



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM RESÍDUO DE ERVA – MATE**

Larissa da Costa Decker

Lajeado, dezembro de 2020

Larissa da Costa Decker

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM RESÍDUO DE ERVA-MATE

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II do Curso de Engenharia Química da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, para fins de obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Cleide Borsoi

Lajeado/RS, novembro de 2020

*A dona do coração mais belo e puro que já
conheci, minha avó Ilone (in memoriam).*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Inês e Erni, por servirem de alicerce em minha vida. Pelo constante incentivo aos estudos, apoio incondicional, pela ajuda ao longo da minha vida acadêmica e por estarem sempre ao meu lado em todos os momentos.

A minha irmã Luana, por servir como exemplo de dedicação e comprometimento, pelo incentivo e por toda ajuda ao longo da vida.

Ao meu namorado, amigo, companheiro e futuro colega de profissão William, pela compreensão, paciência, apoio e incentivo durante todos os momentos.

A minha querida orientadora e professora Cleide Borsoi, exemplo de profissional, pela maestria em me orientar, mesmo diante de todos os compromissos de sua intensa vida acadêmica. Por sempre demonstrar paciência e dedicação, me colocando na direção correta e sanando todos questionamentos. Pela disposição de seu tempo e auxílio na realização do presente trabalho, pelas palavras positivas de incentivo, e por toda atenção ao longo desse ano, que foram essenciais para que este trabalho fosse concluído satisfatoriamente.

Ao professor André Luis Catto, pelo auxílio, disponibilidade, e incentivo indireto e direto na realização deste trabalho, com destaque na realização dos ensaios mecânicos. Aos professores/funcionários do Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Celso Roman Junior e Edson Francisquetti pelo apoio técnico prestado durante o desenvolvimento do projeto.

A todos meus amigos e demais familiares, por todo o incentivo, apoio e compreensão. Em especial para a minha amiga, dupla e companheira de aulas Paloma, pela troca de conhecimento, incentivando diário e pela amizade que edificamos ao longo da graduação.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

"O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis."

José de Alencar

RESUMO

Estudos relacionados ao desenvolvimento tecnológico na área de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais estão em crescimento nos últimos anos devido a suas diferentes propriedades. Materiais compósitos poliméricos que utilizam fibras residuais da indústria aliam o desenvolvimento de materiais que possuam propriedades mecânicas, físicas e morfológicas adequadas, ao aproveitamento de materiais de origem renovável. Durante o processo de beneficiamento da erva-mate, entre os processos e classificação dos variados tipos de erva-mate, cerca de 2% da produção em massa da erva-mate tornam-se resíduos, na forma de palitos de erva-mate. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um compósito polimérico reforçado com o resíduo do processamento da erva-mate de uma indústria localizada no Vale do Rio Pardo - RS, visando o reaproveitamento e agregando valor ao material. Os compósitos poliméricos foram obtidos através de mistura do resíduo de palito de erva-mate e resina poliéster isoftálica com neopentilglicol (NPG), utilizando o método de moldagem manual. As amostras foram caracterizadas com relação à resistência mecânica (ensaios de tração e flexão), morfologia por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), e análises físicas de absorção de água, porosidade aparente, e massa específica aparente. Os compósitos obtidos com 30% de inserção de fibra apresentaram a maior absorção de água no final do ensaio. Em relação à porosidade aparente, notou-se um aumento em todos os compósitos obtidos com incorporação da fibra, quando comparados à matriz poliéster pura. O valor máximo atingido de massa específica aparente verificou-se no compósito obtido com a adição de 30% de fibra, com um aumento de 20,51% em relação à matriz pura. Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos acentuam tal tendência, assim, a resistência máxima à tração obtida encontra-se no compósito composto majoritariamente por resina poliéster isoftálica, alcançando $40,55 \pm 1,04$ MPa. Em relação ao módulo de elasticidade, observa-se um aumento em comparação à matriz pura, evidenciando um material mais rígido. A resistência à flexão dos compósitos reforçados com fibras apresenta desempenho inferior quando comparado à matriz pura. Através das análises morfológicas, determinou-se falhas e características presentes nos materiais, como presença de vazios, bolhas de ar e o fenômeno de fibras arrancadas, indicando fraca interação matriz/reforço.

Palavras-chave: Compósitos poliméricos. Resíduo de erva-mate. Resina poliéster isoftálica.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estados brasileiros responsáveis pela produção de erva-mate	21
Figura 2 - Principais grupos funcionais de materiais lignocelulósicos	28
Figura 3 - Fluxograma das diferentes etapas de obtenção e caracterização dos compósitos poliméricos	30
Figura 4 - Molde de silicone utilizada na formação e cura dos compósitos.....	33
Figura 5 - Corpos de prova para os testes mecânicos e físicos e análise morfológica. Onde: RP = resina poliéster isoftálica; REM = resíduos de palitos de erva-mate	34
Figura 6 - Análise de absorção de água em compósitos poliméricos reforçados com resíduo de palito de erva-mate em 24 horas de ensaio.	37
Figura 7 - Análise de absorção de água em compósitos poliméricos reforçados com resíduo de palito de erva-mate no período de 338 horas.....	38
Figura 8 - Corpos de prova após final do ensaio de absorção de água. Onde: RP = resina poliéster isoftálica; REM = resíduos de palitos de erva-mate	39
Figura 9 - Análise morfológica das amostras de resíduos de palito de erva-mate, onde: (A') representa a ampliação de 100 vezes e (AA'') representa a ampliação de 1000 vezes.....	45
Figura 10 - Análise morfológica das amostras: (A): RP. Onde ' representa a ampliação de 100 vezes e '' representa a ampliação de 1200 vezes	45

Figura 11 - Análise morfológica das amostras: (A): RP/10REM; (B): RP/20REM; E (C): RP/30REM. Onde 'representa a ampliação de 100 vezes e "representa a ampliação de 1200 vezes47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação e composição das amostras de compósito. Onde: RP = resina poliéster isoftálica; REM = resíduos de palitos de erva-mate	32
Tabela 2 - Resultados de massa específica aparente e porosidade aparente	40
Tabela 3 - Resultados de ensaios mecânicos por tração	42
Tabela 4 - Resultados de ensaios mecânicos de Flexão	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA Absorção de Água

ALMACO Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos

ASTM American Society for Testing Materials

EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MEA Massa Específica Aparente

MEKP Peróxido de Metil Etil Cetona

MEV Microscopia Eletrônica de Varredura

NPG Neopentilglicol

PA Porosidade Aparente

PEAD Polietileno de Alta densidade

PEBD Polietileno de Baixa Densidade

PP Polipropileno

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1.	Objetivos.....	15
1.1.1.	Objetivo geral	15
1.1.2.	Objetivos específicos	15
1.2.	Justificativa e relevância do trabalho.....	15
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1.	Fibras lignocelulósicas.....	17
2.2.	A erva - mate.....	19
2.3.	Polímeros.....	23
2.3.1.	Resina Poliéster	25
2.4.	Materiais compósitos.....	25
2.4.1.	Materiais compósitos poliméricos.....	27
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1.	Materiais.....	31
3.2.	Métodos	31
3.2.1.	Preparação do material de reforço	31
3.2.2.	Obtenção dos compósitos	31
3.3.	Caracterização dos compósitos, resina polimérica e resíduo de erva- mate	35
3.3.1.	Caracterização física dos compósitos	35
3.3.2.	Microscopia de varredura eletrônica (MEV).....	36
3.3.3.	Caracterização mecânica dos compósitos	36
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1.	Caracterização física dos compósitos	37

4.1.1.	Absorção de água	37
4.1.2.	Massa específica aparente e porosidade aparente	40
4.2.	Caracterização mecânica dos compósitos	42
4.3.	Microscopia de Varredura Eletrônica	44
5.	CONCLUSÃO	49
6.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS.....	51

1. INTRODUÇÃO

Materiais compósitos classificam-se como uma classe de materiais da engenharia formados por dois ou mais constituintes, objetivando a obtenção de um produto de qualidade superior aos seus constituintes. As fases constituintes são chamadas de matriz e reforço (ou carga), e possuem diferentes estruturas, composições e propriedades. A fase matriz pode ser metálica, polimérica ou cerâmica, e a fase reforço pode ser constituída por fibras de carbono, vidro, aramidas e fibras naturais. O material resultante se destaca frente aos materiais convencionais por possuir menor massa específica, fácil processamento e redução de custo, e assim, seu uso abrange diferentes áreas como aeronáutica, automóveis e diversas aplicações militares (LOPES, 2017; SHACKELFORD, 2008).

Nos últimos anos, nota-se uma crescente procura no desenvolvimento de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais. Estudos recentes sobre compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais revelam que suas propriedades mecânicas podem ser comparadas a de compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro (SANJAY *et al.*, 2018).

No desenvolvimento de materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais, a matriz polimérica é utilizada na substituição de materiais tradicionais como madeira, metais e cerâmicos. As fibras naturais, por sua vez, substituem as fibras convencionais como vidro e carbono. Quando comparadas, fibras naturais apresentam vantagens como baixo custo, baixo peso, desempenho mecânico satisfatório, e principalmente ser de origem renovável e assim, biodegradável (GONÇALVES *et al.*, 2006).

A crescente conscientização ambiental afeta diversas classes da sociedade, impulsionando esforços para o desenvolvimento inteligente de novos materiais, com propriedades inovadoras para diversas aplicações. Dessa forma, a utilização de fibras naturais corresponde a aplicação sustentável dos recursos naturais e de fontes renováveis, além de atender necessidades regionais, aproveitando resíduos vegetais proveniente de outros processamentos (COSTA, 2018).

Nesse viés, a erva-mate pode ser classificada como uma espécie arbórea medicinal nativa da região sul da América do Sul. O seu consumo ocorre preferencialmente através da infusão de suas folhas verdes secas, em extrato de água quente, bebida conhecida como “chimarrão” (BONFATTI JÚNIOR *et al.*, 2018).

No Rio Grande do Sul, a bebida é considerada regional e um hábito diário para a grande maioria dos gaúchos. Para que a bebida possa ser desfrutada, as folhas verdes da planta passam por processos de industrialização, em que uma grande parte de resíduos provenientes do talo da folha são gerados (BITENCOURT *et al.*, 2009). Os talos de erva-mate classificam-se como fibras lignocelulósicas de origem natural, possuindo quantidades consideráveis de celulose em sua composição. A celulose, quando empregue em compósitos poliméricos por meio de fibras vegetais, desempenha e é responsável por agregar estabilidade e resistência ao material (LOPES, 2017).

Atualmente, os compósitos oriundos de recursos renováveis, onde utilizam-se fibras naturais, tem um potencial promissor por proporcionar benefícios para empresas, consumidor final, e principalmente para o meio ambiente, por substituírem e diminuir a utilização de recursos provenientes do petróleo (BARBOSA *et al.*, 2020). Dentre as matrizes poliméricas mais utilizadas encontram-se as resinas poliésteres, divididas em ortoftálicas, isoftálicas, tereftálicas, bisfenólica e éster-vinílicas (MOREIRA, 2008). A resina isoftálica, quando comparada às outras resinas poliésteres, destaca-se devido a sua utilização em peças que exigem alta resistência química e mecânica à agentes externos. Entre suas propriedades, sua viscosidade média proporciona cor e brilho às superfícies, e ainda apresenta cura em temperatura ambiente, o que facilita seu manuseio (MARINUCCI, 2011).

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um compósito polimérico reforçado com resíduos de talos de erva-mate, e posteriormente avaliar

suas propriedades físicas, mecânicas e morfológicas a fim de avaliar a sua produção e utilização nas diversas áreas aplicáveis.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Desenvolver um compósito polimérico utilizando como matriz polimérica a resina poliéster isoftálica com Neopentilglicol (NPG) e resíduos de palitos de erva-mate, provenientes do seu beneficiamento, como material de reforço.

1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos que coordenam as diretrizes deste trabalho são:

- a) Avaliar a morfologia dos resíduos de talos de erva-mate utilizados;
- b) Avaliar a incorporação de diferentes concentrações de resíduo de talo de erva-mate (10, 20 e 30 em massa) em resina poliéster isoftálica;
- c) Caracterizar os compósitos obtidos quanto às suas propriedades físicas, mecânicas e morfológicas.

1.2. Justificativa e relevância do trabalho

No Estado do Rio Grande do Sul, a produção de erva-mate ocupa uma importante posição na economia, estendendo-se por 219 municípios. No ano de 2018 segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a quantidade produzida na extração vegetal alcançou o número de 392.962 toneladas/ano. Durante o processo de beneficiamento da erva-mate, entre os processos e classificação dos variados tipos de erva-mate, cerca de 2% da produção em massa da erva-mate, ou seja, 7589,24 toneladas/ano, tornam-se resíduos, na forma de palitos de erva-mate. Atualmente, os principais empregos do subproduto são como fonte de energia em

caldeiras, e adubos orgânicos em práticas agrícolas (BITENCOURT *et al.*, 2009; MOSELE, 2002).

Dessa forma, o desenvolvimento do presente trabalho consiste na possibilidade de reaproveitamento dos talos de erva-mate, resíduo de indústrias da região do Vale do Rio Pardo, avaliando o reaproveitamento destes resíduos em uma aplicação com maior valor agregado. Assim, será possível avaliar o potencial de aplicação de resíduos de talos de erva-mate na obtenção de compósitos poliméricos, verificando suas propriedades finais e vislumbrar possíveis aplicações nas mais diversas áreas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Fibras lignocelulósicas

Fibras naturais são classificadas de acordo com sua origem, ou seja, vegetal, animal ou mineral (PANTOJA *et al.*, 2019). As fibras vegetais são provenientes de diferentes partes de plantas, como o caule, fruto, folhas e sementes de várias espécies, as fibras de origem animal são obtidas a partir do pelo de mamíferos e a fibra mineral é derivada unicamente do amianto (GRITSCH; MURPHY, 2005; KIM; NETRAVALI, 2010).

Devido à grande extensão de seu território, o Brasil abriga uma das maiores diversidades biológicas do mundo, refletida na abundante variedade de vegetações. Dessa forma, destaca-se na produção de materiais lignocelulósicos ricos em fibras, como o eucalipto, juta, abacaxi, bambu, banana, algodão, sisal, linho entre outros (LOPES, 2017). Shing *et al.* (2017) ressaltam que as fontes de fibras podem ser oriundas de resíduos e subprodutos agrícolas, como os talos de erva-mate, palha de milho, casca de arroz, bagaço de cana de açúcar e caules de uva, uma vez que se caracterizam como um resíduo abundante, renovável e de baixo custo.

Quando comparadas às fibras artificiais, qualificam-se como um recurso renovável, ao absorverem a mesma quantidade de dióxido de carbono que produzem. Além disso, durante seu processamento, geram somente resíduos orgânicos e seus rejeitos podem ser empregados na geração de energia elétrica (BARBOSA *et al.*, 2020; BERGLUND *et al.*, 2016).

As fibras naturais, também são conhecidas como fibras lignocelulósicas, morfologicamente são células alongadas. De acordo com Silva (2009), a constituição é formada por cerca de 40 a 50% de celulose, 20 a 30% de hemicelulose e 20 a 28% de lignina, além de pequenas quantidades de outras substâncias como compostos inorgânicos, pectinas, carboidratos, terpenos, alcalóides, saponinas, polifenólicos, gomas, resinas, lipídeos e graxas (MOURA, 2019; GURUNATHAN *et al.*, 2015).

Quanto à sua organização estrutural, as fibras vegetais podem ser definidas como compósitos de fibrilas de celulose mantidas estritamente ligadas por uma matriz constituída de lignina e hemicelulose, características relacionadas à natureza da celulose e a sua cristalinidade. A fibra vegetal possui estrutura e propriedades que variam de acordo com a constituição química das paredes celulares. A lignina e a hemicelulose atuam como intercomunicantes entre regiões cristalinas e amorfas da célula. A parede celular é formada por diversas camadas, unidas entre si pelas lamelas médias, membranas utilizadas como uma espécie de cimento, sendo responsáveis por unir as células vegetais (MOURA, 2019; FRANCO, 2010; ALVES, 2012).

A celulose qualifica-se como o material orgânico de maior abundância na Terra, cuja molécula é a principal constituinte da parede celular dos vegetais. Formada por polissacarídeos, é um polímero linear de cadeia longa, e peso molecular variável. A celulose tem estrutura linear, fibrosa e úmida, formada pela conjunção de moléculas de β -glicose através de ligações β -1,4-glicosídicas (THIMM, *et al.*, 2002; SILVA, 2009).

Entre os grupos hidroxilas da celulose estabelecem-se múltiplas ligações de hidrogênio, ou seja, forças intermoleculares responsáveis por formar microfibrilas. As fibrilas se entrelaçam formando filamentos finos que se unem uns aos outros (MOURA, 2019). Devido a existência de ligações de hidrogênio na celulose, existe uma forte tendência de a mesma formar cristais, tornando-a insolúvel em água e a maioria dos solventes orgânicos. Sua cristalinidade oscila de acordo com sua origem e processamento (LOPES, 2017).

A celulose representa uma matéria-prima de grande importância para diversos segmentos da indústria. Quando empregada em compósitos poliméricos através de fibras vegetais, torna-se a principal responsável por agregar estabilidade e propriedades mecânicas, como resistência ao material. Além disso, do ponto de vista

ambiental, caracteriza-se como um insumo sustentável para a indústria química, de fonte renovável e como alternativa a matérias-primas provenientes de combustíveis fósseis (MASUELLI, 2013; LOPES, 2017).

A hemicelulose é um componente essencial que se encontra na parede celular das plantas e está intimamente ligado à celulose. Constituem-se de monossacarídeos polimerizados, sendo a xilose o açúcar presente em maior abundância. Quando comparada, a celulose apresenta baixa massa molar, não é quimicamente homogêneas e não contém regiões cristalinas, característica que as torna hidrofílicas e suscetíveis à hidrólise (VELOSO *et al.*, 2013).

A lignina é formada por polímeros complexos de estrutura amorfa, que atuam como uma espécie de cimento entre as fibrilas, enrijecendo o interior das fibras. A união entre as unidades da lignina é dominada por ligações éteres, apresentando um grande número de interligações (GRUNWALD *et al.*, 2001; SATTLER; FUNNELL-HARIS 2013).

2.2. A erva - mate

A erva-mate (*Ilex paraguariensis*, St Hill) é uma espécie arbórea pertencente à família dos arbustos perenes (Aquifoliaceae), nativa da região subtropical da região da América do Sul (ARRIETA *et al.*, 2018). Recebe esse nome em homenagem ao naturalista francês Augusto Saint Hillaire, responsável por sua classificação em 1822. Considerada uma planta medicinal, é habitualmente consumida por suas conhecidas propriedades antioxidantes, diuréticas e anti-inflamatórias (BONFATTI JÚNIOR *et al.*, 2018).

A erva-mate constitui-se por folhas e ramos de *Ilex paraguariensis*, e o seu beneficiamento é destinado ao preparo de "chimarrão" ou "tererê", adoçado ou não (ANVISA, 2005). As formas de consumo da erva-mate mais empregadas são através da infusão de suas folhas verdes secas, em extrato de água quente, variando sua temperatura de 85 a 95°C (chimarrão), a infusão da erva-mate em água fria (tererê), e na forma de chá, com infusão de água quente em suas folhas processadas e torradas. O produto era consumido por nativos antes da chegada dos colonizadores e

está presente até hoje no hábito de grande parte da população de países como Argentina, Paraguai, Uruguai e sul do Brasil (TEIXEIRA *et al.*, 2016).

Segundo Tonet (2019) a utilização da erva-mate vai além das tradicionais bebidas, visto que possui compostos biologicamente ativos que possibilitam a sua aplicação industrial. Destacam-se, diante das vitaminas, aminoácidos e demais compostos, a cafeína, rutina e ácido clorogênico, em virtude de suas atividades antioxidantes. Dessa forma, a erva-mate pode ser utilizada em produtos farmacêuticos, conservantes de alimentos, cosméticos e produtos de higiene.

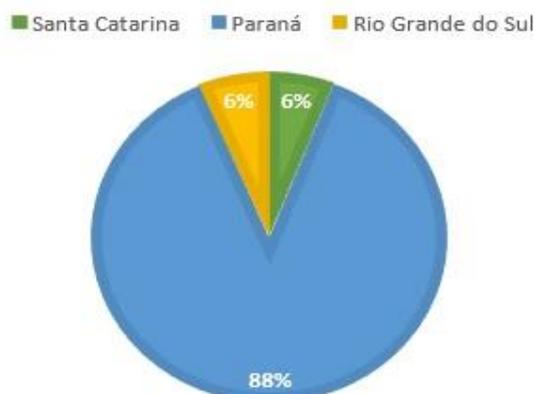
Seu cultivo e consumo se estendem pela Argentina, Paraguai, Uruguai e sul do Brasil, sendo a Argentina a maior consumidora e produtora (ARRIETA *et al.*, 2018). De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (2019), no Brasil a produção ocorre nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Em algumas regiões do Mato Grosso do Sul a produção também ocorre, porém com valores não expressivos. No Paraguai o cultivo se concentra entre os rios Paraná e Paraguai, e na Argentina, ocorre na província de Misiones, província de Corrientes e em pequena parcela da província de Tucumã.

De acordo com o Atlas socioeconômico do Rio Grande do Sul (2019), no estado do Rio Grande do Sul a produção de erva-mate ocorre em 219 municípios da metade norte do Estado, com produção variada, cuja organização ocorre com agrupamento de municípios em polos ervateiros. A existência desses polos tem como principal objetivo facilitar a gestão da cadeia produtiva ervateira.

No ano de 2018, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a quantidade produzida na extração vegetal alcançou o número de 392.962 toneladas/ano. Na Figura 1, observa-se a liderança do estado do Paraná na produção de erva-mate no Brasil, seguido do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, respectivamente.

Figura 1 - Estados brasileiros responsáveis pela produção de erva-mate

EXTRAÇÃO VEGETAL DA ERVA-MATE NOS ESTADOS BRASILEIRO



Fonte: Adaptado de IBGE (2018).

O principal objetivo da produção da erva-mate é a venda de suas folhas para elaboração do mate. De acordo com Bitencourt *et al.* (2009), a fim de obter-se o produto final desejado, o plantio é realizado em meio a floresta, em um sistema de cultivo conhecido como agroflorestal, visando causar o menor impacto possível na floresta nativa.

Após a colheita, a erva-mate segue um processamento que integra três etapas básicas, são elas: sapeco, secagem e cancheamento. O sapeco ocorre com a passagem da erva-mate por um cilindro giratório com furos, onde a erva colhida sofre um choque térmico devido o contato com as chamas da fornalha, que estão a aproximadamente 400°C. O objetivo principal dessa etapa é remover a umidade superficial e inativação de enzimas responsáveis por oxidação do produto (ESMELINDRO *et al.*, 2002).

O processo de secagem é a etapa responsável por provocar a desidratação das folhas, ao passo que, a presença de água na erva-mate corrobora para o crescimento de fungos, que podem levar a degradação das folhas. A etapa de secagem pode ser realizada de diversas formas, seja ela em câmaras de secagem, secadores mecânicos rotativos, ou esteira (JÚNIOR *et al.*, 2017).

A moagem, também chamada de cancheamento, consiste na etapa em que a erva-mate é fragmentada/ triturada/ moída, de acordo com os tamanhos exigidos. Em

seguida, a erva é destinada a peneiras, ventiladores e filtros, que realizam a divisão da erva em pó, folhas, talos e paus (ESMELINDRO *et al.*, 2002).

Ao longo do processo de beneficiamento, cerca de 2% da produção em massa da erva mate tornam-se resíduos, na forma de palitos de erva-mate. Atualmente, a principal aplicação desse subproduto é como fonte de energia, em caldeiras, fertilizantes e como adubo orgânico em outras práticas agrícolas (MOSELE, 2002).

Considerando o elevado consumo de erva-mate na região sul da América Latina, é necessário alternativas com maior valor agregado a esses resíduos. De acordo com Mattos *et al.* (2014), tentativas de agregar valor ao resíduo, tornam-se uma rota estratégica para explorar e desenvolver o setor industrial, aumentando o valor econômico da erva-mate (BONFATTI JÚNIOR *et al.*, 2018; ESMELINDRO *et al.*, 2002).

Em sua composição os resíduos de erva-mate apresentam quantidades consideráveis de celulose, de grande interesse tecnológico. De acordo com os percentuais obtidos por Dahlem Júnior *et al.* (2019), os talos de erva-mate são compostos por 34,85% de α -celulose, 24,77% de hemicelulose, 25,78% de lignina, 10,11% de extrativos e 4,49% de cinzas.

De acordo com os resultados obtidos por Catto *et al.* (2019) visando empregar palitos de erva-mate em compósitos poliméricos, a adição de talos de erva-mate resultou em um aumento na resistência à tração e resistência à flexão do material. Os resultados encontrados comprovam a possibilidade de substituição de 30 a 40% em massa da matriz sintética por fibras, quantidade variável conforme as propriedades desejadas do compósito.

De maneira semelhante, visando utilizar o resíduo da erva-mate no desenvolvimento dos chamados compósitos verdes, Hansen *et al.* (2019), analisaram a influência do resíduo nas propriedades térmicas e termo mecânicas do material. Os resultados dos ensaios comprovam uma significativa melhora na rigidez, boa estabilidade térmica e propriedades termo mecânicas, quando comparadas à matriz pura. Dessa forma, a incorporação de resíduos de erva-mate em compósitos poliméricos, como carga de reforço, torna-se uma alternativa promissora aos compósitos poliméricos convencionais.

2.3. Polímeros

A cadeia de fabricação das embalagens plásticas tem seu início na indústria. Os polímeros são macromoléculas constituídas por incontáveis unidades de repetição, denominadas monômeros, ligadas entre si através de ligações covalentes. As presenças de ligações covalentes conferem ao material propriedades de isolamento elétrico, o que possibilita seu emprego em substituição a metais, cerâmicas e materiais naturais em muitas aplicações, sejam elas domésticas, industriais, comerciais e outras (CANEVAROLO, 2006; QUAN *et al.*, 2015)

Os polímeros podem possuir cadeias lineares, ramificadas ou com ligações cruzadas. As cadeias lineares caracterizam-se por serem constituídas por apenas uma cadeia principal, são solúveis, fundem e escoam. Cadeias ramificadas classificam-se como aquelas em que da cadeia principal partem prolongamentos, apresentando estruturas específicas. Em cadeias com ligações cruzadas, as cadeias poliméricas estão ligadas entre si, através de forças covalentes, dividindo-se em polímeros com alta densidade de ligações cruzadas, e polímeros com baixa densidade de ligações cruzadas (CALLISTER, 2016).

Em relação à sua estrutura química, pode-se dividi-los em polímeros de cadeia carbônica, ou seja, polímeros formados por variações de ligações de carbono, sejam elas simples, duplas ou triplas. Também pode-se dividir os polímeros através da divisão química do seu mero em polímeros de cadeia heterogênea, na qual a cadeia possui outros átomos além do carbono, como oxigênio, enxofre, nitrogênio, silício, entre outros (LOOS, 2014).

De acordo com Pavanati (2015), os polímeros podem ser classificados com relação ao comportamento térmico, isto é, de acordo com sua facilidade em passar do estado sólido para o líquido através da ação do calor. Essa característica relaciona-se diretamente com as propriedades termoplásticas e termorrígidas dos polímeros.

Os polímeros termoplásticos apresentam cadeias lineares ou ramificadas e, amolecem e fluem sob um aumento considerável de temperatura, tornando-se moldáveis. Através de resfriamento solidificam e adquirem a forma desejada,

processo que pode ser reversível, isto é, podem ser moldados em mais de um ciclo térmico, tornando-os recicláveis (PAVANATI, 2015; SHACKELFORD, 2008).

Por sua vez, polímeros termorrígidos também chamados de termofixos ou termoendurecidos, são moldados ainda na forma de pré-polímero e após a moldagem sofrem o processo de cura. O processo de polimerização é responsável por tornar os termorrígidos infusíveis e insolúveis, em virtude da formação de ligações cruzadas na cura destes materiais. A estrutura final respectiva ao processo de cura em polímeros termorrígidos é uma infinita rede tridimensional com alto nível de reticulação (SHACKELFORD, 2008).

Grande parte das propriedades físicas, mecânicas e térmicas do material são adquiridas através do processo de cura. Pode-se dividir a cura em duas etapas, na qual a reação química é a primeira, em que se apresenta como um líquido viscoso, seguido da gelificação e posterior vitrificação, no estado sólido vítreo. Ao longo do processo, a resina sofre uma contração dimensional, resultante da proximidade das moléculas principais do polímero e tensões residuais da matriz (CALLISTER, 2016; DUTRA *et al.*, 2019).

Os polímeros termorrígidos são materiais resistente e com elevada durabilidade, e convém ressaltar suas principais características e propriedades, de acordo com seu comportamento mecânico. Os termorrígidos são resistentes a altas temperaturas, possuem boa resistência química e física, possuem estabilidade dimensional, resistência à fluência e boas propriedades elétricas. Outro fator importante é o alto módulo, rigidez e resistência à deformação, mesmo quando são submetidos a altas tensões, em virtude às cadeias não sofrerem rotação (PAVANATI, 2015).

Em razão de suas propriedades singulares, o emprego desses materiais é amplamente difundido. São tradicionalmente utilizados na fase matriz de materiais compósitos reforçadas com fibras, sejam elas de vidro, carbono, metálicas, orgânicas e demais, em virtude ao baixo tempo de cura, transparência e, quando comparado aos demais, baixo custo (DHAKAL *et al.*, 2007; SHACKELFORD, 2008).

2.3.1. Resina Poliéster

O termo resina é designado para definir um composto natural ou sintético que inicialmente encontra-se no estado viscoso e solidifica-se com o processo de cura. As resinas sintéticas são polímeros obtidos através dos processos de polimerização e classificam-se de acordo com o comportamento térmico em resinas termoplásticas e resinas termorrígidas (COSTA *et al.*, 2014; KERSTING, 2014).

Na produção de compósitos poliméricos, matrizes de poliéster insaturado são geralmente empregados em consequência de suas propriedades mecânicas. O poliéster insaturado destaca-se em relação às outras resinas termorrígidas por apresentar cura em temperatura ambiente, boas propriedades de tração, flexão e impacto, e por ser um material transparente. Na cura de resinas poliéster podem ser utilizadas substâncias catalisadoras que auxiliam no processo, de acordo com o tempo de cura, tempo de gel e propriedades esperadas (COSTA *et al.*, 2015).

As resinas poliésteres são classificadas em ortoftálicas, isoftálicas, tereftálica, bisfenólica e éster-vinílicas, sendo as três primeiras as mais empregadas industrialmente (MOREIRA, 2008).

A resina isoftálica provém de poliésteres de alta massa molecular, como o ácido isoftálico. Sua utilização se dá no segmento industrial em peças que exijam alta resistência química e mecânica à agentes externos, absorvendo melhor impactos e por isso, são indicadas a peças que serão expostas à ambientes agressivos. Entre suas propriedades apresenta viscosidade média, o que proporciona cor e brilho às superfícies. Quando comparada aos outros tipos de resinas poliésteres, apresenta melhores características mecânicas, químicas e térmicas (MARINUCCI, 2011; MOREIRA, 2008).

2.4. Materiais compósitos

Materiais compósitos são definidos como materiais formados por duas ou mais fases com constituintes distintos entre si, ou seja, uma fase matriz e a outra reforço ou carga, com composições, estruturas e propriedades singulares, separadas por uma interface entre os diferentes materiais. A interface é definida como a ligação entre a

superfície da fibra e da matriz, e é de sua responsabilidade transferir os esforços atuantes na matriz para a fase reforço (DIAS *et al.*, 2019).

A fase matriz tem como propósito conferir estrutura ao material, preenchendo vazios e inferindo na forma. A fase matriz é também o elemento responsável por manter a união entre as fibras, além de definir a fase final do compósito e dirigir os processos de produção. Pode ser constituída por cerâmica, polímeros ou metais (GONÇALVES *et al.*, 2006; LOPES, 2017).

A fase reforço, por sua vez, é responsável por aperfeiçoar algumas propriedades físicas e químicas dos compósitos. A fase reforço pode ser constituída por fibras de carbono, fibras de vidro, aramidas e fibras naturais. As propriedades finais dos compósitos são definidas diretamente em função da orientação da fibra, ou seja, a forma em que estão dispostas (alinhadas, desalinhadas ou em duas direções), sua fração, volume e dimensão (curta ou longa). A escolha de sua inserção ocorre de acordo com o tipo de aplicação do compósito (LOPES, 2017).

Segundo Resende (2000), os materiais compósitos movimentam a indústria de materiais desde a Segunda Guerra Mundial. Em 1960, com a introdução dos compósitos poliméricos, esse material ganhou a atenção industrial, sendo empregues no lugar de materiais que até então eram considerados insubstituíveis, como o aço e alumínio. Atualmente, o uso per capita de compósitos é um indicador de desenvolvimento social. Suas aplicações destacam-se na área da aviação e aeroespacial de alto desempenho, equipamentos esportivos, construção naval, e na fabricação de veículos e pontes (SHACKELFORD, 2008).

Segundo Costa (2018), o mercado de compósitos está tornando-se cada vez mais objetos de estudos e pesquisas científicas em virtude de suas características. De acordo com a Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos - ALMACO (2018), a construção civil consome 35% do consumo local de compósitos de poliéster, seguido do transporte (30%), corrosão/ saneamento (19%) e náutico (3%). Já a demanda dos compósitos epóxi apresenta a energia eólica como principal mercado, com 90% da demanda, seguida pelo setor de petróleo com 5%.

Uma das características mais importantes dos compósitos, quando comparado a outros materiais, é a possibilidade da realização de ajustes na fabricação do mesmo,

de acordo com a sua finalidade. Essas características conferem aos materiais compósitos atender as necessidades industriais, constituindo grande parte dos materiais da engenharia comercial (SCIACOVELLI *et al.*, 2018).

A versatilidade de combinar dois materiais diferentes, a fim de alcançar propriedades desejadas, possibilita a união de polímeros com baixas densidades, com fibras que contêm altas propriedades mecânicas. Ao realizar tal fusão de características, obtêm-se propriedades como resistência mecânica (tração, flexão e impacto), rigidez, tenacidade, resistência química, condutividade térmica, densidade, estabilidade dimensional, resistência às condições ambientais e a altas temperaturas. Essas características adquiridas têm como maior vantagem a redução do custo durante o seu processamento, resultando em uma conseqüente economia de energia (MASUELLI, 2013; VASILIEV; MOROZOV, 2001).

2.4.1. Materiais compósitos poliméricos

De acordo com Lopes (2016), a matriz mais utilizada na fabricação de materiais compósitos é a polimérica, uma vez que suas resistências são inferiores se comparadas às de metais e cerâmicos, e o seu processamento não necessita de altas pressões e de altas temperaturas, resultando em leveza e fácil moldagem.

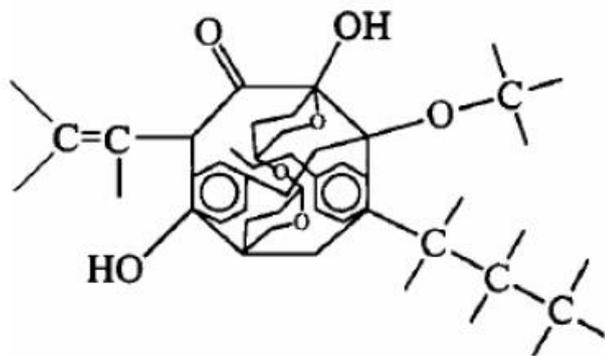
As matrizes de materiais compósitos poliméricos podem ser termoplásticas e termorrígidas. As matrizes termoplásticas mais utilizadas são o polipropileno (PP), polietileno de alta densidade (PEAD) e o polietileno de baixa densidade (PEBD). O poliéster insaturado é a matriz termorrígida mais empregada. Tradicionalmente os polímeros termorrígidos são os mais utilizados como material de matriz em compósitos reforçados por fibras, em função do tempo curto de cura, transparência e custo baixo (LOPES, 2017).

Ao longo dos últimos anos, os compósitos poliméricos reforçados por fibras têm recebido uma maior demanda de consumo, em virtude da combinação do alto desempenho e versatilidade, aliados ao baixo custo de produção e processamento simples. Estes materiais são utilizados na substituição de materiais convencionais, usados a muito tempo, como madeira, metais, cerâmicas e outros (QUINTANA *et al.*, 2018).

As vantagens apresentadas pelo uso de fibras lignocelulósicas como reforço em compósitos são disponibilidade contínua, derivados de fontes renováveis, biodegradabilidade, baixo custo, baixa densidade e propriedades específicas interessantes, resultando baixo impacto ao meio ambiente quando comparada a fibras sintéticas. Afim de garantir tais benefícios, as propriedades do reforço fibroso em compósito polimérico dependem do módulo de resistência da fibra, estabilidade química da matriz polimérica e interfase entre reforço e matriz (BORGES *et al.*, 2020).

Materiais compósitos apresentam-se como um campo promissor para a utilização destas fibras, como reforço em matrizes poliméricas termorrígidas, em substituição a elementos sintéticos (BORGES *et al.*, 2020). Fibras lignocelulósicas possuem grupos funcionais, como hidroxilas, ácidos carboxílicos, ligações éter, ligações insaturadas entre carbonos, anéis furfurílicos e fenólicos (FIGURA 2). Esses grupos funcionais são susceptíveis a diversas reações químicas, o que confere facilidade em estabelecer ligações fortes entre a fibra e a matriz polimérica (PEREIRA, 2016).

Figura 2 - Principais grupos funcionais de materiais lignocelulósicos



Fonte: Lopes (2017).

De acordo com Barbosa *et al.* (2020), a presença de fibras lignocelulósicas em compostos poliméricos resulta, muitas vezes, no aumento da rigidez e resistência do material. A interação físico-química presente nas cadeias das fibras lignocelulósicas é responsável por permitir que a parede vegetal apresenta propriedades mecânicas singulares. Dessa forma, essa eficiência está diretamente associada ao comprimento e a porcentagem de fibras presentes no compósito, uma vez que a transferência de tensões da matriz para o reforço está ligada a essa proporção.

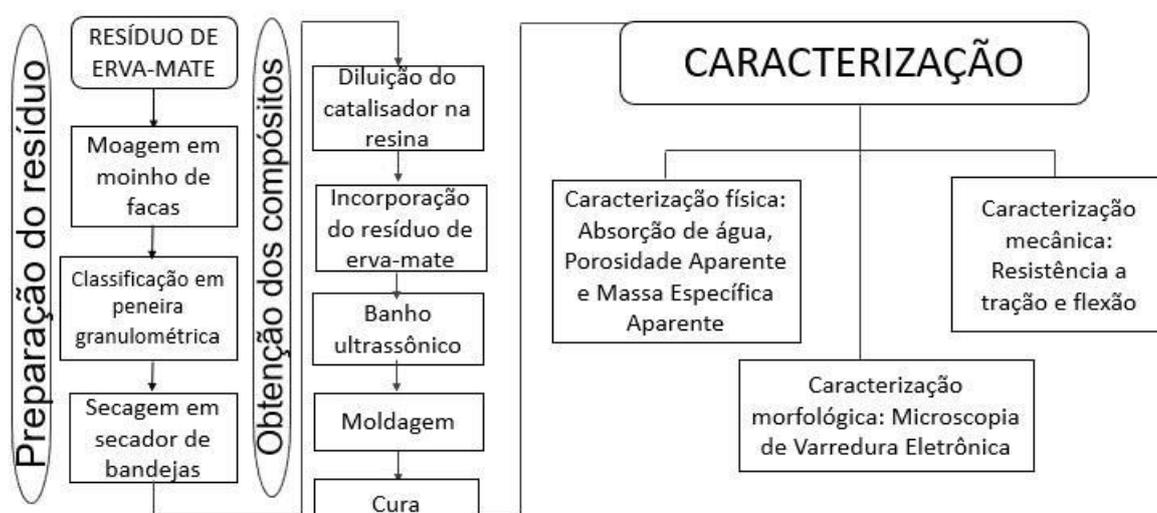
Em um estudo realizado por Francklin *et al.* (2019) fibras de sisal foram empregadas na produção de compósitos utilizados como reforço em estruturas de concreto armado. Avaliou-se o compósito com teor de fibra que apresentou o melhor desempenho mecânico, para isso os autores realizaram ensaios de flexão até a ruptura do material. Os resultados obtidos demonstraram que o desempenho mecânico do material equivale a compósitos de matriz epóxi reforçada com fibra de carbono, material utilizado no mercado como reforço de estruturas de concreto armado.

Lopes *et al.* (2019), realizaram um estudo com o objetivo de desenvolver compósitos com fibra de bambu e de cana-de-açúcar, utilizando matriz de poliéster tereftálica, a fim de comparar os resultados de tração entre os dois tipos de compósitos. De acordo com os resultados obtidos, os autores concluíram que os compósitos apresentaram diferentes propriedades entre as fibras de bambu e fibras de cana-de-açúcar, e assim ambos se apresentam como uma opção de materiais a serem utilizados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 3 apresenta o fluxograma para desenvolvimento e caracterização dos compósitos poliméricos reforçados com resíduo de erva-mate. As etapas contemplam a preparação do resíduo, posterior obtenção do compósito e resina pura, e caracterização física, mecânica e morfológica.

Figura 3 - Fluxograma das diferentes etapas de obtenção e caracterização dos compósitos poliméricos



Fonte: Da autora (2020).

3.1. Materiais

O material de reforço utilizado para a realização do trabalho foi o resíduo de palito de erva-mate, obtido da empresa Elacy, localizada na cidade de Venâncio Aires (Rio Grande do Sul, Brasil).

Os materiais poliméricos utilizados foram a resina poliéster isoftálica com neopentilglicol (NPG) acelerada, com catalisador Butanox M-50, adquiridos da empresa Fiberglass.

3.2. Métodos

3.2.1. Preparação do material de reforço

A fim de preparar os talos de erva-mate para posterior utilização nos compósitos, os mesmos foram moídos em um moinho de facas, da marca Tecnal, modelo TE 631, a uma velocidade de 27000 rpm. Após, as amostras foram classificadas em peneira granulométrica, com malha de 150 mesh Tyler. Em seguida, os resíduos foram submetidos ao processo de secagem, com o objetivo de eliminar a umidade da amostra, em uma secador de bandejas com circulação de ar à 60 °C por 12 horas. Posteriormente à secagem, as amostras foram colocadas em dessecador até sua utilização.

3.2.2. Obtenção dos compósitos

O processo adotado para obtenção dos compósitos foi através da fabricação manual, com o objetivo de atingir uma mistura homogênea dos componentes. A moldagem do compósito realizou-se em temperatura ambiente, utilizando a resina termofixa de poliéster isoftálica com NPG, e catalisador Butanox M-50. Para a preparação dos compósitos foram utilizadas diferentes concentrações de resíduos de palito de erva-mate com objetivo de avaliar a influência da incorporação destes resíduos nas propriedades dos compósitos. A Tabela 1 apresenta a composição e identificação das amostras obtidas.

Tabela 1 - Identificação e composição das amostras de compósito. Onde: RP = resina poliéster isoftálica; REM = resíduos de palitos de erva-mate

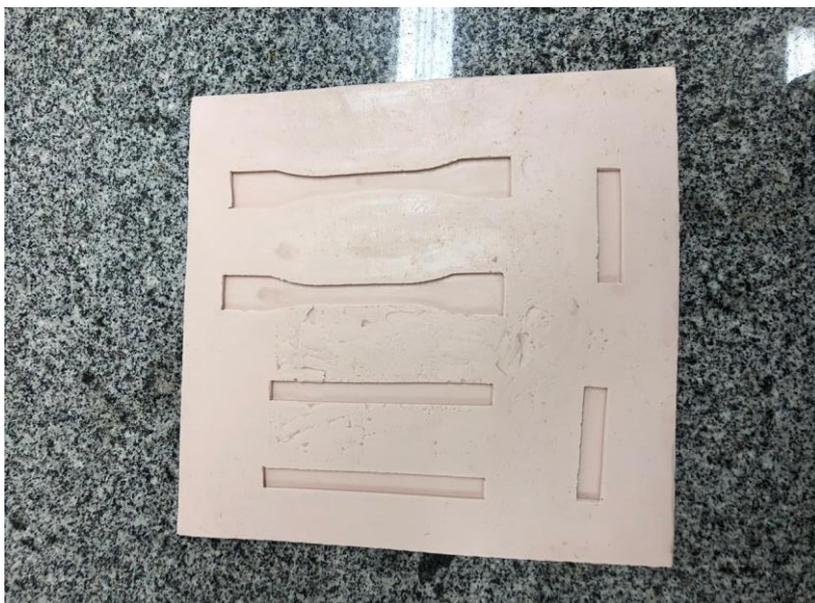
Amostras	Resíduos de erva-mate (% em massa)	Resina poliéster isoftálica (% em massa)
RP	-	100
RP/10REM	10	90
RP/20REM	20	80
RP/30REM	30	70

Fonte: Da autora (2020).

A moldagem dos compósitos ocorreu em 3 etapas. Primeiramente foi adicionado 1% em massa de catalisador na resina acelerada. A porcentagem de catalisador foi definida de acordo com testes realizados com diferentes porcentagens. O próximo passo compreendeu a incorporação do resíduo de palitos de erva-mate moídos à matriz polimérica acelerada, através de homogeneização, com auxílio de um bastão de vidro. Em seguida, a amostra foi direcionada ao banho ultrassônico por aproximadamente 5 minutos, visando a diminuição de bolhas de ar.

A mistura, após homogeneização, foi colocada em um molde confeccionado em silicone, onde a mesma sofreu moldagem manual até o processo completo de cura do material. O molde de silicone forneceu corpos-de-prova com dimensões e formatos de acordo com as normas técnicas seguidas, garantindo a padronização dos ensaios, conforme Figura 4.

Figura 4 - Molde de silicone utilizada na formação e cura dos compósitos

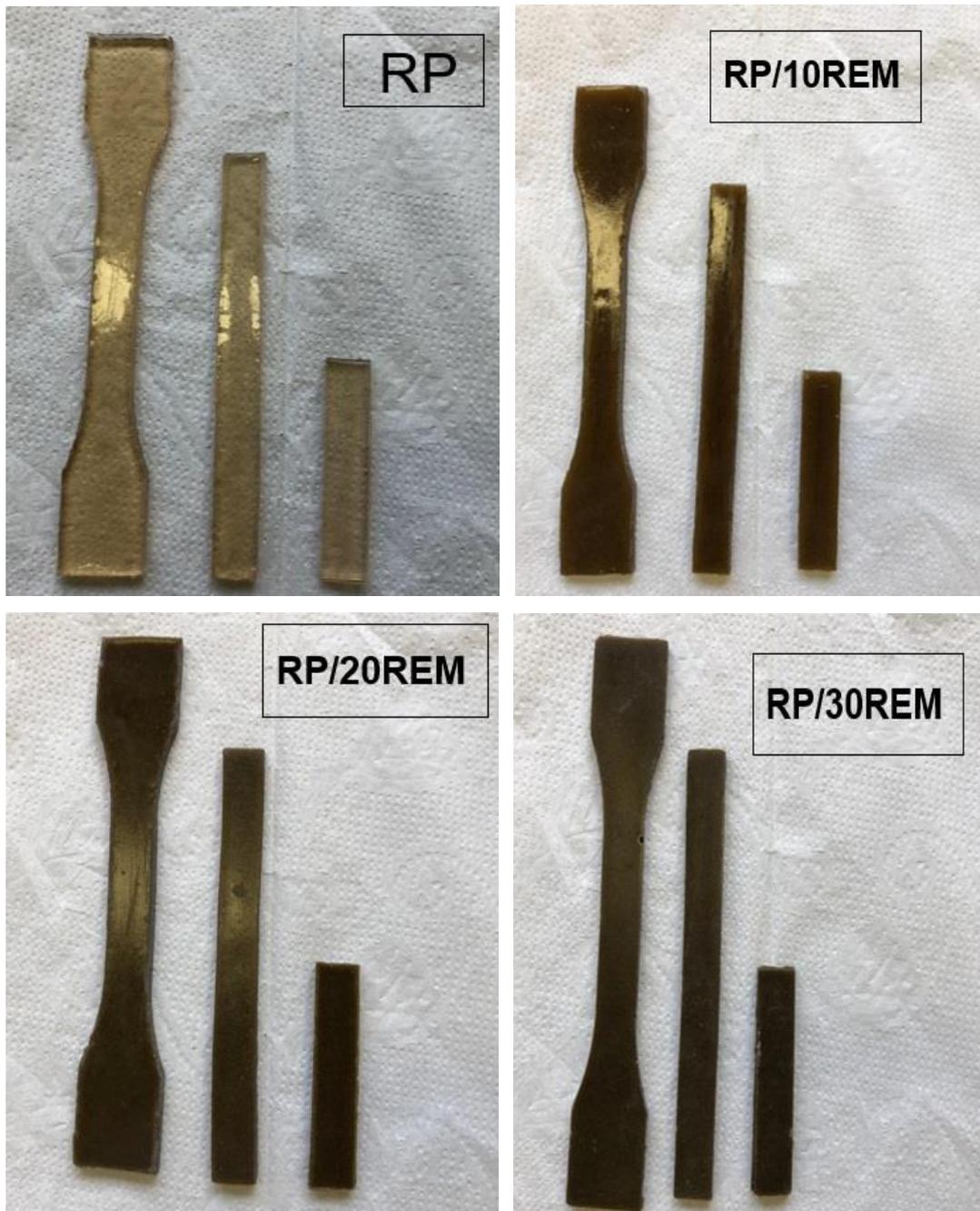


Fonte: da Autora (2020).

Ao final da conformação e cura, obteve-se os corpos de prova para os testes mecânicos e físicos e análise morfológica, conforme Figura 5.

Figura 5 - Corpos de prova para os testes mecânicos e físicos e análise morfológica.

Onde: RP = resina poliéster isoftálica; REM = resíduos de palitos de erva-mate



Fonte: da Autora (2020).

3.3. Caracterização dos compósitos, resina polimérica e resíduo de erva-mate

Para a caracterização dos compósitos realizou-se análises a fim de avaliar as propriedades físicas do material, como porosidade, densidade aparente e absorção de água. As propriedades mecânicas foram verificadas através de ensaios de resistência à flexão e à tração. A fim de obter características morfológicas do material, realizou-se a análise morfológica, com o uso de microscópio eletrônico de varredura (MEV).

3.3.1. Caracterização física dos compósitos

Com o intuito de avaliar as características físicas dos compósitos obtidos e resina pura realizaram-se análises de Massa Específica Aparente - MEA, conforme a norma D 792 da *American Society for Testing Materials* (ASTM, 2008), Absorção de Água - AA, de acordo com a norma ASTM D570 (ASTM, 1998) e Porosidade Aparente - PA, conforme a norma ASTM D 2734 (ASTM, 2009).

Os testes de Massa Específica Aparente e Porosidade Aparente requerem a mesma preparação das amostras, assim, após a obtenção dos corpos-de-prova, os mesmos foram colocados em estufa por 24 horas a uma temperatura de 105 °C. Em seguida, após retirar da estufa, foi avaliada a massa de cada amostra em uma balança de precisão, a fim de verificar a massa seca (m_s). Após, as amostras foram imersas em água destilada por 24 horas, com o intuito de determinar a massa úmida (μ). Para determinação de massa imersa (m_i) os corpos foram pesados hidrostáticamente, ou seja, a mensuração foi realizada a partir do volume de líquido deslocado quando o corpo-de-prova foi inserido, uma vez conhecida a massa específica da água.

Conhecidos os valores de massas secas, úmida e imersas, foi possível obter os resultados de Massa Específica Aparente e Porosidade Aparente, de acordo com as Equações 1 e 2.

$$MEA = \frac{m_s}{\mu - m_i} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (1)$$

$$PA = \frac{\mu - m_s}{\mu - m_i} \times 100 \quad (2)$$

Para a realização do ensaio de absorção de água, os corpos-de-prova foram secos em estufa (50 ± 3) °C por 24 horas, colocadas em um dessecador e posteriormente suas massas foram verificadas em balança analítica de precisão.

As amostras foram colocadas imersas em água destilada, sendo removidas da água em um primeiro período de 1 hora, secas com papel toalha na superfície para a retirada do excesso de água, medidas suas massas em balança analítica e novamente recolocadas na água. O procedimento de imersão e pesagem foi repetido a cada hora, durante as primeiras 12 horas. Posteriormente, foi avaliado a cada 24 horas por 5 dias, e após, a cada dois dias. O fim do ensaio foi determinado em 14 dias, quando obteve-se a curva de absorção de água (%) versus tempo de imersão (dias).

3.3.2. Microscopia de varredura eletrônica (MEV)

Para a análise morfológica dos resíduos de palito de erva-mate e dos compósitos foi realizado o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando o microscópio eletrônico da marca ZEISS, modelo EVO LS 10, com uma tensão de aceleração de 10 kV. O local utilizado para realização do teste foi na região de fratura dos corpos de prova após ensaio de flexão. As amostras foram recobertas por uma fina camada de ouro antes da análise.

3.3.3. Caracterização mecânica dos compósitos

Os ensaios de flexão e tração dos compósitos foram realizados com o auxílio de uma máquina universal de ensaios EMIC DL 2000, no Instituto Federal do Rio Grande do Sul. No ensaio de flexão foi utilizado cálculo de velocidade e distância entre pontos de apoio para cada corpo de prova, conforme a norma ASTM D790 (ASTM, 2003). Para os ensaios de tração foi utilizada velocidade de 2 mm/min, seguindo a norma ASTM D 638 (ASTM, 2000).

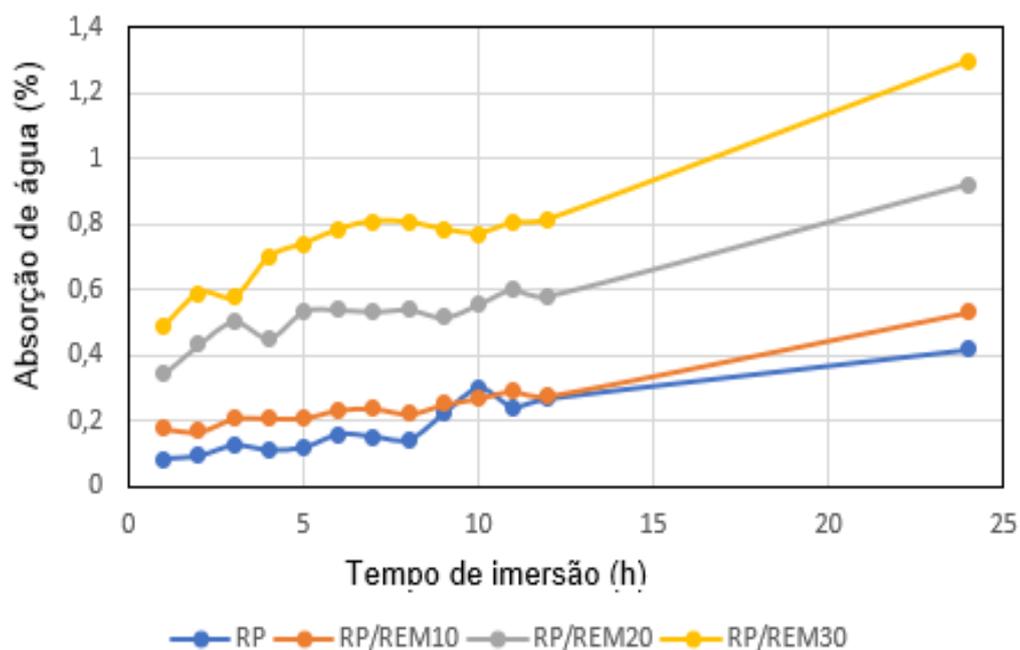
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização física dos compósitos

4.1.1. Absorção de água

Na Figura 6 é possível observar a curva de absorção de água (%) versus tempo de imersão (h) ao longo das primeiras 24 horas de ensaio. A Figura 7 expressa o resultado encontrado no período total determinado para a realização do ensaio, de 338 horas.

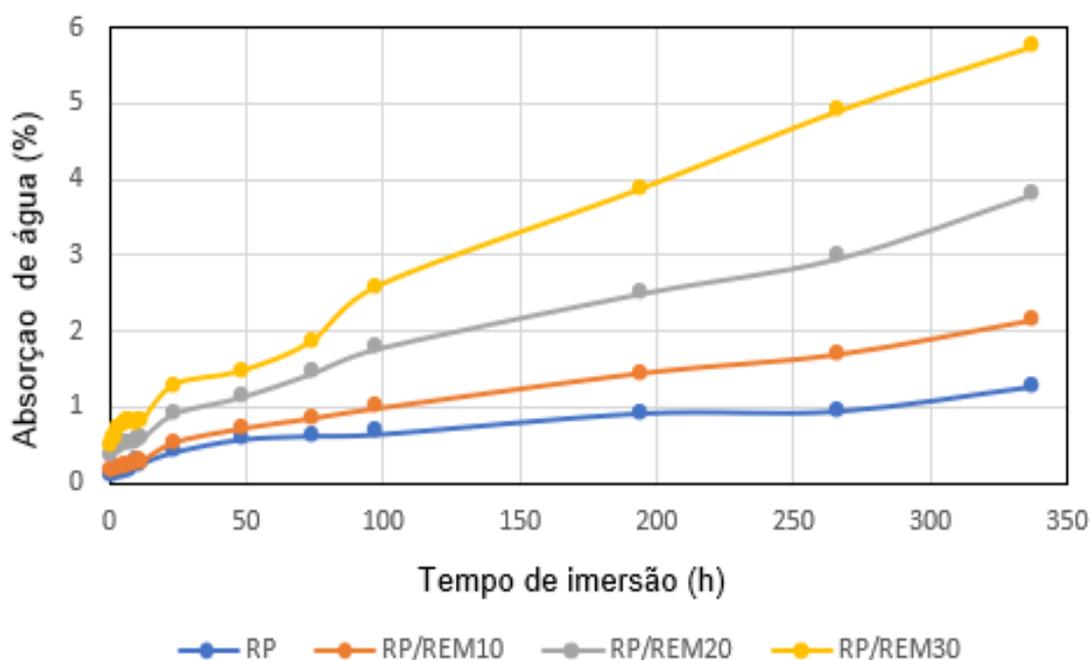
Figura 6 - Análise de absorção de água em compósitos poliméricos reforçados com resíduo de palito de erva-mate em 24 horas de ensaio.



Fonte: Da autora (2020).

A partir da Figura 7 observa-se que inicialmente a curva apresenta comportamento similar em todas as amostras, onde o fenômeno de absorção ocorre de maneira rápida, o que é conhecido como absorção de tempo curto. Isso se deve a facilidade de locomoção das moléculas de água no material (LOPES, 2017; SANJAY et al., 2018).

Figura 7 - Análise de absorção de água em compósitos poliméricos reforçados com resíduo de palito de erva-mate no período de 338 horas



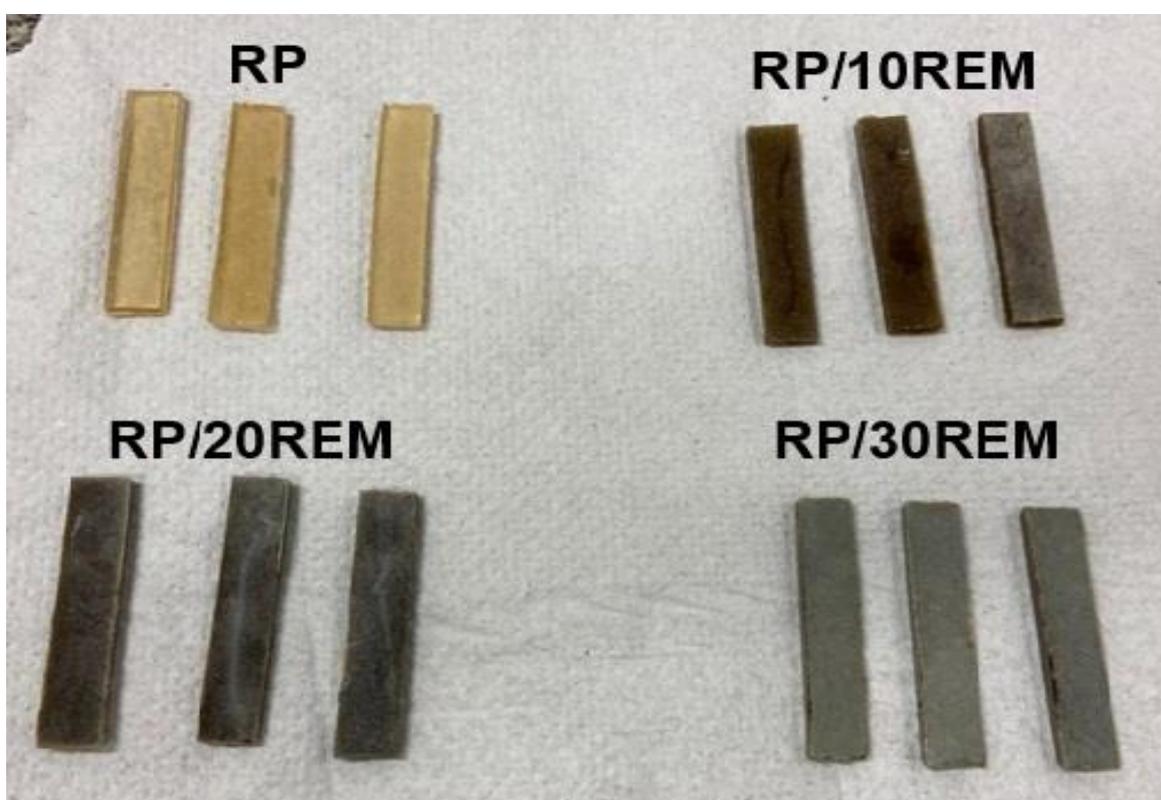
Fonte: Da autora (2020).

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que a absorção de água aumenta gradualmente com o aumento na porcentagem de incorporação de fibra, e assim, a maior porcentagem de absorção de água ocorre no compósito com maior concentração de resíduo de palito de erva-mate, ou seja, 30% em massa. O comportamento é semelhante aos resultados encontrados por Vivek *et al.* (2020) em compósitos de resina isoftálica reforçados com fibras de pala índigo, espécie vegetal encontrada na Ásia e Oceania.

Após as 24 horas iniciais, os compósitos reforçados com 30% de fibra de erva-mate apresentaram absorção de água de $1,29 \pm 0,18\%$. Ao realizar o mesmo ensaio,

sob as mesmas condições, em compósitos reforçados com 30% de fibra de eucalipto, Pereira (2016) obteve o índice de absorção de água de $1,72 \pm 0,2\%$, o que corrobora com os resultados obtidos. Na Figura 8 é possível observar a apresentação dos corpos de prova ao final do período de ensaio, 338 horas. A superfície esbranquiçada evidencia claramente uma maior absorção de água.

Figura 8 - Corpos de prova após final do ensaio de absorção de água. Onde: RP = resina poliéster isoftálica; REM = resíduos de palitos de erva-mate



Fonte: Da autora (2020).

A tendência de materiais lignocelulósicos absorverem umidade está relacionada a sua formação básica ser constituída por celulose, lignina e hemicelulose. O mecanismo de absorção de água acentua-se devido à formação de ligações de hidrogênio entre a água e os grupos hidroxilas da celulose, lignina e hemicelulose. Convém ressaltar que a estrutura da celulose é composta por fortes ligações de hidrogênio, propriedade que a torna altamente hidrofílica. Dessa forma, a absorção de água em compósitos reforçados com fibras naturais expressa a natureza polar e alto teor hidrofílico presente em fibras naturais (ONUAGULUCHI,

2016; HUSSEINSYAH; MOSTAPHA, 2011).

Outro fator importante relaciona-se ao fato de que em compósitos, a absorção de água está relacionada diretamente a quantidade de espaços vazios presentes em seu interior. No processo de fabricação manual, a agitação da mistura matriz/reforço resulta na presença de bolhas de ar ao longo da estrutura, que no momento da cura, são desprezadas e resultam em vazios e defeitos nos corpos de prova. Além disso, pode-se justificar a presença de imperfeições na estrutura devido à fraca adesão entre matriz e reforço (JAWAID *et al.*, 2011).

Visto isso, torna-se importante especificar que em materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais, a absorção de água contempla e influencia diretamente as propriedades mecânicas dos materiais produzidos. Nessa perspectiva, um melhor desempenho dos materiais pode ser vislumbrado quando os mesmos apresentarem absorção de água reduzida (TAJVIDII; TAKEMURA, 2011).

4.1.2. Massa específica aparente e porosidade aparente

A Tabela 2 apresenta os dados obtidos nos ensaios físicos de massa específica aparente (MEA) e porosidade aparente (PA) para a matriz polimérica pura e compósitos com diferentes porcentagens mássicas de incorporação de resíduos de palito de erva-mate.

Tabela 2 - Resultados de massa específica aparente e porosidade aparente

Amostra	MEA (g/cm ³)	PA (%)
RP	1,03 ± (0,009)	0,43 ± (0,006)
RP/REM 10	1,10 ± (0,011)	0,48 ± (0,021)
RP/REM20	1,12 ± (0,008)	0,52 ± (0,229)
RP/REM30	1,17 ± (0,007)	0,53 ± (0,178)

Fonte: da Autora (2020).

Os resultados apresentadas na Tabela 2 fornecem importantes informações acerca da natureza física do material, visto que um dos principais motivos pelos quais materiais compósitos se destacam frente a materiais convencionais da engenharia é a menor massa específica.

Através da Tabela 2 observa-se que a propriedade de massa específica aparente sofreu aumento em consequência ao acréscimo de fibras de erva-mate. O valor máximo atingido encontra-se com a adição de 30% de fibra, ou seja, $1,17 \text{ g/cm}^3$ ($\pm 0,007$), onde o mesmo obteve um aumento de 20,51% em relação à matriz pura. O aumento efetivo na massa específica aparente explica-se pelo aumento da massa específica das fibras no compósito (BORGES, 2018).

De maneira semelhante, Santos (2018), em seu estudo de avaliação mecânica de compósitos poliméricos com fibras de juta, encontrou resultados que demonstram que a massa específica aparente sofre aumento efetivo com a inserção das fibras, não sofrendo alteração com a diferença no comprimento das fibras.

Também pode-se observar um aumento da porosidade aparente para cada um dos compósitos obtidos com a incorporação do resíduo de palito de erva-mate, quando comparados com a matriz poliéster pura. Este comportamento está relacionado ao aumento de quantidade de resíduo de palito de erva-mate favorecer o acréscimo de espaços vazios no material. Dessa forma, os espaços vazios e defeitos encontrados no material influenciam diretamente as propriedades dos materiais (ONUAGULUCHI, 2016; RIBEIRO, 2011).

Em materiais compósitos, a porosidade aparente compreende a relação entre o volume de poros abertos e o volume do corpo de prova. A existência de vazios ou poros ao longo da extensão dos corpos-de-prova é um efeito indesejável, porém de difícil controle, uma vez que com o aumento da porcentagem de fibras, maior será a viscosidade da mistura pré-moldagem. A alta porosidade aparente pode levar ao desenvolvimento de concentradores de tensões, o que decorre na diminuição das propriedades mecânicas o que pode ocasionar a restrição das possibilidades de aplicação dos materiais compósitos (BORGES, 2018; LOPES, 2011), bem como diminuição da estabilidade térmica e dimensional (LOPES, 2017).

O maior percentual de porosidade aparente atingido encontra-se no corpo de prova com 30% de fração mássica de erva-mate, alcançado o valor máximo de 0,53% ($\pm 0,178$). O valor demonstra-se inferior ao encontrado por Santos (2018) de 1,18% ($\pm 0,12$), na determinação da porosidade aparente em compósitos poliméricos reforçados com 5% de fibras de juta de 45 mm, a maior fração mássica utilizada no referido estudo.

Estudos relacionando a porosidade aparente em compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais são escassos, demonstrando carência na literatura. Entretanto, convém relacionar os resultados encontrados no presente trabalho com os resultados também encontrados por Santos (2018) para compósitos poliméricos com fibras de vidro, onde o mesmo obteve o percentual de 0,52 ($\pm 0,16$), com 5% de reforço com 45 mm. Tal comparação é válida por relacionar um reforço convencional utilizado em compósitos, a fibra de vidro, e o reforço alternativo de resíduo de palitos de erva-mate, e ambos apresentarem resultados quase idênticos.

4.2. Caracterização mecânica dos compósitos

Os resultados dos ensaios de tração (valores médios e desvios-padrão) para as amostras de resina pura e compósitos poliéster/resíduo de erva-mate, obtidos através dos ensaios de tração estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados de ensaios mecânicos por tração

Amostras	Tensão Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Deformação Específica na Ruptura (MPa)
RP	40,55 \pm 1,04	2125,00 \pm 160,07	3,00 \pm 0,816
RP/10REM	34,80 \pm 0,82	2795,50 \pm 171,30	2,00 \pm 0,00
RP/20REM	24,50 \pm 0,82	2938,50 \pm 314,06	1,00 \pm 0,50
RP/30REM	18,15 \pm 1,25	3929,00 \pm 3092,18	1,00 \pm 0,00

Fonte: da Autora (2020).

Observa-se na Tabela 3, que o aumento na incorporação de resíduo de palito de erva-mate na matriz reduz, respectivamente, a resistência à tração do compósito.

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 (PANAITESCU *et al.*, 2015).

Outro fator importante é a interação fibra natural/matriz polimérica, pois de acordo com Sari *et al.* (2020), a diminuição da resistência à tração em compósitos com incorporação de fibras naturais está relacionada a fraca interface entre o poliéster e as fibras. Nessa mesma perspectiva, Tajvidii e Takemura (2011) realçam que a fragilidade dos compósitos está relacionada diretamente a aglomeração das fibras, indica a baixa adesão interfacial entre o reforço e matriz.

Dessa forma, a resistência máxima à tração obtida encontra-se na compósito composto majoritariamente por resina poliéster isoftálica, alcançando $40,55 \pm 1,04$ MPa. Este comportamento é justificado por Costa (2016), que expõe a regressão das propriedades mecânicas dos compósitos de acordo com o aumento da fração mássica na matriz polimérica, em virtude do surgimento de vazios e poros, o que dificulta a interação entre a fase reforço e matriz. Estes resultados corroboram com as análises de porosidade aparente, apresentadas na Tabela 2.

Em relação ao módulo de elasticidade, 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, 2016).

Com base nos resultados obtidos, observa-se um aumento em comparação à matriz pura, o que evidencia um material mais rígido, e por vez alterando significativamente a deformação específica na ruptura por tração. Observa-se o maior módulo de elasticidade por tração no compósito composto por 30% em massa de resíduo de erva-mate.

A Tabela 4 apresenta os dados dos comportamentos mecânicos obtidos através dos ensaios de flexão dos compósitos de acordo com sua fração mássica.

Tabela 4 - Resultados de ensaios mecânicos de Flexão

Amostras	Tensão Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Deformação Específica na Ruptura (MPa)
RP	72,55 ± 2,50	2065,56 ± 145,76	8,58 ± 0,92
RP/10 REM	61,15 ± 4,48	2985,44 ± 333,77	4,52 ± 0,14
RP/20 REM	42,00 ± 2,46	2449,29 ± 343,12	3,58 ± 0,59
RP/30REM	33,86 ± 3,21	1817,40 ± 385,41	3,48 ± 0,78

Fonte: da Autora (2020).

Os resultados obtidos nos ensaios indicam que a resistência à flexão dos compósitos reforçados com resíduos de palito de erva-mate apresenta desempenho inferior quando comparado à matriz pura. A amostra com teor de fibra de 30% apresentou o menor resultado para o ensaio de resistência à flexão, com 33,86 MPa ($\pm 3,21$), o que evidencia que a incorporação de resíduos de palitos de erva-mate reduziu a resistência à flexão da resina e o módulo de elasticidade do material.

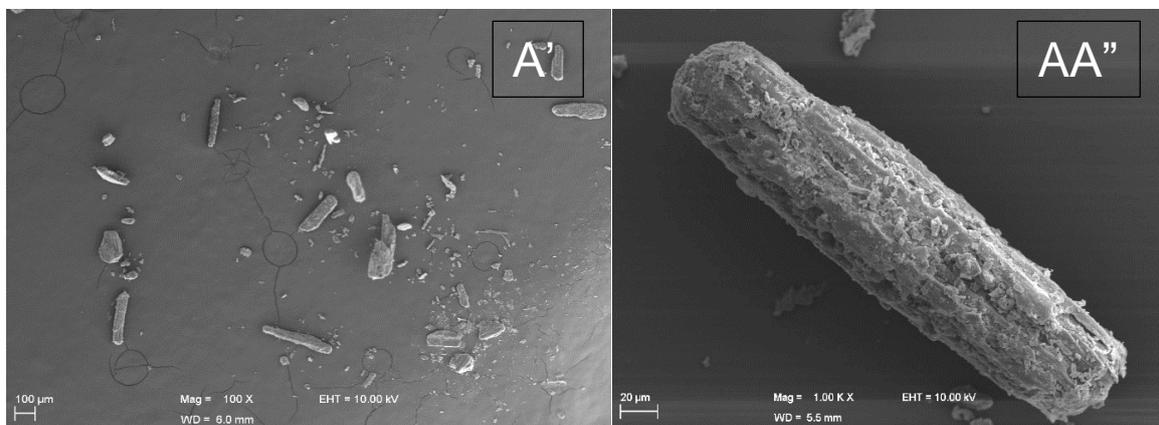
Em relação ao módulo de elasticidade, o mesmo confirmou inferioridade quando comparado à matriz pura. O comportamento do módulo de elasticidade é decorrente à dificuldade encontrada ao processar o corpo de prova e garantir uma estrutura composta sem bolhas de ar, imperfeições, vazios e pontos falhos (SARI *et al.*, 2020).

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, 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 (BORGES, 2018).

4.3. Microscopia de Varredura Eletrônica

Na Figura 9 é possível observar as micrografias das amostras de fibra de resíduo de palito de erva-mate.

Figura 9 - Análise morfológica das amostras de resíduos de palito de erva-mate, onde: (A') representa a ampliação de 100 vezes e (AA'') representa a ampliação de 1000 vezes.



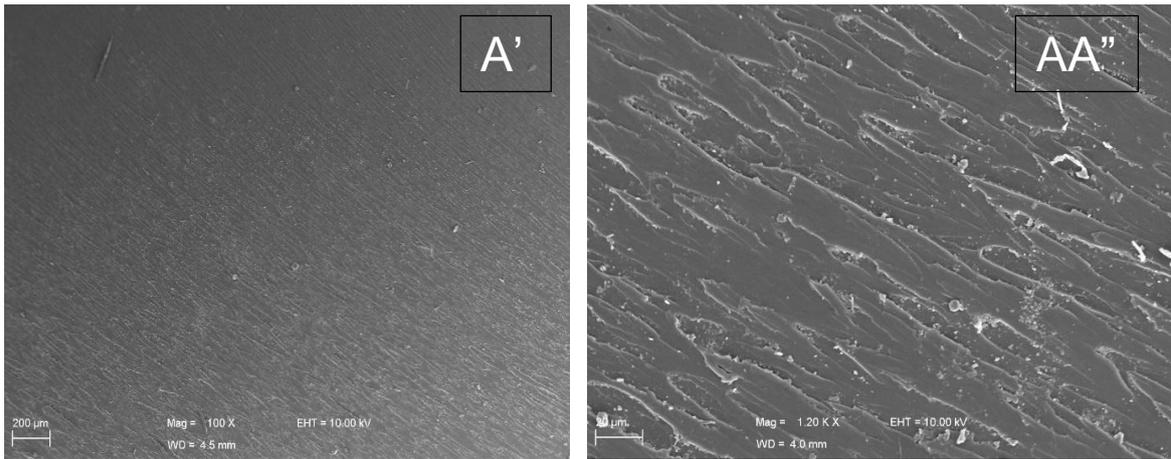
Fonte: da Autora (2020).

Na Figura 9(A') observa-se formatos irregulares, com diferentes tamanhos (diâmetro e comprimento). Na Figura 9 (AA'') observa-se uma superfície rugosa, com presença de estruturas incrustadas na mesma, formando uma camada envoltória de impurezas, composta principalmente por ceras e extrativos, sendo uma consequência proveniente do beneficiamento e da composição da erva-mate. Constata-se através da análise morfológica que no processo de moagem em moinho de facas, não ocorreu fibrilação da fibra, pois a estrutura manteve-se compacta.

De acordo com D'Ardie (1986), a rugosidade superficial, natural das fibras, favorece a adesão a matrizes poliméricas. Contudo, deve avaliar a compatibilidade entre a fibra e a matriz, pois a rugosidade atua como ponto de interação (ancoragem) devido as irregularidades, porém para que a adesão seja eficiente é necessário a compatibilidade entre a fibra natural e a matriz polimérica.

Através da micrografia da resina pura presente na Figura 10, é possível contemplar e vislumbrar a morfologia característica da resina poliéster, ou seja, sem vazios e sem presença de bolhas de ar. Convém ressaltar que falhas e irregularidades presentes na superfície da estrutura do corpo de prova são decorrentes do rompimento das amostras na análise de tração.

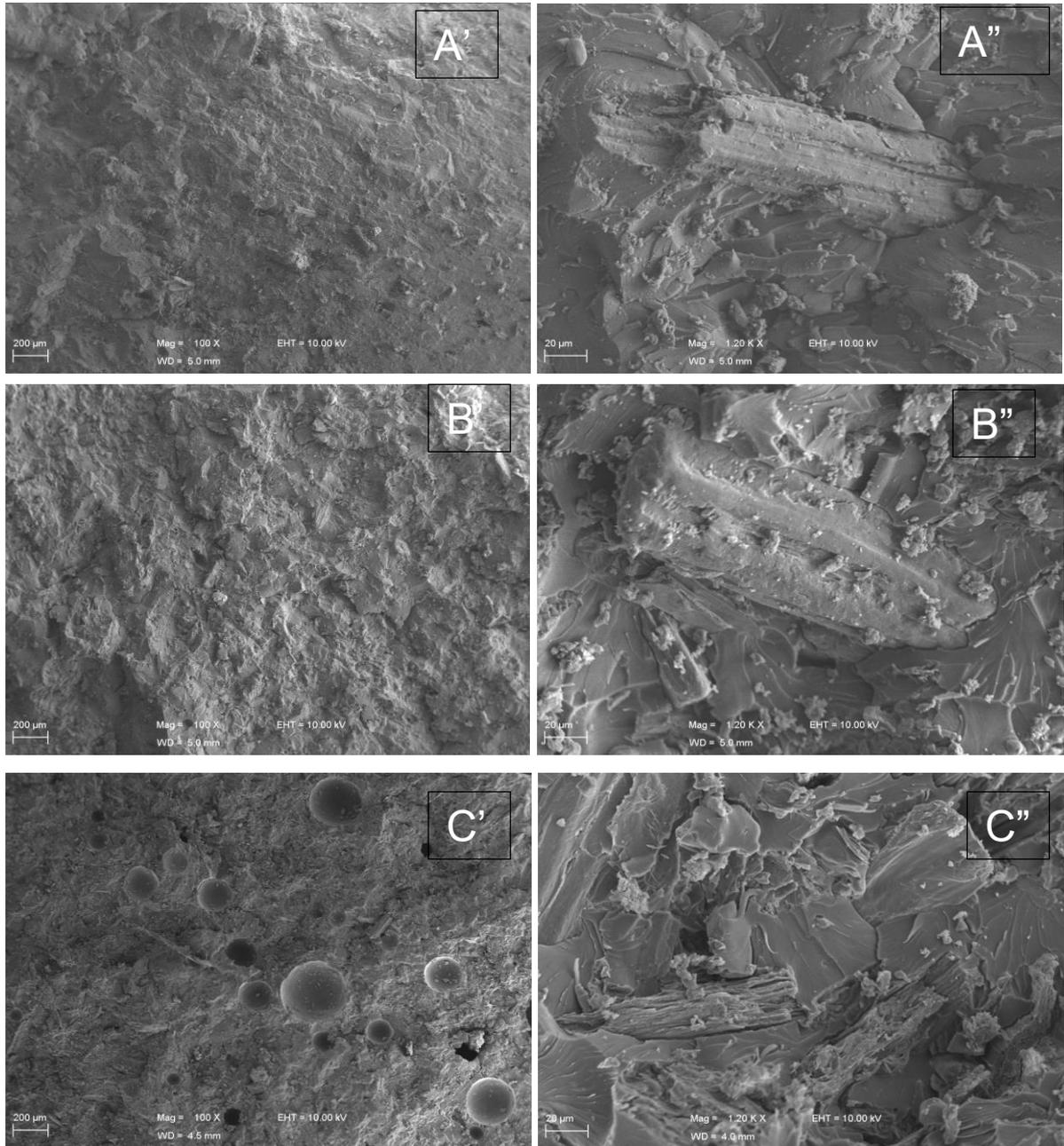
Figura 10 - Análise morfológica das amostras de resina pura. Onde (A') representa a ampliação de 100 vezes e (AA'') representa a ampliação de 1200 vezes



Fonte: da Autora (2020).

Afim de verificar a adesão entre a fibra de resíduo de erva-mate e a matriz poliéster, a Figura 11 apresenta a superfície de fratura dos compósitos após teste de tração, nas amostras compostas por 10, 20 e 30% em massa de resíduo de palito de erva-mate.

Figura 11 - Análise morfológica das amostras: (A): RP/10REM; (B): RP/20REM; E (C): RP/30REM. Onde 'representa a ampliação de 100 vezes e "representa a ampliação de 1200 vezes



Fonte: da Autora (2020).

De acordo com a Figura 11, observa-se um maior agrupamento de fibras de resíduo de palito de erva-mate, em consequência do aumento da fração mássica de fibra, resultando em redução de interações entre fibra/matriz. Na imagem A' observa-se a presença de áreas vazias, assim como a presença de bolhas de ar. Seguindo

nessa mesma imagem, observa-se a presença de alguns defeitos tais como arrancamento da fibra e fraca adesão fibra/matriz.

A imagem A" demonstra com maior clareza a fragilidade do compósito. Essa característica morfológica ocorre quando as fibras são puxadas para fora da matriz, além de rupturas de fibras que permaneceram na matriz polimérica (JAWAID *et al.*, 2011; SANJAY *et al.*, 2018).

De acordo com Santos (2007), os orifícios vazios presentes na estrutura do compósito em decorrência às fibras arrancadas da matriz, indicam fraca adesão entre fibra e matriz. A transferência de esforços da matriz para a fibra, origina o deslocamento na interface fibra-matriz, resultando em falha no compósito. Entretanto, é possível observar locais com boa interação fibra/matriz, onde ao sofrer esforço, a fibra rompeu-se.

O comportamento mencionado anteriormente, repete-se na imagem B, indicando comportamento característico. Todavia, o compósito apresentado na imagem C destaca-se negativamente frente aos demais, depreciação esta referente as expressivas bolhas de ar formadas. Tal formação explica-se pelo aumento da fração mássica, maior volume dentre as estudadas, e conseqüente dificuldade na moldagem manual.

Por fim a análise morfológica demonstrada na Figura 11 corrobora com os resultados encontrados nos ensaios físicos e mecânicos já discutidos anteriormente, complementando-se e apresentando comportamento esperado.

5. CONCLUSÃO

Através da realização do presente trabalho, objetivou-se um novo destino ao resíduo de palitos de erva-mate, através da obtenção de um material compósito, para ser utilizado em novas aplicações, contribuindo com o reaproveitamento do resíduo e diminuição de porcentagem de resina, e por sua vez, resultando na redução de custos.

Em relação a caracterização física dos compósitos, os resultados obtidos demonstram que a absorção de água aumenta gradualmente com o aumento na porcentagem de incorporação de fibra, e assim, a maior porcentagem de absorção de água ocorre no compósito com maior concentração de resíduo de palito de erva-mate, ou seja, 30% em massa.

Os resultados encontrados nos ensaios de porosidade aparente e massa específica aparente atenuam o resultado obtido na absorção de água, uma vez que é notório que a propriedade de massa específica aparente sofreu aumento em consequência ao acréscimo de fibras de erva-mate.

Em relação aos resultados dos ensaios mecânicos, conclui-se que o aumento na incorporação de resíduo de palito de erva-mate na matriz polimérica, reduz as propriedades de tração e flexão.

Através da análise morfológica, os resultados obtidos corroboram com os já mencionados anteriormente, ao encontrarmos estrutura com presença de irregularidades, vazios e bolhas de ar, o que complementa e justifica o comportamento apresentando.

Com o presente trabalho buscou-se ampliar a compreensão sobre o tema. O fomento para a realização do trabalho concentrou-se na geração do resíduo da indústria de beneficiamento da erva-mate, em suma pelo volume proveniente, e por se tratar de um resíduo que apresenta em sua estrutura porcentagens consideráveis

de celulose, uma importante matéria-prima para diversas indústrias, que apresenta propriedades interessantes para a obtenção de materiais compósitos. Os resultados encontrados não foram satisfatórios, contudo, possibilitam novas pesquisas na área.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Testar diferentes tratamentos no resíduo de palito de erva-mate, e avaliar a influência positiva ou negativa do tratamento, através da realização de ensaios físicos, mecânicos e morfológicos.
- Testar novas porcentagens na incorporação do resíduo de palito de erva-mate.

REFERÊNCIAS

ALVES JR., C. A. **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos de matriz poliéster com gravetos ou Fibras de taquara (*Merostachys sp.*)**.

Dissertação- Mestrado em Engenharia de Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Santa Catarina, 2012.

ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 227, de 22 de setembro de 2005. Regulamento Técnico para café, cevada chá, erva-mate e produtos solúveis. **Diário Oficial da União**, 2005.

ARRIETA, M. P. *et al.* Recovery of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) residue for the development of PLA-based bionanocomposite films. **Industrial Crops & Products**, Madri, v. 111, p. 317-328, 2017.

Associação Latino-Americano de materiais compósitos (ALMACO). **Por que a Ashland aposta no mercado brasileiro de compósitos**. 2018. Disponível em: <<http://almaco.org.br/2018/03/>>. Acesso em 24 de março de 2020.

ATLAS SOCIOECONÔMICO DO RIO GRANDE DO SUL. **Erva-mate**. Porto Alegre, 4. ed., 2019. Disponível em: <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/erva-mate>>. Acesso em 28 de março de 2020.

BARBOSA, K. S. L. *et al.* Efeito da adição do resíduo de mármore e granito com fibras de sisal nas propriedades de compósitos poliméricos. **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, v.6, n. 2, p. 7653-7667, 2020.

BITENCOURT, J.; ZUFFELLATO-RAIBS, K.C.; WENDLING, I.; KOEHLER, H.S. Enraizamento de estacas de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hill) provenientes de brotações rejuvenescidas. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v.11, p.277-281, 2009.

BONFATTI JÚNIOR, E. A. *et al.* Mapeamento do processo produtivo de erva-mate. **Revista Internacional de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 08, n. 01, p. 82 - 98, 2018.

BORGES, A. P. S. N. *et al.* Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais. **Rede Latino-Americana de Materiais**, Rio de Janeiro, v.24, n.2, Rio de Janeiro, 2019.

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

CALLISTER JR, W.; RETHWISCH, D. **Ciência e Tecnologia de Materiais: Uma Introdução**. 9ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CATTO, A. L. *et al.* Characterization of polypropylene composites using yerba mate fibers as reinforcing filler. **Composites Part B**, v.174, Lajeado, 2019.

CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2.ed. São Paulo: Artliber, 2002.

COSTA, D. S. *et al.* Laminados de matriz polimérica e fibras de bambu contínuas e alinhadas. In: **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014 [= Blucher Chemical Engineering Proceedings, v.1, n.2]**. São Paulo: Blucher, 2015.

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

COSTA, D. S. *et al.* Resíduo industrial (cinzas) com fibra de sisal em compósitos poliméricos. **Brazilian Applied Science Review**, v.2, n.7, Curitiba, 2020.

D'ardie D. **Los plasticos reforzados com fibras de vidro**. 2.ed. Buenos Aires: Americalee, 1986.

DAHLEM JÚNIOR, M. A. *et al.* Evaluation of different methods for extraction of nanocellulose from yerba mate residues. **Carbohydrate Polymers**, Lajeado, v. 218, p. 78-86, 2019.

DHAKAL, H. N. *et al.* Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fiber reinforced unsaturated polyester composites. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 67, n. 7-8, 2007.

DIAS, R. S. M. *et al.* Metodologia de ensino didático no laboratório para fabricação de placas de poliéster reforçados por fibras naturais de juta de 5mm. **Brazilian Applied Science Review**, v. 3, n. 1, p. 212-226, 2019.

DUARTE, M. R.; GOLAMBIUK, G. Ilustração de caracteres microscópicos de drogas vegetais para o controle de qualidade farmacognóstico.III. Erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. ST.-HIL., aquifoliaceae). **Visão Acadêmica**, Curitiba, v.9, n.1, 2008.

DUTRA, G. B. *et al.* Avaliação da utilização da pós cura nas propriedades térmicas e mecânicas de um sistema epóxi de cura à temperatura ambiente. **Rede Latino-Americana de Materiais**, Rio de Janeiro, v.24 n.3, 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **A erva-mate**, dez. 2019. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/erva-mate>>. Acesso em 23 de março de 2020.

ESMELINDRO, M. C. *et al.* Caracterização físico-química da erva mate: influência das etapas do processamento industrial. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.22, n.2, Campinas- São Paulo, 2002.

EVERT, R. F. **Anatomia das plantas Esau**. São Paulo: Blucher, 2013. E-book. Disponível em <<https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/164492/pdf/4>>. Acesso em 12 de março de 2020.

FRANCKLIN, H. M. *et al.* Estudo da viabilidade da utilização de compósitos epóxi e fibras de sisal como reforço de estruturas de concreto armado. **IBRACON Estrut. Mater.**, São Paulo, v.12 n.2, 2019.

FRANCO, F. J. P. **Aproveitamento da fibra de epicarpo do coco de babaçu em compósito com matriz de epóxi: estudo do efeito do tratamento da fibra**. 2010. Dissertação- Curso de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal- Rio Grande do Norte, 2010.

GONÇALVES, M. *et al.*, Production of charcoal from maté waste to remove organic contaminants from aqueous solution. **Ciênc. agrotec**, b.31, n.5, pp.1386-1391, 2006.

GRITSCH, C. S.; MURPHY, R. J. Ultrastructure of Fibre and Parenchyma Cell Walls During Early Stages of Culm Development in *Dendrocalamus asper*. **Ann Bot**, Oxônia, Inglaterra, vl.95, n.4, 2005.

GRUNWALD, C *et al.* On the Cytochemistry of Cell Wall Formation in Poplar Trees. **Plant biol**, Nova York, v.4, 2001.

GURUNATHAN, T. *et al.* A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 77, 2015.

HANSEN, B. *et al.* Thermal and thermo-mechanical properties of polypropylene composites using yerba mate residues as reinforcing filler. **Industrial Crops & Products**, v.140, Lajeado, 2019.

HUSSEINSYAH, S., e MOSTAPHA, M. The effect of filler content on properties of coconut shell filled polyester composites. **Malaysian Polymer Journal**, 6(1), 2011.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura, 2018**. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/289>>. Acessado em 23 de março de 2020.

JAWAID M. *et al.* Chemical resistance, void content and tensile properties of oil palm/jute fibre reinforced polymer hybrid composites. **Materials & Design**, Malasia, 2011.

JÚNIOR, C. K. *et al.* **A cultura da Erva-mate (*Ilex paraguariensis*) em sistema de cultivo convencional e orgânico como alternativa de renda ao pequeno proprietário rural.** In: XXIV Congresso Brasileiro de Custos – Florianópolis - Santa Catarina, 2017

KERSTING, D. F. **Cura de Compósitos de Sistemas Epóxi via Irradiação de Micro-ondas.** 2014. Dissertação- Mestrado em Ciência de Materiais – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

KIM, I. *et al.* Identification of a developmental transition in plasmodesmatal function during embryogenesis in *Arabidopsis thaliana*. **Development**, Califórnia, v.129 n.5, 2002.

KIM, J. T.; NETRAVALI, Anil N. Mercerization of sisal fibers: Effect of tension on mechanical properties of sisal fiber and fiber-reinforced composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Nova Iorque, v.41, n.9, 2010.

LEÃO, R. M. **Tratamento superficial de fibra de coco e aplicação em materiais compósitos como reforço do polipropileno.** 2012. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

LOOS, M. R. **Nanociência e Nanotecnologia: Compósitos Termofixos Reforçados com Nanotubos de Carbono.** Rio de Janeiro: Interciência, 2014. E-book. Disponível em: <<https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/37687/pdf/0>>. Acessado em 14 de março de 2020.

LOPES, B. L. S. **Polímeros reforçados por fibras vegetais.** São Paulo: Blucher, 2017. E-book. Disponível em: <<https://plataforma.bvirtual.com.br/Acervo/Publicacao/163482>>. Acessado em 14 de março de 2020.

LOPES, C. E. P. *et al.* Colmos de caule de bambu e da cana-de-açúcar para a fabricação de compósitos poliméricos. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 5, n. 6, 2019

LOPES, F. P. D. **Estudos adicionais dos compósitos poliméricos reforçados por fibras de curauá.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, p. 92, 2011.

MARINUCCI, G. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia.** São Paulo: Artliber Editora, 2011.

MASUELLI, M. A. **Fiber reinforced polymers – The technology applied for concrete repair.** Rijeka- Croacia: Intech, 2013.

MATTOS B.D. *et al.* Properties of polypropylene composites filled with a mixture of household waste of mate-tea and wood particles. **Construction and Building Materials**, v. 61, 2014.

MEURER, M. C.; SILVA, F. V. Uso de erva-mate como biossorvente de contaminantes no tratamento de água. **Revista Tecnologia e Tendências**, Novo Hamburgo, Rio Grande do Sul, v. 10, n. 1, 2019.

MOSELE, S. H. **A governança na cadeia agroindustrial da erva-mate na região do Alto Uruguai Rio Grandense**. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

MOREIRA, W. **Compósitos I: materiais, processos, aplicações, desempenhos e tendências**. São Paulo: ABMACO, 2008.

MOURA, C. Aplicações e tratamentos da fibra de bambu e similares: uma revisão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Santa Catarina, v.5, n.5, 2019.

NETO, J. R. A. *et al.* Influência da adição de uma carga nanoparticulada no desempenho de compósitos poliuretano/fibra de juta. **Polímeros**, São Paulo, v.17, n.1, jan.mar.2007.

NETO, L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Blucher, 2006. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/176576/pdf/2>. Acessado em 15 de março de 2020.

OLIVEIRA, S. V.; WAQUIL, P. D. Dinâmica de produção e comercialização da erva-mate no Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria- Rio Grande do Sul, v.45, n.4, 2014.

ONUAGULUCHI, N. B. O. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. **Cement and Concrete Composites**, Canada, 2016.

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.

PANTOJA, J. R. C. *et al.* Laboratório de materiais compósitos: apresentação de um método artesanal na fabricação de compósitos com fibras naturais como recurso didático em aulas práticas. **Brazilian Applied Science Review**, Curitiba, v.3, n.1, jan.fev 2019.

PAVANATI, H. C. **Ciência e tecnologia dos materiais**. São Paulo: Pearson, 2015. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/22183/pdf/3>. Acessado em 15 de março de 2020.

PEREIRA, T. G. T. **Compósitos produzidos com resina poliéster e fibras de eucalipto tratadas termicamente**. Dissertação- Programa de PósGraduação em EngenA cultura da Erva-mate (*Ilex paraguariensis*) em sistema de cultivo convencional e orgânico como alternativa de renda ao pequeno proprietário rural.haria de Biomateriais, Universidade Federal de Lavras- Minas Gerais, 2016.

QUAN, Z. *et al.* Additive manufacturing of multi-directional preforms for composites: opportunities and challenges. **Materials Today**, Kidlington, v. 18, p. 503-512, 2015.

QUINTANA, A. *et al.* Comparative Life Cycle Assessment of gypsum plasterboard and a new kind of bio-based epoxy composite containing different natural fibers. **Journal of Cleaner Production**, v. 185, 2018.

SANJAY *et al.* Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**. v. 172, n. 20, 2018.

SANTOS, W. S. T. **Avaliação mecânica de tração e flexão dos compósitos com fibras curtas de juta e vidro**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

SARI, M. G. *et al.* Fabricating an epoxy composite coating with enhanced corrosion resistance through impregnation of functionalized graphene oxide-co-montmorillonite Nanoplatelet. **Corrosion Science**, v. 129, 2017.

SARI, N.H. *et al.* Corn husk fiber–polyester composites as sound absorber: nonacoustical and acoustical properties, **Adv. Acoustics and Vibration**, 2017.

SATTLER, S.; FUNNELL-HARIS, D. Modifying lignin to improve bioenergy feedstocks: strengthening the barrier against pathogens?. **Frontiers in Plant Science**, Nebraska- USA, v. 4, 2013.

SCIACOVELLI, A. *et al.* High Density polyethylene (HDPE) – Graphite composite manufactured by extrusion: A novel way to fabricate phase change materials for thermal energy storage. **Particuology**, v. 40, 2018.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2008. E-book. Disponível em: <<https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/424/pdf/0>>. Acessado em 15 de março de 2020.

SHING I. *et al.* Study of Effect of Surface Treatment on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Composites. **Materials today: Proceedings**. Amsterdã, v.4, n. 2, 2017.

SILVA, R. *et al.* Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, São Paulo, v.32, n.4, 2009.

SILVA, V. B. *et al.* Propriedades e Características Estruturais de Compósitos Poliméricos de Resina Poliuretana de Óleo de Mamona (*Ricinus Communis* L.) Reforçados com Fibras do Bagaço de Cana-de-Açúcar. **Perspectivas Online: Exatas & Engenharias**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 26, 2019.

TAJVIDLI, M., e 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.

TEIXEIRA, A. S. *et al.* Yerba Mate (*Ilex paraguariensis*) Waste and Alginate as a Matrix for the Encapsulation of N Fertilizer. **ACS Sustainable Chem. Eng.** Porto Alegre, v.4, n.4, p. 2449-2458, 2016.

TONET, A. *et al.* Biological activity and quantification of bioactive compounds in yerba mate extract and its application in fish hamburger. **Braz. J. Food Technol**, Campinas, v.22, ago.2019.

VASILIEV, V. V., MOROZOV, E. V. **Mechanical and analysis of composites materials**. Elsevier Science, 2001.

VELOSO, Y. M. S. *et al.* Reutilização da fibra da casca do coco verde para a produção de matéria prima industrial. **Cadernos de Graduação: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Aracaju, vol. 1, n. 17, 2013.

VIVEK, V. V. *et al.* Prediction of mechanical characteristics of Wrightia tinctoria fiber reinforced iso-polyester resin composites. **Materials Today: Proceedings**, India, 2020.