



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

LARISSA MOREIRA BARBOSA

**EFEITO DO TRATAMENTO ALCALINO E A PLASMA DAS FIBRAS DE SISAL
NAS PROPRIEDADES DE TRAÇÃO DE BIOCOMPÓSITOS A BASE DE FÉCULA
DE MANDIOCA**

MOSSORÓ-RN

2021

LARISSA MOREIRA BARBOSA

**EFEITO DO TRATAMENTO ALCALINO E A PLASMA DAS FIBRAS DE SISAL
NAS PROPRIEDADES DE TRAÇÃO DE BIOCOMPÓSITOS A BASE DE FÉCULA
DE MANDIOCA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, PPgCEM, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, UFERSA, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciências e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Klebson Gomes dos Santos

Co-Orientador: Prof. Dr. Ricardo Henrique de Lima Leite

MOSSORÓ-RN

2021

LARISSA MOREIRA BARBOSA

**EFEITO DO TRATAMENTO ALCALINO E A PLASMA DAS FIBRAS DE
SISAL NAS PROPRIEDADES DE TRAÇÃO DE BIOCOMPÓSITOS A BASE
DE FÉCULA DE MANDIOCA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, PPgCEM, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, UFERSA, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciências e Engenharia de Materiais.

Defendida em: 27 / 02 / 2021.

BANCA EXAMINADORA

FRANCISCO KLEBSON
GOMES DOS
SANTOS:00779263405

Assinado de forma digital por
FRANCISCO KLEBSON GOMES DOS
SANTOS:00779263405
Dados: 2021.04.07 15:48:44 -03'00'

Francisco Klebson Gomes dos Santos, Prof. Dr. (UFERSA)

Orientador
RICARDO HENRIQUE DE
LIMA
LEITE:52264343400

Assinado de forma digital por
RICARDO HENRIQUE DE LIMA
LEITE:52264343400
Dados: 2021.04.07 15:36:00 -03'00'

Ricardo Henrique de Lima Leite, Prof. Dr. (UFERSA)

Coorientador
ANDARAIR GOMES DOS
SANTOS:02813010421

Assinado de forma digital por ANDARAIR
GOMES DOS SANTOS:02813010421
Dados: 2021.04.07 15:41:45 -03'00'

Andarair Gomes dos Santos, Prof^a. Dr^a. (UFERSA)
Membro Examinador Interno ao Programa

Francisco Edson Nogueira
Fraga

Assinado digitalmente por Francisco Edson Nogueira Fraga
DN: C=BR, CN=Francisco Edson Nogueira Fraga, E=enfraga@ufersa.edu.br
Razão: Eu estou aprovando este documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2021.04.07 09:46:50 -03'00'
Foxit Reader Versão: 10.1.1

Francisco Edson Nogueira Fraga, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador Externo ao Programa

RENATA
BARBOSA:02462231463

Assinado de forma digital por
RENATA BARBOSA:02462231463
Dados: 2021.04.06 11:48:22 -03'00'

Renata Barbosa, Prof^a. Dr^a. (UFPI)
Membro Examinador externo à Instituição

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

B223e Barbosa, Larissa Moreira.

EFEITO DO TRATAMENTO ALCALINO E A PLASMA DAS
FIBRAS DE SISAL NAS PROPRIEDADES DE TRAÇÃO DE
BIOCOMPÓSITOS A BASE DE FÉCULA DE MANDIOCA /

Larissa Moreira Barbosa. - 2021.

39 f. : il.

Orientador: Francisco Klebson Gomes dos
Santos.

Coorientador: Ricardo Henrique de Lima Leite.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal

Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais, 2021.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

A Deus, pela sua infinita misericórdia, por sua proteção e pelo seu amor.

Dedico aos meus pais que sempre me deram apoio para lutar e conquistar meus sonhos. Que nos momentos mais difíceis me deram todo o seu amor para que eu não desistisse e sempre acreditaram na minha capacidade para concluir mais este degrau. Sem eles eu não seria nada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a UFERSA e ao PPGCEM pela oportunidade e por todo auxílio ao longo dos 24 meses.

Agradeço ao meu orientador, Francisco Klebson, que teve toda paciência e calma para me ouvir, me orientar, me ensinar e me ajudar em todas as etapas enfrentadas durante esse tempo de pesquisa.

Agradeço também ao professor, Ricardo Leite, por ser meu coorientador, por me ajudar no desenvolvimento desse trabalho. Também agradeço a todos os professores que contribuíram de alguma forma no processo de desenvolver e finalizar a pesquisa.

Agradeço a Leonardo, Jussier, Gustavo, Fabrício e Bruno, ambos técnicos de laboratório, por me auxiliar em toda a parte experimental da pesquisa.

Finalizo agradecendo ao Laboratório de Pós-Colheita, ao Laboratório de Fitotecnia, ao Laboratório de Processos Químicos, LabPlasma e ao Laboratório de Ensaio, todos da UFERSA por total apoio no desenvolvimento da pesquisa.

“A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro”.

Albert Einstein

RESUMO

O crescente apelo ambiental desencadeia cada vez mais estudos para a substituição de produtos petroquímicos por produtos biodegradáveis e oriundos de fontes renováveis, de forma a buscar o desenvolvimento sustentável do planeta. Com isso, o uso de materiais plásticos naturais, como o amido e a quitosana, vem sendo incentivado e aperfeiçoado para se obter um melhor desempenho. Uma forma de aumentar o desempenho dos plásticos naturais é o uso de fibras naturais em materiais compósitos poliméricos para modificar suas propriedades mecânicas. Neste trabalho foi desenvolvido um biocompósito proveniente de fécula de mandioca e de fibra de sisal, onde as propriedades mecânicas de limite de resistência a tração, alongamento e módulo de elasticidade foram analisadas. Foi realizado, primeiramente, um estudo das condições de secagem do material, analisando a interferência da modificação da temperatura de secagem em relação as propriedades. Foi realizado também um planejamento experimental, DIC (Delineamento Inteiramente Casualizado), variando o teor de fécula e de fibra para escolher a melhor composição de acordo com as propriedades mecânicas. E por último, a fibra de sisal foi tratada de forma química, com hidróxido de sódio em uma concentração de 5% e de forma física, com plasma tipo DBS (descarga dielétrica de barreira) em uma pressão atmosférica e utilizando os gases atmosférico. Os biocompósitos constituídos de fécula de mandioca e fibra de sisal foram produzidos e em seguida foram realizados ensaios mecânicos e morfológicos para observar a alteração das propriedades mecânicas e a interação da fibra com a matriz. Os resultados mostraram que apenas o módulo de elasticidade tem mudança significativa em relação a variação de temperatura. Dentro da análise do planejamento experimental observou-se que a proporção 85% de fécula de mandioca, 5% de fibra de sisal e 10% de glicerol obteve melhores propriedades. O tratamento da fibra com plasma foi o mais adequado, devido às melhorias em suas propriedades mecânicas; em contrapartida, o compósito com fibra tratada com NaOH não teve alterações relevantes em suas propriedades em comparação com a fibra *in-natura*, deixando o material mais frágil.

Palavras-chave: Tratamento com NaOH. Tratamento com plasma. Condições de secagem. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The growing environmental appeal is triggering more and more studies to replace petrochemical products with biodegradable products from renewable sources, in order to seek the sustainable development of the planet. With this, the use of natural plastic materials, such as starch and chitosan, has been encouraged and improved to obtain a better performance. One way to increase the performance of natural plastics is to use natural fibers in polymeric composite materials to modify their mechanical properties. In this work, a biocomposite from cassava starch and sisal fiber was developed, where the mechanical properties of limit of tensile strength, elongation and modulus of elasticity were analyzed. First, a study of the drying conditions of the material was carried out, analyzing the interference of the drying temperature modification in relation to the properties. An experimental design was also carried out, DIC (Fully Randomized Design), varying the starch and fiber content to choose the best composition according to the mechanical properties. Finally, the sisal fiber was chemically treated, with sodium hydroxide in a concentration of 5% and physically, with plasma type DBS (barrier dielectric discharge) at atmospheric pressure and using atmospheric gases. The biocomposites made up of cassava starch and sisal fiber were produced and then mechanical and morphological tests were carried out to observe the change in the mechanical properties and the interaction of the fiber with the matrix. The results showed that only the modulus of elasticity has a significant change in relation to the temperature variation. Within the analysis of the experimental design it was observed that the proportion 85% of cassava starch, 5% of sisal fiber and 10% of glycerol obtained better properties. The treatment of the fiber with plasma was the most adequate, due to the improvements in its mechanical properties; on the other hand, the composite with fiber treated with NaOH had no relevant changes in its properties in comparison with the natural fiber, leaving the material more fragile.

Keywords: NaOH treatment. Plasma treatment. Drying conditions. Mechanical properties.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 PLÁSTICOS	14
2.2 BIOPLÁSTICOS	15
2.3 BIOCOMPÓSITOS	16
2.4 TRATAMENTO DAS FIBRAS	17
2.5 APLICAÇÃO DE BIOCOMPÓSITOS	18
2.6 ESTADO DA ARTE.....	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 REAGENTES E EQUIPAMENTOS.....	21
3.2 CONDIÇÕES DE SECAGEM DO MATERIAL.....	21
3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	21
3.4 TRATAMENTO DA FIBRA DE SISAL	22
3.4.1 Tratamento químico com NaOH	22
3.4.2 Tratamento físico com plasma	23
3.5 OBTEÇÃO E CONFECÇÃO DOS BIOCOMPÓSITOS.....	23
3.5.1 Obtenção dos biocompósitos.....	23
3.5.2 Confecção dos corpos de prova.....	24
3.6 CARACTERIZAÇÕES DO MATERIAL	24
3.6.1 Espessura dos biocompósitos	24
3.6.2 Propriedades mecânicas	25
3.6.3 Análise estatística.....	25
3.6.4 Análise morfológica	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4.1 CONDIÇÕES DE SECAGEM DO MATERIAL.....	26
4.2 ANÁLISE DA PORCENTAGEM DE FIBRA DE SISAL NO BIOCOMPÓSITO	27

4.3 TRATAMENTO DAS FIBRAS	28
5 CONCLUSÃO.....	32
REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

Com o possível esgotamento das fontes de recursos petrolíferos e com o fato de que o desenvolvimento sustentável está se tornando cada vez mais uma questão prioritária, o uso de biopolímeros provenientes de recursos renováveis vem se tornando imprescindível (SINGH *et al.*, 2017). Além disso, o uso de biopolímeros é impulsionado pela questão da poluição ambiental causada pelos plásticos e seus derivados.

Os plásticos são classificados como polímeros, os quais possuem propriedades diversas, como durabilidade, resistência, leveza e transparência (COLE *et al.*, 2011). Em contrapartida, demoram a se decompor, passando muito tempo no meio ambiente. Os plásticos se degradam de diferentes formas: térmica, química e mecânica (GANGADOO *et al.*, 2020).

O plástico se degrada e se transforma em microplásticos, que são materiais fragmentados com tamanho inferior a 5mm, com diferentes densidades, composição, cor e forma (DUIS; COORS, 2016). Os microplásticos estão cada vez mais presentes no meio ambiente, principalmente em ambientes marinhos, onde a presença desses corpos está causando altas concentrações e potencializando efeitos negativos na vida marinha e nos processos ecológicos (GUZZETTI *et al.*, 2018).

O nível de toxicidade dos microplásticos é alto, podendo causar inúmeros problemas para os seres vivos. Os animais marinhos confundem o microplástico com algas e plânctons, causando problemas intestinais, respiratórios, dentre outros; outro exemplo de dano é que a alta concentração desse material plástico em ambiente aquático interfere na incidência da luz solar na água, onde algas e outros seres vivos necessitam para sua sobrevivência; nos seres humanos pode causar doenças respiratórias e cardiovasculares (LU *et al.*, 2019; PRATA, 2018).

Os biopolímeros são materiais biodegradáveis, onde o prefixo “bio” significa que estes são produzidos por organismos vivos (GEORGE *et al.*, 2020). Esse tipo de material possui propriedades mecânicas inferiores aos de origem sintética, contudo uma das alternativas para melhorar essas propriedades é a introdução de uma fibra para formar um compósito (SINGH *et al.*, 2017). Riedel e Nickel (2002) sugerem que as fibras servem como reforço e possuem características mecânicas altas, como a resistência à tração e a dureza, além de outras propriedades interessantes, como estabilidade térmica, comportamento dinâmico, preço e custos de processamento.

Estudos vêm sendo realizados onde fibras sintéticas estão sendo substituídas por fibras naturais, deixando o compósito totalmente biodegradável, onde tanto a fibra (reforço) quanto o

polímero (matriz) são oriundos de recursos naturais e recebem o nome de biocompósito (KARTHI *et al.*, 2020; MADHU *et al.*, 2020; SINGH *et al.*, 2017; REDDY; YOGANANDAM; MOHANAVEL, 2020).

Verma e Gope (2013) sugerem que alguns compósitos de fibras naturais possuem propriedades mecânicas semelhantes aos compósitos que utilizam a fibra sintética de vidro; esse tipo de fibra sintética apresenta alguns pontos negativos, tanto por ser um material poluente, que demora para se degradar na natureza, como por seu alto custo para confecção. As principais fibras naturais utilizadas como reforço são: sisal, bambu, coco, bagaço de cana-de-açúcar, juta, dentre outros.

Algumas das vantagens do uso das fibras naturais é o baixo custo, menor densidade, resistência específica comparável à de fibras sintéticas e não-abrasividade durante o processamento (RAMESH; PALANIKUMAR; REDDY, 2013). Uma das desvantagens apresentadas pelas fibras naturais é que apresentam propriedades mecânicas inferiores quando comparadas às fibras sintéticas (ASIM *et al.*, 2015).

O uso da fibra natural como reforço em compósitos tem mostrado bons resultados, seja utilizando uma matriz de material sintético ou de material biodegradável. O que leva a acreditar que biocompósitos com fibras naturais podem ser um grande diferencial ao ser implantado dentro da sociedade para diversos usos, reduzindo a quantidade de resíduo petroquímico e a poluição do ambiente como um todo (JORDAN; CHESTER, 2017; WANG *et al.*, 2019).

Sabe-se que as fibras naturais são compostas por microfibras de celuloses (ZHENG *et al.*, 2015). Visando à modificação da adesão da fibra na matriz há tratamentos físicos ou químicos promissores. O tratamento com plasma modifica a parte superficial da fibra, causando uma reticulação e podendo inserir grupos reativos, além de induzir o fortalecimento da fibra; essa modificação ocorre devido ao bombardeamento de plasma no material, produzindo modificações químicas (MACEDO *et al.*, 2020). No tratamento químico, há uma desestruturação da lignina presente na fibra, causando um aumento de microporos e um consequente aumento de sua área superficial, o que proporciona uma maior interação com os grupos funcionais presentes no biopolímero.

Com isso, este trabalho busca obter um material biocompósito a partir de fécula de mandioca e fibra de sisal, avaliando as condições de secagem do material, a interferência da quantidade de fibra em cada material e a mudança nas propriedades mecânicas dos compósitos quando a fibra de sisal passa por tratamentos com NaOH e plasma.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo aborda temas inerentes à pesquisa realizada, tais como os problemas ambientais causados pelos microplásticos, os biopolímeros que podem substituir os plásticos petroquímicos, as fibras naturais usadas como material de reforço para os biopolímeros e os alguns tratamentos que podem ser aplicados às fibras.

2.1 PLÁSTICOS

Os plásticos são um tipo de polímero que podem ser classificados como orgânico, sintético, semissintético ou natural, desde que sejam maleáveis e possam ser moldados de forma a ser um objeto sólido. Devido ao seu baixo custo, por ser leve, duradouro e versátil, a aplicação dos plásticos é muito diversificada e aplicada, tanto em embalagens, em peças para automóveis, eletrônicos, dentre muitos outros tipos de uso, fazendo assim o plástico participar da vida cotidiana das pessoas (CHEN, X.; YAN, 2020).

A fabricação do primeiro tipo de plástico conhecido, proveniente de petroquímicos, a baquelite, desenvolvido por Leo Baekeland em meado dos anos 1900, foi o estopim do uso do plástico para diferentes fins, havendo uma expansão e desenvolvimento de novos plásticos em 1950. Ocorrendo assim a modernização da indústria do plástico, implicando na produção em massa, chegando-se a fabricar milhões de toneladas de plásticos em todo mundo nos anos seguintes (CHEN, Zhi *et al.*, 2020; MENG; KELLY; WRIGHT, 2020; SIMUL BHUYAN *et al.*, 2020).

Devido à alta produção de plásticos e à falta de estratégias para ter um descarte ou uma reciclagem eficiente desses resíduos, desenvolveu-se um grande problema ambiental. A vida útil dos produtos plásticos é geralmente curta, o que acaba aumentando ainda mais o nível de lixo jogado no ambiente. Os plásticos oriundos de petroquímicos podem levar séculos para se decompor, levando a diversos impactos ambientais (CHEN, X.; YAN, 2020).

Dentre os problemas ambientais causados pelos plásticos petroquímicos estão os microplásticos, que são partículas de plástico com dimensão inferior a 5 mm de diâmetro, formados a partir da degradação dos plásticos (LU *et al.*, 2019). Devido à grande produção e ao uso exagerado de plásticos, os microplásticos se tornaram problema global e um poluente perigoso (COLE *et al.*, 2011).

Os microplásticos estão sendo amplamente distribuídos na água e vários estudos apontam que existe microplásticos na água do mar, dos rios, no solo e até no sal de cozinha. Os principais seres atingidos são os animais marinhos, pois ingerem os microplásticos, causando um alto nível de toxicidade, prejudicando desde a distribuição tecidual até a reprodução (LU *et al.*, 2019).

Os impactos causados à saúde humana devido aos microplásticos, além de ocorrer pela ingestão, podem ocorrer também pela inalação, causando doenças respiratórias e cardiovasculares a partir de uma pequena concentração presente no organismo; já para uma concentração maior podem causar câncer pulmonar (PRATA, 2018).

2.2 BIOPLÁSTICOS

Os bioplásticos são materiais poliméricos biodegradáveis e oriundos de fontes vivas renováveis, sendo considerados polímeros ecologicamente corretos. O crescimento de estudos na área de bioplásticos tem aumentado, buscando resolver os problemas ambientais causados pelos plásticos sintéticos biorecalcitrantes oriundos do petróleo. Porém, a produção desse tipo de material tem custos elevados em comparação à produção de plásticos de origem petroquímica (CHIA *et al.*, 2020; JÕGI; BHAT, 2020).

Uma das formas de fabricação de plásticos biodegradáveis é através de plantação, no setor agrícola, como por exemplo de batata e milho. O que acarreta diretamente o aumento de cultivo, implicando diretamente com o aumento de uso de terra, água, nutrientes e outros fatores, causando assim uma prática não sustentável a longo prazo. Com isso, a utilização de algas nos resíduos desses cultivos e transformar em biomassa, e a partir da biomassa produzir os biocompósitos (CHIA *et al.*, 2020).

Outra alternativa para a produção de bioplásticos se tornar mais viável economicamente e ecologicamente é a utilização de resíduos e substratos dos lixões. A utilização de bio-resíduos acumulados nos aterros para novos fins, transformando esses materiais em matérias-primas com grande potencial comercial. Diversos avanços têm sido feitos em relação a essa transformação acarretando na produção de bioplásticos (SINDHU *et al.*, 2019).

O crescimento desses estudos para utilização de recursos renováveis tende a ser vantajoso na área da economia, mas principalmente na área ambiental, trazendo redução na

emissão de gases de efeito estufa, de poluentes prejudiciais à saúde, além da conservação de ecossistemas (SHOGREN *et al.*, 2019).

2.3 BIOCOMPÓSITOS

Os biocompósitos podem ser chamados de compósitos verdes, e se dividem em totalmente ou parcialmente biodegradáveis. Os compósitos totalmente biodegradáveis são aqueles em que todos os elementos utilizados são de origem natural, já os compósitos parcialmente biodegradáveis são os que possuem o reforço ou a matriz de material sintético e outros elementos de origem natural. Vários trabalhos (LOMELÍ-RAMÍREZ *et al.*, 2014; SINGH *et al.*, 2017; GOMES *et al.*, 2019; GEORGE *et al.*, 2020) vêm estudando biocompósitos utilizando fibras naturais com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas e possibilitar maior aplicação na engenharia.

Diante das questões ambientais que vêm, cada vez mais, sendo discutidas e do possível esgotamento das fontes de petróleo, os biopolímeros estão sendo estudados e melhorados para que possam substituir os materiais oriundos de fontes não renováveis. Nos últimos anos, a comercialização de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais vem aumentando, tanto devido à parte ambiental, mas também por sua ampla aplicação: indústrias de móveis, de embalagens, de automóveis e até de materiais de construção (ALSAEED; YOUSIF; KU, 2013).

Na fabricação dos compósitos onde a matriz envolve a fibra, a fibra natural possui maior desempenho quando é utilizada uma fibra com maior teor de celulose e com micro fibrilas de celulose mais alinhadas na direção das fibras (PICKERING; EFENDY; LE, 2016), em que o núcleo da planta, ou seja, o tronco, tem maior concentração de celulose que as folhas, podendo ser utilizado como uma fonte de fibra celulósica e possuindo melhor desempenho mecânico (NEGAWO *et al.*, 2018).

As fibras são utilizadas como reforço nas matrizes poliméricas para melhorar as propriedades do material. As fibras utilizadas são de origens sintéticas, como a fibra de vidro e de origem vegetal, como a fibra de bambu, coco, sisal dentre outros. As fibras sintéticas demandam um custo maior devido a sua matéria-prima e a sua produção, porém as fibras naturais são de fácil acesso, são renováveis e recicláveis (PRASAD; GOWDA; VELMURUGAN, 2017). Além disso, as fibras naturais apresentam outras vantagens, como baixa densidade e propriedades mecânicas adequadas, como mostra a Tabela 1, além de possuir baixo custo (SILVA, *et al.*, 2010; VIMAL *et al.*, 2015). O campo de atuação vem se ampliando ao longo do tempo, principalmente na indústria automotiva.

O desempenho dos compósitos de biopolímeros e suas propriedades mecânicas reforçados com fibras naturais dependem principalmente da escolha da fibra e de sua adesão à matriz. Essa adesão é melhorada por tratamentos químicos e físicos, os tratamentos superficiais (SHALWAN; YOUSIF, 2013). A fibra natural é utilizada de forma curta, orientadas aleatoriamente e usando o processo de extrusão e/ou injeção (SINGH *et al.*, 2017).

Tabela 1 - Propriedades de algumas fibras naturais

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Alongamento (%)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Abacá	1,5	3-10	430-760	12,0
Abacaxi	0,8-1,6	2,4	170-1627	60-82
Algodão	1,5-1,6	7,0-8,0	287-597	5,5-12,6
Bambu	0,6-1,1	-	140-230	11-17
Banana	-	3	529-914	27-32
Coco	1,2	30,0	175	4,0-6,2
Juta	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5
Kenaf	1,4	1,5	930	53,0
Linho	1,5	2,7-3,2	345-1035	27,6
Rami	1,5	3,6-3,8	400-938	61,4-128
Sisal	1,5	2,0-2,5	511-635	9,4-22,0

Fonte: Adaptado de Ramesh; Palanikumar; Reddy (2017)

2.4 TRATAMENTO DAS FIBRAS

As fibras naturais, diferentemente das fibras sintéticas, possuem propriedades físico-químicas reduzidas para algumas aplicações, sendo necessário que o material passe por tratamentos. Por exemplo, ao se tratar de materiais biocompósitos, a fibra natural possui natureza hidrofóbica, ou seja, não possuem afinidade pela água e pela matriz biopolimérica, que apresentam natureza hidrofílica, o que implica em uma baixa adesão entre a matriz e a fibra, deixando assim o material com propriedades mecânicas frágeis. Esses tratamentos têm como objetivo melhorar as propriedades; isso ocorre em consequência da melhora da adesão entre a fibra e o biopolímero, fazendo com que essa se adeque ao uso determinado (KARTHI *et al.*, 2020; REDDY; YOGANANDAM; MOHANAVEL, 2020).

A utilização de recursos químicos ou físicos para modificar as fibras tem como objetivo principal melhorar a adesão da fibra com a matriz polimérica, alterando a área superficial da fibra e sua afinidade, onde diversos estudos demonstram o uso dos mesmos para melhorar as propriedades físicas, mecânicas e químicas dos compósitos desenvolvidos (CHANDRASEKAR *et al.*, 2017; MADHU *et al.*, 2018; VIJAY *et al.*, 2020).

O tratamento químico, seja com um ácido ou com uma base, pode remover grupos funcionais ou até mesmo alterá-los, fazendo com que ocorra uma melhor ligação com a matriz hidrofílica. Com isso, é observado que a remoção dos grupos amorfos da superfície das fibras naturais faz com que elas tenham melhoras na aderência quando utilizadas na produção do biocompósito (VIJAY *et al.*, 2020).

Já o tratamento físico, seja ele térmico, a plasma ou outro, pode alterar, além da superfície do material, o seu interior, provocando alterações nas suas estruturas, removendo ou adicionando grupos funcionais, por exemplo (MACEDO *et al.*, 2020). O plasma nada mais é do que a interação entre elétrons e íons positivos que se movimentam e se chocam. Existem diversas formas de produzir plasma, seja ela de baixa ou alta pressão, em pressão ambiente, como o DBD (descarga dielétrica de barreira). O plasma DBD é gerado através da aplicação de uma pressão elevada entre dois eletrodos, onde um precisa estar isolado; para gerar esse tipo de plasma pode-se usar o ar atmosférico ou outros gases (CHENG *et al.*, 2019).

2.5 APLICAÇÃO DE BIOCOMPÓSITOS

Os biopolímeros vem cada dia aumentando o seu campo de atuação dentro do dia a dia das pessoas. Uma área que vem com grande aplicação é na agricultura, com a fabricação de recipientes para colocar mudas de plantas. Isso acontece devido a degradação natural do material e acrescentar melhorias ao solo; além de, ao ser introduzido nos cultivos, o biocompósito não agride as raízes e a quantidade de água e nutrientes são reduzidas (GEORGE *et al.*, 2020).

Na área de embalagens tem várias aplicações, desde sacos, recipientes em geral, copos, pratos, talheres ambos descartáveis, dentre outros. Considerando uma aplicação com futuro promissor devido as suas características ecológicas, por ser produzido a partir de fontes

renováveis e possuir menor índice de emissão de carbono, potencializando a fabricação de embalagens biodegradáveis (GEORGE *et al.*, 2020; STOICA *et al.*, 2020).

No ramo de automóveis existe um avanço na busca por materiais que venham a reduzir o peso nos veículos, além de buscar uma melhor funcionalidade. Com isso, existe estudo de desenvolvimento de novos materiais sustentáveis como a aplicação de biocompósito em itens de *design* no interior e exterior dos veículos, detalhes no painel, aplicação em itens de segurança, dentre outros (GEORGE *et al.*, 2020; RAMASAMY *et al.*, 2020).

Diversos trabalhos estudam formas de substituir o uso da fibra de vidro e de carbono por fibras naturais. As fibras naturais apresentam menor densidade, deixando o produto mais leve; ainda possui a vantagem de apresentar baixo custo, maior disponibilidade e biodegradabilidade (RAGHUL *et al.*, 2020; VIGNESHWARAN *et al.*, 2020).

2.6 ESTADO DA ARTE

Singh *et al.* (2017) estudaram sobre diferentes tipos de fibras, de sisal, de juta e banana, aplicando com reforço em um compósito utilizando uma matriz polimérica a base de epóxi e observaram suas propriedades: limite de resistência a tração, compressão e ao impacto. Existe a comparação entre os diferentes tipos de fibra e elas passam também pelo tratamento com NaOH a 5%. Com isso é observado que a fibra de juta possui as melhores propriedades mecânicas, seguida de sisal e por último a fibra de banana. Ao ser realizado o tratamento químico os resultados do limite de resistência a tração tiveram um aumento considerado, em contrapartida o limite ao impacto teve uma redução considerável.

Gomes *et al.* (2019) realizaram um estudo da fabricação de biocompósito com diferentes composições com fécula de mandioca, fibra de sisal, cera de carnaúba e glicerol. O objetivo era avaliar as propriedades mecânicas em relação à variação das composições. Foi observado melhoria das propriedades mecânicas com a aplicação do reforço; o material passou de um limite de resistência a tração de 0,859 MPa, sem adição de fibra, aumentou para 11,219 MPa, ao adicionar à composição 15% de fibra de sisal; e ao adicionar 20% de cera esse valor reduziu para 0,615 MPa. O módulo de elasticidade ao inserir a fibra alterou, melhorando a propriedade e o alongamento sem a fibra reduziu ao adicionar fibra de sisal. Concluindo que a melhor

composição foi 7,5% de fibra de sisal, 10% de cera de carnaúba e 10% de glicerol em que apresentou as melhores propriedades para possíveis aplicações.

Kathirselvam *et al.* (2019) relataram sobre as mudanças nas propriedades da fibra da casca da *Thespesia populnea* após tratamento químico para melhorar suas características. Foi realizado tratamento com NaOH em diferentes concentrações (2%, 4%, 5%, 6% e 8%) e em diferentes tempos (15, 30, 45, 60 e 90 minutos), observando melhora na adesão e nas propriedades mecânicas no tempo de 60 minutos e em solução de 5%. A fibra sem tratamento apresentou limite de resistência à tração de 557,82 MPa e ao passar pelo melhor tempo e concentração do tratamento aumenta para 678,41 MPa, e esse aumento ocorre também no módulo de elasticidade que de 20,57 MPa passa para 22,73 MPa e o alongamento que altera de 2,80 % para 3,14%. O tratamento químico na fibra proporcionou mudanças estruturais e superficiais.

Parre *et al.* (2020) realizaram tratamento químico com NaOH em fibra de banana com concentrações de 1, 3, 5, 7 e 9 % por 24 horas; onde perceberam a remoção parcial de lignina e hemicelulose da fibra, além de observar que o melhor resultado estava na fibra tratada com uma solução de 5% de NaOH. Foi possível perceber que a fibra sem tratamento apresentou um aspecto mais liso e contínuo, ao passar pelo tratamento e aumentar a concentração da solução ocorreu a remoção dos componentes citados anteriormente, sendo observada uma estrutura irregular, não lisa e com presenças de nós.

Silva *et al.* (2020) aplicaram o plasma na fibra de sisal com objetivo de observar a influência do tratamento na superfície da fibra. Foi realizado o plasma a frio com mistura dos gases Ar e CO₂. Antes da fibra ser exposta ao plasma, elas foram lavadas e secas. O plasma foi aplicado em 6×10^{-1} Torr de pressão final do tratamento durante 1,5 min; a fonte de tensão foi de 1 kW e frequência de 2,4 Ghz. Foi observado que o plasma removeu grupos hidroxila, além de aumentar a rugosidade da fibra comparado com o material sem tratamento. A fibra não apresentou danos em suas propriedades, quando comparado ao material não tratado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são mostrados e detalhados os materiais, equipamentos e metodologias aplicados para o desenvolvimento do presente trabalho.

3.1 REAGENTES E EQUIPAMENTOS

Para produção dos biocompósitos foram utilizados a fécula de mandioca, fornecida pela Indústria Primícias do Brasil Ltda., Macaíba-RN; as fibras de sisal foram gentilmente doadas pela Sisaltec, Natal-RN; o glicerol (P.A; P.M: 92,10) foi adquirido pela Dinâmica Química Contemporânea Co., Brasil. No tratamento químico foi utilizado hidróxido de Sódio (P.A, P.M: 40), adquirido pela VETEC- Química Fina.

O equipamento usado para nos ensaios de tração foi a máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL10000. Os materiais foram pesados em uma balança analítica de precisão digital (AY220 da Marte) com resolução de 0,0001g e preparados em homogeneizador mecânico, modelo TE-099, da Tecnal. A estufa foi utilizada com renovação de ar (TE-392/1 da TECNAL). As espessuras dos corpos de provas foram verificadas com auxílio de um micrômetro digital, Mitutoyo MDC Lite 293-821-30. No tratamento por plasma foi utilizado o osciloscópio digital Agilent, modelo MSO-X 2002. Para realização da análise morfológica foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), Tescan VEGA 3.

3.2 CONDIÇÕES DE SECAGEM DO MATERIAL

Foi realizado um teste preliminar (Barbosa *et al.*, 2020), no intuito de se observar as melhores condições de secagem dos corpos de prova.

De acordo com metodologia de Gomes *et al.* (2019) foi produzido compósitos com composição de 15 g de fibra de sisal, 75 g de fécula de mandioca, 10 g de glicerol e 900 mL de água. Foi produzido para cada temperatura avaliada um total de 5 corpos de provas. A secagem em estufa foi conduzida nas temperaturas de 50°C, 70°C, 90°C e 110°C. Para cada experimento foi observado o tempo que o material precisou para ficar pronto. Ao finalizar, foram produzidos os corpos de provas e analisados as propriedades mecânicas.

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental utilizado foi o DIC (Delineamento Inteiramente Casualizado), onde foram estudadas quatro composições dos biocompósitos; para cada

composição foram realizadas seis repetições, como mostrado na Tabela 2, onde a quantidade de água e de glicerol são fixas, havendo variação na quantidade de fibra de sisal sem tratamentos e de fécula de mandioca.

Tabela 2 - Planejamento experimental DIC usado no estudo do efeito da composição nas propriedades mecânicas dos biocompósitos

Amostra	Composição			
	Fibra (g)	Fécula (g)	Glicerol(g)	Água (mL)
T1	0	90	10	900
T2	5	85	10	900
T3	10	80	10	900
T4	15	75	10	900

3.4 TRATAMENTO DA FIBRA DE SISAL

As fibras, *in-natura*, foram cortadas no tamanho aproximado de 20mm e, em uma balança analítica de precisão, foram pesadas de acordo com a composição do biocompósito; só então foram encaminhadas para a realização dos tratamentos.

Foram realizados dois tipos de tratamentos na fibra de sisal, um tratamento químico, com hidróxido de sódio, e um tratamento físico, utilizando plasma.

3.4.1 Tratamento químico com NaOH

As fibras passaram pelo tratamento químico com solução a 5% de NaOH, de acordo com metodologia desenvolvida por Kathirselvam *et al.* (2019) e Zwane *et al.* (2019). O tempo de tratamento foi de 60 minutos, de acordo com metodologia de Kathirselvam *et al.* (2019).

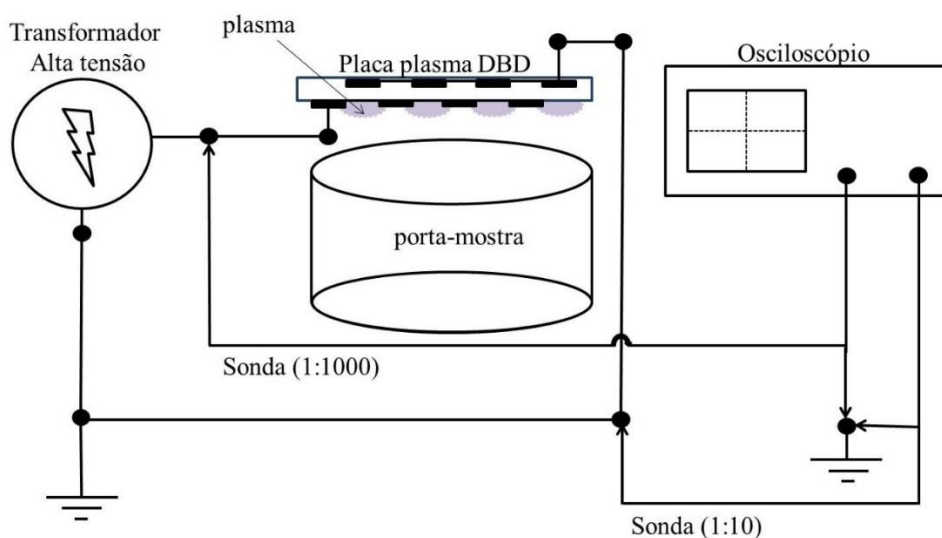
As fibras foram colocadas em recipientes grandes onde pudesse ser inserida a solução de NaOH. Tal solução foi preparada antecipadamente e então foi inserida nos recipientes abertos com fibras e em temperatura ambiente. As fibras ficaram submersas na solução por 60 minutos. Após esse tempo foram realizadas várias lavagens com água destilada até equilibrar o pH em 7.

3.4.2 Tratamento físico com plasma

O tipo de plasma escolhido para o tratamento da fibra de sisal foi o DBD coplanar. O plasma DBD se encontra na categoria de plasma frio, o qual nessa situação tem uma grande vantagem: não degrada a fibra devido ao aumento da temperatura; além disso, é fonte de um grande volume de plasma e possui simplicidade na montagem e na reprodução (BILLAH *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2020).

O tratamento com plasma foi realizado nas seguintes condições: tensão de 10kV, frequência de 4 kHz, corrente contínua, temperatura ambiente (23°C), utilização do gás atmosférico e tempo de exposição de 60 min. No porta amostra foi colocada a amostra de 5 g de fibra de sisal, já cortada com 20 mm de comprimento. O material após tratado foi acondicionado em um recipiente fechado e levado para a preparação do compósito. A Figura 1 mostra o esquema utilizado no tratamento por plasma.

Figura 1- Esquema da aplicação do plasma pelo método DBD



3.5 OBTEÇÃO E CONFECÇÃO DOS BIOCOMPÓSITOS

3.5.1 Obtenção dos biocompósitos

Primeiramente foram misturados todos os componentes da formulação: fécula de mandioca, glicerol, fibra de sisal e água destilada; em seguida foram postos sob agitação

constante em homogeneizador mecânico, com temperatura de 90°C, para que ocorresse a gelatinização da fécula de mandioca.

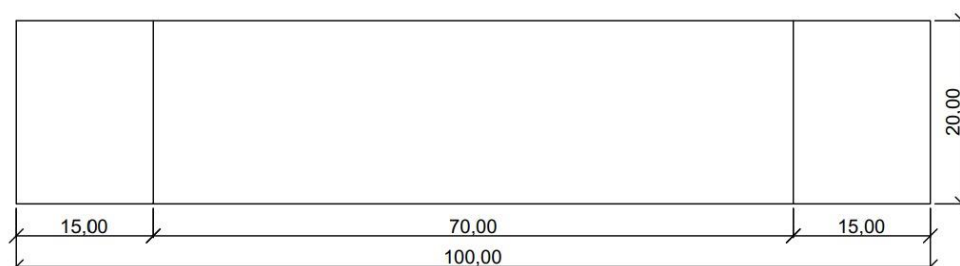
A mistura foi colocada em bandejas retangulares, de dimensões 200mm x 300mm, e levadas para secagem em estufa com renovação de ar em uma temperatura de 50°C, conforme estudo prévio descrito no item 3.2.

3.5.2 Confeção dos corpos de prova

Após sua secagem, os corpos de prova foram removidos da bandeja, com auxílio de uma espátula. Esse processo é feito de forma cautelosa para que a desmoldagem ocorra sem danos.

Após a desmoldagem, o material foi cortado, com auxílio de estilete, nas dimensões de 100 mm x 20 mm, como mostrado na Figura 2. Para cada tipo de amostra foram utilizados seis corpos de prova.

Figura 2- Dimensões, em milímetros, dos corpos de prova



3.6 CARACTERIZAÇÕES DO MATERIAL

3.6.1 Espessura dos biocompósitos

Para determinar a espessura dos corpos de provas foi realizada a medição em cinco pontos aleatórios, com auxílio de um micrômetro digital Mitutoyo MDC Lite 293-821-30. Essas medidas foram utilizadas para auxiliar na obtenção das propriedades mecânicas do material.

3.6.2 Propriedades mecânicas

Os corpos de provas obtidos foram colocados na máquina de ensaio universal, de acordo com a norma ASTM D3039M, para obtenção das propriedades mecânicas. A célula de carga utilizada foi de 5 kN com uma velocidade 5 mm/min.

3.6.3 Análise estatística

Com os dados obtidos e com auxílio do software Statistica® 12.5 (StatSoft, Inc., USA) foi realizado uma análise de variância (ANOVA) de um fator e o teste de Tukey a 5% de significância.

3.6.4 Análise morfológica

A análise morfológica foi realizada na ruptura do corpo de prova, após ensaio de tração, apenas para os biocompósitos em que a fibra de sisal passou por tratamentos. Foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Tescan VEGA 3, operando a uma tensão de 10 kV. As amostras passaram por um processo em que foram metalizadas com uma camada fina de ouro para que se tornassem condutoras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo foram apresentados os resultados da pesquisa, mostrando as alterações causadas pela variação da temperatura e tempo de secagem dos biocompósitos, além da verificação da melhor composição e a influência dos tratamentos da fibra nas propriedades mecânicas.

4.1 CONDIÇÕES DE SECAGEM DO MATERIAL

A Tabela 3 apresenta os valores das propriedades mecânicas para os biocompósitos de fécula de mandioca e fibra de sisal *in-natura*.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas das amostras de biocompósitos de fécula de mandioca e fibra de sisal *in-natura* em diferentes condições de secagem

T (°C)	t (h)	σ (MPa)	ϵ (%)	E (MPa)
50	76	5,22±1,66 ^a	14,17±1,63 ^a	30,31±2,24 ^a
70	34	3,71±1,53 ^a	8,74±0,90 ^a	14,85±3,64 ^b
90	16	3,46±1,79 ^a	8,40±2,05 ^a	19,98±1,48 ^b
110	13	4,66±0,82 ^a	9,61±3,22 ^a	26,17±2,21 ^a

Temperatura (T), tempo (h), limite de resistência à tração (σ), alongamento (ϵ) e módulo de elasticidade (E). Letras distintas indicam diferença estatística ($p < 0,05$) nas propriedades, a comparação é realizada pelo teste de Tukey 5%.

O maior valor de σ obtido foi de 5,22 MPa, em relação ao biocompósito obtido a uma temperatura de secagem de 50° C, enquanto o menor foi de 3,46 MPa para 90°C. A fécula possui a desvantagem de ser um material instável à temperatura, fator causador das mudanças de suas propriedades (LOMELÍ-RAMÍREZ *et al.*, 2014; MALI *et al.*, 2005). Porém, realizando a ANOVA e o teste de Tukey, foi observado que o limite de resistência à tração possui diferença significativa entre as demais temperaturas.

O alongamento na ruptura apresentou maior valor, 14,17%, na temperatura de 50 °C, e ocorreu uma redução nas demais temperaturas. Segundo Suderman, Isa e Sarbon (2018), o alongamento pode ser alcançado com a mistura de um polímero que possui baixo peso molecular ou com outro polímero que auxilie na redução da cristalização. Neste caso, os materiais pertencem a mesma classe de polímero, não havendo a maior flexibilidade, deixando

o material com alongamento reduzido. Após a análise estatística foi possível conferir que não existiu uma diferença significativa entre as temperaturas.

Ao comparar os valores do módulo de elasticidade, percebe-se uma diferença de mais da metade do valor, ao aumentar a temperatura para 70° C, onde o valor passa de 30,31 MPa para 14,85, e nas demais temperaturas essa redução é menor. O módulo de elasticidade é o parâmetro utilizado para medir a rigidez do material. Devido à mistura entre a fécula e as fibras serem feitas de maneira aleatória durante a fabricação, isso implica em uma matriz não totalmente homogênea, interferindo na estabilidade térmica, havendo má distribuição da fibra na matriz, deixando pontos com maior concentração de fibra e outros com maior concentração de fécula (PRASAD; GOWDA; VELMURUGAN, 2017; SINGH *et al.*, 2017; SUDERMAN; ISA; SARBON, 2018). É notório o grau de significância do módulo de elasticidade entre as temperaturas de 50 °C e 70°C; 70 ° C e 110 °C, onde o teste de Tukey teve valor inferior a 0,05.

Analisando o tempo de secagem dos materiais é possível afirmar pode ocorrer degradação do material, interferindo nas propriedades dos mesmos. Isso ocorre devido à presença de calor nos constituintes sensíveis, como pectinas, hemiceluloses e lignina (GHOSH; BHASNEY; KATYAR, 2019; LIANG; NOURI; LAFRANCHE, 2015; LOMELÍ-RAMÍREZ *et al.*, 2014).

4.2 ANÁLISE DA PORCENTAGEM DE FIBRA DE SISAL NO BIOCOMPÓSITO

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios mecânicos do material compósito com fibra *in-natura*.

Tabela 4 - Valores médios das propriedades mecânicas

Amostra	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)
T1	-	-	-
T2	5,24 $\pm$ 1,08 ^a	13,61 $\pm$ 4,11 ^a	28,13 $\pm$ 2,87 ^a
T3	2,83 $\pm$ 0,42 ^b	4,30 $\pm$ 2,07 ^c	18,31 $\pm$ 2,70 ^b
T4	1,16 $\pm$ 0,45 ^c	8,10 $\pm$ 3,24 ^b	17,42 $\pm$ 2,31 ^c

limite de resistência à tração (σ), alongamento (ε) e módulo de elasticidade (E). Letras distintas indicam diferença estatística ($p < 0,05$) nas propriedades, a comparação é realizada pelo teste de Tukey 5%.

A amostra T1, amostra sem fibra, apresentou comportamento frágil e quebradiço ao ponto de inviabilizar o ensaio de tração. Ao ser fixado o corpo de prova nas garras para realização do ensaio, o material já apresentou defeitos, ocorrendo a fratura antes de receber a tensão axial aplicada pelo equipamento. Implicando que uma grande quantidade de polímero e a ausência da fibra como reforço fez com que as propriedades mecânicas ficassem baixas.

Percebe-se que ao aumentar a porcentagem da fibra fez com que o corpo de prova ficasse propriedades mecânicas reduzissem. A amostra T2, apresentou as melhores propriedades mecânicas. Nas amostras T3 e T4, em que a presença de fibra aumentou e consequentemente, a quantidade de fécula reduziu, notou-se uma redução nas propriedades mecânicas. Isso se deve ao fato de estar ligado diretamente com o volume de fibra presente; esse aumento na quantidade de fibras faz com que ocorra menos interação entre a fibra e a matriz; além disso, a forma desorientada das fibras entra em atrito, implicando em um tipo de afrouxamento do material que, ao ser ensaiado, o corpo de prova se desliga facilmente (KECK; FULLAND, 2019; PRASAD; GOWDA; VELMURUGAN, 2017).

A partir da análise de variância foi possível determinar que todas as propriedades mecânicas tiveram resultados significativos, sendo então diferentes entre si. Ao realizar o teste de Tukey para o limite de resistência à tração, foi perceptível que a composição T2 foi superior em relação a T3 e T4; a mesma análise se aplica para demais propriedades.

4.3 TRATAMENTO DAS FIBRAS

A Tabela 5 apresenta os resultados das propriedades mecânicas dos materiais compósitos preparados com fibra de sisal submetida a diferentes tratamentos. A composição utilizada foi a T2 (5 g de fibra de sisal, 85 g de fécula de mandioca, 10 g de glicerol e 900 mL de água) com uma temperatura de secagem de 50 ° C por um tempo de 76 horas.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas dos biocompósitos preparados com fibras de sisal submetidas a diferentes tratamentos

Fibra	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)
Tratada (Plasma)	37,87 $\pm$ 17,26 ^a	8,41 $\pm$ 1,28 ^a	119,89 $\pm$ 29,10 ^a
Tratada (NaOH)	3,01 $\pm$ 0,46 ^b	7,19 $\pm$ 1,77 ^a	5,82 $\pm$ 1,60 ^c
Não tratada	3,85 $\pm$ 1,69 ^b	8,96 $\pm$ 1,70 ^a	20,06 $\pm$ 1,60 ^b

limite de resistência à tração (σ), alongamento (ε) e módulo de elasticidade (E). Letras distintas indicam diferença estatística ($p < 0,05$) nas propriedades, a comparação é realizada pelo teste de Tukey 5%.

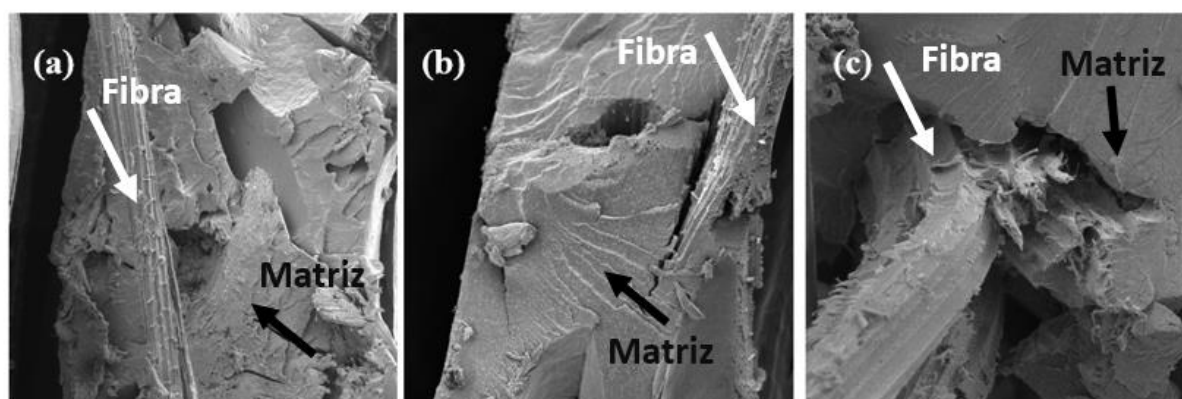
Analizando a Tabela 5, pode-se perceber que o tratamento químico com NaOH (5%) reduziu os valores das propriedades mecânicas em comparação com a fibra não tratada e com a fibra tratada a plasma. Zwane *et al.* (2019), concluíram que a fibra de sisal com tratamento químico diminui o limite de resistência a tração, como é observado na Tabela 5, reduzindo de 3,85 MPa para 3,01 MPa. Kathirselvam *et al.* (2019) relatam que o tratamento químico com concentração de 5% de NaOH se torna mais eficiente nas propriedades mecânicas da fibra de sisal e na remoção da celulose em comparação com outras porcentagens. Madhu *et al.* (2020) mostraram que o tratamento com NaOH (6%) apresentou quase nenhuma alteração nas propriedades mecânicas da fibra. Analisando a Figura 3 (b) é possível notar um afastamento maior entre a matriz e a fibra de sisal tratada de forma química.

O limite de resistência a tração do biocompósito com fibra tratada por plasma teve um aumento significativo (37,87 MPa) quando comparado com o valor do material com fibra sem tratamento (3,01 MPa). O tratamento da fibra proporcionou uma interação com a matriz polimérica (MACEDO *et al.*, 2020; YUAN; JAYARAMAN; BHATTACHARYYA, 2002). O tratamento com plasma pode alterar a composição química, além de causar uma melhor interação entre os constituintes do material (MACEDO *et al.*, 2020; REGNER; DRECHSLER; SENTPALI, 2019). Em outros estudos com matriz de fécula de mandioca foram observadas variações dos valores de limite de resistência, como usando fibra da casca de arroz como reforço teve um valor de 4 MPa (KARGARZADEH; JOHAR; AHMAD, 2017), com fibra de sisal valor de 11,2 MPa (GOMES *et al.*, 2019).

O módulo de elasticidade do material com fibra tratada com plasma foi de 119,89 MPa e com fibra não tratada foi de 20,06 MPa. Esses valores demonstram que o tratamento da fibra por plasma melhorou sua interação com a matriz, deixando as fibras mais compactas ao polímero, como pode ser observado na análise morfológica, Figura 3. Segundo Pejić *et al.* (2020), essa melhora pode estar atrelada tanto a introdução de grupos funcionais, quanto à remoção da celulose e lignina presentes na fibra devido à esfoliação. É observado em outros trabalhos que o módulo de elasticidade pode variar mesmo com a matriz de fécula de mandioca, aonde os valores chegam em 45 MPa (KARGARZADEH; JOHAR; AHMAD, 2017), e 235,6 MPa (GOMES *et al.*, 2019).

O alongamento não apresentou diferença significativa para nenhum dos materiais. Após a realização da ANOVA foi constatado que o alongamento não possui dados significativos, implicando em uma indiferença em relação ao tratamento feito na fibra. Já as demais propriedades são percebidas um grau de importância, comprovado também pelo teste de Tukey onde é feito a análise em par entre os tipos de tratamento, concluindo que o tratamento de plasma apresentou significância em relação aos demais.

Figura 3 - MEV do compósito com fibra tratada com Plasma, NaOH e sem tratamento



(a) tratado com plasma; (b) tratado com NaOH e (c) sem tratamento. Escala de 200µm e ampliação de 212x.

Na Figura 3 (a-c) pode ser observada as micrografias eletrônicas de varredura da área de superfície onde ocorreu a ruptura do biocompósito. Na Figura 3 (a) é apresentada a ampliação do compósito em que a fibra passou pelo tratamento de plasma. Nesse primeiro caso, observou-se que a fibra possui uma maior adesão na matriz polimérica e, ainda, foi possível observar uma maior rugosidade e estrias na fibra ao ser comparado com a Figura 3 (c) que representa a fibra *in-natura*. Essa maior aderência é considerada devido a inserir grupos

funcionais ao entrar em contato com jato de plasma, além de remoção da lignina e da celulose, consequentemente esse biocompósito possui algumas propriedades mecânicas mais elevadas (SILVA *et al.*, 2020; FAZELI; FLOREZ; SIMÃO, 2019; MACEDO *et al.*, 2020).

Na Figura 3 (b) a fibra de sisal foi tratada de forma química com uma solução de NaOH, onde foi possível observar que existe um espaço entre a fibra e a matriz, dando assim uma menor aderência e reduzindo as propriedades mecânicas. Além disso, percebeu-se que a fibra possui pontos de maior rugosidade e aspereza; isso ocorre devido ao uso da solução em que o material sofre a remoção de componentes como hemicelulose. Esses pontos de maior remoção de componentes interferem na fragilidade da fibra, dando vincos que a deixa com pontos concentradores de tensão, reduzindo assim a resistência a tração do material (IZWAN *et al.*, 2020; KATHIRSELVAM *et al.*, 2019; MADHU *et al.*, 2020; ZWANE *et al.*, 2019).

5 CONCLUSÃO

Foi observado que o aumento da temperatura de secagem não alterou significativamente as propriedades mecânicas de limite de resistência à tração e o alongamento. Apenas o módulo de elasticidade apresentou valores significativos, de acordo com a ANOVA. O teste de Tukey corrobora com grau de significância, mostrando que as temperaturas de 50° C, 70° C e 110°C são as que possuem valores inferiores a 0,05.

Foi observado que variações na porcentagem de fécula e de fibra de sisal alteram suas propriedades mecânicas, mostrando que a ausência de fibra no compósito implica em um material frágil. O aumento do percentual de fibra e a consequente redução do biopolímero fez com o que o material se tornasse mais quebradiço e frágil.

Um melhor resultado nas propriedades mecânicas de um biocompósito está associado a uma melhora da interação entre a fibra e a matriz, em que, nesse caso, demonstrou-se que ocorreu entre a fibra *in-natura*, tratada com NaOH e com plasma. A eficiência do tratamento com plasma nas propriedades mecânicas dos biocompósitos foi notória e apresentou valores superiores aos demais casos. Observou-se, ainda, que o alongamento nos três casos não teve um valor significativo e se manteve dentro de um valor aproximado. Diferente das demais propriedades, o limite de resistência à tração e o módulo de elasticidade tiveram um grau de importância elevado se comparado com os demais tratamentos. Por fim, é importante perceber que não houve diferença de importância no que se refere ao uso do tratamento com NaOH. Esse resultado está ligado ao fato de o tratamento de plasma não agredir a fibra e, sem alterar suas propriedades físicas, atua removendo impurezas e deixando uma maior rugosidade ao longo da fibra.

REFERÊNCIAS

- ALSAEED, T.; YOUSIF, B. F.; KU, H. The potential of using date palm fibres as reinforcement for polymeric composites. **Materials and Design**, vol. 43, p. 177–184, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.061>.
- ASIM, M.; ABDAN, K.; JAWAID, M.; NASIR, M.; DASHTIZADEH, Z.; ISHAK, M. R.; HOQUE, M. E.; DENG, Y. A review on pineapple leaves fibre and its composites. **International Journal of Polymer Science**, vol. 2015, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/950567>.
- ASTM – American Society for Testing Materials. **ASTM D3039/D3039M – 14**: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. In: Annual Book of ASTM, 2014.
- BARBOSA, L. M.; LEITE, R.; MARIA MENDES AROUCHA, E.; GOMES DOS SANTOS, F. K. Comportamento físico-químico sob diferentes temperaturas de secagem de compósitos de fécula de mandioca e fibra de sisal. **Agropecuária Científica No Semiárido**, vol. 16, no. 2, p. 81, 2020. <https://doi.org/10.30969/acsa.v16i2.1229>.
- BILLAH, M.; SAJIB, S. A.; ROY, N. C.; RASHID, M. M.; REZA, M. A.; HASAN, M. M.; TALUKDER, M. R. Effects of DBD air plasma treatment on the enhancement of black gram (*Vigna mungo* L.) seed germination and growth. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, vol. 681, no. October 2019, p. 108253, 2020. DOI 10.1016/j.abb.2020.108253. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.abb.2020.108253>.
- CHANDRASEKAR, M.; ISHAK, M. R.; SAPUAN, S. M.; LEMAN, Z.; JAWAID, M. A review on the characterisation of natural fibres and their composites after alkali treatment and water absorption. **Plastics, Rubber and Composites**, vol. 46, no. 3, p. 119–136, 2017. <https://doi.org/10.1080/14658011.2017.1298550>.
- CHEN, X.; YAN, N. A brief overview of renewable plastics. **Materials Today Sustainability**, vol. 7–8, p. 100031, 2020. DOI 10.1016/j.mtsust.2019.100031. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100031>.
- CHEN, Z.; QUE, M.; ZHENG, L.; LI, X.; SUN, Y. Effect of Mortar Constraint Conditions on Pullout Behavior of GFRP Soil Nails. **Advances in Materials Science and Engineering**, vol. 2020, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/4170363>.
- CHENG, J.; CHEN, Q.; FRIDMAN, G.; JI, H.-F. A colorimetric method for comparison of oxidative strength of DBD plasma. **Sensors and Actuators Reports**, vol. 1, no. September, p. 100001, 2019. DOI 10.1016/j.snr.2019.100001. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.snr.2019.100001>.
- CHIA, W. Y.; YING TANG, D. Y.; KHOO, K. S.; KAY LUP, A. N.; CHEW, K. W. Nature's fight against plastic pollution: Algae for plastic biodegradation and bioplastics production. **Environmental Science and Ecotechnology**, vol. 4, p. 100065, 2020. DOI 10.1016/j.es.2020.100065. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.es.2020.100065>.
- COLE, M.; LINDEQUE, P.; HALSBAND, C.; GALLOWAY, T. S. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. **Marine Pollution Bulletin**, vol. 62, no.

12, p. 2588–2597, 2011. DOI 10.1016/j.marpolbul.2011.09.025. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>.

DUIS, K.; COORS, A. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. **Environmental Sciences Europe**, vol. 28, no. 1, p. 1–25, 2016. <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0069-y>.

FAZELI, M.; FLOREZ, J. P.; SIMÃO, R. A. Improvement in adhesion of cellulose fibers to the thermoplastic starch matrix by plasma treatment modification. **Composites Part B: Engineering**, vol. 163, no. October 2018, p. 207–216, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.048>.

GANGADOO, S.; OWEN, S.; RAJAPAKSHA, P.; PLAISTED, K.; CHEESEMAN, S.; HADDARA, H.; TRUONG, V. K.; NGO, S. T.; VU, V. V.; COZZOLINO, D.; ELBOURNE, A.; CRAWFORD, R.; LATHAM, K.; CHAPMAN, J. Nano-plastics and their analytical characterisation and fate in the marine environment: From source to sea. **Science of the Total Environment**, vol. 732, p. 138792, 2020. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.138792. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138792>.

GEORGE, A.; SANJAY, M. R.; SRISUK, R.; PARAMESWARANPILLAI, J.; SIENGCHIN, S. A comprehensive review on chemical properties and applications of biopolymers and their composites. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 154, p. 329–338, 2020. DOI 10.1016/j.ijbiomac.2020.03.120. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.120>.

GHOSH, T.; BHASNEY, S. M.; KATIYAR, V. Blown films fabrication of poly lactic acid based biocomposites: Thermomechanical and migration studies. **Materials Today Communications**, vol. 22, no. October 2019, p. 100737, 2019. DOI 10.1016/j.mtcomm.2019.100737. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100737>.

GOMES, Á. V. R.; DE LIMA LEITE, R. H.; DA SILVA JÚNIOR, M. Q.; GOMES DOS SANTOS, F. K.; MENDES AROUCHA, E. M. Influence of composition on mechanical properties of cassava starch, sisal fiber and carnauba wax biocomposites. **Materials Research**, vol. 22, p. 1–9, 2019. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0887>.

GUZZETTI, E.; SUREDA, A.; TEJADA, S.; FAGGIO, C. Microplastic in marine organism: Environmental and toxicological effects. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, vol. 64, no. October, p. 164–171, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.10.009>.

IZWAN, S. M.; SAPUAN, S. M.; ZUHRI, M. Y. M.; MOHAMED, A. R. Effects of Benzoyl Treatment on NaOH Treated Sugar Palm Fiber: Tensile, Thermal, and Morphological Properties. **Journal of Materials Research and Technology**, vol. 9, no. 3, p. 5805–5814, 2020. DOI 10.1016/j.jmrt.2020.03.105. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.105>.

JÕGI, K.; BHAT, R. Valorization of food processing wastes and by-products for bioplastic production. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, vol. 18, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100326>.

JORDAN, W.; CHESTER, P. Improving the Properties of Banana Fiber Reinforced Polymeric Composites by Treating the Fibers. **Procedia Engineering**, vol. 200, p. 283–289, 2017. DOI

10.1016/j.proeng.2017.07.040. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.040>.

KARGARZADEH, H.; JOHAR, N.; AHMAD, I. Starch biocomposite film reinforced by multiscale rice husk fiber. *Composites Science and Technology*, [s. l.], v. 151, p. 147–155, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.08.018>

KARTHI, N.; KUMARESAN, K.; SATHISH, S.; GOKULKUMAR, S.; PRABHU, L.; VIGNESHKUMAR, N. An overview: Natural fiber reinforced hybrid composites, chemical treatments and application areas. **Materials Today: Proceedings**, vol. 27, p. 2828–2834, 2020. DOI 10.1016/j.matpr.2020.01.011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.011>.

KATHIRSELVAM, M.; KUMARAVEL, A.; ARTHANARIESWARAN, V. P.; SARAVANAKUMAR, S. S. Characterization of cellulose fibers in Thespesia populnea barks: Influence of alkali treatment. **Carbohydrate Polymers**, vol. 217, no. April, p. 178–189, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.063>.

KECK, S.; FULLAND, M. Effect of fibre volume fraction and fibre direction on crack paths in unidirectional flax fibre-reinforced epoxy composites under static loading. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, vol. 101, no. January, p. 162–168, 2019. DOI 10.1016/j.tafmec.2019.01.028. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.01.028>.

LI, S.; DANG, X.; YU, X.; ABBAS, G.; ZHANG, Q.; CAO, L. The application of dielectric barrier discharge non-thermal plasma in VOCs abatement: A review. **Chemical Engineering Journal**, vol. 388, no. October 2019, p. 124275, 2020. DOI 10.1016/j.cej.2020.124275. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124275>.

LIANG, S.; NOURI, H.; LAFRANCHE, E. Thermo-compression forming of flax fibre-reinforced polyamide 6 composites: influence of the fibre thermal degradation on mechanical properties. **Journal of Materials Science**, vol. 50, no. 23, p. 7660–7672, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9330-4>.

LOMELÍ-RAMÍREZ, M. G.; KESTUR, S. G.; MANRÍQUEZ-GONZÁLEZ, R.; IWAKIRI, S.; DE MUNIZ, G. B.; FLORES-SAHAGUN, T. S. Bio-composites of cassava starch-green coconut fiber: Part II - Structure and properties. **Carbohydrate Polymers**, vol. 102, no. 1, p. 576–583, 2014. DOI 10.1016/j.carbpol.2013.11.020. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.11.020>.

LU, L.; LUO, T.; ZHAO, Y.; CAI, C.; FU, Z.; JIN, Y. Interaction between microplastics and microorganism as well as gut microbiota: A consideration on environmental animal and human health. **Science of the Total Environment**, vol. 667, p. 94–100, 2019. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.02.380. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.380>.

MACEDO, M. J. P.; SILVA, G. S.; FEITOR, M. C.; COSTA, T. H. C.; ITO, E. N.; MELO, J. D. D. Surface modification of kapok fibers by cold plasma surface treatment. **Journal of Materials Research and Technology**, vol. 9, no. 2, p. 2467–2476, 2020. DOI 10.1016/j.jmrt.2019.12.077. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.077>.

MADHU, P.; SANJAY, M. R.; JAWAID, M.; SIENGCHIN, S.; KHAN, A.; PRUNCU, C. I. A new study on effect of various chemical treatments on Agave Americana fiber for composite reinforcement: Physico-chemical, thermal, mechanical and morphological properties. **Polymer Testing**, vol. 85, p. 106437, 2020. DOI 10.1016/j.polymertesting.2020.106437. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106437>.

MADHU, P.; SANJAY, M. R.; SENTHAMARAIKANNAN, P.; PRADEEP, S.; SIENGCHIN, S.; JAWAID, M.; KATHIRESAN, M. Effect of Various Chemical Treatments of Prosopis juliflora Fibers as Composite Reinforcement: Physicochemical, Thermal, Mechanical, and Morphological Properties. **Journal of Natural Fibers**, vol. 17, no. 6, p. 833–844, 2018. DOI 10.1080/15440478.2018.1534191. Available at: <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1534191>.

MALI, S.; GROSSMANN, M. V. E.; GARCÍA, M. A.; MARTINO, M. N.; ZARITZKY, N. E. Mechanical and thermal properties of yam starch films. **Food Hydrocolloids**, vol. 19, no. 1, p. 157–164, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2004.05.002>.

MENG, Y.; KELLY, F. J.; WRIGHT, S. L. Advances and challenges of microplastic pollution in freshwater ecosystems: A UK perspective. **Environmental Pollution**, vol. 256, p. 113445, 2020. DOI 10.1016/j.envpol.2019.113445. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113445>.

NEGAWO, T. A.; POLAT, Y.; BUYUKNALCACI, F. N.; KILIC, A.; SABA, N.; JAWAID, M. Mechanical, morphological, structural and dynamic mechanical properties of alkali treated Ensete stem fibers reinforced unsaturated polyester composites. **Composite Structures**, vol. 207, no. June 2018, p. 589–597, 2018. DOI 10.1016/j.compstruct.2018.09.043. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.043>.

PARRE, A.; KARTHIKEYAN, B.; BALAJI, A.; UDHAYASANKAR, R. Investigation of chemical, thermal and morphological properties of untreated and NaOH treated banana fiber. **Materials Today: Proceedings**, vol. 22, p. 347–352, 2020. DOI 10.1016/j.matpr.2019.06.655. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.655>.

PEJIĆ, B. M.; KRAMAR, A. D.; OBRADOVIĆ, B. M.; KURAICA, M. M.; ŽEKIĆ, A. A.; KOSTIĆ, M. M. Effect of plasma treatment on chemical composition, structure and sorption properties of lignocellulosic hemp fibers (*Cannabis sativa* L.). **Carbohydrate Polymers**, vol. 236, no. February, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116000>.

PICKERING, K. L.; EFENDY, M. G. A.; LE, T. M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, vol. 83, p. 98–112, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>.

PRASAD, G. L. E.; GOWDA, B. S. K.; VELMURUGAN, R. Comparative Study of Impact Strength Characteristics of Treated and Untreated Sisal Polyester Composites. **Procedia Engineering**, vol. 173, p. 778–785, 2017. DOI 10.1016/j.proeng.2016.12.096. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.096>.

PRATA, J. C. Airborne microplastics: Consequences to human health? **Environmental Pollution**, vol. 234, p. 115–126, 2018. DOI 10.1016/j.envpol.2017.11.043. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.043>.

RAGHUL, K. S.; LOGESH, M.; KISSHORE, R. K.; RAMANAN, P. M.; MURALITHARAN, G. Materials Today : Proceedings Mechanical behaviour of sisal palm glass fiber reinforced composite with addition of nano silica. **Materials Today: Proceedings**, no. xxxx, 2020. DOI 10.1016/j.matpr.2020.07.063. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.063>.

RAMASAMY, M.; ARUL, A.; NITHYA, M.; KUMAR, S. S.; PUGAZHENTHI, R. Materials Today : Proceedings Characterization of natural – Synthetic fiber reinforced epoxy based

composite – Hybridization of kenaf fiber and kevlar fiber. **Materials Today: Proceedings**, no. xxxx, 2020. DOI 10.1016/j.matpr.2020.07.243. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.243>.

RAMESH, M.; PALANIKUMAR, K.; REDDY, K. H. Mechanical property evaluation of sisal-jute-glass fiber reinforced polyester composites. **Composites Part B: Engineering**, vol. 48, p. 1–9, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.12.004>.

RAMESH, M.; PALANIKUMAR, K.; REDDY, K. H. Plant fibre based bio-composites: Sustainable and renewable green materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 79, n. April 2016, p. 558–584, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.094>.

REDDY, R. A.; YOGANANDAM, K.; MOHANAVEL, V. Effect of chemical treatment on natural fiber for use in fiber reinforced composites - Review. **Materials Today: Proceedings**, vol. 33, p. 2996–2999, 2020. DOI 10.1016/j.matpr.2020.02.982. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.982>.

REGNER, S.; DRECHSLER, K.; SENTPALI, S. Modification of the fiber/matrix bonding by a plasma treatment to reduce the structure-borne sound transmission. **Applied Acoustics**, vol. 153, p. 78–86, 2019. DOI 10.1016/j.apacoust.2019.04.005. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.04.005>.

RIEDEL, U.; NICKEL, J. Applications of Natural Fiber Composites for Constructive Parts in Aerospace, Automobiles, and Other Areas. **Biopolymers Online**, 2002. <https://doi.org/10.1002/3527600035.bpola001>.

RODRIGUEZ, L. J.; PEÇAS, P.; CARVALHO, H.; ORREGO, C. E. A literature review on life cycle tools fostering holistic sustainability assessment: An application in biocomposite materials. **Journal of Environmental Management**, vol. 262, no. February, p. 110308, 2020. DOI 10.1016/j.jenvman.2020.110308. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110308>.

SHALWAN, A.; YOUSIF, B. F. In state of art: Mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres. **Materials and Design**, vol. 48, p. 14–24, 2013. DOI 10.1016/j.matdes.2012.07.014. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.014>.

SHOGREN, R.; WOOD, D.; ORTS, W.; GLENN, G. Plant-based materials and transitioning to a circular economy. **Sustainable Production and Consumption**, vol. 22, no. xxxx, p. 1–22, 2019. DOI 10.1016/j.spc.2019.04.007. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.04.007>.

SILVA, C. C. da; DE FARIA LIMA, A.; MORETO, J. A.; DANTAS, S.; ALVES HENRIQUE, M.; PASQUINI, D.; CIPRIANO RANGEL, E.; SCARMÍNIO, J.; GELAMO, R. V. Influence of plasma treatment on the physical and chemical properties of sisal fibers and environmental application in adsorption of methylene blue. **Materials Today Communications**, vol. 23, no. April, p. 101140, 2020. DOI 10.1016/j.mtcomm.2020.101140. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101140>.

SILVA, F. de A.; FILHO, R. D. T.; FILHO, J. de A. M.; FAIRBAIRN, E. de M. R. Physical and mechanical properties of durable sisal fiber-cement composites. **Construction and Building Materials**, vol. 24, no. 5, p. 777–785, 2010. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.030. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.030>.

SIMUL BHUYAN, M.; VENKATRAMANAN, S.; SELVAM, S.; SZABO, S.; MARUF HOSSAIN, M.; RASHED-UN-NABI, M.; PARAMASIVAM, C. R.; JONATHAN, M. P.; SHAFIQUUL ISLAM, M. Plastics in marine ecosystem: A review of their sources and pollution conduits. **Regional Studies in Marine Science**, , p. 101539, 2020. DOI 10.1016/j.rsma.2020.101539. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101539>.

SINDHU, R.; GNANSOUNOU, E.; REBELLO, S.; BINOD, P.; VARJANI, S.; THAKUR, I. S.; NAIR, R. B.; PANDEY, A. Conversion of food and kitchen waste to value-added products. **Journal of Environmental Management**, vol. 241, no. March, p. 619–630, 2019. DOI 10.1016/j.jenvman.2019.02.053. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.053>.

SINGH, J. I.P.; DHAWAN, V.; SINGH, S.; JANGID, K. Study of Effect of Surface Treatment on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Composites. **Materials Today: Proceedings**, vol. 4, no. 2, p. 2793–2799, 2017. DOI 10.1016/j.matpr.2017.02.158. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.158>.

STOICA, M.; MARIAN, V.; LAURA, M.; STOICA, D. The financial impact of replacing plastic packaging by biodegradable biopolymers - A smart solution for the food industry. **Journal of Cleaner Production**, vol. 277, p. 124013, 2020. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.124013. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124013>.

SUDERMAN, N.; ISA, M. I. N.; SARBON, N. M. The effect of plasticizers on the functional properties of biodegradable gelatin-based film: A review. **Food Bioscience**, vol. 24, no. June, p. 111–119, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2018.06.006>.

VERMA, D.; GOPE, P. Coir fiber reinforcement and application in composites: A review. **Green Approaches to Biocomposite Materials Science and Engineering**, no. April, p. 201–227, 2013. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0424-5.ch010>.

VIGNESHWARAN, S.; SUNDARAKANNAN, R.; JOHN, K. M.; JOEL, R. D.; PRASATH, K. A.; AJITH, S.; ARUMUGAPRABU, V.; UTHAYAKUMAR, M. Recent advancement in the natural fiber polymer composites: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, vol. 277, p. 124109, 2020. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.124109. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124109>.

VIJAY, R.; VINOD, A.; LENIN SINGARAVELU, D.; SANJAY, M. R.; SIENGCHIN, S. Characterization of chemical treated and untreated natural fibers from Pennisetum orientale grass- A potential reinforcement for lightweight polymeric applications. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, vol. 4, no. 1, p. 43–49, 2020. DOI 10.1016/j.ijlmm.2020.06.008. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.06.008>.

VIMAL, R.; SUBRAMANIAN, K. H. H.; ASWIN, C.; LOGESWARAN, V.; RAMESH, M. Comparisonal Study of Succinylation and Phthalicylation of Jute Fibres: Study of Mechanical Properties of Modified Fibre Reinforced Epoxy Composites. **Materials Today: Proceedings**, vol. 2, no. 4–5, p. 2918–2927, 2015. DOI 10.1016/j.matpr.2015.07.254. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.254>.

WANG, Q.; XIAO, S.; SHI, S. Q.; CAI, L. Mechanical property enhancement of self-bonded natural fiber material via controlling cell wall plasticity and structure. **Materials and Design**, vol. 172, p. 107763, 2019. DOI 10.1016/j.matdes.2019.107763. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107763>.

YUAN, X.; JAYARAMAN, K.; BHATTACHARYYA, D. Plasma treatment of sisal fibres and its effects on tensile strength and interfacial bonding. **Journal of Adhesion Science and Technology**, vol. 16, no. 6, p. 703–727, 2002. <https://doi.org/10.1163/156856102760099898>.

ZHENG, Y.; WANG, J.; ZHU, Y.; WANG, A. Research and application of kapok fiber as an absorbing material: A mini review. **Journal of Environmental Sciences (China)**, vol. 27, no. C, p. 21–32, 2015. DOI 10.1016/j.jes.2014.09.026. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2014.09.026>.

ZWANE, P. E.; NDLOVU, T.; MKHONTA, T. T.; MASARIRAMBI, M. T.; THWALA, J. M. Effects of enzymatic treatment of sisal fibres on tensile strength and morphology. **Scientific African**, vol. 6, p. e00136, 2019. DOI 10.1016/j.sciaf.2019.e00136. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00136>.