



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

KRISHANA CARVALHO DE ALENCAR

**COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA COM RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO (RCD) E FIBRAS DE SISAL**

Ananindeua
2022

KRISHANA CARVALHO DE ALENCAR

**COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA COM RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO (RCD) E FIBRAS DE SISAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais, do Campus Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa

Coorientadora: Ma. Karla Suellen Lino Barbosa

Ananindeua
2022

FICHA CATALOGRÁFICA

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

A368c Alencar, Krishana Carvalho de.
Compósitos de matriz polimérica com resíduos da construção e
demolição (RCD) e fibras de sisal / Krishana Carvalho de Alencar.
— 2022.
74 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Coorientador(a): Prof^a. MSc. Karla Suellen Lino Barbosa
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de
Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2022.

1. Compósitos . 2. Resíduo da Construção e Demolição . 3.
Sisal. I. Título.

CDD 620.11

KRISHANA CARVALHO DE ALENCAR

**COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA COM RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO (RCD) E FIBRAS DE SISAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Faculdade de Engenharia de Materiais, do Campus
Universitário de Ananindeua, da Universidade
Federal do Pará, como requisito para obtenção do
título de Bacharela em Engenharia de Materiais.

Data da Aprovação: 30/05/2022

Conceito: Exceleste

BANCA EXAMINADORA

Deibson Silva da Costa

Prof. Dr. Deibson Silva da costa
(FEMat/CAMPANANIN/UFPA – Orientador)

Karla Suellen Lino Barbosa

Ma. Karla Suellen Lino Barbosa
(PRODENA/ITEC/UFPA – Coorientadora)

Alisson Clay Rios da Silva

Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva
(FEMat/CAMPANANIN/UFPA – Examinador Interno)

Emerson Cardoso Rodrigues

Prof. Dr. Emerson Cardoso Rodrigues
(FEQ/ITEC/UFPA – Examinador Externo)

Ananindeua
2022

À Deus por ter chegado até aqui. Aos meus pais por todo amor e apoio dado ao longo da graduação. Gratidão!

AGRADECIMENTOS

A Deus, diante do ano que passamos e em meio a tantas dificuldades, nunca me abandonou, sem ele nada seria possível.

A minha mãe, Claudete Alencar, por ser o meu porto seguro nos momentos difíceis e por ser a minha maior inspiração para me tornar uma mulher forte.

Ao meu pai, Keizi Alencar, por ser um exemplo em minha vida e por ter me dado todo suporte para alcançar esse objetivo.

Ao meu irmão, Klisman Alencar, e a todos os meus familiares que sempre me apoiaram, me motivaram e acreditaram no meu potencial.

Aos meus amigos, Pedro Ricardo, Isabela Lisboa, Iandra Gurjão e Julianne Lalor, que estiveram comigo ao longo desses cinco anos e que permanecerão pra sempre em minha vida.

A todos os professores da FEMat, que foram essenciais com seus ensinamentos e incentivo ao longo da graduação.

Em especial ao meu orientador Prof. Dr. Deibson Costa, pela oportunidade, confiança, apoio, dedicação e por ter acreditado em mim.

A minha coorientadora, Ma. Karla Barbosa, pelo ensinamento, apoio e disponibilidade para me ajudar no que foi preciso para a conclusão deste trabalho.

Ao grupo de pesquisa do LAMPS, pelos momentos que passamos juntos e toda experiência adquirida.

A Universidade Federal do Pará, pela disponibilidade dos laboratórios utilizados para a realização dos ensaios necessários para esta pesquisa.

Enfim, a todos que acreditaram em mim e contribuíram de alguma forma para a conclusão dessa etapa da minha vida.

RESUMO

Com os impactos gerados por resíduos industriais no meio ambiente e pela necessidade de fontes naturais e renováveis, pesquisas têm sido realizadas para a produção de novos materiais com o uso de resíduos e fibras vegetais, como os materiais compósitos. Neste trabalho, foram produzidos materiais compósitos poliméricos com Resíduo da Construção e Demolição (RCD), com granulometria de 100 *mesh*, e adição de fibras de sisal, no comprimento de 15 mm. Foram confeccionados compósitos híbridos, pelo método manual (*hand lay-up*) associado à compressão, com frações mássicas de resíduo variando de 5 % a 25 % e com frações de 3 % de fibras de sisal. A matriz utilizada foi a resina poliéster isoftálica junto com materiais catalíticos. Foi realizada caracterização mineralógica no resíduo e caracterização morfológica no resíduo e na fibra. Realizou-se ensaios físicos, mecânico de tração e de flamabilidade horizontal nos compósitos produzidos. A análise mineralógica do resíduo apresentou os principais picos de Quartzo e Calcita. A análise morfológica do resíduo identificou diferentes formatos de partículas, e a da fibra indicou a presença de superfície rugosa. Observou-se que as propriedades físicas aumentaram conforme elevou-se as proporções. A análise de resistência à tração indicou resultados superiores à matriz plena para os compósitos produzidos, sendo a composição com 20 % de RCD e 3 % de Fibras de Sisal a que obteve o melhor desempenho de tração (16,92 MPa). Em relação a flamabilidade, houve uma redução da taxa de queima à medida que foi inserido resíduo e fibras na matriz polimérica, onde a composição com 25 % de RCD e 3 % de Fibras de Sisal obteve o melhor resultado em relação à matriz plena (51,44 %) e com redução de 87,04 % e 82,72 % para as normas CONTRAN nº 498 e ASTM D 635, respectivamente. Com base no estudo, o reaproveitamento do resíduo de construção e demolição e a utilização fibras de sisal é uma alternativa viável para a produção de novos materiais que substituam os convencionais, para a aplicação em forros, painéis, paredes divisórias, pois apresentam boas propriedades e são sustentáveis.

Palavras-chave: Compósitos Híbridos. Resíduo. Fibras. Propriedades.

ABSTRACT

With the impacts generated by industrial waste on the environment and the need for natural and renewable sources, research has been carried out to produce new materials using waste and plant fibers, such as composite materials. In this work, polymeric composite materials were produced with Construction and Demolition Waste (RCD), with a granulometry of 100 mesh, and the addition of sisal fibers, in a length of 15 mm. Hybrid composites were made by the manual method (hand lay-up) associated with compression, with mass fractions of waste ranging from 5% to 25% and with fractions of 3% of sisal fibers. The matrix used was isophthalic polyester resin together with catalytic materials. Mineralogical characterization was performed on the residue and morphological characterization on the residue and fiber. Physical, mechanical tensile and horizontal flammability tests were carried out on the composites produced. The mineralogical analysis of the residue showed the main peaks of Quartz and Calcite. The morphological analysis of the residue identified different shapes of particles, and that of the fiber indicated the presence of a rough surface. It was observed that the physical properties increased as the proportions increased. The tensile strength analysis indicated superior results to the full matrix for the composites produced, and the composition with 20% RCD and 3% Sisal Fibers had the best tensile performance (16,92 MPa). Regarding flammability, there was a reduction in the burning rate as residue and fibers were inserted into the polymeric matrix, where the composition with 25% of RCD and 3% of Sisal Fibers obtained the best result in relation to the full matrix (51,44%) and with a reduction of 87,04% and 82,72% for CONTRAN 498 and ASTM D 635, respectively. Based on the study, the reuse of construction and demolition waste and the use of sisal fibers is a viable alternative for the production of new materials that replace the conventional ones, for application in ceilings, panels, partition walls, as they have good properties and are sustainable.

Keywords: Hybrid Composites. Residue. Fibers. Properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Classificação dos compósitos com base na fase dispersa.....	20
Figura 2.2 – Resina poliéster isoftálica.....	23
Figura 2.3 – Processo de cura da resina poliéster: (a) poliéster insaturado; (b) monômero de estireno; (c) poliéster curado.....	24
Figura 2.4 – Tipos de reforços utilizados em uma matriz polimérica.....	28
Figura 2.5 – Planta de sisal (<i>Agave sisalana</i>).....	30
Figura 2.6 – Tipos de orientações das fibras utilizadas como reforço em compósitos: (a) fibras contínuas unidirecionais; (b) fibras contínuas bidirecionais; (c) fibras contínuas multidirecionais; (d) fibras descontínuas unidirecionais; e (e) fibras descontínuas aleatórias.....	32
Figura 3.1 – Fluxograma das principais etapas de produção dos compósitos.....	34
Figura 3.2 – Materiais: (a) resina poliéster insaturada; (b) acelerador de cobalto; (c) iniciador MEK-P e (d) desmoldante.....	35
Figura 3.3 – Resíduo de Construção e Demolição: (a) antes do processo de beneficiamento e (b) após o processo de beneficiamento.....	36
Figura 3.4 – Fibras de sisal: (a) dispostas em feixe e (b) após o dimensionamento dos fios em 15 mm de comprimento.....	37
Figura 3.5 – Equipamentos utilizados: (a) estufa; (b) balança analítica; (c) molde metálico; e (d) prensa hidráulica.....	38
Figura 3.6 – Microscópio Eletrônico de Varredura.....	40
Figura 3.7 – Fluxograma da fabricação dos compósitos.....	42
Figura 3.8 – Dimensões dos corpos de prova para os ensaios físicos, em mm.....	43
Figura 3.9 – Corpos de prova para os ensaios físicos.....	44
Figura 3.10 – Dimensões dos corpos de prova para os ensaios de tração, em mm.....	44
Figura 3.11 – Corpos de prova para o ensaio de tração.....	45
Figura 3.12 – Máquina universal de ensaio.....	46
Figura 3.13 – Dimensões dos corpos de prova para os ensaios de flamabilidade horizontal, em mm.....	46
Figura 3.14 – Equipamento utilizado para o ensaio de flamabilidade horizontal.....	47
Figura 4.1 – Difração de Raios-X do resíduo de construção e demolição.....	49
Figura 4.2 – Morfologia do RCD com aumento de 150x.....	50
Figura 4.3 – Morfologia da fibra com aumento de 250x.....	51

Figura 4.4 – Comparativo entre a massa específica aparente e absorção de água entre os compósitos produzidos.....	53
Figura 4.5 – Desempenho de tração entre os compósitos produzidos.....	56
Figura 4.6 – Gráfico carga (N) x deslocamento (mm) para os compósitos estudados.....	58
Figura 4.7 – Comparativo dos resultados obtidos de flamabilidade horizontal para os compósitos produzidos.....	60
Figura 4.8 – Comparativo dos resultados obtidos de flamabilidade horizontal com os parâmetros exigidos.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades de algumas fibras vegetais em comparação a fibra de sisal.....	31
Tabela 3.1 – Quantidades estabelecidas para a confecção dos compósitos.....	41
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios físicos para os compósitos.....	52
Tabela 4.2 – Resultados do teste Tukey para a propriedade AA e MEA dos compósitos produzidos.....	54
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de tração para os compósitos.....	55
Tabela 4.4 – Resultado do teste Tukey para a resistência à tração e módulo elásticos dos compósitos produzidos.....	57
Tabela 4.5 – Desempenho dos corpos de prova quanto à flambilidade horizontal.....	59
Tabela 4.6 – Resultados do teste Tukey para o ensaio de flamabilidade dos compósitos produzidos.....	61
Tabela 4.7 – Relação da amostra com a melhor taxa de queima com polímeros e outros compósitos.....	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Classificação dos materiais compósitos.....	19
Quadro 2.2 – Classificação dos resíduos sólidos.....	26

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área útil da seção transversal
AA	Absorção de água
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ANOVA	Análise de Variância
C	Coefficiente de dilatação térmica
CAMPANANIN	Campus Ananindeua
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP's	Corpos de Prova
DRX	Difração de Raios X
E	Módulo de Elasticidade
F	Carga instantânea
FS	Fibra de Sisal
FEMat	Faculdade de Engenharia de Materiais
HB	<i>Horizontal Burning</i>
ITEC	Instituto de Tecnologia
L	Comprimento útil
LAMPS	Laboratório de Materiais Porosos Sintetizados
LCE	Laboratório de Caracterização Estrutural
LEQ	Laboratório de Engenharia Química
kN	Kilo Newton
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MEA	Massa Específica Aparente
MEK	Metil Etil Cetona
MPa	Mega Pascal
M_i	Massa imersa
M_u	Massa úmida
M_s	Massa seca
MP	Matriz Plena
mm	Milímetro
PA	Porosidade Aparente

P.I	Poliéster Isoftálica
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
TRT	Tensão de Resistência à Tração
TSD	Teste de Tuckey
UFPA	Universidade Federal do Pará
USIMAT	Usina de Materiais
UNIFESSPA	Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
V _c	Volume do picnômetro corrigido
V	Volume do picnômetro
ΔT	Variação da temperatura
ρ	Densidade
ε	Deformação de engenharia
E	Módulo de elasticidade
%-RCD/%-FS	% Proporção de Resíduo de Construção e Demolição e % de Fibra de Sisal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativa e motivação	16
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
1.3 Composição do trabalho	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Compósitos	18
2.1.1 Classificação de materiais compósitos	19
2.1.2 Compósitos híbridos	20
2.1.3 Método de fabricação manual (<i>Hand lay-up</i>).....	21
2.2 Matrizes	22
2.2.1 Resina poliéster	22
2.2.2 Compósitos com matriz polimérica.....	25
2.3 Carga de enchimento/carga de reforço.....	26
2.3.1 Resíduo de Construção e Demolição (RCD).....	26
2.3.2 Compósitos reforçados com partículas.....	28
2.4 Fibras	29
2.4.1 Fibras de sisal (<i>Agave sisalana</i>)	30
2.4.2 Compósitos poliméricos reforçados com fibras	31
3 MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL	34
3.1 Materiais.....	35
3.1.1 Materiais sintéticos	35
3.1.2 Resíduo de Construção e Demolição (RCD).....	36
3.1.3 Fibras de sisal	36
3.2 Metodologia experimental	37

3.2.1 Caracterização das matérias-primas	39
3.2.1.1 Massa específica	39
3.2.1.2 Análise mineralógica	40
3.2.1.3 Análise morfológica	40
3.2.2 Fabricação dos compósitos	41
3.2.3 Caracterização dos compósitos	42
3.2.3.1 Ensaio físicos	42
3.2.3.2 Ensaio de resistência à tração	44
3.2.3.3 Ensaio de flamabilidade horizontal	46
3.3 Análise estatística.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1 Caracterização das matérias-primas	48
4.1.1 Massa específica	48
4.1.2 Análise mineralógica	48
4.1.3 Análise morfológica	49
4.2 Caracterização dos compósitos.....	52
4.2.1 Ensaio físicos	52
4.2.2 Ensaio de resistência à tração	55
4.2.3 Ensaio de flamabilidade horizontal	59
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	64
5.1 Conclusões	64
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	65
REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais o consumo exagerado dos recursos naturais tem sido um grave problema para o meio ambiente, pois ocasiona impactos irreversíveis. Por isso, pesquisas têm sido realizadas para o reaproveitamento dos resíduos descartados na natureza que, na sua maioria, apresentam um grande potencial de reutilização. A inserção desses resíduos como reforços em materiais compósitos é uma alternativa viável, pois são sustentáveis e garantem boas propriedades mecânicas, físicas e térmicas (BARBOSA *et al.*, 2020; COSTA, 2016).

A construção civil é o setor que mais cresce no país, entretanto é um dos maiores causadores de problemas ambientais devido a geração e a destinação final incorreta dos resíduos, como o Resíduo da Construção e Demolição (RCD). Segundo Nagalli (2014), 50 a 70 % dos resíduos industriais gerados são oriundos do RCD. Por outro lado, o RCD apresenta-se como um material com grande potencial de aplicabilidade, tornando a reciclagem deste resíduo uma solução para este entrave ambiental (MORAND, 2016).

A utilização de fibras naturais como reforço em materiais compósitos é interessante pela variedade de tipos de fibras encontradas no Brasil. As fibras vegetais possuem baixa densidade, proporcionando melhorias nas propriedades do compósito, não são abrasivas, são biodegradáveis, além de serem obtidas de fontes renováveis. A aplicação das fibras naturais em compósitos poliméricos tem o objetivo de substituir os materiais à base de fibra sintética, além do seu processo de fabricação ser mais econômico (PEREIRA *et al.*, 2021).

A fibra de vidro é a que mais vem sendo substituída, por ser de uma utilização mais ampla e de custo relativamente baixo, porém de alta agressividade ao meio ambiente e ao homem (MARTINS, 2016). Sendo assim, as fibras de sisal estão sendo utilizadas para a substituição das fibras de vidro.

As fibras de sisal são obtidas das folhas da planta *Agave sisalana*, encontradas com abundância na região Nordeste do Brasil. Essas fibras têm um alto teor de celulose e um elevado grau de polimerização, o que confere boas propriedades a elas, como elevada resistência ao impacto, além de melhorar a resistência mecânica à tração que é, geralmente, superior a outras fibras lignocelulósicas (DARROS, 2013). Essas características tornam as fibras de sisal interessantes para a utilização como reforço em compósitos poliméricos.

Com isso, há a necessidade de pesquisas por novos materiais considerando os aspectos econômicos, sociais e ambientais. Portanto, foi realizada a confecção e caracterização (física, mecânica e de inflamabilidade) de compósitos de matriz polimérica com Resíduo da Construção e Demolição (RCD) com adição de fibras de sisal

1.1 Justificativa e motivação

Com o desenvolvimento da sociedade, aumenta-se cada vez mais o consumo de materiais e, conseqüentemente, aumenta o descarte de resíduos no meio ambiente. Esta pesquisa justifica-se pela busca de reduzir a quantidade desses rejeitos na natureza, sendo assim, tem-se pesquisado novos materiais a partir desses resíduos minerais, como os materiais compósitos.

Soma-se a este fator a necessidade por fontes renováveis e sustentáveis, por isso a motivação para este estudo é a utilização das fibras naturais em materiais compósitos, pois são renováveis, biodegradáveis e melhoram a qualidade das propriedades físico-mecânicas dos compósitos, além de serem matérias-primas abundantes no Brasil.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar as propriedades dos compósitos híbridos de matriz polimérica com resíduo da construção e demolição com adição de fibras de sisal.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar as propriedades mineralógicas (DRX) do resíduo e as morfológicas (MEV) do resíduo e da fibra utilizados, com o objetivo de analisar a influência da composição mineralógica do resíduo e morfológica da fibra e resíduo nos compósitos híbridos.
- Confeccionar compósitos poliméricos com proporções de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % e 25 % de Resíduo de Construção e Demolição (RCD) e 3 % de fibras de sisal, analisando o limite de viabilidade de confecção das placas compósitas.
- Analisar as características físicas dos compósitos produzidos, visando identificar a influência do RCD e da fibra de sisal nas propriedades dos compósitos.
- Estudar o comportamento mecânico em tração dos compósitos produzidos, a fim de compreender a influência das diferentes proporções utilizadas do resíduo e da fibra.
- Avaliar a flamabilidade dos compósitos híbridos com diferentes proporções de resíduo com adição de fibra de sisal em relação a matriz plena.

1.3 Composição do Trabalho

A seção 1 apresenta a introdução e os objetivos do trabalho, visando expor sobre o que se trata a pesquisa, assim como a importância e o potencial de aplicabilidade do resíduo e da fibra utilizados nos compósitos produzidos.

A seção 2 fornece uma revisão bibliográfica sobre os materiais compósitos, além de retratar sobre a matriz polimérica, o resíduo industrial utilizada e as fibras.

A seção 3 aborda a metodologia utilizada, descrevendo os materiais e processos experimentais, desde a fabricação dos compósitos até a caracterização (física, mecânica e inflamabilidade) dos corpos de prova.

A seção 4 apresenta os resultados obtidos a partir das análises realizadas nos compósitos produzidos, onde são feitas as discussões com o auxílio de gráficos e tabelas.

A seção 5 expõe as conclusões obtidas nos resultados da pesquisa, apresentando os objetivos alcançados e as sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compósitos

Os materiais compósitos são definidos, por Hull (2019) e também por Van Vlack (1988), como sendo uma combinação de dois ou mais materiais macro e microscopicamente diferentes, que juntos visam a obtenção de melhores propriedades e características.

Callister (2016) define compósito como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa de ambas as fases constituintes, de modo que melhores combinações de propriedades são obtidas.

Ainda segundo a norma ASTM D3878 (2022), os materiais compósitos são a combinação de dois ou mais materiais, onde essa junção promove propriedades que não podem ser encontradas em seus constituintes isoladamente.

Já a IUPAC (2022) define o compósito um material multicomponente compreendendo múltiplas fases (não gasosas), onde pelo menos uma delas é contínua.

Sendo assim, há várias definições de materiais compósitos encontradas na literatura, onde todas apresentam alguma concordância ao relacionar as fases constituintes e as propriedades obtidas. Segundo Callister (2016), essas fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e estar separadas por uma interface distinta, sendo assim, tem-se a fase contínua, denominada de matriz que envolve uma outra, chamada de fase dispersa.

A fase matriz pode ser de origem cerâmica, metálica ou polimérica, e o reforço pode ser fibroso, particulado ou proveniente de folhas. A adesão entre as fases é fundamental para o desempenho do material, uma vez que a matriz é responsável pela absorção das deformações causadas e confere resistência quando submetida à compressão, já o reforço tem a finalidade de aumentar a tenacidade do material a ser produzido (ASKELAND, 2014).

Além disso, as propriedades obtidas para os compósitos a serem confeccionados dependerão das propriedades das fases constituintes, assim como à interação entre a matriz e a partícula, pois é nessa região de interface que ocorre a transferência de propriedades (VIEIRA, 2021).

2.1.1 Classificação de materiais compósitos

Para Hull (2019), os materiais compósitos são classificados quanto à natureza dos materiais que são compostos. Os materiais estão divididos em materiais compósitos naturais e materiais compósitos sintéticos, sendo os sintéticos subdivididos em: Microcompósitos e Macrocompósitos. O Quadro 2.1 mostra essa classificação.

Quadro 2.1 – Classificação dos materiais compósitos.

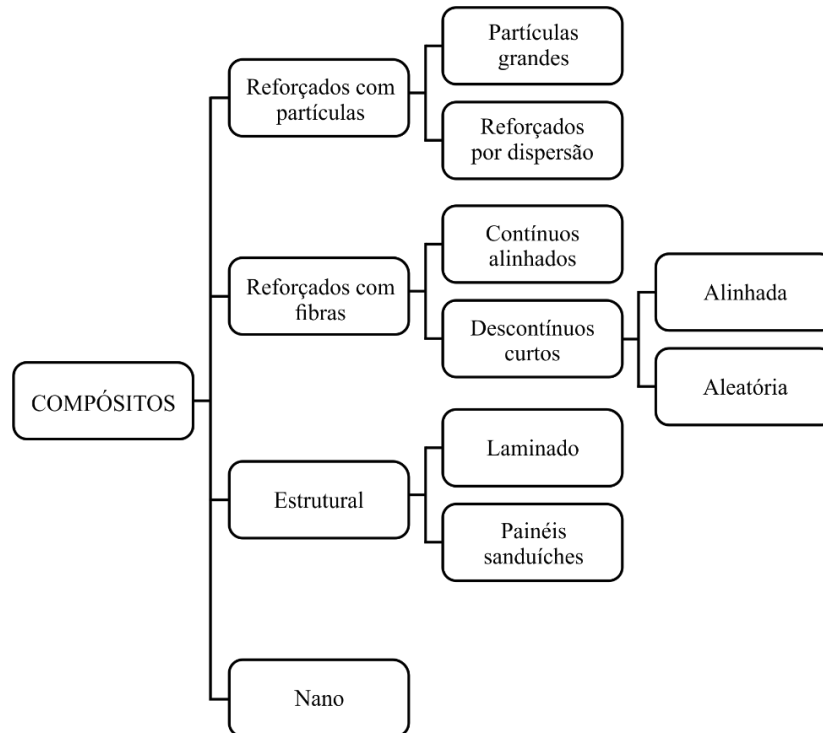
Natureza do Material	Exemplos
Natural	Músculos, Madeira, Sisal, etc.
Microcompósito Sintético	Plásticos reforçados
Macrocompósito Sintético	Vigas de concreto armado e Aço galvanizado

Fonte: Adaptado de Hull (2019).

Conforme Callister (2016), os compósitos podem ser classificados em quatro divisões principais: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibra, compósitos estruturais e nanocompósitos. A principal diferença entre eles é a fase dispersa, para o reforçado com partículas, a sua fase é equiaxial; nos compósitos reforçados com fibras, a fase tem geometria de uma fibra; nos compósitos estruturais têm-se camadas múltiplas; já nos nanocompósitos a fase dispersa tem dimensões na ordem de nanômetros.

A Figura 2.1 ilustra a classificação dos materiais compósitos.

Figura 2.1 – Classificação dos compósitos com base na fase dispersa.



Fonte: Adaptado de Callister, 2016.

2.1.2 Compósitos híbridos

Os compósitos híbridos são obtidos a partir de diferentes tipos de reforços imersos em uma única matriz. Cada reforço pode ser diferente por causa das propriedades físico-mecânicas, da forma do material ou pela composição química, o que garante uma combinação de propriedades ao novo material (ASTM D 3878, 2022).

Sendo assim, os pesquisadores estão estudando os materiais compósitos reforçados com combinação de partículas e fibras, pois conforme Costa (2016), é vantajoso em diversos aspectos, já que minimiza a utilização de fibras sintéticas, reduz os custos de produção, além de que essa junção promove melhores propriedades físico-mecânicas. Segundo Kickelbick (2007), os melhores resultados de hibridização são obtidos quando os materiais selecionados como reforço são compatíveis entre si e com o tipo de matriz utilizada.

As principais aplicações desses materiais compósitos híbridos encontram-se na fabricação de componentes estruturais de baixo peso para transportes terrestres, aquáticos, aéreos, além de artigos esportivos e componentes ortopédicos de baixo peso (CALLISTER, 2020).

Costa (2016) analisou a influência de resíduos gerados pela indústria mineradora nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras naturais. E obteve resultados mecânicos (tração, flexão e impacto) com aumento de 15 % e 95 % para compósitos com fibras em comparação a matriz plena, e 10 % para os compósitos com resíduos industriais e fibras.

Barbosa *et al.* (2020) estudaram a incorporação de fibras curtas de bambu nos comprimentos de 15 e 30 mm e resíduo industrial de caulim flint nas frações mássicas de 10, 20 e 30 % em compósitos de matriz polimérica. E observaram que os compósitos fabricados apresentaram resultados de resistência mecânica à tração semelhantes ao da matriz plena, destacando-se os compósitos nas proporções de 20 % de resíduo de caulim e 3 % de fibras de bambu para ambos os comprimentos.

Santos (2020) realizou a caracterização de material compósito incorporado com fibras de bambu e resíduos sólidos industriais para utilização como componente estrutural para a construção civil, com frações mássicas dos resíduos em 10, 20, 30 e 40 % e 1, 2 e 3 % de fibras. Os melhores resultados de resistência mecânica foram para os compósitos híbridos com adição de 20 % de resíduo de caulim/3% de fibras de bambu nos comprimentos de 15 mm com tratamento.

2.1.3 Método de fabricação manual (*Hand lay-up*)

A fabricação manual ou Hand lay-up é um dos processos mais simples e antigos para a confecção de materiais compósitos. Inicialmente é necessário aplicar um desmoldante sobre o molde para facilitar a retirada da peça na etapa de desmoldagem, além de evitar a aderência da peça no molde, a fim de obter um melhor acabamento final da placa compósita (ABMACO, 2009; SERCEL, 2022).

As vantagens deste método são o baixo custo, pois necessita pouco investimento em ferramentas, a simplicidade do processo e vasto tipos de formas de moldes, além de não limitação dimensional. Já as desvantagens são o tempo de fabricação, sendo um processo pouco reprodutível, além de que qualidade do compósito depende da habilidade do laminador (ABMACO, 2009).

Associado ao método de fabricação manual, utiliza-se a moldagem por compressão. Esse tipo de moldagem possibilita a produção de peças mais complexas, além de dispensar a necessidade de operações posteriores, como soldagem ou usinagem (CUNHA, 2015).

A moldagem por compressão inicia-se com a carga inserida no interior do molde, que é fechada rapidamente e comprimida a uma taxa constante de pressão. A compressão ocasiona o fluxo do material no interior do molde até que preencha as cavidades, expulsando o ar retido no molde, evitando bolhas, trincas e vazios (MALLICK, 2007; MENDES, 2019). O método manual associado à compressão foi utilizado nos trabalhos de Deus *et al.* (2019), de Moraes *et al.* (2019) e Queiroz *et al.* (2019).

2.2 Matrizes

A matriz é a fase contínua do compósito e pode ser classificada em: polimérica, metálica e cerâmica. Nos compósitos reforçados com fibras, a matriz tem duas funções principais. Em primeiro lugar, ela une as fibras e atua como meio de transmissão e distribuição da tensão aplicada externamente às fibras. A segunda função da matriz é a proteção das fibras individuais contra danos superficiais, como trincas (CALLISTER, 2020).

A escolha do tipo de matriz a ser utilizada para um tipo de reforço é fundamental para o desempenho do compósito, pois a interação forte entre a matriz e o reforço garante uma melhor transferência de cargas. Quanto maior for essa região de contato, maior a possibilidade de ocorrer uma interação de natureza física, química ou físico-química (FERREIRA, 2017). Além disso, a escolha da matriz depende da aplicabilidade do compósito e das propriedades esperadas.

2.2.1 Resina poliéster

Poliéster é o nome dado a uma categoria de materiais obtidos através de uma reação de condensação entre um poliálcool e um ácido policarboxílico. Os polímeros poliésteres são sintéticos e versáteis, podendo ser encontrados como fibras, plásticos, filmes e resinas (MARTINS, 2016).

A resina poliéster pode ser classificada em saturada ou insaturada, isso vai depender da formulação, ausência ou presença de ligações duplas entre os átomos de carbono que formam a cadeia molecular (MARTINS, 2016).

A resina poliéster insaturada é a mais empregada para a fabricação de compósitos poliméricos reforçados com partícula e/ou fibras, uma vez que esta resina apresenta boas propriedades mecânicas, químicas e elétricas, boa estabilidade dimensional, são facilmente

processadas e têm baixo custo quando são comparadas com outras resinas termorrígidas (EL BANNA, 2017).

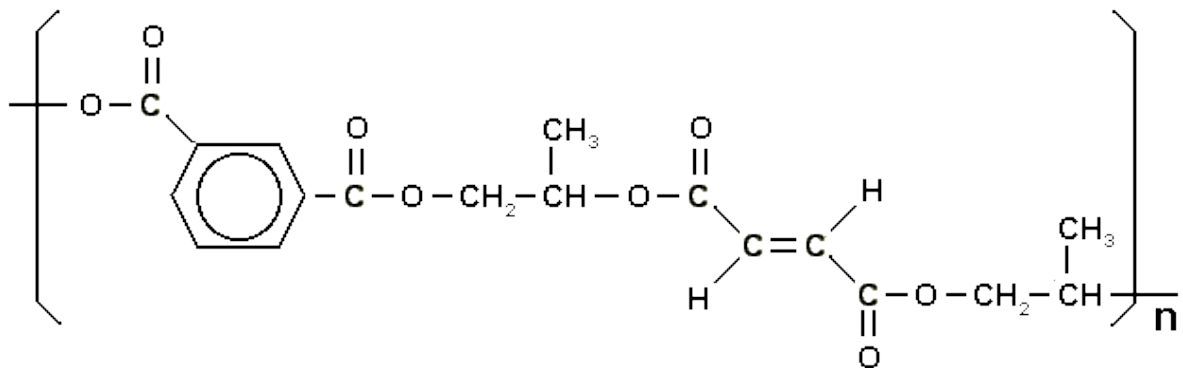
A resina poliéster insaturada pode ser classificada quanto a sua estrutura, sendo essas: isoftálica, tereftálica e ortoftálica (SILAEX, 2022). A resina poliéster insaturada isoftálica é uma das mais utilizadas, conforme Moreira (2009).

As resinas isoftálicas são obtidas por poliésteres de alta massa molar, como o ácido isoftálico. A diferença entre esta resina e a ortoftálica é que a isoftálica não forma anidrido cíclico e nem sofre regeneração, dessa forma o poliéster isoftálico apresenta uma estrutura com maior resistência química e mecânica, absorvendo melhor os impactos (SILAEX, 2022).

Na estrutura, as moléculas da resina poliéster isoftálica são ligadas às moléculas de estireno aos pontos reativos das insaturações, com ligações cruzadas para a copolimerização poliéster estireno, como mostra a Figura 2.2 (CUNHA, 2015).

A resina poliéster insaturada é sólida à temperatura ambiente, então normalmente são utilizados monômeros apropriados, como o estireno, que é usado para diminuir a viscosidade e facilitar a processabilidade da resina, além de participar do seu processo de polimerização (TARGA *et al.*, 2009).

Figura 2.2 – Resina poliéster isoftálica.



Fonte: Adaptado de Silaex, 2022.

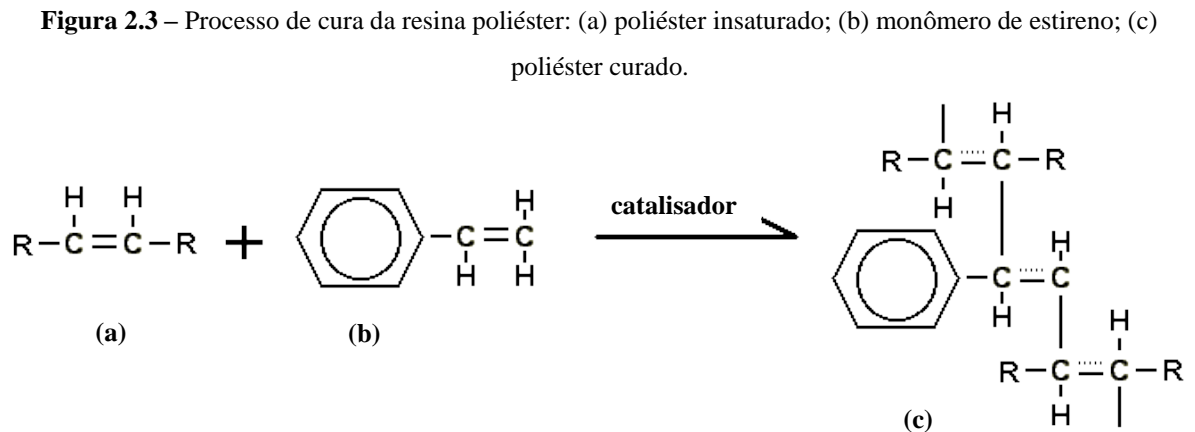
O processo de polimerização influencia diretamente nas propriedades finais e qualidade do polímero a ser produzido. A polimerização é uma reação onde as moléculas simples reagem entre si formando uma macromolécula de alta massa molar, ou seja, é o processo de transformação de líquido para sólido (CANEVAROLO, 2010). A cura, como é chamado esse processo de polimerização dos materiais compósitos, está associada com o aumento da viscosidade do polímero e também pela geração de calor da natureza exotérmica das reações dos termorrígidos (CUNHA, 2015).

A polimerização descontrolada pode causar variação térmica inapropriada, promovendo defeitos microscópicos na estrutura da rede na fase matriz e defeitos macroscópicos, como vazios, bolhas e fibras descoladas e quebradas (KENNY *et al.*, 1990).

Sendo assim, o processamento de cura ocorre, geralmente, em temperatura ambiente, através de reações químicas com agentes de cura, como catalisadores ou agentes do ar. O tempo de cura também é fundamental para a qualidade do compósito, para processos de moldagem por pressão, muito utilizado em termorrígidos, é normalmente menor que cinco minutos, porém depende da quantidade de catalisador e acelerador utilizado no processo (MENDES, 2019).

Neste processo, utiliza-se o catalisador, também chamado de iniciador, peróxido de metil etil cetona (MEK-P) e o acelerador, octato de cobalto. Na cura da placa compósita à temperatura ambiente, o acelerador irá fornecer calor para que ocorra a decomposição do iniciador. A quantidade de catalisador e acelerador controla a velocidade da reação (COSTA, 2012).

No entanto, é necessário calcular a dosagem de acelerador de cobalto e deve adicioná-lo na resina, pois ao misturar o acelerador com o iniciador podem ocorrer reações violentas e provocar explosões (OLIVEIRA, 2013). A Figura 2.3 apresenta a estrutura básica do processo de cura da resina poliéster.



Fonte: Adaptado de Silaex, 2022.

2.2.2 Compósitos com matriz polimérica

Os compósitos com matriz polimérica são formados por uma resina polimérica como matriz e com fibra e/ou partículas como reforço, são os materiais encontrados com maior diversidade e quantidade, devido às suas propriedades em temperatura ambiente aliado a facilidade de fabricação e do seu baixo custo (CALLISTER, 2020).

Além disso, as características peculiares dos compósitos poliméricos os tornam materiais muito utilizados nas indústrias automobilística, naval, aeronáutica e de transformação. Eles apresentam um baixo peso específico, elevada resistência química, excelente resistência mecânica e a intempéries, além da facilidade de manutenção e alta durabilidade (MARTINS, 2016).

As matrizes poliméricas podem ser termoplásticas ou termorrígidas. As termoplásticas são formadas por macromoléculas individuais lineares sem reticulação, enquanto que as termorrígidas são constituídas por polímeros em que as moléculas formam estrutura tridimensionais bastante rígidas (SILVA, 2014).

As matrizes poliméricas mais utilizadas são as termorrígidas, as quais são formadas por ligações cruzadas, são insolúveis, infusíveis e não-recicláveis (CANEVAROLO, 2010). Elas são as mais utilizadas na confecção de materiais compósitos, devido a facilidade de impregnação do reforço, visto que estas matrizes apresentam uma baixa viscosidade antes da cura (MARCELO, 2011). Sanchez *et al.* (2010) diz também que, ao utilizar a matriz termorrígida, é necessária a utilização de material para reforço em razão de sua baixa resistência à fratura.

Em relação aos compósitos reforçados com fibras, a matriz termorrígida é mais comumente empregada, devido à capacidade de polimerização à baixas temperaturas, reduzindo o risco de deterioração das fibras (SILVA, 2011).

Ainda assim, as matrizes poliméricas termoplásticas são bastante utilizadas em compósitos por conta do baixo custo associado a rapidez do processo produtivo, além de serem recicláveis, pois fundem e retornam ao seu estado anterior sem degradação do material (ALBINANTE, 2013). Segundo Silva (2011), elas também promovem maior tenacidade à fratura, maior resistência ao impacto e maior tolerância à danos em relação aos termorrígidos.

As matrizes termoplásticas ao serem submetidas a um aumento de temperatura ou pressão, amolecem e fluem, e ao se solidificar adquirem a forma do molde. Os termoplásticos, no geral, são solúveis, reversíveis e possuem cadeia linear ou ramificada (CANEVAROLO, 2010).

2.3 Carga de enchimento/carga de reforço

A carga de enchimento ou carga de reforço é adicionada ao material polimérico com a finalidade de modificar uma ou mais propriedades do polímero puro. Sendo assim, as propriedades do compósito dependem tanto do reforço utilizada como da concentração, tamanho, forma, distribuição e orientação da mesma (LOURENÇO, 2017).

O interesse na utilização de cargas de enchimento/reforço inertes na matriz polimérica se dá, principalmente, pela redução dos custos com a produção dos materiais compósitos. Além disso, reduz a exotermia na cura da resina poliéster, diminui a retração do material, aumenta o módulo de flexão e a resistência ao desgaste por abrasão, e também promove retardamento de chama e isolamento térmico (COSTA, 2016).

2.3.1 Resíduo de Construção e Demolição (RCD)

O Resíduo de Construção e Demolição (RCD), de acordo com a Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, é:

“Proveniente de construções, reformas e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto, rochas, metais, resinas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, asfalto, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliças ou metralha”.

Os RCD são divididos em quatro classes, conforme a Resolução nº 307/02 do CONAMA, essa classificação estabelece uma destinação final adequada para os resíduos, conforme mostra o Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Classificação dos resíduos sólidos.

Classes	Descrição dos Produtos
A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: de construção, demolição, reformas de pavimentação, componentes cerâmicos, argamassa, concreto.
B	Resíduos recicláveis para outras destinações, como: plásticos, papel, metais, vidros, madeiras, etc.
C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitem a sua reciclagem/recuperação, como o gesso.
D	Resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados vindo de demolições, reformas e reparos, entre outros.

Fonte: Adaptado de CONAMA nº 307, 2002.

A construção civil é uma das atividades mais importantes para o desenvolvimento econômico e social, no entanto é a maior geradora de impactos ambientais, tanto pelo consumo de recursos naturais não renováveis quanto pela excessiva geração de resíduos. Entre os resíduos sólidos industriais que são gerados, 50 a 70 % são oriundos do resíduo de construção e demolição (NAGALLI, 2014). De acordo com Pinto (2005), os principais impactos sanitários e ambientais que envolvem o resíduo da construção e demolição são aqueles associados à destinação final irregular.

Os RCD apresentam uma baixa periculosidade, o seu impacto, no entanto, é causado pelo grande volume que é gerado. O descarte inadequado pode contaminar córregos, entupir galerias e bueiros, causar o assoreamento de córregos e rios, contribuir para a proliferação de doenças, gerar poluição visual, sendo assim, afeta a vida humana e o meio ambiente (NAGALLI, 2014).

Portanto, a reutilização desses resíduos é fundamental tendo em vista a escassez de matéria-prima cada vez maior no planeta. Além disso, segundo Leite (2014), a reciclagem é uma alternativa de controle e minimização dos problemas sociais e ambientais causados pela geração desses resíduos.

Os resíduos de construção e demolição apresentam-se com um elevado potencial de aplicabilidade. Atualmente, muitas universidades têm feito estudos em busca de reutilizar os resíduos da construção e demolição, desde a reutilização desses resíduos na construção civil até a fabricação de novos materiais.

Araújo (2017) analisou o uso de resíduo de construção e demolição em argamassas geopoliméricas, através de ensaios físicos, de resistência mecânica a flexão e compressão. Os resultados demonstraram que a resistência à compressão com 0 % e 100 % de RCD alcançaram 22,79 e 11,55 MPa respectivamente, para os ensaios físicos, os resultados foram satisfatórios em relação a matriz plena. As formulações estudadas mostraram-se viáveis para aplicação em argamassas geopoliméricas.

Carvalho (2019) fez uma avaliação mecânica (tração) e flamabilidade de compósitos poliméricos com resíduos de construção e demolição, nas proporções de 0, 5, 10, 15, 20 e 25 % na granulometria de 100 mesh. E verificou que os compósitos atuaram como carga de reforço, sendo os compósitos com 5 % de RCD os mais resistentes à tração, e nos ensaios de flamabilidade houve uma redução de aproximadamente 53 % na propagação de chamas na proporção de 25 % de RCD em comparação à matriz plena.

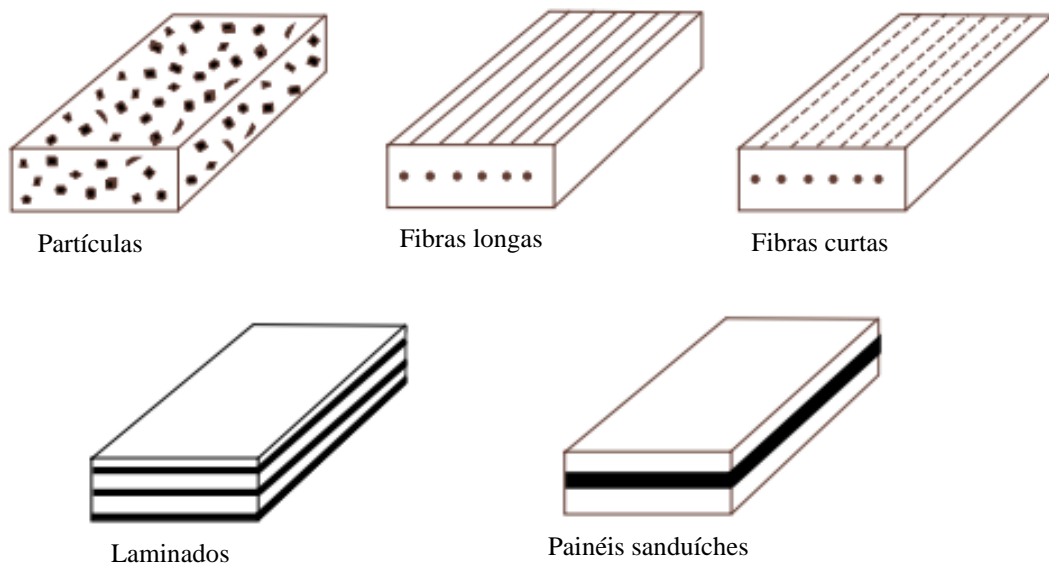
Alencar *et al.* (2020) verificaram o potencial de aplicabilidade de compósitos poliméricos com resíduos minerais e da construção civil, nas proporções de 10 e 20 % com

granulometria de 100 mesh, em revestimentos internos, onde concluíram que todas as proporções estudadas nos compósitos apresentaram redução da propagação de chama em relação a matriz plena, estando todos dentro das normas estabelecidas para revestimentos internos.

2.3.2 Compósitos reforçados com partículas

Os reforços nos compósitos são constituídos por três divisões principais: os compósitos reforçados com partículas, os compósitos reforçados com fibras (longas ou curtas) e os compósitos estruturais (laminados e painéis sanduíches) (CALLISTER, 2016). A Figura 2.4 mostra os tipos de reforços em uma matriz polimérica.

Figura 2.4 – Tipos de reforços utilizados em uma matriz polimérica.



Fonte: Adaptado de Lourenço, 2017.

Entre as diversas partículas utilizadas em matrizes poliméricas, tem-se o resíduo sólido industrial. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), os resíduos nos estados sólidos são os que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Esses resíduos, conforme Ferreira (2020), são uma ameaça para a natureza se não forem despejados corretamente, pois contém produtos químicos, metais, solventes, que são prejudiciais ao meio ambiente. Para isso, a reciclagem desses materiais vem sendo adotada para preservar o meio ambiente, proteger a saúde pública, além de reduzir o consumo de recursos naturais causados pelas indústrias.

Carvalho *et al.* (2019) fizeram uma avaliação mecânica de tração e flamabilidade a partir da reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição (RCD), nas proporções de 10 e 20 % em compósitos poliméricos. Concluiu-se que os compósitos produzidos atuaram como carga de enchimento, apresentando valores de resistência à tração próximos ao da matriz plena (35,78 MPa), sendo 31,12 MPa (10 %) e 22,98 MPa (20%). Os resultados de flamabilidade mostraram uma redução de aproximadamente 47 % na propagação de chama na proporção de 20 % de RCD.

Ferreira *et al.* (2019) analisaram compósitos reforçados com partículas de cinzas volantes, nas proporções de 0 %, 10 % e 20 % com granulometria de 100 e 200 mesh, e através dos ensaios mecânicos, notaram um aumento da resistência à tração em comparação a matriz plena, configurando o resíduo industrial como carga de reforço. Nas análises de flamabilidade, todas as proporções apresentaram considerável retardo de chama no material, com ênfase para a proporção de 20 % na granulometria de 200 mesh.

Oliveira *et al.* (2020) estudaram o reaproveitamento de resíduo industriais de mármore e granito, nas proporções de 10 e 20 % em massa com granulometria de 100 mesh, como cargas de reforço em compósitos. Ao avaliar a resistência mecânica, concluíram que os compósitos com resíduo de mármore e granito apresentaram valores de resistência à tração próximos ao da matriz plena, já para o ensaio de flamabilidade, todos os compósitos apresentaram bons resultados, de acordo com as normas estudadas, indicando que são bons retardantes de propagação de chamas.

2.4 Fibras

As fibras são utilizadas como reforço nos compósitos, caracterizadas por serem finas, flexíveis e por apresentarem um comprimento maior que a dimensão da sua seção transversal. As fibras são, normalmente, constituídas por macromoléculas ou polímeros, podendo ser de origem orgânica ou inorgânica (OLIVEIRA, 2013).

As fibras são classificadas em naturais ou sintéticas. As fibras sintéticas não são encontradas na natureza na forma de fibras, mas são sintetizadas pelo homem a partir de polímeros sintéticos. Sendo que, as fibras sintéticas apresentam um elevado desempenho em relação à resistência química, térmica e à rigidez, podendo ser aplicadas em diversas áreas, porém não são renováveis e são prejudiciais ao meio ambiente, além do elevado custo (OLIVEIRA, 2013; SANTOS, 2017).

Dessa forma, as fibras naturais são bastante utilizadas para a substituição das fibras sintéticas, como a fibra de vidro. As fibras naturais são extraídas de fontes renováveis, são encontradas com abundância, são biodegradáveis, apresentam um baixo custo, possuem baixa densidade e alta deformabilidade, além de serem menos abrasivas que as sintéticas, gerando menores desgastes nos equipamentos envolvidos nos processamentos (PEREIRA *et al.*, 2021).

As fibras naturais podem ser de origem animal, vegetal ou mineral. As fibras de origem vegetal podem ser encontradas em frutos e sementes (algodão), no caule (juta) e em folhas (sisal), sendo estas as fibras mais utilizadas como reforço em compósitos poliméricos. São constituídas, principalmente, por celulose, hemicelulose e lignina (COSTA, 2012).

2.4.1 Fibras de sisal (*Agave sisalana*)

As fibras de sisal são obtidas das folhas da planta *Agave sisalana*. O Brasil é o maior produtor mundial de sisal, sendo o Rio Grande do Norte, a Paraíba e a Bahia os principais Estados produtores. O sisal, além de ser uma fonte de renda e emprego, é um importante agente de fixação do homem na região semi-árida nordestina, sendo, muitas vezes, a única alternativa de cultivo (MARTIN *et al.*, 2009).

O sisal pode produzir entre 200 e 250 folhas, cada folha mede de 6 a 10 cm de largura e 150 a 200 cm de comprimento. Contém aproximadamente 700 a 1400 feixes de fibras com comprimento variando de 0,5 a 1,0 m (MARTIN *et al.*, 2009). As fibras são extraídas das folhas do sisal, envolvendo etapas de corte, descorticação, lavagem, secagem e limpeza das fibras (LEVY NETO e PARDINI, 2016). A Figura 2.5 mostra a planta de sisal (*Agave sisalana*).

Figura 2.5 – Planta de sisal (*Agave sisalana*).



Fonte: Ageitec, 2021.

O sisal se destaca como uma alternativa ecologicamente correta e, segundo Angrizani *et al.* (2006), ele pode ter seu valor agregado multiplicado ao ser utilizado como fibras de reforço em compósitos poliméricos. Além disso, conforme Martin *et al.* (2009), as fibras de sisal têm gerado interesse das indústrias pelo seu baixo custo, abundância, por serem ecologicamente corretas e possuírem boas propriedades mecânicas comparadas com as fibras de vidro.

O alto teor de celulose associado ao elevado grau de polimerização garantem boas propriedades às fibras de sisal, que também possuem uma elevada resistência ao impacto, além de boas propriedades de tração e flexão que são, na maioria das vezes, superiores às outras fibras lignocelulósicas (DARROS, 2013). Devido a estas características, as fibras de sisal têm sido muito utilizadas como reforço em compósitos poliméricos. A Tabela 2.1 mostra algumas propriedades da fibra de sisal em comparação com outras fibras.

Tabela 2.1 – Propriedades de algumas fibras vegetais em comparação a fibra de sisal.

Fibra	Autor	Diâmetro (μm)	M. Especifica (g/cm^3)	Tração (MPa)	Alongamento (%)
Sisal	Costa (2016)	0,25	1,42	453,60	5,5
Buriti	Pereira <i>et al.</i> (2021)	0,53	0,38	148,10	3,5
Malva	Costa (2016)	0,045	1,48	396,00	5,00
Juta	Roy <i>et al.</i> (2012)	0,062	1,22	337,00	1,5

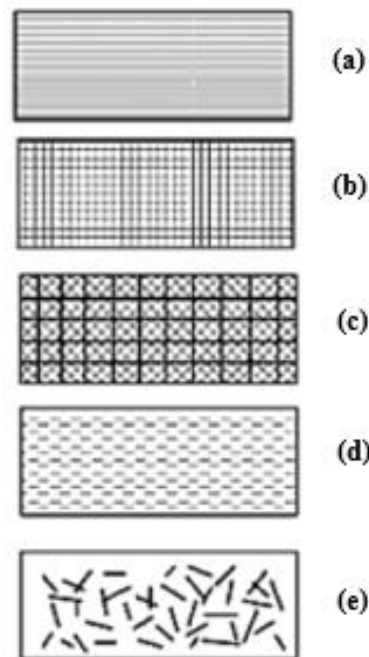
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

2.4.2 Compósitos poliméricos reforçados com fibras

As fibras de sisal estão sendo utilizadas como reforço em materiais compósitos poliméricos por conta das diversas vantagens ambientais, econômicas e mecânicas que elas fornecem ao serem inseridas em uma matriz polimérica. A espessura, o diâmetro e o comprimento das fibras são fatores que as tornam eficientes, pois estas características reduzem as falhas e melhoram a resistência mecânica do material (COSTA, 2012).

A orientação, a concentração e a distribuição das fibras apresentam uma influência significativa sobre a resistência mecânica e outras propriedades dos compósitos. As fibras utilizadas como reforços em materiais compósitos podem ser orientadas de diversas formas, como contínuas unidirecionais, bidirecionais ou multidirecionais (MALLICK, 2007). A Figura 2.6 mostra os tipos de orientações das fibras.

Figura 2.6 – Tipos de orientações das fibras utilizadas como reforço em compósitos: (a) fibras contínuas unidirecionais; (b) fibras contínuas bidirecionais; (c) fibras contínuas multidirecionais; (d) fibras descontínuas unidirecionais; e (e) fibras descontínuas aleatórias.



Fonte: Adaptado de Hull, 2019.

Normalmente, quando a orientação da fibra é aleatória, são utilizadas fibras curtas e descontínuas. O processo produtivo é mais rápido ao usar as fibras curtas, podendo conformar formas complexas que não são possíveis com o reforço com fibras contínuas. Além disso, os custos de fabricação são menores em comparação as fibras contínuas e alinhadas (CALLISTER, 2020).

A estrutura e a natureza da interface fibra-matriz são importantes para as propriedades dos compósitos, pois é através da interface que ocorre a transferência de carga da matriz para a fibra. Muitas vezes, devido à incompatibilidade entre as fibras, que são hidrofílicas, e os polímeros, que são hidrofóbicos, torna-se necessária a inserção de aditivos para aumentar a ligação química entre as fases (SILVA, 2011).

A natureza hidrofílica das fibras de sisal é uma desvantagem, pois apresentam uma alta higroscopicidade em relação às fibras sintéticas devido ao alto teor de polissacarídeos (hemicelulose e celulose). Além de que as propriedades dos compósitos reforçados com fibras de sisal são variantes, pois a resistência mecânica à tração e à rigidez não são uniformes ao longo das fibras. A fibra de sisal possui seção transversal arredondada, porém irregular e variável, decrescendo em direção às extremidades livres das folhas, dessa forma, há uma variação nas propriedades das fibras, implicando na qualidade do compósito (COSTA, 2016; LEVY NETO e PARDINI, 2016).

Na literatura, são encontradas diversas pesquisas de compósitos reforçados com fibras de sisal. Pereira *et al.* (2013) analisaram o comportamento de tração de compósitos com matriz poliéster reforçados com fibras de sisal, onde foram produzidos corpos de prova com até 30 % em volume de fibras, orientadas de forma contínua e alinhada juntamente à resina poliéster. Os resultados mostraram um aumento significativo na resistência e na rigidez dos compósitos em função da quantidade de fibras de sisal introduzidas.

Kuwahara *et al.* (2013) caracterizaram compósitos de matriz poliéster e fibra de sisal com comprimento híbrido de 5 a 15 mm, com proporções de 3,90 %, 4,87 % e 5,41 %. Os resultados de resistência à tração dos compósitos de sisal aumentaram conforme aumentou-se a proporção de fibras, sendo que os compósitos de fração mássica 5,41 % apresentaram melhor resistência mecânica variando o comprimento da fibra nas duas proporções, de 5 a 15 mm.

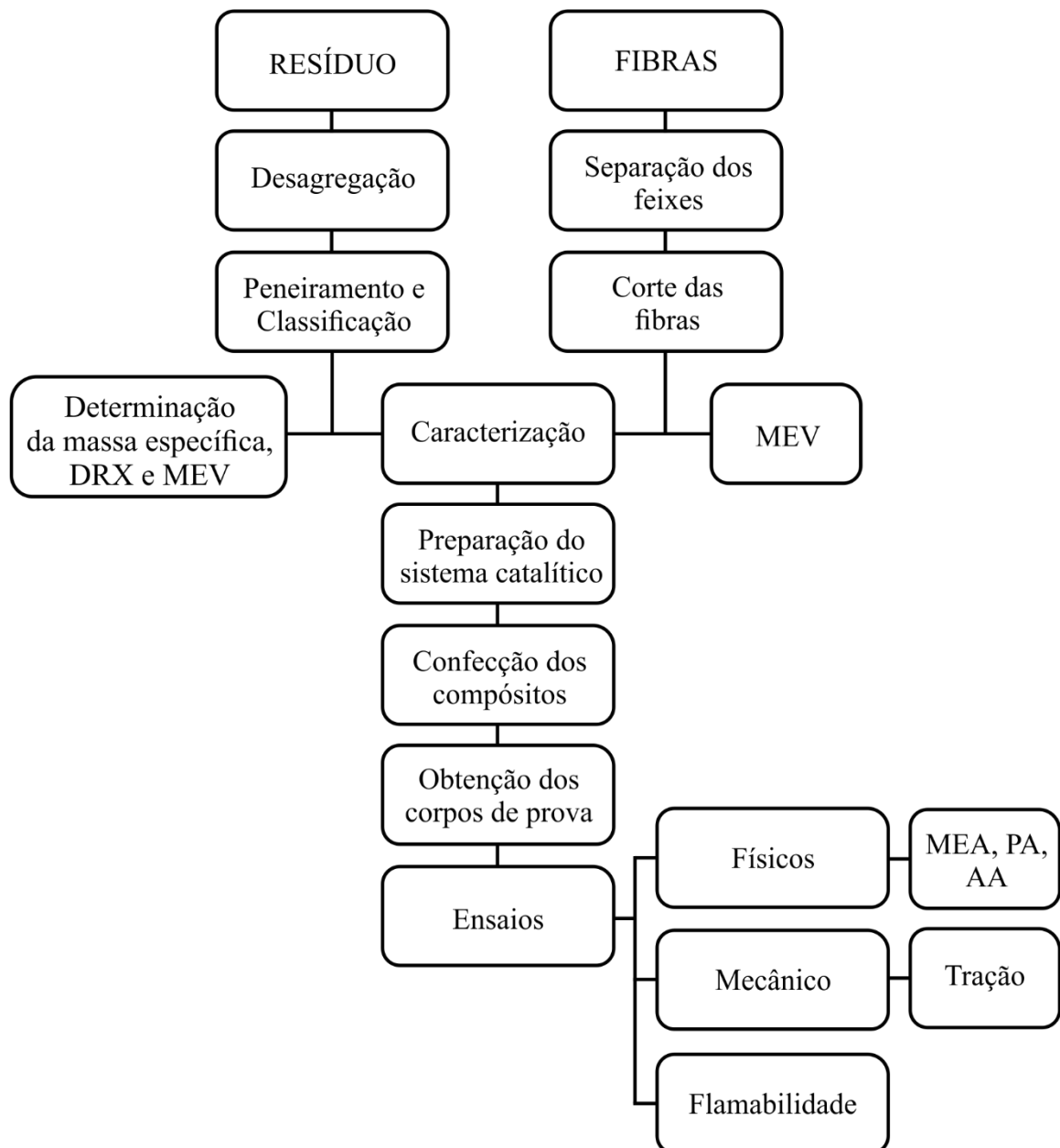
Pereira *et al.* (2017) estudaram a resistência à tração e flexão de compósitos de matriz de policarbonato reforçado com fibra natural de sisal com proporção de 20 % em volume. E concluíram que o uso da fibra de sisal no compósito não apresentou desempenho satisfatório, apresentando degradação da fibra, além de surgimento de bolhas, ocasionando fragilidade nos corpos de prova.

Oliveira Filho *et al.* (2019) fizeram uma avaliação do comportamento mecânico de compósitos poliméricos reforçados com fibras de sisal descontínuas e orientadas aleatoriamente, nos comprimentos de 5, 10, 15 mm, com e sem tratamento químico. E observaram que o compósito reforçado com sisal (in natura) no comprimento de 10 mm apresentou maior resistência à tração, com aumento de 18,71 % em comparação à matriz pura. Ainda sobre o reforço de 10 mm, o compósito com tratamento térmico apresentou aumento de 11,12 % e 19,95 % da resistência à tração em relação ao in natura e à matriz plena, respectivamente.

3 MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os compósitos foram produzidos na Usina de Materiais do Laboratório de Engenharia Química (LEQ) na Universidade Federal do Pará – UFPA. A Figura 3.1 apresenta um fluxograma com as principais etapas de produção dos compósitos, desde a obtenção das matérias-primas até as caracterizações dos corpos de prova.

Figura 3.1 – Fluxograma das principais etapas de produção dos compósitos.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.1 Materiais

3.1.1 Materiais sintéticos

A matriz utilizada para a confecção dos compósitos foi a resina poliéster isoftálica insaturada de nome comercial AM 910. A densidade da resina é de aproximadamente $1,157 \text{ g/cm}^3$, de acordo com a sua ficha técnica. Conforme as informações obtidas com o fabricante, a resina possui baixa viscosidade, boa resistência química e mecânica, média reatividade, de coloração amarelada. De acordo com o fabricante, há a necessidade de utilizar catalisadores.

O sistema catalítico utilizado, em volume, foi a solução de Octato de cobalto 1,5 %, comercialmente chamado de CAT MET UMEDECIDO e o iniciador Peróxido de Metil Etil Cetona 1 % (MEK-P), de nome comercial BUTANOX M-50. Para facilitar a retirada da placa compósita do molde metálico foi utilizado o desmoldante de nome comercial Desmojet líquido. A Figura 3.2 mostra os materiais utilizados para a fabricação dos compósitos.

Figura 3.2 – Materiais: (a) resina poliéster insaturada; (b) acelerador de cobalto; (c) iniciador MEK-P e (d) desmoldante.



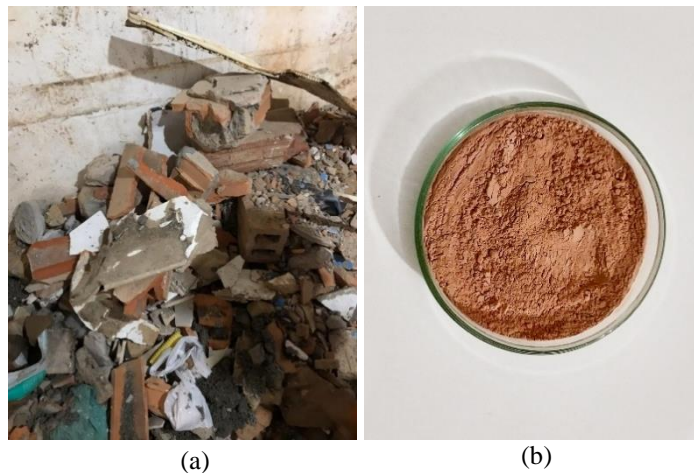
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.1.2 Resíduo da Construção e Demolição (RCD)

O resíduo industrial utilizado foi o Resíduo da Construção e Demolição (RCD), proveniente de construção predial na região metropolitana de Belém do Pará. O resíduo não passou por processo de triagem, dessa forma contém diversos fragmentos, como concreto, argamassa, restos de tijolos, entre outros materiais.

O material passou por etapas de classificação granulométrica. Inicialmente foi feita cominuição manual e depois passou pelo moinho de bolas durante 30 minutos para desagregação. Após esse processo o resíduo passou para a etapa de peneiramento manual em uma peneira de 100 *mesh* da série Tyler, para obter a granulometria adequada para a fabricação dos compósitos, conforme os trabalhos de Almeida *et al.* (2019) e Queiroz *et al.* (2019). A Figura 3.3 apresenta o resíduo antes e após a classificação granulométrica.

Figura 3.3 – Resíduo de Construção e Demolição: (a) antes do processo de beneficiamento e (b) após o processo de beneficiamento.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

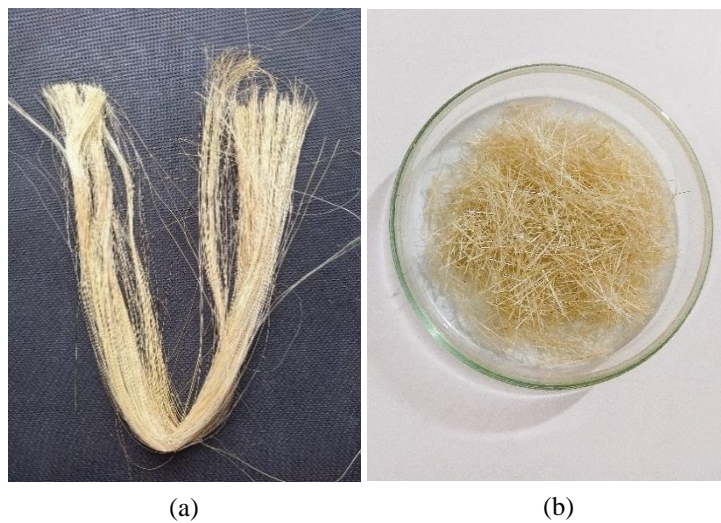
3.1.3 Fibras de sisal

Para a confecção dos compósitos foi utilizada a fibra de sisal, pois possui uma boa eficiência como reforço em matriz polimérica, tendo boa acomodação, disposição e facilidade de homogeneização com o sistema catalítico, além de apresentar melhor resistência à tração em comparação a outras fibras, como juta e piaçava (COSTA, 2016; LEVY NETO e PARDINI, 2016).

A fibra apresenta densidade de 1,42 g/cm³, conforme o trabalho de Costa (2016). As fibras já foram fornecidas por uma empresa do Estado de São Paulo, e não passaram por

nenhum tratamento químico. Sendo assim, foi feito o dimensionamento das fibras com o auxílio de uma escala milimétrica de 15 mm de comprimento, de forma que as fibras foram dispostas em feixes e cortadas no comprimento de 15 mm. Utilizou-se esse comprimento conforme a literatura pesquisada (SANTOS, 2020; BARBOSA *et al.*, 2020), onde os melhores desempenhos mecânicos em relação ao comprimento de fibras dispostas aleatoriamente dentro da matriz estão no comprimento de 15 mm. A Figura 3.4 apresenta as fibras de sisal utilizadas para a confecção dos compósitos.

Figura 3.4 – Fibras de sisal: (a) dispostas em feixe e (b) após o dimensionamento dos fios.



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.2 Metodologia experimental

A confecção dos compósitos foi realizada com os equipamentos disponíveis no Laboratório de Engenharia Química (LEQ), da Usina de Materiais (USIMAT) e do Laboratório de Materiais Porosos Sintetizados (LAMPS) da Universidade Federal do Pará, campus Belém.

Para a secagem do resíduo de construção e demolição e das fibras de sisal, utilizou-se uma estufa, da marca DE LEO – Equipamentos Laboratoriais, Temperatura de 50 °C a 250 °C. A determinação das massas dos constituintes da fase matriz e fase dispersa para a confecção dos CP's e para o ensaio físico foi feita por meio de uma balança analítica da marca BIOSCALE, modelo FA-2204.

Para a produção dos compósitos foram fabricadas placas retangulares em molde metálico inoxidável, com dimensões de 320 mm x 172,5 mm x 5 mm. A confecção dos compósitos foi feita através do método de laminação manual, chamado de *hand lay-up*, associado à prensagem, onde utilizou-se uma prensa hidráulica da marca MARCON, modelo MPH-15, que possui capacidade de 15 toneladas. Para os cortes dos corpos de prova utilizou-se a máquina de corte, da marca EINHELL, modelo BT-TC-9005. A Figura 3.5 apresenta os equipamentos mencionados.

Figura 3.5 – Equipamentos utilizados: (a) estufa; (b) balança analítica; (c) molde metálico e (d) prensa hidráulica.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.2.1 Caracterização das matérias-primas

3.2.1.1 Massa específica

Para a determinação da massa específica do resíduo foi utilizado o método do picnômetro, baseado nos estudos feitos por Silva *et al.* (2015) e Viana *et al.* (2020). Inicialmente foi pesado a massa do conjunto picnômetro vazio (m_1) e a massa do conjunto picnômetro + água (m_4), com a verificação da temperatura da água, para determinar o volume do picnômetro (Volume corrigido), como mostra a Equação (1):

$$V_c = V (1 + C * \Delta T) \quad (1)$$

Onde: V_c é o volume do picnômetro corrigido para a temperatura de trabalho; V é o volume do picnômetro à temperatura de fabricação; C é o coeficiente de dilatação térmica do vidro; e ΔT é a variação da temperatura de trabalho e a de fabricação.

Dessa forma, foi determinada a densidade aparente da água, de acordo com a Equação (2):

$$\rho_{\text{água}} = \frac{m_4 - m_1}{V_c} \quad (2)$$

Após essa etapa, toda a água do picnômetro foi removida e secou-se o recipiente. Depois adicionou-se o resíduo ao picnômetro e determinou a massa do picnômetro com o sólido (m_2). Em seguida, foi adicionada água até completar o volume do picnômetro. Mediu-se a massa do conjunto picnômetro/sólido/água destilada (m_3).

A densidade relativa do sólido (ρ_s) e a densidade aparente do sólido (ρ_{ap}) foram determinadas conforme as Equações (3) e (4):

$$\rho_s = \frac{(m_2 - m_1)}{(m_4 - m_2) - (m_1 - m_3)} \quad (3)$$

$$\rho_{ap} = \rho_s \times \rho_{\text{água}} \quad (4)$$

3.2.1.2 Análise mineralógica

A caracterização mineralógica do Resíduo de Construção e Demolição (RCD) foi feita por Difração de raios-X (DRX) com a finalidade de identificar as fases cristalinas presentes do material. Antes da análise, foi feita a redução granulométrica do resíduo com auxílio de uma peneira com granulometria de 325 mesh da série Tyler. Depois, fez-se a homogeneização do resíduo com auxílio de um pistilo e almofariz, para adequação dos tamanhos de grãos e aumento da relevância da amostra analisada.

A análise foi feita no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA/Marabá), através de um Difratorômetro de Raios-X, modelo MINIFLEX 600, da Rigaku Corporation, com Goniômetro (Theta/Theta) e com tubos de Raios-X cerâmico de ânodo de Cu ($K\alpha_1=1,54060 \text{ \AA}$). A faixa angular de varredura utilizada foi entre $5,00^\circ$ a $90,00^\circ$ (2Θ), com tamanho de passo de $0,0200^\circ$ (2Θ), e tempo/ passo de 1s, fenda divergente de 1° e máscara de 10 mm.

3.2.1.3 Análise morfológica

A caracterização morfológica do resíduo e da fibra de sisal foi realizada através de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de bancada, da marca HITACHI, modelo TM 3000, com o objetivo de avaliar a influência da morfologia do resíduo nas propriedades dos compósitos fabricados. O aumento utilizado para o RCD foi de 150 vezes e para a fibra de sisal foi de 250 vezes. As análises foram feitas no Laboratório de Microscopia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, da Universidade Federal do Pará, campus Belém. A Figura 3.6 apresenta o Microscópio Eletrônico de Varredura.

Figura 3.6 – Microscópio Eletrônico de Varredura.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.2.2 Fabricação dos compósitos

A fabricação dos compósitos híbridos ocorreu na Usina de Materiais (USIMAT) da Universidade Federal do Pará, por meio do método manual associado à compressão.

Com base na literatura, estabeleceu-se as composições do resíduo de construção e demolição variando em proporções de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % e 25 % em massa, adotando a proporção de 0 % como a composição comparativa. Moraes *et al.* (2019) e Queiroz *et al.* (2019) ao estudarem a inserção de resíduos industriais em compósitos com sucessivos aumentos de 5 %, obtiveram boa homogeneização da mistura e bom preenchimento do molde, sem que ocorresse o comprometimento da homogeneização da mistura e do resultado final da placa compósita.

Para as fibras de sisal, adotou-se a composição de 3 % em massa. A proporção utilizada também foi baseada na literatura estudada, onde os trabalhos de Reis *et al.* (2020) e Santos (2020) verificaram que os compósitos poliméricos com inserção de fibras vegetais obtiveram propriedades mecânicas superiores para a fração de 3 %.

Com base no volume da resina, foi determinada a utilização de 1,5 % de acelerador de cobalto e 1,0 % de MEK-P, para todas as composições. A Tabela 3.1 apresenta as quantidades estabelecidas para cada um dos constituintes da mistura.

Tabela 3.1 – Quantidades estabelecidas para a confecção dos compósitos.

Resíduo	Fibra	Resina	MEK-P	Octato	Resíduo	Fibra	Resina
	%		ml			g	
0	0	100	1,7664	2,6496	0	0	203,14
5	3	92	1,6251	2,4376	24,2	7,5249	186,89
10	3	87	1,5368	2,3052	48,399	7,5249	176,73
15	3	82	1,4484	2,1727	72,599	7,5249	166,57
20	3	77	1,3601	2,0402	96,799	7,5249	156,41
25	3	72	1,2718	1,9077	121	7,5249	146,26

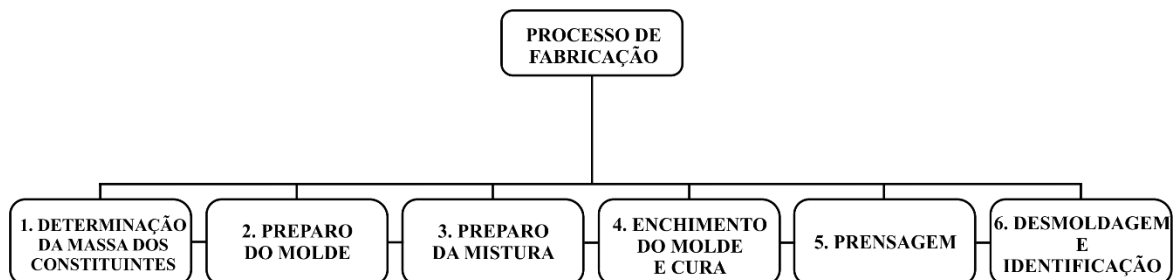
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Dado o beneficiamento das matérias-primas e estabelecidas as quantidades dos constituintes da mistura, iniciou-se o processo de fabricação dos compósitos, utilizando o método manual (*hand lay up*) associado a prensagem.

Antes do preparo da mistura, o resíduo e a fibra foram pesados e levados para estufa à 105 °C de temperatura por um período de 30 minutos, com a finalidade de retirar o excesso de umidade superficial dos materiais. Depois desse período, as fibras foram dispostas de forma aleatória dentro do molde. Sendo assim, foi feita a mistura, onde adicionou-se na resina o ativador, incorporando gradualmente o resíduo, até obter uma mistura homogênea. Por último, adicionou-se o iniciador e depois despejou-se a mistura sob as fibras dentro do molde metálico.

Após a mistura atingir o ponto de gel, que varia de 10 a 15 minutos, foi feita a prensagem em uma prensa hidráulica com uma carga de 25 kN por 20 minutos. Em seguida, o compósito foi retirado do molde metálico e disposto sob pesos por 24 horas, até polimerização completa. Ao fim dessa etapa, foram feitos os cortes das placas para o preparo dos corpos de prova para os ensaios. A Figura 3.7 apresenta o fluxograma do processo de fabricação dos compósitos.

Figura 3.7 – Fluxograma da fabricação dos compósitos.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

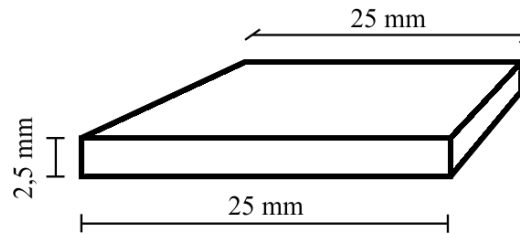
3.2.3 Caracterização dos compósitos

Após processo de fabricação e corte dos corpos de prova, realizou-se a caracterização dos compósitos. Foram realizados ensaios físicos, de resistência à tração e de flamabilidade.

3.2.3.1 Ensaios físicos

Para os ensaios físicos foram utilizados 5 corpos de prova para cada composição, com dimensões de 25 mm x 25 mm x 2,7 mm. A Figura 3.8 apresenta as dimensões dos corpos de prova.

Figura 3.8 – Dimensões dos corpos de prova para os ensaios físicos, em mm.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Os ensaios físicos realizados foram de Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA), seguindo as diretrizes estabelecidas pelas normas ASTM D 570, ASTM D 2734 e ASTM D 792, respectivamente. Para os cálculos das propriedades físicas, fez-se o uso das Equações (5), (6) e (7).

$$AA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (5)$$

$$PA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100 \quad (6)$$

$$MEA (g/cm^3) = \frac{M_s}{M_s - M_i} \times \rho_{H_2O} \quad (7)$$

Onde M_u é a massa úmida, M_s é a massa seca e M_i é a massa imersa, todos em gramas (g) e ρ é a massa específica da água em g/cm^3 .

Os corpos de prova foram levados a estufa a uma temperatura de 105 °C por 24 horas para obter a massa seca, em seguida, as amostras foram imersas em água destilada por mais 24 horas para a verificação da massa úmida e, depois, com um aparato acoplado em uma balança analítica, foi obtida a massa imersa. A Figura 3.9 mostra os corpos de prova com as proporções estudadas.

Figura 3.9 – Corpos de prova para os ensaios físicos.

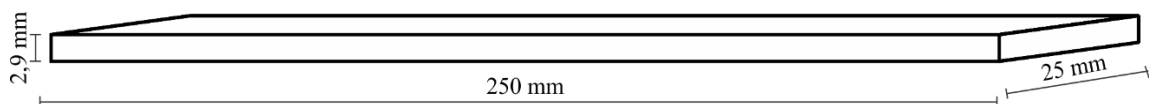


Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

3.2.3.2 Ensaio de resistência à tração

Para o ensaio de tração foram utilizados 6 corpos de prova para cada composição, com dimensões de 250 mm x 25 mm x 2,9 mm, conforme a norma ASTM D 3039. A Figura 3.10 mostra as dimensões dos corpos de prova para os ensaios de tração.

Figura 3.10 – Dimensões dos corpos de prova para os ensaios de tração, em mm.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A Tensão de Resistência à Tração (TRT), em MPa, é determinada pela relação entre a carga aplicada ao longo do corpo de prova com sua área útil, conforme a Equação 8.

$$TRT = \frac{F}{A} \quad (8)$$

Onde F é a carga aplicada, em Newtons e A é a área útil da seção transversal do corpo de prova, em milímetros quadrados.

O módulo de elasticidade (E), em MPa, pode ser calculado através da relação da tensão de resistência à tração (TRT) com a deformação do corpo de prova (ϵ). A Equação 9 mostra essa relação.

$$E = \frac{TRT}{\epsilon} \quad (9)$$

A caracterização mecânica dos compósitos foi feita através do ensaio de tração uniaxial, seguindo a norma ASTM D 3039. Foram colocados suportes nas extremidades dos CP's, chamados de *tabs*, que são usados para evitar o deslizamento dos corpos de prova quando entram em contato com a garra da máquina utilizada para o ensaio de tração. A Figura 3.11 mostra os corpos de prova com as proporções estudadas para o ensaio de tração.

Figura 3.11 – Corpos de prova para o ensaio de tração.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Para a realização do ensaio, utilizou-se uma máquina universal de modelo KE 2000 MP da marca KRATOS, com célula de carga de 5 kN, a uma velocidade de ensaio de 2 mm/min. A Figura 3.12 mostra a máquina utilizada.

Figura 3.12 – Máquina universal de ensaio.

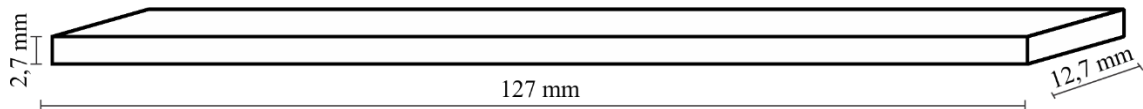


Fonte: KRATOS, 2022.

3.2.3.3 Ensaio de flamabilidade horizontal

A análise de resistência à chama dos compósitos foi feita por meio do ensaio de flamabilidade horizontal, conforme a norma ASTM D 635, que tem como objetivo medir a taxa de queima dos compósitos poliméricos, posicionados horizontalmente. Foram utilizados 10 corpos de prova para cada composição. A Figura 3.13 mostra as dimensões dos corpos de prova para os ensaios de flamabilidade.

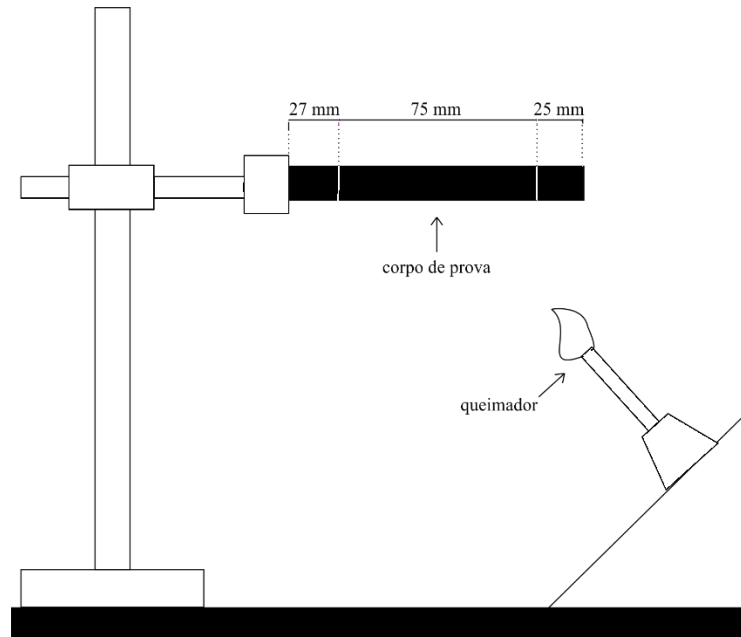
Figura 3.13 – Dimensões dos corpos de prova para os ensaios de flamabilidade horizontal, em mm.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Para o ensaio foi utilizado um aparato para acoplamento e sustento do corpo de prova, com dimensões de 127,0 mm x 12,7 mm x 2,7 mm, e um bico de Bunsen para iniciar a queima do material. A Figura 3.14 mostra o equipamento utilizado durante o ensaio.

Figura 3.14 – Equipamento utilizado para o ensaio de flamabilidade horizontal.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A taxa de propagação de chama foi calculada através do tempo de queima em relação ao comprimento útil do corpo de prova, como mostra a Equação 10.

$$Taxa = \frac{L}{t} \quad (10)$$

Onde L é o comprimento útil do corpo de prova, em milímetros, e t é o tempo para a chama percorrer o comprimento útil, medido em minutos.

3.3 Análise estatística

Com os resultados obtidos através dos ensaios físicos, de tração e de flamabilidade foram feitas análises estatísticas, por meio da análise de variância (ANOVA) de único fator pelo software *Past 3.2* com confiança de 95 %. Para os resultados estatisticamente significativos (p-Valor > 0,05) a hipótese nula (H_0) foi rejeitada, indicando que os níveis analisados apresentam efeito significativo na variável independente.

Quando pelo menos um dos níveis é estatisticamente diferente dos demais, os resultados atendem a condição para rejeição da H_0 , sendo assim, para esses resultados foi empregado o teste Tukey (TSD) para a comparação entre as médias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das matérias-primas

4.1.1 Massa específica

Através dos cálculos efetuados com base no método do picnômetro foi possível encontrar a massa específica do resíduo para a confecção dos materiais compósitos. A determinação da massa específica da carga de reforço a ser inserida no compósito é fundamental, pois conforme Carrijo (2005), é necessário conhecer a densidade dos materiais constituintes para obter a proporção adequada dos mesmos na mistura polimérica, além de que, através da densidade pode-se saber o consumo de materiais utilizados na produção das misturas.

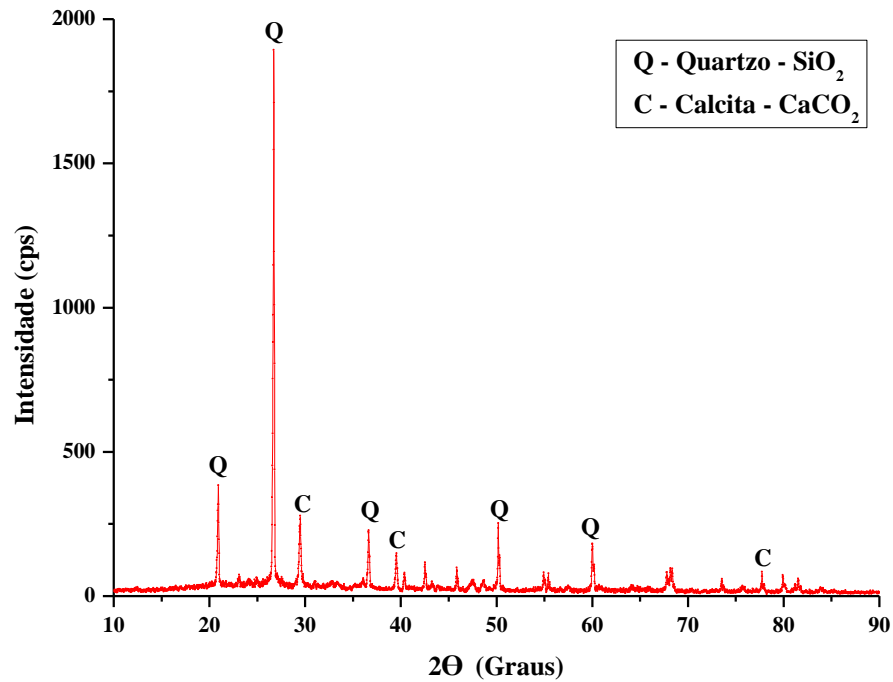
O resultado obtido para a massa específica do RCD foi de, aproximadamente, 4,50 g/cm³. Esse resultado está de acordo com a literatura pesquisada, nos trabalhos de Carvalho (2019) e de Alencar *et al.* (2020).

4.1.2 Análise mineralógica

A mineralogia do RCD foi investigada através da análise de Difração de Raios-X (DRX). A Figura 4.1 apresenta os principais componentes mineralógicos do material investigado, evidenciando os principais picos. Através da análise do Resíduo da Construção e Demolição, observou-se que este material tem em sua composição: Quartzo (SiO₂) – PDF 01-078-2315 e Calcita (CaCO₃) – PDF 01-089-1304, resultados que condizem com os trabalhos de Silva (2014) e Carvalho (2019).

A presença desses minerais pode estar relacionada com os componentes encontrados no resíduo, devido a presença de materiais cerâmicos, como tijolos, telhas, concreto, areia. O Quartzo e a Calcita são materiais inorgânicos, podendo causar influências significativas nas propriedades térmicas, como a flamabilidade do material compósito (CUNHA, 2015).

Figura 4.1 – Difração de Raios-X do resíduo de construção e demolição.



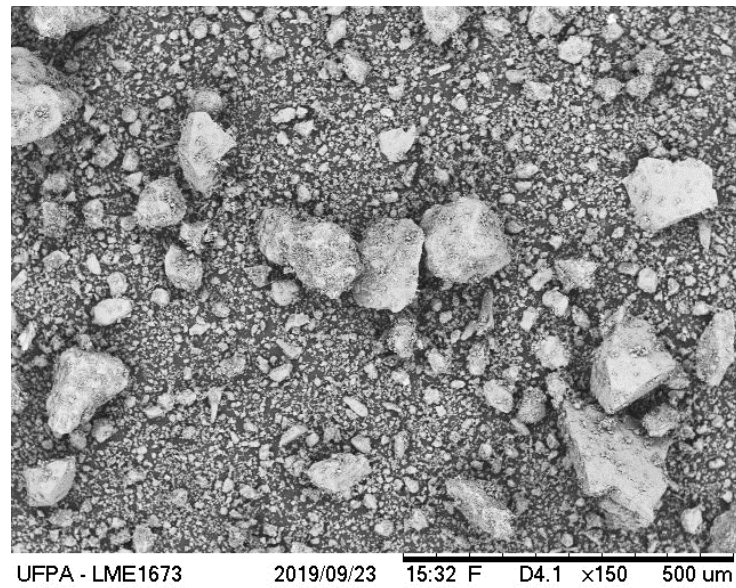
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

4.1.3 Análise morfológica

- Resíduo da Construção e Demolição (RCD)

A morfologia do RCD é apresentada na Figura 4.2, analisada por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), com aumento de 150x. Através das análises foi possível identificar as morfologias, distribuições dos tamanhos e formatos das partículas.

Figura 4.2 – Morfologia do RCD com aumento de 150x.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Por meio da Figura 4.2, nota-se uma diferença na granulometria do resíduo, além de fragmentos de diversos formatos. É possível observar partículas com formatos redondos, ortogonais, esféricos, pontiagudos, entre outros. Segundo Çoban *et al.* (2016), a presença de grãos de diferentes tamanhos pode desenvolver um desempenho superior nos compósitos, devido a melhor sinergia gerada.

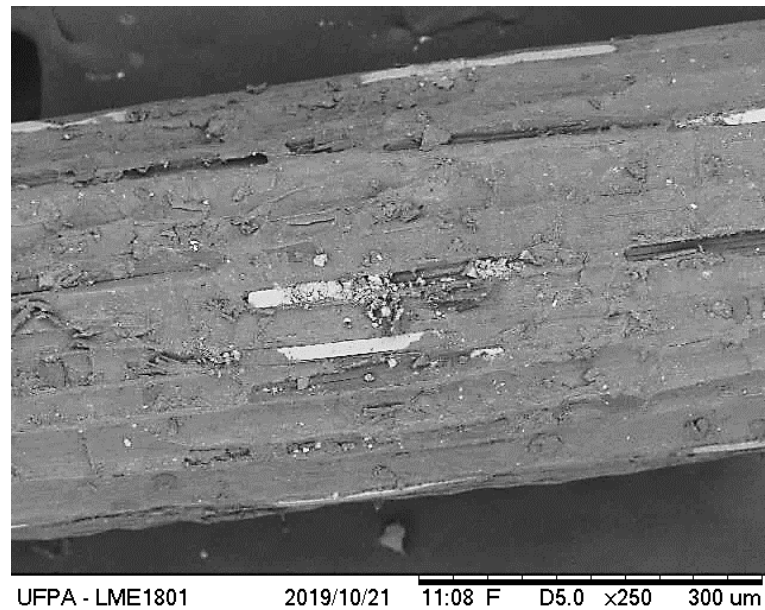
Além disso, a diferença granulométrica pode promover a diminuição de vazios. Conforme Apolinário (2014), ocorre o melhor empacotamento das partículas, promovendo o tamponamento de poros, ou seja, o preenchimento dos espaços vazios.

Também pode-se observar que não ocorre aglutinação das partículas, uma vez que as mesmas apresentam boa dispersão. Além disso, nota-se a presença de um material muito fino e pulverulento aderido às partículas maiores, que conforme Andrade (2014), é característico dos argilominerais.

- Fibras de Sisal

A análise morfológica foi feita em uma fibra de sisal sem tratamento químico, por meio da microscopia eletrônica de varredura, com aumento de 250x, como mostra Figura 4.3.

Figura 4.3 – Morfologia da fibra com aumento de 250x.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

É possível observar na Figura 4.3 que há a presença de impurezas na fibra investigada, além de uma superfície relativamente rugosa e sem uniformidade, o que pode facilitar a adesão entre fibra/matriz.

Segundo Neira (2005), a estrutura rugosa encontrada na morfologia da fibra de sisal contém pequenas partículas, que podem ser graxas ou pequenas fibrilas aderidas à superfície. Além de que, Costa (2016) diz que as fibras vegetais apresentam em sua composição microestrutural um alto percentual de microfibrilas de celulose.

Na microestrutura da fibra de sisal também é possível notar uma diferença de comprimento, de tamanho e de forma entre os filamentos. De acordo com Caldas (2014), as fibras de sisal apresentam formas geométricas diversificadas em sua seção transversal e possuem diversos diâmetros ao longo do comprimento das fibras. Esta variedade pode influenciar nas propriedades físico-mecânicas quando as fibras naturais são utilizadas como reforço em materiais compósitos.

4.2 Caracterização dos compósitos

4.2.1 Ensaio físicos

Os resultados da caracterização física dos compósitos produzidos são demonstrados na Tabela 4.1, onde são apresentados os valores obtidos de Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA) para os compósitos com inserção de RCD e fibra de sisal.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios físicos para os compósitos.

Composição (%)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)
MP	0,8435 ± 0,2480	1,0070 ± 0,2951	1,1938 ± 0,0095
5-RCD/3-FS	1,2447 ± 0,0445	1,5931 ± 0,0642	1,2798 ± 0,0097
10-RCD/3-FS	1,3729 ± 0,1467	1,8514 ± 0,2149	1,3482 ± 0,0463
15-RCD/3-FS	1,4975 ± 0,2220	2,1180 ± 0,2965	1,4168 ± 0,0340
20-RCD/3-FS	1,6979 ± 0,6120	2,4663 ± 0,8520	1,4593 ± 0,0351
25-RCD/3-FS	1,5305 ± 0,1679	2,3481 ± 0,2844	1,5334 ± 0,0596

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

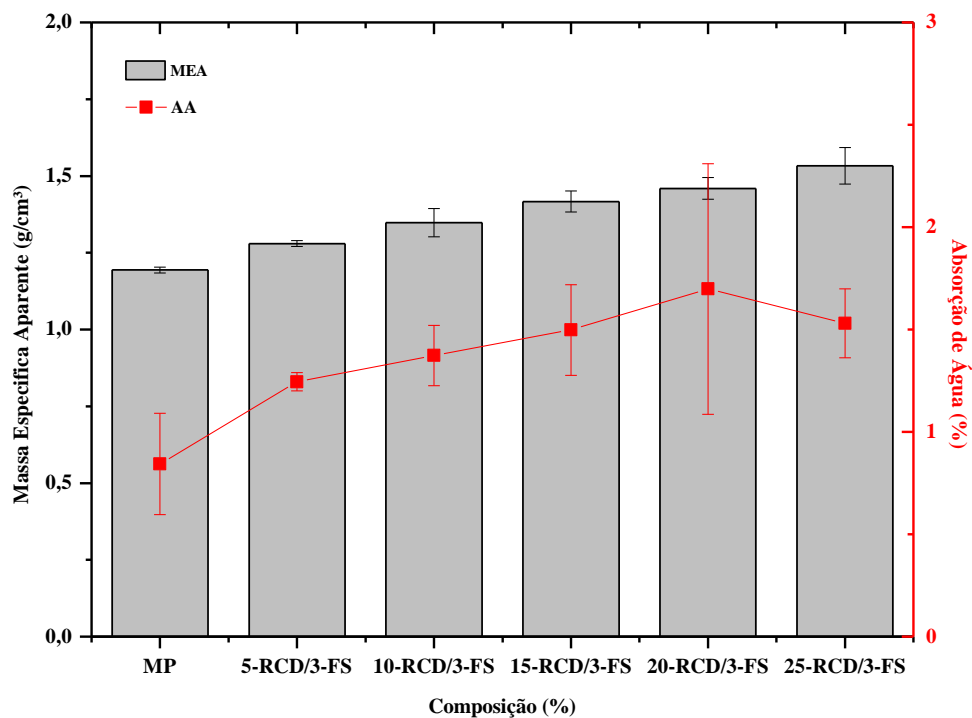
A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.1, observou-se um aumento gradativo da massa específica aparente com a inserção do resíduo e da fibra, em comparação com a Matriz Plena (MP). Isso ocorre por conta das propriedades físicas dos constituintes dos compósitos, pois a massa específica do resíduo de construção e demolição (4,50 g/cm³) e da fibra de sisal (1,42 g/cm³) é superior à massa específica da resina (1,157 g/cm³). A composição com 25-RCD/3-FS (25 % de Resíduo de Construção e Demolição e 3 % de Fibras de Sisal) obteve o maior resultado de MEA, com aumento de 28,44 % em comparação com a matriz plena. Sendo assim, os resultados estão de acordo com a regra da mistura, onde cada fase que constitui o compósito contribui nas propriedades efetivas do material (Callister, 2016). O aumento da massa específica aparente com adição de resíduo e fibras também foi encontrado por Barbosa *et al.* (2020) e Santos (2020).

Notou-se também um aumento expressivo da porosidade aparente à medida que aumentou a proporção dos constituintes na matriz. Esse aumento pode ter relação com o método de fabricação utilizado (*hand lay up*), o qual pode favorecer o surgimento de falhas nos materiais compósitos, como vazios, bolhas, trincas, conforme a adição de resíduo na resina.

Além disso, os resultados de absorção de água também foram superiores ao da matriz plena para todas as composições. Segundo Fang *et al.* (2013), esses valores podem ter relação com a presença de poros nos compósitos, pois o aumento de resíduo na matriz pode auxiliar na formação de espaços vazios, resultando no aumento na absorção de água. Soma-se a isso a tendência que as fibras possuem de absorver umidade, pois são materiais lignocelulósicos, constituídos principalmente por celulose, lignina e hemicelulose. Segundo Das *et al.* (2008), a umidade estufa a parede celular da fibra até a saturação com água, fazendo com que a água ocupe os espaços livres entre os feixes de fibras e altere as suas dimensões.

A Figura 4.4 apresenta um gráfico relacionando das propriedades físicas entre a matriz plena e os compósitos com adição de resíduo de construção e demolição com adição de fibras de sisal.

Figura 4.4 – Relação entre a massa específica aparente e absorção de água entre os compósitos produzidos.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Os resultados dos ensaios físicos foram tratados pela Análise de Variância (ANOVA) e análise Tukey. Foi feita a comparação por pares com os compósitos produzidos com a finalidade de verificar a significância dos materiais analisados. Através do software PAST, com a ANOVA de fator único, analisou-se as diferentes composições residuais com relação aos grupos Tukey. A Tabela 4.2 apresenta as conclusões por meio do teste Tukey.

Tabela 4.2 – Resultado do teste Tukey para a propriedade AA e MEA dos compósitos produzidos.

Comparações	Conclusão	Conclusão
	AA (%)	MEA (g/cm ³)
5-RCD/3-FS – MP	Não difere	Difere
10-RCD/3-FS – MP	Não difere	Difere
15-RCD/3-FS – MP	Difere	Difere
20-RCD/3-FS – MP	Difere	Difere
25-RCD/3-FS – MP	Difere	Difere
10-RCD/3-FS – 5-RCD/3-FS	Não difere	Difere
15-RCD/3-FS – 5-RCD/3-FS	Não difere	Difere
20-RCD/3-FS – 5-RCD/3-FS	Não difere	Difere
25-RCD/3-FS – 5-RCD/3-FS	Não difere	Difere
15-RCD/3-FS – 10-RCD/3-FS	Não difere	Difere
20-RCD/3-FS – 10-RCD/3-FS	Não difere	Difere
25-RCD/3-FS – 10-RCD/3-FS	Não difere	Difere
20-RCD/3-FS – 15-RCD/3-FS	Não difere	Não difere
25-RCD/3-FS – 15-RCD/3-FS	Não difere	Difere
25-RCD/3-FS – 20-RCD/3-FS	Não difere	Difere

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

De acordo com a Tabela 4.2, a comparação dos pares entre as médias foi diferente para todas as composições do ensaio físico de massa específica aparente, exceto a fração com 15 % e 20 % que se mostraram semelhantes. A matriz plena foi diferente de todas composições de comparação, o que mostra o efeito nessa propriedade quanto à inserção do resíduo e fibras de sisal na matriz polimérica.

Além disso, as composições com 5 % e 10 % de resíduo mostraram-se semelhantes a matriz plena para os ensaios físicos de absorção de água. Ao aumentar a quantidade de resíduo (15 %, 20 % e 25 %) nos ensaios físicos de AA, os compósitos apresentaram comportamento divergente em relação à matriz plena. Sendo assim, os resultados evidenciam a sensibilidade dessas propriedades quanto a adição de reforço na matriz.

4.2.2 Ensaio de resistência à tração

A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de tração dos materiais compósitos produzidos.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de tração para os compósitos.

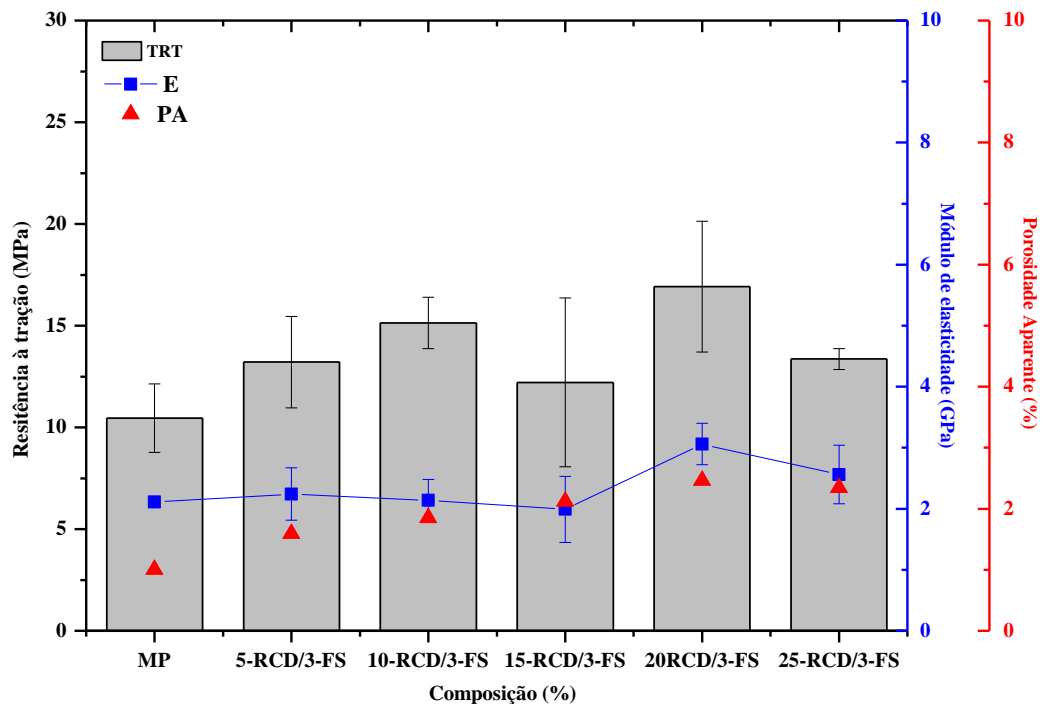
Composição (%)	Tensão de resistência à tração (MPa)	Alongamento linear (mm)	Módulo elástico (GPa)
MP	10,45 ± 1,68	0,89	2,11 ± 0,02
5-RCD/3-FS	13,21 ± 2,25	1,08	2,24 ± 0,43
10-RCD/3-FS	15,14 ± 1,26	1,29	2,14 ± 0,34
15-RCD/3-FS	12,21 ± 4,15	1,10	1,99 ± 0,54
20-RCD/3-FS	16,92 ± 3,22	0,99	3,06 ± 0,34
25-RCD/3-FS	13,36 ± 0,52	0,97	2,55 ± 0,48

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Por meio da Tabela 4.3 é possível notar que todas as composições apresentaram resultados superiores à matriz plena. No geral, os compósitos poliméricos com inserção de RCD e fibras de sisal apresentaram um bom desempenho de tração em relação à matriz plena. Esse aumento da tensão de resistência à tração pode ter sido influenciado pela forma, tamanho, distribuição e orientação da fase dispersa na matriz, fazendo uma melhor distribuição da carga no interior do corpo de prova à medida que ele é tracionado (CALLISTER, 2020).

A Figura 4.5 apresenta um gráfico que relaciona os resultados de resistência à tração e porosidade aparente entre a matriz plena e os compósitos com resíduo de construção e demolição com adição de fibras de sisal.

Figura 4.5 – Desempenho de tração entre os compósitos produzidos.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Através do gráfico da Figura 4.5 pode-se ressaltar que a composição com melhor desempenho no ensaio mecânico de tração foi a com 20-RCD/3-FS, sendo aproximadamente 22,64 % superior ao resultado obtido para a matriz plena. Além disso, o bom desempenho dos compósitos produzidos pode ter ocorrido por conta da granulometria do resíduo, com diversos formatos e tamanhos que, segundo Çoban *et al.* (2016), proporcionou uma melhor resistência ao material quando exposto a forças de tração. Soma-se a isto o fato de que a fibra de sisal apresentou um desempenho eficiente nas propriedades mecânicas de tração, que é resultado de uma boa ancoragem na interface fibra/matriz. Segundo Costa (2016), as fibras vegetais possuem características que desenvolvem boas propriedades mecânicas devido a boa adesão fibra/matriz, como a presença de superfícies rugosas, demonstrado no MEV da fibra na Figura 4.3.

Quanto à propriedade física de porosidade aparente, notou-se o aumento da PA conforme adicionado resíduo na matriz polimérica. O aumento da fase dispersa dentro da matriz facilita a ocorrência de poros nos compósitos e pode influenciar na propriedade mecânica de tração, pois reduz a molhabilidade e dificulta a trabalhabilidade do sistema matriz/resíduo/fibra. Além disso, o resíduo atua como um revestimento do reforço (fibras), o que dificulta uma boa ancoragem do sistema fibra/matriz e degrada a resistência à tração dos compósitos (COSTA, 2016).

Em relação ao módulo elástico, observa-se que a composição com 20-RCD/3-FS apresentou maior módulo de elasticidade. Essa propriedade influencia diretamente na resistência à tração do material, segundo Callister (2016), quanto maior o módulo de elasticidade, mais rígido será o material, ou seja, menor será a deformação elástica ao ser aplicada uma força. Sendo assim, a proporção com 20-RCD/3-FS obteve o melhor desempenho de resistência à tração, o que comprova a influência do módulo de elasticidade no comportamento mecânico de tração dos compósitos.

Através da Análise de variância (ANOVA) e método de Tukey, foram realizadas as comparações entre as frações estudadas para comprovar as diferenças significativas entre a resistência a tração e o módulo de elasticidade, através do software PAST, conforme a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultado do teste Tukey para a resistência à tração e módulo elástico dos compósitos produzidos.

Comparações	Conclusão Tração (MPa)	Conclusão M.E (GPa)
5-RCD/3-FS – MP	Não difere	Não difere
10-RCD/3-FS – MP	Difere	Não difere
15-RCD/3-FS – MP	Não difere	Não difere
20-RCD/3-FS – MP	Difere	Difere
25-RCD/3-FS – MP	Não difere	Não difere
10-RCD/3-FS – 5-RCD/3-FS	Não difere	Não difere
15-RCD/3-FS – 5-RCD/3-FS	Não difere	Não difere
20-RCD/3-FS – 5-RCD/3-FS	Não difere	Difere
25-RCD/3-FS – 5-RCD/3-FS	Não difere	Não difere
15-RCD/3-FS – 10-RCD/3-FS	Não difere	Não difere
20-RCD/3-FS – 10-RCD/3-FS	Não difere	Difere
25-RCD/3-FS – 10-RCD/3-FS	Não difere	Não difere
20-RCD/3-FS – 15-RCD/3-FS	Difere	Difere
25-RCD/3-FS – 15-RCD/3-FS	Não difere	Não difere
25-RCD/3-FS – 20-RCD/3-FS	Não difere	Não difere

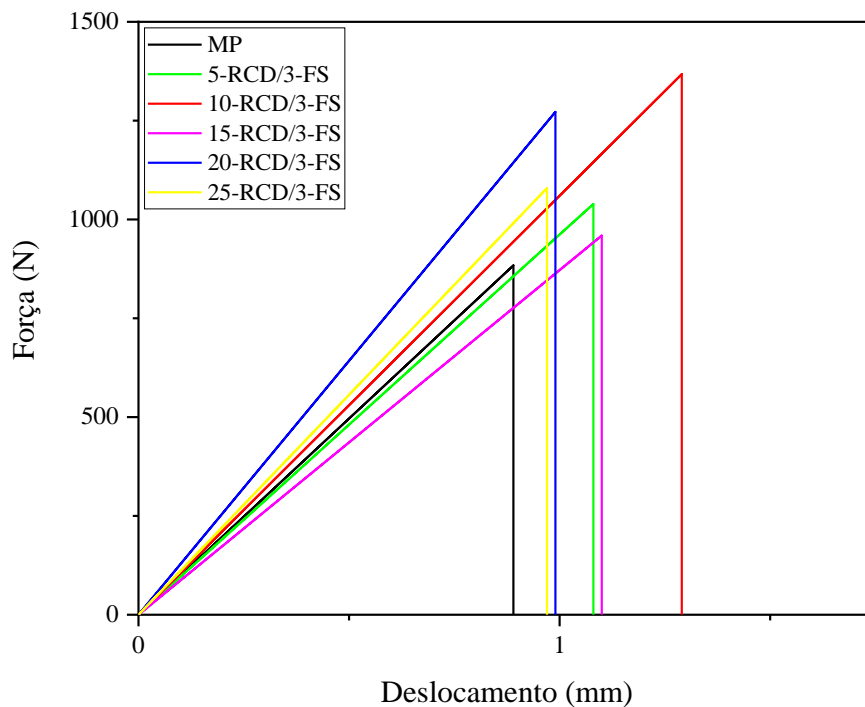
Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

De acordo com os resultados do teste Tukey mostrados na Tabela 4.4, somente as composições com 10 % e 20 % de resíduo apresentaram-se diferentes da matriz plena para o ensaio de resistência à tração, evidenciando o efeito significativo dessas quantidades de carga de enchimento/reforço inseridas na matriz, as quais apresentaram os melhores resultados de resistência à tração, sendo 15,14 MPa para 10-RCD/3-FS e 16,92 MPa para 20-RCD/3-FS. Já para o módulo de elasticidade, observa-se que a composição com 20 % de resíduo diferiu da matriz plena, sendo a composição 20-RCD/3-FS a que obteve o maior módulo elástico (3,06 GPa) e o melhor resultado para o ensaio de resistência à tração, mostrando a influência do módulo elástico para essa propriedade.

O aumento da resistência à tração na fração mássica de 20 % de resíduo e inserção de fibras também foi observado pelos autores: Santos (2020), com incorporação de resíduo de cobre e reforço de fibras de bambu em compósitos; por Barbosa *et al.* (2020), com o resíduo de mármore e granito e fibras de sisal; e por Farias *et al.* (2019), com a inserção de resíduo de cobre e fibra de bambu em compósitos poliméricos.

A Figura 4.6 apresenta o gráfico da relação entre a carga (N) e deslocamento (mm) dos corpos de prova de cada proporção estudada.

Figura 4.6 – Gráfico carga (N) x deslocamento (mm) para os compósitos estudados.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Por meio do gráfico da Figura 4.6, foi possível notar que ocorreu um alongamento durante a fase elástica, resultando em uma ruptura do tipo frágil. Além disso, observou-se que a composição 10-RCD/3-FS obteve maior alongamento em relação as demais composições, com um alongamento linear de aproximadamente 1,29 mm. Nota-se também que ocorreu uma variação do alongamento em relação a carga aplicada nos materiais compósitos.

4.2.3 Ensaio de flamabilidade horizontal

Os resultados obtidos nos ensaios de flamabilidade horizontal para os corpos de prova de compósito com resíduos da construção e demolição (RCD) e inserção de fibras curtas de sisal estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Desempenho dos corpos de prova quanto à flamabilidade horizontal.

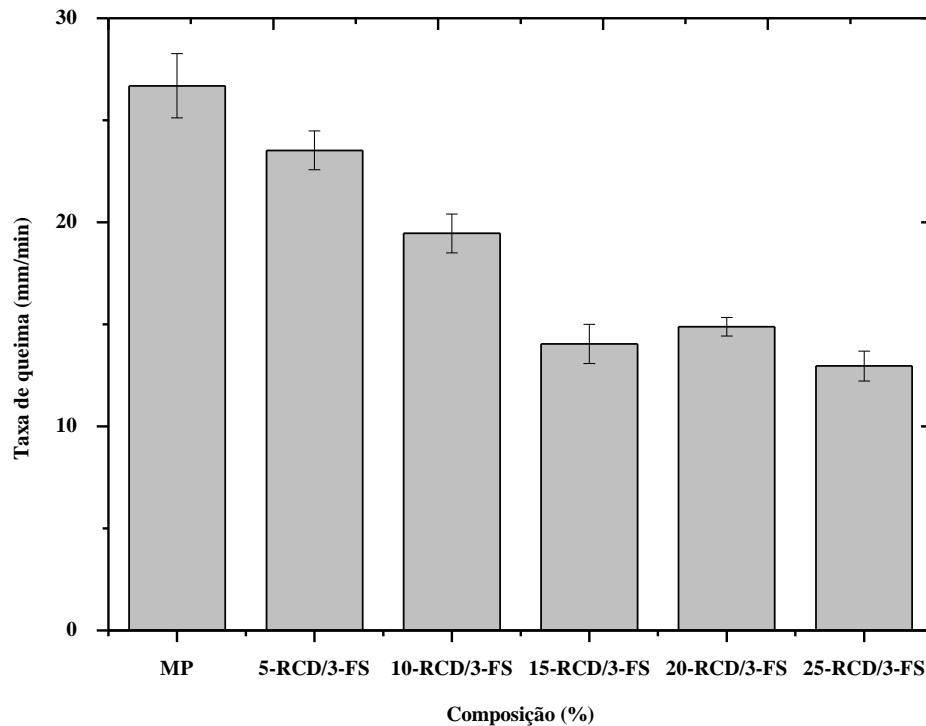
Composição (%)	Taxa de queima (mm/min)	Redução (%)
MP	26,69 ($\pm 1,58$)	-
5-RCD/3-FS	23,52 ($\pm 0,95$)	11,87
10-RCD/3-FS	19,46 ($\pm 0,95$)	27,08
15-RCD/3-FS	14,04 ($\pm 0,96$)	47,39
20-RCD/3-FS	14,88 ($\pm 0,46$)	44,25
25-RCD/3-FS	12,96 ($\pm 0,73$)	51,44

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Conforme mostra a Tabela 4.5, houve uma redução da taxa de queima (mm/min) dos compósitos à medida que foi inserido resíduo e fibras na matriz polimérica. A proporção de 25-RCD/3-FS obteve o melhor desempenho comparado a MP, com uma redução da taxa de queima em aproximadamente 51,44 % em relação à matriz plena.

A Figura 4.7 apresenta o comparativo da taxa de queima para todas as proporções dos compósitos com RCD e fibras de Sisal.

Figura 4.7 – Comparativo dos resultados obtidos de flamabilidade horizontal para os compósitos produzidos.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

O gráfico da Figura 4.7 evidencia que o aumento de inserção de reforço residual e fibroso na matriz reduziu a taxa de queima dos compósitos produzidos. Isso pode ter ocorrido porque a inserção de resíduo de construção e demolição na matriz polimérica resultou na diminuição da taxa de queima, devido a redução da quantidade de resina utilizada. Segundo Ullah *et al.* (2014), a incorporação de particulados inorgânicos, com baixa flamabilidade, pode atuar na redução de quantidade de material combustível disponível para a propagação, o que explica a progressiva redução na taxa de queima em função do aumento do teor de particulado.

Além disso, como foi mostrado no DRX da Figura 4.1, o RCD apresenta minerais de quartzo e calcita que são inorgânicos, portanto, facilitam o retardo de chama e promovem compósitos mais resistentes quando expostos ao fogo, conforme Moraes *et al.* (2019). A presença de óxidos como CaCO_3 e SiO_2 contribuem para a decomposição térmica dos carbonatos. Os óxidos hidratados liberam água estrutural ao atingirem a temperatura de desidratação, o que favorece o retardo de chamas (CUNHA, 1998).

Para evidenciar os resultados obtidos, foi feita a análise de variância através do software PAST, com a finalidade de identificar as diferenças significativas entre as composições estudadas, com Valor-P 2,029E-09. A Tabela 4.6 apresenta as conclusões obtidas para o ensaio de flamabilidade.

Tabela 4.6 – Resultado do teste Tukey para o ensaio de flamabilidade dos compósitos produzidos.

Comparações	Conclusão
5-RCD/3-FS – MP	Difere
10-RCD/3-FS – MP	Difere
15-RCD/3-FS – MP	Difere
20-RCD/3-FS – MP	Difere
25-RCD/3-FS – MP	Difere
10-RCD/3-FS – 5-RCD/3-FS	Difere
15-RCD/3-FS – 5-RCD/3-FS	Difere
20-RCD/3-FS – 5-RCD/3-FS	Difere
25-RCD/3-FS – 5-RCD/3-FS	Difere
15-RCD/3-FS – 10-RCD/3-FS	Difere
20-RCD/3-FS – 10-RCD/3-FS	Difere
25-RCD/3-FS – 10-RCD/3-FS	Difere
20-RCD/3-FS – 15-RCD/3-FS	Não difere
25-RCD/3-FS – 15-RCD/3-FS	Não difere
25-RCD/3-FS – 20-RCD/3-FS	Difere

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

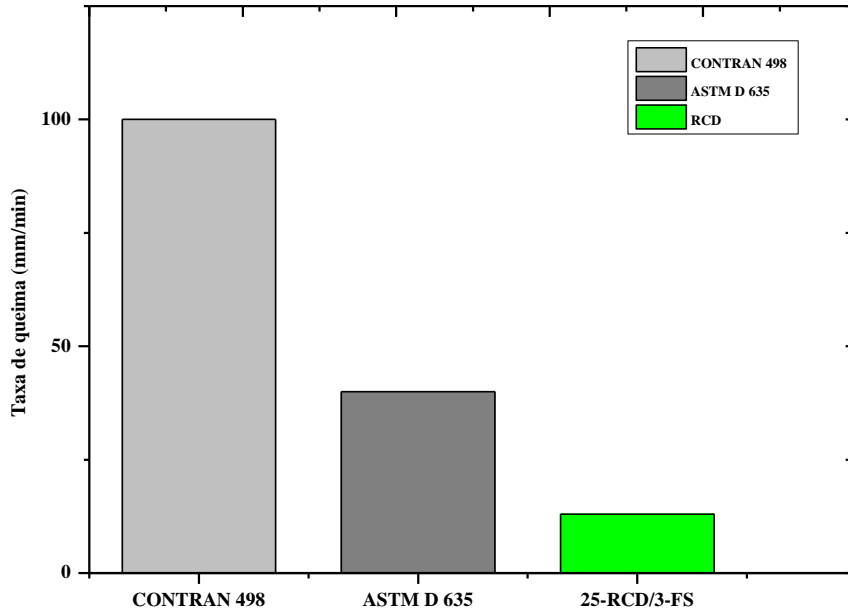
Através dos resultados do teste Tukey mostrados na Tabela 4.6 observou-se que todas as composições se mostraram diferentes da matriz plena, o que evidencia o efeito significativo da adição do RCD e fibras de sisal nos compósitos produzidos e suas eficiências no retardo de chama.

Segundo a norma ASTM D 635, para a amostra ser classificada como HB a velocidade de propagação de chama não deve ultrapassar 40 mm/min em corpos de prova com espessura abaixo de 3 mm. Logo, os resultados do ensaio de flamabilidade mostram que todas as amostras estão de acordo com as especificações da norma ASTM D 635 e podem ser classificados como HB.

O Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) exige que os revestimentos internos da indústria automobilística possuam uma taxa de propagação de chama de 100 mm/min. Sendo assim, os compósitos produzidos estão dentro da recomendação da norma CONTRAN nº 498.

Os resultados obtidos foram comparados com as normas CONTRAN n° 498 e a norma ASTM D 635, mostrados no gráfico da Figura 4.8, para apresentar o expressivo efeito retardante à chama do compósito reforçado com resíduo de construção e demolição e fibras de sisal.

Figura 4.8 – Comparativo dos resultados obtidos de flamabilidade horizontal com os parâmetros exigidos.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

O gráfico da Figura 4.8 compara as normas com a proporção de 25-RCD/3-FS, estabelecido como melhor resultado. Observa-se que os valores são promissores, avaliando uma margem de erro considerável. A redução comparada à norma CONTRAN n° 498 foi de uma taxa de 87,04 % e 82,72 % para a norma ASTM D 635.

A Tabela 4.7 relaciona o compósito com melhor desempenho no ensaio de resistência à chama com a literatura pesquisada.

Tabela 4.7 – Relação entre a amostra com a melhor taxa de queima com polímeros e outros compósitos.

Materiais de Referência	Taxa de Queima (mm/min)	Fonte
Poliéster Isoftálica/ 25 % RCD/ 3 % Fibra de Sisal	12,96	Este Trabalho
Poliéster Isoftálica/ 20% Lama Vermelha/ 5% Fibra de Sisal	14,77	Costa (2016)
Poliéster Isoftálica / 20 % Cobre/ 1% Fibra de Bananeira	13,67	El Banna (2017)
Poliéster Isoftálica / 20 % Caulim/ 1% Fibra de Bambu	15,14	Mendes (2019)
Poliéster Isoftálica / 30% Lama Vermelha/ 5% Fibra de Juta	13,53	Oliveira <i>et al.</i> (2020)
Polietileno (PE)	15,20	ASTM D 635
Polietileno Tereftalato (PET)	192,00	ASTM D 635
Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	26,90	Oliveira <i>et al.</i> (2017)

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Como mostra a Tabela 4.7, todos os compósitos da literatura pesquisada apresentaram boa taxa de propagação de chama em relação as matrizes poliméricas citadas. Além disso, os compósitos com resíduo e fibras apresentaram os menores valores de taxa de queima em comparação com as normas e diretrizes citadas.

Conforme Ribeiro *et al.* (2013), quanto maior for o tempo de queima, mais facilmente ocorrerá a extinção de chama, além de dificultar a propagação do fogo. Sendo assim, a proporção com 25-RCD/3-FS apresentou o melhor desempenho de retardo à chama em comparação com a literatura.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

A caracterização do Resíduo da Construção e Demolição possibilitou a identificação dos principais componentes minerais (Quartzo e Calcita), os quais influenciaram no desempenho satisfatório de resistência à chama dos materiais compósitos.

Na morfologia do resíduo observou-se que houve a variação nos tamanhos das partículas, além de fragmentos de diversos formatos. Na caracterização morfológica da fibra de sisal notou-se uma superfície rugosa e não uniforme. Essas características encontradas para as matérias-primas estudadas influenciaram no desempenho mecânico à tração dos materiais compósitos estudados.

De maneira geral, os compósitos fabricados apresentaram poucas falhas de fabricação, o que torna viável o processo *hand lay up*, pois apresenta um baixo custo de produção.

Os ensaios físicos tiveram resultados de aumento da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água para todas as composições estudadas. A composição com 25-RCD/3-FS obteve o maior resultado de MEA, com aumento de 28,44 % em comparação com a matriz plena.

No ensaio de resistência à tração, todos os compósitos apresentaram resultados superiores em relação a matriz plena. A composição com melhor desempenho no ensaio mecânico de tração foi a com 20-RCD/3-FS, sendo aproximadamente 22,64 % superior a matriz plena.

Em relação ao ensaio de flamabilidade, os compósitos híbridos apresentaram resultados satisfatórios em relação a matriz plena e as normas estudadas, sendo que todos podem ser classificados como HB. O compósito com a proporção de 25-RCD/3-FS obteve o melhor desempenho, com uma redução da taxa de queima em aproximadamente 51,44 % em relação à matriz plena.

Logo, os compósitos com RCD e fibras de sisal demonstraram um bom desempenho em comparação à matriz plena, sendo a reciclagem do resíduo de construção e demolição e a utilização de fibras naturais uma alternativa viável para a produção de materiais compósitos com boas propriedades, sustentável e com menor custo.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Tendo em vista a abrangência do assunto abordado neste estudo, a seguir são apresentadas algumas sugestões para a continuação do presente trabalho:

- Fabricar e analisar a inserção de outras fibras vegetais em diferentes proporções e comprimentos em compósitos poliméricos com resíduo de construção e demolição, a fim de verificar a influência nas propriedades dos materiais;

- Realizar tratamento químico e/ou térmico nas fibras vegetais com o objetivo de melhorar a interface fibra/resíduo/matriz;

- Realizar outros ensaios mecânicos nos compósitos fabricados, como impacto e flexão, com a finalidade de obter mais respostas das propriedades dos materiais compósitos.

REFERÊNCIAS

ABMACO. **Compósitos 2: Tecnologia de Processos**. [s.l.], 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: **Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ALBINANTE, S. R.; PACHECO É. B. A. V.; VISCONTE, L. L. Y. Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas. **Química Nova**, vol. 36, n. 1, 2013.

ALMEIDA, L. R. *et al.* Reaproveitamento de resíduos em compósitos poliéster: influência das cinzas nas propriedades mecânicas e térmicas. In: Engenharia no Século XXI, v. 3. Ed. Belo Horizonte: **Poisson**, 2019. Cap. 4, p. 23 – 29.
doi: 10.5935/978-85-7042-091-6.

AGEITEC – Agência Empraba de Informação Tecnológica. **Sisal**. Disponível em: <<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/sisal/arvore/CONT000gv5km0x602wx7ha0g934vg75gpe5w.html>> Acesso em: 19/08/2021.

ALENCAR, K. C. *et al.* Potencial de aplicabilidade de compósitos poliméricos reforçados com resíduos minerais e da construção civil em revestimentos internos. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 9, p.73343-73353, sep. 2020.

ANDRADE, L. C. R. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. Tese (Pós-graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa - UFV -, Viçosa, 2014.

APOLINÁRIO, E. C. de A. **Influência da adição de resíduo proveniente do corte de mármore e granito (RCMG) nas propriedades de argamassas de cimento Portland**. 2014. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana). Universidade Federal da Bahia, 2014.

ARAUJO, L. E. **Desenvolvimento de argamassas geopoliméricas com o uso de resíduo de construção e demolição**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

ASKELAND, D. R. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. Tradução Solange Aparecida Visconti. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

ASTM D 3878. **Standard Terminology for Composite Materials**, ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, 2022.

ASTM D 570. **Standard Test methods for water absorption of plastics**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 1998.

ASTM D 2734. **Standard Test methods for void content of reinforced plastics**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 2017.

ASTM D 3039. **Standard Test methods for tensile properties of Polymer matrix composite materials.** Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 2017.

ASTM D 635. **Standard Test methods for rate of burning and/or extent and time of burning of plastics in a horizontal position.** ASTM Internacional, West Conshohocken, P.A, 2018.

ASTM D 792. **Standard Test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement.** Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2008.

BARBOSA, K. S. L. *et al.* Incorporação de fibras curtas de bambu e carga de resíduo industrial de caulim flint em compósitos de matriz polimérica. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 2, p. 7653-7667, feb. 2020.

BARBOSA, K. S. L. *et al.* Efeito da adição do resíduo de mármore e granito com fibras de sisal nas propriedades de compósitos poliméricos. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 4, n. 3, p. 1065-1073, mai/jun. 2020.

BARBOSA, K. S. L. *et al.* Caracterização mecânica de compósitos poliméricos com fibras de juta. **Brazilian Applied Science Review**. Curitiba, v. 4, n. 3, p. 1474-1481, mai/jun. 2020.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimento para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 17 jul. 2002.

CALDAS, B. G. S. **Estrutura sanduíche de matriz poliéster reforçado com tecido de sisal conformado por infusão a vácuo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2014.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução.** 10 Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução.** 9 Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CANEVAROLO Jr, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** 3 ed. São Paulo: Artliber, 2010.

CARVALHO, P. R. C. *et al.* Utilização de resíduos da construção civil e demolição em compósitos poliméricos: características físicas, mecânica e de flamabilidade. In: **Anais do 6º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil.** 2019, Belém.

CARVALHO, P. R. C. **Reciclagem de resíduos da construção civil e demolição (RCD) em compósitos poliméricos: avaliação mecânica (tração) e flamabilidade.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade da Amazônia, Belém, 2019.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 2005.

ÇOBAN, O.; BORA, M.O.; SINMAZÇELIK, T. Effect of Mixed Size Particles Reinforcing on the Thermal and Dynamic Mechanical Properties of Al₂O₃/PPS Composites. **Polym. Compos.**, v. 37, p. 3219–3227, 2016.

COSTA, D. S. **Caracterização de materiais compósitos de matriz poliéster e fibras de bambu, sisal e vidro e híbridos bambu/sisal, bambu/vidro e sisal/vidro.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

COSTA, D. S. **Estudo da influência de resíduos gerados pela indústria de mineração nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras naturais.** Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2016.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). Resolução nº 498 – “Requisitos aplicáveis aos materiais de revestimento interno do habitáculo de veículos nacionais ou importados.”. **Código de trânsito Brasileiro – CTB**, 29 de julho de 2014.

CUNHA, E. J. S. **Influência do uso do resíduo do processo bayer nas propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de curauá (Ananás lucidus).** Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

CUNHA, E. J. S. **Degomagem de feixe de fibras de curauá (Ananas erectifolius S.): Influência das variáveis de processos na solubilidade do material péctico e nas propriedades mecânicas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Pará, Belém, 1998.

DARROS, A. B. **Compósitos de Matrizes Poliméricas com Mantas Aleatórias de Fibras Vegetais de Sisal e de Coco.** Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba, 2013.

DAS, S.; *et al.* Effect of Steam Pretreatment of Jute Fiber on Dimensional Stability of Jute Composite. **J. Appl. Polym. Sci.**; 76:1652-1661.

DEUS, J. F. *et al.* Resistência à tração de compósitos laminados epoxídicos reforçados com tecido de rami sob diferentes condições de cura. In: **Anais do 74º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração**, 2019, São Paulo – SP, Brasil.

EL BANNA, W. R. **Influência do resíduo de flotação de minério de cobre nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de matriz termofixa e fibras de bananeira (Musa sapientum, Musacae).** Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

FANG, H.; ZHANG, Y.; DENG, J.; RODRIGUE, D. Effect of Fiber Treatment on the Water Absorption and Mechanical Properties of Hemp Fiber/Polyethylene Composites. **J. Appl. Polym. Sci.** v. 127, p. 942-949, 2013.

FARIAS, D. C.; *et al.* Produção de compósitos híbridos com resíduo de cobre e fibras de bambu de 30 mm com caracterização mecânica por meio de tração. In: **16º Encontro e Profissionais da Química da Amazônia**, de 10 a 13 de Setembro de 2019, Belém, PA.

FERREIRA, V. H. M. M. *et al.* Compósitos poliméricos com particulados de cinza volante. In: **XXXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**, de 27 a 30 de Outubro de 2019, Belém-Pará.

FERREIRA, V. H. M. M. **Cinzas volantes: uma alternativa para compósitos reforçados com partículas.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua, Ananindeua, 2020.

FERREIRA, B. T. **Compósitos híbridos reforçados com fibras de sisal/vidro e micropartículas de sílica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João del-Rei, 2017.

OLIVEIRA FILHO, E. G. O. *et al.* Avaliação do comportamento mecânico de compósitos poliméricos reforçados com fibras de sisal. In: **Anais do 72º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração**, 2017, São Paulo.

HULL, D. **An Introduction to Composite Materials.** Third Ed. Cambridge University Press, Cambridge, 246p, 2019.

IUPAC. **Materials Chemistry Edu: Green Materials.** 2012. Disponível em: <<https://iupac.org/materialschemistryedu/environmental/green-materials/>> Acesso em: 09/07/2022.

KRATOS EQUIPAMENTOS. Máquina de ensaios Kratos. 2021. Disponível em: <https://www.kratos.com.br/avada_portfolio/maq-de-ensaios-mecanicas-e-hidraulicas/> Acesso em: 06/02/2022.

KENNY, J. M.; MAFFEZZOLI, A.; NICOLAIS, & L. A model for the thermal and chemorheological behavior of thermoset processing: Unsaturated polyester based composites. **Composites Science and Technology**, v. 38: p. 339-358, 1990.

KICKELBICK, G. Introduction to hybrid materials. In: Kichelbick G, editor. **Hybrid mater synth charact appl.** John Wiley & Sons, 2007.

KUWAHARA, M. *et al.* Caracterização de materiais compósitos de matriz poliéster e fibras de sisal com comprimento híbrido de 5 a 15 mm. In: **Anais do 68º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração**, 2013, Belo Horizonte.

LEITE, S. R. P. **Estudo das práticas de gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil do Rio de Janeiro.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 2ª edição. São Paulo: Edgar Blucher, 2016, 418 p.

LOURENÇO, L. M. G. **Caracterização Física e Mecânica de Compósitos Híbridos de Matriz Polimérica**. Dissertação de mestrado, Leiria, 2017.

MALLICK, P. K. **Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design**. 3rd. Ed. London: CRC Press, 2007.

MARCELO, F. S. F.; MOURA, A. B.; MORAIS, A. G. Materiais compósitos – Materiais, fabrico e comportamento mecânico. **Publindústria**, Produção de comunicação Lda. 2011.

MARTINS, A. R. *et al.* Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 19, n. 1, p. 40-46, 2009.

MARTINS Neto, J. A. **Obtenção, Caracterização e Utilização de um Compósito com Matriz de Resina Poliéster e Carga de Fibras de Sisal**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, 2016.

MENDES, B. H. A. **Estudo da influência da incorporação de resíduo de beneficiamento de caulim nas propriedades de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibra de bambú (*Bambusa vulgaris*)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

MORAND, F. G. **Estudo das Principais Aplicações dos Resíduos de Obra como Materiais de Construção**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

MOREIRA, A. M. **Materiais de construção I: Materiais compósitos**. Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Tomar, Tomar, 2009.

MORAES, M. H. M. *et al.* Avaliação mecânica e resistência à chama de resíduos de cinzas volantes e mármore-granito em compósitos poliméricos. In: **Anais do 74º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração**, 2019, São Paulo – SP, Brasil.

NAGALLI, A. Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2014.

NEIRA, D. S. M. **Fibra de sisal (*Agave sisalana*) Como isolante térmico de tubulações**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005.

OLIVEIRA, G. da C. *et al.* Reaproveitamento de resíduos industriais como cargas em compósitos: resistência mecânica e à chama. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 10, p. 82955-82964, oct. 2020.

OLIVEIRA, L. S. *et al.* Compósitos produzidos com resíduo de lama vermelha e fibras naturais: análise de flamabilidade. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 7, p. 42767-42776, jul. 2020.

OLIVEIRA, M. J. A. de. **Efeito da adição de lama vermelha como carga nas propriedades mecânicas de compósitos de poliéster insaturado reforçados com fibra natural de carauá (ananás erectifolius)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

OLIVEIRA, R. M. de. **Compósito de poliuretano elastomérico reforçado com fibra de juta: estudo das propriedades dinâmico-mecânicas e viscoelásticas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba, 2013.

OLIVEIRA, S. V. *et al.* Nanocompósitos de polietileno/argila bentonítica com propriedades antichamas. **Polímeros**, São Carlos, v. 27, n. spe, p. 91-98, Epub 16-Jan-2017. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2288>.

PEREIRA, A. C.; MONTEIRO, S. N.; MARGEM, F. M. Comportamento em tração de compósitos com matriz poliéster reforçados com fibras de sisal. In: **Anais do 68º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração**, 2013, Belo Horizonte.

PEREIRA, A. P. *et al.* Resistência à tração e flexão de compósito de matriz de policarbonato reforçado com fibra natural de sisal. In: **Anais do 72º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração**, 2017, São Paulo.

PEREIRA, W. A. *et al.* Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibra da Folha do Buriti. **Revista Matéria**, v. 26, n. 1, 2021.

PINTO, T. P.; GONZÁLES, J. L. R. Manejo e gestão dos resíduos da construção civil – **Manual de orientação: como implementar um sistema de manejo e gestão nos municípios**, vol. 1. Brasília: CAIXA, 194 p., 2005.

QUEIROZ, D. P. *et al.* Uso de fibras metálicas e lama vermelha em compósitos poliméricos híbridos. In: **Anais do 74º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração**, 2019, São Paulo – SP, Brasil.

QUEIROZ, D. P. *et al.* Avaliação mecânica e flamabilidade de compósitos com resíduos de lama vermelha e cobre. In: **Engenharia no Século XXI**, v. 3. Ed. Belo Horizonte: Poisson, 2019. Cap. 7, p. 48 – 55.
doi: 10.5935/978-85-7042-091-6.

REIS, I. M. *et al.* Influência das fibras vegetais em compósitos poliméricos com carga de resíduo sólido de mármore e granito. In: **Anais do 11º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos**, 2020, Porto Alegre – RS, Brasil.

RIBEIRO, L. M. *et al.* Flamabilidade e retardância de chama do compósito: Poliéster insaturado reforçado com fibra de abacaxi (PALF). **HOLOS**, vol. 1, 2013, pp. 115-126. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.

RODRIGUES, D. N. **Influência da adição de resíduo de mármore e granito em compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de coco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará, 2016.

ROY, A. *et al.* Improvement in mechanical properties of jute fibres through mild alcalin treatment as demonstrated by utilization of the weibull distribution model. **Bioresource Technology**, n. 107, p. 222-228, 2012.

SANCHEZ, E. M.; CAVANIC C. S.; SANCHEZ, C. G. Compósitos de resina de poliéster insaturado com bagaço de cana-de-açúcar; Influência do tratamento das fibras nas propriedades. **Polímeros**, v. 20, p. 194-200, 2010.

SANTOS, D. G. dos. **Estudo termo hídrico e caracterização mecânica de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra vegetal: simulação 3D e experimentação**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2017.

SANTOS, A. J. G dos. **Caracterização de material compósito incorporado com fibras de bambu (*Bambusa vulgaris*) e resíduos sólidos industriais para utilização como componente estrutural para construção civil**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2020.

SERCEL, Soluções em fibras. Hand lay-up: O que é e como funciona. Disponível em: < <http://www.sercel.com.br/blog/hand-lay-up-o-que-e-e-como-funciona.html>>. Acesso em: 16/06/2022.

SILAEX, Química LTDA. Resinas poliéster. 2018. Disponível em: < <http://www.silaex.com.br> >. Acesso em: 30/02/2022.

SILVA, L. J. **Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos laminados com fibras vegetais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João del-Rei, MG, 2011.

SILVA, I. L. A. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta**. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2014.

SILVA, L. S.; DEMETRIO, J. C. C.; DEMETRIO, F. J. C. Concreto sustentável: Substituição da areia natural por pó de brita para confecção de concreto simples. In: **Anais do International Workshop Advances in Cleaner Production**. São Paulo, SP, Brasil, 2015.

TARGA, G. N.; PIRES, E. N.; AL-QUERESHI, H. A.; BARRA, G. M. O. Produção e caracterização de um compósito de fibra de jura e resina de poliéster insaturado. In: **Anais do 10 ° Congresso Brasileiro de Polímeros**. Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2009.

ULLAH, S.; AHMAD, F.; SHARIFF, A. M.; BUSTAM, M. A. **Synergistic effects of kaolin clay on intumescent fire retardant coating composition for fire protection of structural steel substrate**. *Polymer Degradation and Stability*, v. 110, p. 91-103, 2014.

VAN VLACK, L. H. **Elements of Materials Science and Engineering**. Ann arbor, Adisson-Wesley, 489p, 1988.

VIANA, J. R. *et al.* Comparative analysis of solid state hydroxyapatite synthesis. **Revista Matéria**, v. 25, n. 1, 2020.

VIEIRA, Karina. **Síntese e caracterização de um compósito polimérico biodegradável utilizando poli (ácido láctico) e borra de café.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Joinville, 2021.