	707,72	A
C14	741,01	A
C15	717,87	A
C16	797,30	A

Fonte: Autoria própria (2023)

Segundo Moslemi (1974), a densidade dos reforços influencia nas propriedades mecânicas dos compósitos. Compósitos fabricados com reforços de densidade de até 500 kg/m³ tendem a apresentar maior resistência à flexão, módulo de elasticidade e resistência à tração em comparação com aqueles produzidos com materiais de densidade mais elevada, pois espécies com baixa densidade podem ser comprimidas durante o processo de prensagem dos compósitos, resultando em uma ampliação da área de contato entre partículas, fibras e matriz, contribuindo para o aumento na aderência entre os componentes (MALONEY, 1993).

Paula (2017) obteve compósitos produzidos com 37,5% de serragem, 12,5% de sisal e 50% de espuma rígida com densidade média de 644,76 kg/m³.

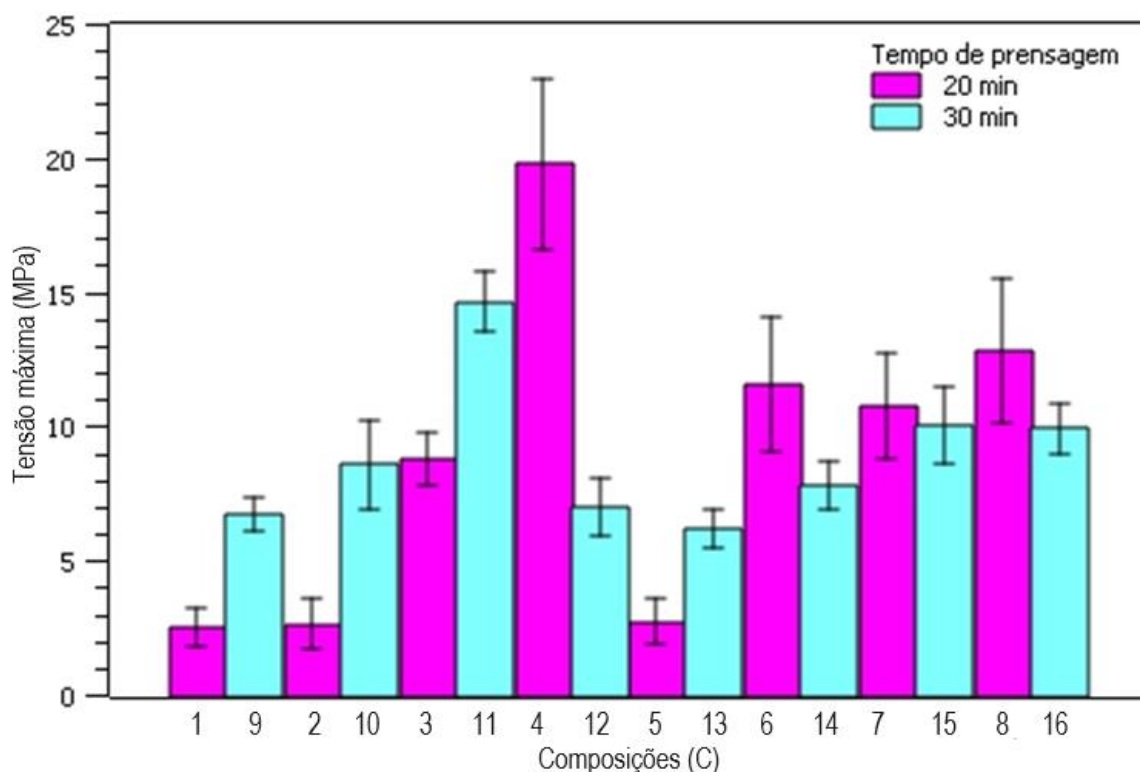
Protzek et al (2016) produziram e analisaram compósitos de serragem de *Pinus taeda* com 50% em massa de adesivo de poliuretano derivado de óleos vegetais e obtiveram compósitos com densidade de 1124,44 kg/m³.

De acordo com Iwakiri (2005), painéis aglomerados podem ser categorizados em três classes distintas: baixa densidade, que compreende valores de até 599 kg/m³; média densidade, variando de 600 a 799 kg/m³; e alta densidade, correspondendo a valores acima de 800 kg/m³. Sendo assim, é possível classificar os compósitos produzidos como de média densidade.

Nas Figuras 32, 33, 34, 35 e 36 são apresentados os resultados de tensão máxima (MPa) por composição obtida pelo ensaio de flexão estática de três pontos. Neles as composições lado a lado correspondem aos compósitos similares, ou seja, variando-se apenas o parâmetro analisado em cada figura e mantendo-se iguais os demais parâmetros de obtenção.

Na Figura 32 são apresentados os resultados de resistência à flexão organizados pelo tempo de prensagem.

Figura 32 -Tensão máxima versus combinação em função do tempo de prensagem



Fonte: Autoria própria (2023)

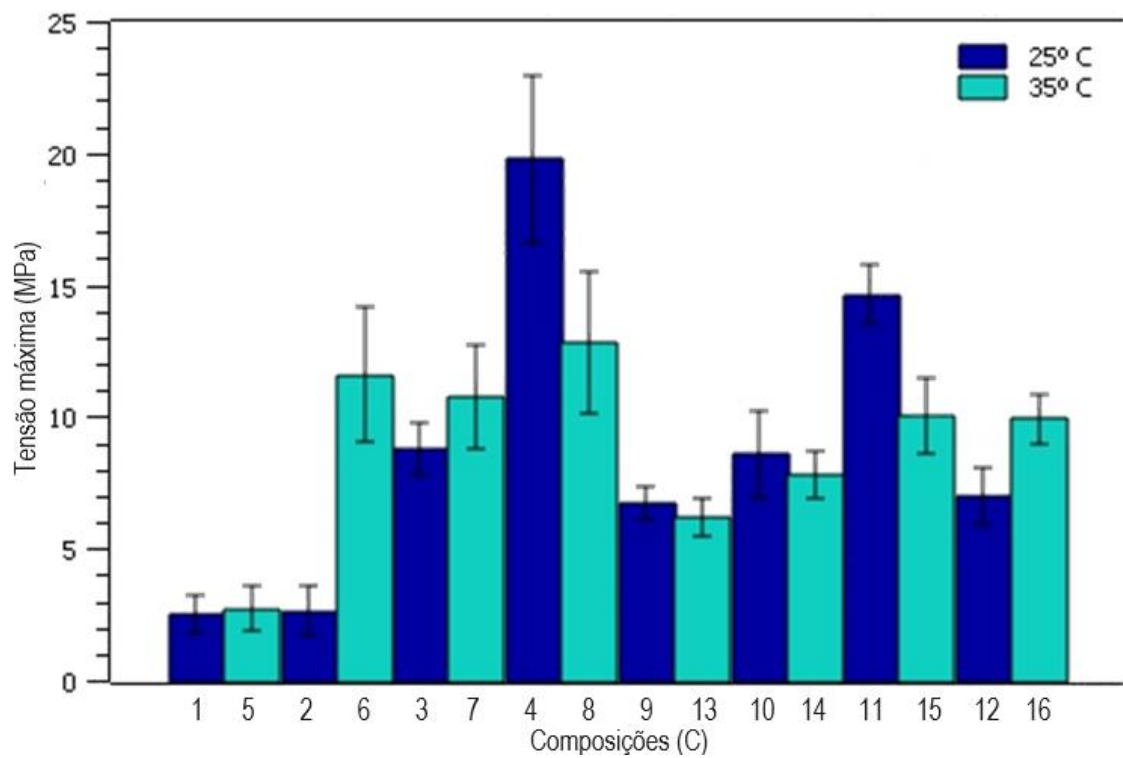
Observando os resultados organizados com base nos tempos de prensagem, Figura 32, pode-se notar que, dentre os resultados obtidos para composições cuja prensagem foi de 20 minutos, a resistência à flexão das composições C4, C6, C7 e C8 apresentaram tensão máxima média superior às das composições similares a elas (C12, C14, C15, C16, respectivamente), sugerindo que 20 minutos de prensagem podem ser suficientes para a formação eficiente de compósitos de espuma rígida com fibras e serragem. Também é possível observar na Figura 32 que compósitos cujo tempo de prensagem foi de 30 minutos apresentaram menor variação da resistência entre as composições. Este fato pode estar relacionado à reação de cura da espuma, que com 30 minutos de prensagem

em temperatura estável pode estabilizar a expansão e promover o empacotamento dos componentes das amostras de forma semelhante.

Tendo em vista que um maior tempo de prensagem reflete em maior custo operacional e que, de acordo com a análise, o tempo de prensagem de 20 minutos é suficiente para a formação adequada dos compósitos, não é necessário tempo de prensagem maior que 20 minutos para esses compósitos.

Na Figura 33 são apresentados os valores de resistência à flexão por composição em função da temperatura de prensagem.

Figura 33 -Tensão máxima versus composição em função da temperatura de prensagem



Fonte: Autoria própria (2023)

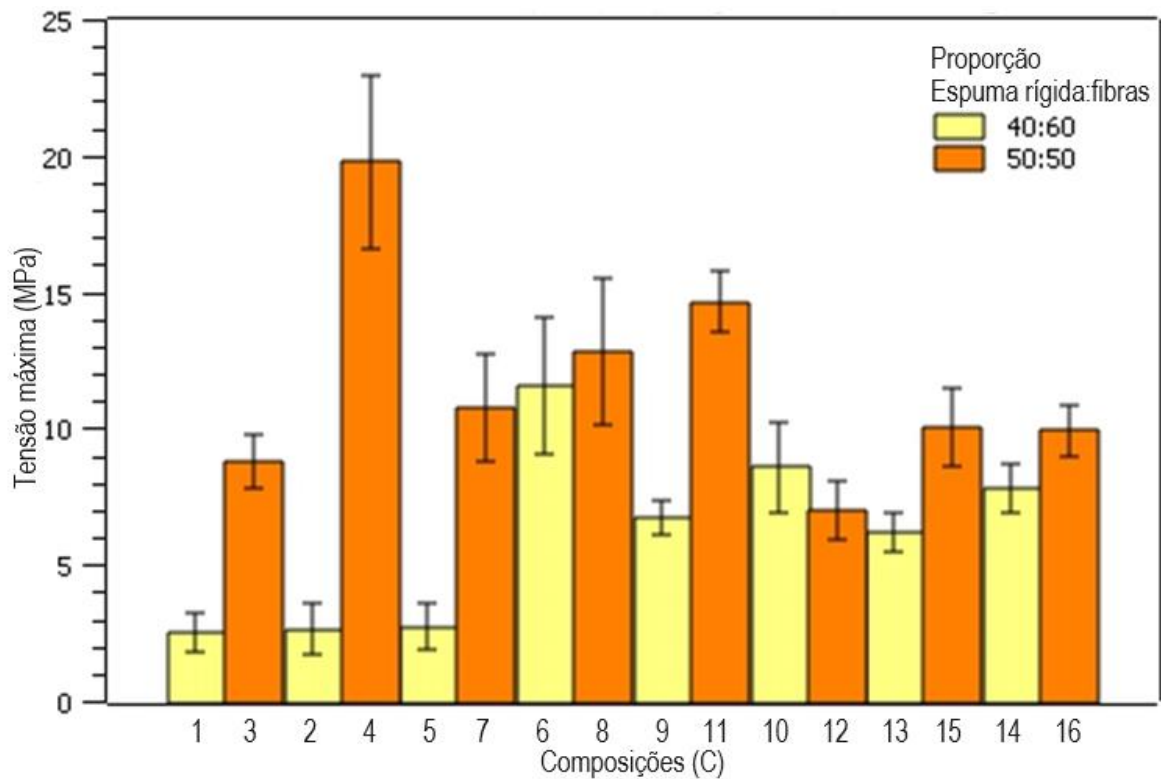
Pode-se observar na Figura 33 que nas composições C2, C6, C12 e C16 o aumento da temperatura de prensagem promoveu o aumento de resistência. Essa

alteração pode estar relacionada à maior fluidez que a mistura da espuma rígida apresenta com o aumento da temperatura, favorecendo o recobrimento das fibras vegetais e obtendo-se o equilíbrio entre a fluidez da espuma rígida e a criação de bolhas, que unido aos demais parâmetros de obtenção dessas combinações, favoreceram a resistência à flexão.

Nas demais composições, a temperatura de prensagem de 25° C ocasionou equivalência ou aumento da resistência comparada às composições semelhantes com prensagem a 35 °C. Com isso, entende-se que a prensagem em temperatura ambiente favorece a formação adequada de bolhas da espuma rígida e o recobrimento das fibras e serragem, formando-se uma interface adequada entre os componentes do compósito, bem como a transferência de tensões mediante esforços mecânicos.

Na Figura 34 são apresentados os valores de resistência à flexão *versus* proporção espuma rígida.

Figura 34 -Tensão máxima versus composição em função da proporção de espuma rígida:fibras

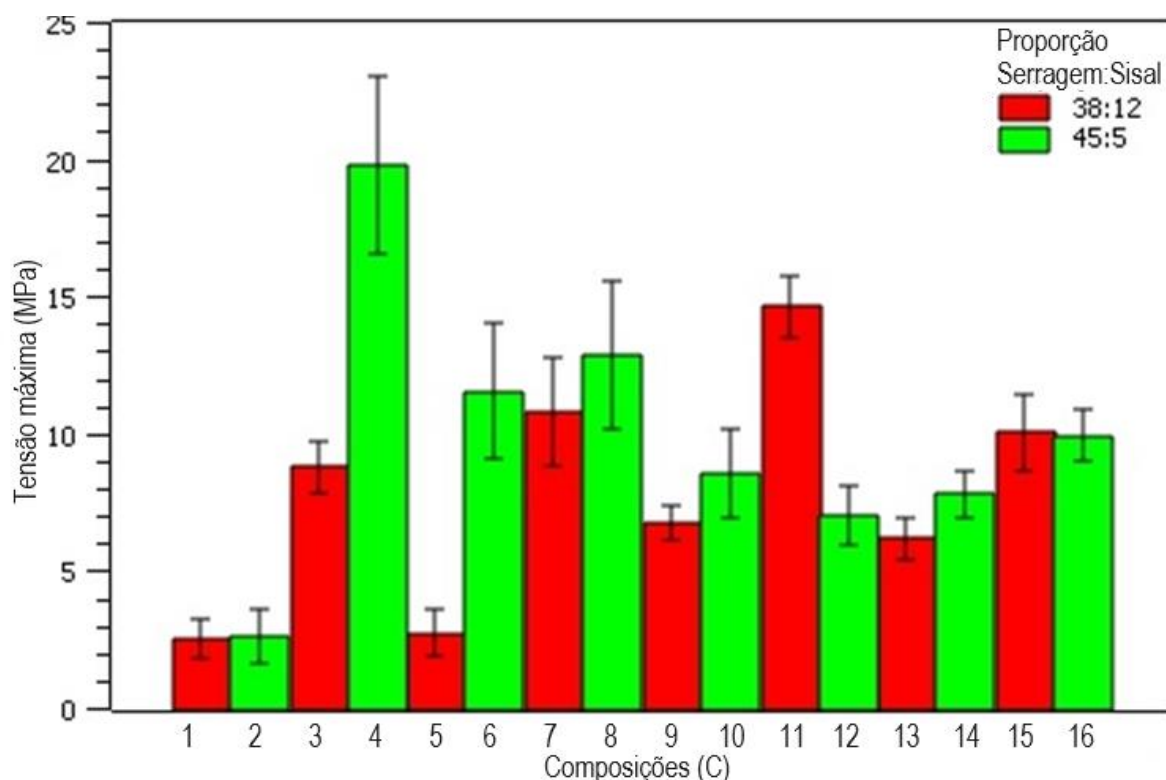


Fonte: Autoria própria (2023)

Observando os resultados apresentados na Figura 34 pode-se notar que a maior quantidade de PU nos compósitos promoveu o aumento da resistência à flexão das composições. Esse fato pode estar associado ao melhor recobrimento das fibras vegetais pelo poliuretano, que por sua vez promovem a melhor dissipação das forças aplicadas entre o poliuretano e a fase vegetal e aumentam a resistência à flexão dos compósitos.

Na Figura 35 são apresentados os dados de resistência à flexão organizados de modo comparativo relativo à proporção serragem:sisal.

Figura 35 -Tensão máxima por composição em função da proporção serragem:sisal.



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 35 pode-se observar que, exceto na combinação C12, a proporção 45:5 foi mais eficiente que a 38:12 ou manteve-se semelhante estatisticamente.

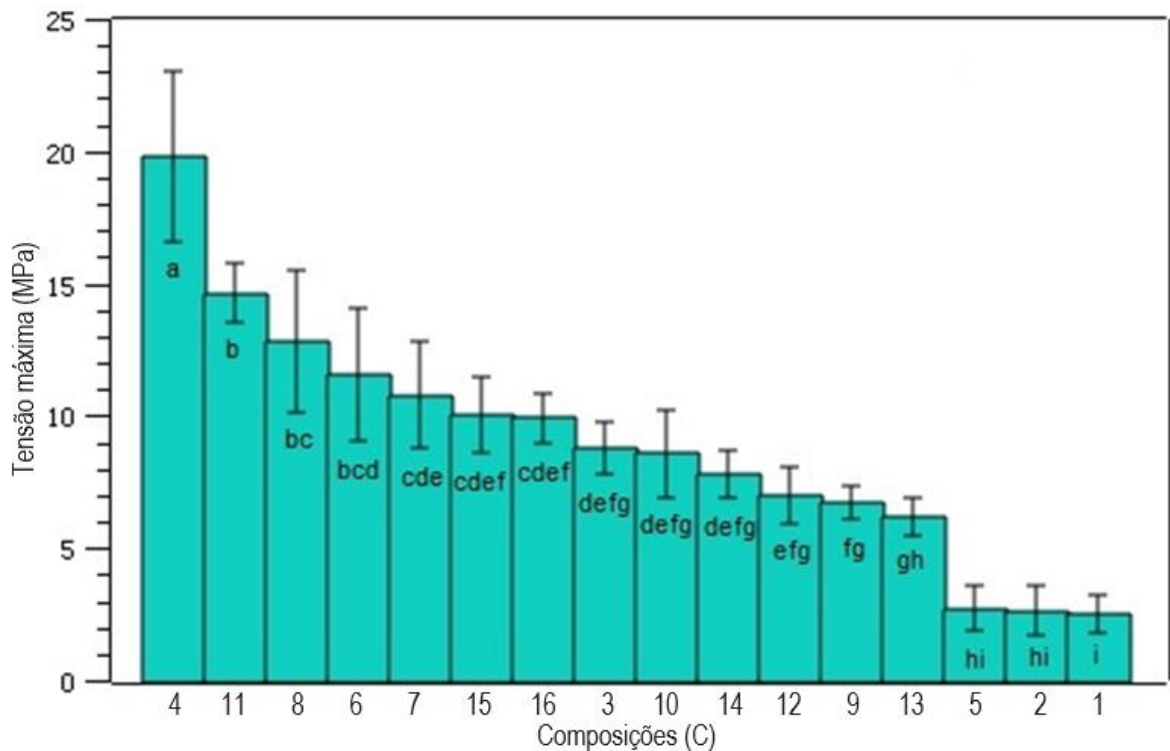
Paula (2020) analisou a proporção de serragem:sisal em compósitos com matriz de espuma rígida de poliuretano derivado de óleos vegetais e constatou que compósitos com 38:12 tiveram resistência à flexão maior quando comparada às demais proporções serragem:sisal analisadas: 50:0; 25:25; 12:38 e 0:50.

Tendo em vista que Paula (2020) não estudou a proporção 45:5, que é intermediária à 50:0 e à 38:12, e considerando que as partículas de serragem possuem comprimento menor e largura maior que as fibras de sisal, a menor quantidade de sisal pode ter favorecido o empacotamento dos componentes e

servido como agente aglutinante nas composições, melhorando a transferência de forças.

Na Figura 36 são apresentados os resultados de resistência à flexão de forma decrescente, bem como os resultados do teste de Tukey HDS.

Figura 36 -Tensão máxima (MPa), desvio padrão e Teste de Tukey HDS* versus composição



*Barras seguidas de mesma letra são consideradas estatisticamente iguais pelo teste de Tukey HDS.

Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 36 os resultados da resistência à flexão foram organizados de forma decrescente para melhor análise dos resultados do Teste de Tukey. Analisando-se a Figura 36 é possível observar que a combinação C4 apresentou média da resistência à flexão de 19,76MPa e que foi superior às demais combinações pelo teste de Tukey.

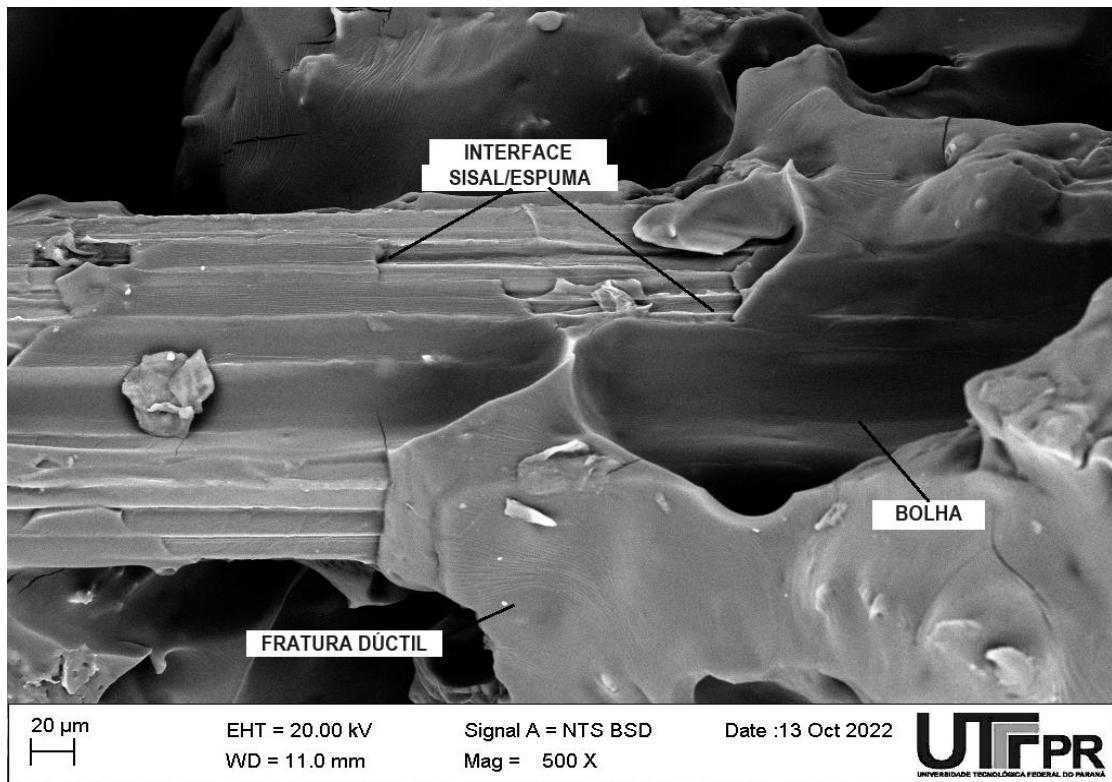
A composição C11 foi estatisticamente igual às composições C8 e C6, enquanto estas últimas são semelhantes também às combinações C7, C15 e C16. Inferiores a essas ficaram as combinações C3, C10 e C14 que por sua vez apresentaram mesmos resultados no teste de Tukey. A composição C12 foi considerada semelhante às seis combinações anteriores, além de semelhantes à C9 e C13. Abaixo dessas ficaram as combinações C5, C2 e C1.

A combinação C4 foi composta pela proporção 50:50 de espuma rígida:fibras, 45:5 de serragem:sisal, temperatura de prensagem ambiente (25°C) e tempo de prensagem de 20 minutos e sua maior resistência à flexão em relação aos demais pode ser explicada pelo adequado empacotamento das fibras e seu efetivo recobrimento pela espuma rígida, favorecido pela combinação dos fatores de prensagem, possibilitando uma melhor transferência de tensões entre os componentes.

Milanese et al. (2012) estudaram compósitos de poliuretano derivado de óleo de mamona reforçada com 44% wt de fibras dispersas de sisal e obtiveram em seu trabalho tensões de flexão de 1,6 MPa.

Silva (2003) estudou compósitos de adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona reforçado com 35% vol de fibras de sisal dispersa e obteve tensões de flexão de aproximadamente 25 MPa. Nas Figuras 37 a 42 são apresentadas micrografias da fratura após o ensaio de flexão das composições analisadas em ordem decrescente de resistência à flexão.

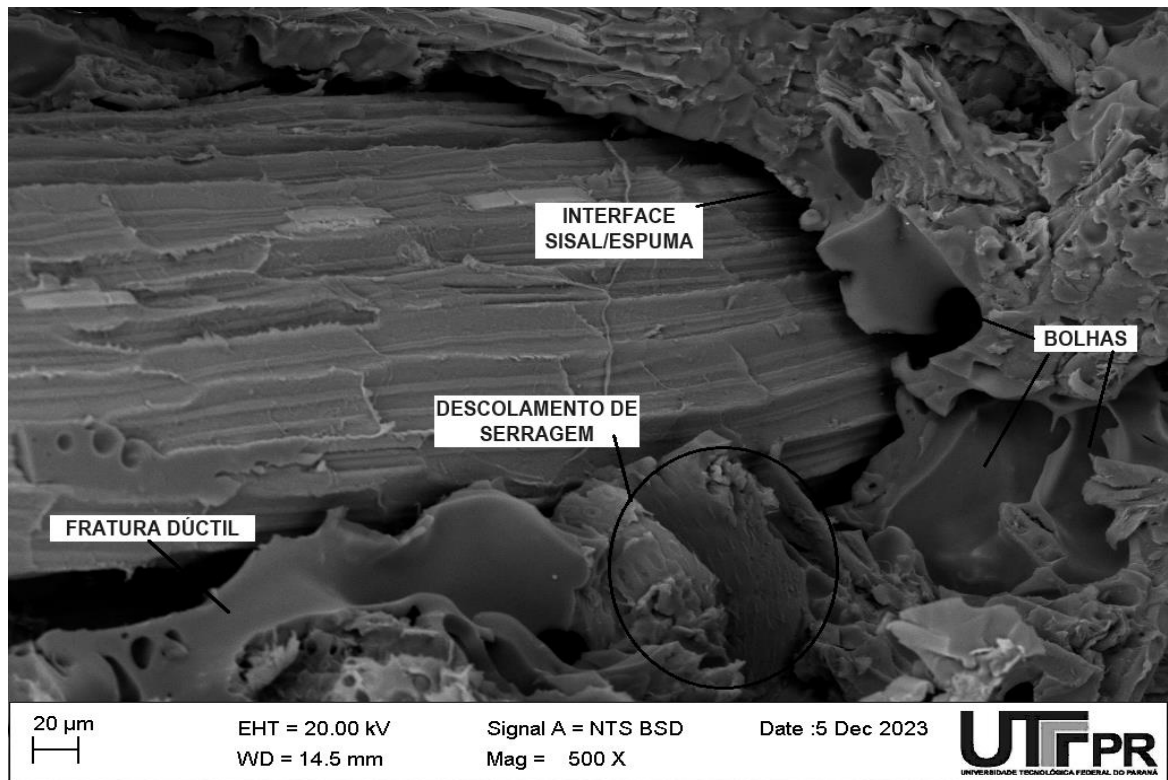
Figura 37 -Micrografia de fratura após teste de flexão da Composição C4



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 37 pode-se observar que a fibra, mesmo após o esforço mecânico, permanece aderida à espuma rígida favorecendo a transferência de tensões entre os componentes e aumentando a resistência mecânica à flexão do compósito. Também se nota que as paredes das bolhas são espessas e a fratura na espuma rígida é dúctil, ou seja, houve deformação e escoamento da espuma rígida antes da ruptura, também fundamentais para o aumento da resistência, corroborando com o resultado obtido no ensaio de flexão.

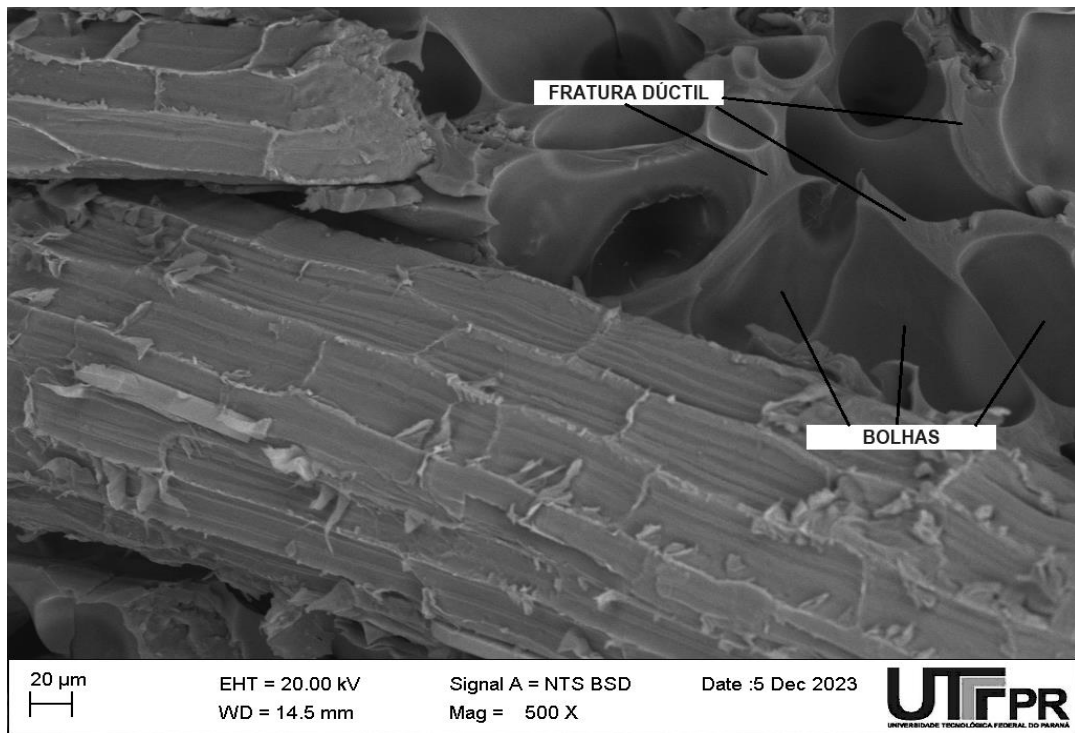
Figura 38 -Micrografia de fratura após teste de flexão da Composição C8



Fonte: Autoria própria (2023)

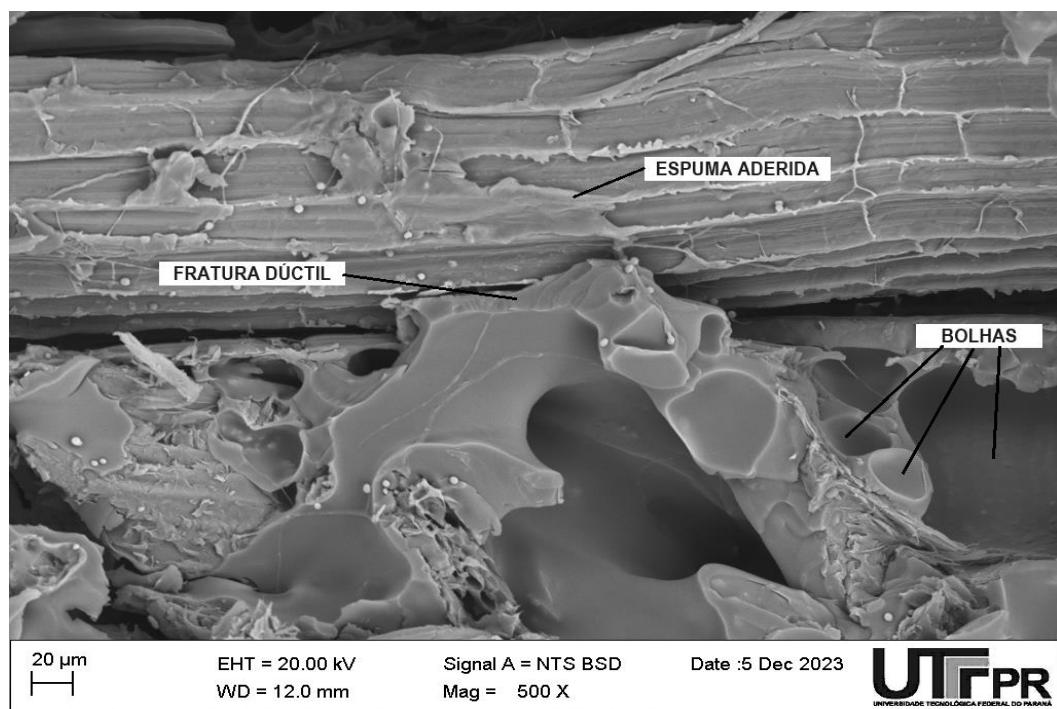
Na Figura 38 observa-se que, assim como na Figura 37, houve fratura dúctil e espessas paredes das bolhas, contudo, a fibra de sisal e a serragem foram descoladas durante o esforço, reduzindo a tensão máxima no ensaio de flexão comparando-se à composição C4.

Figura 39 -Micrografia de fratura após teste de flexão da Composição C7



Fonte: Autoria própria (2023)

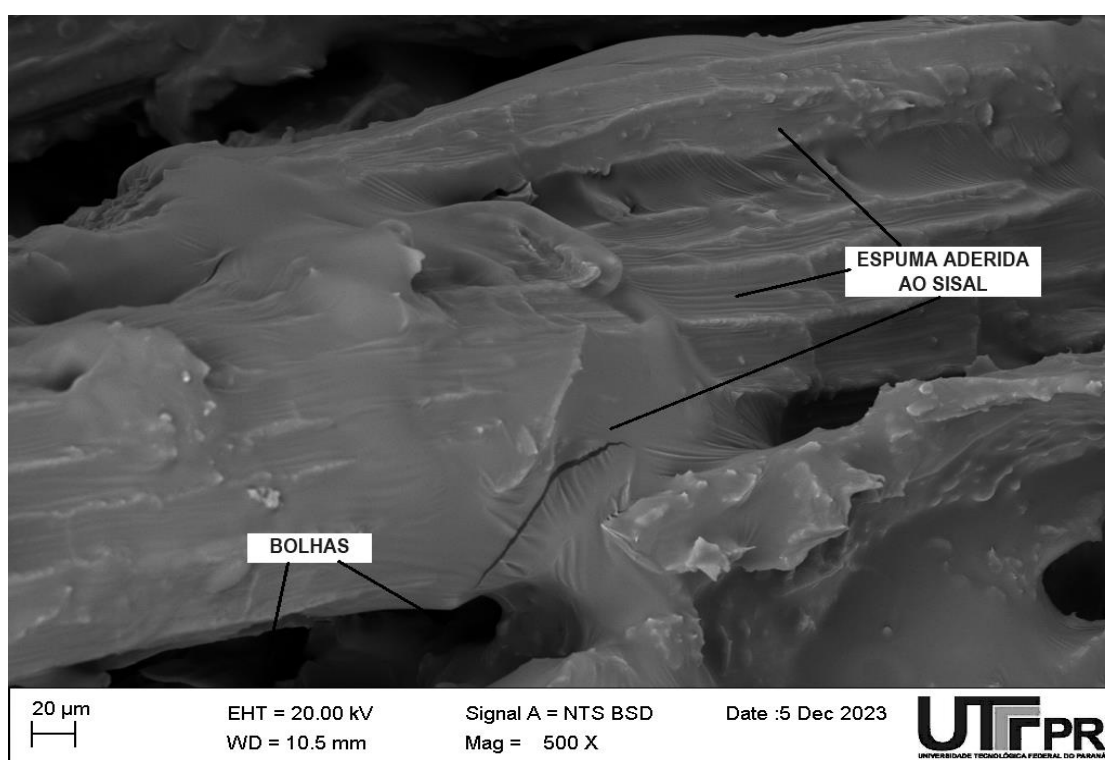
Figura 40 -Micrografia de fratura após teste de flexão da Composição C10



Fonte: Autoria própria (2023)

Nas Figuras 39 e 40 pode-se observar que as fibras estão com pouco ou nenhum recobrimento de espuma, ou seja, durante o esforço as tensões não foram transmitidas de forma adequada, reduzindo a resistência à flexão dessas composições. Apesar disso, a fratura dúctil ainda é visível nas imagens e as paredes das bolhas apresentam-se espessas.

Figura 41 -Micrografia de fratura após teste de flexão da Composição C9

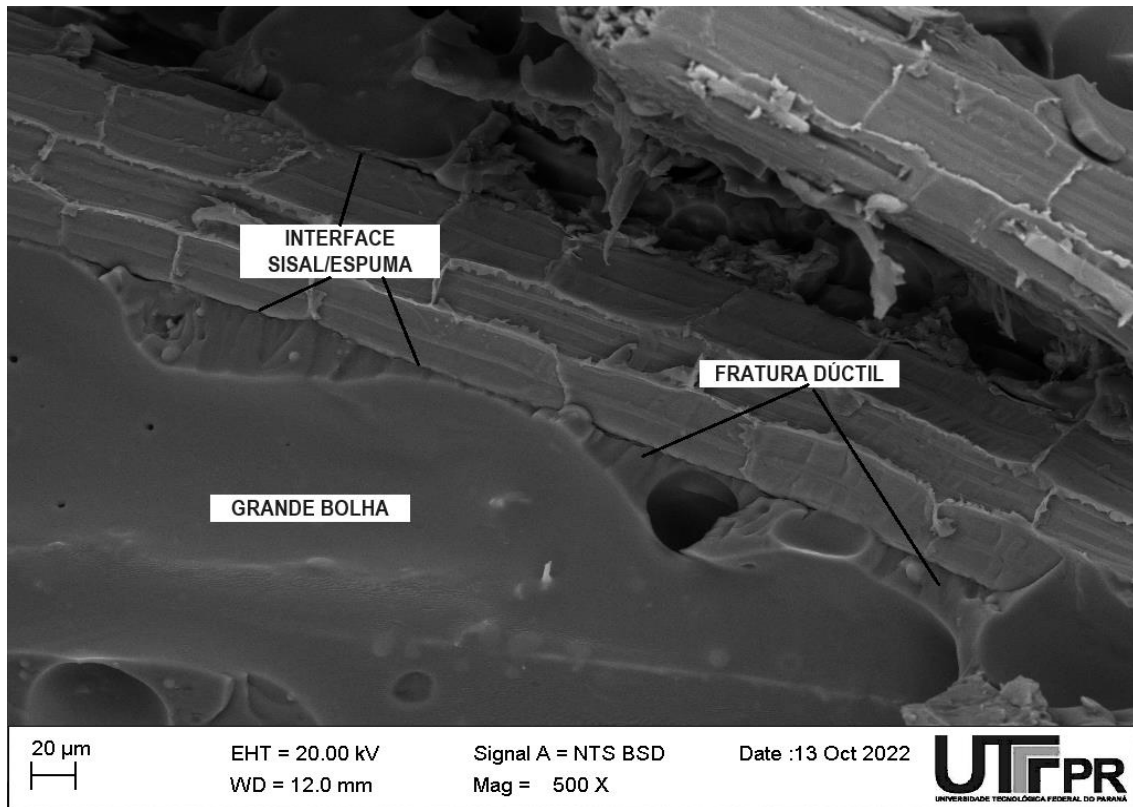


Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 41 observa-se uma fina película de espuma rígida recobrindo a fibra de sisal, deixando-a isolada do restante do material apesar do recobrimento. Essa imagem sugere que houve o surgimento de inúmeras bolhas aglutinadas que, devido às suas paredes finas, aderiram-se à fibra, mas sem a formação de uma interface adequada para transmissão de tensões.

O mesmo, adicionando-se ao descolamento das fibras, é mostrado na Figura 42 na qual se pode observar que a fibra não está aderida à espuma, pois com o esforço a espuma rígida rompeu-se e descolou-se com facilidade da fibra de sisal.

Figura 42 -Micrografia de fratura após teste de flexão da Composição C1



Fonte: Autoria própria (2023)

A interação entre as fibras e a espuma de poliuretano pode ser observada em todas as micrografias. Merlini et al. (2011) e Vasco et al. (2017) afirmam que os grupos OH livres encontrados na lignina presente especialmente na madeira estabelecem ligações químicas com o diisocianato presente no pré-polímero da espuma, o que contribui para a interação química entre os componentes e a resistência desses compósitos.

Nas micrografias nota-se que a serragem permanece encoberta pela espuma, enquanto o sisal é mais visível. Isso se deve à interação química entre a matriz e os reforços ser mais eficaz com a serragem devido à maior quantidade de lignina encontrada no *Pinus taeda* em comparação com a quantidade presente no sisal.

Paula et al. (2020) avaliaram micrografias de compósitos de espuma de poliuretano derivado de óleos vegetais com diferentes proporções de fibras de sisal e serragem. Nas imagens observaram a possível interação química entre a matriz e os reforços, bem como o recobrimento eficiente, as bolhas provenientes da espuma e a presença de fratura dúctil.

Protzek (2017) avaliou micrografias de compósitos com 35% de adesivo poliuretano derivado de óleos vegetais e 65% de fibras de casca de pinhão e observou possível interação química entre as fibras e o polímero, recobrimento das fibras e fratura frágil.

Vasco (2014) examinou micrografias de compósitos de adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona reforçado por sisal com e sem exposição à radiação gama de 25 kGy. Nas análises, foram observadas áreas de aderência entre a fibra e o adesivo, além da presença de bolhas em ambas as situações.

4.4 Caracterização física do compósito C4

Com base nos resultados obtidos, foi estabelecido que os compósitos nomeados de “C4”, produzidos com tempo de prensagem de 20 minutos, temperatura de 25°C, proporção PU:fibras de 50:50 e proporção serragem:sisal de 45:5 seriam reproduzidos e caracterizados por análises de densidade, absorção de água e inchamento em espessura, absorção acústica, análise termogravimétrica, flexão estática após radiação UVA, flamabilidade e perfuração.

4.4.1 Densidade

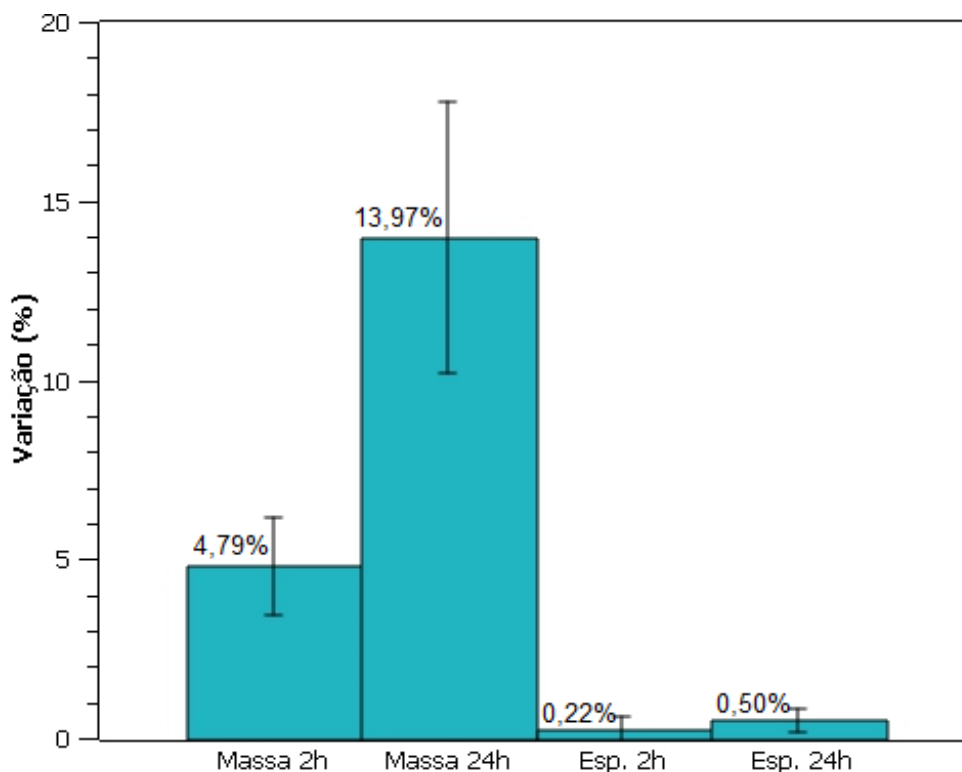
A massa específica média das amostras da composição produzida com tempo de prensagem de 20 min, temperatura de 25°C, proporção PU:fibras de 50:50 e proporção serragem:sisal de 45:5 foi de $776,38 \pm 34,97 \text{ kg/m}^3$, cuja espessura média foi de 5,6mm. Esse resultado é semelhante ao encontrado na etapa de avaliação fatorial das composições. A densidade obtida pelo compósito C4 foi de $767,58 \pm 41,78$, sendo esses valores semelhantes entre si.

Essa massa específica aproxima-se à observada em painéis MDF que, de acordo com a norma NBR 15316-2, possuem densidade média de 651 a 800 kg/m^3 e são classificados de acordo com sua espessura, sendo indicados para uso moveleiro e artesanal de acordo com as propriedades mecânicas e físicas observadas.

4.4.2 Absorção de água e inchamento em espessura

Na Figura 43 são apresentados os resultados de absorção de água e inchamento em espessura após 2h e 24h de imersão.

Figura 43 - Resultados médios e desvio padrão de variação de massa (%) e variação em espessura (%) após 2h e 24h de imersão em água



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 43 é possível observar que após 2h de imersão os compósitos tiveram aumento médio da massa de 4,79% e aumento da espessura de 0,22% sugerindo que apesar de absorver água durante esse período a espessura teve alteração inexpressiva. O mesmo pode ser observado em relação a 24h de imersão, durante a qual houve aumento de 13,97% na massa e 0,50% de aumento na espessura.

Considerando que a espuma rígida contém bolhas após a completa reação de formação, é possível concluir que a água absorvida pelo compósito ocupa os espaços vazios da espuma, fazendo com que a massa aumente sem afetar a estabilidade dimensional do compósito, uma vez que a espessura é alterada pela água quando as fibras a absorvem e incham. Logo, há indicativo de que as fibras foram recobertas pela espuma de forma eficaz.

Este comportamento também foi estudado por Paula (2020) em compósitos de espuma de poliuretano com diferentes proporções de serragem e sisal. A autora constatou que compósitos com 12,5% de sisal e 37,5% de serragem sem prensagem contínua após sua produção, tiveram aumento de 30% da massa e 2,5% da espessura em 24 horas de imersão. Comparando-se aos resultados obtidos pode-se concluir que a manutenção da prensagem posterior ao tempo de reação da espuma rígida reteve a quantidade de células formadas na superfície da espuma, dificultando a absorção de água pelo compósito e garantindo maior estabilidade dimensional após a imersão.

Protzek et al. (2019) analisaram a absorção de água em compósitos de adesivo de poliuretano derivado de óleos vegetais reforçados por fibras de casca de pinhão. Compósitos com 50% de adesivo e 50% de fibras tiveram absorção resultando em aumento de massa de 1,25% após 2 horas de imersão e 4,42% após 24 horas de imersão. Nesse estudo, concluíram que houve o recobrimento eficiente das fibras.

Kusmono et al (2020) analisaram compósitos de poliéster reforçados por fibras de palmeira. Após 2 horas de imersão os compósitos apresentaram em média 7% de aumento de massa e após 24 horas essa variação foi de aproximadamente 20%.

Compósitos de polipropileno com fibras de banana e fibra de coco foram estudados por Bujjibabu et al (2018). Após 24 horas de imersão, compostos com fibras na proporção 5:15 respectivamente tiveram 0,94% de variação de massa.

A norma de painéis de partículas de madeira de média densidade (NBR 14810-2:2018) estabelece os usos do material com base nos resultados de inchamento em espessura após 24h e resistência à flexão estática, que podem ser vistas na Tabela 8.

Com base na Tabela 8 podemos verificar que o compósito estudado pode ser usado tanto de modo estrutural quanto não estrutural em ambiente seco e

úmido, uma vez que atinge o mínimo de resistência à flexão média com 19,76 MPa e seu inchamento em espessura menor que 1%.

Tabela 8 - Requisitos de inchamento em espessura e resistência à flexão para uso de painéis de partículas de média densidade – NBR 14810-2:2018

Tipo de uso	Inchamento após 24h	Resistência à flexão
Não estrutural – ambiente seco	25%	12MPa
Não estrutural – ambiente úmido	20%	14MPa
Estrutural – ambiente seco	21%	16MPa
Estrutural – ambiente úmido	14%	19 MPa
Estrutural com condição severa de carga –ambiente seco	16%	20 MPa

Os requisitos atendidos de inchamento em espessura e resistência à flexão para painéis de fibras de madeira de média densidade (NBR 15316-2:2015) são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Requisitos de inchamento em espessura e resistência à flexão para uso de painéis de fibras de média densidade – NBR 15316-2:2015

Tipo de uso	Inchamento após 24h	Resistência à flexão
Divisórias, forros e paredes	10%	14MPa

Segundo a norma NBR 15316-2:2015, o compósito estudado pode ser utilizado como divisórias, forros e paredes considerando-se os parâmetros de inchamento máximo de 10% e resistência mínima à flexão de 14 MPa, uma vez que os resultados obtidos se enquadraram nos requisitos.

4.4.3 Absorção acústica

As amostras para avaliação da absorção acústica com 100 mm de diâmetro, Figura 44, foram cortadas em fresadora CNC3 eixos, fabricante Vetor CNC, modelo FR2012, utilizando uma fresa de 3mm de metal duro sem revestimento, com velocidade de avanço de 400 mm/min e velocidade de fuso de 2000 rpm.

Figura 44 - Corpos de prova de absorção acústica. (a) Corte em fresadora CNC; (b) Corpos de prova prontos para análise



(a)

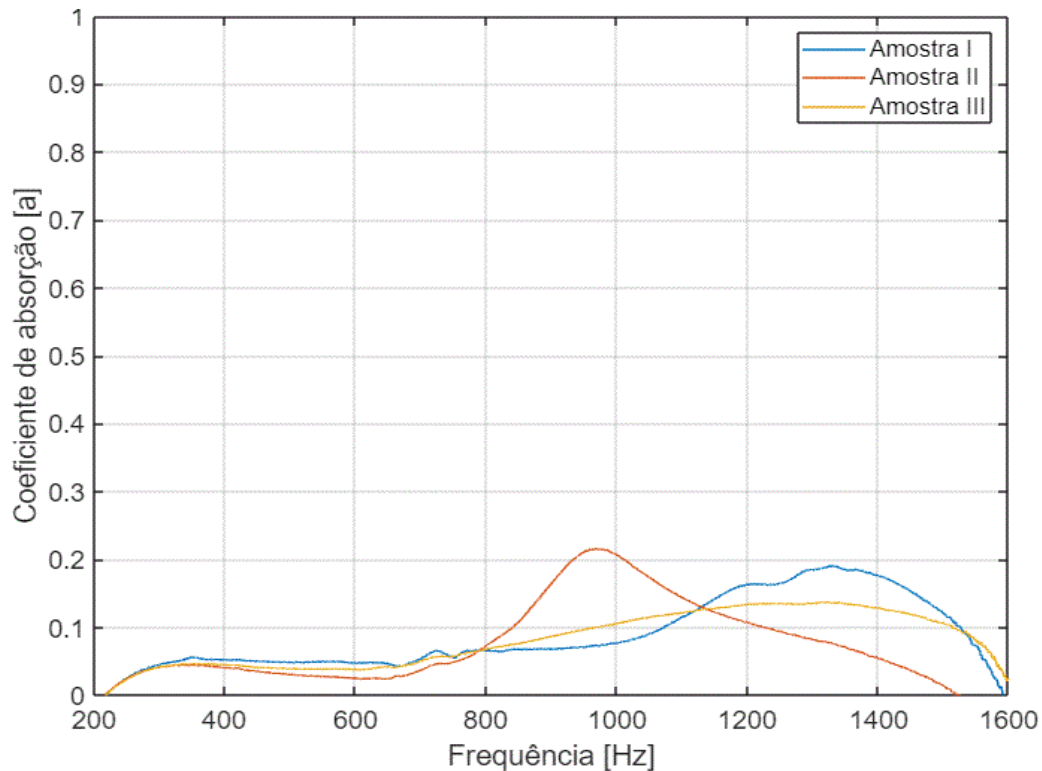


(b)

Fonte: Autoria própria (2023)

Considerando que materiais com maior quantidade de ar em seu interior e consequente baixa massa específica, além de menor dureza, tendem a absorver mais o som, a absorção acústica foi medida de dois modos diferentes: com as amostras individuais, Figura 45, e com as amostras associadas, Figura 46.

Figura 45 -Curva do Coeficiente de absorção em função da frequência para amostra individual

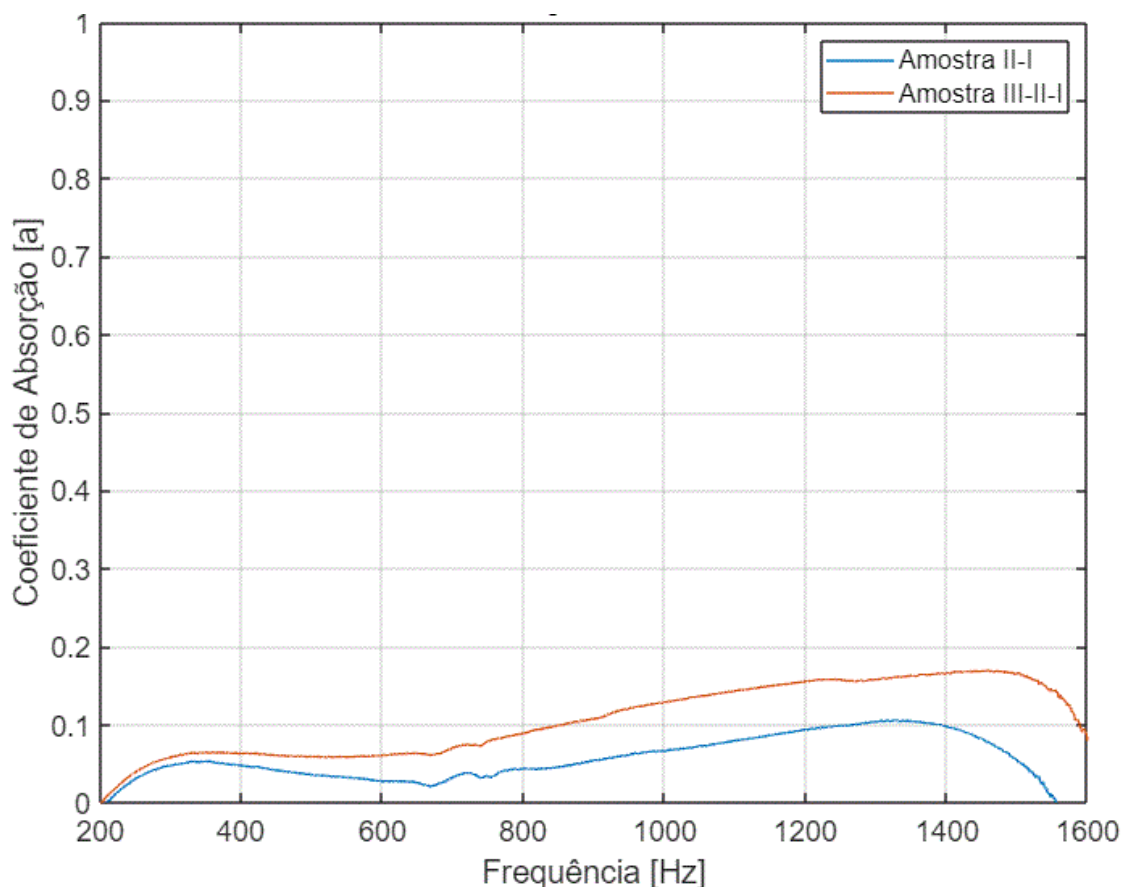


Fonte: Autoria própria (2023)

A absorção acústica é medida de 0 a 1, sendo que a absorção igual a zero indica que não houve absorção acústica e quando o coeficiente é igual a um considera-se que o material teve absorção total do som. Na Figura 45 pode-se observar que na frequência de 1000 Hz (frequência da voz humana) a absorção acústica da amostra I foi de 0,08, a absorção acústica da amostra II foi de 0,1 e a absorção acústica da amostra III foi de 0,21. Esses valores são considerados baixos, uma vez que o maior coeficiente alcançado representou apenas 21% de absorção acústica na frequência da voz humana.

Na Figura 46 são apresentados os resultados de absorção acústica com as amostras associadas.

Figura 46 -Coeficiente de absorção (a) de acordo com a frequência com amostras associadas



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 46 pode-se observar que a associação das amostras II e I – linha azul – teve coeficiente de absorção igual a aproximadamente 0,8 à frequência 1000 Hz, enquanto a associação das amostras III, II e I teve coeficiente de absorção de aproximadamente 0,14 à frequência 1000 Hz. Em ambas as situações a absorção aumentou até a frequência 1400 Hz e depois reduziu novamente.

Tanto na avaliação individual quanto na associada, as amostras não alcançaram um bom resultado de absorção acústica. Este fato pode estar relacionado à densidade dos compósitos, bem como à proporção espuma rígida:fibras uma vez que a maior quantidade de PU proporciona maior quantidade de células que, por sua vez, têm maior capacidade de absorção acústica. Além

disso, espumas rígidas como a utilizada na fabricação no compósito estudado possui células fechadas, dificultando a penetração do som e, por consequência, a absorção acústica.

Considerando que para propagação de som é necessário que haja meio material, uma vez que o som é resultado da compressão e descompressão do ar, a velocidade do som é diretamente proporcional à densidade do meio, ou seja, quanto maior a densidade do material maior será a velocidade de propagação do som.

A espuma em sua forma pura é eficaz para absorção acústica por ter baixa densidade e inúmeros poros que dificultam a passagem do som (SALINO, 2023; BONATTI, 2022). Contudo, ao se analisar o compósito como um todo, apesar de conter espuma, ele é formado por fibras descontínuas que, além de elevarem a densidade do material, ainda podem provocar o fechamento de poros da espuma. Devido a essas características, o compósito de espuma rígida de poliuretano com serragem e fibras de sisal apresenta baixa absorção acústica.

Durbarca et al (2020) estudaram o coeficiente de absorção acústica de painéis MDF com 20 mm de espessura e obtiveram como resultado coeficiente igual a 0,26 em frequência de 500 Hz.

Tudor et al (2020) estudaram compósitos de casca de *Pinaceae* sp. Com tamanho aproximado de 10 a 30 mm, aderidos com tanino, formando compósitos com espessura de 11 mm e densidade de 690 kg/m³ e obtiveram como resultado coeficiente de absorção acústica de aproximadamente 0,10 à frequência de 1000 Hz.

Ribeiro (2020) analisou o coeficiente de absorção sonora de painéis MDF comercial com espessura de 9 mm e 12 mm, e painéis OSB com espessura de 8 e 12 mm. Em seu estudo observou que painéis MDF sob frequência de até 1000 Hz o coeficiente de absorção acústica foi inferior a 0,10 para ambas as espessuras de painéis, enquanto para frequências próximas a 2000 Hz o coeficiente foi próximo a 0,10. Em painéis MDF, o autor verificou que o aumento de espessura não elevou o coeficiente de absorção acústica.

Em painéis comerciais do tipo OSB, Ribeiro (2020) verificou que quando submetidos à frequência de até 500 Hz o coeficiente de absorção acústica também não ultrapassou 0,10, sendo maior apenas em frequências superiores a 500 Hz. Para os painéis OSB, o autor constatou que o aumento da espessura influenciou no coeficiente de absorção acústica.

Com base nesses resultados verifica-se que o comportamento apresentado pelos compósitos de espuma rígida com serragem e sisal em relação ao coeficiente de absorção acústica é semelhante ao obtido em análises com compósitos e painéis comerciais com espessura de 9 mm a 12 mm.

Painéis MDF comerciais são utilizados em móveis planejados, bem como em divisórias de ambientes nas quais não há necessidade de isolamento acústico, sendo apenas usadas para limitar ambientes de forma decorativa. O mesmo uso pode ser proposto para os compósitos de espuma rígida, serragem e sisal produzidos.

No entanto, não se aconselha o uso deste material como divisória de ambientes que necessitem de isolamento acústico sem agrupamento com outros materiais que cumpram a função de isolamento.

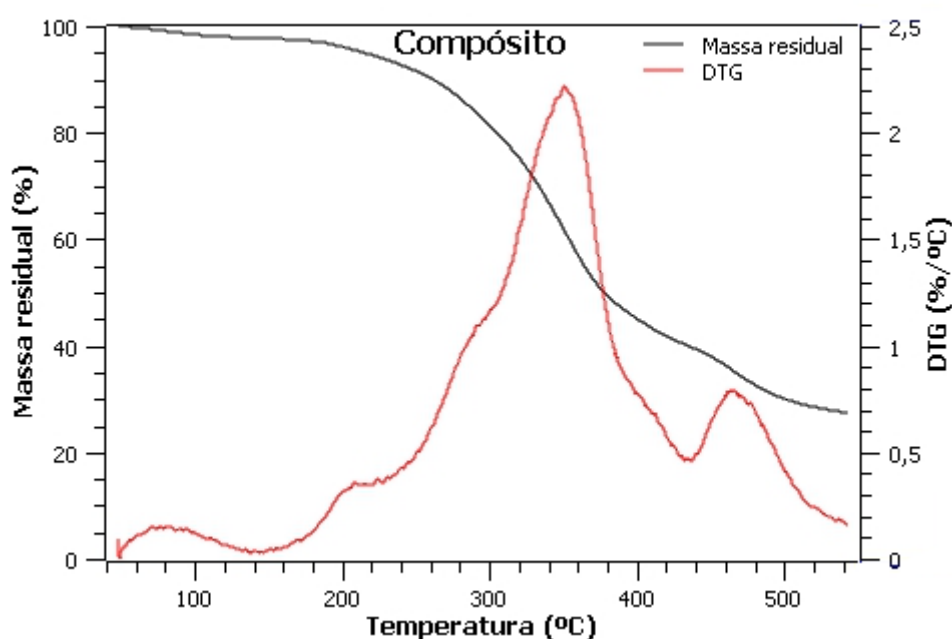
4.4.4 Análise termogravimétrica

Na Figura 47 são apresentadas as curvas de perda de massa (%) *versus* temperatura (°C) da espuma rígida, sisal, serragem e do compósito.

Em relação ao compósito, a primeira etapa de perda de massa ocorreu até 160 °C com perda de cerca de 1% referente à umidade presente no material. A segunda etapa iniciou-se aos 160°C e apresentou eventos consecutivos com primeiro pico aos 200°C referindo-se ao início da quebra das ligações uretânicas; aos 290 °C o pico refere-se à degradação da hemicelulose e aos 350°C ocorreu a degradação da celulose presente nos reforços do compósito. A terceira etapa

ocorreu a partir dos 440°C com pico em 470°C referente à degradação do grupo éster presente na espuma. Ao final, restaram cerca de 35% de massa.

Figura 47 -Curva de perda de massa (%) e DTG (%/°C) em função da temperatura (°C) da serragem



Fonte: Autoria própria (2023)

Comparando-se a curva do compósito com as curvas do sisal, serragem e espuma, pode-se observar que a curva do compósito reflete à mistura de todos os materiais envolvidos, apresentando características de perda de massa semelhante à das fibras e à espuma rígida.

Com base nas curvas apresentadas, verifica-se que o compósito apresenta estabilidade térmica até 160 °C, não sendo aconselhável a exposição do material acima dessa temperatura.

Protzek et al (2019) analisaram curva de perda de massa de compósitos com adesivo de poliuretano derivado de óleos vegetais e fibras de casca de pinhão.

Concluíram que a curva de perda de massa do compósito refletiu à mistura dos seus componentes, com maior perda de massa entre 300 e 350 °C.

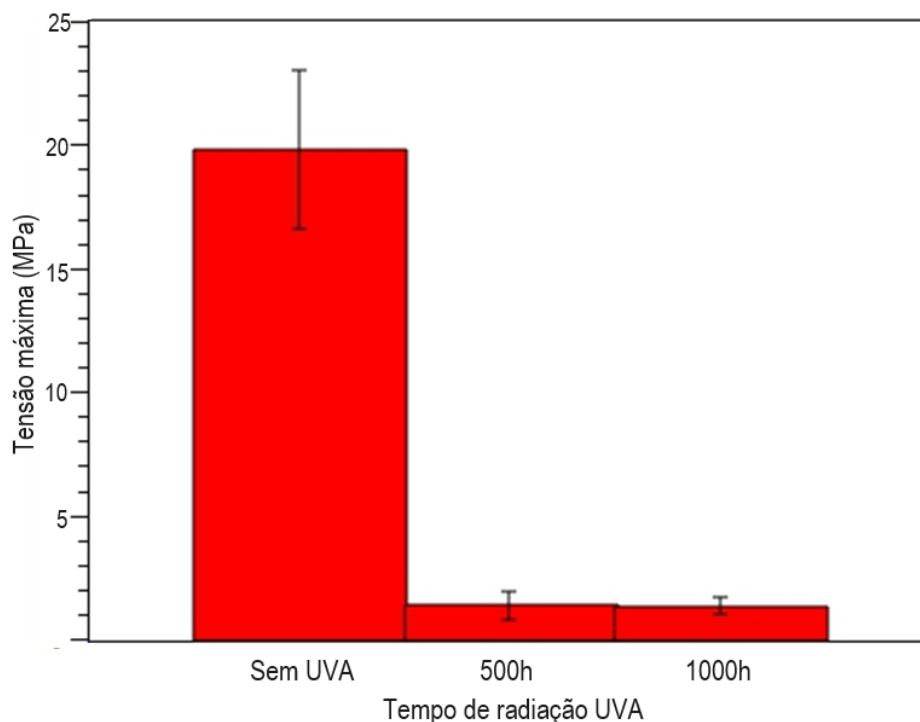
Siakeng et al. (2018) investigaram a estabilidade térmica de compósitos híbridos de PLA reforçado com PALF e fibra de coco. Concluíram que a curva de perda de massa do compósito refletiu à mistura de seus componentes e que a maior perda de massa ocorreu entre 300 e 400 °C.

4.4.5 Resistência à flexão após absorção UVA

Na Figura 48 pode ser observado o resultado da resistência à flexão - tensão máxima (MPa) - dos compósitos após permanência sob irradiação UVA durante 500h e 1000h, comparando-os com o resultado obtido sem a radiação.

Para o cálculo da tensão média foram considerados cinco corpos de prova para compósitos irradiados durante 500h e quatro corpos de prova para compósitos irradiados durante 1000h, pois um dos corpos de prova irradiados durante 1000h rompeu durante o transporte e não pôde ser avaliado pelo ensaio de flexão de três pontos.

Pode-se observar na Figura 48 que ocorreu redução de 93% da resistência média à flexão após a irradiação com raios UVA, passando de 19,76 MPa para 1,34 MPa quando submetido à radiação UVA durante 500h e 1,32 MPa quando submetido durante 1000 horas.

Figura 48 -Gráfico de tensão máxima (MPa) versus tempo de irradiação UVA dos compósitos

Fonte: Autoria própria (2023)

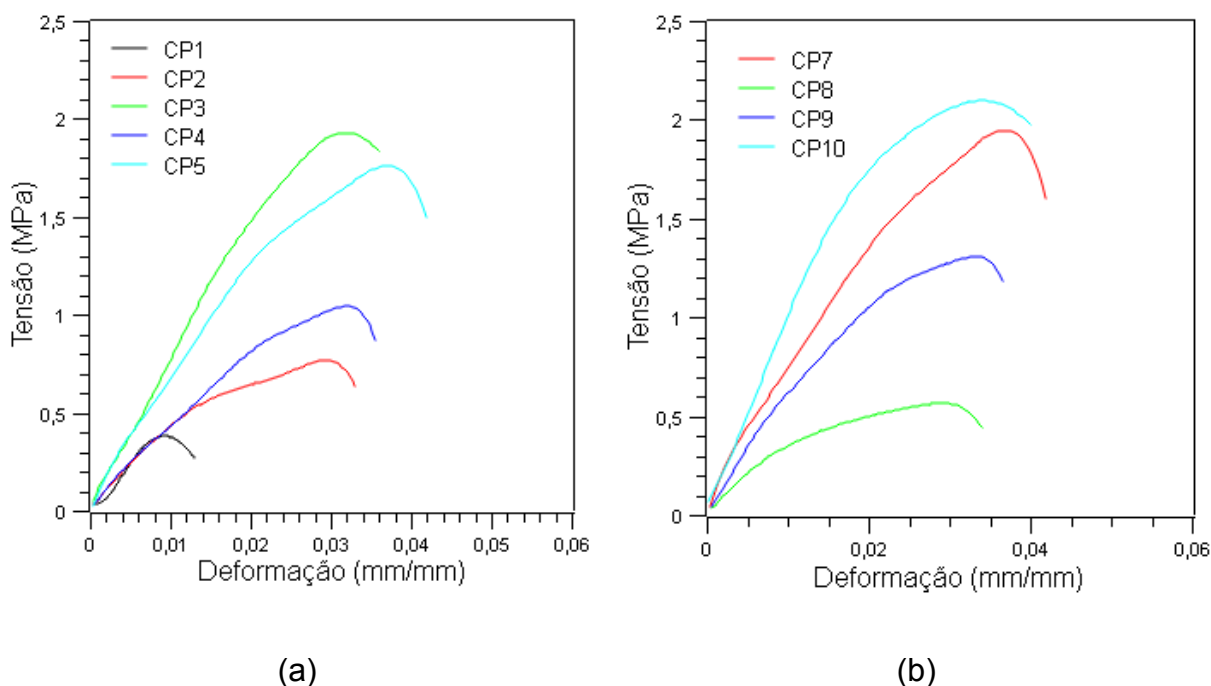
Azevedo (2009) afirma que os raios UVA são pouco penetrantes, atingindo apenas as camadas superficiais do material e fazendo com que a energia seja dissipada ou absorvida logo nas primeiras camadas causando trincas na superfície, que por sua vez provocam o tensionamento do compósito.

Polímeros expostos à radiação podem ter removidos átomos de sua estrutura, resultando na formação de pontos ativos capazes de gerar ramificações. Além disso, a estrutura do polímero pode degradar-se, levando à perda de resistência mecânica, ou pode sofrer distorções devido à formação de vazios (AZEVEDO, 2009).

Considerando que os compósitos foram submetidos à radiação em ambos os lados, pode-se afirmar que ocorreu o tensionamento em toda a superfície do

material provocando a redução da resistência à flexão e provocando fratura frágil no compósito, que pode ser verificada na Figura 49 (a) e (b).

Figura 49 - Curvas de tensão (MPa) versus deformação (mm/mm); (a) Corpos de prova irradiados por 500h; (b) Corpos de prova irradiados por 1000h



Fonte: Autoria própria (2023)

Por outro lado, comparando-se a resistência entre os compósitos irradiados durante 500 horas, Figura 49(a) e 1000 horas, Figura 49(b), pode-se perceber que os resultados obtidos após a radiação são semelhantes, ou seja, a quantidade de horas não influenciou a resistência à flexão.

Para o uso de polímeros e compósitos em locais de incidência solar, deve ser considerada a utilização de aditivos, como os absorvedores de UV, estabilizadores de luz e bloqueadores de UV.

Vasco (2014) avaliou compósitos de poliuretano derivados de óleo de mamona com tecido de sisal e observou que a incidência de radiação gama nos

compósitos provocou a redução da resistência mecânica dos materiais, mantendo a ductilidade do compósito.

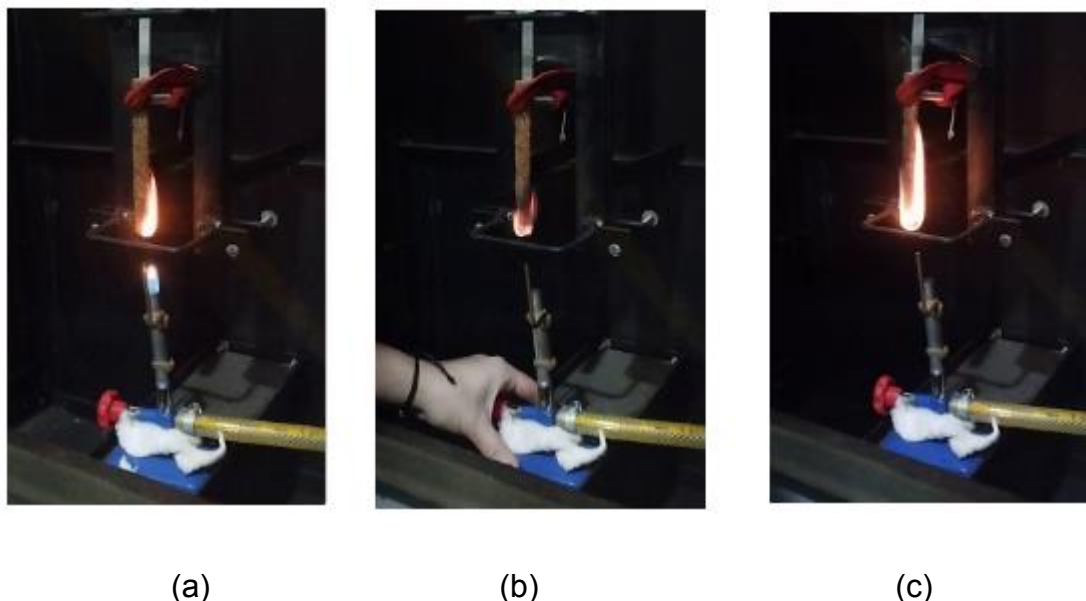
Ferrazza et al. (2012) investigaram o impacto das radiações gama, UVA e UVC em compósitos com diversas proporções entre a fração volumétrica de fibras vegetais e matriz poliuretana. A conclusão do estudo indicou uma redução nas propriedades mecânicas dos materiais após a exposição às radiações.

Em pesquisa sobre a molhabilidade de revestimentos de poliuretana aplicados em substratos de porcelana, Fontanella et al (2008) notaram diminuição do ângulo de contato ao longo de um período de até 720 horas de exposição à irradiação UVA.

4.4.6 Flamabilidade

Na Figura 50 é mostrado o aparato do ensaio de flamabilidade vertical. É possível observar na Figura 50 (a) que o aparato foi adaptado para encaixe do corpo de prova e inserido algodão na base do bico de Bunsen para verificação em caso de gotejamento. Após a queima inicial de 10 segundos a chama não se extinguiu, como é possível visualizar na Figura 50 (b), mantendo-se autossustentada por toda a queima do compósito, não produzindo gotejamento, como pode ser observado na Figura 50 (c).

Figura 50 -Ensaio de flamabilidade vertical (UL 94V): (a) Aplicação da chama; (b) Retirada da chama após 10 s; (c) Autossustentação da chama no compósito

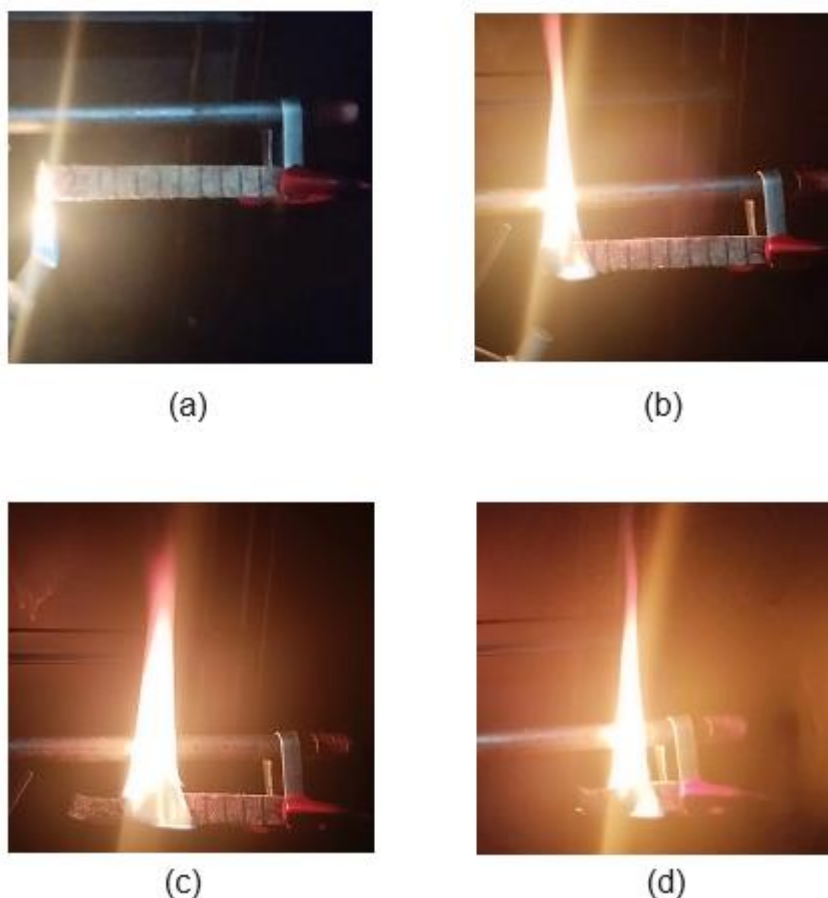


Fonte: Autoria própria (2023)

Devido a autossustentação da chama após os 10 primeiros segundos de aplicação, não foi possível classificar o compósito de acordo com a norma UL 94V, sendo necessária sua análise por meio da norma UL 94HB, cujas imagens da análise de queima horizontal podem ser vistas na Figura 51.

Na Figura 51 (a) é possível observar o compósito disposto horizontalmente, com marcações em 25 mm, 30 mm, 40 mm e assim sucessivamente a cada 10 mm até a última marcação a 100 mm do local de aplicação da chama. Com a retirada da chama, 30 segundos após o início da aplicação, houve a sustentação da chama até o final da queima. Na Figura 51 (b) observa-se a chama autossustentada a 25 mm da aplicação. Na Figura 51 (c) pode-se observar que parte do compósito já foi queimado e a propagação da chama permanece por toda sua extensão, até o final das marcações, como nota-se na Figura 51 (d).

Figura 51 - Ensaio de flamabilidade horizontal (UL 94HB): (a) Aplicação da chama; (b) Chama a 25 mm do local de aplicação da chama; (c) Autossustentação da chama no compósito; (d) Chama a 100 mm do local de aplicação da chama.



Fonte: Autoria própria (2023)

A taxa média de queima (mm/min) foi calculada com base na queima de 5 corpos de prova e resultou em 239 ± 9 mm/min.

Ribeiro et al (2013) estudaram compósitos de poliéster insaturado reforçado com fibra de abacaxi e obtiveram velocidade de propagação de 31,74 mm/min com a adição de 20% de retardante de chama.

Oliveira et al (2019) estudaram compósitos de poliéster reforçados por resíduo de alumínio e obtiveram taxa de propagação de chama de 17,35 mm/min.

Compósitos de resina de poliuretano com ATH e vermiculita foram estudados por Fleck et al (2023). Amostras puras de poliuretano não puderam ser classificadas pela norma UL 94V por terem sustentado a chama após o período de 10 s. Já amostras com adição de vermiculita e/ou ATH foram classificadas como V1, pois a soma dos tempos de combustão manteve-se na faixa de 50 a 250 segundos para todos, sem manter a queima autossustentada por mais de 30 segundos.

Ferrarini (2019) avaliou compósitos de adesivo de poliuretano reforçados por tecido de juta e concluiu que a adição de até 40% em massa de ATH não houve redução da resistência mecânica, sendo que a tensão máxima obtida foi de 61,77 MPa.

Com isso, verifica-se que a velocidade de propagação obtida de 239 ± 9 mm/min é elevada comparando-se aos resultados de compósitos com ATH como os estudados por Ribeiro et al. (2013), Oliveira et al. (2019) e Fleck et al. (2023). Além disso, em seu estudo, Ferrarini (2019) também constatou que o uso de ATH na composição não afetou a resistência mecânica dos compósitos estudados.

Sendo assim, trabalhos futuros com relação ao uso de retardantes de chama como componente dos compósitos de espuma rígida com serragem e sisal podem ser relevantes, uma vez que a adição de retardantes de chama nos compósitos pode reduzir a velocidade de propagação e aumentar a possibilidade de uso do material em diferentes locais.

4.4.7 Perfuração

A montagem de peças de mobiliário ou decoração necessita de procedimentos como perfuração para viabilizar a montagem das peças, contudo, esse processo pode acarretar danos ao compósito, comprometendo visualmente a qualidade da peça. Tais danos podem impactar as propriedades do material e a eficácia dos sistemas de fixação utilizados nas montagens (ELLENBERGER et al., 2022; ISIK et al., 2010; PATEL et al., 2015).

Segundo Roy et al. (2018) e Diaz-Alvarez et al (2018), a ocorrência de danos induzidos por perfuração em compósitos com fibras naturais pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo o tipo de fibra/matriz, o método de entrada da perfuração e saída, geometria da broca, além da temperatura gerada durante o processo.

No Quadro 1 é mostrada a aparência dos furos realizados no compósito com as diferentes velocidades de corte (v_c), velocidades de avanço (f) e tipos de brocas utilizados, na face de entrada e saída dos furos.

Quadro 1 - Parâmetros de perfuração e aparência na face de entrada e saída dos furos realizados no compósito

			Helicoidal		Três pontas	
	V_c (m/min)	f (mm/rot)	Entrada	Saída	Entrada	Saída
1	18.8	0.1				
2	18.8	0.2				
3	18.8	0.3				
4	37.6	0.1				
5	37.6	0.2				
6	37.6	0.3				
7	56.5	0.1				
8	56.5	0.2				
9	56.5	0.3				

Fonte: Autoria própria (2023)

A análise visual, sem auxílio de equipamentos, mostra que os furos apresentaram uma qualidade considerada adequada sem a presença de defeitos significativos que pudessem comprometer estruturalmente o material ou a utilização de sistemas de fixação como parafusos ou rebites. Exceção para o teste 1 com a broca helicoidal na qual a velocidade de corte e avanço mais baixos não conseguiram cortar o material adequadamente na saída do furo.

Percebe-se que a maior velocidade de corte para ambas as brocas resultou no melhor acabamento nas arestas de entrada e saída dos furos. As paredes apresentaram superfície sem defeitos aparentes.

Apesar de a qualidade ser considerada adequada, percebeu-se em todos os casos algumas fibras não são completamente cortadas pela ação das arestas de corte das brocas. Este comportamento foi observado por Ellenberger (2022) em sua pesquisa e pode ser explicado pelo comportamento viscoelástico de fibras naturais e também pelas forças envolvidas no processo da furação.

Dependendo do tipo da fibra e sua resistência, pode ocorrer o desvio da aresta de corte e evitar o corte adequado. Durante o processo de perfuração em compósitos com fibras naturais, o movimento de entrada da broca no material pode levantar as fibras da primeira camada com menor ancoragem em relação às fibras das camadas internas em função das forças envolvidas e da geometria da broca.

Este movimento pode influenciar no corte adequado do material. Na saída do furo existe um processo de extrusão influenciado pela aresta transversal da broca e das forças de avanço envolvidas, o que pode movimentar as fibras da última camada, além de também evitar o corte adequado.

Também pode ser observado que apesar de uma boa superfície na parede dos furos algumas fibras não foram completamente cortadas, o que pode estar relacionado à diferença de resistência dos componentes do compósito.

Elleberger (2022) produziu e analisou a perfuração em compósitos de adesivo de poliuretano com fibras de bananeira cortadas mecanicamente e manualmente e concluiu que a qualidade mais adequada para a furação do compósito com fibras mecanicamente trituradas foi obtida com a broca modelo helicoidal utilizando velocidade de corte de 19 m/min e avanço de 0,1 mm. Em compósitos com fibras cortadas manualmente o melhor resultado foi com a perfuração com broca modelo três pontas utilizando velocidade de corte de 38 m/min e avanço de 0,1 mm.

Na Figura 52 é mostrada a imagem ampliada da superfície de entrada do furo feito com broca helicoidal, v. 56,5 m/min e 0,2 mm/rot na qual são observadas algumas fibras não cortadas.

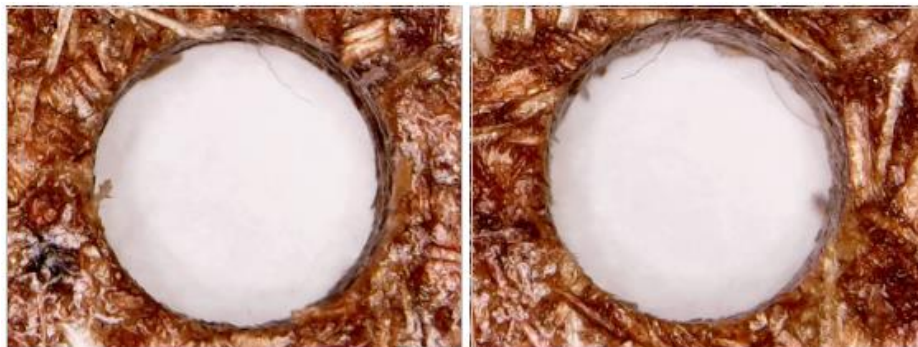
Figura 52—Imagem da perfuração de entrada com a broca helicoidal utilizando $V_c=56,5$ m/min e avanço de 0,2 mm/rot



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 53 são apresentadas as imagens da perfuração com broca helicoidal com velocidade de 56,5 m/min e avanço de 0,3 mm/rot. Pode-se observar que esta é a melhor condição obtida tanto na entrada quanto na saída.

Figura 53 - Aparência da perfuração com a broca helicoidal utilizando $V_c=56,5$ m/min e avanço de 0,3 mm/rot: (a) entrada do furo e (b) saída



(a)

(b)

Fonte: Aatoria própria (2023)

Pode-se observar na Figura 53 a melhor condição obtida tanto na entrada quanto na saída. É possível afirmar que, para esta composição, maiores velocidades de corte e avanço são as mais adequadas em termos de qualidade na furação. Sendo assim, conclui-se que a composição permite perfuração com acabamento adequado com ambas as brocas, contudo o melhor resultado obtido foi com uso de broca helicoidal com $V_c=56,5$ m/min e avanço de 0,3 mm/rot.

4.5 Protótipo

Tendo-se como base os resultados obtidos, pode-se dizer que o compósito produzido é indicado para uso estrutural e não estrutural, especialmente como substituto a painéis de madeira comerciais como o MDF e o MDP. Contudo, pensando-se em aproveitar até mesmo as sobras e recortes do material e assim evitar ao máximo o descarte, há a possibilidade de utilização também em artesanatos.

Sendo assim, para demonstração do uso do compósito em artesanato foi produzido um porta-canetas. Nele, as sobras dos recortes feitos para as análises físicas e mecânicas dessa pesquisa foram cortadas com serra circular de mesa e coladas com adesivo de poliuretano derivado de óleos vegetais da marca Kehl – AG101, com mistura de pré-polímero e poliol na proporção 1:1 em massa. Na Figura 54 podem-se ver fotografias do produto confeccionado.

O protótipo foi produzido sem qualquer tipo de acabamento, apenas com as sobras das placas produzidas da composição C4 e o adesivo, ainda assim o objeto ficou adequado para o uso, com poucas pontas de fibra soltas.

A produção do protótipo demonstra que é possível se agregar valor à serragem disponível em marcenarias utilizando-a na produção de um material compósito biodegradável sem a necessidade de alto investimento em equipamentos, ressignificando assim o produto e tornando-o fonte de renda, já que esse material seria descartado.

Figura 54 - Protótipo de porta-canetas (a) Visão lateral (b) Visão superior (c) Vista frontal (d) Vista posterior



(a)

(b)



(c)

(d)

Fonte: Autoria própria (2024)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Os parâmetros de prensagem ideais para produção de placas de espuma rígida KT-1106 da marca Kehl são 20 minutos de prensagem sob pressão de 4MPa em temperatura ambiente (25°C) que produz espuma com densidade média de 290 kg/m³;
- Não é necessário manter as amostras de espuma rígida sob pressão após esse período, uma vez que a expansão é estabilizada;
- Os parâmetros de produção de compósitos de espuma rígida reforçados por sisal e serragem que apresentou maior resistência à flexão dentre as composições, com tensão máxima de 19,76MPa e densidade de 767±41,78 kg/m³ foi a composição C4 produzida com proporção 50:50 de espuma rígida:fibras, 45:5 de serragem:sisal, temperatura de prensagem ambiente (25°C), tempo de prensagem de 20 min e pressão de 4MPa;
- A elevada resistência à flexão da composição C4 em relação aos demais pode ser explicada pelo adequado empacotamento das fibras e seu efetivo recobrimento pela espuma rígida, favorecido pela combinação dos fatores de prensagem, possibilitando uma melhor transferência de tensões entre os componentes;
- A absorção de água dos compósitos não causou inchamento nos reforços nem trincas na matriz;
- Este compósito não é indicado para uso como paredes de divisórias sem o uso mantas de isolamento no interior das estruturas, pois possui baixa capacidade de absorção acústica;
- A perda de massa dos compósitos inicia-se próxima a 180 °C, sendo assim, pode-se concluir que o compósito é indicado para usos em mobiliário e artesanatos que não são expostos a temperaturas superiores a 180 °C;
- Esse compósito não é indicado para uso em situação de exposição direta à radiação UVA, pois pode ocorrer redução superior a 90% da resistência à flexão.

- Quando submetido à chama, a velocidade de avanço de chama é de 239 ± 9 mm/min, não sendo indicado seu uso em locais com possibilidade de fogo.
- A perfuração com melhor acabamento pode ser feita com uso de broca helicoidal com $V_c=56,5$ m/min e avanço de 0,3 mm/rot.
- O compósito produzido apresentou perspectiva de uso estrutural e não estrutural.
- Sugere-se para trabalhos futuros a avaliação do uso de retardantes de chamas, avaliação dos gases liberados pela queima e uso de bloqueadores UV para considerar novas possibilidades de uso do material compósito, possíveis acabamentos e análise de retenção de pregos e parafusos.

REFERÊNCIAS

- AIRCRAFTFIRE. **Project No. FP7-2010-265612-CP-FP**: Fire Risk Assessment and Increase of Passenger Survivability. Final Summary Report Date December 2014.
- ALI, S.H. The materials science imperative in meeting the Sustainable Development Goals. **Nature Material**. V. 17, p. 1052–1053, 2018.
- ALLARD, J., ATALLA, N. **Propagation of sound in porous media - Modeling sound absorbing materials** John Wiley and Sons Ltd., 2009.
- ALLEN, H. G. **Analysis and design of structural sandwich panels**. Oxford: Pergamon Pres, 1969.
- ALMEIDA, I. A., CORREIA, J.R., BRANCOM F.A., GONILHA, J.A. Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção. **Mecânica experimental**, v.19, p79-90, 2011.
- ALVES, C.; FERRÃO, P. M. C.; SILVA, A. J.; et al. Ecodesign of automotive componentes making use of natural jute fiber composites. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 4, p.313–327, 2010.
- ALVIM, D. S.; GATTI, L. V.; SANTOS, M. H.; YAMAZAKI, A. Estudos dos compostos orgânicos voláteis precursores de ozônio na cidade de São Paulo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro, v.16, n.2, pp.189-196, 2011.
- AMADO, J. L. M.; REIS, M. E. P. **Análise do comportamento mecânico de compósito reforçado com fibra de piaçava**. 2019 Dissertação de mestrado. Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia. Rio de Janeiro, 2019.
- ARANTES, V. L. **Compósitos**. Aula ministrada em apresentação de PowerPoint em 2014. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/188949/mod_resource/content/1/aula%2010%20Comp%C3%B3sites.pdf. Acesso em 16 out. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNTNBR 15316-2**:Painéis de fibras de média densidade - Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNTNBR 14810-2**:Painéis de partículas de média densidade - Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- EN 323**:Wood based panels – Determination of density, 2002.

AMERICAN STANDARDS FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D570-98**: Standard Test Method for Water Absorption of Plastics.

AMERICAN STANDARDS FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D790**: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, USA, 2015.

AMERICAN STANDARDS FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1050**: Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System, USA, 2019.

ARAUJO, T.R. **Espumas rígidas poliuretanas de alta densidade, derivadas de lignopolióis obtidos por glicerólise enzimática**. 2022. Tese (Doutorado), Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, 2022.

AZEVEDO, E. C. **Efeito da radiação nas propriedades mecânicas do adesivo de poliuretana derivado de óleo de mamona**. 2009. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

BENDTSEN, B.A. Properties of wood from improved and intensively managed trees. **Forest Products Journal**, v.28, n.10, pp 61-72, 1978.

BIANCHI, O. CASTEL, C.D., OLIVEIRA, R.V.B.O., BERTUOLI, P.T., HILLIG, E. Avaliação da degradação não-isotérmica de madeira através de termogravimetria-TGA. **Polímeros**, v.20, n. 5, 2010.

BONATTI, E.C. **Análise da viabilidade de utilização de materiais recicláveis para isolamento acústico**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

BIK, J.; GLUSZEWSKI, W.; RZYMSKI, W. M.; ZAGÓRSKI, Z. P., EB radiation cross linking of elastomers. **Radiation Physics and Chemistry**, v 67, p 421- 423, 2003.

BLEDZKI, A. K.; REIHMANN, S.; GASSAN, J. Properties and Modification Methods for Vegetable Fibers for Natural Fiber Composite. **Applied Polymer Science**, v. 59, p. 1329 – 1336, 1996.

BOLSONI, E. **Estudo do reaproveitamento e reutilização das espumas rígidas de poliuretano pós-consumo**. 2008. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008

BORGES, J. C. S. **Compósito de Poliuretano de mamona e vermiculita para isolamento térmico**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

BORTOLUZZI, J., CEMIN, A., BONETTO, L. R., FERRARINI, F., ESTEVES, V. I., & GIOVANOLA, M. Isolation, characterization and valorization of lignin from Pinus

elliottii sawdust as a low-cost biosorbent for zinc removal. **Cellulose**, v.26, n.8, 4895–4908, 2019.

BUJJIBABU, G., DAS, V., RAMAKRISHNA, M., NAGARJUNA, K. Mechanical And Water Absorption Behavior Of Natural Fibers Reinforced Polypropylene Hybrid Composites. **Materials Today: Proceedings**. v.5, p. 12249-12256, 2018.

CALEGARI, E. P., OLIVEIRA, B. F. Compósitos a partir de materiais de fontes renováveis como alternativa para o desenvolvimento de produtos. **Sustentabilidade em debate**.v7, n1, p140-155. 2016.

CALLISTER, W.D & RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9ª ed. Rio de Janeiro, 2016.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V.,**Técnicas de Caracterização de Polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2003.

CANGEMI, J. M. Biodegradação de Poliuretano Derivado do Óleo de Mamona. [s.l.] São Paulo - USP, 2006.

CARDOSO, G. V.; CLARO NETO, S.; VECCHIA, F. Espuma rígida de poliuretano (PU) derivada de óleo vegetal (*Ricinus communis*) para isolamento térmico em sistemas de cobertura. 2011, **Anais[...]** Cáceres, MT: Ed. UNEMAT, 2011.

CARMO, K. M. do; DA SILVA, M. C.; MORELLI, C. L. Reuse of rigid polyurethane foam waste in a thermoplastic polyurethane matrix. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 9, n. 3, 2020.

CARVALHO, R. F. **Compósitos de fibra de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira**. 2005. (Doutorado) – Interunidades em ciências e engenharia de materiais, Universidade de São Paulo. 2005.

CAVALCANTI, W. M., OLIVEIRA, L. S., CANGUSSU, L. B., MAZIERO, R., CASTRO, B. D. Produção, caracterização química e mecânica de compósitos a partir de resíduos de madeira da construção civil e resinas epóxi de óleos vegetais. 2020, **Anais [...]** Gramado, RS: 3º Conresol, 2020.

CELONI, Y., CAPORAL, M.; GONZAGA, C.; NICEZIO, B. Análise de indicadores sobre intoxicação exógena por solventes voláteis no estado do Paraná.**Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v.14, 2023.

CHAWLA, K. K. **Composite Materials: Science and Engineering**. Springer Science & Business Media, 2012.

CLARO NETO, S.; CANGEMI, J. M.; SANTOS, A. M. Poliuretano: De Travesseiros a Preservativos, um Polímero Versátil. **Química nova na escola**. v. 31, n 3, agosto 2008.

COELHO, P. I. C. **Exposição aos Compósitos orgânicos voláteis: trabalhadores em cozinhas escolares**. 2014. Dissertação de Mestrado - Segurança e Higiene do trabalho, Instituto Politécnico de Lisboa, Lisboa, 2014.

DA SILVA, E. H. P. **Síntese e caracterizações da espuma rígida de poliuretano derivada de óleos vegetais dopada com hidróxido de alumínio**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2020.

DA SILVA, V. B.; MARADINI, G. S.; DE AZEVEDO, M. G.; DIAS JÚNIOR, A. F. D.; OLIVEIRA, M. P. Propriedades e Características Estruturais de Compósitos Poliméricos de Resina Poliuretana de Óleo de Mamona (*Ricinus Communis* L.) Reforçados com Fibras do Bagaço de Cana-de-Açúcar. **Perspectivas Online: Exatas & Engenharias**, v. 9, n. 26, p. 35- 44, 2019.

DALTIN, D. **Tensoativos: química, propriedades e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 2012.

DE JESUS, L. C. C.; DA LUZ, S. M.; LEÃO, R. M.; ZATTERA, A. J.; AMICO, S. C. Thermal properties of recycled polystyrene composite reinforced with cellulose from sugarcane bagasse. **Revista Materia**, v. 24, n. 3, 2019.

DE OLIVEIRA F., GONÇALVES L.P., BELGACEM M.N., FROLLINI E. Polyurethanes from plant-and fossil-sourced polyols: properties of neat polymers and their sisal composites **Ind. Crop. Prod.**, 155, 2020.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostras**. EDIPUCRS: Porto Alegre, 2007.

DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, É. T. G. **Princípios e aplicações de análise térmica**. Material de Apoio – Curso teórico prático. USP, São Carlos, Julho/Agosto, 2012.

DIACENCO, A. A. **Modelagem por elementos finitos de materiais compósitos estruturais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010

DIAZ-ALVAREZ, A., RUBIO-LÓPEZ, A., SANTIUSTE C., et al. Experimental analysis of drilling induced damage in biocomposites. **Text Res J**, 88(22): 2544–2558, 2018. DOI: 10.1177/0040517517725118.

DUBARCA, I., SPOREA, N., VASILE, O. Assessment of the Acoustic Absorption Characteristics of Layered Composite Structures Obtained from Plates with Lignocellulosic Coatings. **Materiale Plastice**. v. 57, n. 1, p 8 – 14, 2020.

EL BANNA, W. R., COSTA, D. S., BAIA, L. M. G., SOUZA, J. A. S. Viabilidade da utilização de compósitos híbridos reforçados com fibra de sisal e pó de madeira

como materiais renováveis. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA. **Anais[...]**. 2014.

ELANCHEZHIAN, C., RAMNATH, B. V., RAMAKRISHNAN, G., *et al*, Review on mechanical properties of natural fiber composites, **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 1, p. 1785–1790, 2018.

ELLENBERGER, A. **Fresamento de topo em compósito de fibra do caule da bananeira e poliuretano derivado do óleo de mamona**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Curitiba, 2018.

ELLEMBERGER, A. **Furação em compósito de fibras do caule da bananeira e poliuretano derivado do óleo de mamona**. Tese (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Curitiba, 2022.

ELLENBERGER, A. POLLI, M. L., AZEVEDO, E., PAULA, C. R. P. Drilling of natural fiber-reinforced based polyurethane foam composite. **Journal of composite materials**, v 56, n6, 899-909, 2022.

EMBRAPA Algodão. **Sistemas de Produção**, versão eletrônica (ISSN 1678-8710). 2006.

EMBRAPA Brasil. **Espécies de pinus mais plantadas no Brasil**. 2014.

EMBRAPA Florestas. **Sispinus – simulador de crescimento de pinus**. [s.d].

FERNANDES, R. I. M. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos de fibras naturais modificadas e híbridos: Fibras da coroa do abacaxi/ Polipropileno e Fibras da Coroa do Abacaxi/ Fibras de Vidro/ Polipropileno**. 2012. Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

FERRARINI, F. **Estudo da inflamabilidade do compósito de poliuretano derivado de óleo vegetal com ATH e tecido de fibras de juta para uso aeronáutico**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica e de Materiais – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

FERRAZZA et al. Caracterização mecânica em flexão de compósito de poliuretano derivado de óleo de mamona reforçado com sisal após a radiação gama e ultravioleta. In: Relatório de Iniciação Científica, SICITE, UTFPR, 2012, Curitiba. **Anais [...]** Curitiba.

FLECK, M.E.K., BARCELOS, V.M., PEREIRA, G.M., SANTOS, P.R., MAGNAGO, R.F., Painéis isolantes térmicos e antichamas. **Rev. Gestão & sustentabilidade ambiental**. 2023. Doi <<https://10.59306/rgsa.v12e52023e20075>>

FONTANELLA, C. A., OLIVEIRA, A. P. N. DE E HOTZA, D. Recobrimentos poliméricos hidrofóbicos sobre isoladores elétricos de porcelana. **Matéria** (Rio J.) [online]. v.13, n.4, p. 624-635, 2008.

FRATZL, P. Biomimetic materials research: what can we really learn from nature's structural materials? **Journal of The Royal Society Interface**. v. 4, n. 15, 2007.

FUNDAJ. **Sisal ou Agave (Agave sisalana)** (2019) Disponível em: <https://www.gov.br/fundaj/pt-br/destaques/observa-fundaj-itens/observa-fundaj-plantas-xerofilas/sisal-ou-agave-agave-sisalana-1>.

GALLO, J. B.; AGNELLI, J. A. M. Aspectos do comportamento de polímeros em condições de incêndio. **Polímeros**, São Carlos, v. 8, n. 1, jan/mar. 1998.

GALVÃO, A. C. P.; FARIAS, A. C. M.; SANTANA, J.S.; MENDES, J. U. L. Characterization of castor oil polyurethane composites with glass powder waste for application in thermal insulations. **HOLOS**, v. 1, p. 1–12, 2021.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. LTC: Rio de Janeiro, 2012.

GAY, D.; HOA, S. V. **Composite materials: design and applications**. CRC press, 2007.

GIBSON, R. F. **Principles of Composite Material Mechanics**. CRC Press, 2012.

GRAEDEL, T. E., & ALLENBY, B. R. **Industrial Ecology and Sustainable Engineering**. CRC Press, 2017.

GUIMARÃES, F. A. **Avaliação das propriedades mecânicas de um compósito híbrido de matriz termoplástica PPS reforçado com fibras de carbono contínuas e descontínuas**. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São Paulo, 2018.

GUO, A., JAVNI, I., PETROVIC, Z. Rigid polyurethane foams based on soybean oil **J. Appl. Polym. Sci.**, 77 (2), p. 467-473, 2000.

GURGEL D., BRESOLIN D., SAYER C., CARDOZO FILHO L., DE ARAÚJO P.H.H. Flexible polyurethane foams produced from industrial residues and castor oil **Ind. Crop. Prod.**, 164, 2021.

GUTIÉRREZ, J. C. H., RUBIO, J.C.C., FARIA, P.E., DAVIM, J.P. Usinabilidade de materiais compósitos poliméricos para aplicações automotivas. **Polímeros: Ciência e tecnologia** v.24, n.6, p.711-719, 2014.

HEINS, I. **Systematische Erfassung und Dokumentation der mikronatomischen Merkmale der Nadelhölzer aus Klasse der Pinatae**. 2005. 210p. Tese (Doutorado em Ciências) – Technische Universität München, München-AL.

HIGA, R. C. V., et al. **Zoneamento climático: Pinus taeda no sul do Brasil**. EMBRAPA, 2008.

HIGGINS, R. A. **Propriedades e Estruturas dos Materiais em Engenharia**. São Paulo. 471 p. 1982.

HILLIG, E. **Viabilidade Técnica de produção de compósitos de polietileno (HDPE) reforçados com resíduos de madeira e derivados das indústrias moveleiras**. 2006. Tese (Doutorado) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. 2006.

HILLIG, E.; IWAKIRI, S.; ANDRADE, M. Z.; ZATTERA, A. J. Caracterização de Compósitos produzidos com polietileno de alta densidade (HDPE) e serragem da indústria moveleira, in: **Sociedade de Investigações Florestais**, v.32, n.2,, p.299-310. 2008.

HOVEN. A. V. D., SCHILD, A. Organização Mundial do Comercio - 2016. Comércio de recursos naturais e da comunidade empresarial: o que está em jogo? Disponível em:

<https://www.wto.org/english/res_e/publications_e/wtr10_forum_e/wtr10_18may10_e.htm>. Acesso: 20, dezembro, 2023.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. Outdoor air pollution. **IARC classifies formaldehyde as carcinogenic to humans**. Press Release, n. 153, June 15. 2004.

IS JK, B., EKICI E. Experimental investigations of damage analysis in drilling of woven glass fiber-reinforced plastic composites. **Int J Adv Manufacturing Techn**, 49(9):861–869, 2010. DOI: 10.1007/s00170-009-2440-x.

ISO1209 - Rigid Cellular Plastics - Determination Of Flexural Properties - Part 2: Determination Of Flexural Strength And Apparent Flexural Modulus Of Elasticity (First Revision). Department Of Standards Malaysia, 2006.

ISO845 – Cellular plastic and rubbers – Determination of apparent density, Department Of Standards Malaysia, 2007.

IWAKIRI, S. **Painéis de Madeira reconstituída**. Curitiba: EDFUPEF, 2005.

JESUS, J. M. H., **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada**. 2000. Tese de doutorado – Engenharia de Materiais, Instituto de Química de São Carlos, USP, 2000.

JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and Biocomposites. **Carbohydrate Polymers**. v.71, n.3, 343-364, 2008.

JONES, R. M. **Mechanics of Composite Materials**. Boca Raton: CRC Press. 355 p. 1975.

JUNIOR, A. S. C. N., CARVALHO, A. C. F., OLIVEIRA, A. B. S., NOGUEIRA, L. M. R., GOMES, I. S., FUJIYAMA, R. T., compósitos de reforços vegetais como alternativa para o desenvolvimento regional sustentável: um estudo das características mecânicas e potencial de aplicação. In: 72ª Reunião Anual da SBPC, **Anais[...]** 2020.

KLOCK, U. **Qualidade da Madeira de Pinus maximinoi H. E. Moore**. 2000. Tese - (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

KLOPFER, W. The Hitch Hiker's Guide to LCA - An orientation in LCA methodology and application. **Int J Life Cycle Assessment** v. 11, n. 142, 2006.

KURAŃSKA M., PINTO J.A., SALACH K., BARREIRO M.F., PROCIAK A. Synthesis of thermal insulating polyurethane foams from lignin and rapeseed based polyols: a comparative study **Ind. Crop. Prod.**, 143, 2020.

KUSMONO, HESTIAWAN, H., JAMASRI. The water absorption, mechanical and thermal properties of chemically treated woven fan palm reinforced polyester composites. **Journal of materials research and technology**.v.9, n 3, p. 4410-4420, 2020,. Doi <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.065>>

LI B., ZHOU M., HUO W., CAI D., QIN P., CAO H., TAN T. Fractionation and oxypropylation of corn-stover lignin for the production of biobased rigid polyurethane foam, **Ind. Crop. Prod.**, 143, 2020.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; NAGAHAMA, K. J.; FAIRBAIRN, E. M. Caracterização mecânica de laminados cimentícios esbeltos reforçados com fibras de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.6, p.644–651. 2007.

LORANDI, N. P.; CIOFFI, M. O. H.; ORNAGHI JR, H.. Análise dinâmico-mecânica de materiais compósitos poliméricos. **Scientia cum industriav4**, n1 p.48-60, 2016.

MACEDO, V., ZIMMERMANN, M.V.G., KOESTER, L.S., SCIENZA, L. C., ZATTERA, A.J. Obtenção de espumas flexíveis de poliuretano com celulose de Pinus elliottii. **Polímeros: Ciência e tecnologia** n 27, p 27-34, 2017.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard & Dry-process fiberboard manufacturing**. 2.ed. São Francisco: Miller Freeman Inc., 1993.

MAMTA, H., FOULADI, M.H., AL-ATABI, M., NAMASIVAYAM, S. N. Acoustic absorption of natural fiber composites. **Journal of engineering**, 2016.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução à polímeros**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

MARTIN, A.R., MARTINS, M.A., MATTOSO, L.H.C., SILVA, O.R.R. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana. **Polímeros**, v. 19 n.1, 2009.

MATTOS, R. L. G.; CHAGAS, F. B.; GONÇALVES, R. M. Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 27, p. 121-156, mar. 2008.

MATTOSO, L. H. C.; TEODORO, K. B. R.; TEIXEIRA, M. E.; CORREA, A. C.; CAMPOS, A.; MARCONCINI, J. M. Whiskers de Fibra de Sisal Obtidos sob Diferentes Condições de Hidrólise Ácida: Efeito do Tempo e da Temperatura de Extração. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.21, n.4, p.280-285, 2011.

MERLINI C., SOLDI V., BARRA G. M. O. Influence of fiber surface treatment and length on physico-chemical properties of short random banana fiber-reinforced castor oil polyurethane composites. **Polymer Test**. 30:833-840, 2011.

MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA [**Degeo UFOP**] Disponível em: <<http://www.degeo.ufop.br/laboratorios/microlab/mev.htm>> Acesso em 26 de agosto de 2016.

MILANESE, A., CIOFFI, M.O.H. VOORWALD, H.J.C. Flexural Behavior of Sisal/Castor Oil-based Polyurethane and Sisal/Phenolic Composites. **Materials Research**. 15(2) p: 191-197, 2012.

MIRANDA, D. V., QUINTÃO, C. M. F., GUALBERTO, M. S., NOVACK, K. M. Produção e Caracterização de espumas de poliuretano produzidas a partir de diferentes óleos vegetais. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano. 08, Ed. 10, Vol. 02, p. 166-188. 2023.

MISRA, M.; MOHANTY, A. K.; DRZAL, L. T. Environmentally Friendly Biocomposites from Jute and Biopolymer, In: SAMPE, Advanced Composite Technology for 21st Century Transportation, Midwest Advanced Materials and Processing Conference Proceedings, Dearborn, Michigan, Sept. 12–14, p. 299–310. **Anais[...]** 2000.

MOAD, C. L.; WINZOR, D. J., Quantitative characterization of radiation degradation in polymers by evaluation of scission and cross linking yields, **Progress in Polymer Science**, v. 23, 759-813, 1998.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; HINRICHSSEN, G. **Macromolecular Materials and Engineering**, Wiley. p. 1-24. 2000.

MONTEAVARO, L. L. **Poliuretanas a partir de Polióis de Óleo de Soja**. 2005. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MOSLEMI A. A.; GARCIA, J. F.; HOFSTRAND, A. D. Effect of various treatments and additives on wood-Portland cement water systems. **Wood and Fiber Science**, v. 15, n. 2, p. 164-176, 1983.

MOTTA, B. C. S. **Estudo do efeito do uso de poliol reciclado nas propriedades mecânicas da espuma rígida de poliuretano**. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

NORBACK, D., BJORNSSON, E., JANSON, C., WIDSTROM, J; BOMAN G. Asthmatic symptoms and volatile organic compounds, formaldehyde, and carbon dioxide in dwellings. **Occupacional; Environmental Medicine**, vol. 52 n. 6, p.388-95, 1995.

NUNES, A. P. O. T. **Design & sustentabilidade: compósitos poliméricos com fibra de bambu e sua empregabilidade na fabricação de mobiliário**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2021.

OLIVEIRA, G.C., ALMEIDA, L.R., SILVA, W.R., MENDES, B.H.A., DANIEL, B.T.F., COSTA, D.S., COSTA, D.S. Resíduos metálicos de alumínio em compósitos de poliéster: resistência mecânica e flamabilidade. 74º CONGRESSO ANUAL DA ABM – INTERNACIONAL, PARTE INTEGRANTE DA ABM WEEK. 2019, de 01 a 03 de outubro de 2019, São Paulo **Anais[...]** São Paulo, SP, 2019.

OLIVEIRA, M. C. R. **Compósito de poliuretana de mamona e resíduo industrial para isolamento térmico e absorção sonora**. 2010. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

OLIVEIRA, M. P., SILVA, V.B., MARADINI, G.S., AZEVEDO, M.G., DIAS JUNIOR, A. F., Propriedades e características estruturais de compósitos poliméricos de resina poliuretana de óleo de mamona (*Ricinus communis* L.) reforçados com fibras do bagaço de cana-de-açúcar. **Exatas & Engenharias** v9 n26, p 35-44, 2019.

PARDINI, LUIZ C., AND RODOLFO JC PERES. Tecnologia de fabricação de pré-impregnados para compósitos estruturais utilizados na indústria aeronáutica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia** v6 n2, p 32-42, 2013.

PATEL K, CHAUDHARY V, GOHIL PP, et al. Investigation on drilling of banana fibre reinforced composites. In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON CIVIL, MATERIALS AND ENVIRONMENTAL SCIENCES. 2015. **Anais[...]** p. 201–205. DOI: 10.2991/cmes-15.2015.58.

PAULA, C.R.P., TRIANOSKI, R., AZAVEDO, E. Development and characterization of sawdust and sisal fiber reinforced vegetable based polyurethane foam hybrid composites. **Journal of natural fibers**, 2020.

PAULA, C.R.P. **Caracterização de compósitos de poliuretano de óleo vegetal e madeira de Pinus e fibras de Agave sisalana**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

PAULA, C.R.P., RODRIGUES, I.V., SILVA, C.H., AZEVEDO, E. Influência de diferentes métodos de corte de fibras de sisal como reforço em compósito de espuma de poliuretano derivado de óleo vegetal. In: 15º Congresso Brasileiro de Polímeros. 2019. **Anais [...]**Bento Gonçalves.

PEIXOTO, D. L. **Tipos de materiais compósitos**. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

PEREIRA, A. L., BANEJA, M. D., NETO, S. S. J., CAVALCANTI, D. K. K. Mechanical and Thermal Characterization of Natural Intralaminar Hybrid Composites Based on Sisal. **Polymers**, v.12, n.4, p.866, 2020.

PHILLIPS, E. W. J. Identification of Softwoods by their Microscopic Structure. **Forest Products Research**, London, n. 22, p. 1-50, 1963.

PIERPOINT, S.; SILVERMAN, J.; Al-Sheikhly, M., Effects of ionizing radiation on the aging of polyester based polyurethane binder. **Radiation Physics and Chemistry**, 62, 163-169, 2001.

PIZZI, A. **Advanced Wood Adhesives Technology**, Marcel Dekker, New York, NY, 1994.

PROTZEK, G. R. **Obtenção e caracterização de compósito verde de casca de pinhão e poliuretano derivada do óleo de mamona**. 2017. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

PROTZEK, G. R., MAGALHÃES, W.L.E., BITTENCOURT, P.R.S, CLARO NETO, S., VILLANOVA, R. L., AZEVEDO, E.C. The influence of fiber size on the behavior of the araucaria pine nut shell/PU composite. **Rev Polímeros**, 29(2), e2019025, 2019. Doi < <https://doi.org/10.1590/0104-1428.01218>>.

PROTZEK, G.R.;KOLOSKI,J.;MAGALHÃES,W. L.E.;CLARONETO, S.; NASCIMENTO,E.M.;AZEVEDO,E.Análisedaspropriedadesfísicasdocompósito de serragem e poliuretano derivado de óleo de mamona. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS. **Anais[...]** 2016.

QU Z., ZHAO B., WANG J., PAN X., HU X., TAN J., SHEN Y. Morphological and mechanical behavior of polyurethane/epoxy interpenetrating polymers and its flax fiber-reinforced composites **Polym. Compos.**, 42 (3), p. 1258-1266, 2021.

QUINTANA, A.; ALBA, J.; DEL REY, R.; GUILLÉN-GUILLAMÓN, I. Comparative Life Cycle Assessment of gypsum plasterboard and a new kind of bio-based epoxy composite containing different natural fibers. **Journal of Cleaner Production**, v. 185, p. 408–420, 2018.

RAMESH, M.; PALANIKUMAR, K.; REDDY, K. H. Mechanical property evaluation of sisal-jute-glass fiber reinforced polyester composites, **Composites Part B: Engineering**, v. 48, p. 1-9. 2013.

REINERTE, S., AVOTINA, L., ZARINS, A., CABULIS, U., VIKSNA, A. TG/DTA-FTIR as a method for analysis of tall oil based rigid polyurethane foam decomposition gaseous products in a low oxygen environment. **Polymer Degradation and Stability**, v. 180, 2020.

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. B. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros: Ciência e tecnologia** v10 p.4-10, 2000.

RIBEIRO, E. C. C. **Reciclagem química de espumas de poliuretano**. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Campinas: UNICAMP, 2010.

RIBEIRO, R. S. **Caracterização do condicionamento acústico de uma sala de aula com o uso de painéis de madeira**. 2020. Tese de Doutorado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, Curitiba: UTFPR, 2020.

RIBEIRO, L. M.; LADCHUMANANANDASIVAM, R; GALVÃO, A. O.; BELARMINO, B. B. Flamabilidade e retardância de chama do compósito: poliéster insaturado reforçado com fibra de abacaxi (palf). **Rev. HOLOS**, Ano 29, v. 1, 2013.

ROCHA, M. P.; JUNIOR, M. I. M.; JUNIOR, R. T. Rendimento em madeira serrada de *Pinus taeda* para duas metodologias de desdobro. **Floresta**, v. 35, n.3.2005.

RODOLFO, A. J. **Estudo da processabilidade e das propriedades de PVC reforçado com resíduos de pinus**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ROGOVIN, Z. A.; GALBRAYKH, L. S. **Chemical Conversions and Modification of Cellulose**. Khimiya Publ., Moscou p. 205. 1979.

ROSÁRIO, F; PACHEKOSKI W. M.; SILVEIRA A. P. J.; SANTOS S. F.; JUNIOR H. S.; CASARIN, S. A. Resíduos de Sisal como Reforço em Compósitos de Polipropileno Virgem e Reciclado. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.21, n2, p.90-97, 2011.

ROY CHOUDHURY M, SRINIVAS MS, DEBNATH K, et al. Experimental investigations on drilling of lignocellulosic fiber re-inforced composite laminates. **J Manuf Process**, 34:51–61, 2018;. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.05.032.

RUCHERT, C. O. F. **Materiais compósitos – LOM 3066**. Aula ministrada em apresentação de PowerPoint em 2022. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/enrol/index.php?id=111277>. Acesso em 17 out. 2023.

SALINO, R.E. **Compósitos acústicos verdes à base de resíduos de chapas de gesso acartonado e espuma rígida de poliuretano (PUR) reciclados**. 2023. Tese (Doutorado em Sustentabilidade Ambiental Urbana) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

SANTINI, E.J.; HASELEIN, C.R.; GATTO, D.A. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas. **Ciência Florestal**, v.10, n.1, p.85-93 85, 2000.

SANTOS, D. A.J. Produção e consumo. In: ANDRADE, W. (org.). **O sisal no Brasil**. Salvador: SINDIFIBRAS; Brasília, DF. Apex, 2006. cap.4, p.45-55

SANTOS, F. P. A. **Caracterização de blocos flutuantes de espuma de poliuretano**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SANTOS, G. C. F. **Tendências da Engenharia de Materiais na Sustentabilidade corporativa**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023.

SAVIOLI, M. Q. **Síntese e caracterização de um pré polímero de uretano fundido confeccionado com polioli de origem vegetal e avaliação das propriedades mecânicas**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Programa De Pós-Graduação Em Ciência E Tecnologia Dos Materiais. São Paulo, 2022.

SHARMIN, E.; ZAFAR, F. **Polyurethane: An Introduction**. In: Polyurethane. [s.l.] IntechOpen, 2012. p. 1–16.

SHIMIZU, J. Y. Pinus na silvicultura brasileira. **Revista da Madeira**, v. 16, n. 99, p. 4-14, 2006.

SHIMOYAMA, V. R. S. **Estimativas de propriedades da madeira de Pinus taeda através do método não destrutivo emissão de ondas de tensão visando a geração de produtos de alto valor agregado**. 2005. Tese (Doutorado) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. 2005.

SIKENG, R.; JAWAID, M.; ARIFFIN, H.; SAPUAN, S.M. Thermal properties of coir and pineapple leaf fibre reinforced polylactic acid hybrid composites. **IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.**, n 368, 012019, 2018.

SILVA, C. C. B. da; *et al.* Amostras de matrizes naturais sem êxito para absorção acústica. In: XXX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC2023. 2023, Natal. **Anais [...]**. Natal:UFRN, 2023.

SILVA, C. O., NASCIMENTO, W. A. Uso das fibras do caroço do açaí como fase dispersa em compósitos de matriz termoplástica: uma revisão. **Brazilian Journal of Development** v8, n4 p.28654-28679, 2022.

SILVA, F.P. **Usinagem de Espumas de Poliuretano e Digitalização Tridimensional para a Fabricação de Assentos Personalizados para Pessoas com Deficiência**. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. Tese de Doutorado - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SOLAL, C., BOULANGER, G., ROUSSELLE, C., MANDIN, C., DOR, F., CABANES, P-A. Evaluation des risques sanitaires pour la population générale liés à la présence de formaldéhyde dans les environnements intérieurs et extérieurs. **Air Pur.** n 74. 2008.

SOUZA, K. S., BIGLES, L. H., LIMA, L. H. DE, SILVA, P. DA, SILVERO, S. L., PASSINHAS, D. M. C., MELO, B. N. Avaliação da densidade de espumas de poliuretanos de PET e PC com mistura de diisocianatos. **Brazilian Journal of Production Engineering**, 9(6), 40–44, 2023.

SPINACÉ, M.A.S., JANEIRO, L.G., BERNARDINO, F.C., GROSSI, T.A., PAOLI, M. Poliolefinas reforçadas com fibras vegetais curtas: sisal×curauá. **Polímeros: Ciência e tecnologia**, v 21, n.3, p 168-174, 2011.

THOMSON, T. **Polyurethanes as specialty chemicals: principles and applications**. Florida: CRC Press LLC, 2005.

TOWNSEND, T., 2020. **Natural Fibres and the World Economy**. Disponível em: <https://dnfi.org/coir/natural-fibres-and-the-world-economy-july-2019_18043/>.

TROVATI, G., SDANCHES, E., NETO, S. C., MASCARENHAS, Y., CHIERICE, G. Characterization of polyurethane resins by FTIR, TGA, and XRD. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 115, n. 1, p. 263–268, 2010.

TRIANOSKI, R. **Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas, de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

TUDOR, E. M., DETTENDORFER, A., KAIN G., BARBU, M. C., RÉH R., KRIŠŤÁK, Ľ., Sound-absorption coefficient of bark-based insulation panels, **Polymers**, v. 12, n. 5, p. 1012, 2020.

UL94 - Standard for Safety of Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances testing - Underwriter's Laboratory

VASCO, M. C. **Efeito da radiação gama sobre as propriedades mecânicas de compósito de fibras de sisal/poliuretana sem uso de agentes de acoplamento**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2014.

VASCO, M. C.; CLARO NETO, S.; NASCIMENTO, E. M.; AZEVEDO, E. Gamma radiation effect on sisal / polyurethane composites without coupling agents. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 27, n. 2, p. 165-170, 2017

VENTURA, A. M. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 21, nº 3/4, 2009.

VILAR, W. D. **Química e Tecnologia de Poliuretanos**. Vilar Consultoria: Rio de Janeiro. 3 ed. 2004.

WANGL., DING W.X., SUN Y. Effect of different fiber materials on mechanical properties of polyurethane composites In: 2ND INTERNATIONAL WORKSHOP ON MATERIALS ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCES 2015, pp. 406-411 **Anais[...]**. 2015.

XIANG H., AN J., ZENG X., LIU X., LI Y., YANG C., XIA X. Preparation and properties of polyurethane rigid foam materials modified by microencapsulated phase change materials. **Polym. Compos.**, 41 (4), p. 1662-1672, 2020.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H. E ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, 86, p.1781, 2007.

YANG R., WANG B., ZACH J., KORJENIC A., PETRANEK V., HROUDOVA J., BEDNAR T. Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool **Energy Build.**, 49, p. 246-253, 2012.

ZHANG, J., HORI, N., TAKEMURA, A. Optimization of agricultural wastes liquefaction process and preparing bio-based polyurethane foams by the obtained polyols. **Ind. Crops Prod.** 138, 111455, 2019.

ZHENG, B.; ZHANG, L.; ZHOU, Z.; CHEN, L.; LI, Y.; WU, A.; LI, H.; Understanding the Dynamic Evolution of Hemicellulose Structure During Pinus Taeda L. Growth. **SRRN**, 2023.

ANEXO A - Relatório técnico do material KT1106 – Indústria Kehl



Kehl Indústria e Comércio Ltda – ME
 R. Italo Paino, 700 / Jd. Industrial - São Carlos – SP
 CEP 13564-610 Tel/Fax: (16) 3361-2122
kehl@kehl.ind.br - www.kehl.ind.br

KT1106 KEHLTHERM® KP1106 TECHNICAL DATA SHEET

1. Description

Polyurethane two-component system for rigid foam. Uses CO₂ as blowing agent. Main use: Thermal insulation, thermal insulation, structural. For uses without an injection machine, KT1106-R system is indicated.

2. Polyol

Component	Polyol
Name	KEHLPACK® KT1106
Density (25°C)	1g/cm ³
Viscosity (25°C)	3000 cP
Storage temperature	15-35 °C
Shelf life	6 months
Appearance	Yellowish liquid, translucent



KEHL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA – www.kehl.ind.br – contato@kehl.ind.br

3. Isocyanate

Component	Isocyanate
Name	KEHLTHERM® IC200
Density (25°C)	1,18g/cm ³
Viscosity (25°C)	196 cPs
Storage temperature	15-45 °C
Shelf life	1 year
Appearance	brown, liquid

4. Mixing ratio

POL/ISO ratio	100:100 up to 100:120 ppw
----------------------	---------------------------

5. Typical reactivity and characteristics

Polyol temperature	25-40 °C
Isocyanate temperature	25-40 °C
Gel time	30 seconds
Rising time	60 seconds
Tack free time	180 seconds
Free rise core density	33±3 kg/m ³
Free rise expansion	70 °C
Flow rate	3,5 kg/min
Surface temperature	70±5 °C
Core temperature	150±15 °C

