



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

RICARDO FERNANDES DE SOUZA

**OBTENÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE UM
COMPÓSITO DE MATRIZ DE POLIESTER E CARGA DE PÓ DE
CARNAÚBA**

NATAL
2020

RICARDO FERNANDES DE SOUZA

**OBTENÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE UM COMPÓSITO DE
MATRIZ DE POLIESTER E CARGA DE PÓ DE CARNAÚBA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos parciais para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza

NATAL
2020

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Souza, Ricardo Fernandes de.

Obtenção, caracterização e aplicação de um compósito de matriz de poliéster e carga de pó de Carnaúba / Ricardo Fernandes de Souza. - 2021.

70f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Natal, 2021.

Orientador: Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza.

1. Carnaúba - Tese. 2. Compósito Polimérico - Tese. 3. Fogão Solar - Tese. I. Souza, Luiz Guilherme Meira de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621

RICARDO FERNANDES DE SOUZA

**OBTENÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE UM COMPÓSITO DE
MATRIZ DE POLIESTER E CARGA DE PÓ DE CARNAÚBA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos parciais para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Aprovada em ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza – UFRN
(Orientador)

Profa. Dra. Amanda Melissa Damião Leite
(Examinadora Interna - UFRN)

Prof. Dr. José Heriberto Oliveira do Nascimento
(Examinador Interno - UFRN)

Prof. Dr. Thercio Henrique de Carvalho Costa
(Examinador Interno - UFRN)

Prof. Dr. Daniel Joaquim da Conceição Moutinho
(Examinador Externo - IFPA)

Prof. Dr. Luiz Guilherme Vieira Meira de Souza
(Examinador Externo - IFRN)

*“O verdadeiro e o justo são por
natureza mais fortes que seus opostos”.*

Meu pai

AGRADECIMENTOS

Aos alunos que fazem pesquisas no LMHES/UFRN, que apoiaram em todos os momentos a realização do trabalho. Em especial ao amigo Aldo Paulino de Medeiros Júnior (Servidor) que contribuiu de forma incansável para o desenvolvimento do meu trabalho, sobretudo ao professor e orientador Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza que há quase 40 anos trabalha no desenvolvimento de tecnologias para a sociedade menos favorecida.

RESUMO

A carnaúba, a árvore da vida, é uma palmeira encontrada em todas as regiões do Brasil e que tem inúmeras aplicações, da eletrônica aos cosméticos, com maior ênfase na cera. Obteve-se e estudou-se um compósito de matriz polimérica de resina de poliéster e carga de pó dos pecíolos, parte fibrosa da palha da carnaúba (PPFC). O pó foi obtido pela trituração em forrageira e posterior peneiramento, gerando resíduos com diferentes granulometrias. Foram testadas todas as granulometrias obtidas e escolheu-se a menor, em função de sua maior viabilidade para obtenção do compósito, pela sua melhor processabilidade. Foram escolhidas três proporções em massa de mistura entre matriz e resíduos, 5%, 7,5% e 10%, uma vez que acima desse percentual havia um comprometimento na processabilidade e obtenção do compósito estudado. Foram realizadas caracterizações mecânicas, térmicas e ambientais que demonstraram a viabilidade do compósito proposto. Demonstrou-se que o pó da carnaúba esteve presente no compósito como carga de enchimento. O compósito de melhor desempenho, C₃, foi escolhido para a fabricação de uma parábola de um fogão solar à concentração, podendo também ser utilizado para fabricação de painéis decorativos, móveis, obras de arte, artesanato e bancadas.

Palavras-chaves: Carnaúba. PPFC. Compósito Polimérico. Resina Poliéster. Fogão Solar.

ABSTRACT

The carnauba, the tree of life is a palm tree found in regions of Brazil and has many applications, from electronics to cosmetics, with a greater emphasis on wax. A polymer matrix composite of polyester resin and petiole powder, a fibrous part of the straw, was obtained and studied. The powder was obtained using forage grinding and subsequent sieving, generation residues with different grain sizes. All the obtained granulometries were tested and the smaller one was chosen, due to its greater viability to obtain the composite, due to its better processability. Three mass proportions of the mixture between matrix and residues were chosen, 5%, 7.5% e 10%, since above that percentage there was a compromise in the processability and obtaining the composite studied. Mechanical, thermal and environmental characterizations were performed, which demonstrated the feasibility of the proposed composite. The carnauba powder was shown to be present in the composite as a filler. The best formulation, 10%, was chosen for the manufacture of a decorative panel to be used as TV stand, and could also be used for the manufacture of furniture and parabolas for solar cookers.

Keywords: Carnauba. Petioles. Polymeric Composite. Filler and Residues.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação e subclasses dos Compósitos.....	18
Figura 2 - Carnaúba branca, sem espinhos no pecíolo (A) e carnaúba comum, com espinhos no pecíolo (B). Ipanguaçu, Rio Grande do Norte (RN).....	21
Figura 3 - A Carnaúba <i>Copernicia prunifera</i>	23
Figura 4 - Mapa da distribuição de carnaúba no Nordeste Brasileiro	24
Figura 5 - Folhas de uma carnaubeira.	25
Figura 6 - Fluxograma dos processo de fabricação e caracterização do compósito.	29
Figura 7 - Fluxograma das etapas.....	30
Figura 8 - Etapas do processamento das fibras de carnaúba.	31
Figura 9 - Fibras e pós obtidos dos pecíolos da folha de carnaúba após trituração e peneiramento.	31
Figura 10 - Moldes A e B utilizados para a fabricação dos CPs para ensaios mecânicos.	32
Figura 11 - Mistura entre os componentes do compósito, resina poliéster e PPFC.	34
Figura 12 - Etapas do processo de fabricação das placas dos compósitos para produção dos corpos de prova para ensaios de caracterização.	35
Figura 13 - Fluxograma das etapas caracterização dos compósitos e resina matriz.....	37
Figura 14 - Máquina utilizada para ensaio de impacto Charpy.....	38
Figura 15 - Máquina Universal Shimadzu, modelo AGX 300 e que tem capacidade máxima.....	39
Figura 16 - Corpos de prova de cada formulação para ensaios de tração e flexão em três pontos.....	39
Figura 17 - Corpo de prova da resina poliéster em ensaio de análise térmica.....	40
Figura 18 - Corpos de provas para ensaio de absorção de água.....	41
Figura 19 - a) Densímetro digital DSL 910 utilizados no ensaio de densidade aparente e b) Uma amostra de cada formulação do compósito.	41
Figura 20 - Corpo de prova dos ensaio de envelhecimento, antes (b) e após (a) exposição.	42
Figura 21 - Analisador térmico utilizado no ensaio.	43
Figura 22 - Equipamentos para análise de microestrutura - MEV.	44
Figura 23 - Etapas do processo de fabricação da parábola do fogão solar à concentração (aplicabilidade do compósito estudado).....	45

Figura 24 - Fogão solar à concentração com parábola absorvedora fabricada em compósito de resina de poliéster e PPFC.	46
Figura 25 - Amostras do teste de envelhecimento. a) Após um ano expostas as variações das condições climáticas. b) Antes do ensaio de envelhecimento.....	56
Figura 26 – Curva termogravimétrica da matriz.	57
Figura 27 - Curva termogravimétrica de C ₃	58
Figura 28 - Imagens de MEV nas superfícies de fratura da resina poliéster.	60
Figura 29 - Imagens de MEV nas superfícies de fratura do compósito C ₁	60
Figura 30 - Imagens de MEV nas superfícies de fratura do compósito C ₂	61
Figura 31 - Imagens de MEV nas superfícies de fratura do compósito C ₃	61
Figura 32 - Alimentos cozidos no fogão solar fabricado com o material compósito estudado.....	63
Figura 33 - Alimentos cozidos no fogão solar fabricado com o material compósito estudado.....	63
Figura 34 - Alimentos cozidos no fogão solar fabricado com o material compósito estudado.....	64
Figura 35 - Alimentos cozidos no fogão solar fabricado com o material compósito estudado.....	64

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Formulações dos compósitos para posterior caracterização.	34
Tabela 2 - Dimensões e quantitativos dos corpos de provas e normas utilizadas nos ensaios de caracterização.....	36
Tabela 3 - Resultados dos parâmetros do ensaio da resistência à tração para as formulações dos compósitos e da resina poliéster.....	47
Tabela 4 - Resultados dos parâmetros do ensaio da resistência à flexão para as formulações dos compósitos e da resina poliéster.....	49
Tabela 5 - Resultados da energia de absorção de impacto para as formulações dos compósitos e da resina poliéster	50
Tabela 6 - Resultados das propriedades térmicas para compósitos e resina poliéster	51
Tabela 7 - Resultados da densidade aparente da resina poliéster e compósitos.....	52
Tabela 8 - Resultados do ensaio de absorção de água destilada e água do mar para as formulações do compósito e resina poliéster.....	53
Tabela 9 - Resultados da variação da perda de massa do ensaio de envelhecimento das formulações dos compósitos e da resina poliéster.	55
Tabela 10 - Valores de perda de massa para matriz e formulação do compósito em função da temperatura no ensaio de TGA.	58
Tabela 11 - Valores de T_{onset} , T_{pico} e perda de massa para a resina poliéster e configurações do compósito híbrido	59
Tabela 12 - Resumo dos resultados dos ensaios.....	62

LISTA DE UNIDADES DE MEDIDAS

%	Porcentagem
°C	Grau Celsius
°C/min	Grau Celsius por minuto
°C.cm/W	Grau Celsius centímetro por Watt
cm²	Centímetro quadrado
g	Grama
g/cm³	Grama por centímetro cúbico
h	Hora
J	Joule
J/cm²	Joule por centímetro quadrado
kg	Quilograma
kgf.m	Quilograma força metro
kN	Quilo Newton
m²	Metro quadrado
MJ/ m³.K	Mega Joule por metro cúbico kelvin
MPa	Mega Pascal
mg	Miligrama
mm	Milímetro
mm.hg	Milímetro de mercúrio
mm²/s	Milímetro quadrado por segundo
ml/min	Mililitro por minuto
min	Minuto
W/m.k	Watt por metro kelvin

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	14
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	17
2.1.1 Classificação dos materiais compósitos	17
2.2 MATRIZES POLIMÉRICAS	18
2.2.1 Matrizes Poliméricas Termorrígidas	19
2.2.2 Resina Poliéster	19
2.2.3 Resina Poliéster Ortoftálica	20
2.2.4 Reforços da matriz polimérica	20
2.3 FIBRAS NATURAIS	21
2.3.1 A Carnaúba	22
2.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS	26
2.5 ESTADO DA ARTE	26
2.5.1 Fogões solares	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 MATERIAIS	30
3.1.1. Etapas da seleção dos pecíolos da folha da carnaúba	30
3.2 MÉTODOS	33
3.2.1 Ensaio de Impacto Charpy	38
3.2.2 Ensaios de Tração e Flexão	38
3.2.3 Ensaios térmicos	39
3.2.4 Ensaio de Absorção de água	40
3.2.5 Ensaio de Densidade	41
3.2.6 Ensaio de Envelhecimento (Degradação)	42
3.2.7 Ensaio de Análise Termogravimétrica (TGA)	42
3.2.8 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	43
3.3 APLICABILIDADE DO COMPÓSITO	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 ENSAIOS MECÂNICOS	47
4.1.1 Ensaio de Tração	47
4.1.2 Ensaio de Flexão	48

4.1. 3 Ensaio de Impacto Charpy	50
4.2 ENSAIOS TÉRMICOS	50
4.3 ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS	52
4.3.1 Ensaio de densidade	52
4.3.2 Ensaio de Absorção de água destilada e água do mar	53
4.3.3 Ensaio de Envelhecimento (Degradação).....	55
4.3.4 Ensaio de Análise termogravimétrica (TGA)	57
4.3.5 Ensaio de Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	60
4.3.6 Resumo dos resultados dos ensaios.....	62
4.3.7 Aplicabilidade do compósito PPFC + RP.....	63
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	65
5.1 CONCLUSÕES.....	65
5.2 SUGESTÕES.....	66
REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

As questões relativas ao meio ambiente atualmente estão sendo amplamente discutidas, tanto na área de preservação ambiental, como no controle de emissão de gases e a busca de novas tecnologias que minimizem os danos ambientais ao planeta tornou-se prioridade.

Problemas como poluição nas águas, efeito estufa, chuva ácida, aumento do buraco da camada de ozônio e o aquecimento global têm tomado as páginas de notícias cada vez mais, juntamente com fenômenos catastróficos, muitos provocados por essas mudanças climáticas no globo terrestre.

Os compósitos estão em grande destaque no campo dos materiais, trazendo uma significativa amplitude de possibilidades de uso em substituição aos materiais convencionais, por combinar propriedades inexistentes em um único material. Antes um material só era considerado compósito se a carga a matriz adicionada fosse de reforço. Predominavam as fibras sintéticas de vidro, fibra de carbono e kevlar.

Com a diversidade da fauna e flora brasileiras, com uma infinidade de espécimes vegetais, surgem as fibras naturais como possibilidade grandiosa de utilização de tais espécies como carga de enchimento em novos materiais compósitos (SOUZA, 2019, VIEIRA, 2018, DOS SANTOS JUNIOR, 2017, LEÃO, 2013).

Outra possibilidade de uso em materiais compósitos surgiu principalmente pela vertente ecológica: a retirada do meio ambiente de resíduos sólidos resultantes de processos industriais (COSTA, 2017, GOMES, 2015, DOS SANTOS, 2015).

As vertentes econômica e ecológica abriram amplas possibilidades para o uso dos compósitos em vários setores industriais. Nas áreas automotiva, naval, aeronáutica, saneamento, balística, artesanal, telecomunicações, construção civil, arquitetura e decoração, tal inserção tornou-se uma prioridade, para baixas e médias solicitações mecânicas, devido às características de boa estética, leveza e significativas resistências térmica e acústica (SOUZA, 2019, ANNAMALAI; RAMASUBBU, 2018; BODUR; ENGLUND; BAKKAL, 2017; SATHISHKUMAR *et al.*, 2016; SINGH *et al.*, 2016).

A carnaubeira, cujo nome científico, no Brasil, é *Copernícia prunífera*, é uma palmeira que habita as margens de rios da região Nordeste e produz uma cera de alto valor econômico e social. É chamada de Árvore da Vida, porque se presta a uma infinidade de usos ao homem.

A carnaúba é utilizada em mais de 60 produtos, desde eletrônicos a cosméticos. Por ser uma planta nativa, a carnaúba não necessita de adubação, agrotóxicos, ou mecanização agrícola. A maior aplicabilidade de um subproduto da carnaúba é a cera. A cera de folhas jovens é utilizada no fabrico de velas, filmes plásticos e fotográficos, vernizes, lubrificantes, fósforos, isoladores, cosméticos (CARVALHO, 2011; FREITAS, 2011; DÜŞÜNCELİ *et al.*, 2019; BATISTA, 2014).

A produção de cera com carnaúba é o tópico acadêmico mais difundido no uso da carnaúba. A utilização de fibras de folhas de carnaúba para a obtenção de materiais compósitos só foi encontrada em poucos artigos, apenas no Brasil, nas regiões Norte e Nordeste (CARVALHO, 2011; FREITAS, 2011; MARQUES, 2012; COSTA, 2015; COSTA *et al.*, 2013; MELO, 2012).

O presente trabalho buscou a obtenção de um compósito utilizando fibras dos pecíolos das folhas da carnaúba e resina poliéster. A resina foi escolhida em função de sua fácil processabilidade e custo muito mais baixo dentre as matrizes termorrígidas.

Foram obtidas fibras de diferentes espessuras e tamanhos, chegando-se a um tipo de fibra praticamente em pó, que foi a granulometria de melhor desempenho na processabilidade do compósito.

Testes preliminares demonstraram que a quantidade mássica máxima das fibras em relação à resina, seria de 15%, pois acima dessa proporção a processabilidade do compósito ficava comprometida. Foram escolhidas, então, três formulações a serem testadas: 5,0%, 10% e 15%.

Como aplicabilidade do compósito foi fabricada uma parábola, com a formulação 15%, que representa o elemento principal de um de um fogão solar à concentração que foi fabricado e testado para propiciar a cocção de alimentos (LION FILHO, 2013; MARQUES, 2016; MEDEIROS JÚNIOR, 2016).

O fogão proposto é um protótipo solar de média concentração que trabalha com a concentração dos raios incidentes na parábola refletora em uma região pontual chamada foco e destina-se ao uso doméstico em zonas rurais e urbanas, no período de 9h às 15h.

O trabalho tem como principais inovações a utilização das fibras dos pecíolos da carnaubeira e a aplicação do compósito obtido não encontradas na literatura especializada em materiais compósitos.

Outra inovação do trabalho foi a utilização do espelho plástico para o recobrimento da parábola. Tal espelho tem como grande vantagem a possibilidade de recobrimento do perfil parabólico com segmentos de grande área, pela flexibilidade dos segmentos espelhados, capazes de se adaptarem ao perfil não plano da parábola.

A fibra de carnaúba substituiu a fibra de vidro tradicionalmente usada para a fabricação da parábola, o que tornou os processos de fabricação e montagem do fogão à concentração menos danosos a saúde de quem fabricava a parábola do fogão solar. Esses processos podem ser repassados tecnologicamente com mais facilidade para as comunidades de baixa renda, que poderiam utilizá-lo e/ou fabricá-lo para geração de emprego e renda.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Obter, caracterizar e aplicar um compósito de matriz de resina poliéster e carga de pó dos pecíolos das folhas da carnaúba (*Copernicia prunifera*).

1.2.2 Objetivos específicos

- Colher os pecíolos da carnaúba (*Copernicia prunifera*);
- Processar os pecíolos utilizando forrageira;
- Definir as formulações dos compósitos;
- Obter os compósitos nas formulações 5%, 7,5% e 10% utilizando o pó dos pecíolos da carnaúba;
 - Fabricar as placas dos compósitos para retirada dos CPs;
 - Caracterizar os compósitos;
 - Demonstrar a aplicabilidade dos compósitos estudados, escolhendo o mais viável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos teóricos e fundamentos importantes que dão sustentação a esta pesquisa. A revisão bibliográfica vai abordar pesquisas relevantes sobre os compósitos reforçados com fibras naturais, com a descrição de suas características e classificações, assim como as propriedades mecânicas dos compósitos de fibras naturais, além de apresentar a identificação e particularidades da Carnaúba (*Copernicia Prunífera*).

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos são materiais multifásico que apresentam propriedades de ambas as fases que o constituem, matriz e carga (reforço ou enchimento).

A utilização dos compósitos tem sido buscada cada vez com mais frequência em vários segmentos da indústria, oferecendo assim melhores características estruturais para determinadas aplicações que seus constituintes individualmente não ofereceriam. Acrescente-se a isso os fatores econômicos e ambientais que raramente seriam possíveis em outro material não compósito.

Com a obtenção de materiais compósitos busca-se, geralmente, alterar seu comportamento mecânico, com aumento de resistência mecânica aliada a diminuição do peso, características essenciais para a substituição de materiais convencionais.

2.1.1 Classificação dos materiais compósitos

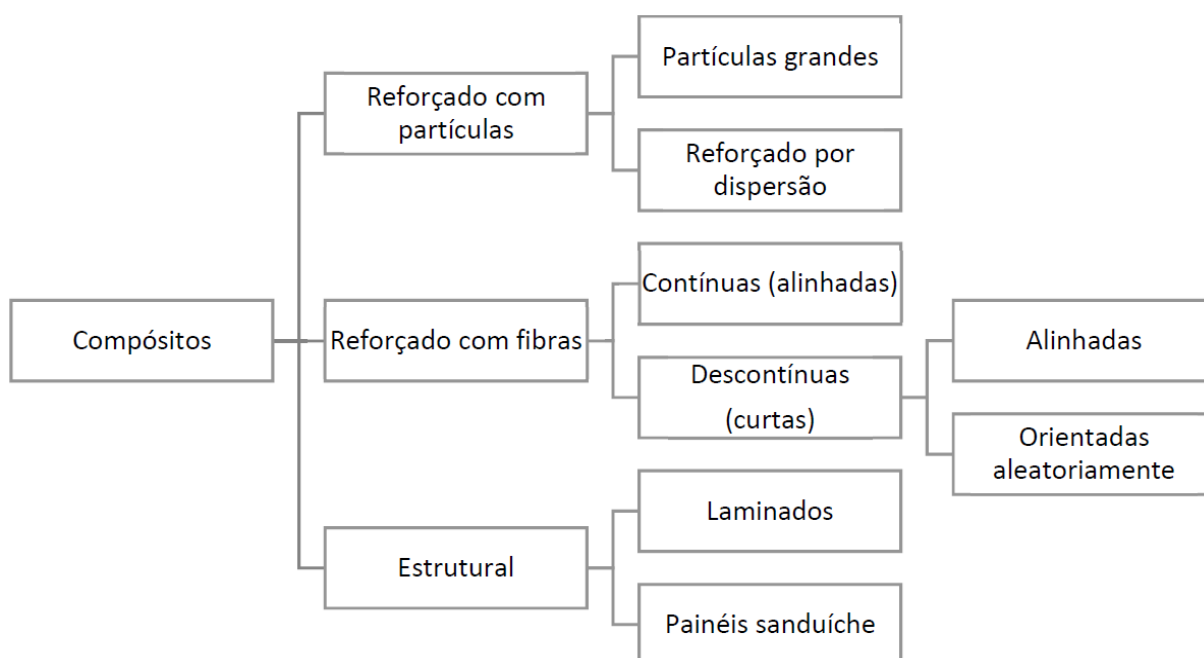
Os materiais compósitos podem ser classificados pela natureza dos materiais que os compõem e dividem-se em duas grandes categorias: materiais compósitos naturais e materiais compósitos sintéticos.

Os compósitos são classificados por sua matriz, em compósitos de matriz polimérica (CMP); compósitos de matriz metálica (CMM); e compósitos de matriz cerâmica (CMC). Os CMP são relevantes por sua leveza e baixo custo, os CMM por suas propriedades mecânicas e os CMC por sua resistência a altas temperaturas e resistência ao desgaste.

Os CMP atrativos são atrativos por apresentarem boa resistência a ataques químicos, terem maior leveza, podem ter boa resistência mecânica, facilidade de moldagem e principalmente menor custo. Dentre as principais desvantagens dos compósitos estão a dificuldade de trabalho em elevadas temperaturas e alta sensibilidade à radiação.

A Figura 1 mostra a classificação dos materiais compósitos, apresentando as principais divisões, características e subclasses que são associadas a cargas de reforço/enchimento na fabricação de um determinado compósito (CALLISTER, 2016).

Figura 1 - Classificação e subclasses dos Compósitos.



Fonte: Callister (2016).

2.2 MATRIZES POLIMÉRICAS

De acordo com Leão (2013), várias resinas termoplásticas e termofixas vêm sendo utilizadas como matrizes em compósitos, sendo as termofixas mais utilizadas em compósitos de alto desempenho, as fenólicas, epóxis, bismaleimidas e poliamidas que exibem excelente resistência a solventes como também a altas temperaturas. Segundo estimativas, mais de três quartos de todas as matrizes de compósitos poliméricos são termofixas.

A incessante procura por materiais ecologicamente corretos, nas duas últimas décadas, tem gerado a obtenção de novos materiais com carga de fibras naturais. A utilização destas fibras em compósitos estruturais vem crescendo principalmente no setor industrial por possuírem baixa densidade, a boa adesão à algumas matrizes baixo custo, pois são oriundas de fontes renováveis e inesgotáveis.

Em geral, as matrizes poliméricas têm baixa resistência e baixo ponto de fusão e apresentam uma ductilidade consideravelmente superior a das fibras, além de servirem como meio de ligação entre as fibras de um material compósito e favorecerem a transferência e distribuição dos esforços externos para o material de reforço. Atuam, também, como elemento de proteção contra a abrasão mecânica mútua e de reações químicas com o ambiente (SILVA, 2013). (FORD *et al.*, 2010).

2.2.1 Matrizes Poliméricas Termorrígidas

Os principais tipos de resinas termofixas são: Poliéster, Fenólicas, Epoxi e as Poliuretânicas. Dentre as resinas citadas, será enfatizada a resina termofixa do tipo Poliéster, utilizada na obtenção do compósito proposto.

2.2.2 Resina Poliéster

Resina poliéster é um polímero obtido por meio de uma reação de condensação entre um poliálcool e um ácido policarboxílico. A natureza do ácido influencia nas propriedades finais das resinas poliésteres. Possui aparência líquida e viscosa e pode ser encontrada nos tipos: ortoftálica, isoftálica e tereftálicas. Os constituintes que dão origem as resinas em questão, são insaturados, isto é, contêm uma ligação dupla relativa entre os átomos de carbono, sendo a resina resultante insaturada (SILVA, 2010 apud GOMES, 2015).

As resinas poliméricas a base de poliéster é às de menor custo de aquisição existentes no mercado, usualmente empregadas na manutenção de piscinas de fibra de vidro.

Apresentam como vantagens estabilidade dimensional, resistência a ambientes quimicamente agressivos, excelentes propriedades elétricas, fácil pigmentação, curam a frio e utilização de moldes simples e de baixo custo.

2.2.3 Resina Poliéster Ortoftálica

A resina utilizada para esta pesquisa do compósito foi a resina ortoftálica que é utilizada em atividades como laminação em reforço de fibras, artesanato, gel-coat primer, entre outros usos. A resina poliéster ortoftálica é obtida por meio do diácio (ácido ftálico), que tem sua origem por meio da reação química formada pelo grupo carboxila na posição orto do anel benzênico (SOUZA, 2019).

Essa resina possui baixa viscosidade e reatividade, além de ter baixo custo e, quando utilizada nos compósitos poliméricos, proporciona leveza em virtude do seu baixo peso específico, oferecendo uma boa resistência química. Possui ainda alta durabilidade e apresenta resistência mecânica a intempéries. Assim, essas características da resina ortoftálica são fundamentais para reduzir os custos indiretos na fabricação dos compósitos (MARQUES, 2016).

Outros aspectos positivos apresentados pela resina ortoftálica estão relacionados a sua praticidade, visto que não requer a utilização de muitos recursos para sua aplicação. Após o processo de cura, as peças que receberam as aplicações das resinas ortoftálica podem ser submetidas aos processos de lixamento, torneamento e polimento. Preservando assim, suas interfases de danos, rachaduras ou cisalhamento mantendo a integridade da peça ou do produto (SANTOS JÚNIOR, 2017).

2.2.4 Reforços da matriz polimérica

O compósito é determinado pelos materiais constituintes, em função da combinação de suas propriedades. A carga geralmente determina a forma geométrica do compósito, assim como sua densidade e a distribuição volumétrica específica que preferencialmente deve tender à homogeneidade.

A carga de enchimento ou de reforço, também conhecida como fase dispersa, possui a função de absorver cargas mecânicas aplicadas, prover a rigidez e a resistência mecânica do compósito, entretanto esse comportamento não ocorre se estiver isolado de uma matriz (ABMACO, 2009 apud GEHLEN, 2014; ADAMIAN, 2009).

O modo como a carga é disposta na matriz, influencia diretamente a isotropia do sistema compósito. Quando a carga está na forma de partículas, com

todas as dimensões aproximadamente iguais, o material compósito comporta-se essencialmente como um material isotrópico, cujas propriedades independem da direção.

Quando as dimensões da carga são desiguais, o material compósito pode ainda se comportar como um material isotrópico, desde que o reforço possa ser disposto aleatoriamente, como por exemplo, o caso de compósitos reforçados com fibras curtas. Entre os tipos de reforços (fibras, partículas, escamas, lâminas) será destacada a utilização da fibra como reforço em compósito polimérico.

2.3 FIBRAS NATURAIS

Devido a enorme diversidade florestal no Brasil as fibras naturais de origem vegetal representam uma vertente muito buscada na atualidade para a obtenção de compósito para fins variados utilizando diferentes tipos de matrizes poliméricas.

As fibras naturais podem ser aplicadas em uma grande variedade de produtos. Suas propriedades mecânicas são consideradas baixas comparadas com as concorrentes sintéticas mais utilizadas, como a fibra de vidro.

Para este estudo serão utilizados os pecíolos da carnaúba comum, que se diferencia da carnaúba branca, pelos frutos maiores e presença de espinhos nos pecíolos, conforme figura abaixo:

Figura 2 - Carnaúba branca, sem espinhos no pecíolo (A) e carnaúba comum, com espinhos no pecíolo (B). Ipanguaçu, Rio Grande do Norte (RN).



Fonte: Souza (2019, p. 589).

As fibras oriundas do caule ou das folhas são conhecidas como fibras duras, de maior interesse para serem utilizadas como reforço em compósitos poliméricos. Entretanto, as fibras de semente e frutos também podem ser utilizadas (SYMINGTON *et al.*, 2009; ELENGA *et al.*, 2009 apud CARVALHO, 2011).

As fibras vegetais são agrupadas em cinco tipos, dependendo da parte e do tipo de vegetal do qual foi retirada e podem ser classificadas em:

- Fibras de gramíneas: retiradas das hastes das plantas monocotiledôneas, tendo como exemplo os cereais (trigo, aveia, cevada, arroz e outros), além do junco, bambu e bagaço de cana.
- Fibras de folhas: retiradas ao longo do comprimento das folhas, exemplos típicos incluem a abacá, sisal e henequém.
- Fibras de caule: são de maços retirados do interior da casca (caule) de hastes de plantas, tendo como exemplos, linho, Juta, cânhamo e kenaf.
- Fibras de sementes e frutos: os exemplos mais comuns são o algodão, a paina e a esponja de *Luffa cylindrica*.
- Fibras de madeiras: são fibras provenientes do xilema de vegetais (angiospermas e gimnospermas), tendo como exemplos os eucaliptos, abetuos, pinus, entre outros (ABREU, 2009).

2.3.1 A Carnaúba

A carnaubeira, cujo nome científico, no Brasil, é *Copernicia prunífera*, é uma palmeira que habita as margens de rios da região Nordeste e produz uma cera de alto valor econômico e social. É chamada de Árvore da Vida, porque se presta a uma infinidade de usos ao homem. Essa planta é uma palmeira da classe das monocotiledôneas, da família *Palmae*. Do gênero *Copernicia* há um total de 28 espécies distribuídas na Índia e na América do Sul (LORENZINE *et al.*, 1996; GOMES *et al.*, 2009 apud CARVALHO, 2011). A Figura 3 mostra uma plantação de carnaúba.

Figura 3 - A Carnaúba *Copernicia prunifera*



Fonte: o autor.

Além da *Copernicia prunifera*, duas outras espécies são encontradas no continente Sul Americano: a *Copernicia tectorum*, encontrada na Venezuela e na Colômbia, e a *Copernicia alba*, encontrada na Bolívia, Argentina e Paraguai. No Brasil a espécie *Copernicia prunifera* é encontrada, principalmente, na região Nordeste (LORENZINE *et al.*, 1996; CUNHA, 1994 apud CARVALHO, 2011).

Países como a Alemanha, Índia, Japão e Estados Unidos já tentaram sem sucesso cultivar essa palmeira. Um fato importante é que sua colheita não agride o meio ambiente, uma vez que as folhas extraídas renascem na safra seguinte.

A carnaúba é uma das principais espécies extrativas do semiárido nordestino, desenvolvendo-se nas áreas baixas circundantes aos recursos hídricos, várzeas e planícies de inundação, constituindo as chamadas matas-galerias ou matas-ciliares, sendo que no Estado do Ceará a sua maior ocorrência dá-se nos vales dos rios Coreaú, Acaraú, Jaguaribe e Cauípe. É encontrada nos estados do Ceará, Piauí, Rio Grande do Norte. Mas ainda existem carnaubais no Maranhão, Bahia (no vale do São Francisco), Pernambuco e Paraíba.

Figura 4 - Mapa da distribuição de carnaúba no Nordeste Brasileiro



Fonte: Câmara Setorial da Carnaúba (2009).

Na região nordestina, é possível verificar habitações inteiras construídas com materiais retirados da carnaúba. As raízes têm uso medicinal. Os frutos são ricos em nutrientes para a ração animal, o tronco é madeira de qualidade para a construção. As palhetas secas são usadas na produção artesanal, fertilizante do solo, revestimento de casas, etc. (DACOSTA, 2004).

Da polpa dos frutos da carnaúba, extrai-se uma espécie de farinha. A amêndoa da carnaúba pode ser torrada e moída e usada em substituição ao pó de café. O caule da carnaúba, por ser muito resistente, é usado em construção de edificações, como postes, caibros e ripas, e em objetos de uso doméstico.

Das folhas aproveita-se a palma inteira, após a retirada da cera, para cobrir casas e abrigos, em substituição às telhas. A cera que reveste externamente as folhas, protegendo-as contra a perda de água em tempos de seca é o principal produto do ponto de vista econômico ligado à carnaúba. A cera de folhas jovens é utilizada no fabrico de velas, filmes plásticos e fotográficos, vernizes, lubrificantes, fósforos, isoladores, cosméticos. Participam da composição de cobertura, a

confecção de chips, *tonners*, e indústria alimentícia. A Figura 5 mostra as folhas de uma carnaubeira.

Figura 5 - Folhas de uma carnaubeira.



Fonte: o autor.

A extração da cera tem uma grande demanda por parte de indústrias como a farmacêutica, a alimentícia, a de cosméticos e a indústria de informática, graxas e óleos bem com a de desmoldantes (CARVALHO, 2011).

As fibras da folha da carnaúba têm sua maior aplicação na confecção de cordas e artigos de artesanato (LORENZINE *et al.*, 1996; CUNHA, 1994; BASTOS, 1994; GOMES *et al.*, 2009 apud CARVALHO, 2011). Entretanto, estas fibras apresentam potencial para aplicações de maior valor agregado como é o caso dos materiais compósitos de matriz biodegradável.

Foi apenas a partir de 1920 que a carnaúba começou a crescer dentro do cenário moderno, sendo utilizada no polimento de assoalhos, além de matéria-prima para fabricar papel-carbono, graxa para sapatos e discos de vinil.

Após 1950, a oferta já não conseguia suprir o consumo, fazendo com que a cera fosse sendo substituída por derivados do petróleo, que eram também mais baratos. Mesmo assim, ela nunca deixou de ser utilizada, sendo considerada um artigo de luxo, e com aplicações que não podem ser substituídas por produtos inflamáveis, como em microchips, onde atuam como isolantes térmicos.

Hoje, a carnaúba é utilizada em mais de 60 produtos, desde eletrônicos a cosméticos. Por ser uma planta nativa, a carnaúba não necessita de adubação, agrotóxicos, ou mecanização agrícola. Ela é representativa para o Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte. E gera emprego e renda para os trabalhadores rurais de julho a dezembro, justamente os meses sem atividade na agricultura familiar em toda a região.

Com as adaptações devido ao clima, suas folhas são espinhentas e caule esbranquiçado. A carnaúba nunca pode perder todas as suas folhas, pois morreria. Para poder ficar exposta ao sol, ela desenvolveu uma cera que impermeabiliza a folha, fazendo com que ela não perca líquido para o ambiente (RODRIGUES, 2012).

2.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS

Para a caracterização dos compósitos obtidos foram realizados ensaios, obedecendo Normas pertinentes, para a determinação de parâmetros balizadores de seus comportamentos térmico, mecânico e ambiental.

Foram determinadas as resistências mecânica à tração, flexão e impacto; a resistência térmica associada à condutividade, difusividade e calor específico volumétrico; a resistência à perda de massa pela elevação da temperatura através da TGA; a densidade; a absorção de água e óleo e a perda de massa pela exposição às intempéries (BELARMINO, 2013).

A análise de MEV foi utilizada para o diagnóstico dos defeitos dos processos de fabricação e distribuição da carga de pó dos pecíolos da carnaúba na matriz de resina poliéster. O comportamento do material está relacionado às propriedades mecânicas que determinam sua capacidade de transmitir e resistir aos esforços que lhe são aplicados, que podem causar rompimentos ou deformações.

2.5 ESTADO DA ARTE

Com relação aos compósitos polímeros utilizando, especificamente, a fibra da carnaúba (*Copernicia prunifera*) as pesquisas científicas ainda aparecem em número reduzido na literatura especializada. Os estudos encontrados encontram-se apresentados a seguir, destacando-se que em nenhum deles foi utilizada a resina de poliéster, matriz polimérica utilizada nesse trabalho.

Marques (2012) estudou um compósito biodegradável com pó de palha de carnaúba e matriz de quitosana. Demonstrou que o pó de carnaúba exerceu função de carga de enchimento, pois houve diminuição das propriedades mecânicas, ocasionadas pela baixa adesão da matriz - pó de carnaúba.

Costa *et al.* (2015) pesquisaram um compósito formado de caulim e pó de folhas da carnaúba. O pó de carnaúba foi adicionado em três proporções de massa, 10, 30 e 50%. Foram demonstradas a viabilidade térmica do compósito para isolamento térmico para temperaturas de até 150°C, sua boa relação custo-benefício e sua aplicabilidade limitada.

Costa *et al.* (2013) estudaram um compósito de fibras de carnaúba e matriz de resina de poliéster. Eles analisaram a influência do comprimento das fibras de carnaúba e descobriram que a resistência à tração, embora menor que a da matriz, apresentou melhores resultados para as fibras mais longas.

Melo *et al.* (2012) utilizaram fibras de carnaúba para a obtenção de um compósito biodegradável. Realizaram tratamentos das fibras para melhorar a ligação interfacial, utilizando álcali, peróxido, permanganato de potássio e acetilação. Compósitos biodegradáveis foram preparados utilizando fibras de carnaúba e polihidroxibutirato (PHB) como matriz. A resistência à tração dos compósitos utilizando fibras tratadas com peróxido foi superior. As observações de MEV na superfície de fratura dos compósitos sugeriram uma melhor adesão para fibra-matriz após o tratamento com peróxido.

2.5.1 Fogões solares

Aproveitando a energia que vem do sol, o fogão transforma a irradiação solar em calor para o preparo de alimentos. Quando se refere à zona rural, segundo Lion (2013), 30% da madeira retirada da caatinga do Nordeste brasileiro transformam-se em lenha para cozimento de alimentos. Com a utilização dos fogões solares será possível economizar até 55% dessa lenha evitando o desmatamento.

Júnior, 2016 apontou que a principal vantagem do uso do fogão solar era a disponibilidade de energia gratuita e abundante, além da ausência de chamas, fumaça, perigo de explosão e incêndios.

Na área rural, a substituição de fogões a lenha por fogões solares diminuiria a quantidade de lenha utilizada pela população para a cocção de alimentos,

amenizando a matriz energética brasileira que tem na lenha 27,2% da matriz energética do setor residencial brasileiro. Isso reduziria o consumo do setor residencial que é de 20 milhões de toneladas (MACEDO NETO, 2010).

A utilização do fogão solar por 30% da população brasileira reduziria anualmente a extração de lenha para cozimento de alimentos em 5.370.000 m³, portanto, haveria diminuição do desmatamento e melhora na qualidade do ar (LION, 2013).

Os fogões solares são dispositivos especiais que por intermédio da luz solar servem para o cozimento de alimentos e outras utilidades. Classificam-se em três tipos básicos: cozinhas do tipo caixa, cozinhas concentradoras e cozinhas aquecidas por meio de coletores de placa plana (SOUZA, 2019; MACEDO NETO, 2010).

Os fogões concentradores captam a radiação solar e a concentram numa região focal, onde se posiciona o absorvedor ou forma, promovendo a cocção dos alimentos. Para que façam essa captação e reflexão da luz solar necessitam de refletores, geralmente espelhos distribuídos em uma superfície de forma côncava (JÚNIOR, 2016).

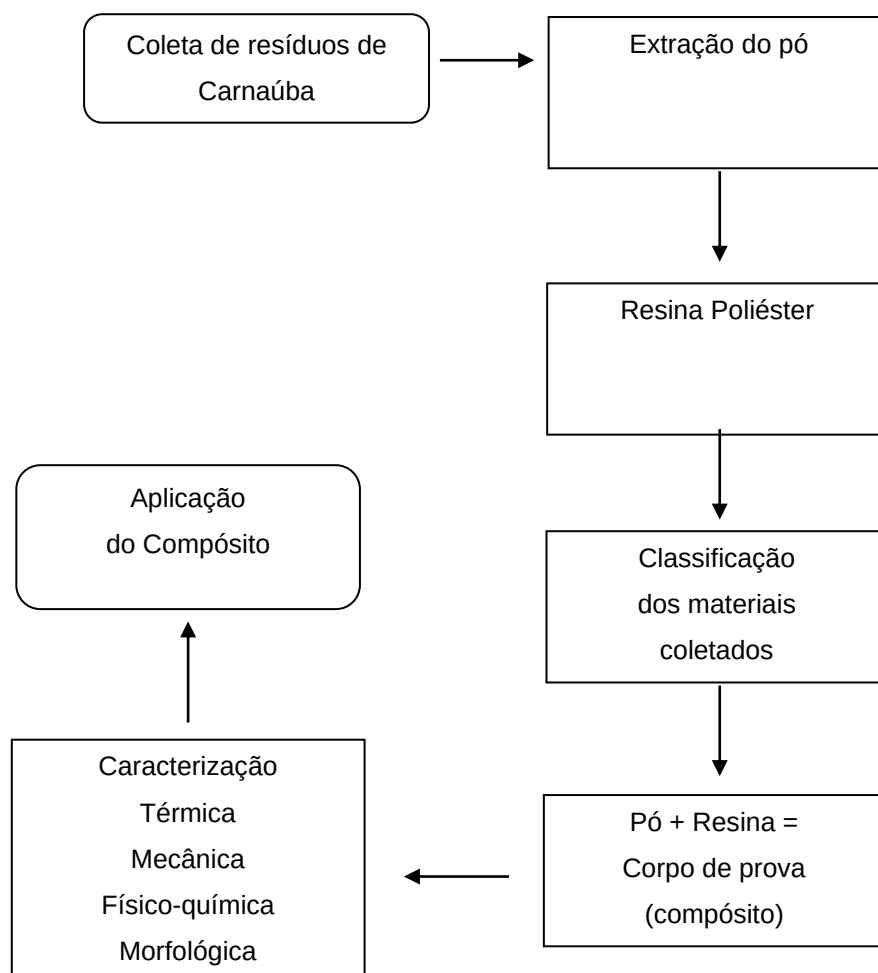
As principais características dos fogões à concentração são: Temperatura de aquecimento bem variável, dependendo do tamanho da parábola refletora, pode ultrapassar 800°C; Tempo de aquecimento rápido, quando comparado com outros fogões; Necessita de luz solar direta e de mecanismo de acompanhamento da trajetória do sol, com reorientação a cada 30 minutos; Apresenta esfriamento rápido dos alimentos se há desvio de foco ou nebulosidade acentuada; É Instável a ventos; Tem risco de fogo ou queimaduras; Podem causar danos aos usuários por raios refletidos e pela elevada exposição ao sol

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais e métodos utilizados para a obtenção do compósito e fabricação das placas, para retirada dos corpos de prova, e dos protótipos, além da caracterização do compósito proposto, obtido e estudado.

Para a caracterização do compósito foram realizados ensaios de tração; flexão; impacto; densidade; resistência térmica; envelhecimento; microscopia eletrônico de varredura (MEV); análise termogravimétrica (TGA) e absorção de água, seguindo normas pertinentes. O fluxograma da Figura 6 mostra as etapas para obtenção e caracterização do compósito.

Figura 6 - Fluxograma dos processo de fabricação e caracterização do compósito.



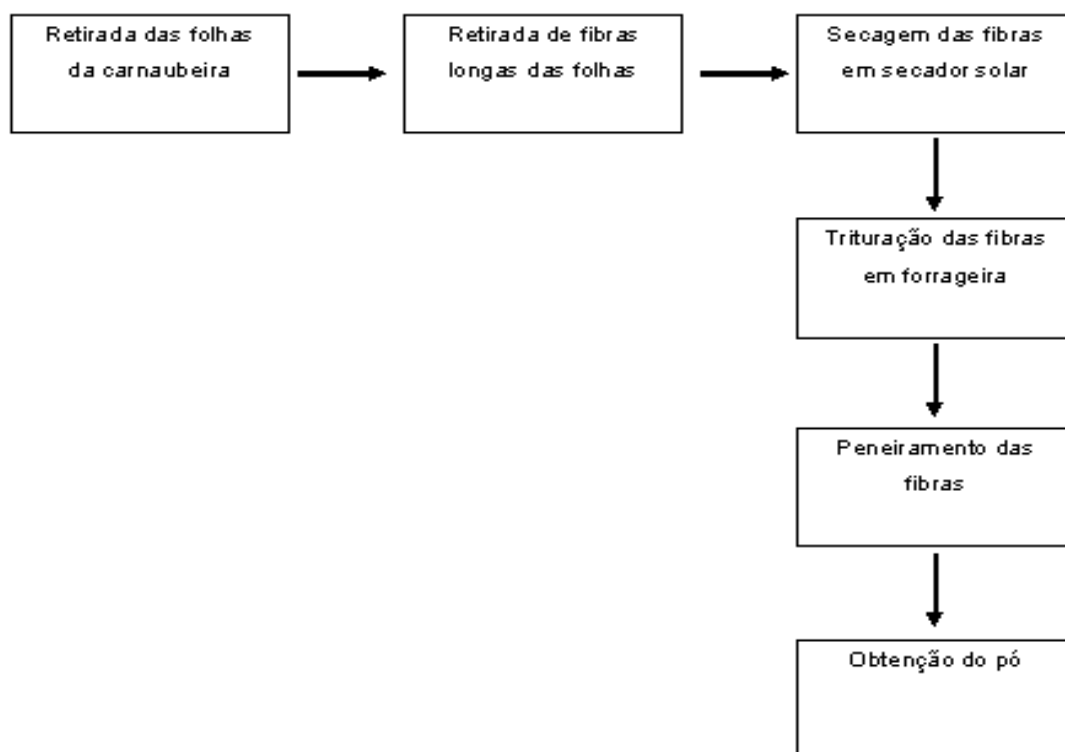
Fonte: o autor.

3.1 MATERIAIS

3.1.1. Etapas da seleção dos pecíolos da folha da carnaúba

Todo o material utilizado neste estudo teve como objetivo a obtenção de um compósito formado do pó dos pecíolos da folha da carnaúba (PPFC), misturados à resina poliéster. Seguindo as etapas do fluxograma da Figura 7 se obteve o pó dos pecíolos da folha da carnaúba.

Figura 7 - Fluxograma das etapas.



Fonte: o autor.

O processo foi iniciado com a retirada das folhas da carnaubeira, de forma manual, no município de Touros, região do Mato Grande, no Rio Grande do Norte. Em seguida foi realizada a retirada de fibras longas das folhas e posterior secagem em secador solar, durante 24 horas. Além disso, foi realizada a trituração das fibras em forrageira e, por fim, o peneiramento das fibras para obtenção do pó dos pecíolos da folha da carnaúba.

A Figura 8 apresenta a carnaubeira, a retirada das folhas e o processo de obtenção das fibras utilizadas no compósito.

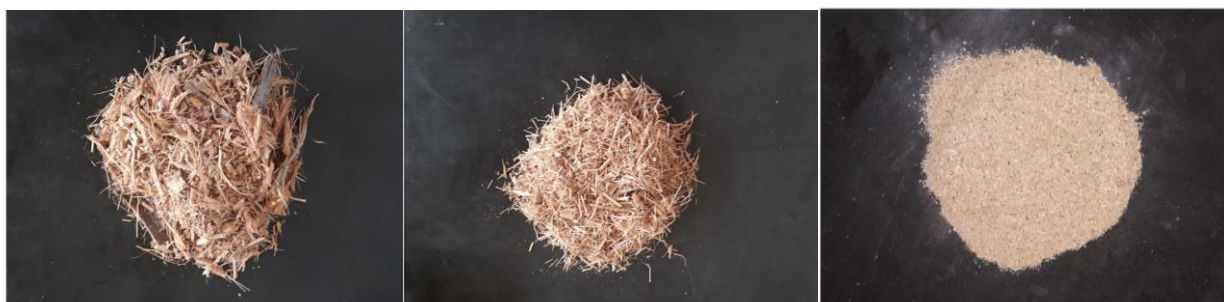
Figura 8 - Etapas do processamento das fibras de carnaúba.



Fonte: Milton Netto.

Quando a palha já estava bem seca passava por uma trituração em forrageira logo depois era peneirada, para a obtenção das fibras com diferentes granulometrias e do pó, conforme mostra a Figura 9. O pó gerado foi utilizado para fabricação dos corpos de prova (CPs) do compósito, utilizados para sua caracterização.

Figura 9 - Fibras e pós obtidos dos pecíolos da folha de carnaúba após trituração e peneiramento.



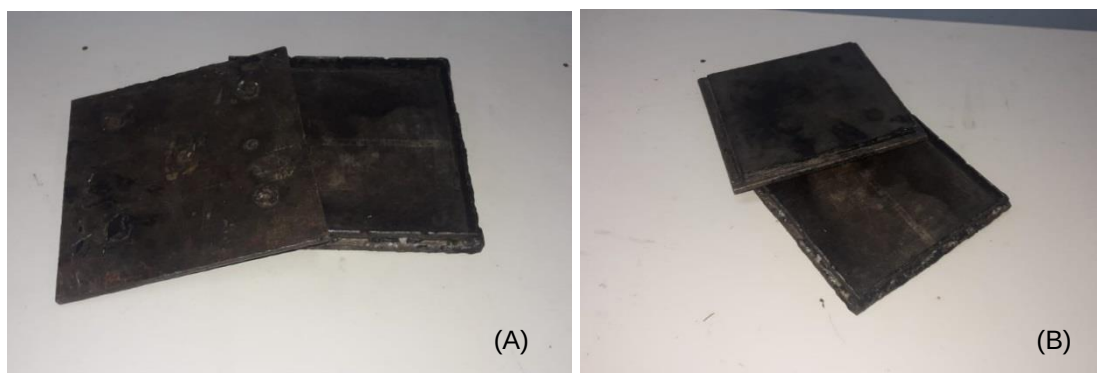
Fonte: o autor.

A matriz escolhida foi a termorrígida de resina poliéster ortoftálica por ser uma das mais disponíveis no mercado, além de ser uma das mais baratas, de boa processabilidade em temperatura ambiente e de baixo risco no manuseio. O custo da resina adquirida correspondeu em média a R\$ 20,00 (US\$3.60).

Para acelerar o processo de cura para resina poliéster ortoftálica foi utilizado o Butanox M-50, fabricada pela Polinox do Brasil, de aspecto incolor, límpido e líquido. O catalisador é um peróxido de metil-etil-cetona em dimetilftalato provedor ou iniciador de cura para resina poliéster insaturada e éster vinílico.

Para a fabricação das placas para a obtenção dos corpos de prova para os ensaios de caracterização, foram utilizados moldes metálicos de aço mostrados na Figura 10, (a) tração e flexão e (b) impacto, de acordo com as normas pertinentes.

Figura 10 - Moldes A e B utilizados para a fabricação dos CPs para ensaios mecânicos.



Fonte: o autor.

O molde A foi utilizado para os ensaios de tração e flexão com dimensões de 8,0 mm x 200 mm x 200 mm, em acordo com as normas ASTM D3039/D3039M-17 (2017) e ASTM D7264/ D7264M-15 (2015). O molde B foi utilizado para o teste de impacto com as dimensões de 10 mm x 100 mm x 100 mm, de acordo com a norma ASTM D6110-18 (2018).

Com o objetivo de não danificar o compósito na retirada do molde e garantir um bom acabamento superficial foi utilizado um desmoldante à base da cera de carnaúba (Tec Glaze-N), usada para polimentos de pisos.

Foram utilizadas duas peneiras granulométricas em aço inox, MESH/TYLER 9, com abertura de 2 mm, para peneirar os pecíolos da folha da carnaúba, após serem triturados, visando a retirada de materiais indesejáveis que pudessem

comprometer o desempenho do compósito. A escolha desta peneira se deu devido à característica do pó resultante da trituração se apresentar com baixa granulometria.

Uma balança de precisão foi utilizada a pesagem dos elementos constituintes do compósito e uma serra elétrica de bancada com disco de corte diamantado de fabricação própria, para cortar as placas das resinas e dos compósitos conforme as normas pertinentes.

Foi utilizada uma prensa hidráulica Marcon com capacidade de até 15 toneladas, para submeter os moldes para fabricação das placas de resina e compósitos à pressão desejada, de 2,0 toneladas, pelo processo de moldagem por compressão a frio em molde fechado.

Durante o processo da caracterização dos materiais, também foram empregados outros equipamentos, tais como misturadores, Baker, pipeta, água destilada, água do mar e garrafas PETs.

3.2 MÉTODOS

Os corpos de prova foram retirados das placas dos compósitos fabricadas. As proporções em massa do pó dos pecíolos da carnaúba utilizadas foram 5,0%, 7,5% e 10,0%, referentes à matriz de resina poliéster.

O método para fabricação das placas do compósito e resina foi o de moldagem úmida por compressão a frio em molde fechado. Depois de obtido, o PPFC foi misturado à resina poliéster ortoftálica e a 2,0% de desmoldante. A Figura 11 mostra a obtenção da mistura do compósito.

Figura 11 - Mistura entre os componentes do compósito, resina poliéster e PPFC.



Fonte: o autor.

Em seguida, a mistura foi colocada nos moldes que posteriormente foram fechados e submetidos em uma prensa a carga compressiva de 2,0 toneladas por 24 horas, o que resultou em uma boa compactação do compósito, buscando a retirada de vazios e bolhas de ar.

As formulações utilizadas 5%, 7.5% e 10%, foram escolhidas em função da carga máxima de pó de pecíolos testada (saturação). A Tabela 1 mostra as formulações utilizadas para caracterização dos compósitos.

Tabela 1 - Formulações dos compósitos para posterior caracterização.

COMPÓSITOS	FORMULAÇÕES
C ₁	1,0 R + 0,0 PPFC
C ₂	1,0 R + 0,05 PPFC
C ₃	1,0 R + 0,075 PPFC
C ₄	1,0 R + 0,1 PPFC

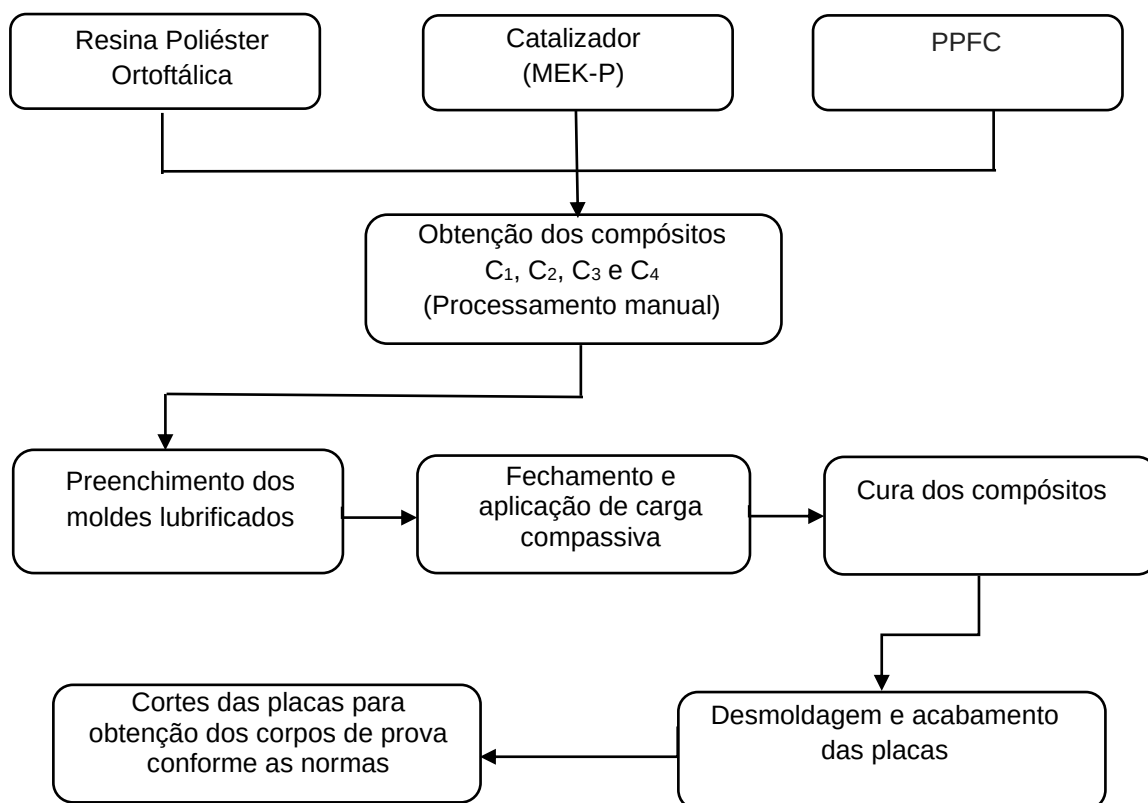
Fonte: o autor.

Utilizando-se uma serra manual, procedeu-se ao corte das placas depois de retiradas dos moldes e as rebarbas do compósito foram retiradas utilizando-se lixa

200. Depois de feitos os cortes, nas dimensões normatizadas para cada ensaio, os CPs foram submetidos às caracterizações.

O fluxograma da Figura 12 apresenta as principais etapas do processo de fabricação das placas de compósitos e resina poliéster para a obtenção dos CPs para os ensaios de caracterização.

Figura 12 - Etapas do processo de fabricação das placas dos compósitos para produção dos corpos de prova para ensaios de caracterização.



Fonte: o autor.

A Tabela 2 traz as dimensões e quantitativos dos corpos de prova e normas utilizadas para cada ensaio de caracterização.

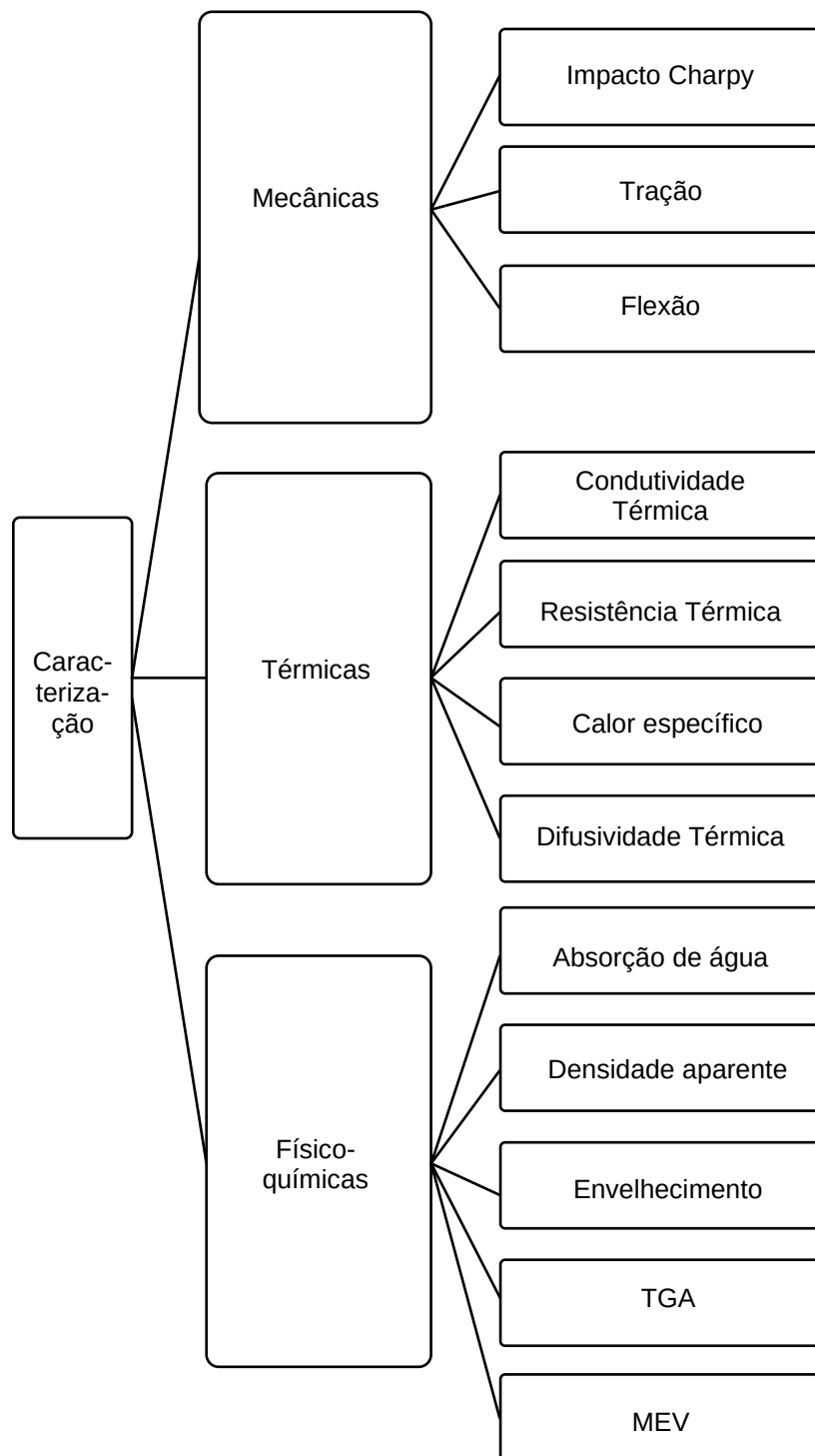
Tabela 2 - Dimensões e quantitativos dos corpos de provas e normas utilizadas nos ensaios de caracterização.

Ensaio	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Quantidade (unidades)	Normas Utilizadas
Tração	200	25	8	6	ASTM D3039/ D3039M-17 (2017)
Flexão	200	25	8	6	ASTM D7264/ D7264M-15 (2015)
Impacto	100	10	10	6	ASTM D6110-18 (2018)
Densidade	25	25	8	6	ASTM D792-13 (2013)
Absorção de água destilada e do mar	25	25	8	7	ASTM D570-98 (2010)
Prop. Térmicas	50	50	-	6	ASTM D5930-17 (2017)
Envelhecimento	200	25	8	1	ASTM D1435-13 (2013)
TGA	5	5	5	1	ASTM E2550-17 (2017)
MEV	8	8	8	1	-----

Fonte: o autor.

O fluxograma da Figura 13 mostra os ensaios realizados para a caracterização dos compósitos e resina matriz.

Figura 13 - Fluxograma das etapas caracterização dos compósitos e resina matriz.



Fonte: Autor.

Para levantamento das características mecânicas do compósito foram realizados os ensaios de Impacto Charpy, tração e flexão.

3.2.1 Ensaio de Impacto Charpy

O ensaio de resistência ao impacto foi realizado usando a norma ASTM D6110-18 (2018) como referência. A Figura 14 mostra o equipamento utilizado, com pêndulo de 0,937 Kg, com um comprimento da haste de 200 mm.

Figura 14 - Máquina utilizada para ensaio de impacto Charpy.



Fonte: Autor.

3.2.2 Ensaios de Tração e Flexão

Foi utilizada uma máquina universal de ensaio Shimadzu, modelo AGX 300, mostrada na Figura 15. As normas adotadas foram a ASTM D3039/D3039M-17 (2017) e ASTM D7264/D7264M-15 (2015). A Figura 16 mostra alguns CPs dos ensaios mecânicos de tração e flexão. As velocidades de aplicação da carga foram 2,0 mm/min na tração e 2,8 mm/min na flexão de três pontos.

Figura 15 - Máquina Universal Shimadzu, modelo AGX 300 e que tem capacidade máxima.



Fonte: o autor.

Figura 16 - Corpos de prova de cada formulação para ensaios de tração e flexão em três pontos.



3.2.3 Ensaios térmicos

Para levantamento das propriedades térmicas foi utilizado o analisador de propriedades térmicas, KD2 Pro, fabricado pela Decagon Devices. A norma seguida para tal propósito foi a ASTM D5930-17 (2017). Foram determinadas a condutividade térmica, o calor específico, a resistência térmica e a difusividade, por cada formulação do compósito estudado. Os corpos de provas foram construídos no

molde metálico cilíndrico, com as dimensões de 50 mm de diâmetro interno e 100 mm de altura.

A Figura 17 mostra um CP de resina poliéster em ensaio no KD2 Pro, para determinação das propriedades de condutividade térmica, capacidade térmica volumétrica, resistividade térmica e difusividade térmica.

Figura 17 - Corpo de prova da resina poliéster em ensaio de análise térmica.



Fonte: o autor.

3.2.4 Ensaio de Absorção de água

O ensaio foi realizado em dois meios aquosos, água destilada e água do mar, de acordo com a norma ASTM D570-98 (2010). Os CPs para o ensaio de absorção estão mostrados na Figura 18.

Figura 18 - Corpos de provas para ensaio de absorção de água.



Fonte: o autor.

3.2.5 Ensaio de Densidade

Os procedimentos para o ensaio de densidade seguiram as diretrizes da norma ASTM D792-13 (2013), sendo realizado em um Densímetro Digital da marca GEHAKA, modelo DSL 910. A Figura 19 (a) mostra o ensaio da densidade dos compósitos de uma das formulações em estudo e (b) mostra a foto dos compósitos de cada formulação da resina poliéster que foi utilizado no ensaio

Figura 19 - a) Densímetro digital DSL 910 utilizados no ensaio de densidade aparente e b) Uma amostra de cada formulação do compósito.



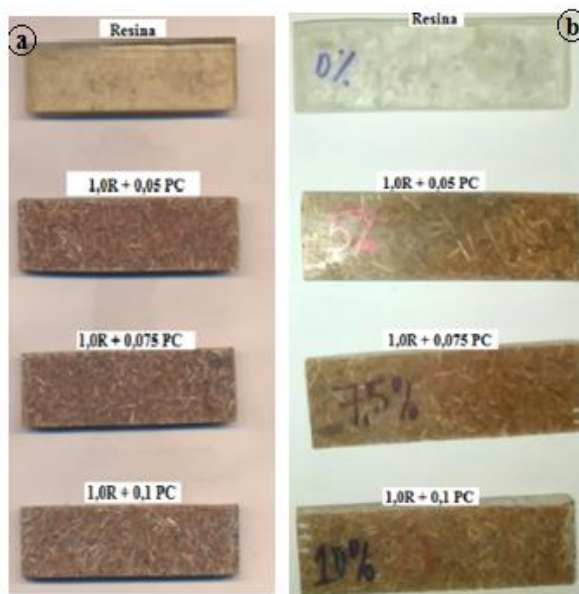
Fonte: o autor.

3.2.6 Ensaio de Envelhecimento (Degradação)

Os compósitos foram postos às condições de envelhecimento natural, no período de 12 meses, em cima de uma laje no LMHES/UFRN, atmosfera de clima tropical e ambiente próximo ao mar. O procedimento para o ensaio seguiu as diretrizes da norma ASTM D1435-13 (2013). Para os ensaios de envelhecimento dos compósitos, foram utilizadas uma amostra de cada compósito e uma da resina poliéster, com dimensões 200 mm x 25 mm x 8 mm.

A Figura 20 apresenta as amostras dos compósitos para o ensaio de envelhecimento natural antes e após degradação.

Figura 20 - Corpo de prova dos ensaio de envelhecimento, antes (b) e após (a) exposição.

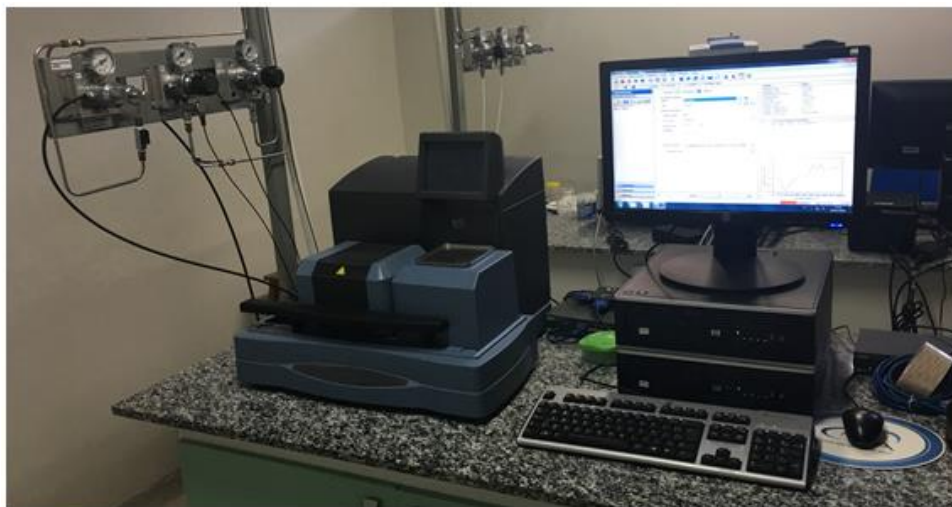


Fonte: o autor.

3.2.7 Ensaio de Análise Termogravimétrica (TGA)

Utilizou-se um analisador termogravimétrico e calorímetro simultâneo fabricante TA Instruments, modelo SDTQ600, conforme, Figura 21, para análise termogravimétrica (TGA). O ensaio seguiu a norma ASTM E2550-17 (2017). Foi realizado com os seguintes parâmetros: cadinho de platina; gás de purga, ar sintético; vazão do gás de purga de 50 ml/min; razão de aquecimento de 10°C/min; temperatura final de 700°C e massa de amostra de ~10mg.

Figura 21 - Analisador térmico utilizado no ensaio.



Fonte: o autor.

3.2.8 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os ensaios foram executados em microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo TESCAN, como mostrado na Figura 22. Foram realizados ensaios de MEV nas superfícies de fratura das amostras do compósito após ensaio de tração, com o objetivo de observar a influência do processo de fabricação moldagem molhada por compressão em molde fechado na qualidade da interface resina/cimento e, consequentemente, da distribuição (homogeneidade) das partículas do PPFC após o processo de mistura, além de avaliar a formação e propagação dos danos na seção de ruptura.

Figura 22 - Equipamentos para análise de microestrutura - MEV.



Fonte: o autor.

3.3 APLICABILIDADE DO COMPÓSITO

Uma aplicabilidade buscada para o compósito proposto foi a fabricação de uma parábola para ser utilizada em um fogão solar à concentração. Foi utilizado o compósito C4, com maior viabilidade econômica.

A parábola do fogão solar à concentração foi fabricada utilizando um molde de concreto de 1,14 m de diâmetro e área de 1,0 m² (LION, 2013). A Figura 32 abaixo mostra o molde utilizado.

O processo de fabricação da superfície parabólica refletora do fogão solar à concentração compreendeu os seguintes procedimentos.

- Recobrimento do molde com plástico para facilitar a retirada da parábola fabricada;
- Preparação do compósito – mistura entre a resina e as fibras de carnaúba trituradas;
- Colocação do compósito no molde utilizando espátula;
- Acabamentos para evitar falhas na superfície parabólica fabricada;
- Cura do compósito em torno de 72 horas;
- Retirada da superfície parabólica fabricada;

- Colocação de uma estrutura metálica no centro da parábola para sua fixação na estrutura do fogão;
- Pintura estética da parábola;
- Corte dos segmentos de espelho plástico utilizando arco de serra;
- Colocação dos segmentos de espelho na superfície parabólica utilizando cola de contato;
- Limpeza da superfície parabólica para retirada e resíduos de cola.

As figuras a seguir mostram algumas etapas do processo de fabricação da parábola do fogão solar à concentração proposto.

Figura 23 - Etapas do processo de fabricação da parábola do fogão solar à concentração (aplicabilidade do compósito estudado).



Fonte: o autor.

Após a colocação da estrutura de ferro no fundo da parábola, na superfície externa, colocou-se a parábola numa estrutura já existente no LMHES, que pode

servir para vários modelos de fogões solares à concentração. Tal estrutura permitia o acompanhamento da parábola ao movimento aparente do sol.

A superfície espelhada da parábola foi obtida através do uso de segmentos de espelho plástico, que proporcionou a vantagem de poder-se trabalhar com segmentos de dimensões elevadas, como mostrado na figura a seguir.

Nos ensaios os dados de temperatura no fundo da panela (Temperatura de foco) e da temperatura da água/alimento foram medidos com um termopar de cromel-alumel acoplado a um termômetro digital (Minipa MT-306).

Utilizou-se também um termômetro a laser para a medida das temperaturas externas da panela absorvedora. O fogão solar à concentração fabricado em operação é mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Fogão solar à concentração com parábola absorvedora fabricada em compósito de resina de poliéster e PPFC.



Fonte: o autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados os resultados e as discussões decorrentes do processo de caracterização das formulações do compósito estudadas e da resina matriz de poliéster.

4.1 ENSAIOS MECÂNICOS

Nesta seção, foram analisados os parâmetros dos ensaios mecânicos de tração, flexão e impacto da resina poliéster e dos compósitos com os pecíolos da carnaúba.

4.1.1 Ensaio de Tração

A Tabela 3 abaixo apresenta os resultados dos parâmetros do ensaio de resistência à tração dos compósitos e da resina poliéster.

Tabela 3 - Resultados dos parâmetros do ensaio da resistência à tração para as formulações dos compósitos e da resina poliéster.

Matriz/Compósitos	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Resina	19,63±0,90	0,475±0,0021
C ₁	14,18±0,95	0,590±0,0023
C ₂	13,13±0,94	0,702±0,0031
C ₃	12,9±0,93	0,754±0,0038

Fonte: dados da pesquisa.

Houve uma diminuição na resistência à tração dos compósitos em relação a matriz, evidenciando que o PPFC esteve presente no compósito desempenhando função de carga de enchimento. Essa redução já era esperada, uma vez que os particulados, como demonstra a literatura de materiais compósitos, diminuem a resistência mecânica dos novos materiais gerados, quando comparados a matriz,

conforme demonstrado por (MARQUES, 2012, GOMES, 2015, NETO, 2016, COSTA *et al.*, 2013).

O compósito de melhor desempenho na tração foi a 1,0R + 0,05 PPFC, que apresentou um decréscimo de 27,76% em relação a resina. Isso é explicado pela prevalência do maior percentual de resina na formulação. Essa queda em relação à matriz é explicada pela deficiência de adesão entre o PPFC e resina poliéster, que poderia ter sido amenizada por um tratamento das fibras (CARVALHO, 2011, MARQUES, 2012, MELO, 2012).

Com o aumento da quantidade de PPFC, a resistência à tração diminuiu, obtendo-se o menor resultado para o C₃, com redução de 34,3% em relação à resina. Na análise entre compósitos, percebeu-se que a maior queda ocorreu entre C₁ e C₃, correspondendo a 20,0%. Portanto, houve uma pequena perda de resistência à tração, uma vez que a quantidade de PPFC dobrou.

Na análise comparativa entre as formulações do compósito percebeu-se que houve uma queda pouco significativa na Resistência à Tração, quando se aumentou a quantidade de resíduo no compósito, pela pouca elevação da massa de carga de PPFC no compósito.

O comportamento de deformação foi idêntico ao da resistência à tração, apresentando valores inferiores aos da matriz e com diminuição com o aumento da carga PPFC, com correspondente aumento do módulo de elasticidade, em consonância com (MARTINS, 2016, GOMES, 2015, Melo *et al.*, 2012). O módulo de elasticidade foi maior que o da resina da matriz, para todas as formulações, demonstrando um aumento na rigidez do compósito com o aumento da porcentagem de PPFC. O compósito com maior carga PPFC, C₃, apresentou módulo de elasticidade de 0,754GPa.

Considerando-se que o preço do PPFC em relação ao da resina é insignificante, o aumento da carga do PPFC trouxe maior viabilidade econômica para o compósito.

4.1.2 Ensaio de Flexão

A Tabela 4 apresenta os resultados dos parâmetros do ensaio de resistência à flexão dos compósitos e da resina poliéster.

Tabela 4 - Resultados dos parâmetros do ensaio da resistência à flexão para as formulações dos compósitos e da resina poliéster.

Matriz/Compósitos	Resistência à Flexão (MPa)	Flecha (mm)
Resina	73,78 ± 1,99	7,46 ± 0,78
C ₁	35,25 ± 1,28	3,54 ± 0,25
C ₂	32,5 ± 1,12	3,48 ± 0,19
C ₃	27,5 ± 1,07	2,94 ± 0,12

Fonte: dados da pesquisa.

A resistência à flexão da resina não apresentou variação significativa em relação a apresentada pelo fabricante, com resultados mais expressivos que na tração para todos os compósitos, alcançando mais que o dobro.

Houve diminuição da resistência à flexão dos compósitos em relação à matriz, em consonância com Marques (2012), Costa *et al.* (2013), Netto (2016). O compósito com maior porcentagem de PPFC, C₃, teve uma perda de 62,8%. O compósito com maior resistência à flexão foi C₁, 22,1% maior que o C₃.

Apesar da boa miscibilidade das partículas do PPFC, a descontinuidade gerada na matriz causou diminuição da resistência, principalmente para compósitos com maior percentual de carga do PPFC.

Em relação às flechas, o mesmo comportamento da Resistência à Flexão foi verificado, com diminuição à medida que se aumentava o percentual de carga de pó de carnaúba na formulação. Todas as formulações apresentaram deformações menores que a da resina, demonstrando o aumento de rigidez com o aumento do percentual mássico de PPFC. Entre as formulações, a diferença de flecha foi pouco significativa, máxima de 0,6mm.

Apesar dos baixos valores de RF todas os compósitos podem ser utilizados em aplicações que não requeiram significativas solicitações de tensões de flexão, com múltiplas possibilidades. Ressalte-se que apresentaram maior viabilidade na flexão que na tração, em conformidade com MELO (2012) e MARQUES (2012).

4.1. 3 Ensaio de Impacto Charpy

A Tabela 5 apresenta os resultados da energia de absorção no teste de impacto Charpy operacionalizado em todas as formulações do compósito e da matriz de resina poliéster.

Tabela 5 - Resultados da energia de absorção de impacto para as formulações dos compósitos e da resina poliéster

Matriz/Compósitos	Resistência ao Impacto (J/cm²)
Resina	0,291 ± 0,03
C ₁	0,295 ± 0,04
C ₂	0,301± 0,05
C ₃	0,302± 0,05

Fonte: dados da pesquisa.

Todos os compósitos apresentaram índices de energia de absorção de impacto praticamente iguais ao da resina matriz de poliéster, demonstrando-se que a carga de PPFC não mudou o comportamento da fragilidade em relação à matriz, para todas as frações mássicas testadas.

Mais uma vez a função de enchimento do PPFC nos compósitos foi comprovada. O percentual de pó de carnaúba na resina não influenciou significativamente na propriedade avaliada, uma vez que a diferença percentual entre a melhor e pior formulação foi inferior a 3,8%. A capacidade de absorção da energia no impacto praticamente se manteve com o aumento da quantidade de pó da carnaúba no compósito.

Mais uma vez ficou comprovada a função de carga de enchimento do pó da carnaúba no compósito.

4.2 ENSAIOS TÉRMICOS

A Tabela 6 apresenta os resultados médios das propriedades condutividade térmica, capacidade térmica volumétrica, difusividade térmica e da resistência térmica (resistividade) para resina e compósitos.

Tabela 6 - Resultados das propriedades térmicas para compósitos e resina poliéster

Matriz/Compósitos	K (W/m.K)	C (MJ/m³.K)	D (mm²/s)
Resina	0,174±0,015	1,848±0,193	0,106±0,015
C ₁	0,160±0,013	1,675±0,161	0,096±0,010
C ₂	0,158±0,012	1,545±0,154	0,100±0,013
C ₃	0,136±0,011	1,352±0,141	0,103±0,013

Fonte: dados da pesquisa.

O comportamento térmico dos compósitos foi superior ao da resina poliéster, para isolantes térmicos, devido à condutividade do PPFC, 0,12 W/m.K, ser inferior (COSTA, 2015). Houve melhora nas propriedades térmicas analisadas, K, C e D, com o aumento da quantidade de PPFC na resina poliéster. O compósito com menor condutividade térmica foi o C₃, 21,8% menor do que a resina de poliéster e o de maior condutividade térmica foi o C₁, com redução de 8,0%.

A capacidade térmica volumétrica diminuiu com o aumento do PPFC na resina. O compósito com menor capacidade térmica volumétrica foi o C₃, com redução de 4,2% em relação à resina e 12,5% em relação ao de maior capacidade térmica volumétrica, C₁.

Mais uma vez, a quantidade de PPFC teve grande influência nas propriedades térmicas dos compósitos obtidos. O mesmo comportamento ocorreu na difusividade térmica, com decréscimo pouco significativo com o aumento da quantidade de PPFC, com variação máxima entre C₃ e C₁ de 3,2%. Em relação à resina poliéster, a variação da difusividade também não foi muito significativa, com variação máxima de 6,0%.

Apesar do bom comportamento térmico dos compósitos, quando comparado ao da resina, as possibilidades de utilização dos compósitos com PPFC para aplicações como isolante térmico são reduzidas pois embora apresente condutividade térmica abaixo de 0,21 W/m.K, nível que classifica um material como isolante térmico, está bem acima de materiais como por exemplo o EPS, com valor de K em torno de 0,030 W/m.K.

Ressalte-se que poucos compósitos já obtidos e estudados com matriz de resina poliéster apresentaram este nível de condutividade térmica: com carga pó de café, pó do sabugo do milho e bucha vegetal (MOTA, 2016; OLIVEIRA, 2015).

4.3 ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS

4.3.1 Ensaio de densidade

A Tabela 7 apresenta os resultados da densidade aparente para todas as formulações do compósito e matriz de resina poliéster.

Tabela 7 - Resultados da densidade aparente da resina poliéster e compósitos.

Matriz/Compósitos	Densidade Aparente (g/cm ³)
Resina	1,241 ± 0,03
C ₁	1,179 ± 0,04
C ₂	1,147 ± 0,03
C ₃	1,143 ± 0,02

Fonte: dados da pesquisa.

A densidade aparente dos compósitos foi inferior à da matriz de resina poliéster. A menor densidade do PPFC, correspondente a 0,33g/cm³, fez com que essa propriedade diminuísse nos compósitos, em relação à resina (COSTA, 2015).

Ocorreu uma diminuição da densidade à medida em que se aumentava a proporção de pó de carnaúba no compósito. O compósito com menor teor de PPFC, C₁, apresentou densidade 5,0% menor em relação à resina poliéster e o de maior teor, C₃, de 7,9%, em conformidade com (MARQUES, 2012; COSTA, *et al.*, 2013).

Apesar da diminuição da densidade dos compósitos ser uma característica importante na busca por materiais mais leves, a queda não foi significativa, exigindo uma relação de massa de PPFC muito maior, o que dificultaria a processabilidade do compósito, impedindo a mistura manual entre resina e PPFC. Entretanto, a diminuição da densidade representa um fator importante para viabilizar a aplicabilidade dos compósitos poliéster e PPFC.

A diminuição da densidade aparente nos compósitos deveu-se à menor densidade do PPFC em relação à resina, suplantando o pequeno efeito de retração de volume na mistura de PPFC e resina, que ocorreu principalmente para o compósito com maior percentual de PPFC, o C₃. A boa difusão do PPFC na resina produziu uma mistura de boa miscibilidade, bastante homogênea, principalmente devido a sua baixa granulometria.

A variação da densidade aparente entre as formulações foi muito baixa. A diferença de densidade do compósito com maior percentual 1,0R + 0,1 PPFC em relação ao de menor percentual, 1,0R + 0,05 PPFC, correspondeu a 2,9%.

Esses compósitos apresentaram uma menor densidade que a maioria dos compósitos com matriz de resina poliéster já estudados, sendo competitivo com as cargas de pó de café, pó da casca do caranguejo, pó de sabugo do milho e bucha vegetal (OLIVEIRA, 2015; MOTA, 2016).

4.3.2 Ensaio de Absorção de água destilada e água do mar

A Tabela 8 apresenta os resultados do ensaio de absorção para os dois meios aquosos e os gráficos 12 e 13 mostra o comportamento comparativo entre resina e compósitos.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de absorção de água destilada e água do mar para as formulações do compósito e resina poliéster

Matriz/Compósitos	Absorção de Água Destilada (%)	Absorção de Água do Mar (%)
Resina	0,35	0,48
C ₁	5,00	5,17
C ₂	5,42	5,59
C ₃	5,72	5,96

Fonte: dados da pesquisa.

Os compósitos apresentaram capacidade de absorção de água muito superior à da resina poliéster. Esse comportamento de maior absorção se deveu à higroscopicidade do PPFC, que possui 41,5% de celulose, 28,9% de hemicelulose e 14% de lignina, substâncias bem compatíveis com a água (Melo, 2012, Costa,

2015). Um outro ponto a ser destacado é que os corpos de prova não foram isolados com resina nas faces cortadas pela serra, para se evitar que essas superfícies porosas ficassem expostas, com contato direto com o meio aquoso.

Devido a maior capacidade de absorção de água do PPFC, quando comparado à resina, houve um aumento proporcional ao crescimento da proporção em massa do PPFC, com maior absorção do C₃, para ambos os meios aquosos. Esse comportamento já era esperado, mas a capacidade de absorção de água para os dois meios aquosos estudados foi baixa, atingindo no máximo 5,72% para a água destilada e 5,96% para a água do mar.

Os resultados indicaram que todos os compósitos apresentaram capacidade de absorção de água destilada muito maior do que a resina de poliéster. Apesar da baixa carga PPFC sobre a resina, houve um aumento muito significativo na capacidade de absorção dos compósitos, com melhor resultado para aquele com menor carga PPFC, C₁.

Entre os compósitos com menor e maior carga PPFC, C₁ e C₃, o aumento da capacidade de absorção correspondeu a 14,2% na água destilada e 15,5% na água do mar.

A capacidade de absorção em água do mar foi maior para compósitos e resinas de poliéster em relação à absorção de água destilada, causada pelo maior número de elementos químicos na água salgada, gerando uma maior força de ionização que a água destilada, produzindo maiores interações com a resina, e causando aumento da absorção de água. No entanto, esse aumento não foi significativo, atingindo o máximo de 4,2%.

A matriz de resina poliéster apresentou índice de absorção de água inferior a 1%, para os dois meios aquosos testados, ficando demonstrada a excelente resistência de penetração de água no interior desse material, em conformidade com Gomes (2017) e Souza (2019).

Os níveis de absorção de água destilada e do mar dos compósitos foram competitivos a vários compósitos já estudados no LMHES e com outros apontados pela literatura de Engenharia de Materiais em relação a esse importante parâmetro (repositório do PPGEM, 2020).

4.3.3 Ensaio de Envelhecimento (Degradação)

A Tabela 9 apresenta os resultados da variação da massa dos corpos de prova submetidos ao ensaio de envelhecimento, em ambiente natural para todas as formulações do compósito estudadas e da resina matriz de poliéster.

Tabela 9 - Resultados da variação da perda de massa do ensaio de envelhecimento das formulações dos compósitos e da resina poliéster.

Matriz/Compósitos	Perda de Massa (%)
Resina	0,27
C ₁	1,36
C ₂	1,58
C ₃	1,93

Fonte: dados da pesquisa.

Todos os compósitos apresentaram percentuais de perda de massa muito superior ao da resina poliéster, porém não significativos para um ano de exposição, com perdas abaixo de 2,0%. A perda de massa ocasionada pela degradação relacionada à exposição às intempéries apresentou comportamento crescente com o aumento da porcentagem de PPFC.

A ausência de recobrimento de resina nas faces laterais dos corpos de prova expostos pode ter contribuído para esse aumento na deterioração dos compósitos em relação à resina, ressaltado por (SOUZA, 2019).

Portanto, o compósito mais viável para exposição às variações climáticas em todas as estações, foi o C₁, de custo mais elevado por possuir menor quantidade de PPFC na resina poliéster. Combinando condições técnicas e econômicas, o composto mais viável foi o C₃.

Os agentes degradativos mais atuantes no ensaio de envelhecimento natural foram variação de temperatura, chuvas, umidade e radiação ultravioleta (UV). Os polímeros são suscetíveis a sofrerem deterioração devido à desintegração estrutural da cadeia principal. Segundo Callister (2016), é importante ressaltar

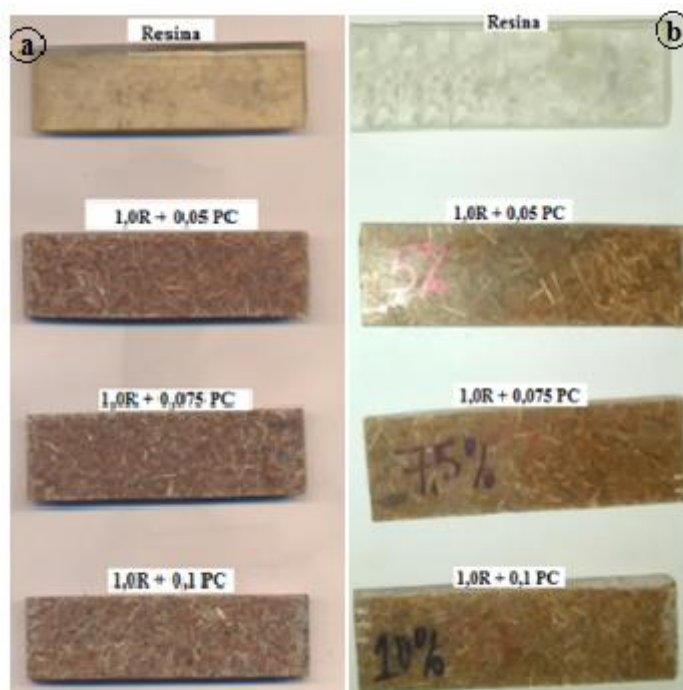
que o processo de degradação envolve fenômenos físicos e químicos; e a partir desses, ocorre uma perda de integridade estrutural do material.

O compósito mais viável para a exposição às intempéries e variações climáticas, em todas as estações, foi C₁, porém de maior custo uma vez que tem uma menor quantidade de PPFC do que a da resina poliéster. Combinando-se condições técnicas e econômicas o compósito mais viável foi o C₄.

Entre as formulações estudadas a que mostrou ser mais viável a exposição às intempéries foi a com 5 % de resíduo, que apresentou uma perda insignificante de 1,36%.

A principal mudança entre as amostras antes e após exposição, no período de um ano, ocorreu na coloração, principalmente na resina poliéster, em consonância com Shokrieh e Bayat (2007), que citaram o amarelamento, a perda de brilho com mudança de cor, a perda de translucidez, o fissuramento, o afloramento de fibras devido ao desgaste da matriz polimérica, o empolamento e perda das propriedades mecânicas como principais características da degradação por envelhecimento natural. A Figura 37 mostra macrografias das amostras submetidas ao ensaio de envelhecimento.

Figura 25 - Amostras do teste de envelhecimento. a) Após um ano expostas as variações das condições climáticas. b) Antes do ensaio de envelhecimento.



Fonte: dados da pesquisa.

4.3.4 Ensaio de Análise termogravimétrica (TGA)

As figuras 26 e 27 mostram os resultados do ensaio de termogravimetria realizado com uma amostra do compósito e outra da resina matriz de poliéster. Os gráficos contêm a curva de massa da amostra em função da temperatura (curva de TGA - termogravimetria) e a derivada dessa curva (curva de DTG – termogravimetria derivada), a qual fornece informações da derivada primeira da variação da massa em função da temperatura e permite identificar em quantas etapas ocorre uma degradação térmica.

Esse ensaio foi realizado para verificar a estabilidade térmica e degradação do compósito 10% e da resina matriz. Essa técnica é muito utilizada para avaliar as possíveis aplicações de um material.

Figura 26 – Curva termogravimétrica da matriz.

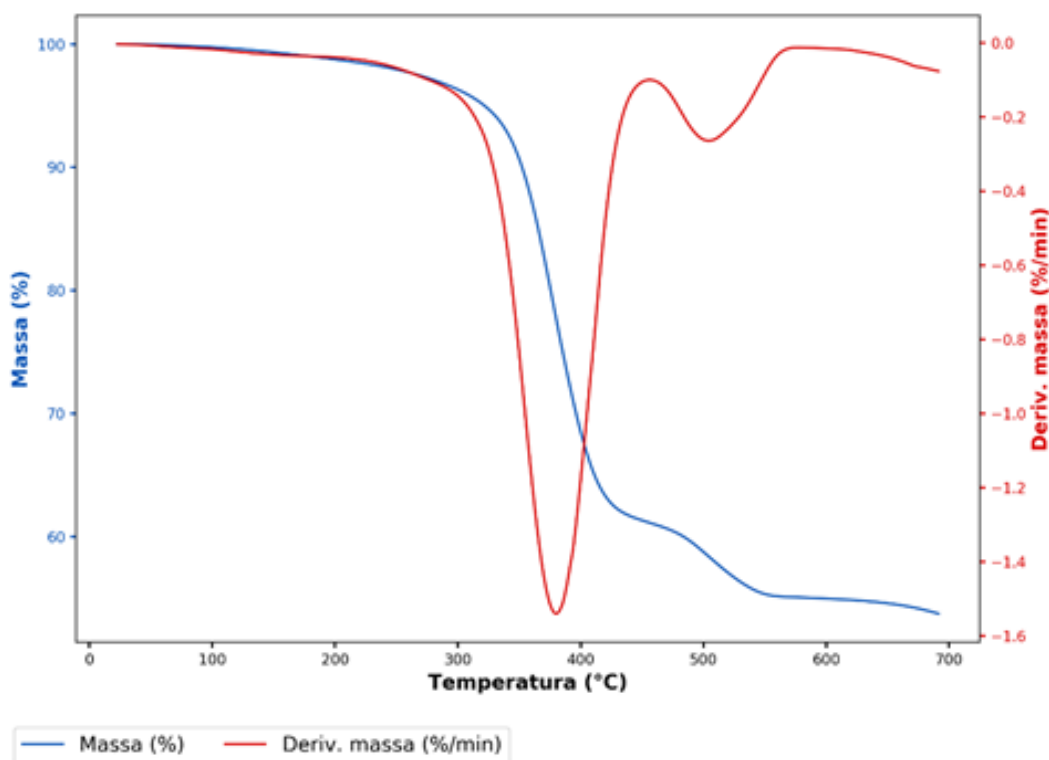
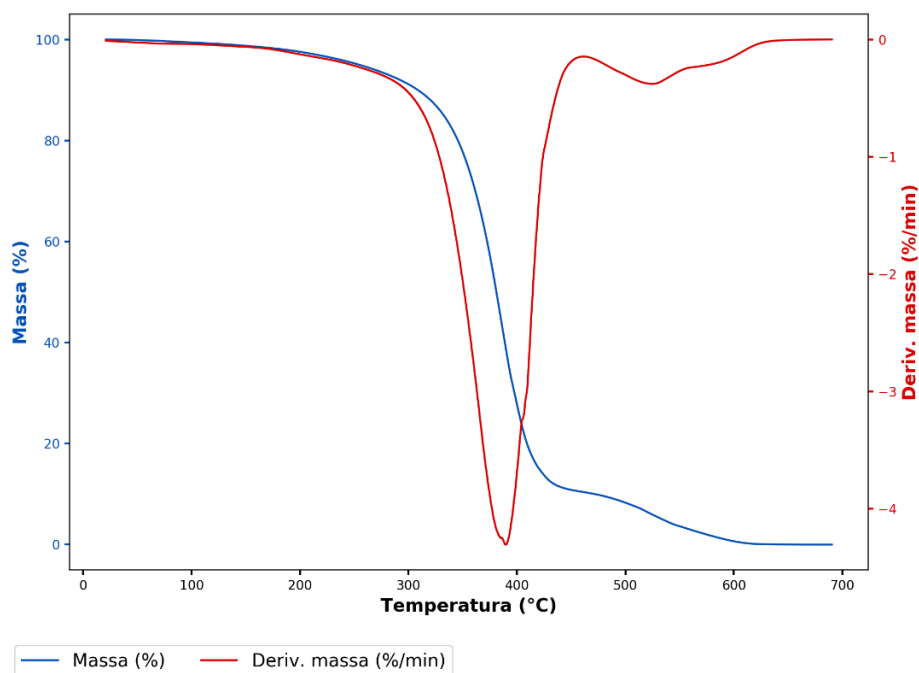


Figura 27 - Curva termogravimétrica de C₃.

Percebeu-se que não houve diferenças significativas na perda de massa entre a matriz e compósito testado. A fibra de carnaúba não apresentou capacidade maior de resistência ao calor. A massa residual após 600°C, para matriz e compósito, foi inferior a 1,0. A Tabela 10 apresenta os valores de perda de massa para matriz e formulação do compósito em função da temperatura no ensaio de TGA.

Tabela 10 - Valores de perda de massa para matriz e formulação do compósito em função da temperatura no ensaio de TGA.

Temperatura (°C)	Resina Cristal (%)	Compósito C ₃ (%)
100	0	0,5
200	2	2,4
300	7	8,3
350	17	23,3
400	74	72,2
450	90	79,2
500	92	91,7
550	97	96,4
600	99	99,4
690	99,3	99,9

Fonte: dados da pesquisa.

Uma vez que o processo de obtenção, processabilidade, se dá à temperatura ambiente, por prensagem a frio, a perda de massa será insignificante, não trazendo maiores preocupações de perda de massa quando da aplicabilidade do compósito. Ficou mais uma vez evidenciada a não influência da carga de PPFC em relação a resistência à temperatura.

De acordo com a norma ASTM E2550-17 (2017), é necessário determinar a variação de massa e a temperatura *onset* (temperatura de início de perda de massa) de cada reação observada durante o ensaio. Como a degradação da resina e a da fibra de carnaúba ocorreram na mesma faixa de temperaturas, não foi possível distingui-las. Dessa forma, os valores exigidos pela norma foram calculados para a reação de degradação resultante. Esse cálculo se deu através de uma análise matemática e geométrica dos dados que compõem as curvas de TGA e de DTG. Os valores exigidos pela norma, bem como a temperatura *peak*, a qual corresponde à temperatura de máxima degradação, estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores de T_{onset} , T_{pico} e perda de massa para a resina poliéster e configurações do compósito híbrido

Matriz/Compósitos	Temperatura <i>Onset</i> (°C)	Temperatura de Pico (°C)	Variação de Massa (%)
Resina	351,07	386,88	99,28
C ₃	346,20	389,30	99,90

Fonte: dados da pesquisa.

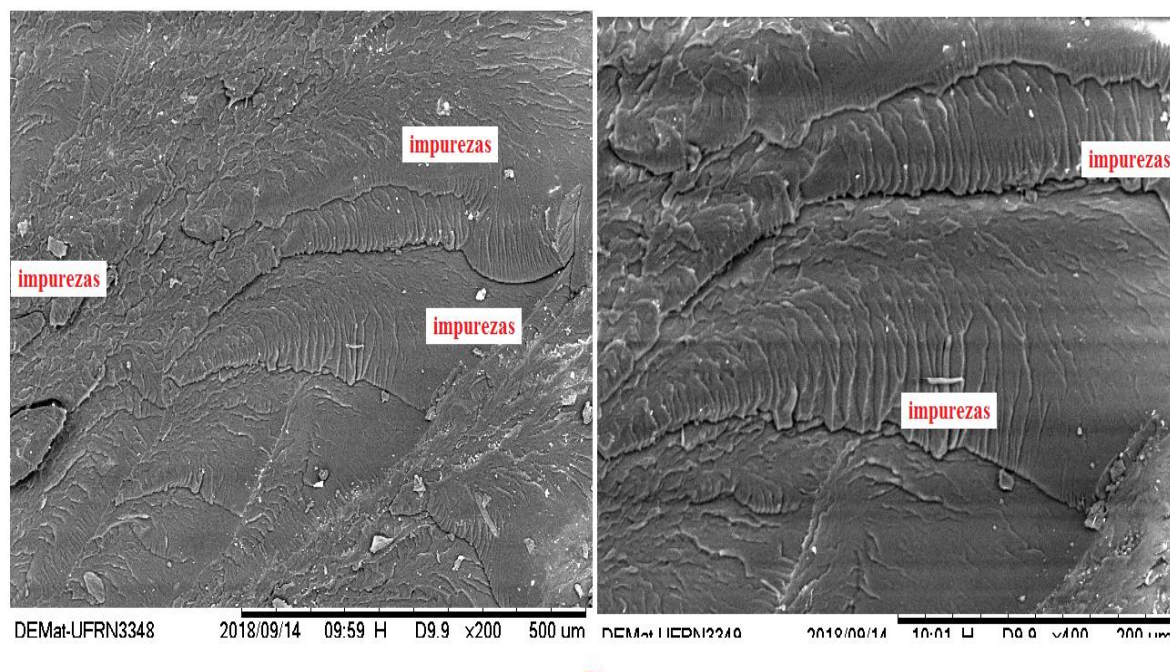
Com relação à temperatura de início de perda de massa, identificou-se que a resina necessitou de uma temperatura mais elevada para iniciar o processo de degradação térmica, sendo mais estável termicamente. Isso se explica pelo fato de que as fibras de carnaúba se degradam em temperaturas mais baixas que a resina. As temperaturas de pico da perda de massa foram praticamente iguais e no final do ensaio a perda de massa foi superior a 99% para matriz e formulação.

É importante salientar que para maioria das aplicações, as quais estão submetidas a temperaturas próximas à do ambiente, o compósito não sofrerá degradação térmica. A utilização dos compósitos em temperaturas que provocam degradação térmica não apresentaria viabilidade.

4.3.5 Ensaio de Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

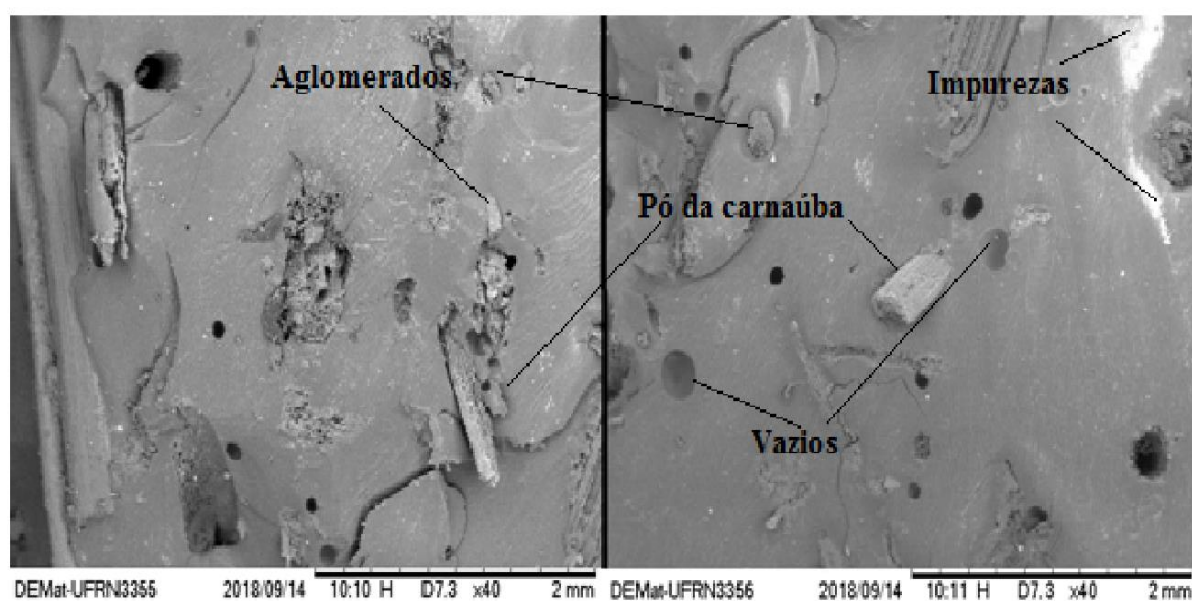
As figuras 28, 29, 30 e 31 mostram as imagens de MEV nas superfícies das fraturas das amostras submetidas à tração para compósitos e resina poliéster.

Figura 28 - Imagens de MEV nas superfícies de fratura da resina poliéster.



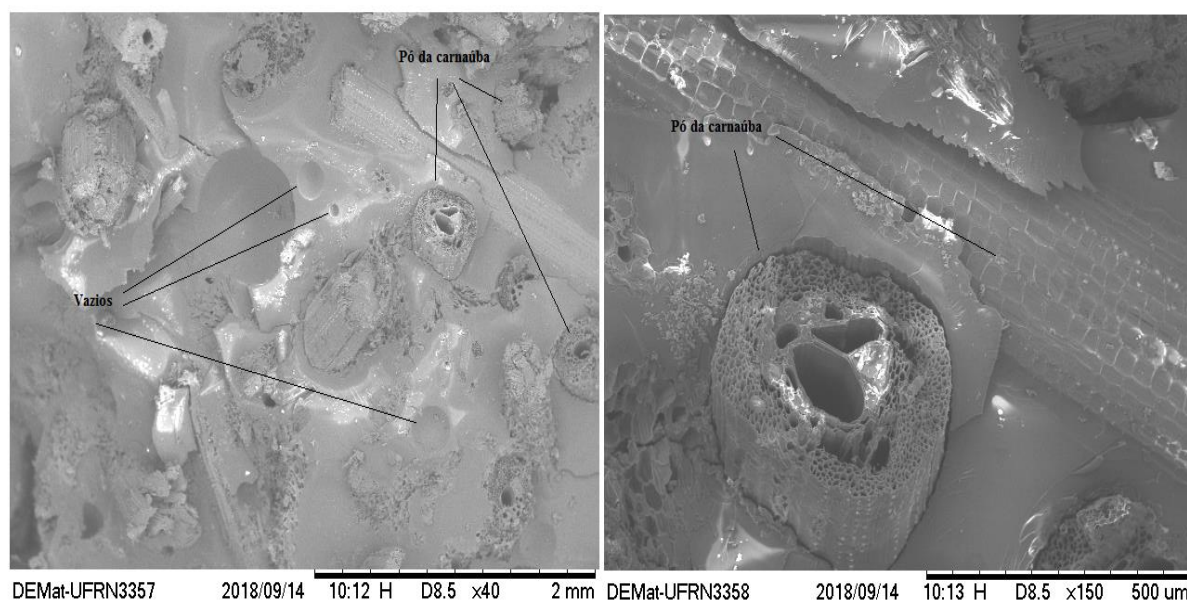
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 29 - Imagens de MEV nas superfícies de fratura do compósito C₁.



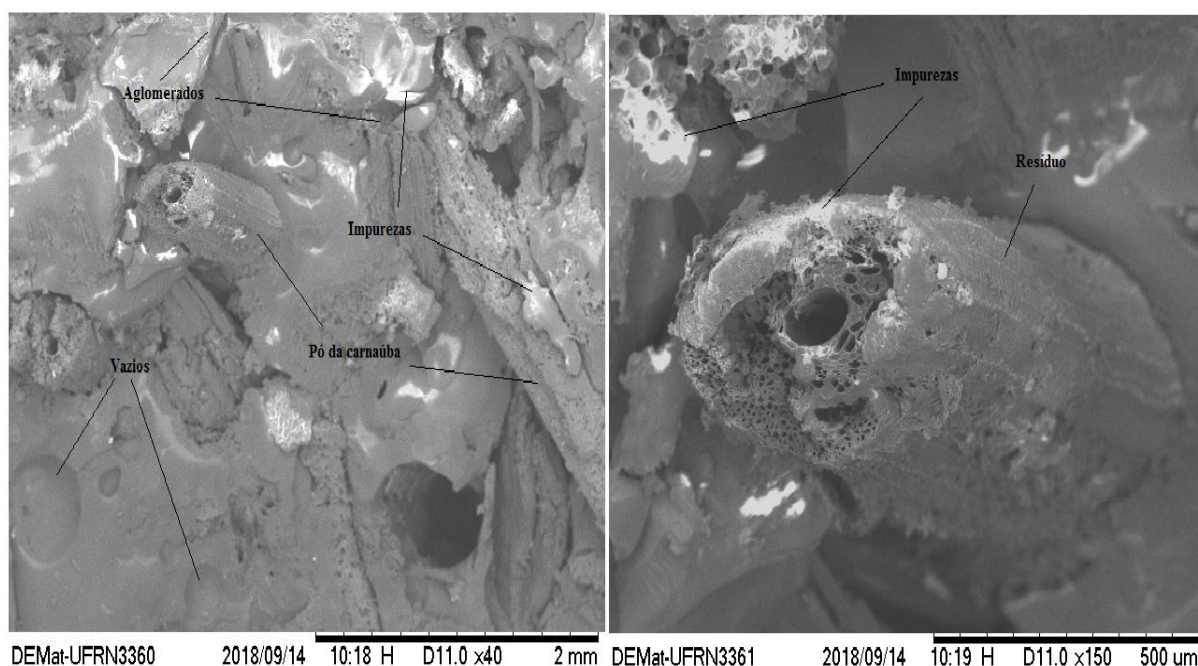
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 30 - Imagens de MEV nas superfícies de fratura do compósito C₂.



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 31 - Imagens de MEV nas superfícies de fratura do compósito C₃.



Fonte: dados da pesquisa.

Como o material compósito proposto era particulado e a carga utilizada não foi de reforço, conforme demonstraram os resultados de tração e flexão, a principal preocupação foi a otimização do processo de obtenção e fabricação das placas para a retirada dos corpos de prova para os ensaios de caracterização.

Procurou-se evitar a presença de contaminantes que geram impurezas, para obter uma mistura bastante homogênea entre os dois constituintes, minimizando a ocorrência de vazios e aglomerados, que poderiam trazer uma fragilidade ainda maior ao compósito, em relação à resina poliéster. Para minimizar esses efeitos, alguns cuidados foram tomados, utilizando recipientes descartáveis novos, batedeira de palheta nunca utilizada, ambiente de trabalho limpo e organizado e sala de processamento em temperatura ambiente.

Apesar dos cuidados evidenciados, as imagens de MEV após fratura em tração mostraram a ocorrência de fratura frágil, presença de impurezas, pequeno número de vazios, arrancamento de aglomerados gerados pela concentração de pó de carnaúba, principalmente para formulações com maior carga de enchimento, C2 e C3. Esses defeitos não comprometeram o processamento do compósito, nem a parte estrutural da parábola fabricada, uma vez que tal protótipo não precisava apresentar resistência mecânica significativa à tração e flexão.

4.3.6 Resumo dos resultados dos ensaios

Na Tabela 12, são apresentados todos os valores obtidos nos ensaios de caracterização da resina poliéster e dos compósitos fabricados neste trabalho, além de suas médias.

Tabela 12 - Resumo dos resultados dos ensaios.

Propriedades	Resina	1,0R+0,05 PPFC	1,0 R + 0,075 PPFC	1,0 R + 0,1 PPFC
Resistência à Tração (MPa)	19,63	14,18	13,13	12,9
Resistência à Flexão (MPa)	73,78	35,25	32,5	27,50
Impacto Charpy (J/cm ²)	0,495	0,328	0,321	0,315
Densidade (g/cm ³)	1,241	1,179	1,147	1,143
Absorção Água Destilada (%)	0,35	5,00	5,42	5,72
Absorção de Água do Mar (%)	0,48	5,17	5,59	5,96
Condutividade K (W/m. K)	0,174	0,160	0,158	0,136
Resistividade R (°C.cm/W)	5,750	6,275	6,330	7,350
Capacidade Tér. C (MJ/m ³ . K)	1,848	1,675	1,545	1,352
Difusividade D (mm ² /s)	0,106	0,096	0,100	0,103
Perda de massa no Envelhecimento (%)	0,27	1,36	1,58	1,93
Perda de massa na TGA	99,28	-	-	99,90

Fonte: dados da pesquisa.

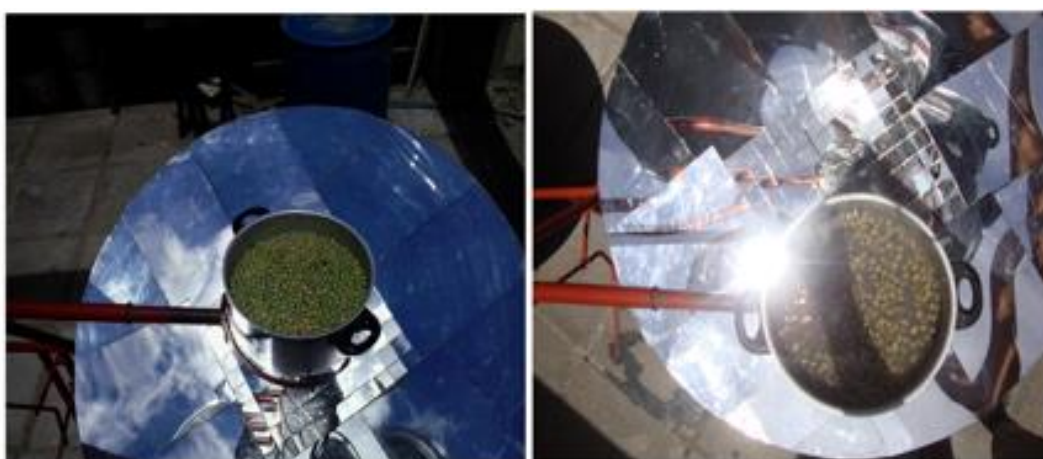
4.3.7 Aplicabilidade do compósito PPFC + RP

O fogão solar com parábola fabricada com o material compósito obtido e estudado demonstrou-se capaz de produzir o cozimento de diversos alimentos de refeições típicas nordestinas. A Figura 32 mostra o fogão em funcionamento na operação de cocção de alguns dos alimentos testados.

Figura 32 - Alimentos cozidos no fogão solar fabricado com o material compósito estudado.



Figura 33 - Alimentos cozidos no fogão solar fabricado com o material compósito estudado.



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 34 - Alimentos cozidos no fogão solar fabricado com o material compósito estudado.



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 35 - Alimentos cozidos no fogão solar fabricado com o material compósito estudado.



Fonte: dados da pesquisa.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Em consonância com os objetivos delineados para o presente trabalho apresentam-se as conclusões e sugestões pertinentes, decorrentes da análise dos resultados da caracterização do compósito em suas várias formulações.

5.1 CONCLUSÕES

1. A viabilidade de obtenção dos compósitos utilizando PPFC da carnaúba e resina poliéster propostos foi demonstrada. Embora apresentem resistência mecânica muito menor do que a da matriz, podem ser utilizados para aplicações com baixa exigência de carga mecânica;
2. O PPFC esteve presente no compósito na função de carga de enchimento, uma vez que os compósitos apresentaram resistência mecânica inferior à da matriz;
3. O pó dos pecíolos da folha de carnaúba reduziu a densidade dos compósitos, em relação à resina, tornando-os mais leves, característica que pode aumentar suas possibilidades de aplicabilidade;
4. Os compósitos apresentaram absorção de água muito superior à da resina, com crescimento da absorção à medida que se aumentava a quantidade de PPFC, com absorção levemente maior para água do mar; embora o nível médio de absorção tenha ficado inferior a 6,0 %, competitivo com grande parte dos compósitos estudados pela literatura de materiais compósitos poliméricos;
5. O comportamento térmico dos compósitos foi superior ao da resina matriz de poliéster, para ser utilizado na função de isolante térmico, em função da condutividade do pó de carnaúba ser inferior ao da resina, com queda na condutividade para a maior carga de pó de 21,8%;
6. A perda de massa das formulações do compósito no ensaio térmico termogravimétrico, apresentou comportamento similar ao da resina matriz de poliéster, demonstrando-se a pouca influência da carga de PPFC no compósito. A perda de massa foi pouco significativa para temperaturas abaixo de 300°C, o que traz boas viabilidade de processamento para o compósito obtido e estudado;

7. Os compósitos apresentaram uma perda de massa maior que a resina no envelhecimento, porém pouco significativa, e um comportamento crescente com o aumento da porcentagem de PPFC;
8. A microscopia eletrônica de varredura evidenciou a ocorrência de vazios, impurezas e aglomerados e superfícies apresentando fratura frágil, devido à deficiência de adesão entre o PPFC e a resina, causando danos à resistência mecânica dos compósitos, evidenciando que o processo de fabricação das placas compósitas precisa ser otimizado, usando uma mistura mecanizada.
9. Em relação a outros compósitos já estudados no LMHES, apresentou menor massa, propriedades térmicas superiores; absorção de água competitiva, constatações que viabilizam a utilização do compósito, para a produção de estruturas submetidas a baixas cargas;
10. O composto mais viável economicamente foi o C₃, que pode ser usado na fabricação de protótipos solares/eólicos, móveis, bancadas, obras de arte, artesanato e painéis. Foi demonstrada a viabilidade de uso prático do compósito, sendo fabricada uma parábola para um fogão solar na concentração de 1,0m²;

5.2 SUGESTÕES

1. A baixa adesão da fibra e da matriz foi demonstrada e, em outros trabalhos, deve-se experimentar a obtenção do compósito com outras resinas, por exemplo, a epóxi;
2. Seria importante realizar um tratamento químico no pó dos pecíolos da folha de carnaúba (PPFC) para melhorar a adesão com a matriz de resina de poliéster;
3. Pode-se hibridizar o compósito estudado com outra fibra natural, juta, açaí, sisal, piaçava e caracterizá-lo, comparando seus resultados com os obtidos para o compósito estudado;
4. Devido à boa estética do compósito produzido com o pó de pecíolos de folha de carnaúba (PPFC), pretende-se fabricar painéis para televisores e móveis decorativos para salas, quartos e cozinhas;

REFERÊNCIAS

ABREU, L. B. *et al.* Avaliação de resíduos de painéis de madeira gerados por industrias moveleiras para aproveitamento na confecção de pequenos objetos - estudo de caso. **Ciência e Agrotecnica**, Lavras, v. 33, edição especial, p. 1747-151, 2009.

ANNAMALAI, M.; RAMASUBBU, R. Optimizing the formulation of e-glass fiber and cotton shell particles hybrid composites for their mechanical behavior by mixture design analysis. **Materials and Technology**, v. 52, n. 2, p. 207-214, 2018.

ASTM D1435-13: **Standard practice for outdoor weathering of plastics**. ASTM International, West Conshohocken, PA, (2013).

ASTM D3039/D3039M-17: **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM D570-98: **Standard test method for water absorption of plastics**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

ASTM D5930-17: **Standard test method for thermal conductivity of plastics by means of a transient line-source technique**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM D6110-18: **Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

ASTM D7264/D7264M-15: **Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM D792-13: **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM E2550-17: **Standard test method for thermal stability by thermogravimetry**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

BATISTA, V. F. M. **Socio biodiversidade e resgate do saber popular da comunidade rural Novo Nilo-União/Piauí-Brasil**. 2014. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2014.

BELARMINO, D. D. **Obtenção e caracterização de microtubos e nanopartículas de carbono da biofibra proteica de penas de frango**. 2013. 114 f. Tese (Doutorado de Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

BODUR, M. S.; BAKKAL, M.; ENGLUND, K. Water absorption behavior and kinetics of glass fiber/waste cotton fabric hybrid composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 134, n. 47, 2017.

CÂMARA SETORIAL DA CARNAÚBA. **A carnaúba: preservação e sustentabilidade**. Fortaleza, 2009. Disponível em: http://www.sfipec.org.br/portaltv2/sites/sindicarnauba/files/Brochura_Carna%C3%BAb2.pdf. Acesso em: 16 jan. 2019.

CARVALHO, L. F. M. **Tratamentos de fibras de carnaúba [copernicia prunífera (miller) h. e. moore] para o desenvolvimento de compósito biodegradável com matriz de polihidroxibutirato**. 2011. 109 f. Tese (Doutorado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos; Processamento de Materiais a part) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

COSTA, D. S. *et al.* Compósitos poliméricos reforçado por fibras de carnaúba (Copernicia prunifera). CONGRESSO DA ABM, 68, 2013. **Anais [...]**. São Paulo: ABM, 2013. p. 1402-1412, São Paulo.

COSTA, L. L. L. **Obtenção e caracterização de um compósito a base de caulim e pó da palha de carnaúba como isolante térmico**. 2015. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

DACOSTA, L P E. **Utilização de resíduos do processamento mecânico da madeira para a fabricação de chapas de partículas aglomeradas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2004.

DÜŞÜNCELİ, N. *et al.* The effect of polyurethane and carnauba wax on the mechanical and physicochemical properties of acrylonitrile butadiene nitrile rubber coating working gloves. **Journal of Elastomers & Plastics**, v. 51, n. 1, 2019.

FORD, E. *et al.* Material compósito com raspas de pneu e látex para isolamento térmico. **Revista UM: Engenharia Civil**, n. 37, p. 27-35, 2010.

FREITAS, M. M. M. **Obtenção de álcoois de cadeia longa a partir da cera da carnaúba**. 2011. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

GOMES, J. W. **Construção e análise de desempenho de um forno/fogão solar tipo caixa alternativo construído a partir de uma sucata de pneu**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

GOMES, J. W. *et al.* Absorção de água e propriedades mecânicas de compósitos poliméricos utilizando resíduos de MDF. **Polímeros**, v. 27, p. 48-55, 2017.

GOMES, J. W. *et al.* Production and characterization of polymeric composite materials using mdf waste in powder and poliester terephthalic resin. **Materials Research**, v.18, n. 2, p.25-29, 2015.

GOMES, J. W. **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica e resíduos gerados pela manufatura do MDF (medium density fiberboard)**. 155 f. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

LEÃO, M. C. **Compósitos poliméricos a base de fibras de licuri: efeitos da hibridização e do envelhecimento ambiental acelerado**. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

LION FILHO, C. A. P. de Q. **Desenvolvimento e caracterização de compósito a partir da borra da piaçava para construção da parábola de um fogão solar a concentração**. 2013. 197 f. Tese (Doutorado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

MACEDO NETO, M. C. **Fogão solar à Concentração com Parábola Refletora Construída em Material Compósito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

MARQUES, J. **Uso do pó da palha de carnaúba em compósitos de quitosana**. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado em Físico-Química; Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

MARQUES, M. S. **Obtenção e caracterização de um compósito polimérico de matriz poliéster e reforço/carga de tecido plano de algodão**. 2016. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MARTINS NETO, José Antônio. **Obtenção, caracterização e utilização de um compósito com matriz de resina poliéster e carga de fibras de sisal**. 2016. 100f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MEDEIROS JÚNIOR, A. P. **Viabilidade de uso de um fogão solar com quatro focos para cocção de alimentos**. 2016. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MELO, J. D. D. *et al.* A biodegradable composite material based on polyhydroxybutyrate (PHB) and carnauba fibers. **Composites Part B: Engineering**, p. 2827-2835, 2012.

MOTA, Maria Kalionara de Freitas. **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de bucha vegetal luffa cylindrica**. 2016. 103f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

OLIVEIRA, M. L. **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de resíduos vegetal proveniente do sabugo de milho**. 2015. 66f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

ONU BR. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **ONU lança década da energia sustentável para todos para a comunidade de negócios**. 2014. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/onu-lanca-decada-da-energia-sustentavel-para-todos-para-a-comunidade-de-negocios/>> Acesso em: 09 jul. 2014.

PAULA, J.C.M. **Aproveitamento de resíduos de madeira para confecção de briquetes**. 48 f. 2006. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

RODRIGUES, J. Carnaúba continua entre os produtos mais exportados. **Notícias de Coreaú** – blogpost. 2012. Disponível em: <<http://coreauonline.blogspot.com.br/2012/09/carnauba-continua-entre-os-produtos.html>> Acesso em: 9 jul. 2019.

SANTOS JÚNIOR, Z. J. **Fabricação e caracterização de um compósito com matriz de resina poliéster ortoftálica e carga de fibras de agave *angustifolia* haw.** 138 f. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

SATHISHKUMAR, T. P. *et al.* Characterization of sisal/cotton fibre woven mat reinforced polymer hybrid composites. **Journal of Industrial Textiles**, v. 47, n. 4, 2016.

SINGH, J. *et al.* Properties of glass-fiber hybrid composites: a review. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v. 56, n. 5, p. 455-469, 2016.

SOUZA, L. G. V. M. **Efeito da hibridização de um compósito com matriz de resina poliéster e carga de tecido de fibra de algodão com uma carga de tecido de fibra de vidro tipo E**. 2019. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

VIEIRA, A. P. N. B. **Obtenção, caracterização e viabilidade de aplicação de um compósito com matriz de resina poliéster e carga de fibras do caroço do açaí**. 99 f. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.