



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL
MESTRADO PROFISSIONAL

HUDSON CARLOS MELO DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ANÁLISE FRACTOGRÁFICA DE
COMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM FIBRAS NATURAIS DO EPICARPO DO
COCO BABAÇU (*Orbignya Speciosa*)**

BELÉM-PA

2022

HUDSON CARLOS MELO DODS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ANÁLISE FRACTOGRÁFICA DE
COMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM FIBRAS NATURAIS DO EPICARPO DO
COCO BABAÇU (*Orbignya Speciosa*)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal Do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

Área de Concentração: Materiais e Metalurgia.

Orientador: Prof. Dr. Laércio Gouvêa Gomes

BELÉM

2022

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

S237c Santos, Hudson Carlos Melo dos.
Caracterização mecânica e análise fractográfica de compósitos
poliméricos com fibras naturais do epicarpo do coco babaçu (*orbignya
speciosa*). / Hudson Carlos Melo dos Santos. — 2022.
67 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Laércio Gouvêa Gomes Dissertação
(Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Industrial, Belém, 2022.

1. Sustentabilidade. 2. Matriz poliéster. 3. Resíduos
vegetais. 4. Babaçu. I. Título.

CDD 621.7

HUDSON CARLOS MELO DOS SANTOS

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ANÁLISE FRACTOGRÁFICA DE COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS COM FIBRAS NATURAIS DO EPICARPO DO COCO BABAÇU
(*Orbignya Speciosa*)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial.

Área de concentração: Materiais e Metalurgia.

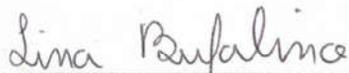
Data de Aprovação: 14 de dezembro de 2022.

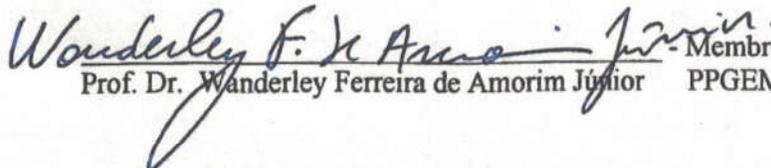
Banca examinadora:


Prof. Dr. Laércio Gouvêa Gomes - Orientadora/Presidente
PPGEI/UFPA


Prof. Dr. Alessandro de Castro Corrêa - Membro Interno
PPGEI/UFPA


Prof. Dr. Deibson Silva da Costa - Membro Externo
UFPA


Profa. Dra. Lina Bufalino - Membro Externo
PPGCF/UFPA


Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior - Membro Externo
PPGEM/UFPA

AGRADECIMENTOS

Antes e acima de tudo a Deus, por tudo que fez e tem feito em minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Laércio Gouvêa Gomes pela oportunidade de trabalho, orientações e paciência.

Ao Prof. Dr. Deibson Silva da Costa por suas contribuições, paciência e ajuda ao montar este trabalho, sempre disposto a esclarecer minhas dúvidas.

Ao Prof. Dr. Bernardo Borges Pompeu Neto pelas orientações e oportunidade que me foi concedida.

À minha esposa Salena Santos, pela paciência, conselhos e incentivos que me motivavam para que este momento se tornasse realidade.

Aos meus familiares em especial meu pai-avô Carlos Cardoso, pois sem ele nada seria possível. As minhas duas tias Odalia e Olbanisa, que praticamente exerceram o papel de mãe nessa minha caminhada. Ao meu pai Mario Cardoso, minha mãe-avó Olgarina e minha prima Andresa que não estão mais entre nós, mais lá de cima estão me guiando.

Aos amigos da coordenação de vigilância e segurança do trabalho (CVST) da UFPA pelos incentivos e compreensão ao longo dessa caminhada.

Aos amigos que contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho em especial Antonio Silva de Oliveira pela paciência e disponibilidade em ajudar com a aquisição e transporte dos cocos babaçu para extração das fibras.

Aos colegas e professores de turma que contribuíram de forma direta ou indireta na minha formação.

À banca examinadora pelo aceite do convite à apresentação deste trabalho.

RESUMO

A pressão exercida sobre os recursos naturais, advinda do crescimento exponencial da demanda mundial conduz a atividade humana a um cenário sem precedentes. Pesquisadores vêm demonstrando inúmeros esforços por soluções sustentáveis, nesse cenário observa-se o crescimento contínuo no desenvolvimento de materiais compósitos com fibras vegetais. Neste trabalho, foram produzidos materiais de matriz poliéster ortoftálica pura e materiais compósitos com fibras vegetais do epicarpo do coco babaçu. Os compósitos foram fabricados de forma manual utilizando moldes de silicone. As fibras caracterizadas quanto a sua morfologia, através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram inseridas de modo aleatório com frações mássicas fixados em 3 % e 5 %, comprimento variando entre 10 mm e 20 mm. Os compósitos produzidos foram analisados quanto as suas propriedades mecânicas, através dos ensaios de tração e flexão segundo as normas ASTM D 638 e ASTM D 790, e análise fractográfica da superfície de fratura através da microscopia eletrônica de varredura (MEV). A análise morfológica da superfície das fibras evidenciou sua rugosidade e características presentes das fibras vegetais. Para os compósitos com 3 % de fibras obteve-se uma resistência à tração de 20,03 MPa enquanto que os compósitos com 5 % de fibras o resultado foi de 14,16 MPa, em relação à propriedade de resistência à flexão os resultados obtidos foram de 32,34 MPa para os compósitos com 3 % de fibras e 37,01 MPa para os compósitos com 5 % de fibras, em ambas propriedades (resistência à tração e resistência à flexão) houve redução das mesmas quando comparados com o material de matriz pura. No que diz respeito ao módulo de elasticidade, os compósitos tiveram um aumento dessa propriedade mecânica quando comparados com a matriz pura, ratificando que o aumento da rigidez do material se dá pelo aumento da fração das fibras, com os melhores resultados obtidos nos compósitos com 5 % de fibras, 0,486 GPa nos ensaios de tração e 27,10 GPa nos ensaios de flexão. As análises fractográficas das superfícies de fratura demonstraram resultados satisfatórios, quanto à identificação dos mecanismos de falhas e características presentes nos compósitos, como presença de bolhas de ar, vazios e o fenômeno de fibras sacadas da matriz (*pull out*), indicando baixa adesão na interface matriz/fibra.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Matriz Poliéster; Resíduos Vegetais; Babaçu.

ABSTRACT

The pressure exerted on natural resources, arising from the exponential growth of world demand, leads human activity to an unprecedented scenario. Researchers have been demonstrating numerous efforts for sustainable solutions, in this scenario there is a continuous growth in the development of composite materials with vegetable fibers. In this work, pure orthophthalic polyester matrix materials and composite materials with plant fibers from the babassu coconut epicarp were produced. The composites were manufactured manually using silicone molds. The fibers characterized according to their morphology, through scanning electron microscopy (SEM), were randomly inserted with mass fractions set at 3% and 5%, length varying between 10 mm and 20 mm. The composites produced were analyzed for their mechanical properties, through tensile and flexural tests according to ASTM D 638 and ASTM D 790 standards, and fractographic analysis of the fracture surface through scanning electron microscopy (SEM). The morphological analysis of the surface of the fibers showed its roughness and characteristics present in vegetable fibers. For composites with 3% of fibers, a tensile strength of 20.03 MPa was obtained, while for composites with 5% of fibers, the result was 14.16 MPa. of 32.34 MPa for the composites with 3% of fibers and 37.01 MPa for the composites with 5% of fibers, in both properties (tensile strength and flexural strength) there was a reduction of the same when compared to the matrix material pure. With regard to the modulus of elasticity, the composites had an increase in this mechanical property when compared to the pure matrix, confirming that the increase in the stiffness of the material is due to the increase in the fiber fraction, with the best results obtained in composites with 5 % of fibers, 0.486 GPa in tensile tests and 27.10 GPa in bending tests. The fractographic analyzes of the fracture surfaces showed satisfactory results regarding the identification of failure mechanisms and characteristics present in the composites, such as the presence of air bubbles, voids and the phenomenon of fibers pulled out of the matrix (pull out), indicating low adhesion at the interface matrix/fiber.

Keywords: Sustainability; Polyester matrix; Plant Waste; babassu.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Material compósito	17
Figura 2 – As fases de um compósito	18
Figura 3 – Classificação dos materiais compósitos	20
Figura 4 – Classificação dos tipos de matrizes.....	21
Figura 5 – Classificação dos materiais compósitos segundo o reforço	24
Figura 6 – Classificação geral das fibras vegetais.....	26
Figura 7 – a) Palmeira do babaçu; b) Cachos de coco babaçu.....	27
Figura 8 – Coco babaçu e sua composição	28
Figura 9 – Mecanismos de falhas em materiais compósitos reforçados por fibras	35
Figura 10 – (a) Resina Poliéster Insaturada; (b) Acelerador de cobalto; (c) Iniciador.....	37
Figura 11 – Coco babaçu.....	38
Figura 12 – Fluxograma dos procedimentos experimentais	39
Figura 13 – Fluxograma de extração das fibras.....	39
Figura 14 – (a) Epicarpo do coco babaçu; (b) Fibras do epicarpo do coco babaçu.....	40
Figura 15 – Equipamentos: a) Estufa; b) Balança analítica	41
Figura 16 - Moldes de Silicone: a) Ensaio de tração; b) Ensaio de flexão	41
Figura 17 – Fluxograma de fabricação dos compósitos poliméricos	42
Figura 18 – Fibras secando na estufa.....	42
Figura 19 – Molde com o compósito fabricado.....	43
Figura 20 – Máquina universal de ensaios mecânicos.....	44
Figura 21 – Dimensões do corpo de prova em mm (ensaio de tração).....	45
Figura 22 – a) Corpos de prova para ensaio de tração; b) Ensaio de tração	45
Figura 23 – Dimensões do corpo de prova em mm (ensaio de flexão)	46
Figura 24 – Ensaio de flexão.....	46
Figura 25 – a) Metalizador; b) Amostras após processo de metalização.....	47
Figura 26 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV)	48
Figura 27 – Micrografia da fibra de coco babaçu com magnificações de 300x (a), 1000x (b) e 500x (c)	49
Figura 28 – Gráfico da relação tensão de resistência à tração e módulo de elasticidade na ruptura	51
Figura 29 – Gráfico comparativo da propriedade de tensão de resistência à tração dos compósitos com fibras de babaçu x resultados da literatura	53

Figura 30 – Análise fractográfica do compósito com fibras do epicarpo do coco babaçu após ensaio de tração	54
Figura 31 – Gráfico da relação tensão de resistência à flexão e módulo de elasticidade na ruptura	56
Figura 32 – Gráfico comparativo da propriedade de tensão de resistência à flexão dos compósitos com fibras de babaçu x resultados da literatura	57
Figura 33 – Análise fractográfica do compósito com fibras do coco babaçu após ensaio de flexão.....	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Principais resinas de poliéster	23
Tabela 2 – Dados obtidos através do ensaio de tração.....	50
Tabela 3 – Dados obtidos através do ensaio de flexão	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Contexto do Trabalho	12
1.2 Justificativa	13
1.3 Objetivo Geral.....	15
1.4 Objetivos Específicos.....	15
1.5 Organização do Trabalho	15
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1 Compósitos	17
2.1.1 Classificação dos Materiais Compósitos.....	19
2.2 Matriz	21
2.2.1 Matrizes Poliméricas.....	21
2.2.2 Resina Poliéster.....	22
2.2.3 Resinas Ortoftálicas.....	23
2.3 Reforço	23
2.3.1 Fibras Vegetais.....	25
2.3.1.1 Fibra do Epicarpo do Babaçu.....	27
2.4 Compósitos Poliméricos	29
2.4.1 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Naturais	29
2.5 Propriedades dos Compósitos Poliméricos.....	31
2.5.1 Propriedades Mecânicas	32
2.5.1.1 Ensaio de Resistência à Tração.....	33
2.5.1.2 Ensaio de Resistência à Flexão	34
2.6 Fratura em Compósitos	34
2.7 Fractografia.....	35
3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	37
3.1 Materiais.....	37
3.1.1 Poliéster Ortoftálico e Sistema Catalítico.....	37
3.1.2 Fibras Naturais	38
3.2 Procedimentos Experimentais	38
3.2.1 Extração das Fibras do Epicarpo do Babaçu	39
3.2.2 Caracterização Morfológica das Fibras do Epicarpo do Coco Babau.....	40
3.2.3 Fabricação dos compósitos.....	40
3.2.4 Caracterização Mecânica dos Materiais Compósitos.....	44

3.2.4.1 Ensaio de Resistência à Tração.....	44
3.2.4.2 Ensaio de Resistência à Flexão.....	46
3.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura – (MEV)	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1 Caracterização morfológica.....	49
4.1.1 Caracterização morfológica das fibras do epicarpo do coco babaçu (MEV).....	49
4.2 Propriedades Mecânicas dos Compósitos.....	50
4.2.1 Ensaio de Resistência à Tração.....	50
4.2.2 Ensaio de Resistência à Flexão.....	55
5 CONCLUSÃO	60
5.1 Conclusões	60
5.2 Recomendações para Trabalhos Futuros.....	61
REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Trabalho

Os polímeros vêm sendo utilizados pela humanidade desde 1600 antes de Cristo, através da borracha natural. Com o passar do tempo a humanidade continuou a explorar as possibilidades desses materiais de modo cada vez mais intensivo, inicialmente com polímeros naturais, como ceras, resinas e borrachas naturais e após o século XIX houve o início de desenvolvimento dos termoplásticos modernos (CRAWFORD, QUINN, 2016).

A indústria polimérica associada a grandes centros de pesquisa tem buscado cada vez mais alternativas economicamente viáveis e que objetivem em sustentabilidade. Vale ressaltar que, não só a reciclagem pode ser tida como meio para obter-se um produto sustentável, diversas práticas vêm sendo adotadas ao longo dos anos, tais como, destinação adequada das matérias primas não utilizadas em processos de manufatura, uso de materiais provenientes de fontes renováveis, dentre outras (ARANTES, 2020).

A pressão exercida sobre os recursos naturais, advinda do crescimento exponencial da demanda mundial conduz a atividade humana a um cenário sem precedentes, a insustentabilidade da produção industrial, bem como alterações severas no clima de todo o planeta, tornando indispensável à nova lógica do desenvolvimento sócio-ambiental sustentável, o reaproveitamento de rejeitos, bem como o desenvolvimento de materiais provenientes de fontes renováveis e não renováveis.

A conscientização com relação a questões relacionadas ao impacto ambiental e desenvolvimento sustentável tem levado a renovação no interesse em materiais provenientes de fontes naturais, aumentando a introdução de novas matérias-primas e produtos (GEORGE *et al.*, 2001).

A crescente preocupação com a utilização de recursos naturais, que vem sendo impulsionado pelo demasiado crescimento tecnológico, tende a aumentar o consumo de materiais no mundo. Esse aumento acaba sendo impactante em diversos setores industriais fazendo com que muitos pesquisadores comecem a pesquisar novos materiais e alternativas para um crescimento sustentável (SILVA, 2003).

Os materiais denominados não convencionais vêm cada vez mais sendo objetos de pesquisas científicas e estudos práticos de aplicação. Em diversos campos nos setores industriais, o uso de materiais compósitos já são uma realidade há algumas décadas e vem ganhando mais espaço em vários segmentos pelo fato de possibilitarem uma boa sinergia

entre os diferentes componentes que os formam, resultando numa gama de propriedades muitas vezes mais interessantes do que as dos componentes isolados (COSTA, 2016).

A partir de então, a adequação dos processos produtivos e o uso de materiais ecologicamente corretos, com origem em fontes renováveis, tem se mostrado um tópico prioritário em diversos estudos, estando os compósitos reforçados por materiais naturais e resíduos, como fibras vegetais e os resíduos minerais, entre os de maior relevância (COSTA, 2016).

O babaçu é uma palmeira de grande porte, com elevado número de frutos por cacho, e que possui sementes oleaginosas e comestíveis. Apresenta uma produção de óleo por hectare comparável à da soja, porém seu potencial tem sido pouco explorado (LAVIOLA *et al.*, 2014).

O aproveitamento do fruto do babaçu tem-se restringido a utilização do óleo da amêndoa, que representa em média, 7 % da massa do fruto, nesse processo, é desprezado até 93 % do fruto, correspondendo ao epicarpo, mesocarpo e endocarpo (QUEIROGA *et al.*, 2015).

Neste contexto, este estudo, propõe o desenvolvimento de um material compósito polimérico com fibras vegetais de coco babaçu de modo a se obter um material com boas propriedades para possíveis aplicações de engenharia.

1.2 Justificativa

A utilização de materiais compósitos é antiga e o desenvolvimento tecnológico demanda materiais que acompanham as exigências recentes em substituição aos materiais convencionais. Os setores aeronáutico e aeroespacial, bem como o setor militar, são tidos como motores para a crescente busca por alternativas. Materiais resistentes química, mecânica e termicamente são cada vez mais demandados e, embora essas características possam ser encontradas em materiais convencionais, algumas exigências limitam seu uso, como a massa específica. Nesse contexto, os compósitos apresentam uma grande flexibilidade de aplicação por apresentar a possibilidade de melhorias em suas propriedades e adequação às exigências para seu uso, abrindo um horizonte de novas possibilidades, que para tanto, necessitam de pesquisas em novos materiais e potencialização de materiais convencionais (CALLISTER, 2018).

As matrizes termorrígidas apresentam um enorme potencial para utilização das fibras vegetais, pois neste caso, podem-se utilizar métodos de processamento bastante simples e de

baixo custo, além de utilizar com vantagem fibras contínuas, sem a necessidade de se promover alterações nos procedimentos e/ou equipamentos de processamento (SILVA, 2003).

Nas últimas décadas houve um crescimento acentuado no desenvolvimento de compósitos reforçados por fibras vegetais, como uma alternativa econômica e ecológica, principalmente na substituição de fibra de vidro, como material de reforço. A fibra de vidro é abrasiva aos equipamentos de processamento, não é biodegradável, sua produção demanda alto consumo de energia e tem alta densidade. A utilização das fibras vegetais como reforço de polímeros, em substituição às fibras de vidro tem sido impulsionada, sobretudo, pelas vantagens ambientais que essa substituição pode apresentar, mas também pelo fato das fibras vegetais apresentarem baixas densidade e abrasividade, um bom conjunto de propriedades mecânicas e custo reduzido em relação às fibras de vidro (SPINACÉ *et al.*, 2011).

As fibras vegetais, quando comparadas às fibras sintéticas, possuem vantagens como o baixo custo de obtenção, são leves, emitem uma menor quantidade de CO₂ para a atmosfera, podem ser obtidas utilizando 80 % menos energia, possuem boas propriedades mecânicas quando relacionado ao seu peso e resistência, e não danificam os equipamentos de processo (SHAWKATALY *et al.*, 2015).

O campo de emprego das fibras naturais é bastante amplo, abrangendo desde as aplicações clássicas na indústria têxtil até o reforço de matrizes poliméricas termoplásticas e termofixas. As fibras lignocelulósicas são excelentes matérias-primas para a química de polímeros e compósitos, o que pode ser comprovado pelo elevado número de patentes nacionais e internacionais e o elevado número de produtos já comercializados (SILVA *et al.*, 2009).

Dentre as fibras vegetais utilizadas como reforço em compósitos estão as fibras de babaçu. O babaçu é importante, por seus aspectos ecológicos, sociais, econômicos e ambientais. De todas as partes da palmeira de babaçu, o fruto é a que apresenta o maior potencial econômico, onde o mesocarpo do fruto produz carvão de alta qualidade, sendo empregado como fonte de energia em siderurgias. A utilização de fibras vegetais é bastante restrita, sendo sua utilização principalmente no artesanato, com poucas utilizações industriais, sempre em pequena escala (CARRAZZA *et al.*, 2012).

Do ponto de vista econômico e ambiental, o trabalho justifica-se pelo custo inicial baixo e contribuindo para minimização de prováveis impactos ambientais, quando comparado com as fibras sintéticas.

1.3 Objetivo Geral

Fabricar compósitos de matriz poliéster ortoftálica reforçados com fibras do epicarpo do coco babaçu e avaliar quanto as suas propriedades.

1.4 Objetivos Específicos

- Caracterização morfológica (MEV) da superfície da fibra do epicarpo do coco babaçu;
- Fabricação dos compósitos poliméricos com as seguintes configurações:
 - ✓ Matriz polimérica pura;
 - ✓ Compósitos de matriz polimérica com adição de fibras vegetais do epicarpo do coco babaçu nas frações mássicas de 3 % e 5 %;
- Caracterização mecânica (tração e flexão) dos compósitos poliméricos fabricados;
- Comparar as propriedades dos compósitos reforçados com fibras do epicarpo do coco babaçu com o material de matriz polimérica pura;
- Investigar a superfície de fratura por fractografia (MEV) identificando os mecanismos de falhas e imperfeições dominantes para cada série de compósitos produzida.

1.5 Organização do Trabalho

Este trabalho foi disposto em cinco seções.

A primeira seção enfatiza a introdução, com o contexto do trabalho, justificativa para o desenvolvimento do mesmo e os objetivos que levaram à pesquisa sobre a produção e caracterização dos compósitos poliméricos com adição de fibras naturais (babaçu).

Revisão da literatura, a segunda seção apresenta o referencial teórico do trabalho, escrito com base em diversos artigos e trabalhos científicos além de livros. Apresenta-se nela uma abordagem geral sobre o que vêm a ser um material compósito, fazendo também uma revisão bibliográfica sobre compósitos poliméricos, propriedades dos compósitos e matrizes poliméricas, além de comentar sobre as fibras vegetais utilizadas no trabalho.

A terceira seção, denominada “Materiais e Métodos”, identifica os materiais e as metodologias experimentais utilizadas neste trabalho.

Na quarta seção, chamada de “Resultados e Discussões” apresenta as análises, interpretações e discussões sobre os resultados encontrados.

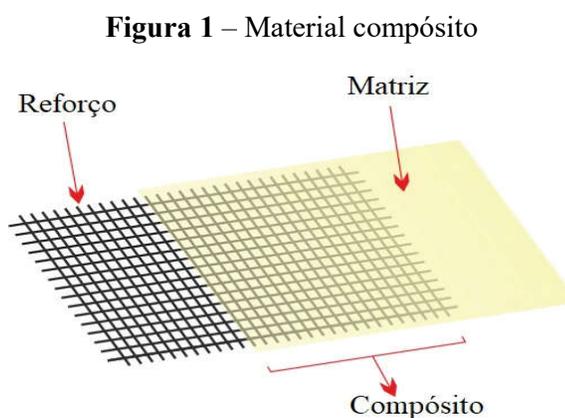
A quinta seção compreende as considerações finais deste estudo com a formulação das conclusões obtidas, resultantes de todo o desenvolvimento do trabalho. Apresenta sugestões para trabalhos futuros possíveis de serem realizados e mostra o referencial bibliográfico utilizado.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Compósitos

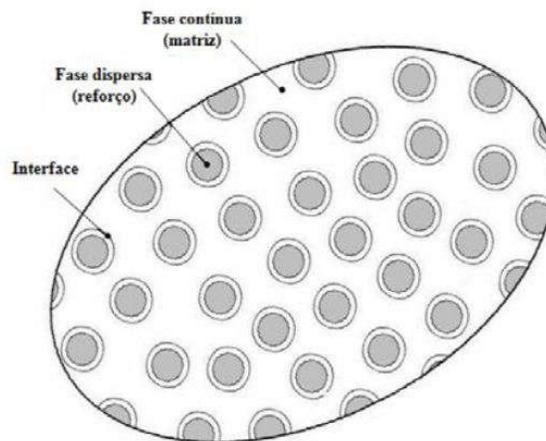
Materiais compósitos ou compósitos são materiais resultantes da combinação de dois ou mais componentes, que diferem nas propriedades físicas e químicas de cada um. A finalidade da combinação é prover características específicas para o material resultante, de acordo com cada tipo de aplicação desejada (CARVALHO, 2005).

Um compósito é um material multifásico feito artificialmente, em contraste com um material que ocorre ou que se forma naturalmente. Além disso, as fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e estar separadas por uma interface distinta (CALLISTER, 2018). A Figura 1 representa o material compósito.



Fonte: Site da empresa OXYBLACK (2021)

Um compósito é constituído por um reforço e uma matriz. O reforço, de elevada resistência e rigidez, é impregnado pela matriz, o que mantém as fibras na sua posição geométrica e transmite tensão através do componente, garantindo ao mesmo tempo a resistência química. Os materiais compósitos são usados em uma ampla gama de aplicações dos setores automotivo, aeronáutico e esportivo e para a construção e arquitetura. Existem diferentes processos de fabricação, dependendo do tipo de aplicação, taxa de produção e tamanho dos componentes (RAGONDET, 2005). A Figura 2 representa as fases de um compósito.

Figura 2 – As fases de um compósito

Fonte: Daniel e Ishai, (2006)

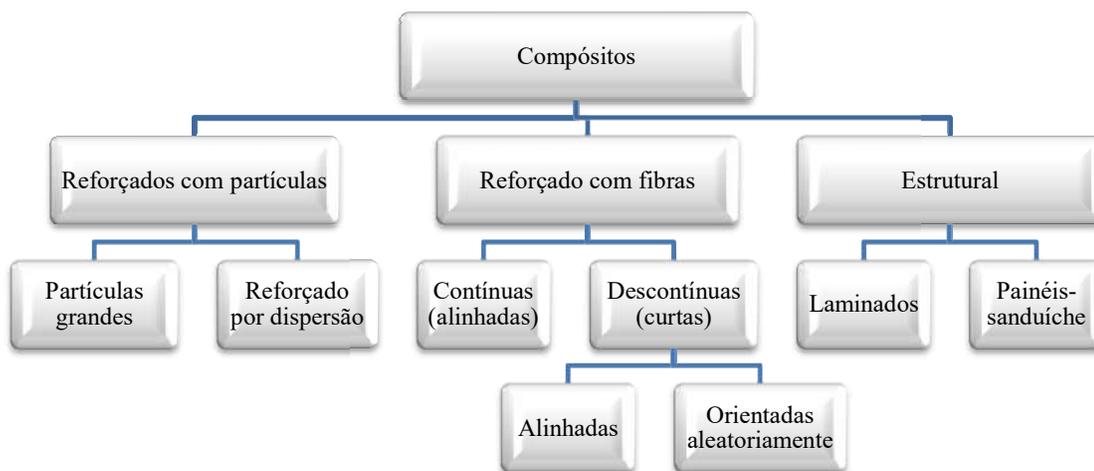
Segundo Pereira (2000), o interesse dos materiais compósitos está ligado a dois fatores: econômico e performance. O fator econômico vem do fato dos compostos serem muito mais leve que os materiais metálicos, o que implica numa economia de combustível e conseqüentemente, num aumento de carga útil (aeronáutica e aeroespacial). A redução na massa total do produto pode chegar a 30 % ou mais, em função da aplicação dada ao material compósito. O custo de fabricação de algumas peças em material compósito pode ser também sensivelmente menor se comparado com os materiais metálicos. O fator performance está ligado a procura por um melhor desempenho de componentes estruturais, sobretudo no que diz respeito às características mecânicas (resistência a ruptura, resistência à ambientes agressivos, etc.). O caráter anisotrópico dos materiais compostos é o fator primordial para a obtenção das propriedades mecânicas requeridas pelo componente. A leveza juntamente com as excelentes características mecânicas faz com que os materiais compósitos sejam cada vez mais utilizados dentro das atividades esportivas. Os principais aspectos mecânicos que indicam larga vantagem no uso dos compósitos são principalmente:

- **Leveza e facilidade de transporte** - Devido ao peso específico das resinas e das fibras de reforço, os produtos fabricados a partir dos compósitos apresentam um baixo peso específico. Devido a esta e a outras propriedades características dos materiais compósitos é que eles são amplamente utilizados nos setores de aeronáutica, naval, automobilístico e outros;

- **Resistência química** - Os compósitos apresentam excepcional inércia química, o que permite sua utilização em uma ampla gama de ambientes agressivos quimicamente. Além disso, aditivos especiais e resinas específicas estão à disposição dos técnicos para solucionar aplicações que requeiram propriedades além das usuais;
- **Resistência às Intempéries** - Umidade, vento, sol, oscilações térmicas tem baixa ação prejudicial sobre os compósitos. E quando características não usuais são requeridas, aditivos como protetores de UV, resinas especiais são amplamente utilizáveis;
- **Flexibilidade Arquitetônica** - Os compósitos têm uma grande vantagem sobre outros materiais estruturais, pois moldes com formas complexas são facilmente adaptáveis aos processos em utilização. Curvas, formas diferenciadas, detalhes arquitetônicos das empresas de materiais compósitos;
- **Durabilidade** - O compósito, devido à sua composição e ao crosslinking polimérico formado durante o processo de moldagem, apresenta como característica uma alta durabilidade;
- **Fácil Manutenção** - Os compósitos além de sua longevidade tradicional apresentam fácil e simples técnica de reparo e manutenção;
- **Resistência Mecânica** - Devido às suas características e à variedade de combinações que podem ser realizadas entre as resinas e os materiais de reforço, os compósitos apresentam uma excelente resistência mecânica que possibilita a sua utilização em aplicações no setor de aeronáutica, naval, automobilístico e outras.

2.1.1 Classificação dos Materiais Compósitos

A tipologia dos materiais compósitos é bastante variável e depende de uma série de fatores. Ao observar a forma como o material de reforço é distribuído, podem-se classificar os compósitos em fibrosos (reforçados por fibras), laminados (estruturais) e particulados (FERRANTE, 2002). Observa-se, na Figura 3 a classificação dos materiais compósitos.

Figura 3 – Classificação dos materiais compósitos

Fonte: Adaptado de Callister, (2018)

Nos particulados os reforços são equiaxiais e muitas vezes apresentam formato esférico. Compósitos de matrizes metálicas ou poliméricas podem ser ótimos exemplos deste tipo de material. No aumento da resistência por dispersão, uma melhor resistência é obtida por partículas extremamente pequenas da fase dispersa, as quais inibem o movimento das discordâncias. O tamanho das partículas é geralmente maior nos compósitos com partículas grandes, cujas características mecânicas são melhoradas pela ação de reforço, os módulos de elasticidade superior e inferior dependem dos módulos e das frações volumétricas das fases matriz e particulada (FERRANTE, 2002; CALLISTER, 2018).

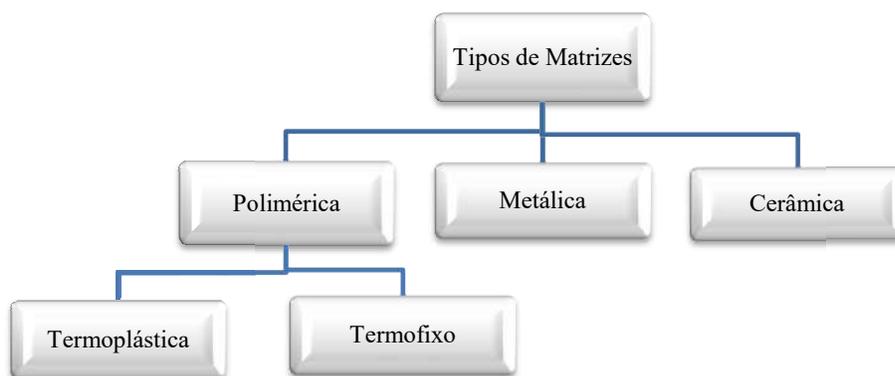
Compósitos Fibrosos dentre os vários tipos de compósitos são os que apresentam o maior potencial para a eficiência do reforço, nesse tipo de compósito uma carga aplicada é transmitida e distribuída entre as fibras pela fase matriz, que na maioria dos casos é pelo menos moderadamente dúctil. Um reforço significativo é possível apenas se a ligação matriz-fibra for forte, uma vez que o reforço é interrompido nas extremidades das fibras, a eficiência do reforço depende do comprimento da fibra (CALLISTER, 2018).

Compósitos Estruturais: Os compósitos laminados são virtualmente isotrópicos em um plano bidimensional, isso é possível com o emprego de várias lâminas de um compósito altamente anisotrópico, unidas uma sobre as outras de tal modo que a direção de alta resistência varie a cada camada sucessiva. Os compósitos em forma de sanduíche consistem em duas lâminas superficiais rígidas e resistentes que estão separadas por um material ou estrutura de núcleo, essas estruturas combinam resistência e rigidez relativamente altas com baixa massa específica (CALLISTER, 2018).

2.2 Matriz

A escolha da matriz é de grande importância para alcançar as características finais desejadas do material compósito, pois ela tem como função proteger as fibras, distribuir o carregamento pelas fibras, dando ao compósito grande parte de suas propriedades, sejam elas, mecânicas, térmicas ou químicas. As matrizes podem ser poliméricas, cerâmicas ou metálicas, conforme ilustra a Figura 4, onde a mais usual é a polimérica devido a sua diversidade de formulações e o baixo custo de processamento, podendo ser termoplástica ou termofixa (NIJSEN, 2015).

Figura 4 – Classificação dos tipos de matrizes



Fonte: Adaptado de Callister, (2018)

A escolha da matriz dependerá das propriedades exigidas para uma determinada aplicação, como também do processo de fabricação escolhido e do custo associado.

De acordo com Callister (2018), a fase matriz exerce normalmente três funções:

- Une as fibras e transmite uma carga aplicada externamente às fibras;
- Protege as fibras individuais contra danos superficiais;
- Previne a propagação de trincas de fibra para fibra.

2.2.1 Matrizes Poliméricas

Os materiais poliméricos são compostos por grandes cadeias moleculares estruturalmente mais complexas do que os metais e os cerâmicos. Essas cadeias são formadas por átomos de carbono ligados covalentemente, o que resulta em materiais geralmente com baixa condução de calor e eletricidade. Em contrapartida, esses materiais são normalmente

baratos e de fácil processamento, além de apresentar considerável resistência química (CHAWLA, 2012).

Os polímeros permitem grande variedade na fabricação de matrizes, sendo por isso, o material mais utilizado na confecção de compósitos, com destaque para as resinas. As resinas que são usadas como matrizes em compósitos reforçados com fibras podem ser classificadas em dois tipos, termorrígidas e termoplásticas, de acordo com a influência da temperatura nas suas características (PILATO; MICHNO, 1994).

Embora existam vários tipos de resinas usadas em compósitos para indústria, a maioria das partes estruturais é feita principalmente com resina termofixa, ou seja, que necessitam de uma reação de cura. Dentre essas resinas a poliéster, vinil éster e epóxi são as mais utilizadas (SOBRINHO, 2005).

2.2.2 Resina Poliéster

Poliéster é o nome dado a uma categoria de materiais obtidos por meio de uma reação de condensação entre um poliálcool e um ácido policarboxílico. O tipo de ácido influencia as propriedades finais das resinas poliésteres ortoftálicas, isoftálicas e tereftálicas. Se um ou ambos constituintes principais são insaturados, ou seja, contêm uma ligação dupla relativa entre átomos de carbono, a resina resultante é insaturada (MOTA, 2016).

As resinas de poliéster são de uma família de polímeros formados da reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos e glicóis que, quando reagidos, dão origem a moléculas de cadeias longas lineares. Se um ou ambos constituintes principais são insaturados, ou seja, contêm uma ligação dupla reativa entre os átomos de carbono, a resina resultante é insaturada. A reação de síntese da resina poliéster é uma reação de polimerização por condensação em etapas, ou seja, a reação de um álcool (base orgânica) com um ácido, resultando em uma reação de esterificação, formando um éster e água (LEVY NETO, PARDINI, 2006).

A resina poliéster é a mais empregada para confecção de compósitos poliméricos, isto se deve ao fato de aliar bom desempenho mecânico, boas condições de reatividade, custo mais acessível que a resina epóxi ou éster-vinilica e a diversidade de formulações disponíveis para atender os requisitos exigidos em diferentes áreas de aplicações dos compósitos (MARINUCCI, 2011).

As principais resinas poliéster são as ortoftálicas, as tereftálicas, as isoftálicas e as bisfenólicas. Existem ainda algumas outras variações que são desenvolvidas periodicamente para necessidades específicas como as de ácido HET (melhor resistência química), bromadas

(características anti-chamas), low-profile (baixa concentração), emulsionadas (baixo teor de estireno-ecológica), etc. (TAKAHASHI, 2011). A Tabela 1 descreve as principais resinas de poliéster.

Tabela 1 – Principais resinas de poliéster

PRINCIPAIS RESINAS	COMENTÁRIOS
Ortoftálica	Resina mais comum de menor custo para usos básicos não nobres.
Tereftálica	Possui resistências físicas pouco superiores a ortoftálica, porém baixa resistência à UV.
Isoftálica	Melhores características mecânicas, químicas e térmicas que as anteriores.
Bisfenólica	Possui melhores características químicas e térmicas.

Fonte: Takahashi, (2011)

2.2.3 Resinas Ortoftálicas

Essa resina possui baixa viscosidade e reatividade, além de ter baixo custo e, quando utilizada nos compósitos poliméricos, proporcionando 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).

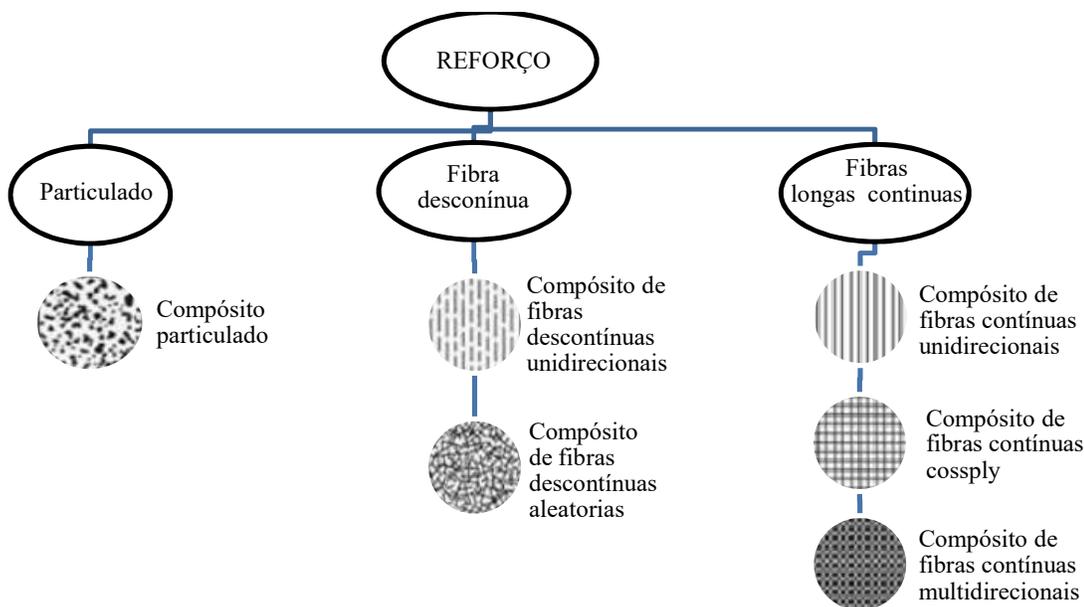
Outros aspectos positivos apresentados pelas resinas ortoftálicas estão relacionados a sua praticidade, visto que não requer a utilização de muitos recursos para sua aplicação. Após o processo de cura, as peças que receberam as aplicações das resinas ortoftálicas podem ser submetidas aos processos de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

2.3 Reforço

O principal objetivo dos reforços em matérias compósitos é receber e distribuir as solicitações mecânicas, sofrida pelo material compósito.

Os reforços apresentam-se, em geral, sob a forma de partículas, fibras curtas (ou descontínua) e fibras longas (ou contínuas). O compósito de fibras descontínuas contém pequenas fibras (por exemplo, fibras picadas ou whiskers) como reforçadoras ao passo que os compósitos de fibras contínuas são elementos reforçados por longas fibras contínuas, sendo os mais eficientes do ponto de vista de rigidez e resistência. Nesses últimos as fibras podem ser orientadas paralelamente (unidirecional). Por sua vez, os compósitos particulados consistem de partículas de várias formas e tamanhos e formas dispersas aleatoriamente dentro da matriz (DANIEL, ISHAI, 2006). A Figura 5 resume as formas que os reforços são apresentados.

Figura 5 – Classificação dos materiais compósitos segundo o reforço



Fonte: Adaptado de Daniel e Ishai, (2006)

O modo como a carga é disposta na matriz, influencia diretamente a isotropia do sistema compósito. Quando a carga está em forma de partículas, com todas as dimensões aproximadamente iguais, o material compósito comporta-se essencialmente como um material isotrópico, cujas propriedades independem da direção (SOUZA, 2020).

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 polimérico (SOUZA, 2020).

Em geral, o uso de fibras a partir de resíduos agrícolas como reforço em compósitos oferece uma solução de baixo custo e ambientalmente amigável para eliminação dos resíduos, além da possibilidade de obter lucro com os resíduos (ZINI, SCANDOLA, 2011).

As fibras lignocelulósicas chamaram atenção considerável como substitutos das fibras sintéticas, como fibras de vidro e carbono. Os compósitos reforçados com fibras naturais são estudados para muitas aplicações, como automóveis, aeroespaciais, embalagens e indústrias de construção, onde não é necessária uma capacidade de carga elevada (ZINI, SCANDOLA, 2011).

2.3.1 Fibras Vegetais

Diante de um cenário que preza pela sustentabilidade, o incentivo ao uso de fibras naturais como adição em compósitos se intensifica e cresce consideravelmente o número de pesquisas na área. Deste modo, a ideia de adicionar os resíduos em matrizes é uma alternativa que visa a diminuição dos resíduos vegetais. Estes resíduos são, em sua maioria, caracterizados como rejeitos, devido a sua inutilidade e destinação inadequada, podendo ser mais bem aproveitados na criação de novos materiais menos poluentes (GARCEZ *et al.*, 2018).

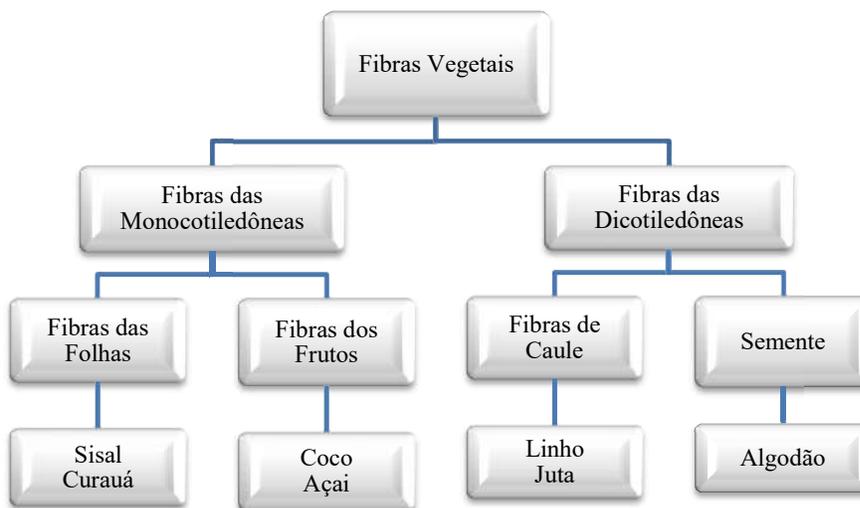
O Brasil é um país privilegiado geograficamente, possui condições climáticas e solo fértil para o cultivo de uma extensa variedade de espécies de plantas. O investimento no emprego de fibras vegetais contribui com a economia, com a geração de renda, ameniza poluições ambientais e substitui e/ou diminui a utilização de recursos de fontes não renováveis e não biodegradáveis (SATYANARAYANA *et al.*, 2007).

As fibras naturais podem ser divididas em vegetais, animais e minerais, e um fator muito importante para a escolha dessas fibras é em relação ao seu ciclo de vida, que engloba basicamente o manuseio, processamento, lavagem e secagem, limpeza, distribuição, confecção dos artefatos, descarte final e a capacidade de renovação e reprodução da espécie, sendo as fibras vegetais as mais estudadas e utilizadas como reforço de materiais compósitos (MOURA, PAULO, 2012).

As fibras vegetais apresentam suas estruturas de comprimentos alongados, e seção transversal vazada e arredondada. As fibras vegetais são um tipo de fibra natural e podem ser distinguidas conforme sua origem na estrutura da planta, em: (a) fibras dos frutos, como coco e açaí; (b) fibras do caule, como linho, juta, kenaf; (c) fibras das folhas, como sisal e curauá; fibras de sementes, como algodão (MUELLER, KROBJILOWSK, 2003). As fibras oriundas

do caule ou das folhas são chamadas fibras duras e são mais utilizadas como reforço em compósitos poliméricos (SILVA, 2003). A Figura 6 apresenta uma classificação geral das fibras vegetais.

Figura 6 – Classificação geral das fibras vegetais



Fonte: Adaptado de Mueller e Krobjilowsk, (2003)

As fibras apresentam propriedades que podem ser divididas em primárias e secundárias. As propriedades primárias envolvem relação comprimento-largura (fator de forma), tenacidade, flexibilidade, coesão e uniformidade. As propriedades secundárias englobam a densidade, capacidade de absorção de água, alongamento, elasticidade, resiliência, comportamento térmico, resistência a microorganismos, exposição à luz, dentre outros (CANDIDO, 2014).

Em comparação com as fibras sintéticas, as fibras vegetais ou lignocelulósicas, possuem as características que tornam seu uso bastante vantajoso, tais como: origem natural abundante, de baixo custo e de fácil renovação, baixa densidade, altas propriedades específicas, sendo menos abrasivas em comparação com as fibras de vidro, não tóxicas e biodegradáveis (BLEDZIK, GASSAN, 1999).

No entanto as fibras naturais não podem substituir as sintéticas em toda a sua vasta gama de aplicações porque elas possuem baixa resistência à umidade, em comparação com fibras sintéticas, como fibra de vidro e de carbono. Além disso, as fibras naturais possuem uma baixa temperatura de processamento (limitada a aproximadamente 200 °C) e um baixo módulo de elasticidade (LEVY NETO, PARDINI, 2006).

Para os compósitos com resinas termorrígidas essa característica não é limitante, uma vez que a cura das resinas ocorre, geralmente, em temperaturas inferiores a 200 °C (SILVA, 2003).

2.3.1.1 Fibra do Epicarpo do Babaçu

O babaçu é um tipo de palmeira da família botânica *Arecaceae*, presente em diversos países da América Latina. No Brasil, seu uso é bastante difundido na Amazônia, na Mata Atlântica, no Cerrado e na Caatinga, onde ocorre espontaneamente em vários estados. Nessas regiões, o babaçu é encontrado principalmente em formações conhecidas como babaçuais que cobrem cerca de 196 mil km² no território brasileiro, com ocorrência concentrada nos estados do Maranhão, Tocantins e Piauí, na região conhecida como mata dos cocais (CARRAZZA *et al.*, 2012).

A palmeira de babaçu pode atingir entre 10 a 20 metros de altura com folhas (chamadas de palha) que podem chegar até 8 metros de comprimento. Os frutos do babaçu (coco babaçu) ocorrem em cachos. Cada safra pode ter entre 3 e 5 cachos, e cada cacho pode produzir de 300 a 500 cocos. O coco tem formato elipsoidal, de coloração castanha, pesando entre 90 a 280 g cada (ALBIERO *et al.*, 2007). A Figura 7 ilustra a palmeira de babaçu e os cachos de cocos babaçu.

Figura 7 – a) Palmeira do babaçu; b) Cachos de coco babaçu



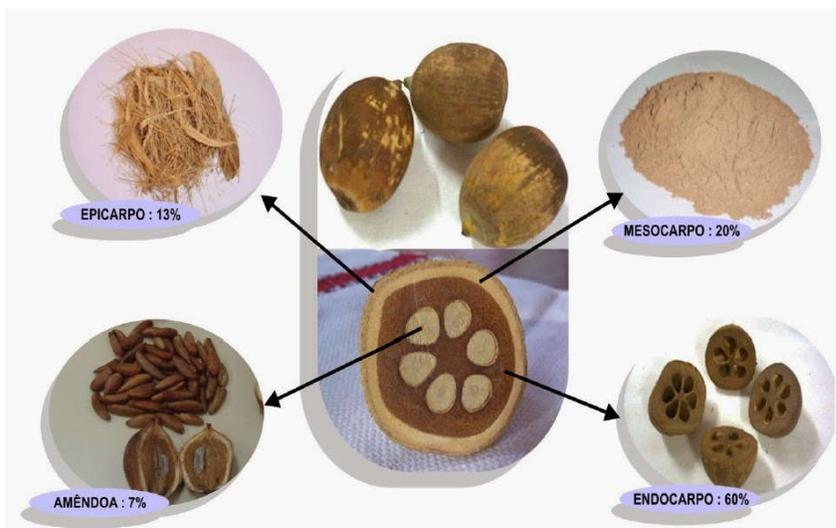
(a)

(b)

Fonte: Sousa, (2016)

O coco babaçu é composto por três camadas: uma externa e fibrosa (epicarpo); uma intermediária, fibrosa-amilácea (mesocarpo) e uma interna, lenhosa (endocarpo), na qual se encontra inseridas as amêndoas. É comum, chamarmos de casca, o conjunto das três camadas, as quais correspondem cerca de 93 %, em peso, do coco (PAVLAK *et al.*, 2007). A Figura 8 ilustra o coco babaçu com seus respectivos componentes.

Figura 8 – Coco babaçu e sua composição



Fonte: Babcoall (2018)

O epicarpo, que corresponde a 12 % em peso do coco, é um material fibroso e lignocelulósico, aproveitado principalmente para fins energéticos. O mesocarpo (20 % em massa do fruto) é composto de 60 a 70 % de amido, sendo utilizado para fins alimentícios tanto para humanos como para animais. O endocarpo, com 60 % do fruto, apresenta elevada dureza se prestando à produção de carvão. As amêndoas, que correspondem a 7 % do fruto, contêm cerca de 60 % de um óleo rico em ácido láurico. O óleo de babaçu é o principal produto obtido desse fruto, e tem sido aplicado nas indústrias oleoquímicas, de cosméticos, de biocombustíveis e, principalmente, de alimentos. Embora tenham grande potencial de utilização, os componentes da casca do coco babaçu (epicarpo, mesocarpo e endocarpo) na maioria das vezes são rejeitos da extração do óleo das amêndoas (SOUSA, 2016).

As fibras do epicarpo do coco babaçu podem ser aproveitadas para a produção de xaxim, estofados, embalagens, vasos, placas, murais, etc. (CARRAZZA *et al.*, 2012).

Para obtê-las, é preciso “descascar” o coco. Este processo pode ser feito com o uso de uma máquina despeliculadeira separando a “pele” (epicarpo misturado ao mesocarpo) do endocarpo com as amêndoas (CARRAZZA *et al.*, 2012).

2.4 Compósitos Poliméricos

São materiais de moldagem estruturais constituídos por uma fase contínua polimérica (plástico) reforçada por uma fase descontínua fibrosa e que se agregam físico-quimicamente após um processo de polimerização (curado), ou seja, são também denominados de plásticos reforçados com fibras (COSTA, 2016).

Na moldagem destas duas fases ocorre um “endurecimento” polimérico através de um processo de cura, que acopla as duas fases, proporcionando ao material final, propriedades especiais que definem sua moderna e ampla aplicabilidade. Propriedades como leveza, flexibilidade, durabilidade, resistência e adaptabilidade, transformam os compósitos poliméricos nos materiais do futuro (COSTA, 2016).

A maioria dos compósitos foi criada para melhorar combinações de características mecânicas, tais como rigidez, tenacidade e resistências às condições do ambiente e de temperaturas elevadas (CALLISTER, 2018).

Em compósitos poliméricos, a fase dispersa é formada por um componente que pode ser um agente de reforço ou de enchimento. O material de reforço é, usualmente, mais rígido e resistente que a matriz e tem como função melhorar as propriedades mecânicas do polímero, enquanto que a carga de enchimento é usada para modificar as propriedades da matriz polimérica e/ou reduzir custos (CALLISTER, 2018).

2.4.1 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Naturais

No atual cenário em que se busca cada vez mais reduzir os impactos ambientais decorrente dos processos de fabricação dos mais diversos materiais, as fibras vegetais vêm aumentando sua participação como material de reforço em compósitos dos mais variados tipos de aplicação. Essas fibras que em sua grande maioria são classificadas como rejeitos, devido ao não aproveitamento e/ou destino inadequado, podem ser melhores aproveitadas no desenvolvimento de compósitos ecologicamente corretos.

De acordo com Franco (2010), a utilização de compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais não é recente, sendo que, as primeiras patentes têm seus registros na década de sessenta.

Compósitos reforçados por fibras naturais têm atraído a atenção da comunidade científica principalmente porque eles estão se transformando em uma solução alternativa para as fontes de petróleo em esgotamento. A produção de materiais 100 % à base de fibras naturais como substituto aos produtos à base de petróleo não é uma solução econômica. A solução mais viável seria a de combinar os recursos petrolíferos e os de base biológica para desenvolver um produto de baixo custo, com diversas aplicações. A aplicação de compósitos reforçados por fibras naturais tem se estendido a quase todos os campos (JOHN, ANANDJIWALA, 2008).

Em geral, a melhor combinação das propriedades dos compósitos reforçados com fibras naturais é obtida quando a sua distribuição é uniforme. Os compósitos com fibras contínuas e alinhadas têm respostas mecânicas que dependem de vários fatores, como o comportamento tensão-deformação das fases fibra matriz, as frações volumétricas das fases e a direção na qual a tensão ou carga é aplicada (EL BANNA, 2017).

Estudos recentes têm relatado o uso de fibras do epicarpo do coco babaçu em compósitos de matriz polimérica:

Arantes (2020) através dos resultados obtidos, mostra que a fibra de babaçu além de ser uma matéria prima de origem renovável com viés socioambiental, ainda apresenta características satisfatórias para incorporação em materiais poliméricos.

Rodrigues (2019) percebeu que a fibra do coco babaçu apresentou possível potencial para a produção de compósitos, pois houve bons resultados para as propriedades físicas e que vão de acordo com valores de outros estudos para painéis de fibras encontrados na literatura.

Machado *et al.* (2017) rematou que o uso de resíduos do coco babaçu como matéria-prima de painéis aglomerados promovem excelente desempenho mecânico a painéis aglomerados, acima dos requeridos pelos documentos normativos nacional e internacional, especialmente o epicarpo de babaçu.

Carvalho (2012) estudou a influência de diversos tratamentos químicos sobre a superfície de fibras extraídas do epicarpo do coco babaçu e verificou uma melhora significativa na interação fibra-matriz em compósitos de matriz polimérica.

Martins *et. al.* (2011) através dos resultados obtidos demonstram a possibilidade de utilização das fibras de pupunha, balsa e babaçu para a confecção de materiais compósitos,

pois apresentam estrutura química característica de material lignocelulósico, e boa estabilidade térmica, até cerca de 220 °C.

Franco (2010) conclui que as fibras do epicarpo do coco babaçu apresentam nas determinações teores compatíveis com outras fibras lignocelulósicas, ressaltando que o teor de cinzas que foi encontrado é justificado pelas qualidades carvoeiras do babaçu, que possui alto teor energético, inclusive, acima do carvão mineral.

Nunes (2009) aplicou fibras extraídas do epicarpo do babaçu como reforço em compósitos com matriz de resinas derivadas da glicerina e concluiu que as mesmas apresentam propriedades similares a outras fibras utilizadas como agente de reforço em compósitos.

Andrade e Nóbrega (2009) concluíram que os resultados preliminares indicam que as fibras de coco babaçu podem ser utilizadas em compósitos poliméricos, para aplicações onde seja necessário médio desempenho mecânico.

2.5 Propriedades dos Compósitos Poliméricos

Para formar o material compósito é necessário haver uma interação entre a matriz polimérica e o reforço, proporcionando a transferência de esforços mecânicos, uma vez que as propriedades do compósito dependem dessa interação. As propriedades dos compósitos são, também, função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa (CALLISTER, 2018).

De acordo com Rabelo (2000), os seguintes fatores são fundamentais para determinar as propriedades dos compósitos poliméricos:

a) Propriedades dos componentes individuais e composição:

Ao se adicionar um reforço a um polímero, a primeira idéia é de que as propriedades do novo material formado sejam intermediárias entre as propriedades dos dois componentes. Esse comportamento é previsto para a propriedade (P) de um compósito, através da regra das misturas. A equação geral da regra das misturas é dada por:

$$P = Pa.Va + Pb.Vb \quad (1)$$

Onde os índices a e b referem-se aos componentes (matriz e fase dispersa) e V é a fração volumétrica.

b) Interação entre as fases:

A transferência de tensões entre o polímero e a reforço ocorre através da região de contato, denominada *interface*. Assim, a interface assume papel decisivo nas propriedades mecânicas do material final, de modo que uma boa aderência resulta em boas propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade e resistência mecânica. Esta aderência está relacionada com as propriedades químicas da carga, bem como com as conformações moleculares e constituição química da matriz.

c) Razão de aspecto e porosidade da carga:

A transferência de tensões entre a matriz e o reforço é mais eficiente quando a razão de aspecto é alta. Logo, o reforço mais eficiente é obtido com o uso de fibras, seguido por escamas ou plaquetas e finalmente por partículas esféricas, onde a razão de aspecto é igual a um. O aumento da razão de aspecto, além de aumentar a resistência à tração, aumenta também o módulo elástico. No caso de compósitos fibrosos, existe um comprimento de fibra crítico para se obter boas propriedades, pelo fato das extremidades das fibras serem pontos de concentração de tensões que fragilizam o material. Com comprimentos elevados e alinhamento no sentido da sollicitação, as fibras passam a suportar as tensões diretamente, elevando a resistência do material. O tamanho das partículas também é importante, pois define a área de contato com a matriz. Em geral, a resistência aumenta com a diminuição do tamanho do particulado.

d) Dispersão do reforço:

Boa dispersão do reforço na matriz é uma das condições necessárias para se ter boas propriedades mecânicas. Há uma tendência natural dos reforços formarem aglomerados, impedindo o envolvimento completo pela matriz, o que gera concentração de tensões e consequentemente redução das propriedades mecânicas do material.

2.5.1 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas dos compósitos, em que a fase dispersa é um material fibroso dependem de alguns fatores, tais como, fração volumétrica, razão de aspecto, distribuição e orientação das fibras, adesão interfacial entre a fibra e a matriz, composição química da matriz polimérica e das fibras (LIU, TANAKA, 2003).

O conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais é extremamente importante e sua determinação pode ser feita através da execução de experimentos em laboratório que objetivam representar o mais próximo possível às condições reais de aplicação. Alguns fatores

devem ser considerados, por exemplo, a natureza e a duração da carga aplicada (CALLISTER, 2018).

A caracterização mecânica dos compósitos poliméricos consistiu na execução dos ensaios de resistência a tração e resistência à flexão.

2.5.1.1 Ensaio de Resistência à Tração

A resistência à tração, ou resistência à tração na ruptura, ou tenacidade de um material, é avaliada pela carga aplicada (F) ao material por unidade de área (A), no momento de ruptura.

O ensaio de tração trata-se de ensaio amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, devido à vantagem de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais (RAMULU *et al.*, 2004).

O ensaio de tração caracteriza-se por ter um corpo de prova submetido a um esforço que tende a alongá-lo no sentido axial até a ruptura. O ensaio é realizado em um corpo de prova de forma e dimensões padronizadas para que os resultados obtidos sejam comparados ou reproduzidos. O corpo de prova é fixado em garras mecânicas da máquina de ensaio que aplica gradativamente esforços na sua direção axial, obtendo medidas na deformação correspondente. A carga aplicada no ensaio é mensurada na própria máquina e normalmente o ensaio ocorre até a ruptura (MARTINS NETO, 2016).

A equação (2) expressa a relação da tensão exercida pelo material representada por (σ).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

Onde F é a carga aplicada ao corpo de prova; A_0 é a área inicial do corpo de prova antes do carregamento.

A deformação (ϵ) é calculada pela equação (3).

$$\epsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3)$$

Onde l é o comprimento final do corpo de prova após o carregamento e l_0 é o comprimento inicial do corpo de prova antes do carregamento.

O resultado do teste de tração é representado pela curva de tensão de tração versus deformação sofrida pelo corpo durante o ensaio (SRIVASTAVA, KAWADA, 2001).

2.5.1.2 Ensaio de Resistência à Flexão

A resistência a flexão representa a tensão máxima desenvolvida na superfície de uma barra quando sujeita a dobramento. Aplica-se a materiais rígidos, isto é, aqueles que não vergam excessivamente sob a ação da carga.

Quanto à resistência a flexão, há uma equivalência dos materiais plásticos às cerâmicas; não é significativa para as borrachas (MANO, 2003).

Para realização do ensaio de flexão foi utilizada a norma ASTM D 790, de modo a aplicar a carga sobre o centro do corpo de prova. O resultado da carga de ruptura é dado pelo Software, assim o Módulo de Ruptura (MOR) foi calculado pela equação (4).

$$MOR = \frac{1,5PD}{BE^2} \quad (4)$$

Sendo MOR em (MPa), P (N) a carga de ruptura, D (mm) o vão entre os apoios, B (mm) e E (mm) a largura e espessura do corpo de prova, respectivamente. Para o cálculo do módulo de elasticidade na flexão (MOE) é determinado pela equação (5).

$$MOE = \frac{PI D^3}{d4E^3} \quad (5)$$

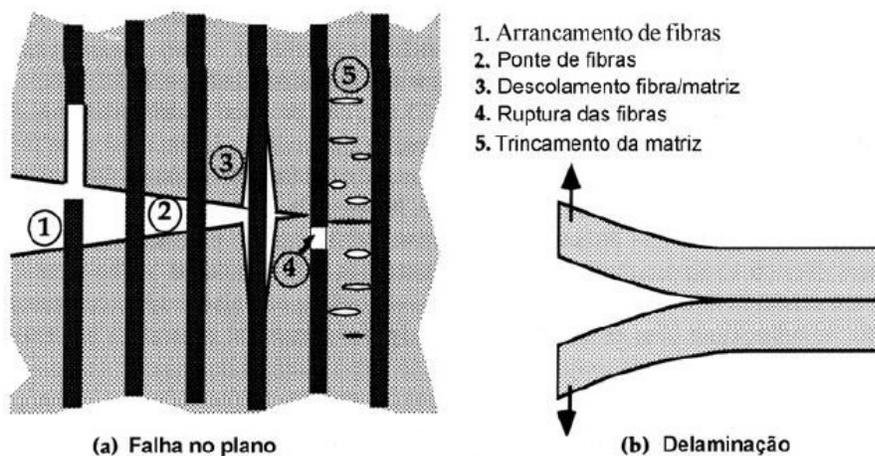
Sendo MOE em (MPa), PI (N) a carga no limite proporcional e d (mm) a deflexão correspondente à carga PI .

2.6 Fratura em Compósitos

De acordo com Al-Qureshi (2002), os mecanismos de falha que podem ocorrer durante a fratura de um compósito reforçado por fibras são: o arrancamento de fibras (*fiber pull out*) (Fig. 9a-1), a formação de ponte de fibras (*fiber bridging*) (Fig. 9a-2), o

deslocamento fibra/matriz (Fig. 9a-3), o deslizamento interfacial seguido da ruptura das fibras (*pull out*) (Fig. 9a-4) e o trincamento da matriz (Fig. 9a-5), quando a falha ocorre no plano, e delaminação (Fig. 9b), quando se trata de um laminado. A Figura 9 apresenta os vários mecanismos de falha que podem ocorrer em compósitos reforçados por fibras.

Figura 9 – Mecanismos de falhas em materiais compósitos reforçados por fibras



Fonte: Al-Qureshi, (2002)

Esses mecanismos podem atuar simultaneamente durante o processo de fratura de um compósito. Nos compósitos que apresentam as fibras orientadas paralelamente a uma direção de propagação da trinca, observa-se, principalmente, o deslocamento das fibras e quando as fibras estão orientadas perpendicularmente à trinca, ocorre deslizamento e fratura das fibras (MIRANDA, 2007).

2.7 Fractografia

A fractografia é a chave para se determinar a sequência dos eventos ocorridos durante o processo de fratura e identificar o estado de tensões atuantes no momento da falha. Outros fatores como condições ambientes e defeitos do material podem contribuir para o início e crescimento da fratura e também podem ser avaliados por esta técnica (FRANCO, 2003).

Os vários tipos de falhas estão relacionados com o tipo de matriz e fibras e com a relação de adesão e interface existente entre estes elementos. A superfície de fratura é o local mais importante para se determinar a causa da falha. Onde é possível observar de forma detalhada a história dos danos ou de parte dela, contendo as evidências do tipo de carregamento, os efeitos envolvidos e a qualidade do material, além de revelar se a falha foi

causada por uma determinada situação de dano ocorrido no local, como impactos (REZENDE, 2007).

3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Materiais

3.1.1 Poliéster Ortoftálico e Sistema Catalítico

O polímero utilizado como matriz no desenvolvimento deste trabalho foi a resina poliéster insaturada ortoftálica. O acelerador de cobalto utilizado na fabricação dos compósitos foi o produto comercial denominado CAT MET UMEDECIDO (solução de octoato de cobalto 1,5 %) e o iniciador BUTANOX M-50 (Péroxido de metil etil cetona [MEK-P]). Produtos adquiridos no comércio local em loja especializada em produtos para fibras de vidro e artesanatos. A massa específica média da resina foi de 1,15 g/cm³, segundo dados fornecidos pelo fabricante.

Os produtos utilizados na preparação da matriz dos compósitos estão ilustrados na Figura 10 a seguir:

Figura 10 – (a) Resina Poliéster Insaturada; (b) Acelerador de cobalto; (c) Iniciador



Fonte: O próprio autor

De acordo com Oliveira (2013), o iniciador MEK-P (Butanox M-50) (agente de cura) e o acelerador de cobalto foram utilizados na proporção de 1,0 % e 1,5 % do volume de resina respectivamente, definindo nessas proporções uma boa trabalhabilidade resultando em compósitos com boas propriedades.

3.1.2 Fibras Naturais

As fibras naturais utilizadas foram às fibras do epicarpo do coco babaçu (*Orbignya Speciosa*). O coco babaçu foi coletado pelos catadores de uma comunidade local na área de plantio, no município de Vargem Grande no estado do Maranhão distante aproximadamente 175 km da capital São Luís, após sua queda espontaneamente das palmeiras devido ao processo de maturação do fruto. O mesmo foi transportado para Belém via correios. A Figura 11 ilustra o coco babaçu.

Figura 11 – Coco babaçu

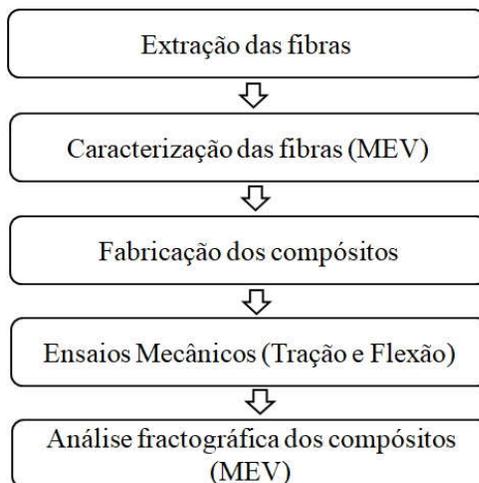


Fonte: O próprio autor

A massa específica adotada da fibra do epicarpo do coco babaçu ($1,038 \text{ g/cm}^3$) foi determinada por Arantes (2020).

3.2 Procedimentos Experimentais

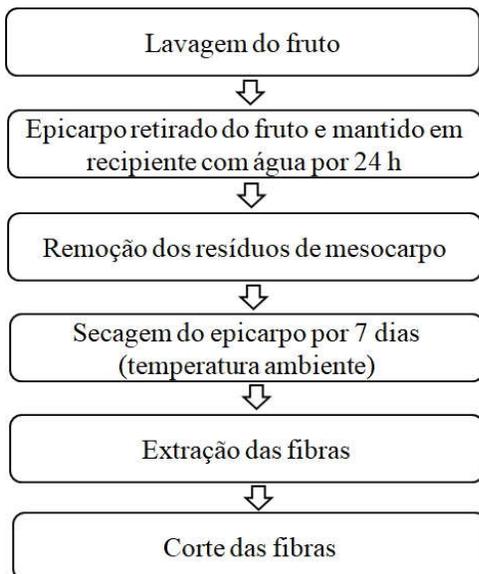
A Figura 12 descreve de forma resumida o fluxograma com as etapas dos procedimentos experimentais utilizado na execução deste trabalho.

Figura 12 – Fluxograma dos procedimentos experimentais

Fonte: O próprio autor

3.2.1 Extração das Fibras do Epicarpo do Babaçu

A Figura 13 apresenta o fluxograma com as etapas para extração das fibras do epicarpo do coco babaçu.

Figura 13 – Fluxograma de extração das fibras

Fonte: O próprio autor

Inicialmente o fruto foi lavado com uma solução de água e sabão neutro para remoção das impurezas, em seguida o epicarpo do coco babaçu foi retirado (descascando o coco) e

mantido de molho na água por um período de 24 horas, sendo então feito a remoção dos resíduos de mesocarpo impregnados no epicarpo do coco babaçu. Após o processo de remoção das impurezas o epicarpo foi colocado para secar por um período de 7 dias em temperatura ambiente e posteriormente desmembrado para obtenção das fibras, vale ressaltar que se obtia as fibras com os mais variados tamanhos devido a dificuldade de manusear as mesmas, todo esse processo feito de forma manual. Posteriormente foi feita a seleção das fibras com o tamanho que se enquadrava dentro dos critérios definidos para este trabalho e o processo de corte das fibras com tamanhos não superiores a 20 mm. Portanto selecionando as fibras que foram utilizadas com tamanhos que variam entre 10 mm e 20 mm, mantidas em temperatura e umidade ambiente e utilizadas *in natura*. A Figura 14 apresenta o epicarpo do coco babaçu após descascar o fruto e as fibras do epicarpo após o processo de desmembramento.

Figura 14 – (a) Epicarpo do coco babaçu; (b) Fibras do epicarpo do coco babaçu



Fonte: O próprio autor

3.2.2 Caracterização Morfológica das Fibras do Epicarpo do Coco Babau

A caracterização morfológica da fibra do epicarpo do coco babaçu foi realizada através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), com vistas à determinação das condições da superfície da mesma.

3.2.3 Fabricação dos compósitos

Para a fabricação dos materiais compósitos foram utilizados os seguintes equipamentos conforme a Figura 15.

Figura 15 – Equipamentos: a) Estufa; b) Balança analítica



(a)

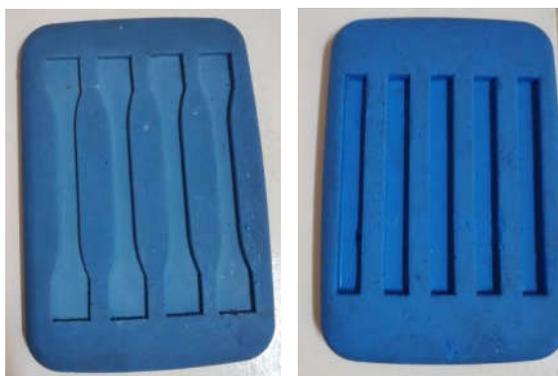
(b)

Fonte: O próprio autor

- a) ESTUFA, DE LEO – Equipamentos Laboratoriais, T 50 °C a 250 °C;
- b) BALANÇA ANALÍTICA, LÓTUS, modelo SF - 400C.

O compósito de matriz poliéster ortoftálica com fibras vegetais do epicarpo do coco babaçu, foram fabricados de forma manual através de moldes de silicone. A Figura 16 ilustra os moldes de silicone utilizados.

Figura 16 - Moldes de Silicone: a) Ensaio de tração; b) Ensaio de flexão



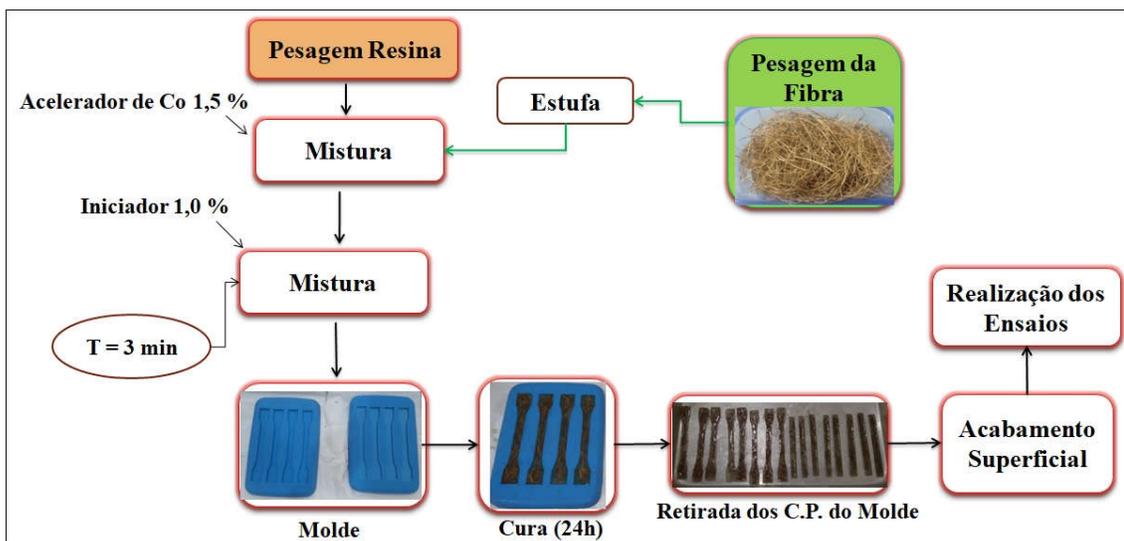
(a)

(b)

Fonte: O próprio autor

A Figura 17 apresenta um fluxograma com as etapas do processo de fabricação dos compósitos poliméricos.

Figura 17 – Fluxograma de fabricação dos compósitos poliméricos



Fonte: O próprio autor

Primeiramente foram realizados os cálculos das frações mássicas da resina ortoftálica, sistema catalítico e fibras do epicarpo do coco babaçu utilizando como base suas respectivas massas específicas e dimensões dos moldes.

As fibras após serem selecionadas e já com suas frações mássicas definidas foram levadas para a estufa a uma temperatura de 105 °C por um período de 20 minutos, para retirada da umidade superficial. A Figura 18 ilustra as fibras do epicarpo do coco babaçu durante esse processo na estufa.

Figura 18 – Fibras secando na estufa



Fonte: O próprio autor

Utilizou-se uma balança analítica, ilustrada na Figura 15, balança esta que possui precisão de $\pm 0,01$ gramas, para determinar a massa dos materiais utilizados. Após todos os materiais pesados e separados, iniciou-se a fabricação dos corpos de provas em temperatura ambiente.

Inicialmente, foram fabricados os corpos de prova somente com a matriz polimérica de resina ortoftálica, posteriormente os compósitos de matriz polimérica com fibras do epicarpo do coco babaçu com comprimento variando entre 10 mm e 20 mm e proporção em massa de 3 %, em seguida os compósitos de matriz polimérica com fibras do epicarpo do coco babaçu com comprimento variando entre 10 mm e 20 mm e proporção em massa de 5 %.

Os compósitos foram fabricados de forma manual, no laboratório Usina de Materiais da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará (UFPA), homogeneizando a mistura de resina com o acelerador inicialmente com o auxílio de um bastão de vidro, posteriormente se adiciona as fibras do epicarpo do coco babaçu, dispostas de maneira aleatória e logo em seguida o agente de cura. Após esse processo, o compósito foi homogeneizado por um período de 60 segundos e em seguida vazado no molde de silicone. Após atingir o ponto de gel os corpos de prova foram retirados do molde e armazenados por um período de 24 horas sobre uma superfície plana para o processo de cura. A Figura 19 ilustra um desses moldes com o compósito fabricado até atingir o ponto de gel.

Figura 19 – Molde com o compósito fabricado



Fonte: O próprio autor

Após o processo de cura, os corpos de prova foram identificados e armazenados em temperatura ambiente para posteriormente realização dos ensaios. Os mesmos podem apresentar dimensões e superfícies irregulares, para solução desse problema foi necessário o

processo de acabamento superficial utilizando lixas que variam até 600 grãos, dessa forma os corpos de provas ficaram homogêneos, com a superfície polida e com as medidas de acordo com as normas utilizadas para realização dos ensaios mecânicos.

3.2.4 Caracterização Mecânica dos Materiais Compósitos

As propriedades mecânicas dos compósitos foram determinadas através dos ensaios de tração e flexão, baseando-se nas normas ASTM D-638 e ASTM D-790 respectivamente, realizados no Laboratório de Metrologia e Resistência dos Materiais do Instituto Federal do Pará (IFPA) em uma máquina universal de ensaios mecânicos modelo Arotec WDW-100E com célula de carga de 5 kN. A Figura 20 ilustra a máquina universal de ensaios mecânicos utilizada na realização dos ensaios.

Figura 20 – Máquina universal de ensaios mecânicos



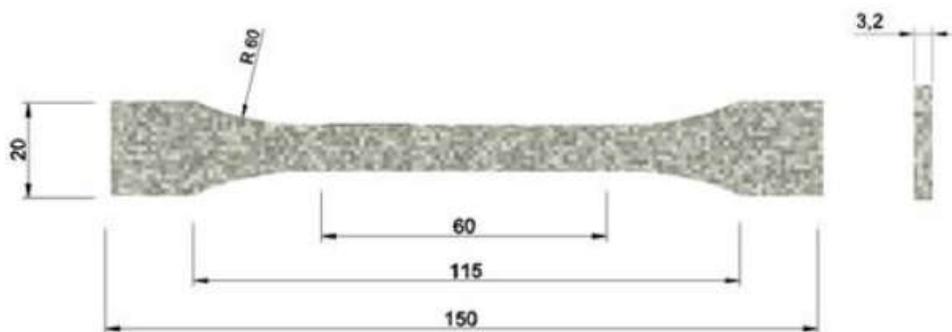
Fonte: O próprio autor

3.2.4.1 Ensaio de Resistência à Tração

As propriedades mecânicas dos compósitos que podem ser determinadas através do ensaio de tração são as seguintes: resistência uniaxial, módulo de elasticidade e deformação.

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma citada e as dimensões dos corpos de prova são ilustradas na Figura 21.

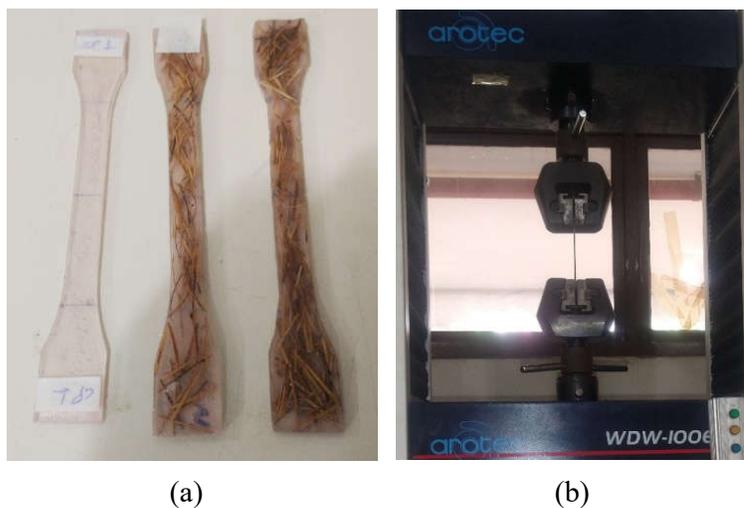
Figura 21 – Dimensões do corpo de prova em mm (ensaio de tração)



Fonte: ASTM D-638

Para os ensaios de tração foram fabricados 8 (oito) corpos de prova de cada fração produzida juntamente com a matriz polimérica pura. Os ensaios foram executados à temperatura ambiente e operando a uma velocidade de deslocamento de 2 mm/min. A Figura 22 ilustra os corpos de prova de tração e o ensaio de tração sendo realizado.

Figura 22 – a) Corpos de prova para ensaio de tração; b) Ensaio de tração



(a)

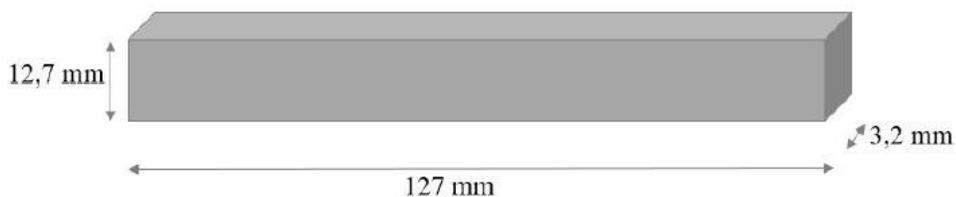
(b)

Fonte: O próprio autor

3.2.4.2 Ensaio de Resistência à Flexão

O ensaio permite determinar a resistência à flexão sob esforços de flexão do material analisado. A norma citada descreve o ensaio de flexão para materiais plásticos reforçados ou não. A Figura 23 apresenta as dimensões do corpo de prova para o referido ensaio.

Figura 23 – Dimensões do corpo de prova em mm (ensaio de flexão)



Fonte: ASTM D-790

Para o ensaio de flexão foram fabricados 8 (oito) corpos de prova de cada fração produzida juntamente com a matriz polimérica pura. Os ensaios foram executados à temperatura ambiente e ensaiados em uma máquina universal de ensaios mecânicos equipada com dispositivo para ensaios de flexão em três pontos, operando a uma velocidade de deslocamento de 2 mm/min. A Figura 24 ilustra o ensaio de flexão sendo realizado.

Figura 24 – Ensaio de flexão



Fonte: O próprio autor

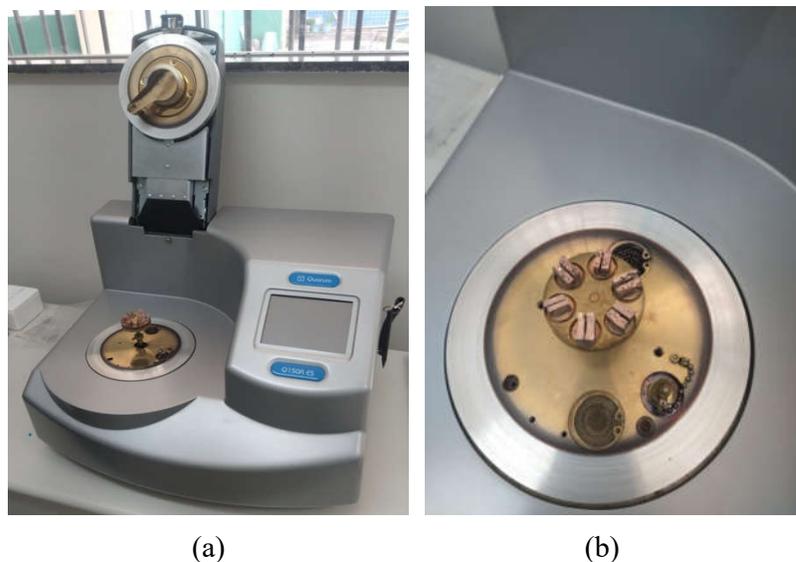
3.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura – (MEV)

O MEV é uma ferramenta importante para o estudo do mecanismo de dano, com esta ferramenta é possível identificar a interação e adesão entre fibra e matriz (MARINUCCI, 2011).

As análises morfológicas da fibra e fractográfica da superfície de fratura dos compósitos fabricados foram realizadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), de modo a se estudar a superfície da fibra e os mecanismos de falhas presente em cada material fabricado.

O ensaio foi realizado no laboratório de microscopia eletrônica de varredura do Instituto Federal do Pará (IFPA). Inicialmente as amostras foram fixadas com o auxílio de uma fita dupla face de carbono nos portas amostras e posteriormente realizado a metalização com Ouro (Au) em um Metalizador modelo Quorum Q 150R ES plus. A Figura 25 ilustra o Metalizador e as amostras após o processo de metalização.

Figura 25 – a) Metalizador; b) Amostras após processo de metalização



Fonte: O próprio autor

Após a metalização das amostras, as mesmas foram inseridas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo VEGA 3 LMU da marca TESCAN e realizado o ensaio. A Figura 26 ilustra o microscópio eletrônico de varredura e as amostras no interior do mesmo.

Figura 26 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV)



Fonte: O próprio autor

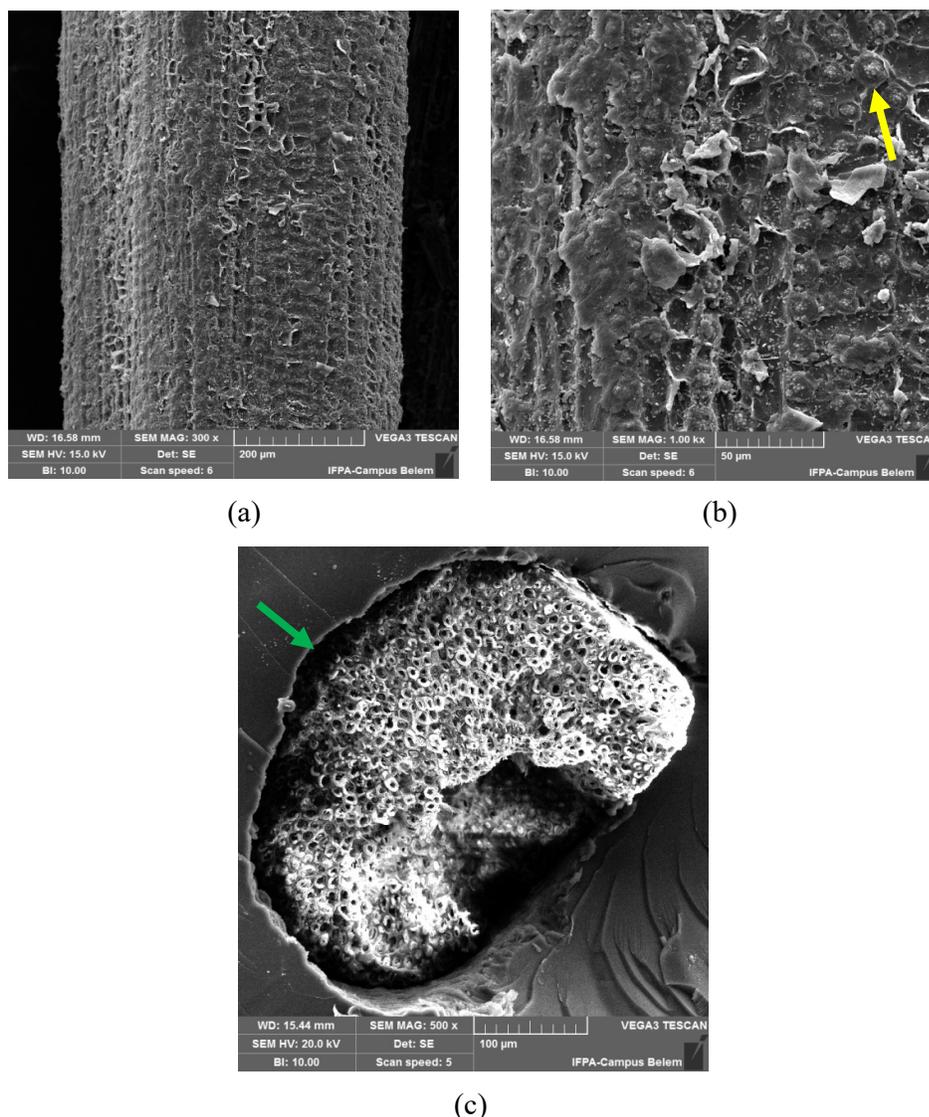
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização morfológica

4.1.1 Caracterização morfológica das fibras do epicarpo do coco babaçu (MEV)

As fibras foram caracterizadas sem tratamento superficial e em condições ambientes. A Figura 27 ilustra a caracterização microestrutural das fibras.

Figura 27 – Micrografia da fibra de coco babaçu com magnificações de 300x (a), 1000x (b) e 500x (c)



Fonte: O próprio autor

A Figura 27 (a) ilustra uma microfotografia, onde pode se observar a superfície da fibra do epicarpo do coco babaçu *in natura* com aspecto irregular e sua rugosidade. Na Figura 27 (b) pode se observar os pontos com depósito de ceras (seta amarela) aderido à superfície da fibra, que contribuem para diminuir a adesão da fibra com a matriz, corroborando com o que relatou Rodrigues (2019). Segundo Franco (2010) a realização de tratamento alcalino com Hidróxido de Sódio (NaOH), contribuem para remoção desta cera da fibra do epicarpo do coco babaçu. A Figura 27 (c) apresenta a seção transversal da fibra, onde se observa sua forma arredondada e os feixes de fibras (características típicas das fibras vegetais) sobre a superfície de fratura de um compósito, nesta imagem pode se observar a interface fibra/matriz (seta verde) e verificar que talvez não tenha ocorrido uma boa adesão interfacial.

4.2 Propriedades Mecânicas dos Compósitos

4.2.1 Ensaio de Resistência à Tração

A caracterização mecânica relacionada à resistência a tração da matriz polimérica pura e os compósitos com fibras do epicarpo do coco babaçu nas proporções de 3 % e 5 % estão apresentados na Tabela 2.

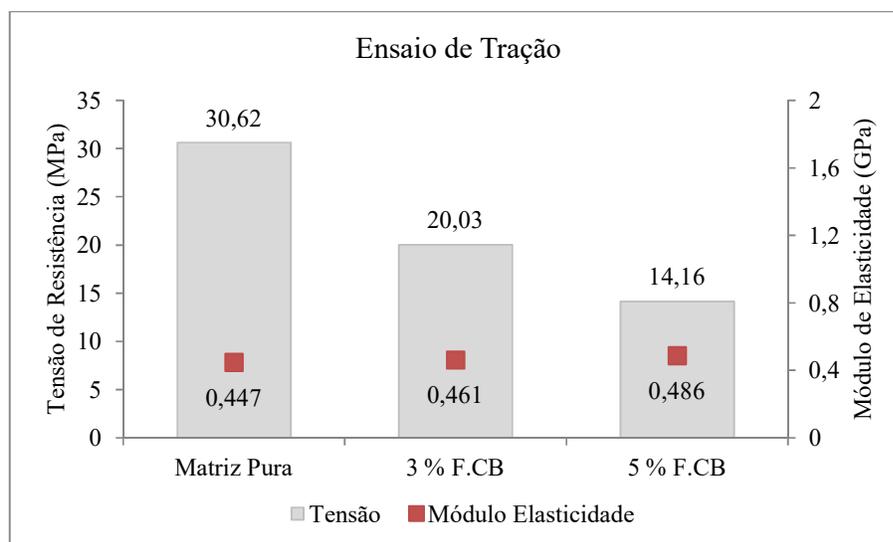
Tabela 2 – Dados obtidos através do ensaio de tração

Composição (%)	Resistência à Tração Média (MPa)	Alongamento na Ruptura (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Matriz Polimérica Pura	30,62 (\pm 1,51)	5,63 (\pm 0,81)	0,447 (\pm 0,09)
3 % F.CB	20,03 (\pm 3,05)	3,51 (\pm 0,31)	0,461 (\pm 0,08)
5 % F.CB	14,16 (\pm 1,90)	2,44 (\pm 0,65)	0,486 (\pm 0,10)

Fonte: O próprio autor

O gráfico da Figura 28 mostra um comparativo entre os resultados encontrados das propriedades mecânicas de resistência à tração e módulo de elasticidade para matriz polimérica pura e os compósitos com os respectivos percentuais de fibras estudados.

Figura 28 – Gráfico da relação tensão de resistência à tração e módulo de elasticidade na ruptura



Fonte: O próprio autor

De acordo com os resultados obtidos observa-se uma redução na resistência à tração dos compósitos à medida que se aumenta a fração mássica de fibras, principalmente quando comparado a matriz polimérica pura. O material de matriz polimérica pura atingiu valores de resistência a tração superior a 30 MPa, enquanto os compósitos com fibras do epicarpo do coco babaçu nas frações de 3 % e 5 % apresentaram resistência à tração de 20,03 MPa e 14,16 MPa respectivamente, uma redução de aproximadamente 34,5 % para os compósitos com 3 % de fibras e 53,7 % para os compósitos com 5 % de fibras, comprovando que as fibras vegetais para as frações definidas neste trabalho não atuaram como um agente de reforço, fenômeno que pode ser explicado pela baixa adesão na interface fibra/matriz. Segundo Franco (2010), a região interfacial é de fundamental importância na determinação das propriedades dos compósitos, pois é através da interface que os esforços atuantes na matriz são transmitidos ao reforço, métodos químicos e físicos podem ser usados para modificar a fibra e otimizar a interface.

Outro fator determinante pode ter sido a não distribuição uniforme das fibras ao longo do material compósito, devido a sua orientação de modo aleatório e o processo de fabricação todo de forma manual dos compósitos. Segundo Panaitescu *et al.* (2015), a incorporação de fibras naturais em matrizes poliméricas deve ocorrer de forma uniforme, pois a distribuição não-uniforme ocasiona pontos de falha devido a aglomeração das fibras, o que ocasiona diminuição das propriedades mecânicas.

Tajvidli e Takemura (2011) realçam que a fragilidade dos compósitos poliméricos com fibras vegetais está relacionada diretamente a aglomeração das fibras, indicando a baixa adesão interfacial entre o reforço e matriz.

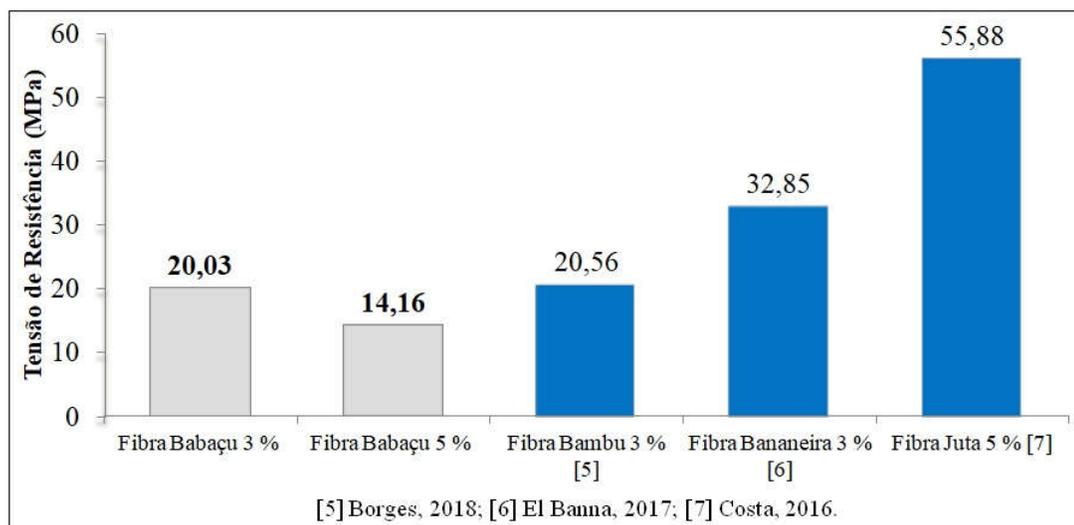
Outro aspecto determinante que poderia proporcionar melhores resultados nas propriedades mecânicas pode ter sido um volume de fibras insuficiente, Andrade e Nóbrega (2009), estudaram os efeitos da adição de fibras do coco babaçu nas propriedades mecânicas de compósitos poliméricos, e constataram que houve um aumento nas propriedades de resistência à tração dos compósitos para teores acima de 38 % de fibras, o que pode justificar a existência de um volume crítico dessas fibras para atuarem como reforço no compósito.

Em relação à rigidez (módulo de elasticidade), pode se constatar de acordo com os resultados obtidos, que houve um aumento discreto dessa propriedade à medida que se aumenta o percentual das fibras, o que evidencia um material mais rígido. Fenômeno que pode ser explicado pelo fato das fibras apresentarem uma maior rigidez que a matriz e/ou diminuir o movimento livre das cadeias poliméricas segundo Andrade e Nóbrega (2009). O compósito com 5 % de fibras foi o que apresentou o melhor desempenho, com 0,486 GPa de módulo de elasticidade, um aumento de aproximadamente 9 % em relação ao material de matriz polimérica pura.

É importante ressaltar que módulo de elasticidade ou módulo de Young é medido através da razão entre tensão e a deformação, onde a deformação é reversível e proporcional à tensão. Dessa forma, quanto maior o módulo de elasticidade, mais rígido será o material, ou menor será sua deformação elástica mediante a aplicação de uma dada tensão (CALLISTER, 2018).

Fazendo um comparativo com trabalhos da literatura pesquisada, Borges (2018) trabalhando com fibras de bambu 15 mm (3 % fração mássica) encontrou uma resistência à tração de 20,56 MPa, El Banna (2017) trabalhando com fibras curtas de bananeira (3 % fração mássica) encontrou resistência a tração de 32,85 MPa, enquanto Costa (2016) trabalhando com fibras curtas de juta (5 % fração mássica) encontrou 55,88 MPa de resistência a tração. O gráfico da Figura 29 ilustra o comparativo entre esses resultados da literatura com os resultados encontrados de resistência à tração dos compósitos estudados.

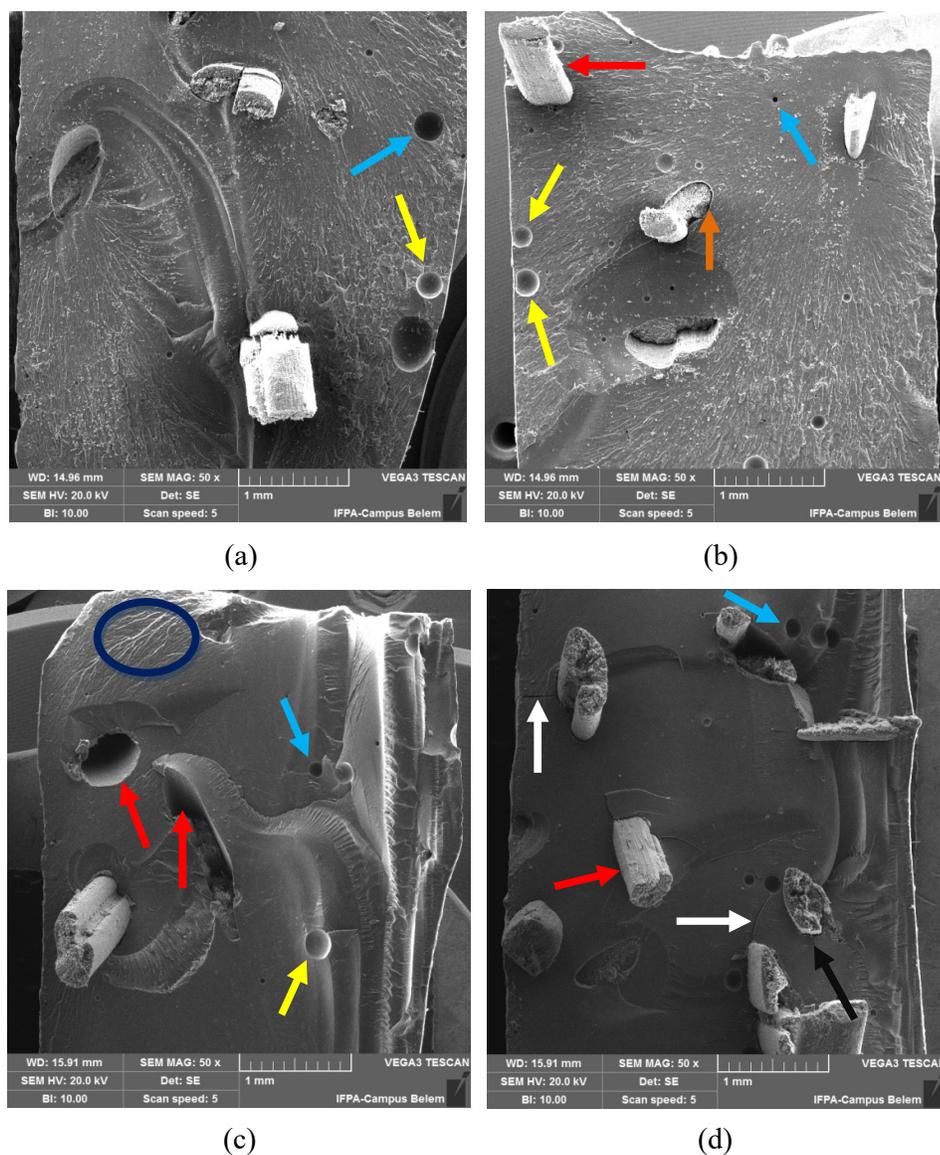
Figura 29 – Gráfico comparativo da propriedade de tensão de resistência à tração dos compósitos com fibras de babaçu x resultados da literatura



Fonte: O próprio autor

A Figura 30 ilustra a superfície de fratura após o ensaio de tração dos compósitos com 3 % e 5 % de fibras do epicarpo do coco babaçu, após análise microestrutural através da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Figura 30 – Análise fractográfica do compósito com fibras do epicarpo do coco babaçu após ensaio de tração



Fonte: O próprio autor

As Figuras 30 (a) e 30 (b) apresentam aos resultados obtidos na análise fractográfica do compósito com 3 % de fibras do epicarpo do coco babaçu, já as Figuras 30 (c) e 30 (d) são os resultados obtidos para o compósito com 5 % de fibras do epicarpo do coco babaçu, ambas com magnificação de 50x. Através da micrografia pode se observar diversos mecanismos presente na superfície de fratura dos mesmos, tais como: A presença de bolhas, representado pela seta amarela, formadas provavelmente durante o processo de cura, fenômeno que pode ter contribuído para redução da resistência à tração do compósito; A presença de alguns

vazios, representado pela seta azul, que podem ser decorrente do processo de fabricação do compósito; A propagação de trincas, indicado pela seta branca e as irradiações das trincas ilustrado pelo círculo azul.

Segundo Rodrigues (2008), o principal fator que pode ter contribuído para reduzir o desempenho dos compósitos, foi à baixa adesão na interface fibra/matriz, que pode ser evidenciado pela seta laranja.

Pode se observar ainda que o mecanismo de falha predominante pode ter sido as fibras sacadas da matriz (*pull out*), evidenciado pela seta vermelha, reforçando mais uma vez a baixa interação entre as fases.

A seta preta apresenta o rompimento de fibras, um indicativo de que houve uma boa adesão da fibra com a matriz nesse ponto.

4.2.2 Ensaio de Resistência à Flexão

A caracterização mecânica relacionada à resistência a flexão, através do ensaio de flexão em três pontos, da matriz polimérica pura e os compósitos com fibras do epicarpo do coco babaçu nas proporções de 3 % e 5 % estão apresentados na Tabela 3.

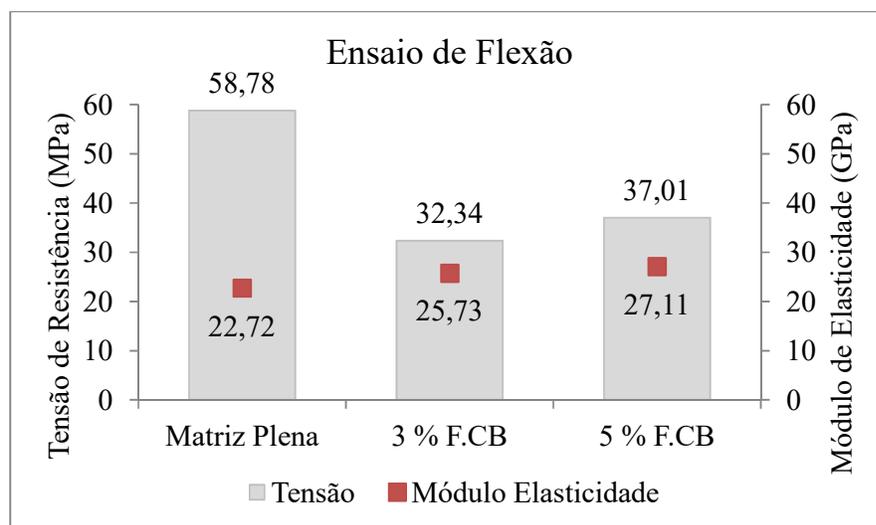
Tabela 3 – Dados obtidos através do ensaio de flexão

Composição (%)	Resistência à Flexão Média (MPa)	Modulo Elasticidade (GPa)
Matriz Polimérica Pura	58,78 (\pm 5,12)	22,72 (\pm 2,83)
3 % F.CB	32,34 (\pm 4,16)	25,73 (\pm 1,44)
5 % F.CB	37,01 (\pm 2,97)	27,10 (\pm 0,98)

Fonte: O próprio autor

O gráfico da Figura 31 mostra um comparativo entre os resultados encontrados das propriedades mecânicas de resistência à flexão e módulo de elasticidade para matriz polimérica pura e os compósitos com os respectivos percentuais de fibras estudados.

Figura 31 – Gráfico da relação tensão de resistência à flexão e módulo de elasticidade na ruptura



Fonte: O próprio autor

De acordo com os resultados obtidos no ensaio, pode se observar que a resistência à flexão dos compósitos com a inserção de fibras do epicarpo do coco babaçu, apresentou desempenho inferior quando comparado à matriz polimérica pura. A matriz polimérica pura atingiu valores de resistência a flexão superior a 58 MPa, enquanto os compósitos com fibras do epicarpo do coco babaçu nas frações de 3 % e 5 % apresentaram resistência a flexão de 32,34 MPa e 37,01 MPa respectivamente, uma redução de aproximadamente 45 % para os compósitos com 3 % de fibras e 37 % para os compósitos com 5 % de fibras, comprovando que as fibras vegetais para as frações definidas neste trabalho não atuaram como um agente de reforço efetivo e sim como carga da enchimento, fenômeno que pode ser explicado pela fraca adesão na interface matriz/fibra. Fazendo o comparativo apenas entre os compósitos com fibras, diferentemente do ocorrido nos ensaios de tração, observa-se que houve um aumento de aproximadamente 14,5 % da tensão de resistência à flexão para os compósitos com 5 % de fibras em relação aos compósitos com 3 % de fibras, fator que pode ser explicado por um melhor alinhamento das fibras no sentido longitudinal do compósito, como o carregamento é aplicado no sentido transversal ao das fibras, elas passam a ser um obstáculo maior para ruptura do material.

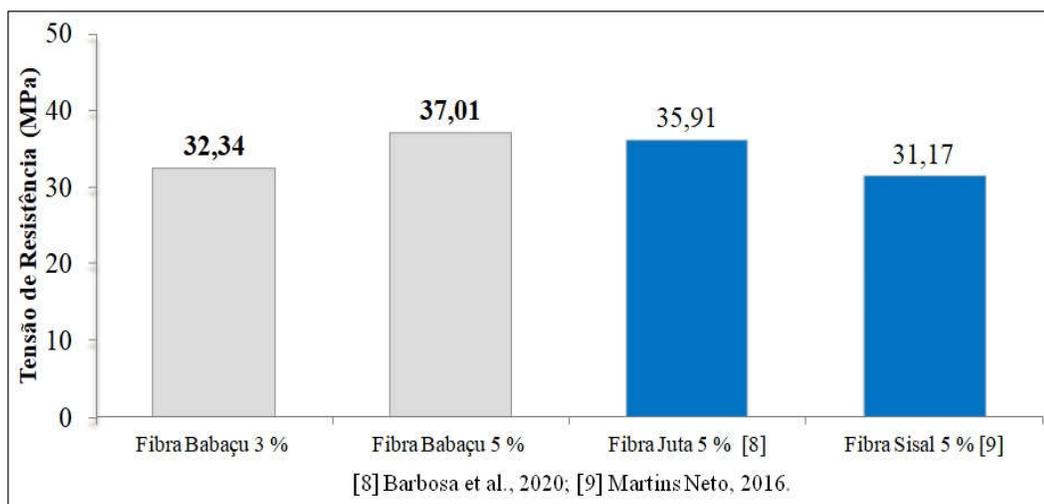
Além da influência do teor de vazios, outro ponto a ser considerado é a disposição das fibras, onde buscou-se obter uma amostra homogênea a partir de uma mistura ideal, todavia, segundo Borges (2018), sabe-se que a concentração ao longo da área total do compósito pode

ser desigual, o que acarreta em diferentes concentrações de fibra natural, em diferentes áreas do compósito, destoando do que foi estipulado, ocasionando pontos de falha no compósito polimérico.

Em relação ao módulo de elasticidade, pode se constatar que houve um aumento dessa propriedade à medida que se aumenta o percentual das fibras. O compósito com 5 % de fibras foi o que apresentou o melhor desempenho, com 27,10 GPa de módulo de elasticidade, um aumento de aproximadamente 20 % em relação ao material de matriz polimérica pura, ratificando que o aumento da rigidez do material se dá pelo aumento da fração das fibras tornando esse material mais frágil.

Fazendo um comparativo com trabalhos da literatura pesquisada, Barbosa *et al.*, (2020) trabalhando com fibras curtas de juta (5 mm) (5 % de fração mássica) encontrou uma resistência a flexão de 35,91 MPa, enquanto Martins Neto (2016) trabalhando com fibras curta de sisal (5 % fração mássica) obteve resistência à tração de 31,17 MPa. O gráfico da Figura 32 ilustra o comparativo entre esses resultados da literatura com os resultados encontrados de resistência à flexão dos compósitos estudados.

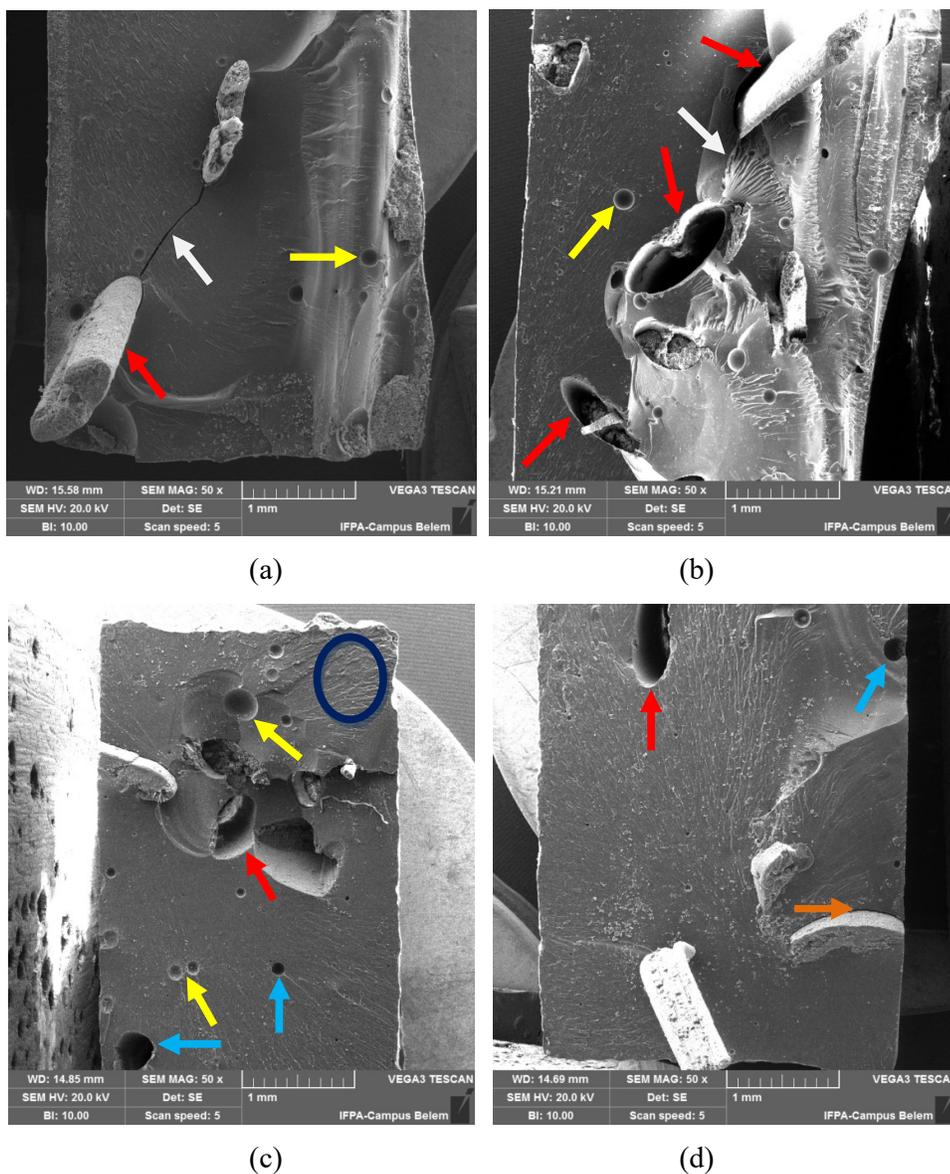
Figura 32 – Gráfico comparativo da propriedade de tensão de resistência à flexão dos compósitos com fibras de babaçu x resultados da literatura



Fonte: O próprio autor

A Figura 33 ilustra as superfícies de fratura após os ensaios de flexão dos compósitos com 3 % e 5 % de fibras do coco babaçu, após análise microestrutural através da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Figura 33 – Análise fractográfica do compósito com fibras do coco babaçu após ensaio de flexão



Fonte: O próprio autor

As Figuras 33 (a) e 33 (b) apresentam aos resultados obtidos na análise fractográfica do compósito com 3 % de fibras do epicarpo do coco babaçu, já as Figuras 33 (c) e 33 (d) são os resultados obtidos para o compósito com 5 % de fibras do epicarpo do coco babaçu, ambas com magnificação de 50x. Conforme já relatado na análise morfológica das superfícies de fratura dos ensaios de tração, para os ensaios de flexão de acordo com a micrografia apresentada pode-se observar que o mecanismo de falha predominante pode ter sido a fibras sacadas da matriz (*pull out*) (seta vermelha), resultante principalmente de uma fraca interação

interfacial entre a matriz polimérica e as fibras, evidenciado pela seta laranja na Figura 33 (d), onde se observa vazios em torno de um feixe de fibras que segundo Mendes (2019) ressalta a incompatibilidade entre as fases. Outros mecanismos de falhas também podem ser observados, tais como: a presença de bolhas (seta amarela), os vazios (seta azul) além das propagações de trincas evidenciados pelas setas brancas. O círculo azul indica estrias radiais que de acordo com Rodrigues (2010) podem indicar a origem da trinca, característica de fratura frágil.

5 CONCLUSÃO

5.1 Conclusões

Neste trabalho estudou-se o desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos com fibras do epicarpo do coco babaçu, onde o processo de fabricação se mostrou eficiente e viável, através de uma metodologia simples e com baixo custo de obtenção dos materiais, uso de poucos equipamentos e boa trabalhabilidade, porém a ausência de pressão no processo de moldagem restringe a quantidade de fibras que podem ser inserido na matriz. Com base nos ensaios realizados pode-se concluir que:

A morfologia da fibra estudada através do MEV apresentou uma superfície com aspecto irregular e sua rugosidade, além da presença de cera, aderido à superfície da mesma, o que diminui a adesão interfacial da fibra com a matriz.

Os compósitos com fibras do epicarpo do coco babaçu apresentaram uma redução das propriedades mecânicas de resistência (tração e flexão) quando comparados com o material de matriz polimérica pura. Para os compósitos com 3 % de fibras obteve-se uma redução de 34,5 % enquanto que os compósitos com 5 % de fibras a redução foi de 53,7 % na resistência à tração. Em relação à propriedade de resistência a flexão a redução foi de 45 % e 37 % para os compósitos com 3 % e 5 % de fibras respectivamente, o que evidenciou que as fibras neste trabalho atuaram como carga de enchimento.

As análises das superfícies de fratura estudadas pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) se mostraram satisfatória e eficiente, demonstrando os mecanismos de falhas, imperfeições presente na matriz, tipos de fraturas nos compósitos além de evidenciar a baixa adesão na interface fibra/matriz, nos dando indicações dos procedimentos a serem adotados no processamento dos compósitos para a melhoria das propriedades mecânicas.

5.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

- Realizar tratamento químico nas fibras do epicarpo do coco babaçu com o objetivo de tornar a adesão junto a matriz polimérica mais eficiente.
- Fabricar compósito com fibras do epicarpo do coco babaçu tratadas e não tratadas variando seus percentuais para comparar os resultados.
- Utilizar outros tipos de matrizes poliméricas na fabricação dos compósitos, de modo a avaliar seu comportamento mecânico.
- Realizar outros ensaios mecânicos, como impacto nos compósitos estudados.

REFERÊNCIAS

AL-QURESHI, H. A. **Introdução aos materiais plásticos reforçados**. UFSC, Florianópolis, 2002.

ALBIERO, D.; MACIEL, A. J. S.; LOPES, A. C.; MELLO, C. A.; GAMERO, C. A. Proposta de uma máquina para colheita mecanizada de babaçu (*Orbignya phalerata* Mart.) para agricultura familiar. **Acta Amazonica**, v. 37, n. 3, p. 337-346, 2007.

ANDRADE, E. C.; NÓBREGA, M. M. S. **Compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de babaçu *orbignya speciosa*: caracterização mecânica**. In: 10º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2009, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu, 2009.

ARANTES, M. M. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos à base de EVA e LDPE reciclados com fibras de coco babaçu – uma contribuição para a sustentabilidade**. 2020. 80f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

ASTM D 638 – 2014, “**Standart Test Method for Tensile Properties of Plastic**”, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

ASTM D 790 – 2010. “**Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**”, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

BABCOALL Babaçu. **Projeto desenvolvimento pela Incubadora de Empresas de Base Tecnológica em Agronegócios (INEAGRO)**, Universidade Federal do Piauí. Disponível em: <<http://babcoall.blogspot.com/>>. Acesso em: 11 jun. 2019.

BARBOSA, K. S. L.; SANTOS, W. S. T.; MENDES, B. H. A.; EL BANNA, W. R.; COSTA, D. S.; SOUZA, J. A. S.; COSTA, D. S. Caracterização mecânica de compósitos poliméricos com fibras curtas de juta. **Brazilian Applied Science Review**. v. 4, n. 3, p. 1474-1481, mai/jun 2020.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. **Composites reinforced with cellulose based fibers**. Prog. Polym. Sci., v. 24, p. 221-279, 1999.

BORGES, D. R. **Influência do uso de fibras de bambu (*bambusa vulgaris*) tratadas quimicamente em compósitos de polímero termofixo carregadas com resíduo da indústria de minério de cobre**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química (PPGEQ), Instituto de Tecnologia, Universidade federal do Pará, Belém, 2018.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CANDIDO, V. S. **Caracterização e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar**. 2012. 189f. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia (IME), 2014.

- CARRAZZA, L. R.; SILVA, M. L.; ÁVILA, J. C. C. **Manual Tecnológico de Aproveitamento Integral do Fruto do Babaçu**. Brasília – DF. Instituto Sociedade, População e Natureza (ISPN). Brasil, 2012.
- CARVALHO, B. C. **Síntese e caracterização de resinas à base de glicerina e sua aplicação em compósitos com fibra do epicarpo do coco babaçu: avaliação do efeito do tratamento da fibra**. 2012. Dissertação (Mestrado em Química) - Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, 2012.
- CARVALHO, R. F. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira**. 119 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos e Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2005.
- CHAWLA, K. K. *composite materials: science and engineering*. 3ª Ed. Springer, 2012.
- COSTA, D. S. **Estudo da influência de resíduos gerados pela indústria de mineração nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras naturais**. 2016. 227f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará (UFPA), Pará, 2016.
- CRAWFORD, C. B.; QUINN, B. **Microplastic Pollutants**. Elsevier Science, 2016.
- DANIEL, I. M.; ISHAI, O. *Engineering Mechanics of composite Material*. New York: Oxford University Press, 2006.
- EL BANNA, W. R. **Influência do resíduo de flotação de minério de cobre nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de matriz termofixa e fibras de bananeira (*musa sapientum, musacae*)**. 2017. 150f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará (UFPA), Pará, 2017.
- FERRANTE, M. **Seleção de Materiais**. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos: Editora UFSCar, 2ª Ed., 2002.
- FRANCO, F. J. P. **Coco babaçu em compósito com matriz epóxi: Estudo do efeito do tratamento da fibra**. 2010. 77f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2010.
- FRANCO, L. A. L. **Análise fractográfica de compósitos poliméricos estruturais**. Dissertação (Mestrado em Física e Química de Materiais Aeroespaciais) – Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2003.
- GARCEZ, M. R.; MACHADO, A. O.; GARCEZ, E. O.; GATTO, D. A. Tijolos leves para alvenaria produzidos a partir de resíduos da industria madeireira. **Eng. Sanit. Ambient**, v. 23 n. 3, p. 607-614, maio/jun 2018.

GEORGE, J.; SREEKALA, M. S.; THOMAS, S. A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. **Polymer Engineering and Science**, v. 41, n. 9, p 1471-1485, 2001.

JOHN, M. J.; ANANDJIWALA, R. D. Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced polypropylene composites. **Polymer Composites**, p. 187-207, 2008.

LAVIOLA, B. G. et. al., Potencial do Pinhão Manso e palmeiras para a diversificação de matéria-prima na produção de biodiesel. **Biodiesel no Brasil. Impulso tecnológico**. vol. I, UFLA, Lavras – Mg, p. 120-140, 2014.

LEVY NETO, F. L.; PARDINI, L. C. Compósitos estruturais: **Ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

LIU, Y.; TANAKA, Y. In situ characterization of tensile damage behavior of a plain-woven fiber-reinforced polymer-derived ceramic composite. **Materials Letters**. v. 57, p. 1571-1578, 2003.

MACHADO, N. A. F.; FURTADO, M. B.; SERRANO, L. J. P.; PARENTE, M. O. M.; FIORELLI, J.; SAVASTANO JÚNIOR, H. Painéis aglomerados fabricados com resíduos do coco babaçu. **Agrária – Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v. 12, n 2, p. 202-209, 2017.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. Rio de Janeiro, ed. Edgard Blucher Ltda, 2003.

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos: Fundamentos e Tecnologia**. São Paulo. Artliber Editora, 2011.

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

MARTINS, A. M.; MORELLI, C. L.; MARINELLI, A. L.; MARCONCINI, J. M.; BRETAS, R. E. S. Caracterização das Fibras Amazônicas de Pupunha, Babaçu e Balsa através de DRX, TG e RMN. **In: 11º Congresso Brasileiro de Polímeros**, Campos do Jordão, SP, Brasil, 2011.

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

MENDES, B. H. A. **Estudo da influência da incorporação de resíduo de beneficiamento de caulim nas propriedades de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibra de bambu (*bambusa vulgaris*)**. 2019. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

- MIRANDA, R. M. **Estudo do comportamento mecânico de um eco-compósito para aplicação como painéis divisórios de ambientes**. 2007. 378f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará (UFPA), Centro Tecnológico, Belém, 2007.
- MOTA, M. K. F. **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de bucha vegetal (*luffa cylindrica*)**. 105f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal – RN, 2016.
- MOURA, R.; PAULO. **Introdução à tecnologia têxtil**. Fortaleza: Senai, 2012. Color.
- MUELLER, D. H.; KROBJILOWSKI, A. New discovery in the properties of composites reinforced with natural fibers. **Journal of Industrial Textiles**. v. 33, p. 112-127, 2003.
- NIJSSEN, R. P. L. **Composite materials: na introduction**. Rotterdam: VKCN, 2015.
- NUNES, A. S. L. **Síntese e caracterização de resinas à base de glicerina para obtenção de compósitos reforçados com fibras de coco babaçu com possível aplicação no setor moveleiro**. 2009. Dissertação (Mestrado em Química) - Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina, 2009.
- OLIVEIRA, M. Jr. A. **Efeito da adição de lama vermelha como carga nas propriedades mecânicas de compósitos de poliéster insaturado reforçado com fibra natural de curauá (*ananas erectifolius*)**. 2013, 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém-PA, 2013.
- PANAITESCU, D. M., *et al.* Influence of compatibilizing systems on morphology, thermal and mechanical properties of high flow polypropylene reinforced with short hemp fibers. **Composites. Part B**, Engineering, 69, 286-295, 2015.
- PAVLAK, M. C. M.; ZUNIGA, A. D.; LIMA, T. L. A.; PINEDO, A. A.; CARREIRO, S. C.; FLEURY, C. S.; SILVA, D. L. Aproveitamento da farinha do mesocarpo do babaçu (*Orbignya martiana*) para obtenção de etanol. **Evidência**, v. 7, n. 1, p. 7-24, 2007.
- PEREIRA, J. C. **Curso de projeto estrutural com materiais compostos**. UFSC, 99 p., 2000.
- PILATO, L. A., MICHNO, M. J. **Advanced Composite Materials**. New York, Springer-Velag, 1994.
- QUEIROGA, V. P.; GIRÃO, E. G.; ARAÚJO, I. M. S.; GONDIM, T. M. S.; FREIRE, R. M. M.; VERAS, L. G. C. Composição centesimal de amêndoas de coco babaçu em quatro tempos de armazenamento. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. v. 17, p. 207-213, 2015.
- RABELO, M. **Aditivção de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2000.
- RAMULU, M.; STICKLER, P. B.; MCDEVITT, N. S. Influence of processing methods on the tensile and flexure properties oh high temperature composite. **Composites Science and Technology**. v. 64, p. 1763-1772. 2004.

- RAGONDET, A. **Experimental characterization of the vacuum infusion process.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – University of Nottingham, Nottingham, 2005.
- REZENDE, M. C. **Fractografia de Compósitos Estruturais.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 10, n. 2, 2007.
- RODRIGUES, P. R. B. **Desempenho físico-mecânico de compósito fabricado com fibra do epicarpo do coco babaçu (*Orbignya phalerata*) e resíduos poliméricos.** 102 f. 2019. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Universidade federal do Tocantins (UFT), Palmas, 2019.
- RODRIGUES, J. S.; FUJIYAMA, R. T.; OLIVEIRA, D. R. C. Análise fractográfica de compósitos de matriz poliéster e resíduo da indústria madeireira. In: **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, VI.** 18-21 ago. 2010, Paraíba.
- RODRIGUES, J. S. **Comportamento mecânico de material compósito de matriz poliéster reforçado por sistema híbrido fibras naturais e resíduos da indústria madeireira.** 2008. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Para (UFPA), Belém, 2008.
- 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 (UFRN), Natal, 2017.
- SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARÃES, J. L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. Composites: Part A, v. 38, p. 1694-1709, 2007.
- SHAWKATALY, A. K. H. P. *et al.* The use of bamboo fibres as reinforcements in composites. In: FARUK, O.; SAIN, M. **Biofiber Reinforcements in Composite Materials.** Cambridge: Woodhead Publishing, p. 488-524, 2015.
- SILVA, R.; HARAGUCHI, S. K.; MUNIZ, E. C.; RUBIRA, A. F. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, v. 32, p. 661-671, 2009.
- SILVA, R. V. **Compósito de Resina Poliuretano Derivada de Óleo de Mamona e Fibras Vegetais.** 2003. 157 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2003.
- Site da empresa OXYBLACK – Composite, Ltda. Disponível em:
<<https://www.oxyblack.com/index.php/pt/compositos/o-que-sao>>. Acesso em: 10 jan. 2021.
- SOBRINHO, L. L. **Desenvolvimento de Matriz Polimérica para Material Compósito Visando o Reforço de Dutos de Aço.** 2005. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2005.

SOUZA, R. F. **Obtenção, caracterização e aplicação de um compósito de matriz de poliéster e carga de pó de carnaúba.** 2020. 70f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2020.

SOUSA, D. C. **Compósitos com Matriz de Amido do Mesocarpo do Coco Babaçu Reforçados com Fibras do Epicarpo do Coco Babaçu.** 2016. 86 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Piauí (UFPI), Piauí, 2016.

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

SRIVASTAVA, V. K.; KAWADA, H. Fatigue behaviour of alumina fibre reinforced epoxy resin composite pipes under tensile and compressive loading conditions. **Composites Science and Technology**. v. 61, p. 2393-2403, 2001.

TAJVIDLI, M., TAKEMURA, A. Effects of reprocessing on the hygroscopic behavior of natural fiber high-density polyethylene composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 122(2), 2011.

TAKAHASHI, R. **Desenvolvimento de material compósito de matriz polimérica reforçada a partir de Pré-pregs de fibras naturais de curauá e de sisal.** Trabalho de conclusão de curso (grau de Engenheiro Mecânico) – Universidade Federal do Pará (UFPA), p. 17-19, 2011.

ZINI E.; SCANDOLA M. Green composites: **an overview.** **Polym Compos**, v 32, p. 1905–15, Dez-2011. DOI: 10.1002 / pc.21224.

