



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-
BRASILEIRA**

INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

BACHARELADO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS

MARIA MARLIETE FERNANDES DE MELO NETA

**ENSAIO DE TRAÇÃO DO COMPÓSITO POLIMÉRICO DE RESINA POLIÉSTER E
PALHA DE CARNAÚBA**

REDENÇÃO-CE

2022

MARIA MARLIETE FERNANDES DE MELO NETA

**ENSAIO DE TRAÇÃO DO COMPÓSITO POLIMÉRICO DE RESINA POLIÉSTER E
PALHA DE CARNAÚBA**

Monografia apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias, na Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, UNILAB – Campus das Auroras.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Cáceres Coaquira.

REDENÇÃO-CE

2022

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Melo Neta, Maria Marliete Fernandes de.

M485e

Ensaio de tração do compósito polimérico de resina poliéster e palha de carnaúba / Maria Marliete Fernandes de Melo Neta. - Redenção, 2022.

57f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Cáceres Coaquira.

1. Carnaúba (Palha). 2. Compósitos poliméricos. 3. Desenvolvimento Sustentável. I. Título

CE/UF/BSP

CDD 633.5

MARIA MARLIETE FERNANDES DE MELO NETA

**ENSAIO DE TRAÇÃO DO COMPÓSITO POLIMÉRICO DE RESINA POLIÉSTER E
PALHA DE CARNAÚBA**

Monografia apresentada como requisito para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
de Energias, na Universidade da Integração
Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira,
UNILAB – Campus das Auroras.

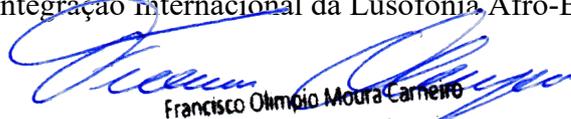
Aprovado em: 07/02/2022

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Carlos Alberto Cáceres Coaquira (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB



Francisco Olímpio Moura Carneiro

Professor do Magistério Superior

Prof. Dr. Francisco Olímpio Moura Carneiro

Instituto de Engenharia e Desenvolvimento
Sustentável - SIAPE: 1148304

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB



Prof. Dra. Rita Karolinny Chaves de Lima

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira - UNILAB

“Á Deus,
Á minha família,
Ao meu avô materno Francisco Gomes de Melo (*in memoriam*),
E aos meus amigos”

AGRADECIMENTOS

A Deus e a Nossa Senhora pelas bênçãos derramadas em minha vida e na minha família e pela força para superar as dificuldades.

A minha mãe France Marie por ser meu porto seguro, por nunca ter me deixado desistir, por ter superado junto comigo as noites e madrugadas em claro, por ter suportado a minha ausência, meu estresse e minhas crises de ansiedade, sempre me motivando a ser melhor e vencer o desânimo e o cansaço.

A minha família materna Marliete Melo, Mary, Marie, Cristianny, Patrícia, Danyelle, Beatriz, Patrício, Isabela, Abraão, Marcos, André, Samia, Samanda e Glaubson, pela disposição em me ajudar em todos os momentos possíveis, por compreenderem minhas ausências e preocupações e pelo carinho dedicado.

A minha família paterna Margleison, Brígida, Oséias, Antônio, Adelaide, Maurickson, Mário e Alencar Júnior por compreenderem minha ausência e pelo carinho.

A todos os meus amigos em especial Simão Neto, Letícia Barros, Wladilson Martins, Patrick Sousa, Luís Andrade e Vanderlania Brito por todos os momentos vividos, pelo incentivo, pelas boas conversas e pela amizade que nasceu na faculdade, mas me acompanhará para sempre.

Ao grupo de pesquisa Poli-EN, a FUNCAP, ao PIBIC e ao laboratório de ciências dos materiais, pelo apoio durante a realização da pesquisa. Ao professor Dr. Carlos Cáceres pela orientação, amizade e suporte.

A Secretaria de Infraestrutura, Transporte e Controle Urbano de Barreira, em especial a Wemeson Fernandes, Eduardo Soares, Thiago Ferreira, Alan Lucas, Carlos Maia, Humberto Julião e Edson Filho, pela oportunidade, pelos bons momentos e pela partilha de conhecimentos.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte desta etapa da minha vida, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Os materiais compósitos reforçados com fibras vegetais, estão sendo cada vez mais utilizados devido suas propriedades mecânicas serem favoráveis e sua eficiência associada com a sustentabilidade. A carnaúba, *Copernicia prunifera* (Miller) H. E. Moore, é uma planta típica do Brasil, adaptada ao clima semiárido que possui diversas aplicações, tendo grande importância econômica para as comunidades rurais, além de ser vitrine para a cultura e para a arte regional. Seu insumo mais valioso é o pó cerífero, entretanto após sua extração as palhas são consideradas resíduos e são subaproveitadas. Essas palhas possuem potencial de aplicação como reforço de materiais compósitos por serem ricas em lignina, hemicelulose e celulose. Neste trabalho foi analisado os efeitos do tratamento químico com hidróxido de sódio nas propriedades mecânicas da palha de carnaúba e de um compósito de matriz polimérica com reforço de palha de carnaúba na forma de trançados e a sua influência no tipo de ruptura sofridas pelas amostras. Os resultados mostraram o potencial da palha carnaúba como reforço em compósitos, devido as suas propriedades mecânicas, sendo uma forma de aproveitar melhor a matéria prima e contribuir com o desenvolvimento econômico e sustentável. Entretanto, a sua utilização na forma de tecido trançado perpendicularmente resultou em introdução de defeito no compósito reduzindo sua resistência mecânica.

Palavras-chave: palha de carnaúba; matriz polimérica; compósitos; desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

Composite materials reinforced with vegetable fibers are being increasingly used because its mechanical properties are favorable and its efficiency associated with sustainability. Carnauba, *Copernicia prunifera* (Miller) H. E. Moore, is a typical plant of Brazil, adapted to the semi-arid climate that has several applications, having great economic importance for rural communities, in addition to being a showcase for culture and regional art. Its most valuable input is the wax powder, however after its extraction the straw are considered waste and are underused. These straws have potential for application as reinforcement of composite materials as they are rich in lignin, hemicellulose and cellulose. In this work, the effects of chemical treatment with sodium hydroxide on mechanical properties of carnauba straw and a polymer matrix composite with reinforcement of carnauba straw in the form of braids and its influence on the type of rupture suffered by the samples. The results showed the potential of carnauba straw as a reinforcement in composites, due to their mechanical properties, being a way to make better use of the raw material and contribute to economic and sustainable development. However, your use in the form of perpendicularly braided fabric resulted in the introduction of a defect in the composite, reducing its mechanical strength.

Key words: carnauba straw; polymer matrix; composites; sustainable development.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Constituição estrutural de uma fibra vegetal.....	20
Figura 2 -	Carnaúba em um carnaubal.....	21
Figura 3 -	Metodologia de confecção das fitas de carnaúba.....	29
Figura 4 -	Metodologia de confecção dos trançados de carnaúba.....	30
Figura 5 -	Metodologia do tratamento químico das fitas de carnaúba.....	31
Figura 6 -	Metodologia do tratamento químico dos trançados de carnaúba.....	32
Figura 7 -	Molde de laminação.....	33
Figura 8 -	Compósito no molde de laminação.....	34
Figura 9 -	Ensaio mecânicos (a) ensaio de tração fitas de carnaúba e (b) ensaio de tração compósitos.....	36
Figura 10 -	Influência da concentração de NaOH na variabilidade dimensional dos corpos de prova (a) Largura e (b) Espessura.....	37
Figura 11 -	Gráfico Tensão versus Deformação palha sem tratamento.....	39
Figura 12 -	Gráfico Tensão versus Deformação palha tratada com concentração em massa de NaOH 1% (m/m)	39
Figura 13 -	Gráfico Tensão versus Deformação palha tratada com concentração em massa de NaOH 3% (m/m)	39
Figura 14 -	Gráfico Tensão versus Deformação palha tratada com concentração em massa de NaOH 6% (m/m)	40
Figura 15 -	Ruptura palha sem tratamento.....	41
Figura 16 -	Ruptura palha tratada com NaOH 0,25 mol/L.....	41
Figura 17 -	Ruptura palha tratada com NaOH 0,75 mol/L.....	42
Figura 18 -	Ruptura palha tratada com NaOH 1,5 mol/L.....	42
Figura 19 -	Módulo de Young (GPa) e Resiliência (kJ/m ³) dos corpos de prova da palha de carnaúba.....	43
Figura 20 -	Tensão de escoamento (MPa) e Tensão na ruptura (MPa) dos corpos de prova da palha de carnaúba.....	44
Figura 21 -	Alongamento da ruptura (%) e Tenacidade (MJ/m ³) dos corpos de prova da palha de carnaúba.....	45
Figura 22 -	Gráfico Tensão versus Deformação amostra de referência do polímero.....	47
Figura 23 -	Gráfico Tensão versus Deformação compósito com a palha <i>in natura</i>	47

Figura 24 - Gráfico Tensão versus Deformação compósito com a palha tratada com concentração em massa de 5% de NaOH.....	48
Figura 25 - Ruptura compósito com palha <i>in natura</i>	49
Figura 26 - Ruptura compósito com palha tratada com 5% de NaOH (1,25 mol/L).....	49
Figura 27 - Alongamento da ruptura (MPa) e Módulo de Young (GPa) dos corpos de prova da amostra de referência e do compósito.....	50
Figura 28 - Tensão na ruptura (MPa) e Resiliência (MJ/m ³) dos corpos de prova da amostra de referência e do compósito.....	51
Figura 29 - Tenacidade (MJ/m ³) dos corpos de prova da amostra de referência e do compósito.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Composição químico-bromatológica da palha de carnaúba <i>in natura</i>	23
Tabela 2 -	Comparativo das propriedades mecânicas da palha de carnaúba tratada com diferentes concentrações de NaOH com a palha <i>in natura</i>	45
Tabela 3 -	Comparativo das propriedades mecânicas da palha de carnaúba sem tratamento obtidas nesse trabalho com a literatura.....	46
Tabela 4 -	Comparativo das propriedades mecânicas do compósito reforçado com o trançado de palha de carnaúba <i>in natura</i> e com a palha tratada com 5% em massa de NaOH com a amostra do polímero.....	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Usos da palha de carnaúba.....	22
--	-----------

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a.C.	Antes de Cristo
ASTM	American Society for Testing and Materials
CE	Ceará
cm	Centímetro
CMC	Carboximetilcelulose
CO ₂	Dióxido de carbono
GPa	Giga Pascal
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
kJ	Quilo Joule
kN	Quilo Newton
L	Litro
m ³	Metro cúbico
MJ	Mega Joule
mm	Milímetro
mm/mm	Milímetro por milímetro
MPa	Mega Pascal
NaOH	Hidróxido de sódio
P.A.	Para análise
ST	Sem tratamento
T1%	Tratamento com concentração em massa de NaOH 1% (m/m)
T3%	Tratamento com concentração em massa de NaOH 3% (m/m)
T6%	Tratamento com concentração em massa de NaOH 6% (m/m)
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo geral	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3. REVISÃO DA LITERATURA	19
3.1. Fibras Naturais	19
3.2. Palha de Carnaúba	20
3.3. Tratamentos Químicos em Fibras Naturais	24
3.4. Materiais Compósitos	25
3.5. Compósitos Reforçados com Fibras Naturais	26
4. MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1. Palha de Carnaúba	29
4.1.1. Confeção das Fitas	29
4.1.2. Confeção dos Trançados	30
4.2. Tratamento Químico	30
4.2.1. Tratamento Químico das Fitas	30
4.2.2. Tratamento Químico dos Trançados	32
4.3. Molde de Laminação	33
4.4. Compósitos de Resina Poliéster e Trançado de Carnaúba	33
4.5. Ensaio Mecânico de Tração	35
4.6. Análise Microscópica	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1. Palha de Carnaúba	37
5.1.1. Variação Dimensional dos Corpos de Prova com o Tratamento Químico.	37
5.1.2. Ensaio de Tração.....	38
5.1.3. Análise Microscópica da Ruptura das Fitas	40

5.1.4. Análise das Propriedades Mecânicas das Fitas	43
5.2. Compósito de Matriz Polimérica Reforçado com Trançado de Carnáuba	46
5.2.1. Ensaio de Tração.....	46
5.2.2. Análise Microscópica da Ruptura dos Compósitos	49
5.2.3. Análise das Propriedades Mecânicas Compósitos	50
6. CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios o homem transforma a natureza buscando extrair dela além do seu sustento, ferramentas que facilitem a sua vida de acordo com a sua necessidade, procurando materiais capazes de auxiliar na transformação do seu espaço social. Atualmente os materiais compósitos estão sendo cada vez mais utilizados nas estruturas de engenharia, devido suas propriedades mecânicas favoráveis, ao aumento das tecnologias e a variação nos métodos de fabricação (MAHAJAN; AHER, 2012).

Um compósito é composto por dois ou mais materiais individuais, visando obter uma combinação de propriedades que não é encontrada em materiais isolados e, também, incorporar as melhores características de cada um dos materiais que o compõem (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016).

As propriedades dos compósitos dependem das propriedades físicas e de fatores inerentes às fases constituintes, podendo ser constituído por diversos tipos de materiais, tanto a matriz como o reforço podem ser de origem sintética e/ou natural (VENTURA, 2009; CALEGARI; OLIVEIRA, 2016).

Diante do atual cenário de incentivo à sustentabilidade é constante a busca pela utilização de fibras naturais como reforço de compósitos por apresentarem uma variedade de propriedades desejáveis. As fibras além de reforçar, são biodegradáveis, possuem baixo custo, tem baixa densidade e não possuem característica abrasiva, desgastando menos à peça e facilitando a moldagem (BALZER et al., 2007; SYMINGTON et al., 2009).

As fibras naturais são aquelas encontradas na natureza e utilizadas "*in natura*" ou após beneficiamento, podendo ser divididas em: fibras de origem animal, origem vegetal e de origem mineral. Vale destacar as fibras naturais de origem vegetal, constituídas principalmente de celulose, hemicelulose, lignina, pectinas e ceras, devido à enorme variedade de plantas disponíveis na biodiversidade, e por ser uma fonte de recurso renovável (MARINELLI et al., 2008; CALEGARI; OLIVEIRA, 2016).

A carnaúba (*Copernicia prunifera*) é uma espécie típica brasileira. Existem outras *Copernicias* na América do Sul, porém, apenas na prunifera as folhas produzem cera. Em geral, as plantas produzem cera para evitar a perda de umidade através das folhas, pois a cera evita o excesso de transpiração que ocorre em estações de secas prolongadas e com baixa umidade

relativa características climáticas predominantes no nordeste brasileiro (FERNANDES et al., 2011).

A carnaúba é conhecida como árvore da vida, devido a sua infinidade de aplicações, suas raízes têm uso medicinal, os frutos são ricos em nutrientes para a ração animal, o tronco é madeira de qualidade para construções, as palhas servem para o artesanato, adubação do solo e extração de cera, insumo valioso utilizado na composição de diversos produtos industriais como cosméticos, cápsulas de remédios, componentes eletrônicos, produtos alimentícios e ceras polidoras (BARBOSA; COSTA; SILVA, 2009).

No Brasil segundo o IBGE no ano de 2020 foram produzidas 813 toneladas de cera de carnaúba e 19.453 toneladas de pó de carnaúba, gerando um total de mais de 4 bilhões e meio de reais. Entretanto, um problema ambiental decorrente da extração da cera é a geração excessiva de resíduos sólidos, devido o descarte das palhas consideradas como subproduto. Uma forma de mitigar esses impactos e aproveitar melhor os benefícios da palha de carnaúba é a sua utilização como reforço de compósitos, aplicação viável devido sua composição química.

A fibra da palha de carnaúba assim como as demais fibras vegetais apresentam como principal desvantagem uma alta variabilidade em suas propriedades mecânicas devido à idade da planta, condições de crescimento, condições geográficas e climáticas e etc., outra desvantagem é sua tendência a absorver água devido ao alto teor de hidroxila da celulose tornando a fibra incompatível com a matriz polimérica tipicamente hidrofóbica (ZINI; SCANDOLA, 2011).

A interação entre os componentes do compósito depende das características da interface entre eles, que deve permitir uma transferência eficiente da tensão da matriz para o reforço, assim, é preciso submeter as fibras a tratamentos químicos para otimizar a interface, sendo o método mais utilizado o tratamento alcalino em solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) (BELTRAMI et al., 2014).

A escassez de informações sobre o uso de compósitos poliméricos reforçados com palha de carnaúba justifica a necessidade de estudos para indicar seu potencial de aplicação. Sendo assim o presente trabalho tem o objetivo de contribuir com o desenvolvimento de novos materiais, baseados na sustentabilidade e na eficiência, além de agregar valor à matéria prima, tão abundante e por vezes subaproveitada e introduzir também uma nova fonte de renda para as comunidades rurais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Estudar o comportamento mecânico da palha de carnaúba e do compósito polimérico reforçado com trançado de palha de carnaúba *in natura* e após tratamento químico em solução aquosa de hidróxido de sódio.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar os efeitos do tratamento químico com hidróxido de sódio nas propriedades mecânicas e no tipo de ruptura da palha de carnaúba, através do ensaio de tração.
- Analisar os efeitos do tratamento químico com hidróxido de sódio nas propriedades mecânicas e no tipo de ruptura dos compósitos de matriz polimérica reforçados com trançado de palha de carnaúba, através do ensaio de tração.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Fibras Naturais

As fibras naturais são aquelas encontradas na natureza e utilizadas "in natura" ou após beneficiamento, são compostas por celulose, hemicelulose, lignina, pectina, ceras e outras substâncias solúveis em água e podem ser divididas em: fibras de origem animal, origem vegetal e de origem mineral. Vale destacar as fibras de origem vegetal, devido à enorme variedade de plantas disponíveis na biodiversidade e por ser uma fonte de recurso renovável (LI; TABIL; PANIGRAHI, 2007; MARINELLI et al., 2008).

As pesquisas e a adaptação de técnicas para utilização de fibras vegetais em diferentes setores têm se tornado cada vez mais viáveis no Brasil, devido seus recursos naturais, as grandes áreas de plantio e a variedade em espécies de plantas (FERNANDES et al., 2011).

As fibras naturais apresentam inúmeras vantagens pois, além de reforçar, são biodegradáveis, possuem baixo custo, são leves (tem baixa densidade) e não possuem característica abrasiva, desgastando menos à peça e facilitando a moldagem (BALZER et al., 2007).

Outra vantagem das fibras vegetais é não liberar CO₂ para atmosfera, além dos processamentos com essas fibras serem menos danosos aos equipamentos e ao homem, quando comparado às fibras sintéticas, além de ser uma alternativa menos agressiva ao meio ambiente, contribuindo para dispor de novos materiais (COSTA, 2016).

As propriedades mecânicas das fibras apresentam alta variabilidade dependendo se foram retiradas do caule ou da folha da planta, das condições do local de plantio, da idade da planta e do processo de extração adotado para coletar a fibra das plantas (MOHANTY; MISRA; DRZAL, 2001).

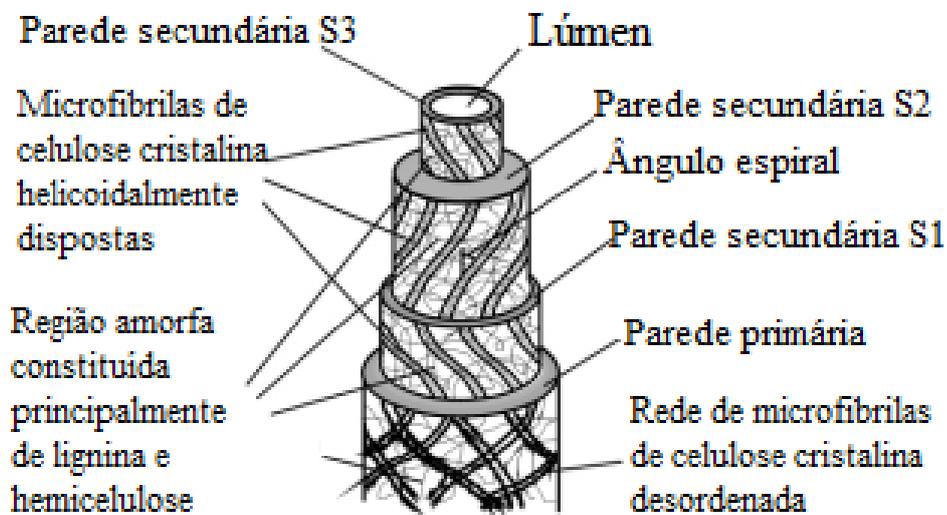
Além disso, as fibras vegetais também apresentam como desvantagens a baixa temperatura de processamento, limitada a aproximadamente 200°C e a alta absorção de umidade, que pode causar o inchaço das fibras, problema que pode ser reduzido de forma drástica pela modificação química das fibras e pela boa adesão na interface fibra/matriz (SILVA, 2003).

Pode-se acrescentar como vantagem ao uso das fibras, o fato de representar uma nova fonte de renda para as comunidades rurais, agregando um caráter social ao seu cultivo, além disso, em outras situações, as fibras podem corresponder a espécies nativas que, se forem

cultivadas, podem produzir benefícios ambientais comparado com as espécies estrangeiras (FERNANDES et al., 2011; KOTIK, 2019).

Cada fibra vegetal é constituída de várias fibras elementares fortemente ligadas entre si por um material de cimentação, constituído principalmente de lignina. Na Figura 1 é apresentada a constituição estrutural de uma fibra elementar. Esta possui uma parede espessa formada por várias micro fibrilas que formam espirais ao longo do eixo da fibra, tendo um lúmen no centro, cada fibra elementar é um compósito no qual as rígidas micro fibrilas de celulose estão envolvidas por uma matriz de lignina e hemicelulose. A lignina atua como material de cimentação, unindo as micro fibrilas e a hemicelulose como interface entre a micro fibrila de celulose e a lignina (SILVA, 2003).

Figura 1 – Constituição estrutural de uma fibra vegetal.



Fonte: Adaptado de Rong et al. (2001).

3.2 Palha de Carnaúba

A carnaúba (*Copernicia prunifera* (Miller) H. E. Moore) é uma árvore da família *Arecaceae* endêmica no semiárido do nordeste brasileiro, com maior ocorrência nos estados do Ceará, do Piauí e do Rio Grande do Norte. "Carnaúba" é um termo derivado do tupi e significa "árvore-que-arranha" por conta da camada de espinhos (BARBOSA; COSTA; SILVA, 2009; SOUSA et al., 2015).

Existem outros *Copernicias* no América do Sul, *Copernicia tectorum* na Venezuela e *Copernicia alba* na Bolívia e no Paraguai, entretanto, apenas na *prunifera* as folhas produzem

cera. De forma geral, a produção de cera ocorre para evitar a perda de umidade, pois a cera evita o excesso de transpiração que ocorre em estações de secas prolongadas e com baixa umidade relativa (FERNANDES et al., 2011).

A carnaúba (Figura 2) é uma planta que se desenvolve principalmente de forma espaçada em locais com solos arenosos e alagadiços, várzeas e margens dos rios de regiões de clima quente, por ser componente das matas ciliares nordestinas essa espécie cumpre funções fundamentais para o equilíbrio ecológico da região, em especial, na conservação dos solos e na proteção dos rios contra a formação de processos de erosão e assoreamento (D'ALVA, 2004; FERNANDES et al., 2011).

Figura 2 – Carnaúba em um carnaubal.



Fonte: Cerratinga (2021).

A carnaubeira é conhecida como árvore da vida, pois oferece uma infinidade de usos: as raízes têm uso medicinal como diurético, os frutos são ricos em nutrientes para a ração animal, o tronco é madeira de qualidade para construções, as palhas servem para a produção artesanal, adubação do solo e extração de cera, insumo muito valioso presente na composição de diversos produtos industriais como cosméticos, cápsulas de remédios, componentes eletrônicos, produtos alimentícios, ceras polidoras e revestimentos (BARBOSA; COSTA; SILVA, 2009).

Por ser uma planta adaptada ao clima semiárido, a carnaúba oferece possibilidades de atividades econômicas nos períodos de estiagem, sendo uma importante fonte de renda alternativa nas comunidades rurais (BARBOSA; COSTA; SILVA, 2009).

Além das formas de aproveitamento apresentadas anteriormente, após a retirada do pó cerífero é possível aproveitar as palhas de carnaúba consideradas resíduos em outras aplicações. No Quadro 1 são descritos quatro exemplos variados de usos para a palha de carnaúba.

Quadro 1 – Usos da palha de carnaúba.

USOS	CARACTERÍSTICAS
Fabricação de papel artesanal	O papel artesanal é uma tecnologia desenvolvida pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Após a retirada do pó, utiliza-se a fibra da palha para obtenção do papel, seguindo diversos procedimentos e utilizando-se produtos químicos como hidróxido de sódio, ácido acético, um aditivo responsável pela união das fibras, a carboximetilcelulose (CMC) e os corantes.
Fabricação de peças artesanais	A palha de carnaúba é tradicionalmente utilizada na fabricação de diversos artesanatos como chapéus, esteiras, capachos, vassouras, entre outros. A produção dessas peças pode se constituir para as populações de baixa renda, terapia ocupacional, realização artística, incentivo a capacidade empreendedora e oportunidade de emprego e renda.
Ração animal	A bagana da carnaúba está sendo pesquisada para a utilização na ração animal, principalmente, pela disponibilidade e pelo volume produzido, apesar de apresentar limitações devido aos altos teores de fibra e lignina e baixos teores de digestibilidade e de proteína bruta.
Cobertura Morta	A bagana de carnaúba é usada na proteção e resfriamento dos solos, em razão do conteúdo de nutrientes e do volume disponível nas regiões produtoras, apresentando diversos benefícios como: redução da variação da temperatura no solo; manutenção da umidade, diminuição da ocorrência de ervas daninhas na área de cobertura e diminuição da mortalidade de plantas jovens.

Fonte: Adaptado de Câmara Setorial da Carnaúba – Ceará (2009).

Outra forma de reduzir o montante de resíduo subaproveitado é a utilização da fibra da palha de carnaúba como agente reforço de materiais compósitos, aplicação viável devido a sua composição química favorável. A Tabela 1 apresenta a composição químico-bromatológica da palha de carnaúba *in natura*, com os valores percentuais de cinzas, hemicelulose, celulose, lignina, fibra em detergente neutro e fibra em detergente ácido expresso em base de matéria seca.

Tabela 1 – Composição químico-bromatológica da palha de carnaúba *in natura*.

Componentes	Porcentagem (%)
Matéria seca	86
Matéria orgânica	94,3
Cinzas	5,74
Hemicelulose	18,5
Celulose	39,9
Lignina	10,6
Fibra em detergente neutro	69,7
Fibra em detergente ácido	51,2

Fonte: Adaptado de Gomes et al. (2009).

Uma das dificuldades no uso da fibra da palha de carnaúba e outras fibras vegetais como agente de reforço em matrizes poliméricas, para se obter compósitos com propriedades mecânicas e estabilidade dimensional desejadas, é a fraca adesão interfacial com o polímero devido a sua tendência em absorver água em consequência do alto teor de hidroxila da celulose tornando a fibra incompatível com a matriz polimérica tipicamente hidrofóbica. Uma forma de contornar este problema é modificar sua estrutura através de métodos químicos ou físicos (PIRES et al., 2012; ZINI; SCANDOLA, 2011).

Os tratamentos físicos, atuam na superfície das fibras, resultando na desfibrilação da superfície. Enquanto os tratamentos químicos, atuam não só na superfície das fibras, podendo alcançar camadas mais internas das mesmas (MIRANDA et al., 2015).

3.3 Tratamentos Químicos em Fibras Naturais

Existem diversos tratamentos químicos para as fibras naturais entre os quais podemos citar: a acetilação, a benzoilação, a acrilação, o tratamento alcalino, os tratamentos com silano, isocianeto, permanganato, peróxido entre outros (LI; TABIL; PANIGRAHI, 2007).

O tratamento alcalino realizado em solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH), é um dos tratamentos químicos mais utilizados para as mais diversas fibras vegetais (BELTRAMI et al., 2014).

A modificação mais importante feita pelo tratamento alcalino é o rompimento da ligação de hidrogênio no grupo hidroxila presente na estrutura da fibra, aumentando assim a rugosidade da superfície e conseqüentemente a adesão fibra/matriz (LI; TABIL; PANIGRAHI, 2007).

Este tratamento remove a hemicelulose e limpa a superfície das fibras removendo parcialmente a lignina, ceras, impurezas e óleos que recobrem a superfície externa da parede celular da fibra e que podem reduzir a resistência interfacial do compósito (BELTRAMI et al., 2014).

Compósitos reforçados com fibras devem ter uma forte adesão entre seus componentes, para que haja a transferência da carga da matriz para a fibra, caso a adesão seja fraca, o princípio dos sistemas reforçados com fibra não funciona (PUKÁNSZKY, 2005).

O tratamento com NaOH reduz o ângulo das micro fibrilas/ângulo espiral, melhorando o alinhamento da carga e a transferindo para mais perto do eixo da fibra, além de promover o aumento do índice de cristalinidade percentual devido à remoção de materiais cimentados, resultando em um melhor acondicionamento das cadeias de celulose (SYMINGTON et al., 2009).

Todavia, deve-se atentar ao efeito da concentração de NaOH, pois quando há concentrações mais altas de álcali, ocorre o excesso de deslignificação da fibra natural resultando em uma fibra mais fraca ou danificada, podendo ter sua resistência reduzida (LI; TABIL; PANIGRAHI, 2007).

Moreira e Seo (2016) utilizaram em seu estudo, o tratamento alcalino com concentração em massa de 3% a 5% de hidróxido de sódio nas folhas de milho secas durante tempo de imersão de 2 a 4 dias.

Carvalho (2011) utilizou em seu estudo sobre fibras da folha de carnaúba, tratamento em meio alcalino nas concentrações em massa de NaOH de 1%, 3% e 5%, com tempo de imersão respectivo de 3 horas, 2 horas e 1 hora.

Silva (2003) utilizou em fibras de sisal e fibras de coco tratamento com hidróxido de sódio na concentração em massa de 10% a temperatura ambiente por 1 hora para o sisal e 24 horas para a fibra de coco.

Beltrami et al. (2014) realizou o tratamento das fibras de curauá com tratamento alcalino, nas concentrações de NaOH de 1, 5 e 10 % (m/v), com tempo de imersão de 2 horas a temperatura de 50 °C.

Fernandes et al. (2017) utilizou solução de hidróxido de sódio na concentração de 4% para fazer a lavagem das fibras de sisal com tempo de imersão de 2 horas com agitação mecânica.

Vale destacar que também é preciso ter cuidado ao trabalhar com o hidróxido de sódio devido aos seus impactos negativos para o homem e para o meio ambiente. Em relação ao homem a substância é corrosiva, sua inalação pode causar danos ao trato respiratório e a sua deglutição causa irritações e danos internos severos. Em relação ao meio ambiente o principal impacto é a elevação considerável do pH do meio em que é disposto devido a sua natureza básica (MÜLLER, 2016).

3.4 Materiais Compósitos

O emprego de materiais compósitos como materiais de engenharia está ganhando cada vez mais espaço em vários segmentos da indústria, pois possibilitam uma boa sinergia na interação entre os diferentes componentes que o formam, resultando em uma gama de propriedades inerentes ao material, e atribuições mais interessantes que as dos componentes que o formam (CASARIL et al., 2007).

Por definição, compósitos são materiais compostos por dois ou mais materiais individuais, visando obter uma combinação de propriedades que não são encontradas nos materiais isolados e incorporar as melhores características de cada um dos materiais que o compõem (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016).

As características dos compósitos podem incorporar as propriedades combinadas da fase contínua (matriz) e da fase dispersa (componente de reforço ou modificador) (PIRES; BIERHALZ; MORAES, 2015).

Os compósitos são constituídos por diversos tipos de materiais, tanto a matriz como o reforço podem ter origem sintética e/ou natural, sendo que atualmente, os materiais de fontes renováveis estão sendo bastante utilizados para o desenvolvimento dos compósitos (CALEGARI; OLIVEIRA, 2016).

Os compósitos podem surgir de combinações entre metais, cerâmicas e polímeros, sendo que as possíveis combinações dependem das condições de processamento e das prováveis incompatibilidades entre os componentes. Como componente matricial, os polímeros são os materiais mais utilizados devido à sua leveza e fácil moldagem, como reforço geralmente são utilizadas fibras (sintéticas ou naturais) que podem ser contínuas ou descontínuas, alinhadas ou com distribuição aleatória, podendo ser obtidas de diversas formas, como tecidos por exemplo (SILVA, 2003).

A principal função do reforço em compósitos é fornecer resistência e rigidez e suportar as cargas que serão aplicadas, já a matriz protege as fibras contra a abrasão e ataques diversos, transfere as cargas aplicadas para a fase reforço, além disso fornece forma ao compósito, estabiliza o compósito contra a flambagem quando submetido a carga compressiva (MAHAJAN; AHER, 2012).

A matriz atua ainda como uma base que confere ductilidade e mantém a estrutura coesa, contribuindo para que o conjunto tenha boas condições de fabricação e a flexibilidade necessária (COSTA, 2016).

Por serem materiais construídos de acordo com as necessidades do projeto em relação a resistência e o desempenho, os compósitos viabilizam a construção de estruturas eficientes, com alto desempenho e pouco peso, fatores que geralmente são de difícil conciliação nos materiais convencionais (PINHEIRO, 2000).

3.5 Compósitos Reforçados com Fibras Naturais

O desenvolvimento de materiais ecologicamente corretos e a melhor adequação dos processos tem sido uma necessidade para minimizar os problemas ambientais no mundo, assim o uso de matérias-primas provenientes de fontes renováveis vem sendo objeto de diversos estudos, devido ao seu potencial para substituir derivados petroquímicos, sendo as fibras naturais uma matéria prima com grande potencial de aplicação na indústria automobilística, no revestimento interno de automóveis e na construção civil (MOTHÉ; ARAUJO, 2004).

As vantagens de materiais compósitos de fibras naturais como a madeira, ossos, ramos finos de plantas vêm sendo exploradas durante séculos, por exemplo os Egípcios que usavam materiais compósitos de fibras naturais como o papiro para fazer barcos, velas e cordas desde o ano 4000 a.C., a palha é outro exemplo usado para reforço de tijolos há mais de 2000 anos método utilizado até hoje (VENTURA, 2009).

As características mecânicas de um compósito reforçado com fibras não dependem somente das propriedades da fibra, sendo necessário considerar também o grau no qual a carga aplicada é transmitida pela fase matriz para fase reforço. A magnitude da ligação interfacial entre as fases fibra e matriz, as características próprias do agente de reforço como o arranjo ou a orientação das fibras entre si, a concentração e a distribuição da fibra têm uma significativa influência na resistência e em outras propriedades mecânicas de compósitos reforçados por fibras (RAYMUNDO et al., 2012).

Em geral, a melhor combinação das propriedades dos compósitos reforçados com fibras é obtida quando 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 e matriz, as frações volumétricas das fases e a direção de aplicação da tensão (VENTURA, 2009).

Os compósitos com fibras descontínuas e alinhadas tem menor eficiência que os de fibras contínuas, apesar disso estão sendo cada vez mais utilizados em diversas aplicações. Os compósitos com fibras descontínuas e aleatórias são aplicados onde as tensões são multidirecionais, tendo baixa eficiência comparado com os compósitos reforçados com fibras contínuas e alinhadas na direção longitudinal (VENTURA, 2009).

Fibras vegetais, como juta, sisal, fibra de bananeira, coco e outras constituem materiais sustentáveis, que já possuem aplicações correntes e outras aplicações que ainda estão sendo pesquisadas. Por outro lado, existem muitas espécies vegetais brasileiras e suas respectivas fibras, onde pouco ou nada é conhecido sobre suas características e possíveis aplicações (GONÇALVES et al., 2018).

Silva (2003) utilizou em seu estudo fibras de sisal e fibras de coco no desenvolvimento de compósito de resina poliuretano. Cerchiaro (2010) em seu estudo analisou o uso do tecido de fibra de sisal como reforço de compósitos poliméricos.

Oliveira, Toledo e Mulinari (2014) em seu estudo analisaram compósitos híbridos formados com tecido de fibra de vidro tramada, tecido de sisal e matriz poliéster ortoftálica para aplicação em carenagem.

Rodrigues, Souza e Fujiyama (2015) analisou compósitos de matriz de poliéster insaturado reforçados com fibras de curuá, juta e palha da costa, na forma de tecidos em estilo plano e fios alinhados.

Fernandes et al. (2017) realizou um estudo sobre compósito de polietileno com fibras de sisal e Souza, Souza e Pereira Neto (2020) obtiveram e fizeram a caracterização de um compósito com resina de poliéster e folha de pó de carnaúba.

O presente trabalho teve como foco o tecido da palha de carnaúba por apresentar conhecimento limitado de suas características e do seu potencial de aplicação em materiais compósitos na literatura.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Palha de Carnaúba

As palhas de carnaúba foram obtidas no município de Aracoiaba – CE, selecionadas e separadas manualmente. Posteriormente foi realizada uma limpeza para remoção de impurezas através da imersão em água durante 16 horas e em seguida foram colocadas para secar em temperatura ambiente durante 72 horas e devidamente armazenadas.

4.1.1 Confeção das Fitas

As palhas secas foram cortadas em fitas com dimensões de aproximadamente 100 mm de comprimento e 4 mm de largura com o auxílio de um estilete. Para realizar o controle das dimensões das fitas obtidas, em termos de variabilidade das larguras e espessuras, foi utilizado um paquímetro digital da marca Messen com precisão de 0,01 mm.

A figura 3 apresenta a metodologia descrita anteriormente para a lavagem e para confeção das fitas de carnaúba que serão utilizadas como corpos de prova nos ensaios de tração.

Figura 3 - Metodologia de confecção das fitas de carnaúba.

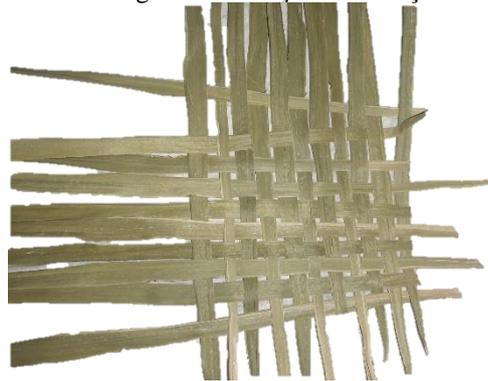


Fonte: Autor (2021).

4.1.2 Confeção dos Trançados

Os trançados foram confeccionados de forma manual com dimensões de aproximadamente 42 cm de comprimento e 42 cm de largura utilizando as palhas de carnaúba secas. O método empregado para a confecção dos trançados (tecido bidirecional) consiste em entrelaçar as palhas posicionando-as verticalmente e horizontalmente de forma alternada, como mostra a figura 4.

Figura 4 - Metodologia de confecção dos trançados de carnaúba.



Fonte: Autor (2021).

4.2 Tratamento Químico

O tratamento químico das palhas de carnaúba cortadas em fitas e dos trançados foi realizado usando soluções aquosas de NaOH de diferentes concentrações. Para o preparo das soluções foi utilizado hidróxido de sódio P.A., em micro pérola (pureza de 97%).

Para definir as concentrações em massa de hidróxido de sódio que foi utilizada no tratamento químico das fitas de carnaúba seguiu-se como base as concentrações disponíveis na literatura em: Moreira e Seo (2016), Carvalho (2011), Silva (2003), Beltrami et al. (2014) e Fernandes et al. (2017).

4.2.1 Tratamento Químico das Fitas

As fitas cortadas foram utilizadas como corpos de prova para verificar as propriedades mecânicas das palhas de carnaúba e para isso foram separadas aleatoriamente em quatro grupos, cada um com trinta amostras. O tratamento alcalino foi realizado em solução aquosa com concentrações de NaOH em massa de 1% m/m (0,25 mol/L), 3% m/m (0,75 mol/L)

e 6% m/m (1,5 mol/L). A metodologia adotada para realização do tratamento químico nas fitas de carnaúba pode ser visualizada na Figura 5.

As soluções de NaOH foram preparadas em balões volumétricos. Para tal, as pérolas de NaOH foram previamente dissolvidas em água com o auxílio de um béquer e de um bastão de vidro (resultando em soluções incolores). Posteriormente, as soluções aquosas foram transferidas para recipientes de polipropileno e os corpos de prova na forma de fitas foram colocados em imersão durante uma hora a temperatura ambiente, e depois retiradas e lavadas com água destilada várias vezes para remover substâncias solúveis provenientes do tratamento químico e/ou resíduos da solução aquosa. A lavagem foi realizada até a água de lavagem atingir um pH neutro. Tiras da marca Qualividros foram utilizadas nas medidas de pH.

Depois do tratamento químico e da lavagem, as amostras foram colocadas para secar a temperatura ambiente por 72 horas e em seguida foram armazenados em sacos plásticos vedados. Para avaliar a variabilidade das dimensões das fitas antes e após o tratamento químico novamente foram feitas medições das larguras e espessuras das fitas utilizando o paquímetro digital da marca Messen com precisão de 0,01 mm.

Figura 5 - Metodologia do tratamento químico das fitas de carnaúba.



Fonte: Autor (2021).

4.2.2 Tratamento Químico dos Trançados

Foi realizado o tratamento químico em 15 (quinze) trançados que posteriormente foram utilizados na confecção dos compósitos. O tratamento alcalino foi realizado em solução aquosa com concentração de 5% em massa de NaOH (1,25 mol/L).

A concentração de 5% em massa de NaOH foi escolhida para os trançados tendo em vista os resultados da palha de carnaúba. A metodologia adotada para realização do tratamento químico nos trançados de carnaúba pode ser visualizada na Figura 6.

De forma similar ao procedimento realizado para as fitas (descrito no subtópico 3.2.1), a solução aquosa foi preparada em um balão volumétrico, em seguida foi transferida para um recipiente de polipropileno de 100L e os trançados foram colocados em imersão durante uma hora a temperatura ambiente. Posteriormente, os trançados foram retirados e lavados com água destilada até a água de lavagem atingir pH neutro utilizando Tiras da marca Qualividros para medida do pH.

Figura 6 - Metodologia do tratamento químico dos trançados de carnaúba.



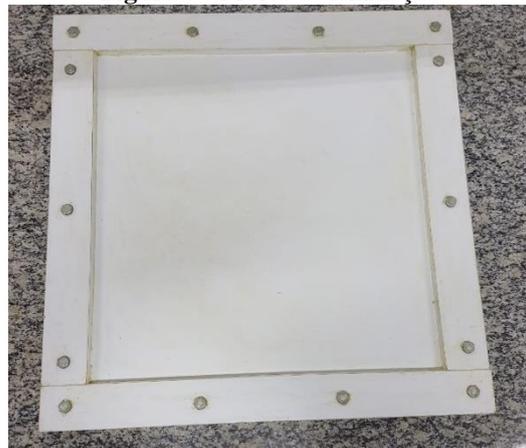
Fonte: Autor (2021).

Seguidamente, os trançados foram colocados para secar a temperatura ambiente durante 72 horas e armazenados em sacos plásticos vedados para evitar a contaminação por agentes externos como poeira.

4.3 Molde de Laminação

O molde de laminação (figura 7) foi projetado utilizando o software AutoCad versão 2019. O molde completo tem 52cm de comprimento e 52 cm de largura e o espaço de laminação possui 42cm de comprimento e 42 cm de largura.

Figura 7 - Molde de laminação.



Fonte: Autor (2021).

O molde foi fabricado de mdf e revestido com “fórmica” branca (laminado melamínico). Para fixar as bordas a base foram utilizados 14 parafusos sextavados galvanizados com porcas garra zincadas para madeira.

4.4 Compósitos de Resina Poliéster e Trançado de Carnaúba

Antes de realizar a laminação o molde foi limpo utilizando álcool 96° da marca Santa Cruz, em seguida foram aplicadas 2 camadas de cera desmoldante em pasta à base de cera de carnaúba da marca Fiberglass com o auxílio de uma estopa fazendo movimentos circulares com intervalo aproximado de 20 a 30 minutos entre cada aplicação. A cera é utilizada para proteger o molde e facilitar a retirada do compósito e a limpeza do molde.

Seguidamente, sobre as camadas de cera foram aplicadas 2 finas camadas de desmoldante líquido à base de álcool polivinílico da marca D’Cofibras com o auxílio de um pincel achatado, a aplicação deve ser feita de forma uniforme e o intervalo entre as aplicações depende do tempo de secagem do desmoldante que variou entre 45 minutos a 1 hora. Esse desmoldante forma uma película fina, uniforme e impermeável que facilita o desmolde dos compósitos.

Após seca a última camada do desmoldante líquido é feita a laminação. Para as laminações foram utilizadas 800 gramas de resina poliéster ortoftálica com catalisador M-60 da marca D’Cofibras, utilizando a proporção de 40 gotas de catalisador (aproximadamente 40 ml) a cada 100 gramas de resina. Primeiramente foi despejada metade da resina no molde, em seguida é posicionado o trançado da carnaúba e despejado o restante da resina, para assentar o trançado e eliminar as bolhas de ar foi utilizado um rolete tira bolhas de alumínio.

A figura 8 apresenta o compósito no molde de laminação durante o período de cura. Após a cura total do compósito (24 horas) é feito o desmolde do compósito e o molde é limpo com álcool 96° da marca Santa Cruz.

Figura 8 – Compósito no molde de laminação.



Fonte: Autor (2021).

Para a fabricação dos corpos de prova que foram utilizados nos ensaios de tração, foi seguida as dimensões recomendadas na norma ASTM D3039 (ASTM,2014) para materiais compósitos de matriz polimérica, com adaptação na espessura devido as características particulares da palha de carnaúba.

O corte foi feito manualmente utilizando uma serra mármore com disco de corte diamantado da marca Tramontina, para facilitar o corte foram feitas marcações no compósito com folga de aproximadamente 0,3 cm. Para corrigir as imperfeições do corte e deixar os corpos de prova mais uniformes foram utilizadas lixas ferro 80 e 120 e lixa d’água 180.

Foram utilizados trançados com a palha *in natura* e após o tratamento químico para avaliar a influência do tratamento nas propriedades mecânicas. Além disso, foram fabricados corpos de prova apenas de resina poliéster para avaliar o reforço proporcionado pelo trançado e o impacto nas propriedades mecânicas.

4.5 Ensaio Mecânicos de Tração

O ensaio de tração é um dos ensaios mecânicos de tensão-deformação mais comuns e pode ser empregado para caracterizar várias propriedades mecânicas dos materiais importantes para projetos. Neste ensaio uma amostra é deformada, geralmente até sua fratura, por uma carga de tração aplicada uniaxialmente ao longo do eixo do corpo de prova e que aumenta gradativamente (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016).

Para a caracterização dos materiais também são utilizados outros tipos de ensaios mecânicos como o ensaio de compressão que pode ser realizado quando as forças em serviço forem desse tipo, os ensaios de cisalhamento e de torção sendo a torção uma variação do cisalhamento puro e o ensaio de flexão onde um corpo de prova é flexionado até a fratura, utilizando uma técnica de aplicação de cargas a três ou a quatro pontos (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016).

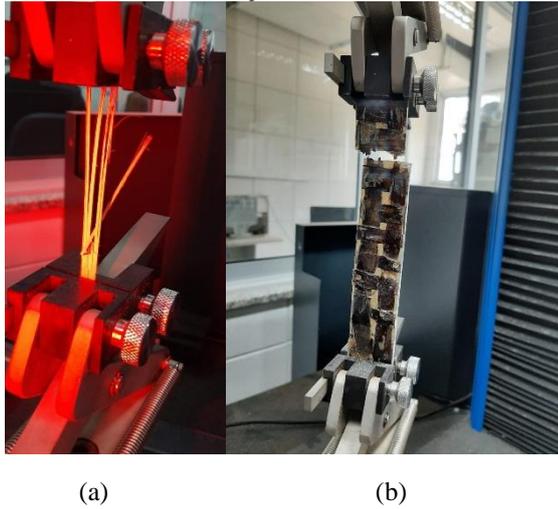
Os ensaios mecânicos de tração das fitas e dos compósitos foram realizados em uma máquina de ensaios universal da marca Instron modelo EMIC 23-100 com célula de carga de 5kN, para as fitas foi utilizada uma velocidade de ensaio de 6 mm/min e para os compósitos uma velocidade de 2 mm/min. Em ambas as amostras o ensaio de tração foi realizado até a ruptura.

As fitas foram separadas em grupos, o primeiro grupo corresponde às fitas sem tratamento químico, ou seja, a carnaúba *in natura* e os outros três grupos correspondem as amostras tratadas quimicamente com diferentes concentrações de hidróxido de sódio.

Os corpos de prova dos compósitos foram separados em três grupos, um grupo utilizando trançados com a carnaúba *in natura*, outro grupo com o trançado tratado quimicamente com hidróxido de sódio na concentração de 5% em massa (1,25 mol/L) e um grupo de referência utilizando apenas resina poliéster.

Com os resultados das curvas de tensão versus deformação, foram determinadas as propriedades mecânicas das amostras como o módulo de elasticidade, a tensão de escoamento, a tensão na ruptura, a resiliência e a tenacidade. Na Figura 9 pode-se visualizar os ensaios mecânicos realizados, na Figura 9a o ensaio de tração das fitas de carnaúba e na Figura 9b ensaio de tração dos compósitos.

Figura 9 – Ensaio mecânico (a) ensaio de tração fitas de carnaúba e b) ensaio de tração compósitos.



Fonte: Autor (2021).

4.6 Análise Microscópica

Amostras representativas das fitas de palha de carnaúba e dos compósitos poliméricos com palha de carnaúba foram selecionadas para analisar o tipo de fratura na ruptura, foram tiradas fotografias através de um microscópio digital USB-8 leds de luz branca e capacidade de zoom ótico de 1000X.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

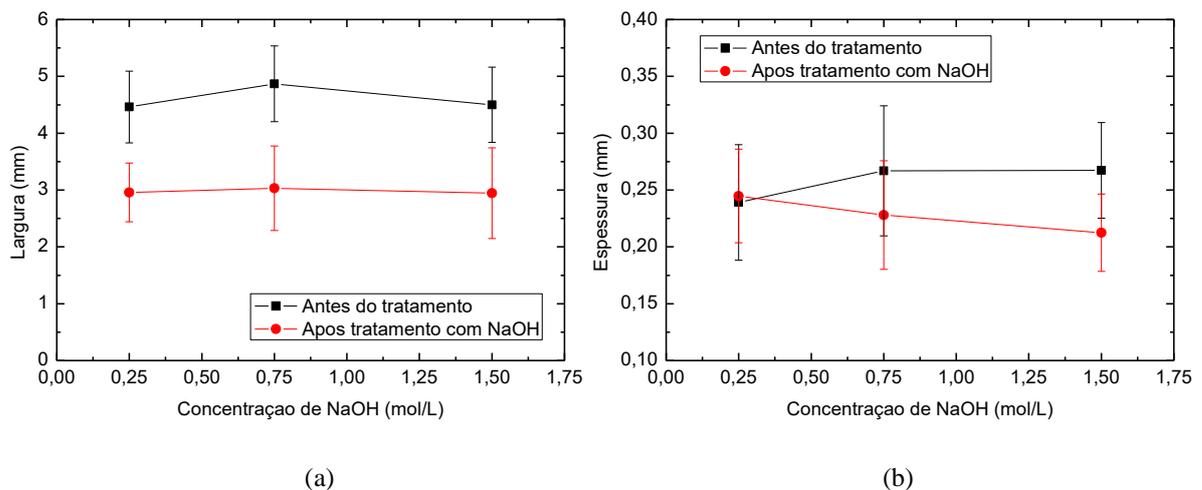
5.1 Palha de Carnaúba

5.1.1 Variação Dimensional dos Corpos de Prova com o Tratamento Químico.

O tratamento alcalino com NaOH degrada visivelmente a palha tornando-a mais frágil e tendo reduções nas dimensões, a figura 10 mostra os valores médios e desvios padrões das dimensões dos corpos de prova em termos de largura e espessura antes e após tratamento químico em soluções aquosas com concentrações de 0,25; 0,75; 1,5 mol/L de NaOH.

Para cada conjunto de tratamento químico foram cortados trinta corpos de prova e pelos dados observados vemos que as dimensões apresentam variabilidade na largura devido o método de corte utilizado e variabilidade na espessura devido as características da própria palha. De forma geral no conjunto total dos noventa corpos de prova analisados teríamos uma variabilidade na largura de $5 \pm 0,02$ mm e na espessura de $0,2 \pm 0,02$ mm.

Figura 10 – Influência da concentração de NaOH na variabilidade dimensional dos corpos de prova (a) Largura e (b) Espessura



Fonte: Autor (2021).

Os resultados mostrados na Figura 10, permitem mostrar que após tratamento químico a largura dos corpos de prova foi reduzida em torno de 5% independentemente da concentração de NaOH utilizada o que significa que a concentração não influencia diretamente na redução. Por outro lado, podemos observar que a espessura não foi afetada com o tratamento

com 0,25mol/L de NaOH e permaneceu dentro do erro da espessura inicial da palha sem tratamento. No entanto, nos tratamentos com 0,75 e 1,5mol/L houve redução nas espessuras e sendo mais intensa com a maior concentração, o que este intimamente relacionado com a remoção parcial da lignina e hemicelulose das palhas de carnaúba.

5.1.2 Ensaio de Tração

A partir dos gráficos de tensão versus deformação obtidos com os ensaios de tração é possível obter as propriedades mecânicas das palhas, tais como módulo de Young, tenacidade, tensão de ruptura, tensão de escoamento e alongamento de ruptura.

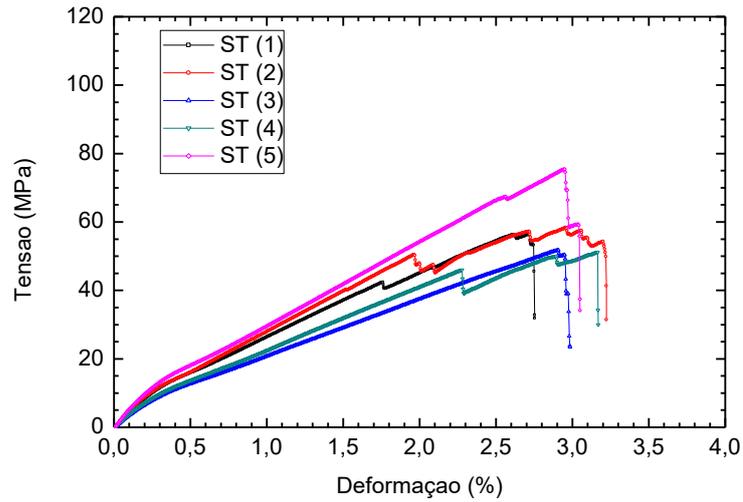
O gráfico correspondente as amostras sem tratamento (figura 11) permite visualizar que as palhas apresentam uma ruptura fragmentada, semelhante ao rompimento de um tecido, isso ocorre devido a estrutura das micro fibrilas e a sua distribuição na palha. Já nos gráficos que apresentam as amostras tratadas com diferentes proporções de NaOH (figuras 12,13 e 14) percebe-se que a ruptura passa a ocorrer de forma mais brusca, isso pode ocorrer devido a dois fatores, a agressividade do tratamento e a remoção da hemicelulose e da lignina.

A agressividade do tratamento aumenta a rigidez da fibra, tornando-a mais quebradiça e a remoção da hemicelulose e da lignina permitem uma distribuição mais uniforme da carga, centralizando a tensão em um determinado ponto, que posteriormente sofrerá ruptura. As observações feitas nos gráficos são confirmadas na análise microscópica e macroscópica da fratura nos corpos de prova.

A tensão máxima apresenta uma variação mista entre os tratamentos, porém fica evidenciado que entre as palhas tratadas e não tratadas há um aumento significativo, isso se deve ao rearranjo das micro fibrilas, promovendo uma distribuição uniforme da carga. As palhas tratadas com 0,25 mol/L de NaOH apresentaram melhores resultados com um aumento de 58,72% em comparação com a palha sem tratamento, enquanto as palhas tratadas com 0,75 mol/L e 1,5 mol/L de NaOH apresentaram aumento de 18,07% e 19,62% respectivamente.

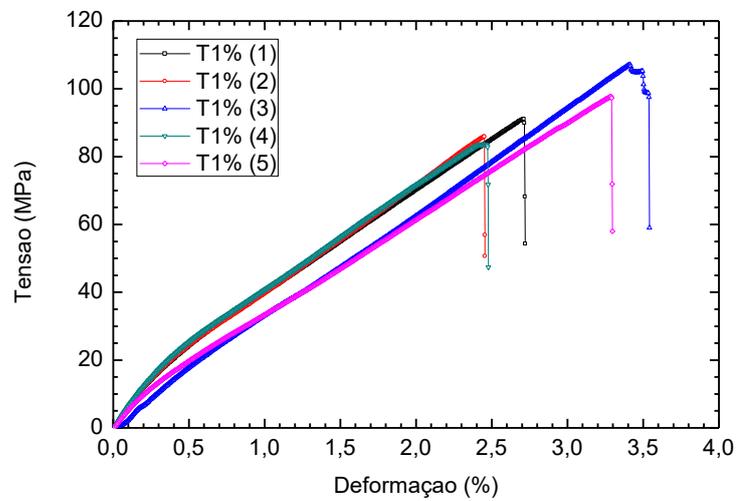
Ao comparar a deformação média das amostras sem tratamento com as amostras tratadas, observa-se que a deformação reduz com aumento da concentração de NaOH, as palhas tratadas com 0,25 mol/L; 0,75 mol/L e 1,5 mol/L reduzem em 2,26%, 16,89% e 28,25% comparada com as fibras sem tratamento. A deformação máxima reduz com o aumento da concentração de NaOH pois as palhas se tornam mais fracas e vulneráveis devido a agressividade do NaOH e as transformações na estrutura cristalina.

Figura 11 – Gráfico Tensão versus Deformação palha sem tratamento.



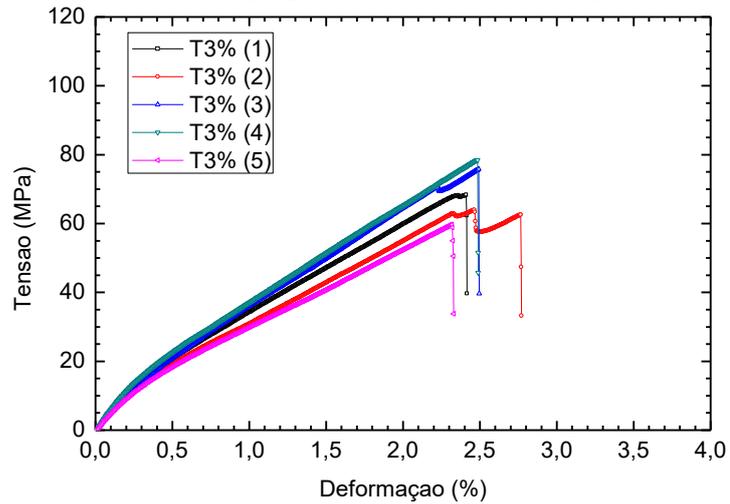
Fonte: Autor (2021).

Figura 12 – Gráfico Tensão versus Deformação palha tratada com concentração em massa de NaOH 1% (m/m).



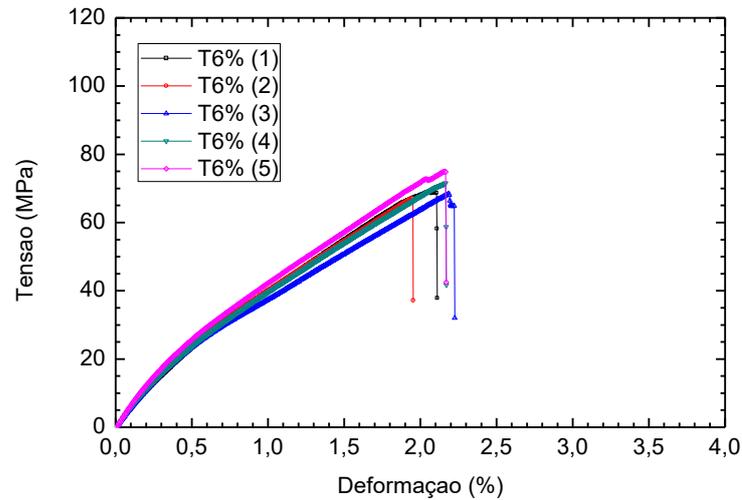
Fonte: Autor (2021).

Figura 13 – Gráfico Tensão versus Deformação palha tratada com concentração em massa de NaOH 3% (m/m).



Fonte: Autor (2021).

Figura 14 – Gráfico Tensão versus Deformação palha tratada com concentração em massa de NaOH 6% (m/m).



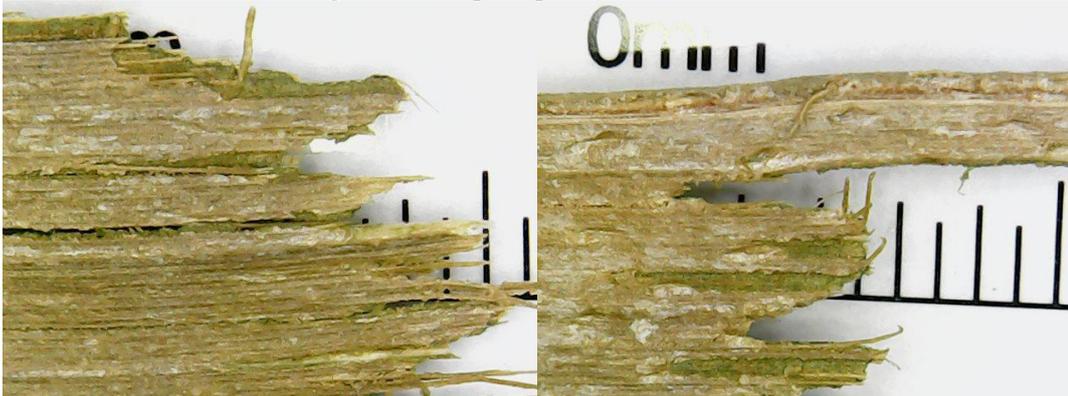
Fonte: Autor (2021).

5.1.3 Análise Microscópica da Ruptura das Fitas

A figura 15 mostra a ruptura de um corpo de prova de palha sem tratamento químico, é possível ver que a ruptura se inicia nas micro fibrilas e depois nas fibras, característico da fratura por cisalhamento, verifica-se também a presença de regiões esverdeadas nas fibras que indicam a absorção de água nos locais onde não há cera pois esta é hidrofóbica. Pode-se constatar que a imersão das palhas em água a temperatura ambiente não é eficiente para remoção da cera e impurezas devido à presença das substâncias na superfície da amostra.

As micro fibrilas estão “grudadas” devido à alta de concentração de lignina, impedindo que as micro fibrilas possam se rearranjar quando uma carga for aplicada diminuindo a tensão que pode ser aplicada. A alta concentração de lignina fortalece a fibra no que diz respeito a deformação por isso que os corpos de prova sem tratamento obtiveram melhores resultados na deformação.

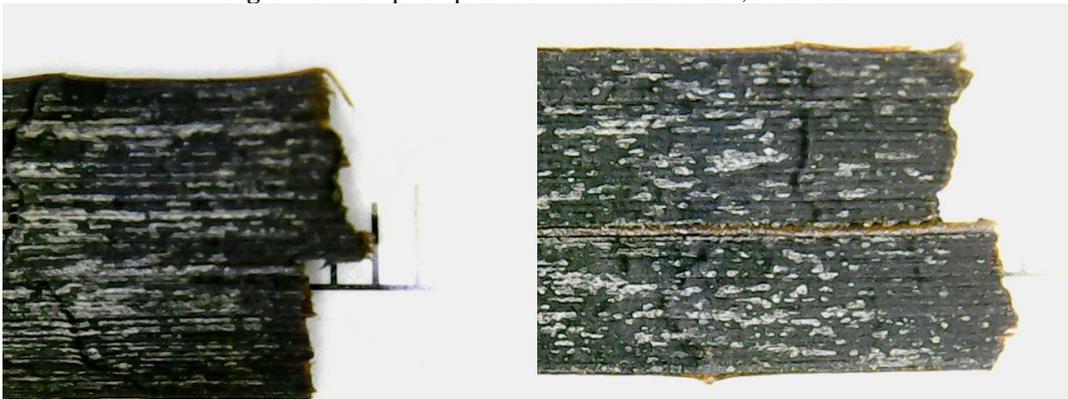
Figura 15 – Ruptura palha sem tratamento.



Fonte: Autor (2021).

A figura 16 mostra a ruptura de um corpo de prova de palha tratada com 1% de NaOH (0,25 mol/L), percebe-se que a ruptura é moderadamente dúctil, verifica-se também a presença de cera na superfície da amostra analisada e de lignina “grudando” as micro fibrilas. Comparando a figura 15 e a figura 16, constata-se a agressividade do tratamento alcalino e a mudança significativa na aparência da fibra, tornando-as mais rígidas e rugosas.

Figura 16 – Ruptura palha tratada com NaOH 0,25 mol/L.



Fonte: Autor (2021).

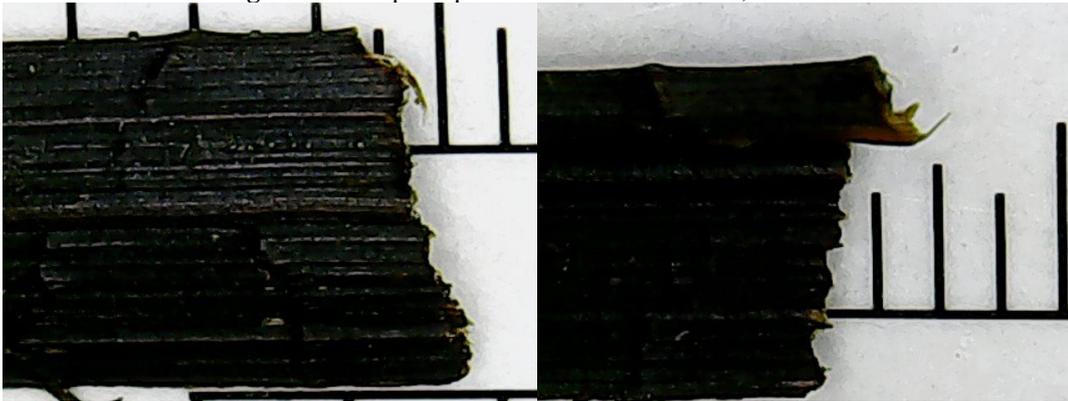
A figura 17 mostra a ruptura de um corpo de prova de fibra tratada 3% de NaOH (0,75 mol/L), caracterizada como moderadamente dúctil, verifica-se também que a cera foi removida e a lignina na superfície da amostra diminui, tornando a palha mais limpa e as fibras mais visíveis, apesar de deixar a fibra mais escura aumentando a absorção de luz.

A figura 18 mostra a ruptura de um corpo de prova de palha tratada com 6% de NaOH (1,5 mol/L), seguindo a tendência das amostras anteriores com o aumento da concentração a superfície da fibra deveria estar mais limpa de impurezas, ceras e lignina, porém

a forma como o tratamento químico foi realizado permitiu que a lignina e outras substâncias dissolvida na solução aquosa aderissem à superfície da palha, diminuindo a visibilidade das micro fibrilas e podendo pode ser um fator prejudicial a adesão com a matriz polimérica.

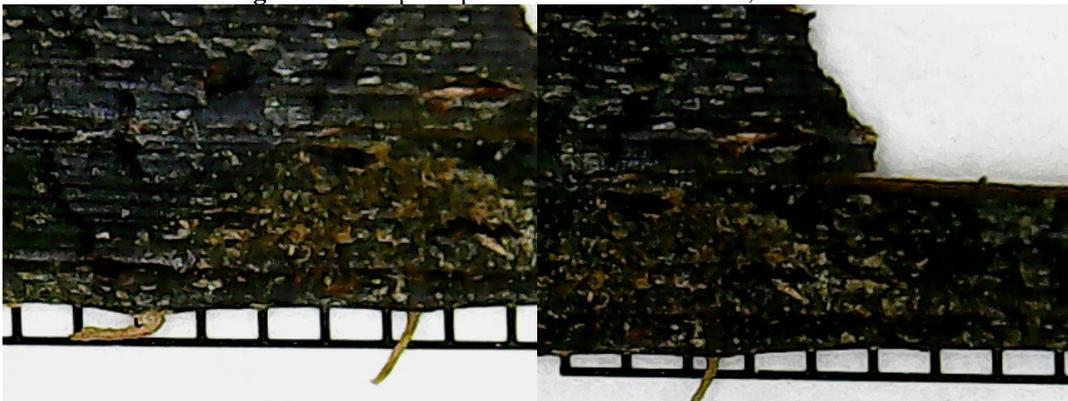
Comparando a figura 17 com a figura 18, observa-se um aumento na rigidez da palha impactando diretamente nas propriedades mecânicas.

Figura 17 – Ruptura palha tratada com NaOH 0,75 mol/L.



Fonte: Autor (2021).

Figura 18 – Ruptura palha tratada com NaOH 1,5 mol/L.



Fonte: Autor (2021).

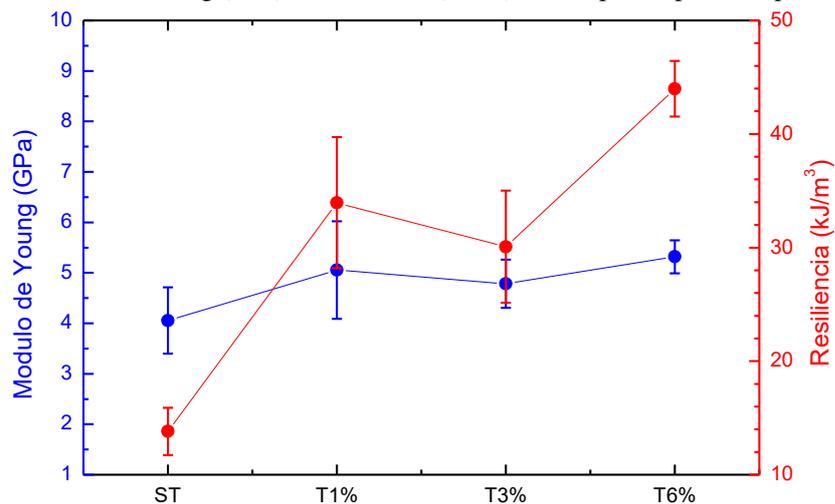
As observações visuais apresentadas neste tópico sobre o efeito do tratamento alcalino e das diferentes concentrações de NaOH nas micro fibrilas da palha de carnaúba também foram constatadas na micrografia das fibras de curauá feita por BELTRAMI et al. (2014), que notou que quanto mais intenso o tratamento alcalino maior a remoção dos componentes amorfos da superfície da fibra, expondo as micro fibrilas, promovendo aumento da rugosidade da superfície e facilitando a desfibrilação.

5.1.4 Análise das Propriedades Mecânicas das Fitas

O módulo de Young (elasticidade) e a resiliência (vide gráfico na figura 19) apresentam resultados satisfatórios comparando as palhas tratadas com as palhas sem tratamento, devido a remoção parcial da hemicelulose e da lignina aumentando a concentração de celulose permitindo o rearranjo das micro fibrilas e promovendo uma distribuição uniforme da carga. No módulo de Young os tratamentos com 0,25 mol/L, 0,75 mol/L e 1,5 mol/L apresentaram aumento respectivo de 24,69%, 18,01% e 31,21% em comparação com as fibras não tratadas. Sendo que o tratamento com 0,25 mol/L de NaOH apresenta desempenho mecânico superior aos demais.

Na resiliência os tratamentos com 0,25 mol/L, 0,75 mol/L e 1,5 mol/L apresentaram aumento respectivo de 145,72%, 117,64% e 218,32% em comparação com as fibras não tratadas. Sendo que as palhas tratadas com 1,50 mol/L de NaOH apresentaram desempenho mecânico superior pois a remoção da lignina interna é mais eficiente deixando espaço para as fibras se rearranjarem, aumentando a deformação elástica da palha.

Figura 19 – Módulo de Young (GPa) e Resiliência (kJ/m^3) dos corpos de prova da palha de carnaúba.

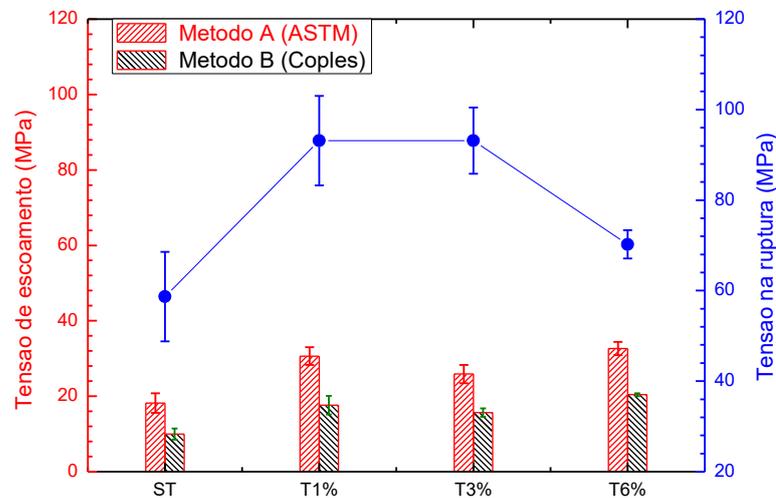


Fonte: Autor (2021).

A tensão na ruptura indica a tensão necessária para que o material se rompa, logo, resultados superiores são melhores porque o material suportará mais carga. Pelo gráfico fica evidenciado que entre as palhas tratadas e as não tratadas há um aumento visível, isso se deve a remoção da hemicelulose e da lignina que permite que as micro fibrilas se rearranjem, promovendo uma distribuição uniforme da carga. Os tratamentos com 0,25 mol/L, 0,75 mol/L

e 1,5 mol/L apresentaram aumento respectivo de 58,72%, 58,72% e 19,64% em comparação com as fibras não tratadas. Sendo que os tratamentos com 0,25 mol/L e 0,75 mol/L de NaOH apresentaram os melhores desempenhos.

Figura 20 – Tensão de escoamento (MPa) e Tensão na ruptura (MPa) dos corpos de prova da palha de carnaúba.



Fonte: Autor (2021).

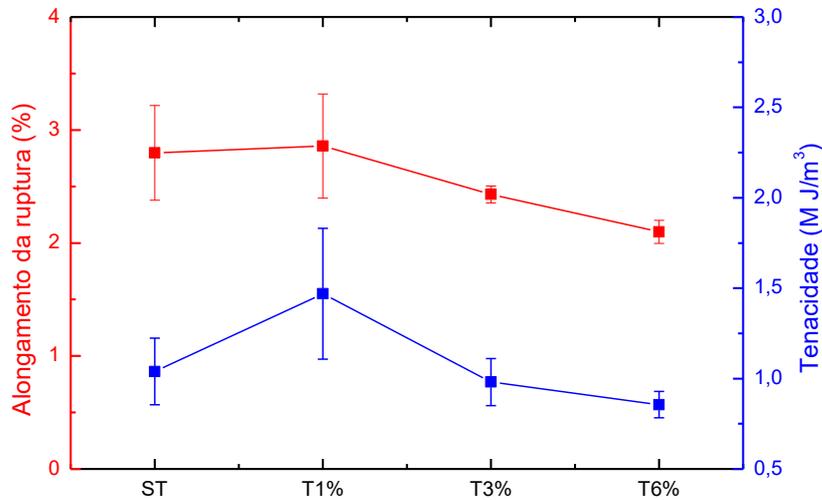
A tensão de escoamento seguindo o método ASTM os tratamentos com 0,25 mol/L, 0,75 mol/L e 1,5 mol/L apresentaram aumento respectivo de 68,49%, 42,43% e 79,59% em comparação com as fibras não tratadas. A tensão de escoamento seguindo o método Coples os tratamentos com 0,25 mol/L, 0,75 mol/L e 1,5 mol/L apresentaram aumento respectivo de 76,81%, 57,18% e 104,65% em comparação com as fibras não tratadas. Em ambos os métodos o tratamento com 1,50 mol/L de NaOH apresenta resultados superiores aos demais.

O alongamento na ruptura apresenta um leve aumento de 2,14% comparando as amostras não tratadas com as amostras tratadas com 0,25 mol/L de NaOH, e reduz 13,15% e 25,02% nos tratamentos com 0,75 mol/L e 1,5 mol/L de NaOH respectivamente. A redução é esperada porque a agressividade do hidróxido de sódio torna a palha mais rígida e quebradiça diminuindo sua deformação, já o aumento que ocorre na amostra com 0,25 mol/L de NaOH se deve ao rearranjo das fibras e das microfibrilas devido a remoção parcial da hemicelulose e da lignina. Vide figura 21.

A tenacidade apresenta o mesmo comportamento que o alongamento na ruptura tendo melhor resultado nas palhas tratadas com 1%(m/m) de NaOH com aumento de 41,46% comparado com as palhas sem tratamento e redução respectiva de 5,60% e 17,61% nos

tratamentos com 0,75 mol/L e 1,5 mol/L em comparação com as palhas não tratadas. Vide figura 21.

Figura 21 – Alongamento da ruptura (%) e Tenacidade (MJ/m³) dos corpos de prova da palha de carnaúba.



Fonte: Autor (2021).

A Tabela 2 apresenta de forma sintetizada os valores percentuais descritos anteriormente do aumento ou da redução nas propriedades mecânicas das palhas tratadas com diferentes concentrações de NaOH comparado com a palha *in natura*. Os valores com sinal negativo indicam que houve redução na propriedade analisada e as que não apresentam sinal indicam aumento.

Tabela 2– Comparativo das propriedades mecânicas da palha de carnaúba tratada com diferentes concentrações de NaOH com a palha *in natura*.

Propriedades mecânicas	ST-T1	ST-T3	ST-T6
Tensão de escoamento - ASTM (MPa)	68,49%	42,43%	79,59%
Tensão de escoamento -Coples (MPa)	76,81%	57,18%	104,65%
Resiliência (kJ/m ³)	145,72%	117,64%	218,32%
Módulo de Young (GPa)	24,69%	18,01%	31,21%
Tensão na ruptura (MPa)	58,72%	58,72%	19,64%
Alongamento da ruptura (%)	2,14%	-13,15%	-25,02%
Tenacidade (MJ/m ³)	41,46%	-5,60%	-17,61%

Fonte: Autor (2021).

As propriedades mecânicas mostradas nas Figuras 19,20 e 21 e na Tabela 2 são resultado da média aritmética de 5 corpos de prova e apresentam o desvio padrão das amostras consequência de erros mecânicos de operação, erros associados a máquina de ensaios e devido à alta variabilidade das propriedades mecânicas das fibras.

Os resultados obtidos para as palhas de carnaúba sem tratamento são similares aos apresentados na literatura em FERNANDES et al. (2011), tendo maior diferença na tensão de ruptura. A Tabela 3 mostra o comparativo entre as propriedades mecânicas obtidas nesta pesquisa e os resultados disponíveis na literatura:

Tabela 3 – Comparativo das propriedades mecânicas da palha de carnaúba sem tratamento obtidas nesse trabalho com a literatura.

Propriedades mecânicas	FERNANDES et al. (2011)	Presente trabalho
Módulo de Young (GPa)	4,91	4,05
Tensão na Ruptura (MPa)	84,5	58,69
Alongamento da ruptura (%)	2,93	2,8

Fonte: Autor (2021).

Vale ressaltar que essa variabilidade é esperada pois as propriedades mecânicas das fibras vegetais variam conforme as condições do local de plantio, da idade da planta e do processo de extração (MOHANTY; MISRA; DRZAL, 2001).

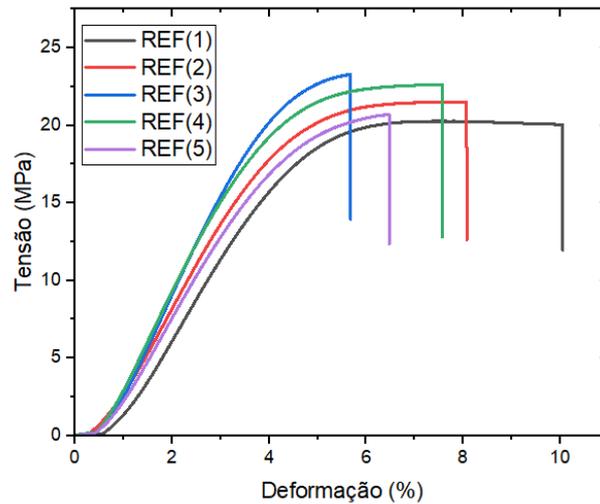
5.2 Compósito de Matriz Polimérica Reforçado com Trançado de Carnaúba

5.2.1 Ensaio de Tração

Na Figura 22 é apresentado o gráfico correspondente as amostras de referência do polímero, na Figura 23 o gráfico do compósito reforçado com a palha de carnaúba *in natura* e na Figura 24 o gráfico do compósito reforçado com a palha tratada com de 5% de NaOH (1,25 mol/L), nessas amostras a ruptura foi do tipo frágil, fator verificado também na análise macroscópica do corpo de prova, entretanto, o comportamento do gráfico dos compósitos é diferente ao da amostra de referência.

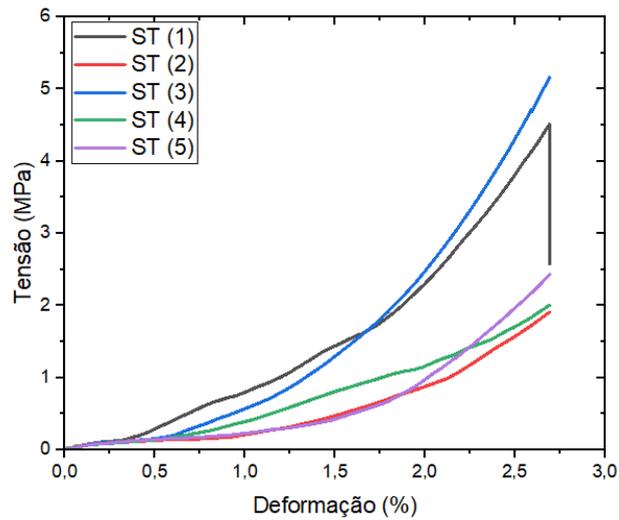
O compósito com reforço da palha *in natura* e com a palha tratada, apresenta ruptura mais brusca com pouca deformação elástica, enquanto na amostra de referência as regiões elástica e plástica estão melhor definidas.

Figura 22 – Gráfico Tensão versus Deformação amostra de referência do polímero.



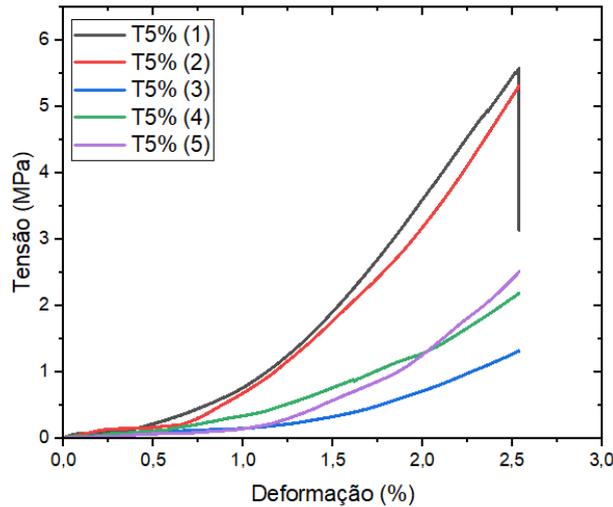
Fonte: Autor (2021).

Figura 23 – Gráfico Tensão versus Deformação compósito com a palha *in natura*.



Fonte: Autor (2021).

Figura 24 – Gráfico Tensão versus Deformação compósito com a palha tratada com concentração em massa de 5% de NaOH.



Fonte: Autor (2021).

A tensão máxima apresenta uma redução acentuada de 71,89% na tensão máxima comparando a amostrada de referência com os compósitos reforçados com palha *in natura* e de 77,69% com a palha tratada.

Outras pesquisas também observaram redução na tensão máxima a tração comparando amostras com apenas resina e amostras com reforço de palha de carnaúba. Souza, Souza e Pereira Neto (2020), analisou compósitos de resina poliéster e pó de pecíolos de folha de carnaúba e constatou que com o aumento da concentração do pó a tensão máxima reduzia.

Na deformação máxima a redução comparando a amostra sem reforço com a reforçada com a palha *in natura* e com a palha tratada foi de 59,72% e 60,39%, respectivamente. Souza, Souza e Pereira Neto (2020), observou comportamento idêntico ao da resistência na deformação à tração, onde os compósitos apresentaram menores valores do que a matriz e maiores reduções com o aumento da concentração do pó.

Os valores obtidos no ensaio de tração do compósito são inferiores aos dos ensaios do polímero sem reforço, isso ocorre pois o reforço assim disposto (tecido trançado perpendicularmente) se comporta como defeito e fragiliza a matriz, reduzindo a resistência mecânica do compósito (CERCHIARO, 2010).

Os compósitos reforçados apresentaram um mecanismo de fratura bastante complexo, envolvendo mecanismos de falhas como ruptura da palha/fibra, trincamento da matriz e descolamento da palha/fibra, comportamento similar ao descrito por Oliveira, Toledo e Mulinari (2014) para compósito híbrido de fibra de sisal e fibra de vidro.

5.2.2 Análise Microscópica da Ruptura dos Compósitos

Na figura 25 temos a análise microscópica da ruptura de um corpo de prova de compósito com palha sem tratamento químico submetido a ensaio de tração, é possível ver que a ruptura é do tipo frágil e que houve falha na matriz, pois é possível verificar que a ruptura ocorreu na fase matriz (resina) e o agente de reforço (palha) não se rompeu, indicando que possivelmente a aderência da fase reforço e da matriz não foi tão efetiva.

Figura 25– Ruptura compósito com palha *in natura*.



Fonte: Autor (2021).

A Figura 26 mostra a ruptura de um corpo de prova de compósito com palha tratada com 5% de NaOH (1,25 mol/L) submetido a ensaio de tração, percebe-se que a ruptura é frágil e a aderência da fase reforço e da matriz foi maior, fator verificado devido a ruptura das duas fases em conjunto.

Figura 26– Ruptura compósito com palha tratada com 5% de NaOH (1,25 mol/L).



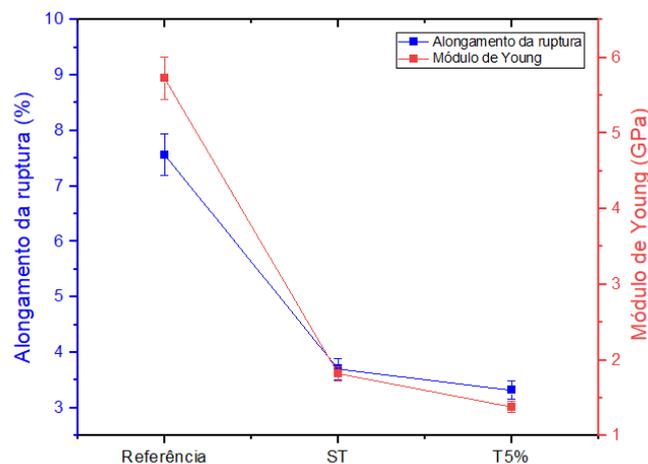
Fonte: Autor (2021).

5.2.3 Análise das Propriedades Mecânicas Compósitos

O alongamento da ruptura e o módulo de Young (elasticidade) (vide figura 27) apresentam redução comparando a amostra de referência do polímero e as amostras do compósito com palhas tratadas e com as palhas *in natura*, devido a inserção do reforço que como visto na análise dos gráficos de tensão versus deformação se caracterizou como defeito.

No alongamento da ruptura as amostras do compósito com palha *in natura* e com palha tratada com 1,25 mol/L apresentaram redução respectivo de 51,06% e 56,12% em comparação com amostra de referência. No módulo de Young as amostras do compósito com palha *in natura* e com palha tratada com 1,25 mol/L apresentaram redução respectivo de 68,20% e 75,88% em comparação com amostra de referência.

Figura 27 – Alongamento da ruptura (MPa) e Módulo de Young (GPa) dos corpos de prova da amostra de referência e do compósito.

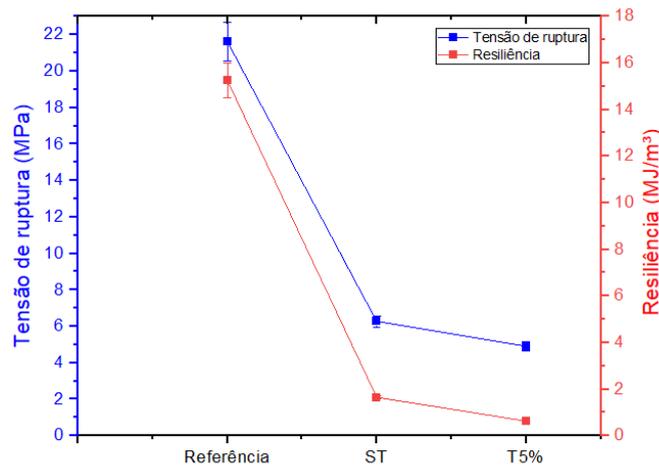


Fonte: Autor (2021).

A tensão na ruptura (figura 28) também foi influenciada de forma negativa com a adição do reforço na matriz, ou seja, o material reforçado suporta menos carga que o polímero. O compósito com palha *in natura* e com palha tratada com 1,25 mol/L apresentaram redução respectiva de 71,00% e 77,28% em comparação com a amostra de referência.

A resiliência (figura 28) também reduziu drasticamente com a adição do reforço, devido à redução na deformação elástica do material e na amostra com a palha tratada a degradação da fibra também foi um fator que contribuiu para essa redução. O compósito com palha *in natura* e com palha tratada com 1,25 mol/L apresentaram redução respectiva de 89,18% e 95,89% comparado com amostra de referência.

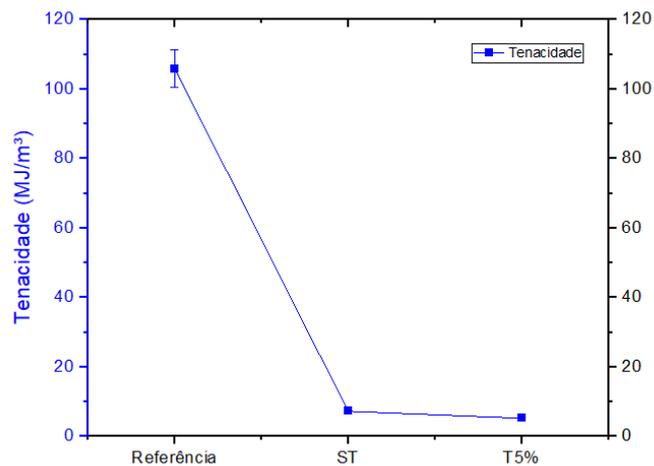
Figura 28 –Tensão na ruptura (MPa) e Resiliência (MJ/m³) dos corpos de prova da amostra de referência e do compósito.



Fonte: Autor (2021).

A tenacidade (figura 29) apresenta o mesmo comportamento das demais propriedades, o compósito com palha *in natura* e com palha tratada com 1,25 mol/L apresentaram redução respectiva de 93,16% e 95,08% comparado com a amostra do polímero.

Figura 29 –Tenacidade (MJ/m³) dos corpos de prova da amostra de referência e do compósito.



Fonte: Autor (2021).

A Tabela 4 apresenta os valores percentuais descritos acima em relação a redução nas propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com trançado de palha *in natura* e trançado de palha tratada com 5% em massa de NaOH comparado com a amostra de referência do polímero.

Tabela 4– Comparativo das propriedades mecânicas do compósito reforçado com o trançado de palha de carnaúba *in natura* e com a palha tratada com 5% em massa de NaOH com a amostra do polímero.

Propriedades mecânicas	REF-ST	REF-T5%
Alongamento da ruptura (%)	-51,06%	-56,12%
Tenacidade (MJ/m³)	-93,16%	-95,08%
Módulo de Young (GPa)	-68,20%	-75,88%
Resiliência (MJ/m³)	-89,18%	-95,89%
Tensão de ruptura (MPa)	-71,00%	-77,28%

Fonte: Autor (2021).

As propriedades mecânicas mostradas nas figuras acima são resultado da média aritmética de 5 corpos de prova e apresentam variação devido diversos fatores como por exemplo o método de fabricação empregado que foi totalmente manual, a disposição do reforço no compósito e a interação da interface matriz/fibra influenciado principalmente pela presença de camadas superficiais de cera na palha. Além das variações da própria palha de carnaúba devido suas características heterogêneas, como todas as fibras vegetais.

6 CONCLUSÕES

As palhas *in natura* apresentam ruptura semelhante a um tecido e de forma fragmentada, e nas palhas tratadas à medida que se aumenta a concentração de NaOH, a ruptura se torna mais brusca, devido ao aumento da rigidez da palha e a distribuição da carga.

Na análise das propriedades mecânicas das palhas houve redução na tenacidade e no alongamento da ruptura com o aumento da concentração do NaOH devido a agressividade do tratamento, deixando as palhas mais fracas e quebradiças, mesmo assim o tratamento se mostrou eficiente pois influenciou positivamente na resiliência, módulo de elasticidade, tensão de ruptura e de escoamento.

A resiliência e a tensão de escoamento apresentam melhores resultados no tratamento com 1,5 mol/L de NaOH pois ocorre uma maior remoção de lignina e hemicelulose, deixando espaço para as fibras se rearranjarem. Entretanto, considerando as propriedades de forma geral, o tratamento com 0,25 mol/L de NaOH apresentou resultados mais positivos, pois há remoção parcial da lignina e da hemicelulose, com menor degradação da celulose e da palha.

Comparando a amostra de referência do polímero com o compósito houve redução em todas as propriedades mecânicas analisadas, podendo ser resultado da fraca interação matriz/reforço, permitindo a formação de concentradores de tensão e/ou pela estrutura do reforço, pois como observado neste trabalho e na literatura, o reforço se comporta como defeito e fragiliza a matriz.

Com este trabalho, foi verificado o potencial da palha de carnaúba para reforço de materiais compósitos. Entretanto, se mostra necessário avaliar outras formas de confecção de compósitos, variando a concentração e a distribuição do reforço na matriz, determinando seu desempenho mecânico. Também deve ser levado em conta a necessidade de aumentar a interação reforço/matriz prejudicada principalmente pela camada superficial de cera presente na palha.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 3039/D 3039M**: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken, 2014. 13 p.

BALZER, Palova S. *et al.* Estudo das propriedades mecânicas de um composto de PVC modificado com fibras de bananeira. **Polímeros**, São Carlos, v. 17, n. 1, p.1-4, mar. 2007. [Http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282007000100004](http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282007000100004).

BARBOSA, Francisca; COSTA, Ana Mônica de Britto; SILVA, Fernando Moreira da. Cooperativa Carnaúba Viva: preservação e valorização da caatinga para o desenvolvimento sustentável do semiárido brasileiro. **Sociedade e Território**, Natal, v. 21, n. 1-2, p. 68-80, jan/dez 2009.

BELTRAMI, Lilian Vanessa Rossa *et al.* Efeito do tratamento alcalino de fibras de curauá sobre as propriedades de compósitos de matriz biodegradável. **Polímeros Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 24, n. 3, p.388-394, 23 jan. 2014. <http://dx.doi.org/10.4322/polimeros.2014.024>.

CALEGARI, Eliana Paula; OLIVEIRA, Branca Freitas de. Compósitos a partir de materiais de fontes renováveis como alternativa para o desenvolvimento de produtos. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 7, n. 1, p.140-155, 28 mar. 2016. [Http://dx.doi.org/10.18472/sustdeb.v7n1.2016.17623](http://dx.doi.org/10.18472/sustdeb.v7n1.2016.17623).

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G.. **Ciência e Engenharia de Materiais**: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2016. 910 p. Tradução: Sergio Murilo Stamile Soares.

CÂMARA SETORIAL DA CARNAÚBA - CEARÁ. **A Carnaúba**: preservação e sustentabilidade. Fortaleza: 2009. 40 p. Disponível em: http://www.sfipec.org.br/porta1v2/sites/sindicarnauba/files/Brochura_Carna%C3%BAbA2.pdf.

CARVALHO, Luiz Fernando Meneses. **TRATAMENTOS DE FIBRAS DE CARNAÚBA [COPERNICIA PRUNÍFERA (MILLER) H. E. MOORE] PARA O DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO BIODEGRADÁVEL COM MATRIZ DE POLIHIDROXIBUTIRATO**. 2011. 109 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal, 2011.

CASARIL, Alexandre *et al.* Análise micromecânica dos compósitos com fibras curtas e partículas. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 408-419, 2007.

CERCHIARO, Jorge Ruben. **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS COM POLIÉSTER E TECIDOS DE SISAL POR MOLDAGEM MANUAL**. 2010. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental Urbana, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

CERRATINGA. **Espécie da Caatinga**. Foto: DoDesign-s. Disponível em: <https://www.cerratinga.org.br/especies/carnauba/>. Acesso em: 09 nov. 2021.

COSTA, Deibson Silva da. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS GERADOS PELA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO NAS PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS**. 2016. 229 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Recursos Naturais, Instituto de Tecnologia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia - Proderna, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

D'ALVA, Oscar Arruda. **O EXTRATIVISMO DA CARNAÚBA NO CEARÁ**. 2004. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

FERNANDES, Janaina Rodrigues *et al.* Nanopartículas de sílica silanizada como compatibilizante em compósitos de fibras de sisal/polietileno. **Polímeros**, [S.L.], v. 27, p. 61-69, 26 jan. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2249>.

FERNANDES, Jéssica Emanuela *et al.* Carnauba straw: Characterization and chemical treatments. **Journal Of Applied Polymer Science**, Lagoa Nova, v. 122, n. 3, p. 1614-1621, 31 maio 2011. <Http://dx.doi.org/10.1002/app.33882>.

GOMES, José Almir Ferreira *et al.* Resíduo agroindustrial da carnaúba como fonte de volumoso para a terminação de ovinos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 1, p. 58-67, jan. 2009.

GONÇALVES, Fernando Antonio de Castro *et al.* Fibras Vegetais: aspectos gerais, aproveitamento, inovação tecnológica e uso em compósitos. **Espacios**, [s. l], v. 39, n. 6, p. 12, 2018.

IBGE. **Tabela 289 - Quantidade produzida e valor da produção na extração vegetal, por tipo de produto extrativo**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/289#resultado>. Acesso em: 02 nov. 2021.

KOTIK, Hector Guillermo. Fibras naturais e compósitos reforçados com fibras naturais: a motivação para sua pesquisa e desenvolvimento. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, 2019.

LI, Xue; TABIL, Lope G.; PANIGRAHI, Satyanarayan. Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review. **Journal Of Polymers And The Environment**, Canadá, v. 15, n. 1, p.25-33, 4 jan. 2007. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10924-006-0042-3>.

MAHAJAN, G.v.; AHER, V. S.. Composite Material: A Review over Current Development and Automotive Application. **International Journal Of Scientificand Research Publications**, Sangamner, v. 2, n. 11, p.1-5, nov. 2012.

MARINELLI, Alessandra L. *et al.* Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica.

Polímeros, São Carlos, v. 18, n. 2, p.92-99, jun. 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282008000200005>.

MIRANDA, Cleidiane S. *et al.* EFEITO DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS NAS PROPRIEDADES DO BAGAÇO DA FIBRA DE PIAÇAVA *Attalea Funifera* Martius. **Química Nova**, São Paulo, v. 38, n. 2, p. 161-165, 2015. GN1 Genesis Network. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20140303>.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T.. Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: an overview. **Composite Interfaces**, East Lansing, v. 8, n. 5, p. 313-343, 2001.

MOREIRA, Tatiana Martinez; SEO, Emília Satoshi Miyamaru. Obtenção e caracterização de polímero reforçado com fibras da folha de milho. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 4, p. 1054-1068, dez. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620160004.0097>.

MOTHÉ, Cheila G.; ARAUJO, Carla R. de. Caracterização Térmica e Mecânica de Compósitos de Poliuretano com Fibras de Curauá. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 4, p. 274-278, 2004.

MÜLLER, Anna Cecília. **PROCEDIMENTOS PARA GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE CARÁTER ÁCIDO, BÁSICO E SOLVENTES HALOGENADOS GERADOS NO LABORATÓRIO DE QUÍMICA-CEFET/ARAXÁ**. 2016. 40 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Minas Construção Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais Unidade Araxá, Araxá, 2016.

OLIVEIRA, Éric Neves Cotrim Castro de; TOLEDO, Gustavo de Oliveira; MULINARI, Daniella Regina. Desenvolvimento de compósitos poliméricos para aplicação em carenagem. **Cadernos Unifoa**, Volta Redonda, v. 9, n. 1, p. 57-63, set. 2014. Edição Especial Engenharia de Produção.

PINHEIRO, Marco Antonio Santos. **COMPÓSITOS REFORÇADOS POR TECIDOS**. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 1, p. 9-18, 2000.

PIRES, Ana Luiza R.; BIERHALZ, Andréa C. K.; MORAES, Ângela M.. BIOMATERIAIS: tipos, aplicações e mercado. **Química Nova**, São Paulo, v. 38, n. 7, p. 957-971, 2015. GN1 Genesis Network. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20150094>.

PIRES, Eduardo N. *et al.* Efeito do tratamento alcalino de fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi. **Polímeros**, Santa Catarina, v. 22, n. 4, p. 339-344, 28 ago. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282012005000053>.

PUKÁNSZKY, Béla. Interfaces and interphases in multicomponent materials: past, present, future. **European Polymer Journal**, Budapeste, v. 41, n. 4, p.645-662, abr. 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2004.10.035>.

RAYMUNDO, Emerson Augusto *et al.* Análise de absorção de água em compósito de polímero reforçado com fibras naturais. **Cadernos Unifoa**, São Paulo, p. 23-28, jun. 2012. Edição Especial do Curso de Mestrado Profissional em Materiais.

RODRIGUES, Jean; SOUZA, José Antônio; FUJIYAMA, Roberto. Compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais da Amazônia fabricados por infusão. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 4, p. 946-960, dez. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620150004.0099>.

RONG, Min Zhi *et al.* The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. **Composites Science And Technology**, Guangzhou, v. 10, n. 61, p. 1437-1447, 2001.

SILVA, Rosana Vilarim da. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 157 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SOUSA, Rodrigo Ferreira de *et al.* ETNOECOLOGIA E ETNOBOTÂNICA DA PALMEIRA CARNAÚBA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. **CERNE**, Macaíba, v. 21, n. 4, p. 587-594, dez. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201521041764>.

SOUZA, Luiz Guilherme Meira de; SOUZA, Ricardo Fernandes de; PEREIRA NETO, Raimundo Vicente. Obtaining, characterizing and applying a Composite with Polyester Resin and Carnauba Leaf Petioles Powder. **Research, Society And Development**, Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 9, p. 1-25, ago. 2020.

SYMINGTON, Mark C. et al. Tensile Testing of Cellulose Based Natural Fibers for Structural Composite Applications. **Journal Of Composite Materials**, Glasgow, v. 43, n. 9, p.1083-1108, 29 jan. 2009. <http://dx.doi.org/10.1177/0021998308097740>.

VENTURA, Ana Mafalda F.M.. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. **C.Tecn. Mat**, Lisboa, v. 21, n. 3-4, p.10-19, jul. 2009.

ZINI, Elisa; SCANDOLA, Mariastella. Green composites: An overview. **Polymer Composites**, Bologna, v. 32, n. 12, p.1905-1915, 4 nov. 2011. <Http://dx.doi.org/10.1002/pc.21224>.