

NAYARA TAÍNE BOHNENBERGER

**CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS E AVALIAÇÃO, ATRAVÉS DE
SIMULAÇÃO, DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS À BASE
DE AMIDO TERMOLPLÁSTICO E FIBRAS DE SISAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de
bacharelado em Engenharia Química.

Área da Engenharia Química: Tecnologia Química

Sub-área: Polímeros

Orientador: Profa. Dra. Daiane Romanzini

FELIZ

2021

NAYARA TAÍNE BOHNENBERGER

**CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS E AVALIAÇÃO, ATRAVÉS DE
SIMULAÇÃO, DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS À BASE DE
AMIDO TERMOLPLÁSTICO E FIBRAS DE SISAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Prof. André Zimmer

Prof. Cinthia Gabriely Zimmer

ORIENTADOR

Prof. Daiane Romanzini

Feliz, 31 de março de 2021.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas oportunidades maravilhosas que colocou no meu caminho.

À minha orientadora, a professora Dra. Daiane Romanzini, pelo acompanhamento, disponibilidade e orientação para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, por todo apoio e incentivo ao longo deste percurso.

À minha irmã Angela, por me incentivar a sonhar alto e me apoiar incondicionalmente.

Aos meus sobrinhos, por acreditarem que as minhas ideias poderão transformar o mundo.

A todos os professores que contribuíram para a minha formação.

E a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para realização deste trabalho.

RESUMO

Materiais compósitos reforçados com fibras naturais vêm sendo amplamente utilizados, visto que esse tipo de reforço é abundante e apresenta baixo custo. Entre as fibras naturais, as fibras de sisal vêm se destacando, por possuírem boas propriedades elásticas, baixa massa específica e por permitirem boa adesão da matriz. O amido se trata de um polímero natural, que é muito abundante e apresenta baixo custo. Nesse sentido, esse estudo objetivou determinar por simulação as propriedades mecânicas e a densidade de materiais compósitos à base de amido termoplástico, reforçados com fibras de sisal curtas e moídas em diferentes tamanhos, e caracterizar as matérias-primas necessárias. Dessa forma, as simulações da densidade, do Módulo de Elasticidade e de Cisalhamento, foram feitas através do *software* Mech-Gcomp. A caracterização do amido ocorreu pela determinação do teor de água, enquanto que as fibras foram caracterizadas por Análise Termogravimétrica e por análise de Infravermelho por Transformada de Fourier. Foi possível verificar que os amidos são adequados para o preparo dos compósitos quanto ao teor de umidade, e que as fibras de sisal tratadas com hidróxido de sódio apresentam melhor estabilidade térmica e remoção de ceras e hemicelulose da superfície, o que é um indicativo de uma maior exposição das fibrilas e possivelmente, ocorrerá um melhor ancoramento na matriz quando os compósitos forem preparados. Através da simulação das propriedades dos compósitos, verificou-se que densidade é crescente com o aumento no teor de fibras. Além disso, o módulo de elasticidade e módulo de cisalhamento são influenciados pelo comprimento e pelo teor das fibras. Concluiu-se que a produção de compósitos à base de amido e fibras naturais é possível, visto que apresentam baixo custo, matérias-primas abundantes e propriedades satisfatórias.

Palavras-chave: Amido de Milho. Fécula de Mandioca. Fibras de Sisal. Fibras Naturais. Compósitos.

ABSTRACT

Natural fibers reinforced composite materials have been widely used, since this type of reinforcement is abundant and low. Among the natural fibers, sisal fibers have stood out, due to the increased elastic properties, low specific mass and improved matrix adhesion. Starch is a natural polymer, which is very abundant and has the advantage of low cost. In this sense, this study aimed to determine by simulation the mechanical properties and the density of composite materials based on thermoplastic starch, reinforced with short and ground sisal fibers in different sizes, and to characterize the raw materials. Thus, the simulations of density, the Elasticity and Shear Modules were performed using the Mech-Gcomp software. The starch characterization was performed by determining the water content, while the fibers were characterized by Thermogravimetric Analysis and by Infrared Analysis by Fourier Transform. It was possible to verify that the starches are suitable for the preparation of the composites in terms of moisture content, and that the sisal fibers treated with sodium hydroxide showed improved thermal stability and removal of waxes and hemicellulose from the surface, which is an indicative of a greater exposure of fibrils and possibly, improved link in the matrix will occur when composites are prepared. Through the simulation of the composites properties, it was verified that density is increasing with the increase in the fiber content. In addition, the modulus of elasticity and shear modulus are influenced by the length and fiber content. It was concluded that the production of composites based on starch and natural fibers is possible, since they have low cost, abundant raw materials and satisfactory properties.

Keywords: Corn Starch. Cassava starch. Sisal fibers. Natural fibers. Composites.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Microscopia eletrônica de diferentes amidos (4500x).	3
Figura 2 – Estruturas moleculares da α -Amilose.....	4
Figura 3 – Estruturas moleculares da amilopectina.....	5
Figura 4 – Foto micrografias do amido nativo (a) e amido termoplástico processado com 30 % de glicerol (b) com aumento de 2000x.....	6
Figura 5 – Estruturas moleculares do glicerol.	8
Figura 6 – Modelo de microfibrilas de celulose.	9
Figura 7 – Estrutura química da celulose	10
Figura 8 - (a) Um esboço da planta de sisal e a seção transversal de uma folha de sisal (Bisanda); (b) fotografia de uma planta de sisal	12
Figura 9 - Um esboço de um pacote de fibras de floema (fita) na seção transversal.....	13
Figura 10 - Transferência de tensões em função do comprimento da fibra.	17
Figura 11 – Página inicial do <i>software</i> Mech-Gcomp.	18
Figura 12 – Preenchimento de dados no <i>software</i> Mech-Gcomp.....	19
Figura 13 – Abordagens quanto ao arranjo das fibras.	20
Figura 14 – Geração de dados no <i>software</i> Mech-Gomp.....	20
Figura 15 - Matérias-primas utilizadas: (a) Amido de milho, (b) fécula de mandioca e (c) fibras de <i>sisal in natura</i>	22
Figura 16 – Tratamento alcalino das fibras de sisal	23
Figura 17 – Espectros de FTIR da fibra de sisal <i>in natura</i> e tratada	27
Figura 18 – Termograma das fibras de sisal <i>in natura</i> e tratadas	28
Figura 19 - TGA e DTG das fibras <i>in natura</i> (a) e tratadas (b).	29
Figura 20 – Módulo de Elasticidade dos compósitos com fibras moídas e cortadas pelo método de Halpin-Tsai.....	31
Figura 21 – Densidade dos compósitos pela Lei das Misturas	32
Figura 22 - Módulo de Cisalhamento do compósito	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Conteúdo de amilose de diversas fontes de amido.....	4
Tabela 2 - Intervalo de temperatura de gelatinização de alguns amidos	6
Tabela 3 – Composição química de algumas fibras.....	11
Tabela 4 – Propriedades mecânicas ao longo do comprimento das fibras de sisal	12
Tabela 5 - Propriedades do TPS.....	24
Tabela 6 – Teor de umidade dos amidos de milho e mandioca.	26

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 Objetivo geral	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
2 REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 AMIDO.....	3
2.1.1 Amilose.....	4
2.1.2 Amilopectina.....	4
2.1.3 Propriedades do amido	5
2.2 PLASTIFICANTE.....	7
2.3 PROPRIEDADES DO AMIDO TERMOPLÁSTICO	8
2.4 FIBRAS NATURAIS	9
2.5 COMPÓSITOS	14
2.5.1 Compósitos reforçados com fibras	15
2.6 <i>SOFTWARES</i> PARA SIMULAÇÃO DE PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS.....	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1 MATERIAIS	21
3.2 PREPARAÇÃO DA FIBRA DE SISAL.....	22
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO AMIDO	23
3.4 CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA.....	24
3.5 SIMULAÇÃO DAS PROPRIEDADES MICROMECAÑICAS DOS COMPÓSITOS.....	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
4.1 TEOR DE UMIDADE DOS AMIDOS DE MILHO E MANDIOCA	26
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE SISAL TRATADAS E <i>IN NATURA</i>	26
4.2.1 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier.....	26
4.2.2 Análise termogravimétrica	28

4.3 SIMULAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS DE SISAL E AMIDO	30
4.3.1 Simulação do módulo de elasticidade	31
4.3.2 Simulação da densidade	32
4.3.3 Simulação do módulo de cisalhamento	33
5 CONCLUSÕES	35
REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

Os compósitos podem ser definidos como materiais constituídos por duas ou mais fases e que possuem propriedades diferentes dos materiais originais, pois contêm uma proporção relevante das características de cada uma das fases (CALLISTER JUNIOR, 2016; NEWELL, 2010).

Conforme Newel (2010), esse grupo é subdividido em compósitos reforçados por fibras, particulados, laminados e híbridos, sendo que as fibras naturais ou as fibras sintéticas são comumente empregadas como reforço. Apesar das propriedades mecânicas das fibras sintéticas serem superiores, a preocupação ambiental, bem como a abundância, atoxicidade e baixo-custo levam a utilização das fibras naturais sempre que possível (DIXIT *et al.*, 2017; SENTHILKUMAR *et al.*, 2018).

As vantagens na utilização das fibras vegetais se devem ao fato de serem compósitos que ocorrem de maneira natural, que são constituídos por microfibrilas de celulose embebidas em lignina (matriz), além de hemicelulose, pectinas e ceras (JOHN e THOMAS, 2008). As fibras de sisal estão entre as fibras naturais mais utilizadas para reforços de materiais compósitos, visto que possuem boas propriedades elásticas e dificultam a absorção de água (SENTHILKUMAR *et al.*, 2018; ZUCCARELLO e MARANNANO, 2018).

Estudos desenvolvidos nos últimos anos trazem a utilização de matrizes à base de amidos, como o amido de milho e a fécula de mandioca por serem abundantes e apresentarem baixo custo. O amido consiste em um polissacarídeo constituído por moléculas de amilopectina e amilose, sendo que o teor dessa última afeta propriedades como a viscosidade e a capacidade de gelatinização (ISOTTON, 2013; GUERRA, 2010; MOTTA, 2005).

Portanto, por meio desse estudo, foram simuladas as propriedades de materiais compósitos com matriz de amido termoplástico e reforçados com fibras de sisal curtas e moídas em diferentes concentrações e tamanhos. Além disso, foram caracterizados alguns insumos necessários para o preparado desses materiais, como os amidos de milho e mandioca, que foram submetidos à determinação do teor de água, e das fibras, que foram caracterizadas por análise termogravimétrica (TGA) e através de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Caracterizar as matérias-primas e avaliar, com o auxílio de um software, a influência do teor e do tamanho das fibras de sisal nas propriedades mecânicas de materiais compósitos à base de amido termoplástico.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar o teor de umidade do amido de milho e da fécula de mandioca,
- Analisar a estabilidade térmica e as mudanças químicas na superfície das fibras naturais tratadas com hidróxido de sódio e *in natura*,
- Simular as propriedades mecânicas dos compósitos utilizando um *software*, variando o teor e o tamanho de fibras de sisal cortadas e moídas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Amido

O amido, cuja fórmula molecular é $C_6H_{10}O_5$, constitui a principal reserva energética das plantas superiores. Considerado o principal carboidrato da alimentação humana, está presente nos cloroplastos de células vegetais, sendo que seu teor é em torno de 60 a 75% da massa total (CARR, 2007; GUINESI *et al.*, 2006; KOOLMAN; ROHM, 2005).

Insípido e inodoro, o amido se apresenta na forma de grânulos brancos, com dimensões, estrutura e forma diferentes para cada espécie vegetal, conforme mostra a Figura 1. Em geral, os diâmetros variam entre 1 a 100 μm e os formatos podem ser tanto regulares como irregulares (CARR, 2007; ISOTTON, 2013).

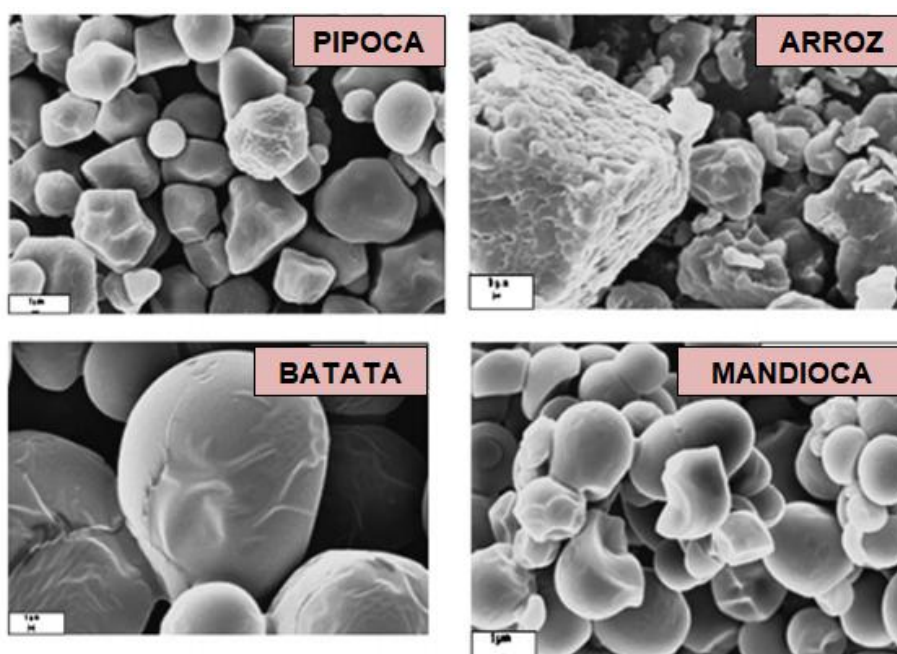


Figura 1- Microscopia eletrônica de diferentes amidos (4500x).
Fonte: adaptado de GUINESI *et al.*, 2006, p. 193.

Os grânulos desse polissacarídeo são compostos por amilose e amilopectina, cujos níveis influenciam outras propriedades e as proporções variam para as diferentes fontes, conforme Tabela 1. Pode-se observar, por exemplo, que enquanto o amido de milho apresenta 25% de amilose, a mandioca possui 18%, levando a

diferenças quanto à viscosidade e capacidade de gelatinização (ISOTTON, 2013; GUERRA, 2010; MOTTA, 2005).

Tabela 1- Conteúdo de amilose de diversas fontes de amido.

Fontes de amido	Teor de amilose (%)
Milho	25
Arroz	16
Mandioca	18
Batata	18
Trigo	24

Fonte: adaptado de Isotton (2013).

2.1.1 Amilose

A amilose é uma molécula longa, formada por cadeias não-ramificadas de resíduos de glicose, unidos por ligações glicosídicas $\alpha(1\rightarrow4)$, conforme Figura 2. Em decorrência da configuração C-1, as cadeias apresentam conformação helicoidal com 6-8 resíduos em torno (CAMPBELL; SHAWN, 2007; ISOTTON, 2013; KOOLMAN; RÖHM, 2005; MOTTA, 2005).

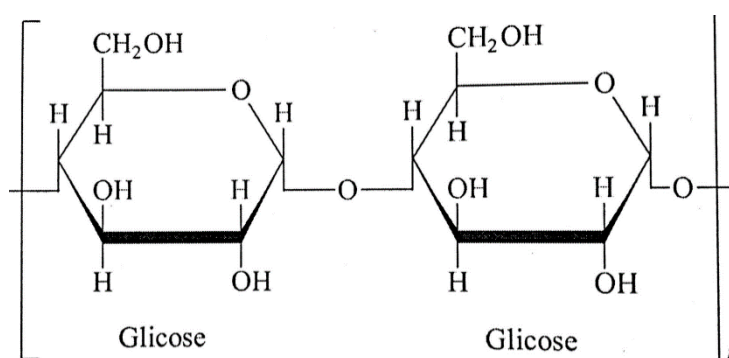


Figura 2 – Estruturas moleculares da α -Amilose.
Fonte: Motta (2015).

2.1.2 Amilopectina

A amilopectina (Figura 3) se trata de um polímero quase insolúvel e com cadeia altamente ramificada, cuja estrutura é constituída por resíduos de glicose

unidos por ligações glicosídicas $\alpha(1\rightarrow4)$, ligados a outras cadeias por ligações $\alpha(1\rightarrow6)$ (CAMPBELL; SHAWN, 2007; KOOLMANN; RÖHM, 2005; MOTTA, 2005).

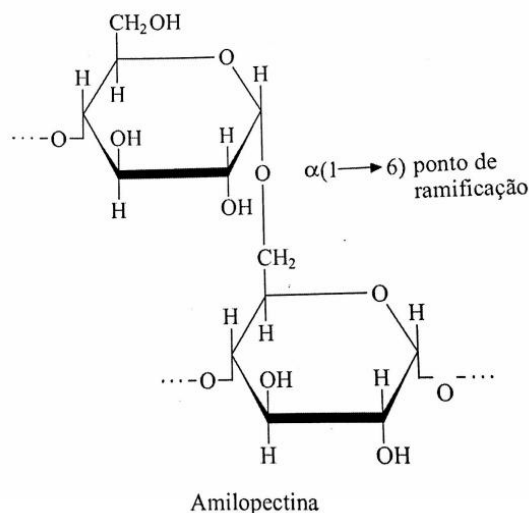


Figura 3 – Estruturas moleculares da amilopectina.
Fonte: Motta (2015)

2.1.3 Propriedades do amido

O amido não modificado possui caráter semicristalino, ou seja, as regiões cristalinas e amorfas estão distribuídas alternadamente. A cristalinidade fica em torno de 20 a 45 %, em decorrência da presença de amilopectina. A amilose, apesar da linearidade das cadeias, possui uma conformação helicoidal, dificultando essa associação (CEREDA, 2002; CORRADINI *et al.*, 2005; GUERRA, 2010).

Embora o amido seja quase insolúvel em água fria, devido às fortes ligações de hidrogênio, sofre grande inchamento em água quente. Após um longo cozimento, em torno de 15 a 25 % se dilui numa solução coloidal, em decorrência da incorporação da água na estrutura do polímero, dissociação e difusão da amilose, que é mais solúvel. Esse processo, no qual a parte cristalina da estrutura se converte em amorfa, é denominado gelatinização. O amido torna-se um material pastoso viscoelástico e quanto maior for o teor de amilose, mais rápido será esse processo (KOOLMAN; ROHM, 2005; ISOTTON, 2013). Conforme Avérous (2004), diferentes produtos são gerados, dependendo do teor de água e do nível de

desestruturação. Para a formação de amido gelatinizado é necessário um elevado teor de água, e se obtém um produto com alta desestruturação.

Os intervalos de temperaturas de gelatinização variam conforme as fontes de amido, de acordo com a Tabela 2:

Tabela 2 - Intervalo de temperatura de gelatinização de alguns amidos

Fontes de amido	Intervalo de temperaturas de gelatinização (°C)
Milho	62-72
Arroz	61-77
Mandioca	58-70
Batata	56-66
Trigo	52-63

Fonte: adaptado de Isotton (2013).

Importante ressaltar que o amido granular se torna termoplástico ou por meio da gelatinização ou por meio da fusão, sendo que a segunda é realizada em temperaturas bem superiores e com baixo teor de água (LIU *et al.*, 2009). Em ambos os processos, a estrutura semicristalina que o grânulo possui é destruída, como pode ser visto na Figura 4, para formar um material amorfo e homogêneo (AVÉROUS, 2004; DEBIAGI, 2013).

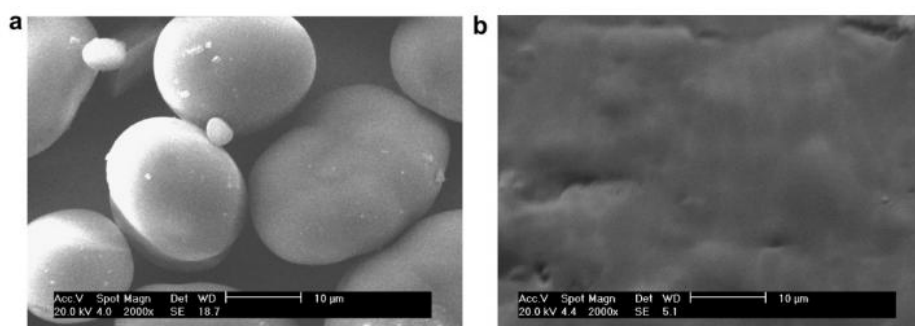


Figura 4 – Foto micrografias do amido nativo (a) e amido termoplástico processado com 30 % de glicerol (b) com aumento de 2000x.

Fonte: Chang; Ma e Yu (2008)

O comportamento reológico desse amido, bem como o processo, dependem da origem do amido, da sua cristalinidade, da quantidade de plastificante adicionada,

da temperatura e da taxa de cisalhamento (CARMONA, 2011). Conforme Carmona (2011), o amido termoplástico apresenta algumas limitações de utilização, associadas a sua sensibilidade à umidade.

O inverso da gelatinização é a retrogradação, processo no qual ocorre a reassociação em uma estrutura cristalina, conforme influência do tempo, temperatura, concentração, tipo de amido, grau de cristalinidade e a porcentagem de amilose/amilopectina (LAI *et al.*, 2000).

2.2 Plastificante

Com a intenção de tornar um polímero mais flexível e melhorar a sua processabilidade, o plastificante é adicionado, pois modifica a mobilidade das macromoléculas (RABELLO, 2000). Em geral, trata-se de um líquido com alto ponto de ebulição, de modo que não seja volátil na temperatura em que o processo é realizado (AVÉROUS, 2004; RABELLO, 2000).

Conforme Rabello (2000), o plastificante penetra no polímero, desintegrando a estrutura ao longo do processo, visto que suas moléculas se instalam entre as macromoléculas. A adição desse componente reduz tanto a temperatura de transição vítrea (T_g) como a temperatura de fusão (T_m), sem alterar quimicamente as macromoléculas.

A influência dos plastificantes glicerol, sorbitol e poli (álcool vinílico) e das diferentes concentrações (15, 20 e 25 %) em matriz de amido de milho termoplástico foram avaliados por Isotton (2015). Para isso, aqueceu os materiais em banho-maria sob agitação magnética pelo tempo de 6 min mantendo a temperatura entre 75 e 85 °C.

Comparando os diferentes plastificantes, o sorbitol e o glicerol se destacaram quanto à morfologia; o poli (álcool vinílico) e o sorbitol na resistência à tração de ruptura; o glicerol quanto à deformação na ruptura, a permeabilidade ao vapor de água e, para 20 % de concentração, em elasticidade e flexibilidade.

O glicerol se trata de um poliálcool no qual três carbonos estão ligados a três grupos hidroxila, conforme pode ser visto na Figura 5. Vem sendo amplamente utilizado devido ao seu ótimo desempenho como aditivo (ISOTTON, 2013).

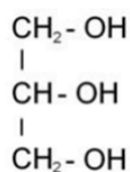


Figura 5 – Estruturas moleculares do glicerol.
Fonte: Isotton (2013).

2.3 Propriedades do amido termoplástico

Inúmeros autores desenvolveram estudos envolvendo a preparação de amido termoplástico (TPS) com o plastificante glicerol, avaliando diferentes aspectos.

Foram preparadas bandejas de TPS por meio da técnica de termoformagem por Marengo, Vercelheze e Mali (2012). Para isso, foram elaboradas diferentes formulações, variando o teor do amido de mandioca, do reforço e de água. Nas amostras controle, feitas sem a adição de reforço, foram adicionadas 100 g de amido, 100 mL de água e 5 g de glicerol para 100 g de sólidos. Nas demais, foram adicionadas diferentes concentrações de amido, água, reforço e 10 g de glicerol para 100 g de sólidos. Como aditivos, foram adicionados: goma guar (1 g para 100 g) como agente estabilizante e estearato de magnésio (0,5 g para 100 g) como agente desmoldante. O processo consistiu na adição dos insumos em agitador mecânico por 5 min a 1500 rpm. O glicerol foi adicionado posteriormente e mantido por 5 min sob agitação. Então, ocorreu a prensagem em prensa hidráulica acoplada a um molde de teflon, que foi mantido a 130 °C e 100 bars de pressão por 20 minutos. Por fim, o condicionamento sob umidade relativa de 58%.

Já Oliveira (2015) obteve e caracterizou esse material, estudou seu envelhecimento e produziu blendas com polipropileno. A primeira parte de seu estudo foi voltada para a obtenção da composição ótima de TPS, variando concentrações e parâmetros. Foram utilizados: amido de milho, previamente seco em estufa por 48 h a 110°C, glicerol, água destilada e ácidos carboxílicos. Um misturador a 1500 rpm durante 20 min garantiu a homogeneização. Depois de permanecer em uma estufa a 25°C por 24 h, as misturas foram agitadas por *mixxer* acoplado a um reômetro de torque.

O autor fixou a massa de amido em 196 g e de glicerol em 84 g. Após as análises, concluiu que a concentração adequada é de 2% de ácido e 20% de umidade. Também foram preparadas algumas amostras de controle, sem a presença de ácidos carboxílicos. Foi verificado que a última agitação deve ocorrer a 100 rpm, por 8 min de processamento e a 125 °C.

2.4 Fibras Naturais

John e Thomas (2008) classificam as fibras naturais quanto à origem em: vegetais, compostas por celulose; animais, constituídas por proteínas; e minerais, como vidro e o amianto.

As fibras vegetais se tratam de compósitos que ocorrem naturalmente e que são constituídos por microfibrilas de celulose que estão embebidas na lignina (matriz), conforme o modelo da Figura 6. São constituídas ainda por hemicelulose, pectinas e ceras (JOHN; THOMAS, 2008).

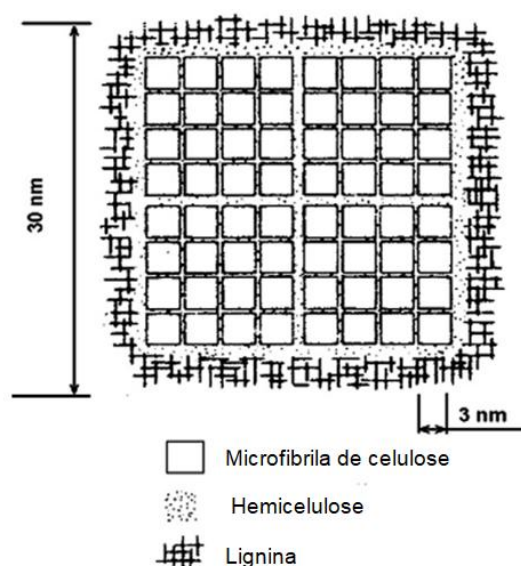


Figura 6 – Modelo de microfibrilas de celulose.
Fonte: adaptado de John e Thomas (2008).

A celulose é um polímero linear constituído por unidades de D-anidridoglucose, cuja estrutura pode ser observada na Figura 7. Cada uma dessas unidades contém três grupos hidroxila, que são responsáveis pelas ligações de hidrogênio intramoleculares e intermoleculares, influenciando tanto o

empacotamento cristalino, quanto as propriedades físicas. (GEORGE *et al.*, 2001; JOHN; THOMAS, 2008).

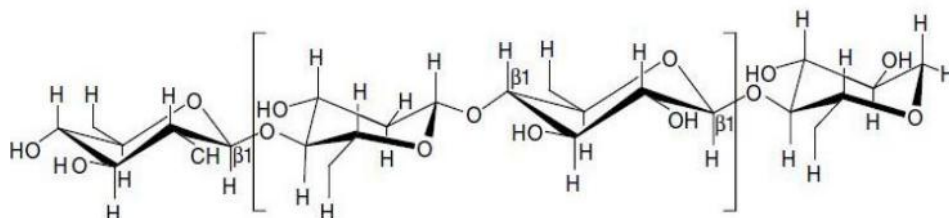


Figura 7 – Estrutura química da celulose
Fonte: Mohanty *et al.*, (2005).

A lignina, responsável pela rigidez das plantas, trata-se de um polímero constituído por alifáticos e aromáticos de alto peso molecular. É amorfa, hidrofóbica, insolúvel em grande parte dos solventes e não pode ser decomposta em unidades monoméricas (JOHN; THOMAS, 2008).

Diferente da celulose, a hemicelulose é constituída por diferentes açúcares, possui um nível considerável de cadeia de ramificação, o que leva a sua não cristalinidade, e seu grau de polimerização é de 10 a 100 vezes menor. São as hemiceluloses que constituem a matriz de suporte para as microfibrilas de celulose (JOHN; THOMAS, 2008). As pectinas são as responsáveis pela flexibilidade dos vegetais e as ceras consistem em tipos variados de alcoóis (JOHN; THOMAS, 2008).

As condições às quais as plantas são submetidas ao longo de seu crescimento, assim como a técnica de extração utilizada, interferem no conteúdo de celulose, no grau de polimerização, na estrutura química orientação e na cristalinidade, levando a diferentes propriedades físicas (GEORGE *et al.*, 2001). Conforme Malkapuram *et al.* (2009), nos casos em que as microfibrilas apresentarem arranjo em espiral em relação ao eixo, a fibra apresenta maior ductilidade. Enquanto isso, se tiverem orientação paralela ao eixo, a fibra será rígida e inflexível.

A Tabela 3 apresenta os valores médios de alguns componentes de fibras vegetais. Podem-se verificar as diferenças significativas nas composições químicas entre as espécies.

Tabela 3 – Composição química de algumas fibras.

Fibras	α-Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Extratos (%)
Sisal	74 – 75,2	10 – 13,9	7,6 – 7,98	-	-
Rami	80 – 85	3 – 4	0,5	-	6,4
Algodão	90	6	-	-	-
Coco	43,4 – 53	14,7	38,7 – 40,77	-	3,5

Fonte: adaptada de Satynarayana *et al.* (2007)

As fibras de sisal são obtidas de uma planta denominada cientificamente como *agave sisalana* (Figura 8), mas que é amplamente conhecida como sisal. Facilmente cultivável, renova-se em períodos curtos e cresce de maneira selvagem em inúmeros locais do mundo, sendo o Brasil e a Tanzânia seus principais produtores. Essas fibras são abundantes, apresentam baixo custo e boas propriedades mecânicas e de isolamento (LI; MAI; SENTHILKUMAR *et al.*, 2018; YE, 2000; SENTHILKUMAR *et al.*, 2018).

A *agave sisalana* contém em média de 200 a 250 folhas e cada uma delas possui de 1000 a 1200 feixes de fibras, que são constituídos por fibra, cutícula, matéria seca e água. A folha é formada por três tipos diferentes de fibras, que são: mecânicas, de fita e de xilema (BISANDA; ANSELL, 1992).

As primeiras são extraídas da periferia das folhas, as segundas são encontradas associadas aos tecidos condutores (Figura 8-a), que devido à estrutura, lhes proporcionam boa resistência mecânica; e as fibras de xilema estão contidas em frente às fibras de fita. Em relação ao formato, as fibras mecânicas são similares a uma ferradura mais espessa, as fibras de fita são mais compridas e podem ser partidas na direção longitudinal com facilidade; e as fibras de xilema apresentam formato irregular e, em geral, são perdidas na extração (BISANDA; ANSELL, 1992).

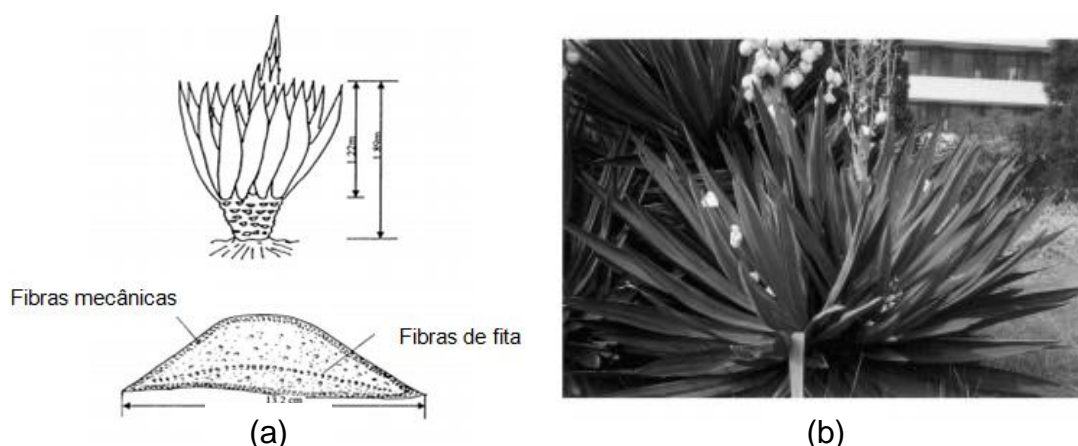


Figura 8 - (a) Um esboço da planta de sisal e a seção transversal de uma folha de sisal (Bisanda); (b) fotografia de uma planta de sisal
Fonte: adaptado de Li, Mai e Ye (2000).

As fibras de sisal apresentam em torno de 1 a 1,5 m de comprimento e suas propriedades mecânicas variam de acordo com a posição ao longo do comprimento, conforme Tabela 4. Isso justifica porque informações como o diâmetro variam tanto na literatura (BISANDA; ANSELL, 1991; MARTIN *et al.*, 2009)

Tabela 4 – Propriedades mecânicas ao longo do comprimento das fibras de sisal

Parte	Posição na fibra (cm)	Resistência à tração (MPa)	Módulo elástico (Gpa)	Diâmetro (μm)
1	0 – 30	448 ± 113	10 ± 3	465 ± 20
2	30 – 60	671 ± 274	25 ± 4	430 ± 9
3	60 – 90	565 ± 146	22 ± 4	440 ± 20
4	90 – 120	369 ± 129	17 ± 3	143 ± 14

Fonte: Adaptado de Martin *et al.* (2009)

O teor de lignina e celulose na parte 1 é inferior ao da parte 4. Em compensação, o teor de celulose se mostrou 10% superior na parte basal em relação à parte apical (MARTIN *et al.*, 2009).

O feixe é constituído por inúmeras fibras paralelas ocas com formato tubular, as paredes celulares são compostas por lignocelulose e reforçadas por bandas de celulose helicoidal, como mostra a Figura 9. Enquanto isso, a parte

externa da fibra contém materiais cerosos (BISANDA; ANSELL, 1992; ZADORECKI; FLODIN, 1987).

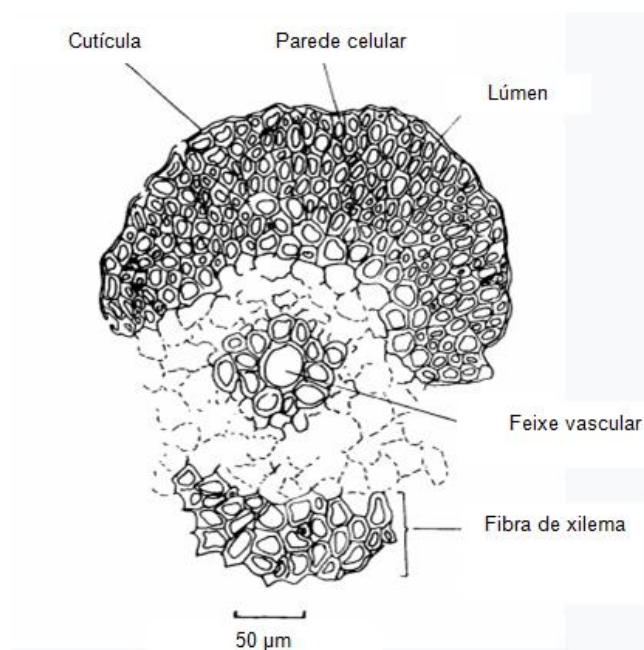


Figura 9 - Um esboço de um pacote de fibras de floema (fita) na seção transversal. A posição do feixe vascular e da fibra do xilema na polpa matriz de folhas também são mostradas. Fonte: adaptado de Bisanda e Ansell (1992).

Devido às características da parte externa das fibras, Joseph, Medeiros e Carvalho (1999) lavaram as fibras com água e as secaram antes da utilização. Já Campos *et al.* (2011) avaliaram o efeito de quatro tratamentos diferentes nas fibras de sisal utilizadas em um biocompósito de amido termoplástico/policaprolactona: a lavagem com água destilada por uma hora sob aquecimento, lavagem com a mistura de cicloexano e etanol, tratamento utilizando hidróxido de sódio e outro tratamento de branqueamento, a base de peróxido alcalino. Após as análises realizadas, verificaram que o último tratamento foi o mais eficiente, pois levou ao aumento de 145 % da resistência à tração, elevou a estabilidade térmica, pois a temperatura de degradação da fibra passou de 254 °C para 293 °C; e melhorou a interação entre o reforço e a matriz.

As fibras de sisal submetidas a diferentes tratamentos foram caracterizadas por Biondo (2012). Foram utilizados para o tratamento: solução de hidróxido de sódio, com concentrações de 2, 5 e 10% e com água destilada. Pôde-se verificar que os tratamentos aumentaram a estabilidade térmica. Além disso, a fibra lavada

com água destilada removeu constituintes amorfos, sem afetar a integridade da fibra, enquanto as soluções de NaOH, apesar da eficiência, levaram a fragmentação da fibra. As soluções com 2 e 5% não alteraram a resistência do material preparado, já a solução com 10% levou à diminuição da resistência à flexão.

Enquanto isso, Wang *et al.* (2015), tratou as fibras de sisal apenas com solução de NaOH 5% durante quatro horas, lavou com água destilada até atingirem pH neutro. Para finalizar o tratamento, colocou as fibras em um forno com temperatura de 90 °C por 3 h.

2.5 Compósitos

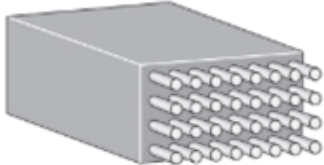
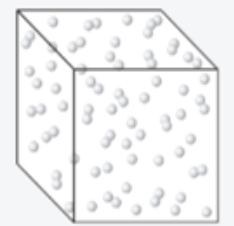
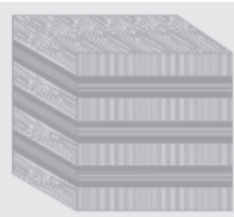
Os compósitos podem ser definidos como materiais constituídos por duas ou mais fases, insolúveis entre si, que devem ser diferentes quanto às suas propriedades químicas e separadas por uma interface distinta. Esses materiais multifásicos são produzidos de forma artificial, a partir de outros que ocorrem de maneira natural (CALLISTER JUNIOR, 2016; NEWELL, 2010).

Nesse contexto, a junção de diferentes materiais confere ao compósito propriedades diferentes dos materiais iniciais, pois contêm uma proporção relevante das características de cada fase. Resultam em combinações incomuns de rigidez, resistência mecânica, densidade, desempenho em altas temperaturas, resistência quanto à corrosão, dureza e condutividade (ASKELAND, 2014; CALLISTER JUNIOR, 2016; NEWELL, 2010).

Em geral, os compósitos são constituídos por duas fases: a fase dispersa e a matriz, que é contínua, envolve a anterior e pode ser composta por material cerâmico, metálico ou polimérico. Dessa forma, as propriedades dos compósitos são influenciadas pela quantidade relativa das fases e pela geometria da fase dispersa (BORSOI, 2015; CALLISTER JUNIOR, 2016).

Levando em consideração a matriz e a fase dispersa, Newel (2010) classifica os compósitos de três maneiras: reforçados por fibras, particulados e laminados, conforme o Quadro 1. Os primeiros apresentam fibras envoltas pela matriz, que em geral é amorfa. Os particulados possuem partículas grandes em dispersão e os últimos, apresentam camadas do material alternadas e unidas entre si.

Quadro 1 - Classes de compósitos.

Classe do compósito	Definição	Esquema	Exemplo
Reforçado por fibras	Compósito no qual um material forma a matriz externa e transfere quaisquer cargas aplicadas para as fibras frágeis e mais resistentes.		Compósitos Kevlar-epóxi
Particulado	Compósito que contém grande número de partículas grossas, para reforçar a matriz.		Concreto
Laminado	Compósito que é fabricado alternando-se o empilhamento de diferentes materiais, mantidos juntos por adesivo.		Compensado
Híbrido	Compósito composto por outros materiais compósitos.		Concreto reforçado por vergalhão

Fonte: adaptado de Newel (2010).

2.5.1 Compósitos reforçados com fibras

Os materiais compósitos podem ser reforçado com fibras naturais ou sintéticas, sendo que as segundas apresentam melhores propriedades mecânicas. No entanto, devido à preocupação ambiental, as fibras naturais vêm sendo utilizadas quando possível (SENTHILKUMAR *et al.*, 2018).

Pelo ponto de vista tecnológico, os principais compósitos possuem a fibra na forma de fase dispersa, com a função de suportar cargas altas de tração na direção

longitudinal. Geralmente, fibras com maior resistência e rigidez, mas frágeis, são adicionadas em uma matriz mais tenaz e dúctil, levando a um material compósito rígido em relação ao peso, resistente à fadiga, ao impacto e com baixa densidade (CALLISTER JUNIOR, 2016; DIXIT *et al.*, 2017; NEWELL, 2010).

Além de melhorarem o desempenho dos materiais nas aplicações tecnológicas, as fibras naturais são muito utilizadas por possuírem baixo custo, por serem abundantes, atóxicas e biodegradáveis (DIXIT *et al.*, 2017; BORSOI, 2015). Portanto, devido à tantas vantagens, os materiais compósitos reforçados com fibras naturais vêm sendo utilizados em aplicações automotivas, construtivas e domésticas (DIXIT *et al.*, 2017).

As fibras devem resistir às tensões que são transmitidas pelo material da matriz, ao mesmo tempo em que essa a protege, diminuindo a difusão das espécies que podem alterar suas propriedades mecânicas (ASKELAND, 2014). Callister Junior (2016) subclassifica os materiais compostos reforçados com fibras em fibras contínuas (alinhadas) e descontínuas (curtas), sendo que as últimas não levam a um aumento significativo na resistência.

Visto que nas extremidades das fibras são suportadas tensões inferiores em relação ao centro, a quebra da ligação com a matriz acontece nesses locais. Sendo assim, haverá uma elevada quantidade de extremidades nos casos em que se utilizam fibras com menor comprimento, levando a propriedades mecânicas inferiores (RABELLO, 2000).

Sendo assim, é determinado o comprimento crítico da fibra (L_c), ou seja, comprimento mínimo no qual a fibra alcança o esforço máximo aceitável (JOSEPH *et al.*, 2003). Nos casos em o comprimento é superior ao comprimento crítico, a região de platô, na qual a tensão que a fibra suporta é máxima, se torna a parte significativa, levando a um aumento da resistência mecânica, conforme a Figura 10 (c). Quando o comprimento for inferior, Figura 10 (a), a transferência para as fibras é restringida a valores baixos, levando a uma resistência menor (RABELLO, 2000).

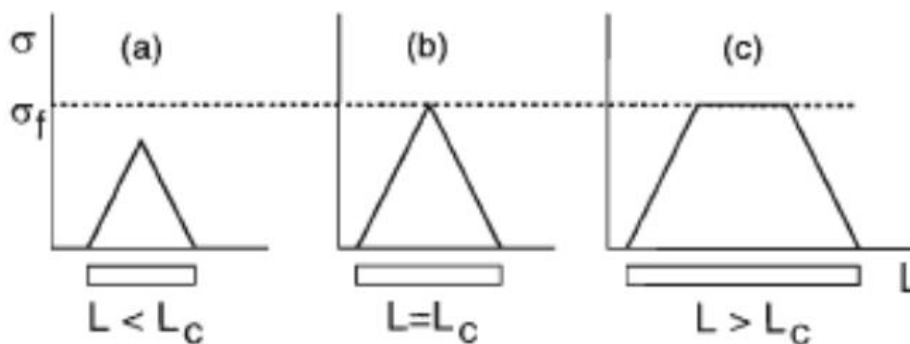


Figura 10 - Transferência de tensões em função do comprimento da fibra.
Fonte: Rabello (2000).

Em relação às desvantagens da utilização de fibras naturais em materiais compósitos, Dixit *et al.* (2017) cita a elevada absorção de água, que leva à redução da ligação entre reforço e matriz e afeta propriedades mecânicas. Além disso, aponta a baixa molhabilidade e o fato das fibras vegetais necessitarem de um tratamento químico para remover a camada cerosa.

Entre as fibras naturais mais utilizadas para reforços de materiais compósitos, as fibras de sisal apresentam maior teor de componentes de celulose, o que leva a elevação de propriedades elásticas e dificulta a absorção de água (SENTHILKUMAR *et al.*, 2018).

Conforme a revisão bibliográfica de Senthilkumar *et al.* (2018), o quanto a fibra de sisal vai alterar as propriedades da matriz depende da orientação de fibra, bem como comprimento, do tratamento realizado, aditivos e a hibridização.

2.6 Softwares para simulação de propriedades de compósitos

A micromecânica, definida como uma área da mecânica de compósitos, estima propriedades elásticas efetivas ou médias globais, bem como a resposta inelástica, de acordo com as propriedades da matriz, do reforço e o teor das fases de um material compósito (ANGRIZANI *et al.*, 2017; HERAKOVICH, 2012).

A partir de 1950, começaram a surgir inúmeros modelos que preveem as propriedades termoelásticas, variando de abordagens simplificadas a muito complexas e precisas. Sendo assim, tornou-se comum a utilização de *softwares* de apoio, que de forma rápida obtêm soluções analíticas confiáveis (ANGRIZANI *et al.*, 2017; HERAKOVICH, 2012).

Alguns exemplos de softwares utilizados para cálculos de micromecânica de compósitos são: *Simulation Composite Design*, *The Laminator*, *SwiftComp Micromechanics*, *ESAComp* e o *Composite Star*. Muitos deles exigem a obtenção de licença e estão disponíveis apenas em línguas estrangeiras. Além disso, costumam utilizar apenas um modelo, em geral baseado na Lei das Misturas (ANGRIZANI *et al.*, 2011; ANGRIZANI *et al.*, 2017).

Em contrapartida, o software MECH-Gcomp, que foi totalmente desenvolvido pelo GCOMP/LAPOL/UFRGS, é gratuito, está disponível em português e é descrito como um programa simples e didático. Por meio das propriedades da matriz e do reforço, que são informadas individualmente, são estimadas as propriedades do compósito final. Os resultados podem ser gerados na forma de gráficos, tabelas e outros recursos visuais (ANGRIZANI *et al.*, 2011; ANGRIZANI *et al.*, 2017; BOSCO; MENEZES, 2016; SILVA, 2015).

Diferente dos softwares comerciais, esse possui equações de inúmeras abordagens diferentes e fornece ao usuário a referência de cada uma delas. Em algumas situações, calcula uma mesma propriedade de maneiras diferentes, permitindo a escolha do valor de preferência. Outra vantagem está associada ao fato de possuir uma variante para fibras não isotrópicas e para fibras curtas em arranjo aleatório (ANGRIZANI *et al.*, 2011; ANGRIZANI *et al.*, 2017; SILVA, 2015).

Na barra localizada na parte superior da tela, o usuário define se o compósito será reforçado com partículas ou fibras, conforme a Figura 11.



Figura 11 – Página inicial do *software Mech-Gcomp*.
Fonte: adaptado de Mech-Gcomp (2021).

Feito isso, na opção “Materiais”, é possível cadastrar um novo ou utilizar um já existente no banco de dados de programa, conforme Figura 12. Podem ser

informados dados como: densidade, módulo de elasticidade e de cisalhamento, coeficiente de Poisson, entre outros.

The screenshot shows the Mech-Gcomp software interface. At the top, there are logos for MECH-GCOMP and UFRGS Apoio, along with the name Nayara Taline Bohnenberger and a 'Sair' button. A navigation menu includes 'Início', 'Nano -', 'Micro - Partículas -', 'Micro - Fibras -', 'Macro - Lâminas -', 'Macro - Laminados -', 'Vigas Sanduíche -', and 'Sobre -'. The current page is 'Micro - Fibras / Material'.

The interface is divided into three main sections:

- Fibra (Fiber):** A dropdown menu is set to 'Sisal'. Below it is a table with the following data:

Nome	Sisal
Densidade [kg/m ³]	1.34e+3
E_1 [Pa]	2.5e+10
E_2 [Pa]	2.85e+9
G_{12} [Pa]	2.4e+6
G_{23} [Pa]	
ν_{12}	0.170
ν_{23}	
e_1 [Pa]	6.65e+8
e_2 [Pa]	
a_1 [m/(m·K)]	
a_2 [m/(m·K)]	
β_1 [m/(m·96m)]	
β_2 [m/(m·96m)]	
k_1 [W/(m·K)]	4e-2
k_2 [W/(m·K)]	4e-2
- Matriz (Matrix):** A dropdown menu is empty. Below it are several input fields for matrix properties:

Nome	
Densidade [kg/m ³]	
E [Pa]	
G [Pa]	
ν	
e_1 [Pa]	
e_2 [Pa]	
e_3 [Pa]	
a [m/(m·K)]	
β [m/(m·96m)]	
k [W/(m·K)]	
c [1/(kg·K)]	
- Diagram:** A central diagram shows a square unit cell with a matrix 'M' and a fiber 'F'. Below it is a 3D perspective view of a fiber-matrix structure with axes 1 (Longitudinal), 2 (Transversal), and 3 (vertical).

At the bottom right, there are buttons for 'Salvar', 'Deletar', and 'Limpar dados'.

Figura 12 – Preenchimento de dados no software Mech-Gcomp.
Fonte: adaptado de Mech-Gcomp (2021)

Em seguida, no caso de micro-fibras, seleciona-se o submenu “fibras contínuas” ou “fibras descontínuas”. As primeiras referem-se às fibras longas, com matriz isotrópica e fibras isotrópicas, como está apresentado na Figura 13. Os métodos se aplicam de maneiras diferentes de acordo com o arranjo: unidirecional ou aleatório (MENEZES; AMICO, 2016).

As fibras descontínuas possuem duas abordagens distintas: distribuição unidirecional ou aleatória, conforme Figura 13.

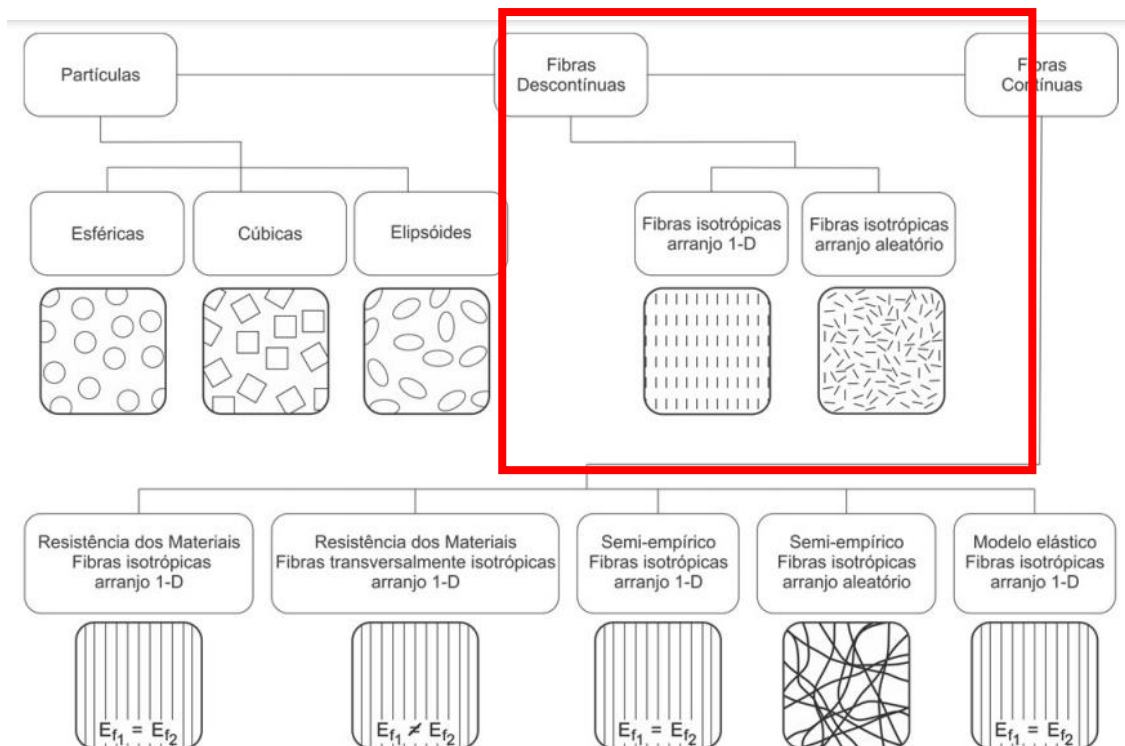


Figura 13 – Abordagens quanto ao arranjo das fibras.
Fonte: Angrazini *et al.* (2017).

No *software*, o usuário deve informar os dados de fração mássica ou volumétrica do reforço para as fibras contínuas. Para as fibras descontínuas também se deve preencher os campos de comprimento e o diâmetro da fibra. Feito isso, é possível calcular e gerar os gráficos das propriedades, como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Geração de dados no *software* Mech-Gomp
Fonte: adaptado de Mech-Gcomp (2021).

O *software* foi utilizado por Angrazini *et al.* (2017) para analisar as propriedades de um compósito particulado de CaCO_3 / poliéster. Sua metodologia consistiu em comparar seus dados obtidos experimentalmente, com resultados analíticos presentes na literatura e com os resultados gerados pelo MECH-Gcomp. Concluiu que esse programa tem potencial como uma ferramenta de análise preliminar, visto que obteve resultados de confiabilidade aceitável, de forma rápida e simples.

Já Garbin (2017), calculou no *software* as propriedades mecânicas de painéis sanduíche com núcleo de poliuretano e faces de fibra de vidro, que foram desenvolvidos por meio da técnica de laminação contínua. O autor concluiu que os resultados apresentados pelo programa foram compatíveis com os dados experimentais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Foram analisados alguns insumos utilizados no preparo de compósitos de amido termoplástico com fibras de sisal. Para isso, foram selecionados dois tipos de amido: amido de milho da marca Maisena preparado em Garanhuns - PE e polvilho doce (fécula de mandioca) da marca Corsetti produzido em Santa Cruz do Sul – RS, por serem comumente utilizados na literatura e por apresentarem diferentes teores de amilose.

Como reforço, foi utilizada a fibra de sisal Compel, 100 % natural, proveniente de Vinhedo - SP. Para seu tratamento, foram utilizados: NaOH com grau PA (5%). Os compósitos preparados com essas fibras possuem inúmeras vantagens, que estão associadas às propriedades das fibras, como: boa adesão de matriz, baixa massa específica e elevada resistência ao impacto, à tração e flexão, devido ao grande módulo de resistência e elasticidade (CAMPOS *et al.*, 2011; ZUCCARELLO; MARANNANO, 2018). Sendo assim, inúmeros autores a empregaram em materiais compósitos nos últimos anos.

Os dois tipos de amido, bem como a fibra *in natura* podem ser observados na Figura 15:

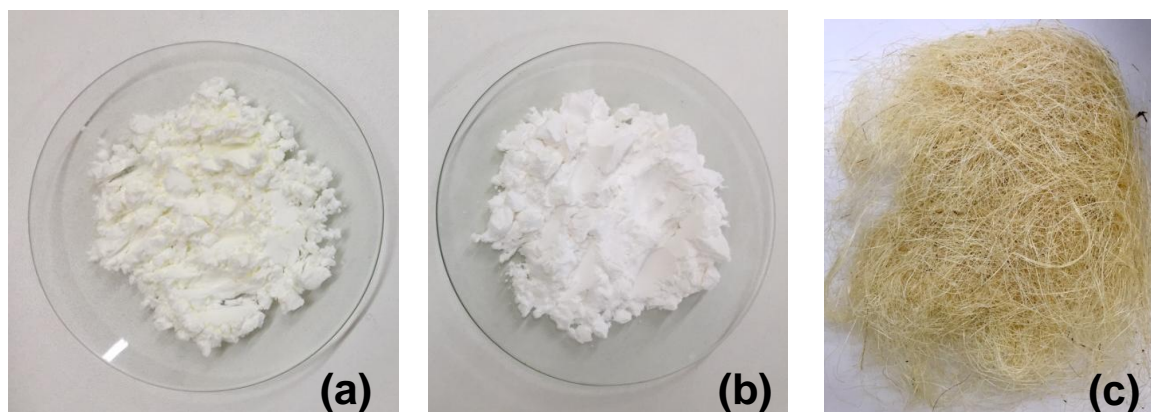


Figura 15 - Matérias-primas utilizadas: (a) Amido de milho, (b) fécula de mandioca e (c) fibras de sisal *in natura*
Fonte: o autor (2021).

3.2 Preparação da fibra de sisal

As fibras *in natura* foram embebidas em solução de NaOH (5%) por 1 h a 25 °C, na proporção de 1 g para 60 mL de solução, pois o tratamento alcalino leva ao aumento da compatibilidade entre o sisal (reforço) e o amido termoplástico (matriz). Então, passaram por uma etapa de lavagem com água destilada a 20 °C durante 1 h, até o pH atingir 7; e, por fim, foram secas na estufa por 2 h na temperatura de 100 °C, conforme representado na Figura 16.

Um tratamento prévio similar foi adotado por Xie *et al.* (2018) e por Biondo (2012), que verificaram sua eficácia em relação à remoção dos materiais cerosos e constituintes amorfos da hemicelulose, que estão presentes na superfície.

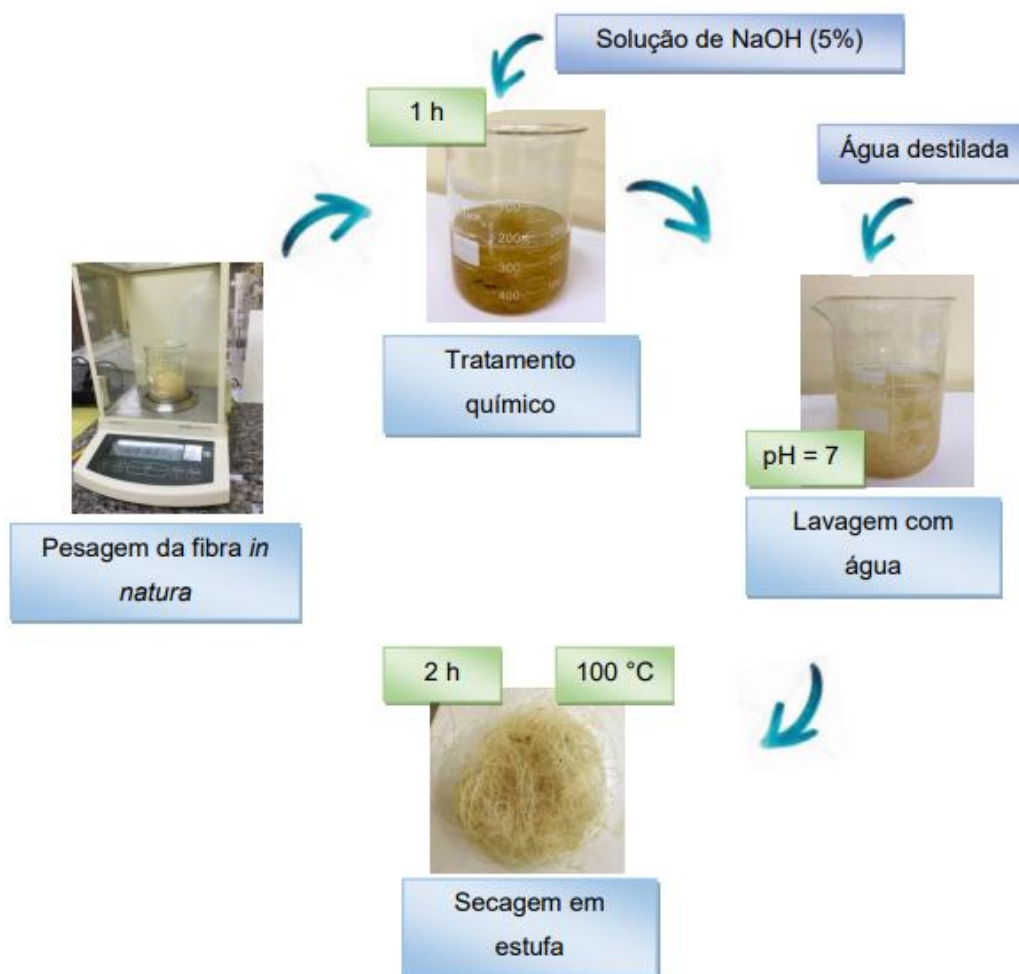


Figura 16 – Tratamento alcalino das fibras de sisal
Fonte: o autor (2021).

3.3 Caracterização do amido

O teor da umidade foi determinado em triplicata, medindo 1 g de amido de cada amostra, levando até a estufa e deixando a 100 °C pelo tempo de 24 h. Para essa análise seguiu-se a norma ASTM E104-02(2012) para definir os parâmetros. Então, foi realizada a medição da massa e se calculou a umidade por meio da diferença da massa antes da secagem, contendo umidade, e depois da secagem, conforme Equação 1, na qual m_i se trata inicial e m_f , da massa após a etapa de secagem.

$$Umidade (\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

3.4 Caracterização da fibra

A análise termogravimétrica foi realizada a uma taxa de 10 °C/min em atmosfera de nitrogênio (50 mL/min), na faixa de 20 a 900 °C. Já a análise de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier permitiu obter um espectro na região de 400 – 4000 cm⁻¹, utilizando a técnica de refletância total atenuada (ATR).

3.5 Simulação das propriedades micromecânicas dos compósitos

O *software* Mech-Gcomp foi utilizado para prever as propriedades micromecânicas dos compósitos produzidos com amido termoplástico e fibras de sisal. Os dados referentes às fibras de sisal já estavam cadastrados no banco de dados, enquanto as informações referentes ao amido termoplástico tiveram que ser cadastradas.

Para isso, realizou-se uma vasta pesquisa bibliográfica em artigos envolvendo a preparação e caracterização desse material, a fim de encontrar todas as informações necessárias. Os dados utilizados estão contidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades do TPS.

Propriedade	Valor	Fonte
Densidade (kg/m ³)	940 ± 60	Debiagi <i>et al.</i> (2010)
Módulo de elasticidade – E _m (Pa)	38.600 ± 100	Oliveira (2015)
Tensão normal (tração) – σ ^T (Pa)	2000	Oliveira (2015)

O cadastro do amido termoplástico foi feito clicando no item “micro-fibras” e acessando a aba “materiais”, presente na parte superior da tela. Os dados foram preenchidos para a matriz e salvos no sistema. Clicando novamente em “micro-fibras”, foi selecionada a aba de “fibras descontínuas”. Para todas as simulações, foi selecionada a abordagem de “fibras isotrópicas curtas em arranjo aleatório”.

Os valores do comprimento das fibras curtas foram variados em 25, 40 e 60 mm. Já para os compósitos preparados com fibras moídas foi adotado o comprimento de. Para ambos os tipos, o diâmetro foi fixado em 430 μm, conforme foi

verificado por Martin *et al.* (2009) entre o comprimento de 30 e 60 cm da fibra em relação à parte basal. Além disso, a fração mássica das fibras foi variada entre 10 e 60%, com variação de 5%, com a intenção de verificar a influência desses parâmetros na densidade, nos Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento do compósito final.

Para o caso de fibras isotrópicas curtas e em arranjo aleatório, vários modelos são apresentados pelo *software*. A densidade do compósito de amido e sisal (ρ_c) foi determinada através da Lei das Misturas (Equação 1), na qual ρ_f é a densidade da fibra (kg/m^3), ρ_m é a densidade da matriz (kg/m^3), V_f é a fração volumétrica de fibras e V_m é a fração volumétrica da matriz.

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (2)$$

Calcularam-se as constantes de engenharia, os módulos de elasticidade longitudinal e transversal utilizando as equações Halpin e Tsai (Equações 3 a 8). Onde: l é o comprimento da fibra (m), d é o diâmetro (m), E_m é o módulo de elasticidade da matriz (Pa), E_{1f} é o módulo de elasticidade longitudinal da fibra (Pa) e G é o módulo de cisalhamento do compósito (MENEZES; AMICO, 2016).

$$E_1 = E_m \left(\frac{1 + 2 \left(\frac{l}{d} \right) \eta_1 V_f}{1 - \eta_1 V_f} \right) \quad (3)$$

$$E_2 = E_m \left(\frac{1 + 2 \eta_2 V_f}{1 - \eta_2 V_f} \right) \quad (4)$$

$$\eta_1 = \frac{\left(\frac{E_{1f}}{E_m} \right) - 1}{\left(\frac{E_{1f}}{E_m} \right) + 2 \left(\frac{l}{d} \right)} \quad (5)$$

$$\eta_2 = \frac{\left(\frac{E_{1f}}{E_m} \right) - 1}{\left(\frac{E_{1f}}{E_m} \right) + 2} \quad (6)$$

$$E_{2D} = \frac{3}{8} E_1 + \frac{5}{8} E_2 \quad (7)$$

$$G = \frac{1}{8}E_1 + \frac{1}{4}E_2 \quad (8)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Teor de umidade dos amidos de milho e mandioca

O teor de umidade está relacionado com etapa de secagem, que ocorre após a extração (FIGUEROA, 2016). Os valores obtidos para as amostras de amido de milho e de fécula de mandioca são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Teor de umidade dos amidos de milho e mandioca.

Amido	Teor médio de umidade (%)
Milho	8,94
Mandioca	8,53

De acordo com Resolução n. de Setembro de 2005 da Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos, é permitida a umidade máxima de 15% (g/100g) para amido de cereais e de 18% (g/100g) para amido de mandioca. Sendo assim, os valores obtidos na análise estão dentro do padrão.

4.2 Caracterização das fibras de sisal tratadas e *in natura*

4.2.1 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier

A estrutura química das fibras de sisal foi analisada por meio da técnica de FTIR-ATR, que é eficaz na caracterização das fibras lignocelulósicas devido às bandas de absorção características da celulose, hemicelulose e lignina (CARMONA, 2011). A Figura 17 apresenta os espectros de FTIR-ATR das fibras *in natura* e tratadas com NaOH.

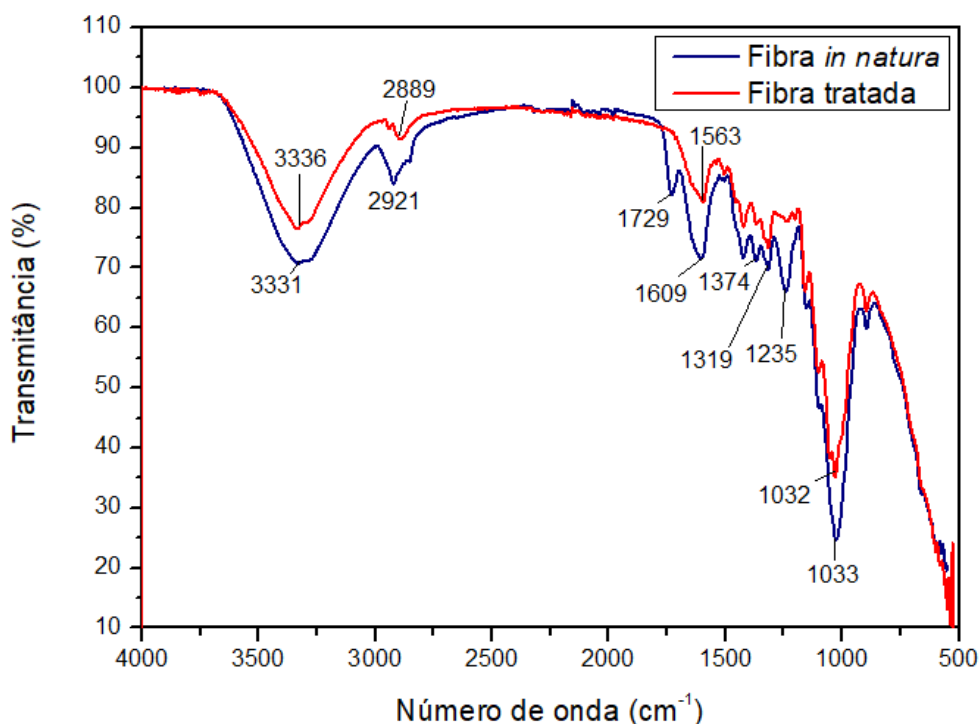


Figura 17 – Espectros de FTIR da fibra de sisal *in natura* e tratada
Fonte: o autor (2021).

O espectro de FTIR se mostrou similar ao encontrado por Biondo (2012) e apresentou as bandas atribuídas aos principais grupos funcionais dos constituintes das fibras lignocelulósicas.

As bandas características dos estiramentos dos grupos hidroxila, que estão presentes nas estruturas da celulose e da água, são observadas na região 3331 cm^{-1} . Já as bandas características dos estiramentos simétricos e assimétricos das ligações C-H da hemicelulose e celulose podem ser vistas na região 2921 cm^{-1} (BIONDO, 2012; CARMONA, 2011).

A região entre 1729 e 1609 cm^{-1} se refere ao estiramento da ligação carbonila do ácido carboxílico e de aldeídos presentes na hemicelulose e também à água que está contida nas fibras (BIONDO, 2012; BORSOI, 2012; CARMONA, 2011). O pico presente em 1729 cm^{-1} para as fibras *in natura*, não aparece nas fibras tratadas. Conforme Reddy *et al.* (2009) isso se deve à remoção de partes amorfas da hemicelulose por meio do tratamento alcalino.

As bandas entre 1374 e 1319 cm^{-1} são atribuídas às vibrações dos grupos C-H e C-O do anel aromático presente nos polissacarídeos da estrutura da celulose. Já o espectro revelado em 1235 cm^{-1} é característico da cera presente na superfície da

fibra. Observa-se a diferença entre a fibra tratada e *in natura*, visto que o tratamento químico auxiliou na remoção dessa camada cerosa. As bandas na região de 1033 cm^{-1} são atribuídas às vibrações dos grupos C-H e C-O contidos nos polissacarídeos da celulose (BIONDO, 2012; BORSOI, 2012; SOOD, DEEPAK, GUPTA, 2018).

De um modo geral, foi verificado que o tratamento alcalino foi eficiente, o que levaria a uma melhora da ancoragem matriz/reforço. Outros estudos mostraram que a remoção de constituintes amorfos e da camada cerosa promoveram a exposição das microfibrilas, aumentando a rugosidade e favorecendo a desfibrilação. (BELTRAMI *et al.*, 2014; CAMPOS *et al.*, 2011).

4.2.2 Análise termogravimétrica

Na Figura 18 é apresentado o termograma das fibras, no qual é possível visualizar que as fibras tratadas com hidróxido de sódio apresentaram estabilidade térmica superior às fibras *in natura*. O mesmo comportamento foi observado por Biondo (2012) e por Teodoro *et al.* (2011). No caso das fibras *in natura*, a degradação iniciou em temperaturas inferiores devido à decomposição das partes não celulósicas (TEODORO *et al.*, 2011).

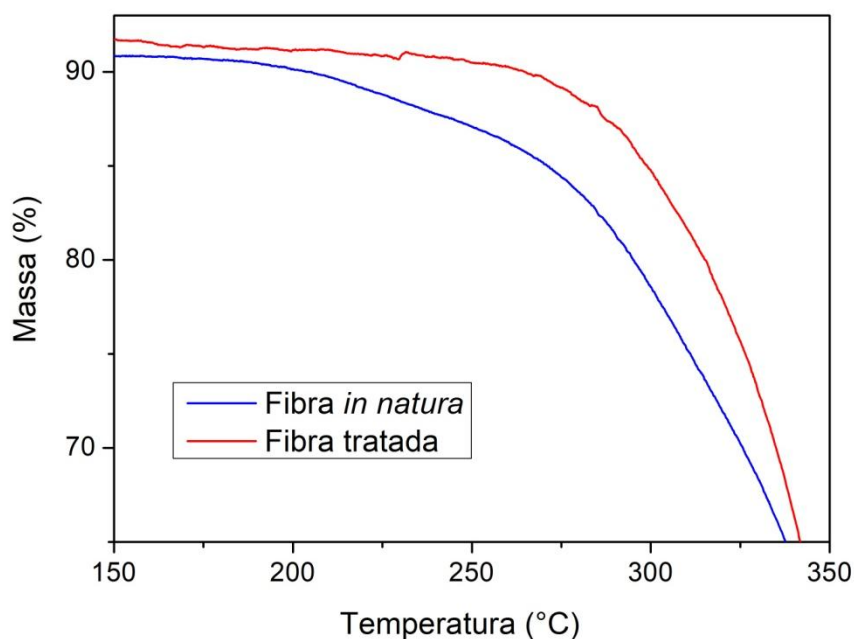


Figura 18 – Termograma das fibras de sisal *in natura* e tratadas
Fonte: o autor (2021).

Nas Figuras 19 são apresentados os resultados da análise termogravimétrica (TGA) e de sua derivada (DTG) para as fibras *in natura* (a) e tratadas (b).

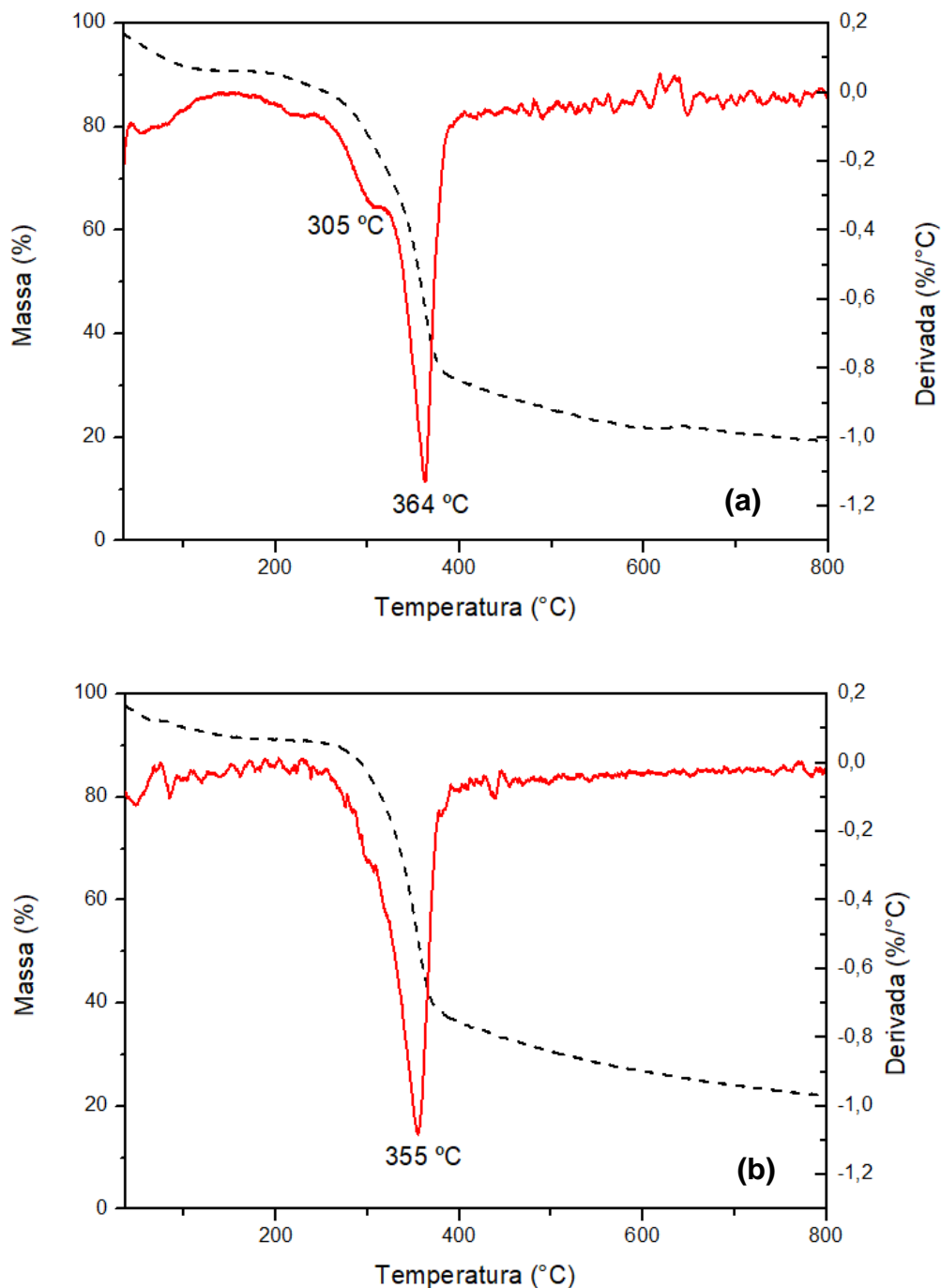


Figura 19 - TGA e DTG das fibras *in natura* (a) e tratadas (b).
Fonte: o autor (2021).

Observa-se, para a fibra *in natura*, uma perda de massa inicial até 130 °C, que ocorreu devido à perda dos constituintes voláteis. A segunda perda, que foi

verificada entre 195 °C e 350 °C, pode estar associada à degradação da hemicelulose, da celulose e de pequena parcela da lignina. Já o decréscimo entre 350 °C e 900 °C tem forte relação com a lignina, que se degrada lentamente e em um grande intervalo de temperatura (CAMPOS *et al*, 2011).

Para as fibras tratadas, observa-se um deslocamento da curva, associado à perda da hemicelulose, que apresenta menor estabilidade térmica, e da lignina. Isso levou a uma fibra mais rígida e com propriedades térmicas superiores (CAMPOS *et al*, 2011; TEODORO *et al*, 2011).

Como poder ser observado, em 600°C, as fibras *in natura* apresentaram 21,94% de massa residual, enquanto as fibras tratadas com NaOH apresentaram 26,77%. Um comportamento similar foi observado por Biondo (2012).

As fibras de sisal *in natura* apresentaram um pico de degradação em 305 °C, que está relacionado com a hemicelulose. Essa etapa de perda de massa não ocorreu para as fibras tratadas, devido à remoção de hemicelulose com o tratamento alcalino, corroborando com os resultados da análise de FTIR. Conforme Reddy *et al*. (2009), como o tratamento prévio das fibras levou à eliminação de impurezas e constituintes amorfos da hemicelulose, ocorreu o aumento da cristalinidade das fibras e a melhora das propriedades térmicas e mecânicas.

Outro evento de perda de massa, associado ao rompimento das ligações glicosídicas da celulose, foi verificado em 364 °C para as fibras *in natura* e em 355 °C para as fibras tratadas (BIONDO, 2012). O mesmo comportamento foi observado por Biondo (2012), que obteve um pico de 346 °C para as fibras *in natura* e de 344 °C para as fibras tratadas com NaOH 5%. Nesse estudo, houve o aumento da estabilidade térmica apenas com solução contendo 10% do álcali.

4.3 Simulação das propriedades dos compósitos de sisal e amido

O *software* Mech-Gcomp permitiu a previsão de algumas propriedades dos compósitos de sisal e amido, com base nas informações fornecidas.

4.3.1 Simulação do módulo de elasticidade

Como pode ser observado na Figura 20, o aumento na fração de fibras levou ao aumento do módulo de elasticidade, visto que as fibras possuem módulo de 25 GPa, enquanto a matriz possui módulo de 38,6 MPa (MENEZES; AMICO, 2016; OLIVEIRA, 2015).

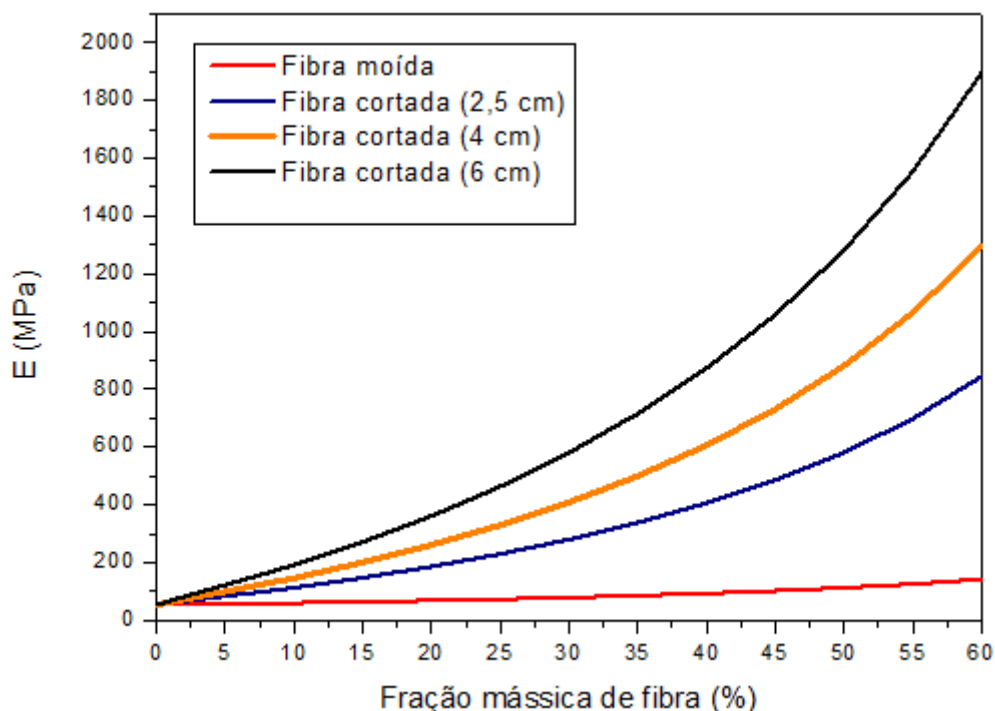


Figura 20 – Módulo de Elasticidade dos compósitos com fibras moídas e cortadas pelo método de Halpin-Tsai

Fonte: o autor (2021).

De acordo com as Equações 3 a 8, essa propriedade é afetada pelo volume das fibras no compósito (V_f) e pelo comprimento das mesmas (l) (MENEZES; AMICO, 2016; OLIVEIRA, 2015). Para a fração mássica de 30% de fibras, foi estimado um aumento de 29,5% do Módulo de Elasticidade na variação de 4,0 para 6,0 cm.

Fibras de sisal foram empregadas como reforço em matriz poliéster por Joseph, Medeiros e Carvalho (1999), que identificaram o comprimento ótimo a ser empregado entre 35 e 45 mm, pois nessa faixa se obtém a resistência máxima do material compósito. Os autores ainda ressaltam que maiores comprimentos podem

levar ao emaranhamento das fibras, que levam à diminuição do Módulo de Elasticidade. Concluíram também, que o teor desse reforço deve ser de 20% a 50%, visto que com teores menores e maiores não obtém propriedades mecânicas satisfatórias. Nesse sentido, a abordagem utilizada apresentou uma limitação quanto à representação da realidade, visto que não previu o decréscimo nas propriedades mecânicas após a utilização de um determinado teor de fibras.

Já Corradini *et al.* (2008) utilizou fibras de sisal como reforço para a matriz preparada com amido, glúten de milho e glicerol. O teor das fibras, que foram moídas e passadas por uma peneira de 10 *mesh*, foi variado entre 5, 10, 15 e 30% em relação aos polímeros naturais da matriz. O comportamento apresentado pelo módulo de elasticidade dos compósitos foi similar ao obtido por meio da simulação. Ou seja, foi crescente com o aumento do teor das fibras de sisal.

4.3.2 Simulação da densidade

A densidade dos compósitos, que foi prevista através da Lei das Misturas, foi superior à densidade da matriz de TPS pura, conforme está apresentado na Figura 21.

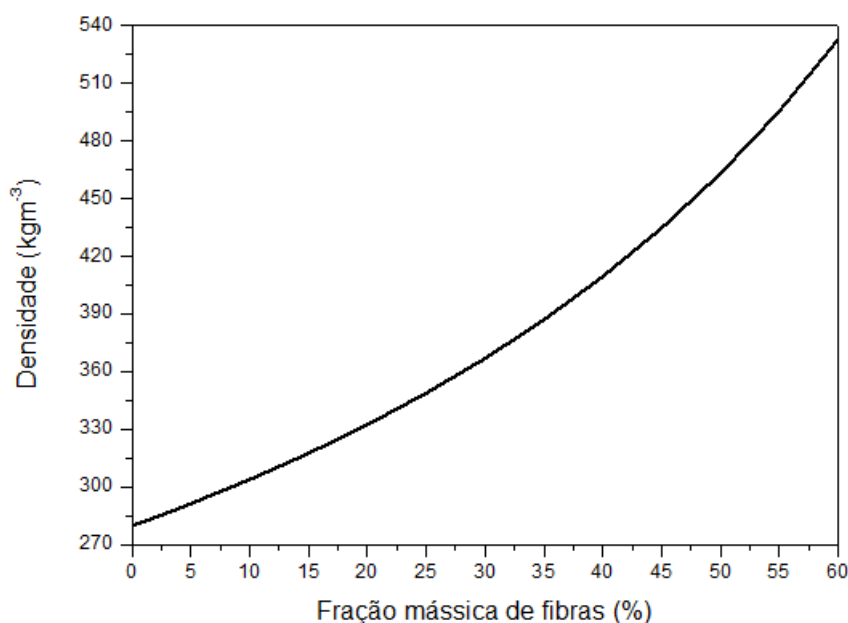


Figura 21 – Densidade dos compósitos pela Lei das Misturas
Fonte: o autor (2021).

O aumento no teor leva ao aumento da densidade porque o volume de fibras e a densidade são diretamente proporcionais (Equação 2).

Embalagens biodegradáveis com matriz de amido termoplástico e reforçadas com fibras de sisal foram desenvolvidas por Xie *et al.* (2018). Os autores avaliaram os efeitos do teor da fibra e do tratamento alcalino no compósito, bem como a compatibilidade entre a matriz e o reforço.

Em relação à densidade, observaram o comportamento crescente com o aumento do teor de fibras, assim como foi simulado pelo *software* Mech-GComp. Ainda verificaram, que os compósitos preparados com fibras tratadas apresentaram densidade superior aos que foram preparados com o reforço *in natura*.

4.3.3 Simulação do módulo de cisalhamento

Na Figura 22 está apresentada a curva do módulo de cisalhamento em relação à fração mássica de fibras.

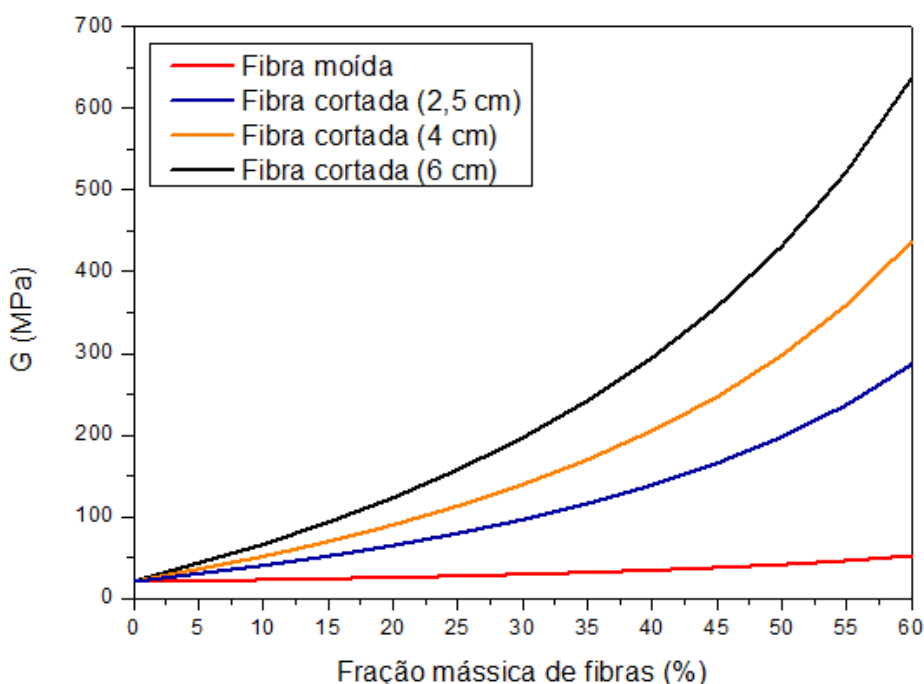


Figura 22 - Módulo de Cisalhamento do compósito
Fonte: o autor (2021).

Observou-se que os compósitos com maior teor de fibras apresentam um módulo de cisalhamento superior. O mesmo comportamento foi verificado por Vera

(2013), que simulou as propriedades de compósitos de resina epóxi, reforçados com fibra de vidro, através da Lei das Misturas.

5 CONCLUSÕES

O presente Trabalho de Conclusão de Curso analisou as matérias-primas necessárias para a produção de compósitos de amido e sisal. Além disso, por meio do *software* Mech-GComp, verificou a influência do teor e do tamanho de fibras de sisal cortadas e moídas nas propriedades mecânicas do material final.

Os amidos analisados apresentaram um teor de umidade satisfatório para a produção de compósitos. Futuramente, poderão ser realizados outros testes, como a determinação de amilose, com o intuito de verificar o quanto essa propriedade afeta a viscosidade e a capacidade de gelatinização do material.

Através das análises realizadas nas fibras de sisal, verificou-se que o tratamento com NaOH (5%) foi eficiente, visto que removeu a camada cerosa que interfere na adesão matriz/reforço. Também foi verificado que os constituintes amorfos da hemicelulose foram removidos de maneira satisfatória através do tratamento alcalino. Além disso, concluiu-se que as propriedades térmicas foram melhoradas, com o deslocamento da curva tratada em relação à *in natura*.

A simulação das propriedades mecânicas dos compósitos resultou em informações similares às encontradas na literatura. O comportamento da densidade foi crescente com o aumento do teor das fibras, visto que elas constituem a fase mais densa. No entanto, a abordagem não previu alguns comportamentos que ocorrem na prática, como a diminuição do módulo de elasticidade, devido ao emaranhamento das fibras depois de certo teor.

Concluiu-se que os materiais compósitos tem potencial para serem desenvolvidos na prática, visto que as matérias-primas são de baixo custo, abundantes e apresentam propriedades mecânicas e térmicas satisfatórias. Além disso, os dados obtidos por simulação sugerem materiais compósitos com boas propriedades físicas e mecânicas.

REFERÊNCIAS

ANGRIZANI, Clarissa Coussirat et al. Use of Mech-gComp academic software for the teaching of particular composites. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 36, n. 1, p. 13-23, 2017. Disponível em: <http://revista.educacao.ws/revista/index.php/abenge/article/view/469>. Acesso em: 22 jan. 2021.

ASKELAND, Donald R. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

AVEROUS, L.; BOQUILLON, N. Biocomposites based on plasticized starch: thermal and mechanical behaviours. **Carbohydrate Polymers**, v. 56, p. 111–122, 2004.

BIONDO, Aline Sewaybricker. **Influência de diferentes tratamentos nas propriedades mecânicas e morfológicas de compósitos poliéster/sisal**. 2012. Dissertação - Curso de Tecnologia em Polímeros, Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2012.

BISANDA ETN, Ansell MP. The effect of silane treatment on the mechanical and physical properties of sisal-epoxy composites. **Composites Science and Technology**, 4, p. 165-178, 1991.

BISANDA ETN, Ansell MP. Properties of sisal-CNSL composites. **Journal of Materials Science**, 27, p. 1690-1700, 1992.

BELTRAMI, Lílian Vanessa Rossa *et al.* Efeito do Tratamento Alcalino de Fibras de Curauá sobre as Propriedades de Compósitos de Matriz Biodegradável. **Polímeros**, Caxias do Sul, v. 24, n. 3, p. 388-394, 2014. Disponível em: https://www.scielo.br/pdf/po/v24n3/aop_polimerosao1467.pdf. Acesso em: 13 mar. 2021.

BOSCO, Julia dal; MENEZES, Eduardo Antonio Wink de. Adição de recursos ao software MECH-Gcomp. In: SALÃO UFRGS: SALÃO DE ENSINO DA UFRGS, 12, 2016, Porto Alegre. **Adição de recursos ao software MECH-Gcomp**. Porto Alegre, 2016. p. 1-1. Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/153551/Ensino2016_Resumo_46470.pdf?sequence=1. Acesso em: 2 fev. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Resolução n. 263, de 22 de setembro de 2005**. Aprova o regulamento técnico para produtos de cereais, amidos, farinhas e farelos. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, p. 368-369, 2005.

CALLISTER JUNIOR, William D. **Ciência e engenharia de materiais – uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2016.

CAMPBELL, Mary K.; FARRELL, Shawn O. **Bioquímica**. São Paulo: Thomson, 2007.

CAMPOS, Adriana; TEODORO, Kelcilene B. R.; MARCONCINI, José M.; MATTOSO, Lui H. C.. Efeito do tratamento das fibras nas propriedades do biocompósito de amido termoplástico/policaprolactona/sisal. **Polímeros**, São Carlos, v. 21, n. 3, p.217-222, 2011.

CARMONA, Vitor Brait. **Desenvolvimento de compósitos biodegradáveis a partir de amido termoplástico e fibras vegetais**. 2011. 129 f. Dissertação - Centro de Ciências Exatas e Tecnologias, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2011.

CARR, Laura Gonçalves. **Desenvolvimento de embalagem biodegradável tipo espuma a partir de fécula de mandioca**. 2007. Tese - Curso de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-08012008-150706/en.php>>. Acesso em: 19 ago. 2019.

CASARIL, Alexandre *et al.* Análise micromecânica dos compósitos com fibras curtas e partículas. **Revista Matéria**, Florianópolis, v. 12, n. 2, p. 408-412, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rmat/v12n2/v12n2a18.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2021.

CEREDA, M. P. FRANCO, C. M. L.; DAIUTO, É. R.; DEMIATE, I. M. CARVALHO, I. C. B.; LEONEL, M.; VILPOUX, O. F.; SARMENTO, S. B. S. Propriedades gerais do amido. Série Cultura de Tubérculos Amiláceas Latino Americanas, v. 1. São Paulo: Fundação Cargill, p. 204, 2002.

CORRADINI, Elisângela *et al.* Estudo comparativo de amidos termoplásticos derivados do milho com diferentes teores de amilose. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 15, n. 4, p.268-273, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v15n4/a11v15n4.pdf>>. Acesso em: 26 ago. 2019.

CORRADINI, Elisângela *et al.* **Amido Termoplástico**, São Carlos: Embrapa, 2007. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPDIA-2009-09/11042/1/DOC30_2007.pdf. Acesso em: 27 jan. 2021.

CORRADINI, Elisângela *et al.* Estudo das Propriedades de Compósitos Biodegradáveis de Amido/Glúten de Milho/Glicerol Reforçados com Fibras de Sisal. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 18, n. 4, p.353-358, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282008000400016&script=sci_abstract&lng=pt>. Acesso em: 2 ago. 2019.

DEBIAGI, Flávia *et al.* 522 DEBIAGI. Efeito de fibras vegetais nas propriedades de compósitos biodegradáveis de amido de mandioca produzidos via extrusão. **Revista Ciência Agrônômica**, Lavras, v. 34, n. 6, p. 1522-1529, nov./dez., 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1413-70542010000600024&lng=en&nrm=iso&lng=pt>. Acesso em: 12 ago. 2019.

DEBIAGI, Flavia *et al.* Embalagens biodegradáveis de amido reforçadas com fibras lignocelulósicas provenientes de resíduos agroindustriais. **Bbr - Biochemistry And Biotechnology Reports**, Londrina, v. 1, n. 2, p.57-67, mar., 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5433/2316-5200.2012v1n2p57>. Acesso em: 12 ago. 2019.

DIXIT, Savita et al. Natural Fibre Reinforced Polymer Composite Materials: A Review. **Polymers From Renewable Resources**, Maulana, v. 8, n. 2, p.71-79, 23 jan. 2017.

FAMÁ, Lucía; GERSCHENSON, Lía; GOYANES, Silvia. Starch-vegetable fibre composites to protect food products. **Carbohydrate Polymers**, Buenos Aires, v. 75, n. 2, p.230-235, 2009.

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

FIGUEROA, Amanda Mileo. **Caracterização de amidos obtidos de diferentes feijões e sua aplicação em filmes biodegradáveis**. 2016. 103 f. Dissertação - Curso de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2016. Disponível em: <https://tede2.uepg.br/jspui/bitstream/prefix/654/1/Amanda%20M%20Figueroa.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2021.

GONÇALVES, Vanderlei O. *et al.* Resistência ao cisalhamento losipescu em compósitos de fibra de carbono e de vidro com resina epóxi. **Journal Of Aerospace Technology And Management**, v. 1, n. 1, p. 49-53, mai., 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/jatm/v1n1/2175-9146-jatm-01-01-0049.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2021.

GUERRA, P. M., **Modificação química do amido de mandioca e blindagem com poliéster biodegradável** – Dissertação – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

GUIMARÃES, José Luis. **Preparação e caracterização de compósitos de amido plastificado com glicerol e reforçados com fibras naturais vegetais**. 2010. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais., Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/26873/R%20-%20T%20-%20JOSE%20LUIS%20GUIMARAES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 7 set. 2019

GUINESI, L. S.; DA RÓZ, A. L.; CORRADINI, E.; MATTOSO, L. H. C.; TEIXEIRA, E. M. CURVELO, A. A. S. Kinetics of thermal degradation applied to starches from different botanical origins by non-isothermal procedures. **Thermochimica Acta**, v. 447, p. 190-196, 2006.

HERAKOVICH, C. T. J. Mechanics of composites: a historical review. **Mechanics Research Communication**, v. 41, p. 1-20, 2012.

ISOTTON, Francine Suélen. **Desenvolvimento e caracterização de filmes de amido de milho eterificado com plastificante glicerol, sorbitol e poli (álcool vinílico)**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Processos e

Tecnologias, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013.

JOHN, M. J.; THOMAS, S. Review-biofibres and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, n.71, p. 343–364, 2008.

JOSEPH P. V.; MATHEW, G.; JOSEPH, K.; GROENINCKX, G.; THOMAS, S. Dynamic mechanical properties of short sisal fiber reinforced polypropylene composites. **Composites: Part A**, n.34, p. 275-290, 2003.

JOSEPH, K.; MEDEIROS, E. S.; CARVALHO, L. H. Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 9, n. 4 p.136-141, 1999.

KOOLMAN, Jan; ROHM, Klaus-Heinrich. **Bioquímica: texto e atlas**. Porto Alegre, Artmed, 2005.

LAI, V.M.F., LU, S., LII, C, Molecular characteristics influencing retrogradation kinetics of rice amylopectins. **Cereal Chemistry**, v. 77, p. 272-278, 2000.

LI, Yan; MAI, Yiu-wing; YE, Lin. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. **Composites Science And Technology**, Sydney, v. 60, p.2037-2055, 2000.

LIU, H.; YU, L.; DEAN, K.; SIMON, G.; PETINAKIS, E.; CHEN, L. Starch gelatinization under pressure studied by high pressure DSC. **Carbohydrate Polymers**, v. 75, p. 395–400, 2009.

MALKAPURAM, R.; KUMAR, V.; NEGI, Y. S. Recent development in natural fiber reinforced polypropylene composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 28, n. 10, p.1169-1189, 2009.

MARENCO, Vitor Almeida; VERCELHEZE, Ana Elisa Stefani; MALI, Suzana. COMPÓSITOS BIODEGRADÁVEIS DE AMIDO DE MANDIOCA E RESÍDUOS DA AGROINDÚSTRIA: a. **Química Nova**, Londrina, v. 36, n. 5, p.680-685, mar., 2013.

MENEZES, Eduardo A. W. de; AMICO, Sandro C.. **Tutorial do equacionamento utilizado pelo software Mech-Gcomp**. Porto Alegre, 2016. Disponível em: https://gcomp-srv01.nuvem.ufrgs.br/static/mechg/pdfs/Tutorial_MECH-Gcomp_v1.0.pdf. Acesso em: 3 fev. 2021.

MOTTA, Valter T. **Bioquímica**. Caxias do Sul, EDUCS, 2005.

MURARI, V.; UPADHYAY, C. S. Micromechanics based diffuse damage model for unidirectional composites. **Composite Structure**, v. 94, p. 419-432, 2012.

MURHERJEE P.S., SATYANARAYANA K.G.. Structure and properties of some vegetable fibres, part 1. Sisal fibre. **Journal of Materials Science**, v. 19, n.1, 3925-3934, 1984.

NEWELL, James. **Fundamentos da moderna engenharia e ciência dos materiais**. Rio de Janeiro, LTC, 2010.

RABELLO, M. **Aditivação de polímeros**. São Paulo, Artliber, 2000.

SENTHILKUMAR, K. *et al.* Mechanical properties evaluation of sisal fibre reinforced polymer composites: A review. **Construction And Building Materials**, Selangor, n. 174, p.713-719, 2018.

SILVA, Alvaro Souza Pereira da. Apresentação MECH-GComp. In: SALÃO UFRGS: SIC - SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRGS, 27., 2015, Porto Alegre. **Apresentação MECH-GComp**. Porto Alegre, 2015. p. 1-1. Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/137288/Resumo_42600.pdf?sequence=1. Acesso em: 2 fev. 2021.

SILVA, Washington Azevêdo da *et al.* Determinação da cor, imagem superficial topográfica e ângulo de contato de biofilmes de diferentes fontes de amido. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 1, p.154-163, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cagro/v31n1/v31n1a23.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2019

SOOD, Mohit; DEEPAK, Dharmpal; GUPTA, V.k.. Tensile properties of sisal fiber / recycled polyethylene (high density) composite: Effect of fiber chemical treatment. **Materials Today: Proceedings**, Punjab, v. 5, p.5673-5678, 2018.

SREEKUMAR, P.a. *et al.* Effect of glycerol and short sisal fibers on the viscoelastic behavior of wheat flour based thermoplastic. **Composites**, Rouen, n. 41, p.991-996, 2010.

TEODORO, Kelcilene B. R. *et al.* Whiskers de Fibra de Sisal Obtidos sob Diferentes Condições de Hidrólise Ácida: efeito do tempo e da temperatura de extração. **Polímeros**, [s. l], v. 21, n. 4, p. 280-285, 2011. Disponível em: https://www.scielo.br/pdf/po/v21n4/AOP_0708.pdf. Acesso em: 14 mar. 2021.

VERA, Rômulo Vinícius. **Estruturas aeronáuticas de interior em compósito natural: fabricação análise estrutural e de inflamabilidade**. 2012. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: < https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18148/tde-09092012-214341/publico/Dissertacao_Romulo2012_FINAL.pdf>. Acesso em 19 mar. 2021.

VOET, Donald. **Bioquímica**. 4. Porto Alegre, ArtMed, 2013.

Wang, C., Li, F., Wang, L., Li, J., Guo, A., Zhang, C., *et al.* Research on thermoplastic starch and different fiber reinforced biomass composites. **RSC Advances**, v. 5, p. 49824–49830, 2005.

WEBER, Fernanda Hart; COLLARES-QUEIROZ, Fernanda Paula; CHANG, Yoon Kil. Caracterização físico-química, reológica, morfológica e térmica dos amidos de milho normal, ceroso e com alto teor de amilose. **Ciência e Tecnologia de**

Alimentos, Campinas, v. 3, n. 29, p. 748-753, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/cta/v29n4/08.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2021.

XIE, Qi et al. A new biodegradable sisal fiber–starch packing composite with nest structure: a. **Carbohydrate Polymers**. Jinan, v. 189, p. 56-64, jan., 2018.

ZUCCARELLO, Bernardo; MARANNANO, Giuseppe. Random short sisal fiber biocomposites: Optimal manufacturing process and reliable theoretical models. **Materials And Design**, Palermo, v. 149, p.87-100, 2018.