

**Secagem de fibras de sisal em estufa com circulação forçada de ar: Um estudo experimental**

**Drying of sisal fibers in oven with forced air circulation: An experimental study**

**Secado de fibras de sisal en horno con circulación forzada de aire: Un estudio experimental**

Recebido: 16/10/2020 | Revisado: 17/10/2020 | Aceito: 20/10/2020 | Publicado: 23/10/2020

**Jacqueline Félix de Brito Diniz**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7888-1931>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: [jacqueline@mat.ufcg.edu.br](mailto:jacqueline@mat.ufcg.edu.br)

**Elisiane Santana de Lima**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3004-8841>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: [limaelisianelima@hotmail.com](mailto:limaelisianelima@hotmail.com)

**Hortência Luma Fernandes Magalhães**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7849-2792>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: [hortencia.luma@gmail.com](mailto:hortencia.luma@gmail.com)

**Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4067-2691>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: [wam\\_magno@hotmail.com](mailto:wam_magno@hotmail.com)

**Túlio Rafael Nascimento Porto**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6744-4306>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: [trnporto@gmail.com](mailto:trnporto@gmail.com)

**Ricardo Soares Gomez**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4387-4600>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: [ricardosoaresgomez@gmail.com](mailto:ricardosoaresgomez@gmail.com)

**Gicelia Moreira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8639-2049>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: [gicelia.moreira@eq.ufcg.edu.br](mailto:gicelia.moreira@eq.ufcg.edu.br)

**Antonio Gilson Barbosa de Lima**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1691-1872>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: [antonio.gilson@ufcg.edu.br](mailto:antonio.gilson@ufcg.edu.br)

## **Resumo**

Nos últimos anos, com a crescente conscientização de preservação do meio ambiente, e controle de poluição, o interesse pelo uso de fibras naturais tem aumentado significativamente. No entanto, fibras vegetais são altamente higroscópica e o seu uso, quando úmida, afeta fortemente as propriedades desses materiais. Buscando melhoria para o processo de secagem de fibras vegetais, este trabalho apresenta um estudo experimental da secagem de corpos fibrosos com particular referência a fibras de sisal variedade Agave sisalana. Foram realizados experimentos de secagem de fibras de sisal com teor de umidade médio de 11,19% (base seca). As fibras foram submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar nas temperaturas de 50, 60, 70, 80 e 90°C. Resultados experimentais das cinéticas de secagem e aquecimento das fibras foram apresentados e analisados. Verificou-se que as curvas de perda de umidade e temperatura das fibras de sisal foram influenciadas pela temperatura do ar de secagem, sendo mais acentuada nas maiores temperaturas, e que todo a remoção de umidade ocorre no período de taxa decrescente. Aspectos da qualidade das fibras pós-secagem também foram avaliadas.

**Palavras-chave:** Secagem; Fibras vegetais; Sisal; Experimentos; Qualidade das fibras.

## **Abstract**

In recent years, with the growing awareness of environmental preservation and pollution control, interest in the use of natural fibers in polymer composites has increased significantly. However, vegetable fibers are highly hygroscopic and their use, when wet, in the manufacture of composites, strongly affects the properties of these materials. Seeking improvement to the drying process of vegetable fibers, this work presents an experimental study of the drying process of fibrous bodies with particular reference to sisal fibers (Agave sisalana variety). For

this propose, drying experiments were carried out with sisal fibers with an average moisture content of 11.19% (d.b.). The fibers were subjected to oven drying with forced air circulation at 50, 60, 70, 80 e 90°C. Experimental results of drying and heating kinetics of the fibers were presented and analyzed. It was verified that the moisture loss and temperature kinetics of the sisal fibers were influenced by the drying temperature, being more accentuated in the higher drying air temperatures, and the moisture removal occurred in falling rate period. Aspects of the fiber quality after drying were also evaluated.

**Keywords:** Drying; Vegetable fibers; Sisal; Experiments; Fiber quality.

## Resumen

En los últimos años, con una mayor conciencia sobre la preservación del medio ambiente y el control de la contaminación, el interés en el uso de fibras naturales ha aumentado significativamente. Sin embargo, las fibras vegetales son altamente higroscópicas y su uso, cuando está húmedo, afecta fuertemente las propiedades de estos materiales. Buscando la mejora del proceso de secado de las fibras vegetales, este trabajo presenta un estudio experimental del secado de cuerpos fibrosos con especial referencia a las fibras de sisal, variedad Agave sisalana. Se llevaron a cabo experimentos de secado de fibra de sisal con un contenido de humedad promedio de 11,19% (base seca). Las fibras se secaron en un horno con circulación de aire forzado a temperaturas de 50, 60, 70, 80 y 90 °C. Se presentaron y analizaron los resultados experimentales de la cinética de las fibras de secado y calentamiento. Se encontró que las curvas de pérdida de humedad y temperatura de las fibras de sisal fueron influenciadas por la temperatura del aire de secado, siendo más pronunciada a temperaturas más altas, y que toda la remoción de humedad ocurre en el período de tasa decreciente. También se evaluaron aspectos de la calidad de la fibra post-secado.

**Palabras clave:** Secado; Fibras vegetales; Sisal; Experimentos; Calidad de la fibra.

## 1. Introdução

As fibras são matérias muito finas e alongadas, como filamentos. Toda fibra é um polímero e sua classificação é feita de acordo com a polimerização. Pode-se classificar as fibras em dois grupos principais: fibras químicas e fibras naturais (Romero et al., 1995; Silveira, 2015). As fibras químicas podem ser divididas em dois grupos atendendo às suas diferenças não só químicas, mas de obtenção industrial, como segue:

- a) Sintéticas: são fibras fabricadas em indústrias próprias, partindo de substâncias

puramente químicas. Ex.: Poliéster, acrílico.

b) Artificiais: são fibras fabricadas também em indústrias próprias, mas partindo de matéria de origem natural, nomeadamente restos de fibras naturais que não têm as características necessárias para poderem ser trabalhadas como fibras têxteis. Ex.: Viscose e acetato.

As fibras naturais são fibras retiradas prontas da natureza. Estas fibras podem ser divididas, de acordo com sua natureza, em três grupos:

a) Fibras de origem mineral: as fibras de origem mineral têm a sua origem em rochas com estrutura fibrosa e são constituídas, essencialmente, por silicatos (Silveira, 2015). Ex.: Amianto e asbesto.

b) Fibras de origem animal (proteicas): o nome proteica origina da palavra proteína, que é a substância básica das fibras de origem animal. Por isso quando esta fibra é queimada tem um cheiro muito característico a unha queimada (Silveira, 2015). Ex.: Seda e lã.

c) Fibras de origem vegetal (celulósicas): o nome celulósicas origina da palavra celulose, que é a substância básica das fibras de origem vegetal. Por isso quando esta fibra é queimada tem um cheiro característico similar ao do papel queimado (Silveira, 2015).

As fibras vegetais são classificadas em sete grupos, como segue: Fibras de gramínea (por exemplo, bambu, bagaço de cana-de-açúcar e junco); Fibras de folhas (por exemplo, abacá, abacaxi, sisal e banana); Fibras de caule (por exemplo, juta, rami e linho); Fibras de fruto (por exemplo, coco); Fibras de semente (por exemplo, algodão e sumaúma); Fibras de raiz (por exemplo, zacatão) e Fibras de madeira (por exemplo, eucalipto e pinho).

As fibras vegetais estão em todas as partes do mundo e são também conhecidas como fibras celulósicas, devido ao seu principal componente químico ser a celulose. A disponibilidade de grandes quantidades destas fibras com propriedades bem definidas é um pré-requisito para o uso bem sucedido destes materiais. Essas fibras apresentam vantagens quando comparadas com as fibras sintéticas, tais como, fonte abundante e de rápida renovação, baixo custo, baixa densidade, alta resistência específica, biodegradabilidade, não-tóxicas e são menos abrasivas se comparadas às fibras de vidro (Bledzki & Gassan, 1999; Nabi Saheb & Jog, 1999; Ibrahim et al., 1997). Como desvantagens, pode-se citar: baixa temperatura de processamento, limitada a aproximadamente 200°C, falta de uniformidade de propriedades mecânicas, que dependem da origem das fibras, da região do plantio, da variedade de espécies e da habilidade manual durante a colheita, e alta absorção de umidade, que pode causar o inchaço das fibras (Silva, 2003).

Uma fibra vegetal é constituída de várias fibras elementares ligadas fortemente entre si

por um material de cementação. Os principais componentes químicos das fibras vegetais são substâncias polares, tais como a celulose, a hemicelulose (ou polioses) e a lignina, com menores percentuais de outros componentes como pectina, cera e substâncias solúveis em água. Sua composição química varia ligeiramente de acordo com a região de cultivo, tipo de solo e condições climáticas (Silva, 2003; Bledzki & Gassan, 1999).

Cada fibra elementar é essencialmente um compósito no qual microfibrilas rígidas de celulose são envolvidas em uma matriz amorfa de lignina e hemicelulose. A lignina atua como material de cementação “matriz”, unindo as microfibrilas, enquanto a hemicelulose atua como interface entre a microfibrila de celulose e a lignina (Silva, 2003). A estrutura de uma fibra vegetal elementar é constituída por uma parede espessa formada por vários espirais de microfibrilas ao longo do eixo da fibra, tendo um lúmen no centro (Silva, 2003).

A celulose é o principal responsável pela resistência mecânica e estabilidade das fibras. É um polissacarídeo linear de alta massa molar constituído por unidades de anidro-D-glicose ( $C_6H_{10}O_5$ ), formando, pela união de unidades, uma cadeia molecular (Fengel & Wegener, 1989). Cada unidade de anidro-D-glicose contém três grupos hidroxila (-OH). Estas hidroxilas formam ligações de hidrogênio dentro da molécula (intramolecular) e entre moléculas de celulose (intermolecular). As ligações de hidrogênio intermolecular são as principais responsáveis pela cristalinidade da celulose (Lima Júnior, 2007; Silva, 2003).

A hemicelulose é um polissacarídeo constituído por diferentes unidades de açúcares. Os principais açúcares são as pentoses, hexoses, 6-desoxi-hexoses e os ácidos urônicos. O seu grau de polimerização é de 10 a 100 vezes menor que o da celulose e as cadeias possuem um considerável grau de ramificação em relação à celulose (Silva, 2003). Geralmente, a hemicelulose age como um elemento de ligação entre a celulose e a lignina, não estando diretamente correlacionada à resistência e rigidez das fibras.

A lignina, responsável por unir as fibras celulósicas formando a parede celular, é um polímero amorfo com constituintes alifáticos e aromáticos. Sua concentração nas fibras influencia nas propriedades mecânicas, na estrutura, na morfologia, na flexibilidade e na taxa de hidrólise das mesmas. Contribui para resistência à compressão ao tecido celular e às fibras, enrijecendo a parede celular e protegendo os carboidratos (açúcares) contra danos físicos e químicos. Fibras com alto teor de lignina são de excelente qualidade e flexíveis (Passos, 2005).

Outros constituintes das fibras vegetais são a pectina e componentes minerais. A pectina é um polissacarídeo presente nas paredes celulares, rico em ácido galacturônico e tem função aglutinante. Já os componentes minerais, após a incineração das fibras, são os

responsáveis pela formação das cinzas (Passos, 2005).

As propriedades mecânicas das fibras vegetais variam em função do tipo de fibra devido à variação da composição e orientação das fibrilas de celulose (ângulo espiral). Essas características dependem da origem da fibra e são determinantes nas suas propriedades mecânicas (Bledzki & Gassan, 1999; Silva, 2003; Passos, 2005). Para Martin et al. (2010), as características mecânicas de um compósito reforçado com fibras naturais são proporcionais ao tipo e qualidade da fibra a ser utilizada. Nas fibras de sisal, os tamanhos das fibras podem variar, assim como a suas propriedades mecânicas.

As fibras vegetais vêm sendo uma alternativa na busca de novos materiais; além disso, o alto preço das fibras sintéticas e a maior conscientização dos próprios consumidores, da necessidade de preservação do meio ambiente, têm contribuído para o desenvolvimento de novas pesquisas nesta área (Silva, 2003). Nas últimas décadas a utilização de fibras vegetais como reforço em compósitos poliméricos substituindo as fibras sintéticas tem sido o foco de inúmeras pesquisas devido às novas exigências legislativas quanto ao uso e destino final das fibras sintéticas e resinas derivadas do petróleo. Nesse sentido, pesquisadores têm desenvolvido compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais, tais como curauá (Mothé & Araujo, 2004; Spinacé et al., 2009), coco (Silva et al., 2013), sisal, rami, bagaço de cana-de-açúcar (Joseph et al., 1996; Chand & Jain, 2005; Silva et al., 2012), juta, abacaxi e banana (Mishira et al., 2004; Kiran et al., 2007).

Embora quase todas as fibras vegetais possam ser usadas como agente de reforço em matrizes poliméricas, as fibras de folha são as mais empregadas, pois, em geral, são mais duras do que as fibras de caule. As fibras de folhas são geralmente conhecidas como “fibras duras” enquanto fibras de caule são conhecidas como “fibras macias” (Silva, 2003). Nesse sentido, fibras como as de juta e sisal são indicadas para uso como material de reforço em compósitos por apresentarem percentuais altos, tanto de celulose ( $\approx 65\%$ ) como de lignina ( $\approx 11\%$ ).

O sisal é uma planta da família das cactáceas, com o nome científico *Agave Sisalana* Perrine, sendo cultivado em regiões semiáridas, por ser resistente à aridez e ao sol intenso.

Dos pontos de vista social e econômico, a cultura do sisal tem sido de grande valor para o Brasil, visto que, além de ser fonte de renda e emprego para um elevado número de trabalhadores rurais, tem possibilitado a fixação destes trabalhadores na região do semiárido do Nordeste tornando-se, em algumas dessas regiões, como a única alternativa de cultivo viável. A agaveicultura tem se concentrado em áreas de pequenos produtores, sendo praticamente de agricultura familiar (Martin et al., 2009).

No ano de 2009, a fibra do sisal correspondeu a aproximadamente 70% de toda a produção comercial de fibras duras (Martin et al., 2009). Cerca de 4,5 milhões de toneladas de fibra de sisal são produzidas a cada ano em todo o mundo. O Brasil é o maior produtor mundial e exportador de sisal, respondendo por cerca de 140.000 toneladas por ano. Além de maior produtor mundial, o Brasil é o maior exportador da fibra. Estima-se que mais de 80% da produção nacional é exportada para mais de 50 países, sendo os principais importadores os Estados Unidos, China, México e Portugal. Beneficiada ou industrializada, essa fibra representa cerca de 80 milhões de dólares em divisas para o Brasil, além de gerar mais de meio milhão de empregos diretos ou indiretos através de sua cadeia de serviços, que começa com as atividades de manutenção das lavouras, colheita, desfibramento e beneficiamento da fibra e termina com a industrialização e confecção de artesanato (Martin et al., 2009). Na lista dos países que mais produzem o sisal também estão os da África Oriental, entre eles, Tanzânia, Quênia e Uganda (Martin et al., 2009).

O principal e mais conhecido produto do sisal é o fio biodegradável utilizado em artesanato, no enfardamento de forragens, cordas de várias utilidades, inclusive navais, torcidos, terminais e cordéis. O sisal também é usado na produção de estofos, pasta para indústria de celulose, produção de tequila, tapetes decorativos, remédios, biofertilizantes, ração animal, adubo orgânico e sacarias. As fibras podem ainda ser utilizadas na indústria automobilística, substituindo a fibra de vidro.

O sisal é atualmente uma das fibras naturais mais estudadas e este interesse é decorrente das vantagens apresentadas pela mesma, tais como: facilidade de modificação superficial; abundância no Brasil; facilidade de cultivo; por ser um material biodegradável que provém de fonte renovável; e por apresentar boas propriedades como isolante térmico e acústico. Estes fatores, aliados à alta tenacidade, resistência à abrasão e ao baixo custo, têm levado um grande número de pesquisadores a realizarem estudos nos vastos campos da pesquisa de controle, secagem e armazenamento, com o objetivo de preservar as fibras do sisal para sua utilização em diversas aplicações tecnológicas (Angrizani et al., 2006; Barreto et al., 2011).

A utilização da fibra de sisal em compósitos de alto desempenho requer estudo do comportamento mecânico das fibras. Existe grande discrepância entre os valores reportados na literatura para a resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra de sisal. A variabilidade nas propriedades dessas fibras pode ser atribuída a três fatores principais: parâmetros e condições de teste, características das plantas e o método de medição da seção transversal. Dentre os parâmetros e/ou condições de teste que podem influenciar nas

propriedades mecânicas das fibras, podem ser citados a precisão dos instrumentos, o comprimento da fibra, a velocidade de ensaio, os tipos de garras utilizados e a própria sensibilidade do equipamento. Como características das próprias plantas entendem-se a origem da planta, idade, tipo de processamento (processo de extração) assim como sua microestrutura. A medição da seção transversal pode, ainda, ocasionar variação na medida das propriedades mecânicas devido à forma indefinida da seção e pela própria variação ao longo da fibra (Silva, 2008).

Quando as fibras são extraídas da folha do agave, elas estão úmidas. Devido ao fato de que suas propriedades mecânicas serem dependentes deste teor de umidade, e pensando na sua utilização como reforço em compósitos poliméricos, e outras aplicações, seu teor de umidade deve ser reduzido mediante processo de secagem. Esta secagem, em geral, no campo é realizada ao sol, o que torna o processo lento e de baixa produtividade, além de degradar a fibra, por exposição a energia solar por longo período. Uma alternativa, é a utilização de secagem artificial usando estufa ou secadores. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo estudar experimentalmente a secagem de fibras de sisal em estufa, em diversas condições operacionais, verificando os aspectos de qualidade do produto pós-secagem, produtividade e economia de energia no processo.

## **2. Metodologia**

### **Materiais e equipamentos**

A matéria prima utilizada foi a fibra de sisal da variedade *Agave Sisalana* com teor de umidade médio de 11,19%, adquirida no município de Pocinhos-PB, já submetida a uma secagem natural. Antes de serem submetidas a secagem, as fibras passaram por um processo de seleção. Inicialmente foram retiradas algumas impurezas, como resíduos de plantas e do solo, e em seguida foram selecionadas as fibras que aparentemente apresentaram melhor qualidade e uniformidade.

Os materiais utilizados para secagem em estufa foram cestos com fibras de sisal na forma de paralelepípedo, como pode ser visto na Figura 1. Para a determinação dos parâmetros de secagem (massa, dimensões e temperatura) os seguintes equipamentos foram utilizados: Balança digital Maste-AL500 com divisão de 1 miligrama; Paquímetro digital da marca Messen com precisão de 0,01 mm; Termômetro de infravermelho com escala de -50 à 1000°C TI 890; Estufa com circulação mecânica de fabricação da FANEM mod. 320E com



controlador digital de temperatura; Escalímetro com precisão de 1 mm e Termohigrômetro de fabricação da ICEL, mod. HT 208.

**Figura 1:** Cesto com as fibras de sisal.



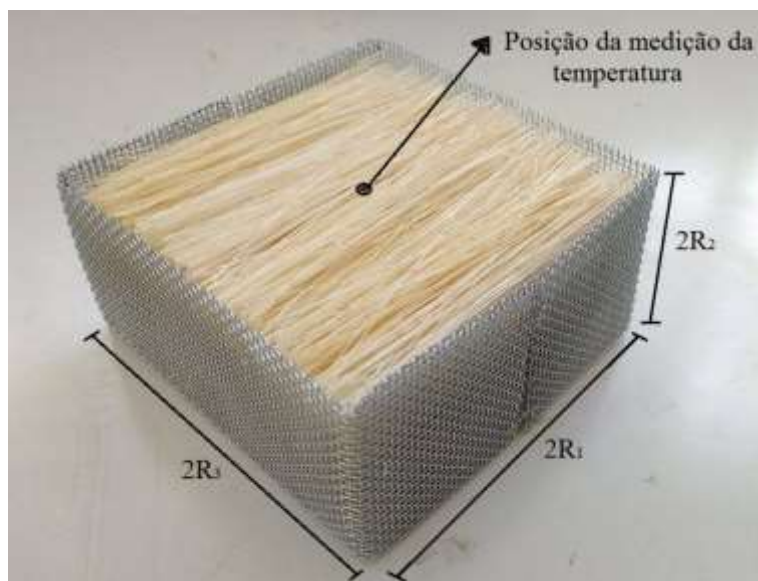
Fonte: Dados da pesquisa.

### **Procedimentos experimentais**

Inicialmente foram medidas as dimensões, massa, temperatura do meio fibroso, temperatura ambiente e umidade relativa do ar. Em seguida, as amostras foram levadas ao interior da estufa onde se realizava a secagem. Nesse processo, a temperatura interna da estufa era fixada na temperatura desejada (50, 60, 70, 80 e 90°C) através do controlador de temperatura. Em intervalos pré-definidos a amostra era retirada da estufa, possibilitando a medição da temperatura e da massa. Para cada experimento, com base nos trabalhos encontrados na literatura com fibras vegetais, as medições foram feitas de 5 em 5 minutos até que a massa tivesse variação mínima (cerca de 30 min), depois de 10 em 10, 15 em 15, 20 em 20, 25 em 25 e 30 em 30 min. Em seguida, as medições passaram ser de 60 em 60 min até a massa constante ser atingida. Logo após, a amostra foi submetida a uma secagem por 24 horas para obtenção da massa de equilíbrio e, em seguida por mais 24 horas, na temperatura de 105°C, para obter-se a massa seca. Essa metodologia tem sido baseada nos trabalhos de Silva (2009), Almeida (2009) e Santos (2017).

A Figura 2 ilustra o modelo do corpo de prova utilizado, bem como as posições onde foram obtidas as medidas do comprimento ( $2R_1$ ), da largura ( $2R_3$ ), da altura ( $2R_2$ ) e da temperatura do meio fibroso. A Tabela 1 apresenta para cada experimento a denominação das amostras, suas dimensões e volume, e temperatura de secagem utilizada na estufa.

**Figura 2:** Corpo de prova mostrando a largura ( $2R_3$ ), a altura ( $2R_2$ ), o comprimento ( $2R_1$ ) e local da medição da temperatura do meio fibroso.



Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 1:** Parâmetros experimentais do ar e dimensões do meio fibroso utilizado nos experimentos.

Teste	Ar			Meio Fibroso			
	UR (%)	T (°C)	v (m/s)	$2R_1$ (m)	$2R_2$ (m)	$2R_3$ (m)	*V (m <sup>3</sup> )
1	17,52	50	0,05	0,1	0,05	0,1	$5 \times 10^{-4}$
2	11,04	60	0,06	0,1	0,05	0,1	$5 \times 10^{-4}$
3	6,89	70	0,07	0,1	0,05	0,1	$5 \times 10^{-4}$
4	4,19	80	0,08	0,1	0,05	0,1	$5 \times 10^{-4}$
5	3,28	90	0,09	0,1	0,05	0,1	$5 \times 10^{-4}$

\*Calculado pela Equação (5). Fonte: Dados da pesquisa.

### Cálculos auxiliares

Após a secagem de todas as amostras, a partir das dimensões e massa do meio fibroso, foram feitos alguns cálculos auxiliares para determinação de novos parâmetros, que são de suma importância para obtenção dos resultados e discussão do trabalho em questão.

a) Massa de água

O cálculo da quantidade de água em cada meio fibroso ( $m_a$ ) e em cada tempo de medição, foi feito com base no valor da massa de fibra e na massa de fibra seca ( $m_s$ ), da seguinte forma:

$$m_a = m - m_s. \quad (1)$$

b) Teor de umidade em base seca

O cálculo do teor de umidade de cada corpo de prova ( $M$ ) e em cada tempo de medição, foi feito com base no valor da massa de água do meio fibroso ( $m_a$ ) e na massa do meio fibroso seco ( $m_s$ ), da seguinte forma:

$$M = m_a/m_s. \quad (2)$$

c) Teor de umidade adimensional

O cálculo do teor de umidade adimensional de cada corpo de prova ( $M^*$ ) e em cada tempo de medição, foi feito com base no valor do teor de umidade ( $M$ ), do teor de umidade inicial ( $M_o$ ) e do teor de umidade de equilíbrio ( $M_{eq}$ ), da seguinte forma:

$$M^* = (M - M_{eq})/(M_o - M_{eq}). \quad (3)$$

d) Temperatura adimensional

O cálculo da temperatura adimensional de cada corpo de prova ( $T^*$ ) e em cada tempo de medição, foi feito com base na temperatura no vértice do corpo de prova ( $T$ ), da temperatura inicial ( $T_o$ ) e da temperatura de equilíbrio ( $T_{eq}$ ), da seguinte forma:

$$T^* = (T - T_{eq})/(T_o - T_{eq}). \quad (4)$$

e) Volume do meio fibroso

O cálculo do volume do meio fibroso ( $V$ ), foi feito com base no valor das suas dimensões, comprimento ( $2R_1$ ), largura ( $2R_3$ ) e altura ( $2R_2$ ) usando a seguinte equação:

$$V = 2R_1 \times 2R_2 \times 2R_3. \quad (5)$$

f) Volume da fibra de sisal

O cálculo do volume da fibra de sisal, foi feito com base no valor das suas dimensões, comprimento ( $c$ ) e diâmetro ( $d$ ) usando a seguinte equação:

$$V_{\text{fibra}} = c \frac{\pi d^2}{4}. \quad (6)$$

Assim, com  $V_{\text{fibra}}$  é o número de fibras da amostra, obteve-se o volume total das fibras  $V_f$

g) Porosidade do meio fibroso

O cálculo da porosidade do meio fibroso ( $\epsilon$ ), foi feito usando a seguinte equação:

$$\epsilon = 1 - \frac{V_f}{V}, \quad (7)$$

onde  $V_f$  é o volume total das fibras e  $V$  é o volume do meio fibroso.

### 3. Resultados e Discussão

#### Cinéticas de secagem e aquecimento

Nos experimentos foram utilizadas diversas temperaturas e umidades relativas do ambiente de secagem no interior da estufa, conforme ilustram as Tabelas 1 e 2, com o

objetivo de analisar os efeitos das condições do ar de secagem na remoção de umidade e aquecimento das fibras de sisal, e qualidade das mesmas pós-secagem.

**Tabela 2:** Parâmetros experimentais do ar e das fibras para cada teste de secagem.

Teste	Ar		Meio Fibroso				t (h)
	T (°C)	UR (%)	M <sub>o</sub> (b.s.)	M <sub>eq</sub> (b.s.)	T <sub>o</sub> (°C)	T <sub>f</sub> (°C)	
1	50	17,52	0,11327	0,03837	29,8	46,3	7,7
2	60	11,04	0,11118	0,02606	29,8	56,6	6,7
3	70	6,89	0,11148	0,02015	31,5	67,3	5,7
4	80	4,19	0,11030	0,01390	29,6	76,3	5,0
5	90	3,28	0,11342	0,00525	30,4	87,4	4,7

Fonte: Dados da pesquisa.

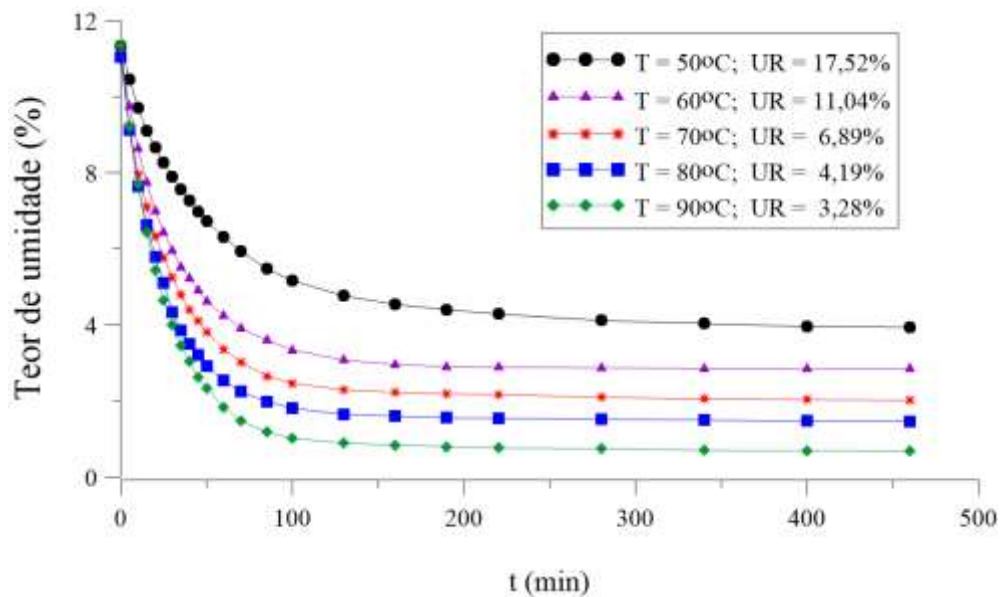
A partir da análise da Tabela 2, observa-se que na medida que a temperatura do ar de secagem aumenta, a umidade relativa do ar diminui e conseqüentemente, o teor de umidade de equilíbrio também diminui.

O aumento da temperatura e a diminuição da umidade relativa do ar de secagem aumenta a taxa de secagem e o meio fibroso alcança mais rapidamente a temperatura e sua umidade de equilíbrio. Esta situação pode causar danos as fibras, interferindo na sua qualidade. Não são recomendados altos gradientes térmicos e hídricos ao longo do meio fibroso, porque isto produz uma secagem não uniforme, o que pode causar o surgimento de tensões internas e a proliferação de fungos ao longo do processo de armazenamento dessas fibras, comprometendo a qualidade das fibras para aplicações industriais. Uma secagem prévia, controlada, é de grande importância, contudo, se a secagem for muito lenta, o processo tornar-se antieconômico.

A Figura 3 mostra a comparação entre os teores de umidade das fibras de sisal durante a secagem a 50, 60, 70, 80 e 90°C.

Observa-se na Figura 3 que o teor umidade do meio fibroso decresce ao longo do tempo, tendendo ao seu teor de umidade de equilíbrio para cada condição experimental. Foi possível constatar que realmente, a medida que a temperatura do ar de secagem aumenta e a umidade relativa do ar diminui, o teor de umidade de equilíbrio também diminui, além do meio fibroso atingir mais rapidamente o equilíbrio hídrico.

**Figura 3:** Teores de umidade (base seca) das fibras de sisal em função do tempo durante a secagem a 50, 60, 70, 80 e 90°C

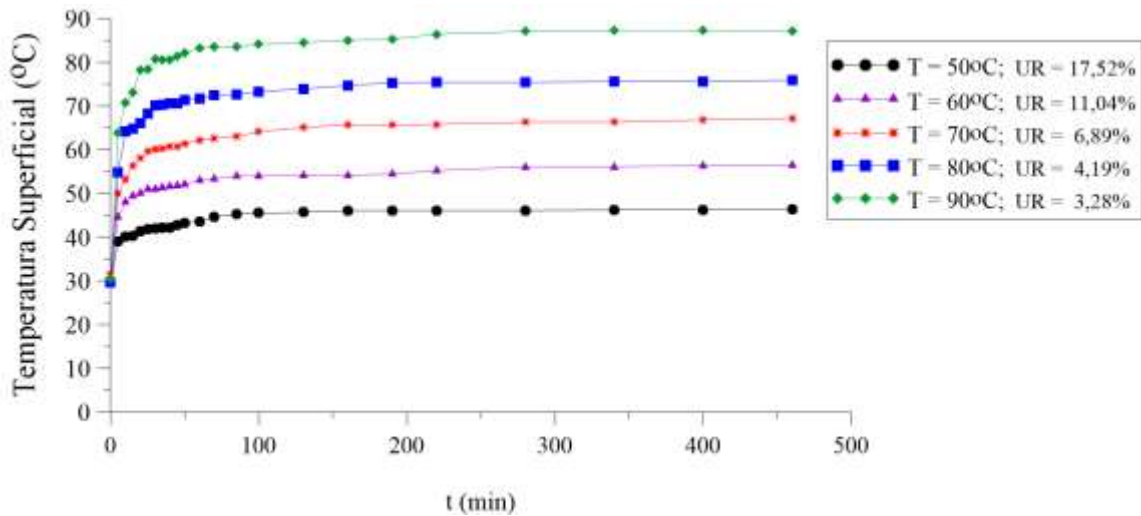


Fonte: Dados da pesquisa.

A temperatura das fibras em cada instante de pesagem foi medida através de um termômetro infravermelho e os resultados estão apresentados na Figura 4.

Observa-se na Figura 4 que no início da secagem (primeiros 50 min do processo) há uma forte elevação na temperatura do meio fibroso tendendo a ajustar-se com a temperatura de bulbo úmido do ar aquecido. Neste período, as fibras estão saturadas de água e o ar aquecido promove a evaporação da umidade. Foi possível constatar que ao longo do processo, a temperatura superficial do meio fibroso cresce tendendo à temperatura do ar de secagem, para cada condição experimental. Observa-se também, que o equilíbrio térmico é atingido mais rapidamente na medida que aumenta-se a temperatura do ar aquecido.

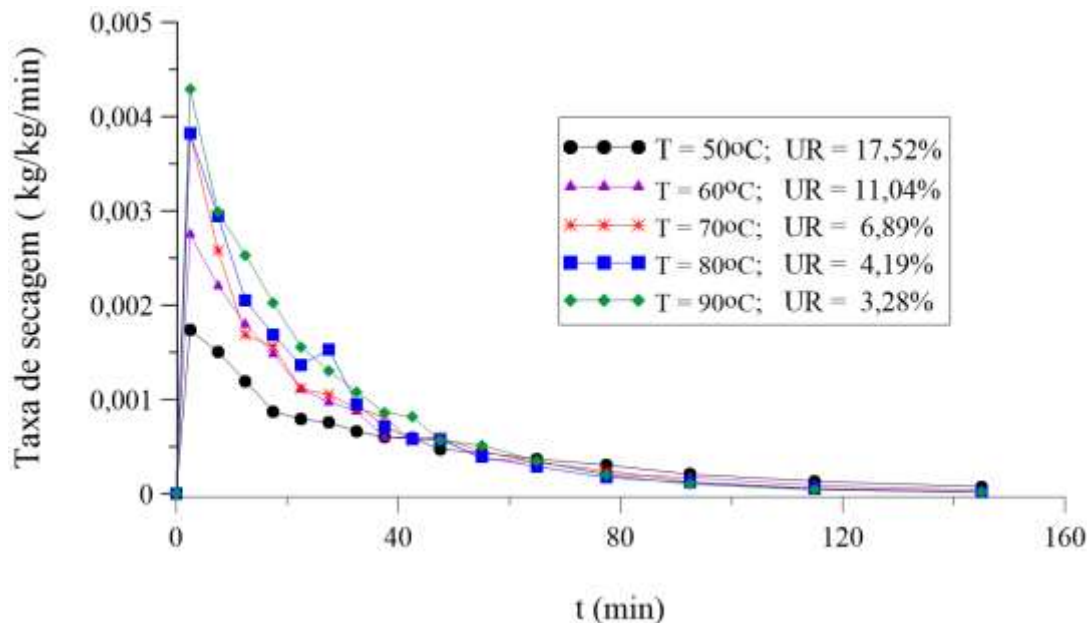
**Figura 4:** Temperaturas superficiais das fibras de sisal em função do tempo durante a secagem a 50, 60, 70, 80 e 90°C.



Fonte: Dados da pesquisa.

A taxa de secagem  $\frac{\partial M}{\partial t}$  foi determinada como sendo igual a  $\frac{\Delta M}{\Delta t}$ , onde  $\Delta M$  é a variação do teor de umidade no intervalo de tempo  $\Delta t$ . A Figura 5 apresenta a comparação entre as taxas de secagem das fibras de sisal durante a secagem a 50, 60, 70, 80 e 90°C.

**Figura 5:** Taxas de secagem das fibras de sisal durante a secagem a 50, 60, 70, 80 e 90°C.



Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se através da Figura 5 que nos primeiros minutos do processo (em torno de 5 min) há uma elevação da taxa de secagem, é o chamado período de acomodação. Após esse período, o processo ocorre a taxa de secagem decrescente, ou seja, a velocidade de migração da água do interior da fibra até a sua superfície é menor do que a velocidade de retirada de água da superfície através do ar aquecido. A temperatura da fibra cresce na medida em que a taxa de secagem decresce. Resultados semelhantes foram relatados por diferentes pesquisadores (Lima et al., 2016; Santos et al., 2017). Mas é importante resaltar que, para a secagem a temperatura de 80°C, verificou-se um pequeno acréscimo na taxa de secagem em  $t = 27,5$  min. Essa alteração no comportamento da taxa de secagem, foi ocasionada provavelmente, por erro no processo de pesagem da amostra durante o experimento. Além disso sabe-se, que na medida que é retirado um material da estufa para pesar, dependendo do tempo, esse material pode absorver umidade.

Percebe-se que no final do processo, a taxa de secagem tende a zero quando a umidade aproxima-se do teor de umidade de equilíbrio e a temperatura da fibra se estabiliza, isto é, a fibra se aproxima de seu equilíbrio térmico. Observa-se que a taxa de secagem atinge valores mais altos quando utiliza-se temperaturas de secagens mais elevadas.

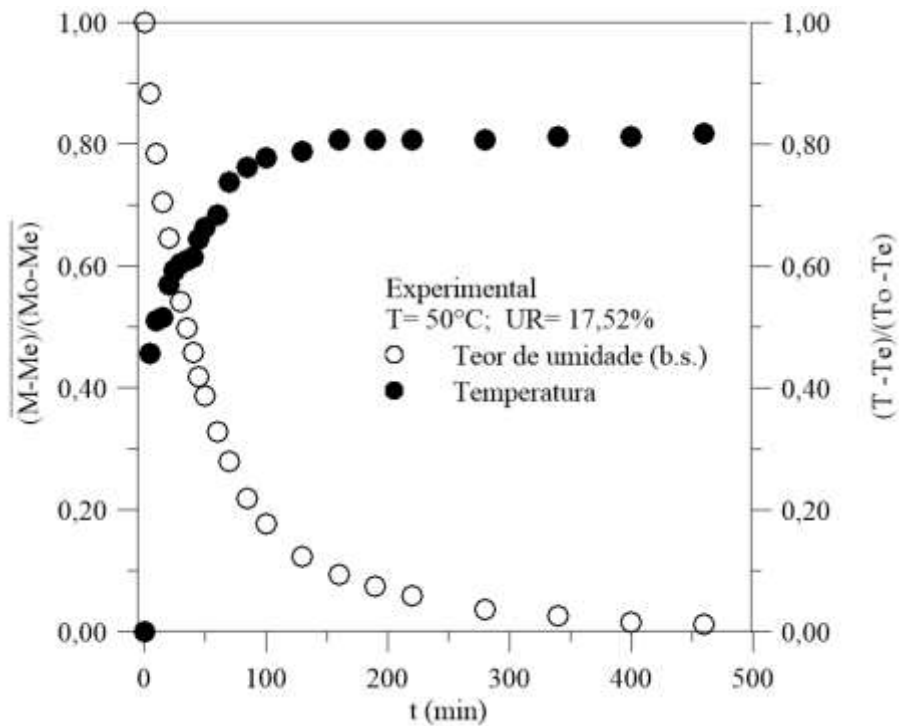
A partir da cinética de secagem foi possível também verificar que a secagem das fibras de sisal ocorreu no período de taxa decrescente, o que indica que a difusão é o principal mecanismo responsável pela perda de umidade, como relatado em outras pesquisas de secagem de fibras vegetais (Crank, 1975; Nordon & Davi, 1967; Santos, 2017). Desta forma, a cinética de secagem possibilita a determinação do mecanismo predominante na transferência de massa do material para o fluido e, conseqüentemente, as equações matemáticas correspondentes para descrever o processo.

As Figuras 6 e 7, mostram a evolução do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional em função do tempo quando as fibras estão sendo secas à diferentes temperaturas.

Nos primeiros 200 min de processo, a secagem a temperatura mais baixa (Figura 6), apresenta uma variação no teor de umidade e temperatura um pouco mais lenta se comparada a secagem a temperatura mais elevada (Figura 7). Após os 200 min iniciais, verifica-se uma variação praticamente constante do teor de umidade e temperatura das fibras em todas as condições de secagem.

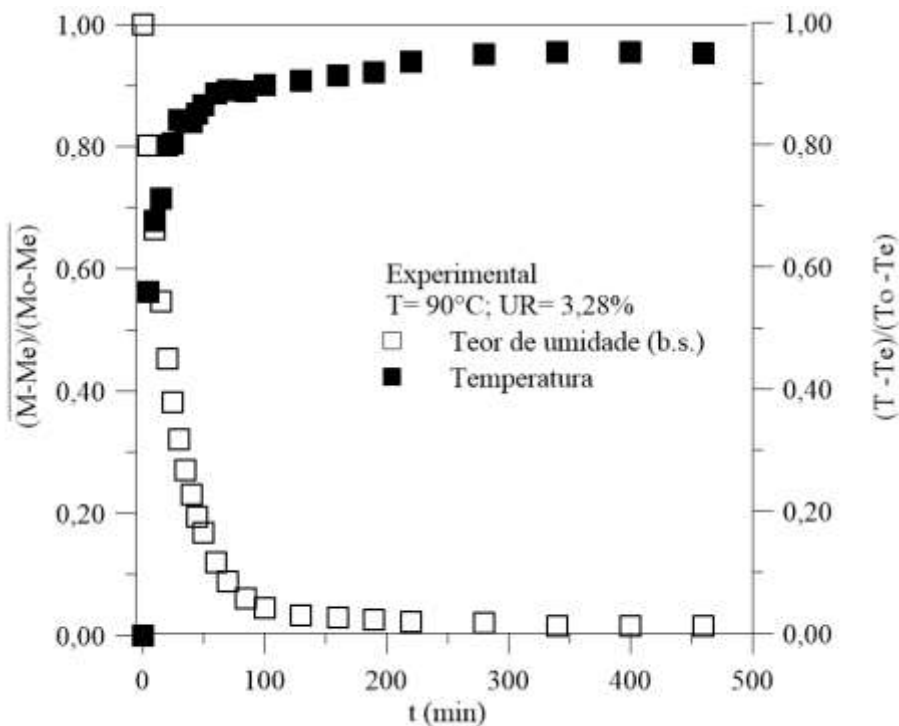


**Figura 6:** Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 50°C e UR 17,52%.



Fonte: Dados da pesquisa.

**Figura 7:** Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 90°C e UR 3,28%.



Fonte: Dados da pesquisa.

Para secagem a temperatura mais baixa (Figura 6), observa-se que a taxa de aquecimento é maior do que a taxa de secagem, tendo em vista, que o meio fibroso atinge o equilíbrio térmico primeiro do que o equilíbrio hídrico. Entretanto, para temperaturas de secagem mais altas (Figura 7), ocorre o inverso, a taxa de secagem é maior do que a taxa de aquecimento.

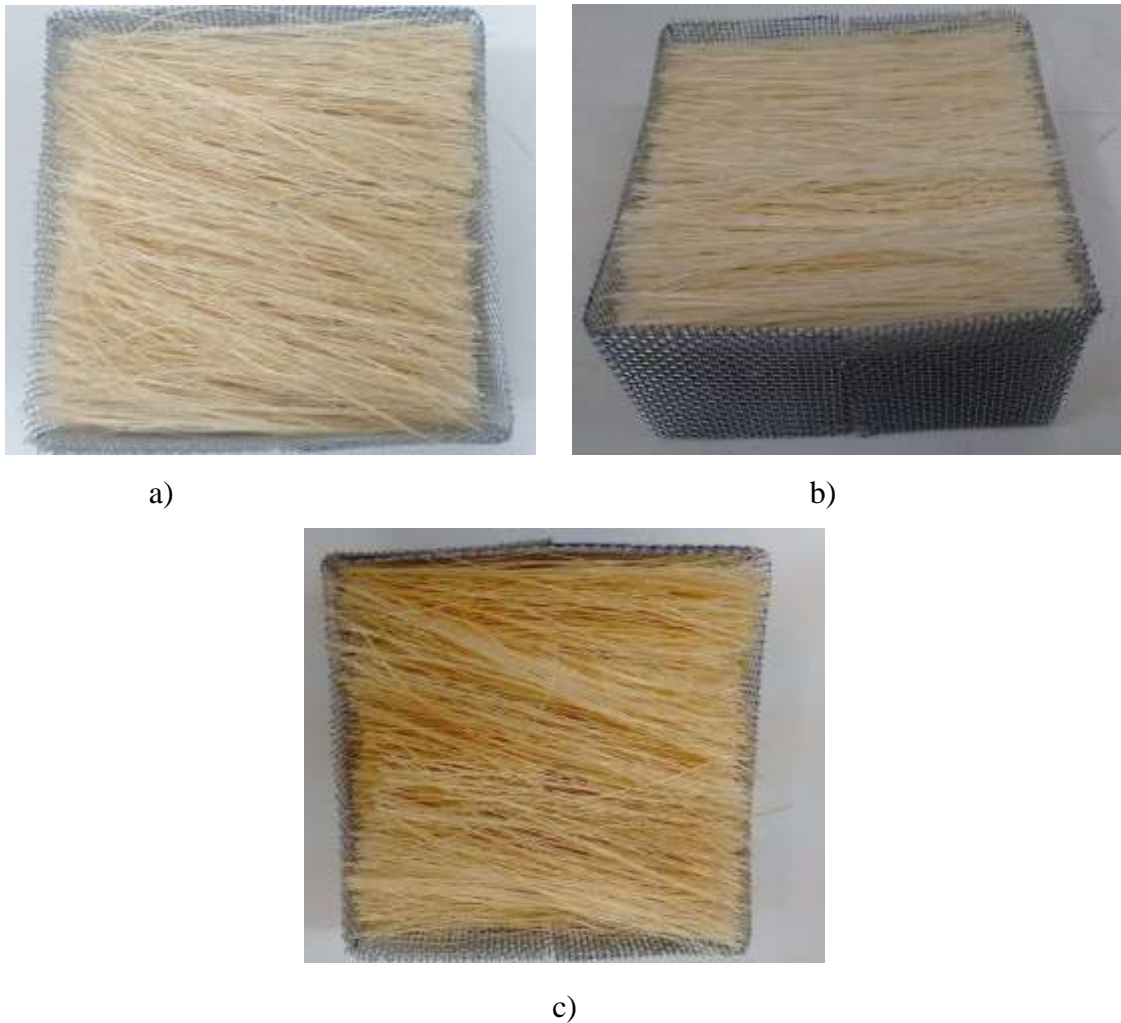
### **Propriedades físicas e parâmetros geométricos das fibras de sisal**

Em cada experimento, a temperatura da estufa foi mantida fixa em 50, 60, 70, 80 e 90°C. Nessas temperaturas as fibras perderam umidade até atingir o teor de umidade de equilíbrio, alcançado quando a temperatura da superfície da fibra atingiu 46,3°C, 56,6°C, 67,3°C, 76,3°C e 87,4°C, respectivamente. No entanto, existia ainda umidade presente nas fibras que pode ser removida através de um maior fornecimento de energia. Dessa forma, a temperatura da estufa foi elevada a 105°C, com o objetivo de atingir a massa seca das fibras, o que foi alcançado. Por outro lado, a temperatura de 105°C provocou uma acentuada alteração na coloração das fibras e perda de massa atribuída à perda de umidade (Figura 8).

Segundo Santos (2017) e Martin et al. (2010), embora tenha-se observado essa alteração na coloração das fibras após a secagem, a degradação da hemicelulose e celulose das fibras de sisal só ocorre a temperaturas superiores a 185°C e 200°C, respectivamente. Nos seus estudos, Santos (2017) verificou que a secagem à 105°C não alterava significativamente as propriedades mecânicas das fibras de sisal, tendo em vista que os valores de resistência mecânica à tração das fibras após a secagem nas temperaturas de 60°C e 80°C permaneceram próximos às de 105°C (Tabela 3).

A Figura 9 ilustra as fibras de sisal depois da secagem com temperatura constante na estufa de 90°C. Estas imagens vem a concordar com o exposto anteriormente que, para temperaturas mais baixas, a secagem é mais controlada garantindo um produto de qualidade, sem fortes alterações na sua pigmentação. Já para a temperatura de secagem a 90°C, observou-se uma alteração significativa na cor das fibras no final do processo de secagem. Durante a secagem geram-se, tensões de sentido contrário entre a camada externa e a interna da fibra e, quanto maior a perda de água e aquecimento, maior também será a tensão resultante, fazendo o material deformar-se.

**Figura 8:** Aspecto da fibra de sisal: (a) antes; (b) depois da secagem a 50°C e (c) depois de 24h de secagem a 105°C.



Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 3:** Propriedades mecânicas das fibras de sisal secas.

Temperatura de secagem (°C)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
60 por 24 h	242,93±54,08	12,90±4,32	2,46±0,44
80 por 24 h	239,03±56,99	11,28±4,18	2,17±0,55
60 por 24 h e 105 por 24 h	195,70±52,67	9,63±1,73	2,08±0,40
80 por 24 h e 105 por 24 h	201,05±42,74	8,97±1,96	2,19±0,25
105 por 24 h	196,24±55,36	8,24±0,71	1,88±0,43

Fonte: Santos (2017).

**Figura 9:** Aspecto da fibra de sisal (a) antes e (b) depois da secagem a 90°C.



Fonte: Dados da pesquisa.

Para obter-se uma secagem uniforme (gradientes de temperatura e umidade minimizados) é importante moderar adequadamente a intensidade da secagem, pelo controle da velocidade, umidade relativa e temperatura do ar de secagem, forma do corpo, a relação área/volume e a porosidade do material. Isto conduz a um produto de qualidade.

A Tabela 4 apresenta alguns parâmetros geométricos da fibra de sisal obtidos antes da secagem. Avaliando-se esta tabela verifica-se que a porosidade do leito de fibra é muito alta, aproximadamente 92%.

**Tabela 4:** Parâmetros físicos da fibra de sisal antes da secagem.

Teste	T (°C)	c (m)	**d (µm)	*V <sub>fibra</sub> (nm <sup>3</sup> )	Nº de fibras	V <sub>f</sub> (m <sup>3</sup> )	V (m <sup>3</sup> )	ε (-)
1	50	0,1	247	4,789	8539	40,895 x10 <sup>-6</sup>	5x10 <sup>-4</sup>	0,91821
2	60	0,1	247	4,789	8190	39,224 x10 <sup>-6</sup>	5x10 <sup>-4</sup>	0,92155
3	70	0,1	247	4,789	8490	40,660 x10 <sup>-6</sup>	5x10 <sup>-4</sup>	0,91868
4	80	0,1	247	4,789	8627	41,316 x10 <sup>-6</sup>	5x10 <sup>-4</sup>	0,91737
5	90	0,1	247	4,789	8869	42,475 x10 <sup>-6</sup>	5x10 <sup>-4</sup>	0,91505

\* Calculado pela Equação (6); \*\* Fonte: Santos (2017).

#### 4. Considerações Finais

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que:

a) A temperatura do ar de secagem e o teor de umidade inicial têm influência na cinética de secagem. Quanto maior o valor da temperatura e do teor de umidade inicial, maior é a velocidade de secagem, e portanto o material seca e se aquece mais rápido;

b) A secagem das fibras ocorreu no período de taxa decrescente, em todas as condições operacionais;

c) Para os experimentos de secagem de fibras de sisal nas temperaturas de 80 e 90°C, houve redução do tempo de operação efetiva, quando comparada com a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70°C;

d) Para as temperaturas de 50 e 60°C, a secagem foi mais controlada. A taxa de secagem é menor, diminuindo os riscos de deformações, e garantindo um produto de qualidade, sem forte alteração na sua pigmentação;

e) Durante a secagem à 90°C, houve uma alteração significativa na cor das fibras.

## Referências

Almeida, G. S. (2009). Simulação e experimentação da secagem de cerâmica vermelha em sistemas térmicos industriais. *Tese de Doutorado*, Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande. Obtido de <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/11369>

Angrizani, C.A.; Vieira, C. A. B.; Zattera, A. J.; Freire, E.; Santana, R. M. C.; & Amico, S. C. (2006). *Influência do comprimento da fibra de sisal e do seu tratamento químico nas propriedades de Compósitos com Poliéster*. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. Obtido de <https://docplayer.com.br/52075763-Influencia-do-comprimento-da-fibra-de-sisal-e-do-seu-tratamento-quimico-nas-propriedades-de-compositos-com-poliester-alegre-rs.html>

Barreto, A. C. H.; Rosa, D. S.; Fachine, P. B. A.; & Mazzetto, S. E. (2011). Properties of sisal fibers treated by alkali solution and their application into cardanol-based biocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(5), 492-500. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.01.008>

Bledzki, A. K., & Gassan, J. (1999). Composite reinforced with cellulose based fiber. *Progress in Polymer Science*, 24(2), 221-274. doi: [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5)

Chand, N.; & Jain, D. (2005). Effect of Sisal fibre orientation on electrical properties of Sisal fibre reinforced epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(5), 594-602. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.08.002>

Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*. London: Oxford University Press.

Ibrahim, M. H.; Daud, W. R. W.; & Talib, M. Z. M. (1997) Drying characteristics of oil palm kernels. *Drying Technology*, 15(3-4), 1103-1117. doi: <https://doi.org/10.1080/07373939708917281>

Joseph, K.; Varghese, S.; Kalaprasad, G.; Thomas, S.; Prasannakumari, L.; Koshyh, P.; & Pavithran, C. (1996). Influence of Interfacial Adhesion on The Mechanical Properties and Fracture Behaviour of Short Sisal Fibre Reinforced Polymer Composites. *European Polymer Journal*, 32(10), 1243-1250. doi: [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(96\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(96)00051-1)

Kiran, C. U.; Reddy, G. R.; Dabade, B. M.; & Rajesham, S. (2007). Tensile Properties of Sun Hemp, Banana and Sisal Fiber Reinforced Polyester Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26(10),1043-1050. doi: <https://doi.org/10.1177/0731684407079423>

Lima Júnior, U. M. (2007) Fibras da semente do açaizeiro (*Euterpe Oleracea* Mart.): Avaliação quanto ao uso como reforço de compósitos fibrocimentícios. *Dissertação Mestrado*. Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Obtido de <http://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/3280>

Lima, A.G.B.; Silva, J.B.; Almeida, G.S.; Nascimento, J.J.S.; Tavares, F.V.S; & Silva, V.S. (2016). *Drying and Energy Technologies*, Heidelberg: Springer.

Martin, A. R.; Martins, M. A.; Mattoso, L. H. C.; & Silva, O. R. R. F. (2009). Caracterização Química e Estrutural de Fibra de Sisal da Variedade Agave Sisalana. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 19(1), 40-46. doi: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282009000100011>

Martin, A. R.; Martins, M. A.; Silva, O. R. R. F.; & Mattoso, L. H. C. (2010). Studies on the thermal properties of sisal fiber and its constituents. *Thermochimica Acta*, 506(1-2), 14-19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2010.04.008>

Mishira, S.; Mohanty, A. K.; Drzal, L. T.; Misra, M.; & Hinrichsen, G. A. (2004). Review on pineapple leaf fibers, sisal fibers and their biocompositers. *Macromolecular Materials and Engineering*, 289(11), 955-974. doi: <https://doi.org/10.1002/mame.200400132>

Mothé, C. G.; & Araujo, C. R. (2004). Caracterização térmica e mecânica de compósitos de poliuretano com fibras de curauá. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 14(4), 274-278. doi: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282004000400014>.

Nabi Saheb, D.; & Jog, J. P. (1999). Natural fiber polymer composites: A review. *Advances in Polymer Technology*, 18(4), 351-363. doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2329\(199924\)18:4<351::AID-ADV6>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2329(199924)18:4<351::AID-ADV6>3.0.CO;2-X)

Nordon, P., & David, H. G. (1967). Coupled diffusion of moisture and heat in hygroscopic textile materials, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 10(7), 853-899. doi: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(67\)90065-8](https://doi.org/10.1016/0017-9310(67)90065-8)

Passos, P. R. A. (2005). Destinação sustentável de cascas de coco (cocos nucifera) verde: obtenção de telhas e chapas de partículas. *Tese Doutorado*. Programa de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Obtido em [http://www.ppe.ufrj.br/images/publicações/doutorado/Paulo\\_Roberto\\_de\\_Assis\\_Passos.pdf](http://www.ppe.ufrj.br/images/publicações/doutorado/Paulo_Roberto_de_Assis_Passos.pdf)

Romero, L. L.; Vieira, J. O. W. M.; Martins, R. A.; & Medeiros, L. A. R. (1995). *Fibras artificiais e sintéticas*. Rio de Janeiro: BNDES.

Santos, D. G. (2017). Estudo termo-hídrico e caracterização mecânica de compósitos de matriz polimérica reforçado com fibra vegetal: Simulação 3D e experimentação. *Tese*

*Doutorado*. Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande. Obtido em [https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFCG\\_3a541f663ef78f9702c2cc4a4a30d119](https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFCG_3a541f663ef78f9702c2cc4a4a30d119)

Santos, D. G.; Lima, A.G. B.; & Costa, P. S. (2017). The effect of the drying temperature on the moisture removal and mechanical properties of sisal fibers. *Defect and Diffusion Forum*, 380, 66-71. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.380.66>

Silva, J. S. (2008). *Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas*. Viçosa: Aprenda Fácil.

Silva, L. J.; Panzera T. H.; Christoforo A. L.; Rubio, J. C. C.; & Scarpa F. (2012). Micromechanical analysis of hybrid composites reinforced with unidirectional natural fibres, silica microparticles and maleic anhydride. *Materials Research*, 15(6), 1003-1012. doi: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392012005000134>

Silva, R. V. (2003). Compósito de resina poliuretana derivada de óleo de mamona e fibras vegetais. *Tese Doutorado*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Obtido em <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-29082003-105440/publico/teseRosanaVilarimdaSilva.pdf>

Silva, J. B. (2009). Simulação e experimentação da secagem de tijolos cerâmicos vazados. 2009. *Tese de Doutorado*, Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande. Obtido de <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/1654/1/JOSELITO%20BARBOSA%20DA%20SILVA%20-%20TESE%20PPGEP%202009..pdf>

Silveira, S. (2015). *Manual de Matérias primas têxteis*. CILAN – Centro de Formação Profissional para a Indústria de Lanifícios.

Spinacé, M. A. S.; Janeiro, L. G.; Bernardino, F. C. E; & Paoli, M. A. (2009). *Caracterização das Fibras de Sisal e de Curauá visando Aplicação em Compósitos Poliméricos*. 32ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química. Obtido em <http://www.s bq.org.br/32ra/>



**Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito**

Jacqueline Félix de Brito Diniz – 40%

Elisiane Santana de Lima – 10%

Hortência Luma Fernandes Magalhães– 10%

Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima – 5%

Túlio Rafael Nascimento Porto– 5%

Ricardo Soares Gomez– 5%

Gicelia Moreira– 5%

Antonio Gilson Barbosa de Lima– 20%