

**Secagem de fibras de sisal em leito fixo: uma análise preditiva usando modelos
concentrados**

Drying of sisal fibers in fixed bed: a predictive analysis using lumped models

Secado de fibras de sisal en lecho fijo: un análisis predictivo con modelos agrupados

Recebido: 16/10/2020 | Revisado: 24/10/2020 | Aceito: 26/10/2020 | Publicado: 28/10/2020

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

Hortência Luma Fernandes Magalhães

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

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: hortencia.luma@gmail.com

Elisiane Santana de Lima

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

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: limaelisianelima@hotmail.com

Ricardo Soares Gomez

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

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: ricardosoaresgomez@gmail.com

Túlio Rafael Nascimento Porto

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

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: trnporto@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

Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima

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

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: wan_magno@hotmail.com

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

Resumo

Fibras de sisal tem despertado o interesse da academia e indústria, devido as suas excelentes características para uso em diversas aplicações. Essas fibras, ao serem extraídas da planta, estão úmidas e, são submetidas a secagem para redução do teor de umidade. O controle do processo de secagem é de grande importância para garantir a qualidade das fibras em termos de resistência mecânica e coloração. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo estudar teoricamente a secagem de fibras de sisal em estufa com circulação forçada de ar. Foram propostos modelos matemáticos para prever o comportamento transiente do teor de umidade médio e temperatura superficial, e do teor de umidade de equilíbrio das fibras, em função da temperatura do ar de secagem e concentração de vapor de água no leito de fibras. Resultados preditos das cinéticas de secagem e aquecimento, e do teor de umidade de equilíbrio higroscópico das fibras são apresentados e comparados com os dados experimentais, em diferentes condições operacionais. Verificou-se que um bom ajuste foi obtido, com coeficiente de correlação maior que 0,99, para todos os modelos analisados.

Palavras-chave: Secagem; Calor; Fibra de sisal; Modelos concentrados; Simulação.

Abstract

Sisal fibers have inspired the interest of academia and industry, due to their excellent characteristics for use in various applications. These fibers, when extracted from the plant, are moist and are subjected to drying to reduce the moisture content. The control of the drying process is of great importance to guarantee the quality of the fibers in terms of mechanical strength and color. In this sense, this work aims to theoretically study the drying of sisal fibers in an oven with forced air circulation. Mathematical models have been proposed to predict the transient behavior of the average moisture content and surface temperature, and the equilibrium moisture content of the fibers, as a function of the drying air temperature and

water vapor concentration in the fiber bed. Predicted results of drying and heating kinetics, and the hygroscopic equilibrium moisture content of the fibers are presented and compared with the experimental data, under different operational conditions. It was found that a good fit was obtained, with a correlation coefficient greater than 0.99, for all models analyzed.

Keywords: Drying; Heat; Sisal fibers; Lumped models; Simulation.

Resumen

Las fibras de sisal han despertado el interés de la academia y la industria, debido a sus excelentes características para su uso en diversas aplicaciones. Estas fibras, cuando se extraen de la planta, están húmedas y se someten a secado para reducir el contenido de humedad. El control del proceso de secado es de gran importancia para garantizar la calidad de las fibras en cuanto a resistencia mecánica y color. En este sentido, este trabajo tiene como objetivo estudiar teóricamente el secado de fibras de sisal en un horno con circulación de aire forzado. Se han propuesto modelos matemáticos para predecir el comportamiento transitorio del contenido promedio de humedad y la temperatura superficial, y el contenido de humedad de equilibrio de las fibras, en función de la temperatura del aire de secado y la concentración de vapor de agua en el lecho de fibras. Los resultados predichos de la cinética de secado y calentamiento y el contenido de humedad en equilibrio higroscópico de las fibras se presentan y comparan con los datos experimentales, en diferentes condiciones de funcionamiento. Se encontró que se obtuvo un buen ajuste, con un coeficiente de correlación mayor a 0,99, para todos los modelos analizados.

Palabras clave: Secado; Calor; Fibras de sisal; Modelos agrupados; Simulación.

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 naturais (origem vegetal) são fibras retiradas prontas da natureza, e são bem conhecidas como fibras celulósicas. O nome celulósica se 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). A celulose é o principal componente responsável pela resistência mecânica e estabilidade das fibras. É um polissacarídeo linear de alta massa molar constituído por unidades de anidro-D-

glicose (C₆ H₁₁ O₅), formando, pela união de unidades, uma cadeia molecular (Fengel & Wegener, 1989).

As fibras naturais de origem vegetal 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). No entanto, apresentam algumas desvantagens, tais como: 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).

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). Nesse sentido, pesquisadores têm desenvolvido compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais, tais como macambira (Cruz et al., 2011); caroá (D´Almeida et al., 2006); curauá (Mothé & Araujo, 2004), coco (Ishizaki et al., 2006; Silva et al., 2013), sisal, rami, bagaço de cana-de-açúcar (Silva et al., 2012), juta e abacaxi (Cavalcanti et al., 2004; Mishira et al., 2004).

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).

O sisal é uma planta da família das Agavaceae, com o nome científico *Agave sisalana* Perrine, sendo cultivado em regiões semiáridas, por ser resistente à aridez e ao sol intenso. As primeiras plantações de sisal foram desenvolvidas no México pelos Maias, antes da chegada dos Europeus. São conhecidas atualmente cerca de 57 espécies (Chavami et al., 1999). No Brasil, as primeiras mudas de sisal foram trazidas provavelmente da Flórida (Estados Unidos), através de uma empresa americana. O cultivo da planta foi difundido a partir de 1920, inicialmente no Estado da Paraíba e somente no final da década de 30, na Bahia (Barreto et al., 2011).

No ano de 2009, a fibra do sisal correspondeu a aproximadamente 70% de toda a produção comercial de fibras duras (Martin et al., 2009). O Brasil é o maior produtor mundial e exportador de sisal, respondendo por cerca de 140.000 toneladas por ano, e também 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).

Diante disto, a cultura do sisal torna-se de grande importância socioeconômica para o Brasil, visto que, além de ser fonte de renda e emprego para um grande número de trabalhadores, é também um importante agente de fixação do homem à região semiárida nordestina, sendo, em algumas dessas regiões, a única alternativa de cultivo com resultados econômicos satisfatórios. A agaveicultura se concentra em áreas de pequenos produtores, com predomínio do trabalho familiar.

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. 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 ciclo de transformação do sisal em fios naturais começa aos três anos de vida da planta ou quando suas folhas atingem cerca de 150 cm de comprimento. A folha de sisal consiste em uma estrutura composta por aproximadamente 4% de fibras, 1% de película (cutícula), 8% de matéria seca e 87% de água (Martin et al., 2009; Wei et al., 2014).

O trabalho no campo concentra-se basicamente no corte das folhas, desfibramento, lavagem/secagem e batimento das fibras. O processo de extração da fibra de sisal, que consiste na eliminação da polpa das fibras, pode ser feito manualmente, por maceração ou por meio de um processo mecânico chamado de decorticamento (Silva, 2008). No processo de decorticamento, as folhas de sisal são esmagadas pela passagem entre duas rodas com facas sem corte (desfibrilador), de forma que somente as fibras permanecem (Silva, 2008). No Nordeste brasileiro, o desfibramento é realizado por meio de uma máquina denominada “motor de agave” ou “máquina Paraibana” (Appeluz, 2011). Exceto as fibras, esses materiais são considerados resíduos do beneficiamento, sendo utilizados como adubo orgânico, ração

animal e pela indústria farmacêutica.

A fibra obtida é imersa, por período de oito a dez horas, em tanques com água limpa para a eliminação dos resíduos da mucilagem péctica e da seiva clorofílica, que ficam aderidos à fibra de sisal. Após a lavagem, as fibras são secas ao sol por período que varia de 8 a 10 horas. Depois de secas, as fibras são amarradas em pequenos feixes e armazenadas. No entanto este processo é totalmente sem controle, com relação a qualidade e resistência mecânica das fibras, o que abre um leque de possibilidades para o estudo mais aprofundado da secagem deste tipo de fibra, e sua relação com a degradação e resistência mecânica da fibra, com vistas a aplicação mais nobre, como por exemplo, como reforço de matrix polimérica e de cimento.

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 (Spinacé et al., 2009; Martin et al., 2009; Ferreira et al., 2012; Angrizani et al., 2006; Lopes et al., 2010; Barreto et al., 2011; Zhou et al., 2014).

A umidificação e secagem são processos termodinâmicos, por meio do qual ocorre variação da umidade de um corpo através de processos mecânicos ou térmicos (Fortes & Okos, 1980). O transporte de umidade da superfície do corpo para o seu interior (umidificação) ou do interior para a superfície (secagem), pode ocorrer na forma de líquido e/ou vapor, dependendo do tipo do material e do percentual de umidade presente.

O processo de secagem de um produto poroso pode ocorrer de forma natural ou artificial. Dentre os métodos artificiais, o mais comum consiste em pré-aquecer o ar ambiente, diminuindo assim sua umidade relativa (método convectivo). Em seguida, o ar é transferido a uma certa velocidade, para o ambiente no qual ele é colocado em contato com o produto. Com isso, há um processo contínuo de transferência de água da superfície do produto para o ar, na forma de vapor (Alvarenga et al., 1980; Hall, 1980; Strumillo & Kudra, 1986; Brooker et al., 1992).

Devido a sua complexidade, o processo de secagem tem sido objeto de estudo de pesquisadores de todo o mundo, e várias teorias e mecanismos para descrever este processo

têm sido reportados na literatura. Alguns consideram as condições externas, tais como temperatura, velocidade e umidade relativa do ar, correlacionadas à taxa de secagem dos produtos, enquanto outros dão ênfase as condições internas dos mesmos, levando em consideração o movimento da água e calor no seu interior (Fortes & Okos, 1980; Brooker et al., 1992; Keey, 1992; Lima, 1995; Ibrahim et al., 1997; Diniz et al., 2020).

Com o objetivo de descrever o transporte de água no interior de produtos, muitos trabalhos reportados na literatura, apresentam apenas dados experimentais. Porém, se a finalidade for apresentar uma descrição detalhada do transporte de água e calor, modelos matemáticos devem ser usados. A principal finalidade do uso desses modelos é correlacionar os dados experimentais da secagem a equações matemáticas que visam representar as cinéticas de remoção de umidade e aquecimento do produto. Deve-se observar que alguns desses modelos possibilitam prever a distribuição de umidade no interior do produto, em qualquer instante de tempo.

Existem na literatura diversos modelos matemáticos que podem ser utilizados para descrever a transferência de umidade e/ou calor em produtos higroscópicos porosos, como as fibras vegetais. De modo geral, estes modelos estão divididos em dois grandes grupos, dentre os quais podem ser citados: Modelos concentrados e Modelos distribuídos. As equações de camada fina nos modelos concentrados podem ser classificadas em empíricas, semiempíricas e teóricas. Estas equações negligenciam os efeitos de variação de temperatura e umidade no interior do material durante o processo (Lima, 1999; Cavalcante, 2006; Nóbrega, 2007; Ganjollo et al., 2011; Mercali et al., 2011; Meneghetti et al., 2012; Koprivica et al., 2013; Silva et al., 2013; Santos, 2017).

Diante do exposto, e devido a escassez de trabalhos teóricos relacionados com a secagem da fibra de sisal, esta pesquisa tem como objetivo estudar teoricamente a perda de umidade e aumento de temperatura da fibra de sisal durante a secagem em estufa, usando modelos concentrados.

2. Metodologia

Experimental

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

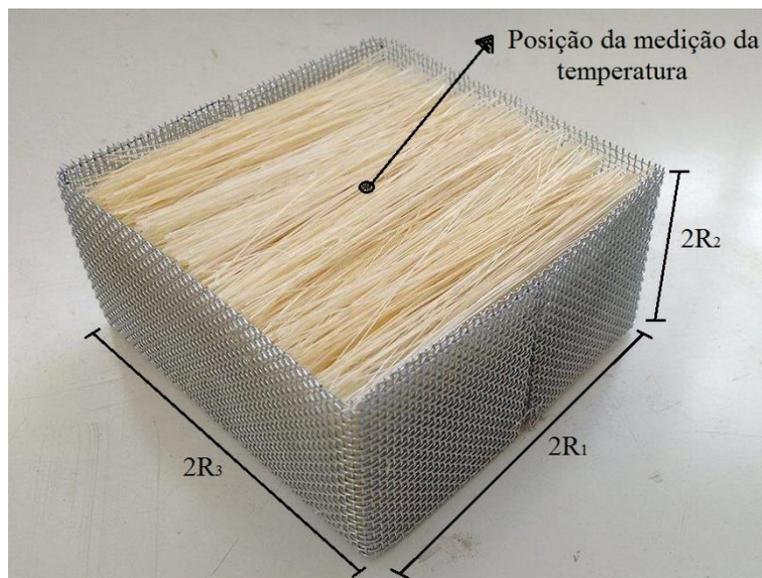
secagem natural prévia. Para a secagem em estufa as fibras de sisal foram acomodadas em um recipiente como ilustrado na Figura 2.

Figura 1. Fibras de sisal que foram utilizadas no experimento.



Fonte: Autores (2018).

Figura 2. Cesto com as fibras de sisal.



Fonte: Autores (2018).

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. Em intervalos pré-definidos a amostra era retirada da estufa, possibilitando a medição da temperatura e da massa. Maiores detalhes do procedimento experimental pode ser encontrado em Diniz (2018). As Tabelas 1 e 2

apresentam para cada experimento a denominação das amostras, suas dimensões e volume, e condições do ar de secagem utilizada na estufa.

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 ³)
1	17,52	50	0,05	0,1	0,05	0,1	5x10 ⁻⁴
2	11,04	60	0,06	0,1	0,05	0,1	5x10 ⁻⁴
3	6,89	70	0,07	0,1	0,05	0,1	5x10 ⁻⁴
4	4,19	80	0,08	0,1	0,05	0,1	5x10 ⁻⁴
5	3,28	90	0,09	0,1	0,05	0,1	5x10 ⁻⁴

Fonte: Autores (2018).

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

Teste	Ar		Meio Fibroso				t (h)
	T (°C)	UR (%)	M _o (b.s.)	M _{eq} (b.s.)	T _o (°C)	T _f (°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: Autores (2018).

Tratamento estatístico dos dados

a) Teor de umidade médio

A partir dos dados obtidos do teor de umidade e temperatura das fibras ao longo do processo de secagem, foi possível verificar que no período inicial, as taxas de perda de umidade e temperatura são mais elevadas, requerendo do pesquisador a leitura destes dados

em intervalos de tempo menores, podendo ser ampliado, à medida que o processo for se desenvolvendo. Sob o aspecto físico, esta metodologia é extremamente satisfatória, em virtude de possibilitar a descrição do fenômeno com grande precisão. É estatisticamente mais adequado realizar o ajuste de parâmetros a partir de uma distribuição uniforme de pontos ao longo do processo. Desta forma, propõe-se um ajuste de uma equação exponencial com 3 termos e 6 parâmetros aos dados experimentais do teor de umidade. A equação tem a forma:

$$\bar{M} = a_1 \exp(-k_1 t) + a_2 \exp(-k_2 t) + a_3 \exp(-k_3 t), \quad (1)$$

onde t é dado em minutos.

A estimativa dos parâmetros a_1 , a_2 , a_3 , k_1 , k_2 e k_3 da Equação (1) foi realizada utilizando o método numérico de Quasi-Newton empregando o “Software” Statistica®, com critério de convergência de 0,000099.

A escolha da forma da Equação (1) foi baseada nos trabalhos de Lima (1999), Nascimento (2002) e Silva (2009), onde verificaram que equações exponenciais com maior número de termos se ajustam muito bem aos dados experimentais da cinética de secagem.

b) Temperatura superficial da fibra

Já os dados experimentais da temperatura, propõe-se um ajuste a uma equação logarítmica com 1 termo e 7 parâmetros, como segue:

$$T = b_1 \log_2[(k_1 t + k_2)^{b_2} \times (k_3 t + k_4)^{b_3}], \quad (2)$$

onde t é dado em minutos.

A estimativa dos parâmetros b_1 , b_2 , b_3 , k_1 , k_2 , k_3 e k_4 da Equação (2) foi realizada utilizando o método numérico de Quasi-Newton empregando o “Software” Statistica®, com critério de convergência de 0,000099.

c) Estimativa dos parâmetros da equação de equilíbrio

Considerou-se a equação de equilíbrio dada por:

$$M = \alpha + \sigma C - \beta T, \quad (3)$$

onde M é a quantidade de umidade absorvida por unidade de massa de fibra expressa em $\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{m.s.}}$, C é a concentração de vapor de água nos espaços vazios (interfibras) expressa em $\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{m}^3$, T é a temperatura em $^{\circ}\text{C}$, e α , σ e β são constantes.

Pode-se ainda escrever a Equação (3) da seguinte forma:

$$M = c_1 + c_2 T, \quad (4)$$

onde $c_1 = \alpha + \sigma C$ e $c_2 = -\beta$.

Com os valores de T_{eq} e M_{eq} para cada condição experimental, fez-se um ajuste linear da Equação (4) aos dados experimentais, usando o método numérico de Quasi-Newton empregando o “Software” Statística[®], com critério de convergência de 0,000099, de onde obteve-se os valores de a_1 e a_2 .

Por outro lado, a equação de estado de gás ideal é dada por:

$$P = \rho_{\text{ar}} \times \bar{R} \times T, \quad (5)$$

onde P é a pressão atmosférica, ρ é a densidade, \bar{R} é a constante particular do gás (ar atmosférico) e T é a temperatura de secagem na escala absoluta. Assim, pode-se determinar a densidade do ar no interior do meio fibroso como segue:

$$\rho_{\text{ar}} = \frac{P}{\bar{R} \times T}. \quad (6)$$

Para calcular a concentração de vapor de água de equilíbrio do meio fibroso (entre as fibras), considerou-se a seguinte fórmula:

$$C_{\text{eq}} = \rho_{\text{ar}} \times UA, \quad (7)$$

onde ρ_{ar} é densidade do ar e UA é a umidade absoluta do ar nos espaços vazios, obtidos a partir da temperatura e umidade relativa do ar de secagem. Assim, usando os dados de C_{eq} e M_{eq} para $T = 50$ e 90°C , e o valor de β obtido do ajuste, têm-se um sistema de equações com duas incógnitas, o que possibilita a obtenção do α e σ .

3. Resultados e Discussão

Cinéticas de secagem

A Tabela 3 apresenta os parâmetros da Equação (1) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade. As Figuras 3 e 4 ilustram as curvas de ajuste do teor de umidade médio das fibras em função do tempo para as temperatura do ar de secagem de 60 e 80°C.

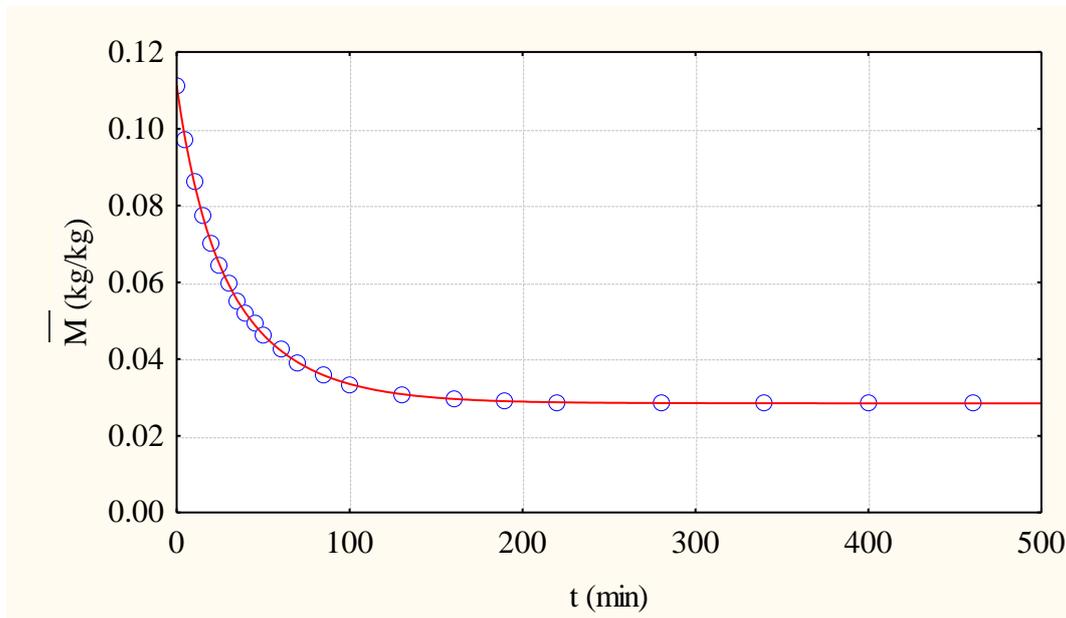
Após análise da Tabela 3 e das Figuras 3 e 4, pode-se verificar uma boa concordância entre os valores preditos e experimentais, caracterizados por coeficientes de correlação próximos de 1,0. Conseqüentemente, pode-se afirmar que o modelo proposto descreve adequadamente o processo de secagem das fibras de sisal. Apesar disso, verifica-se que os parâmetros da equação proposta apresentam um comportamento oscilante com a temperatura de secagem. Isto é característico deste tipo de modelo matemático, que é desprovido dos aspectos fenomenológicos, sendo valores puramente matemáticos.

Tabela 3. Parâmetros da Equação (1) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade.

T (°C)	Parâmetros					
	a ₁ (kg/kg, b.s.)	k ₁ (°C ⁻¹)	a ₂ (kg/kg, b.s.)	k ₂ (°C ⁻¹)	a ₃ (kg/kg, b.s.)	k ₃ (°C ⁻¹)
50	0,044521	0,000287	0,006052	0,153978	0,062820	0,019823
60	0,060180	0,024910	0,028524	0,000006	0,022567	0,073435
70	0,779910	0,031757	0,022230	0,000215	0,011298	0,243766
80	0,005432	0,242474	0,088221	0,038727	0,016677	0,000323
90	0,006208	0,220259	0,008476	0,000490	0,098719	0,037977
T (°C)	R	Proporção da variância		Função de perda (obs - pred) ²		
50	0,99994	0,99989		0,000001245		
60	0,99998	0,99996		0,000000480		
70	0,99995	0,99989		0,000001574		
80	0,99990	0,99981		0,000003106		
90	0,99997	0,99995		0,000001081		

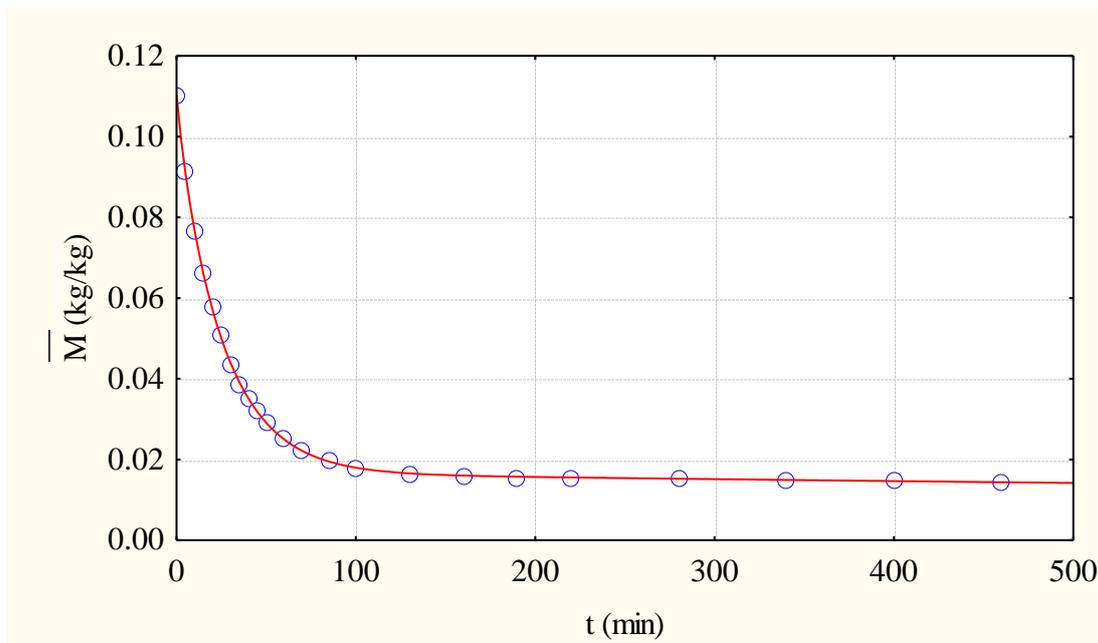
Fonte: Autores (2018).

Figura 3. Comparação entre os teores de umidade médios experimental (°°°°°) e predito (—) das fibras para o experimento realizado na temperatura de 60°C.



Fonte: Autores (2018).

Figura 4. Comparação entre os teores de umidade médios experimental (°°°°°) e predito (—) das fibras para o experimento realizado na temperatura de 80°C.



Fonte: Autores (2018).

A partir da análise da Figuras 3 e 4 observa-se que o teor umidade do meio fibroso decresce ao longo do tempo, tendendo ao seu teor de umidade de equilíbrio para cada condição experimental. Além disso, verifica-se 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 seu equilíbrio higroscópico. Além disso verifica-se que a remoção de umidade é mais intensa nos primeiros 50 minutos de processo (maior taxa de secagem).

Além disso, 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).

Cinéticas de aquecimento

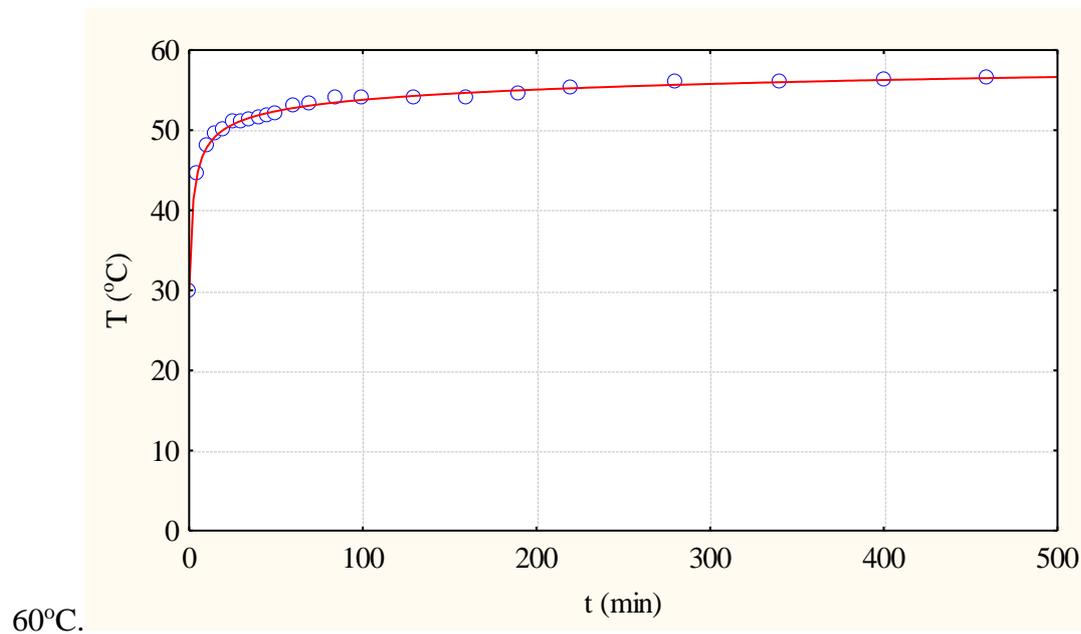
A Tabela 4 apresenta os parâmetros da Equação (9) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura. As Figuras 5 e 6 ilustram as curvas de ajuste da temperatura na superfície das fibras em função do tempo para as temperatura do ar de secagem de 60 e 80°C.

Tabela 4. Parâmetros da Equação (2) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura.

T (°C)	Parâmetros						
	b ₁ (°C)	k ₁ (°C ⁻¹)	k ₂ (...)	b ₂ (...)	k ₃ (°C ⁻¹)	k ₄ (...)	b ₃ (...)
50	2,088806	59,13998	36,98447	,728715	0,011778	0,046578	-1,191320
60	2,770573	30,58093	54,94132	39,62808	23,53380	47,35824	-39,22180
70	0,536510	0,000406	0,006903	-5,85983	13,39565	3,234171	8,947182
80	68,89534	732,1602	2461,262	-5,64276	816,8746	2552,429	5,654512
90	0,737719	0,961179	10,15929	-18,8663	45,79376	38,34649	19,82850
T (°C)	R		Proporção da variância		Função de perda (obs - pred) ²		
50°C	0,98807		0,97627		7,220055570		
60°C	0,99861		0,99722		1,898513473		
70°C	0,99737		0,99474		6,887782641		
80°C	0,99819		0,99637		7,903952131		
90°C	0,99866		0,99733		8,623793049		

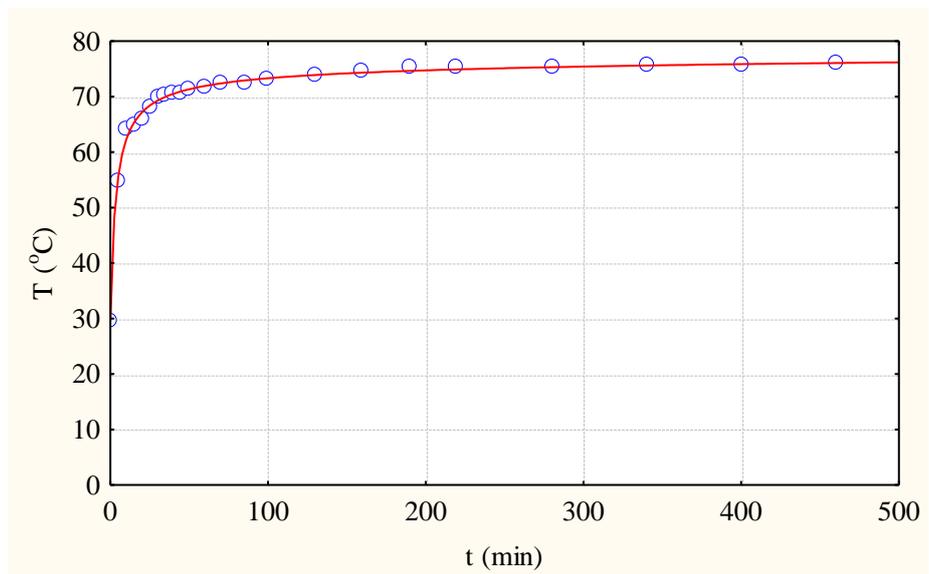
Fonte: Autores (2018).

Figura 5. Comparação as temperaturas experimental (°°°°°) e predito (—) das fibras para o experimento realizado na temperatura de



Fonte: Autores (2018).

Figura 6. Comparação as temperaturas experimental (°°°°°) e predito (—) das fibras para o experimento realizado na temperatura de 80°C.



Fonte: Autores (2018).

Analisando a Tabela 4 e as Figuras 5 e 6, pode-se perceber uma boa concordância entre os valores preditos e experimentais da temperatura superficial das fibras, caracterizados

por coeficientes de correlação próximos de 1,0. Consequentemente, pode-se afirmar que o modelo proposto descreve adequadamente o processo de aquecimento das fibras, no entanto, similarmente ao teor de umidade médio, os parâmetros da equação não apresentam comportamento tendencioso com as condições do ar de secagem.

Observa-se nas Figuras 5 e 6 que 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. Além disso, foi possível constatar que no início da secagem (primeiros 50 min do processo) há uma forte elevação na temperatura do meio fibroso.

De forma geral, um aumento da temperatura e a diminuição da umidade relativa do ar de secagem aumentam as taxas de secagem e de aquecimento do meio fibroso, o que conduz a elevados gradientes térmico e hídrico. 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, danos mecânicos, descoloração nas fibras, e a proliferação de fungos ao longo do processo de armazenamento dessas fibras, comprometendo a qualidade das mesmas para aplicações industriais.

Para obter-se uma secagem uniforme (gradientes de temperatura e umidade minimizados) torna-se de grande importância moderar adequadamente a intensidade da secagem, controlando os parâmetros de secagem (velocidade, umidade relativa e temperatura). Diante do exposto, pode-se dizer que uma secagem prévia, controlada, torna-se de grande importância, contudo, se a secagem for muito lenta, o processo tornar-se antieconômico.

Equação de equilíbrio higroscópico

A Tabela 5 apresenta as condições do ar e teor de umidade de equilíbrio das fibras para cada condição de secagem, e na Tabela 6 são apresentados os parâmetros da Equação (4), obtidos após ajuste do modelo aos dados experimentais do teor de umidade de equilíbrio. A Figura 7 ilustra a curva de ajuste do teor de umidade de equilíbrio das fibras em função da temperatura do ar de secagem.

Analisando a Tabela 6 e Figura 7 verifica-se que a boa concordância entre os valores preditos e experimentais foi obtido, caracterizado por um coeficiente de correlação próximo de 0,99, o que ratifica o comportamento linear do teor de umidade de equilíbrio com a temperatura do ar de secagem no intervalo de 50 a 90°C.

Tabela 5. Parâmetros experimentais do ar e das fibras para cada teste de secagem.

Ar			Meio Fibroso
T (°C)	UR (%)	UA (kg vapor / kg ar seco)	M _{eq} (kg/kg, b.s.)
50	17,52	0,01357	0,03837
60	11,04	0,01382	0,02606
70	6,89	0,01348	0,02015
80	4,19	0,01242	0,01390
90	3,28	0,01443	0,00525

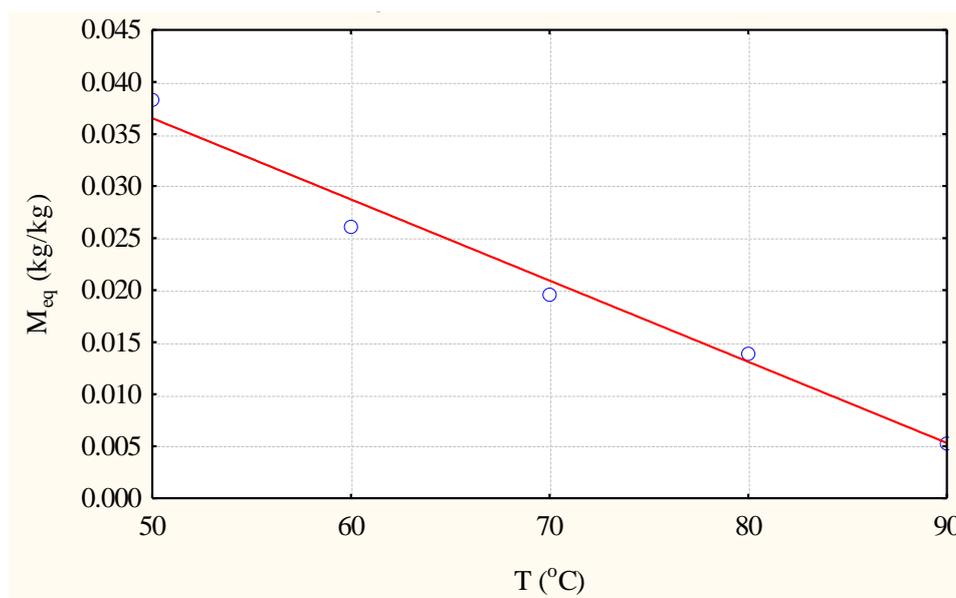
Fonte: Autores (2018).

Tabela 6. Parâmetros da Equação (4) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade de equilíbrio das amostras.

c ₁ (kg/kg)	c ₂ (kg/kg/°C)	R (-)	Proporção da variância	Função de perda (obs - pred) ²
0,075519	-0,00078	0,98999	0,98009	0,00001249

Fonte: Autores (2018).

Figura 7. Comparação entre os teores de umidade equilíbrio experimental (°°°°°) e predito (—) das fibras para o experimento realizado nas temperaturas de 50 a 90°C.



Fonte: Autores (2018).

A partir das Equações (5)-(7), obteve-se os seguintes parâmetros de processo apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros do ar e das fibras para as temperaturas de 50°C e 90°C.

T (K)	\bar{R} (kJ/kmol/K)	P (kPa)	* ρ_{ar} (kg _{ar seco} /m ³)	UA (kg vapor/kg ar seco)	** C_{eq} (kg _{vapor} /m ³)
323,15	0,287	101,325	1,092523	0,01357	0,014825
363,15	0,287	101,325	0,972184	0,01443	0,014029

*Calculado pela Equação (6); **Calculado pela Equação (7). Fonte: Autores (2018).

Substituindo os dados das Tabelas 6 e 7 na Equação (3) e desde que $-\alpha_2 = \beta = 0,000784 \text{ kg}_{vapor}/\text{kg}_{m.s./}^{\circ}\text{C}$, obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} 0,005249 = \alpha + \sigma \times 0,014029 - 0,000784 \times 90 \\ 0,038374 = \alpha + \sigma \times 0,014825 - 0,000784 \times 50 \end{cases} \quad (8)$$

Resolvendo o sistema de equações, encontra-se os seguintes resultados: $\alpha = 0,044702 \text{ kg}_{vapor}/\text{kg}_{fibra \text{ seca}}$ e $\sigma = 2,217337 \text{ m}^3/\text{kg}_{fibra \text{ seca}}$. Nota-se que os valores de α e σ estão coerentes, visto que, considerando $C_{eq} = 0,014029 \text{ kg}_{vapor}/\text{m}^3$, para $T = 90^{\circ}\text{C}$, obtém-se $\alpha + \sigma \times C_{eq} = 0,075809 \approx a_1$.

Dessa forma, obtém-se a seguinte equação de equilíbrio:

$$M = 0,044702 + 2,217337 C - 0,000784 T \quad (9)$$

A Equação (9) descreve a dependência linear do teor de umidade (M), com a temperatura (T) e concentração de vapor de água (C) no meio poroso.

4. Considerações Finais

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, constatou-se que o processo de secagem de fibras de sisal ocorre no período de taxa de secagem decrescente, evidenciado pela elevação contínua e crescente da temperatura da amostra. Constatou-se ainda que, quanto maior a temperatura e menor a umidade relativa do ar de secagem, maiores serão as taxas de remoção de umidade e de elevação da temperatura da fibra e, portanto, o material seca e se aquece mais intensamente. Além disso, verificou-se que o teor de umidade de equilíbrio da fibra de sisal cresce linearmente com a elevação da temperatura do ar de secagem, variando de 0,03837 kg/kg até 0,00525 kg/kg, quando a temperatura do ar de secagem foi aumentada de 50 para 90°C, respectivamente. Observou-se, ainda, que as equações propostas para o teor de umidade médio, temperatura e teor de umidade de equilíbrio das fibras de sisal, mostraram um bom ajuste, evidenciado por uma boa concordância entre os valores preditos e experimentais, caracterizados por coeficiente de correlação maior que 0,99, para todas as condições operacionais do ar de secagem estudadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, a CAPES e a FINEP pelo apoio financeiro, e aos pesquisadores referenciados no texto que, com suas pesquisas, contribuíram para o melhoramento do trabalho.

Referências

Alvarenga, L. C., Fortes, M., Pinheiro Filho, J. B., Hara, T. (1980). Transporte de umidade no interior de grãos de feijão preto sob condições de secagem. *Revista Brasileira de Armazenamento*, 5(1), 5-18. Recuperado de <http://www.centreinar.org.br/revistas.php>.

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. Recuperado 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>.

Appeluz. (2011). *Associação dos Pequenos Produtores de Sisal de Santaluz/BA - Homenagem à Faustino, criador da máquina de sisal*. Recuperado de <<http://blogdojazel.blogspot.com.br/2011/03/homenagem-faustino-criador-da-maquina.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.

Bledzki, A. K., Gassan, J. (1999). Composite reinforced with cellulose based fiber. *Progress in Polymer Science*, 24, 221-274. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.01.008>

Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F.W., Hall, C.W. (1992). *Drying and storage of grains and oilseeds*. New York: AVI Book.

Cavalcanti, W. S., Carvalho, L.H., Alsina, O.L.S. Lima, A.G.B. De. (2004). *Sorção de Água de Compósito Poliéster Insaturado Reforçados por Tecido de Juta e Tecido Híbrido Juta/Vidro*. XVI CBECIMAT, Porto Alegre. Recuperado de https://www.scielo.br/pdf/po/v20n1/aop_pol_0492.pdf

Chavami, K., Toledo Filho, R. D., Barbosa, N. P. (1999). Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement & Concrete Composites*, 21(1), 39-48. doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00033-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00033-X)

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

Cruz, V. C. A., Nóbrega, M. M. S., Silva, W. P., Carvalho, L. H., Lima, A. G. B. (2011). An experimental study of water absorption in polyester composites reinforced with macambira natural fiber. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 42(11), 979-984. doi: <https://doi.org/10.1002/mawe.201100840>

D'almeida, A. L. F. S., Carvalho, L. H., D'almeida, J. R. M. (2006). *Characterization of caroá (Neoglaziovia variegata) fibers*. World Polimer Congress – 41st International

Symposium on Macromolecules. Anais. Rio de Janeiro – Brazil. doi: <https://doi.org/10.1002/macp.200600554>

Diniz, J. F. B. (2018). Transferência de calor e massa em sólidos porosos com forma paralelepípedica. Estudo de caso: Secagem de fibras de sisal. *Tese de Doutorado em Engenharia de Processos*, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil.

Diniz, J. F. B., Lima, E. S., Magalhães, H. L. F., Lima, W. M. P. B., Porto, T. R. N., Gomez, R. S., Moreira, G., Lima, A. G. B. (2020). Secagem de fibras de sisal em estufa com circulação forçada de ar: Um estudo experimental, *Research, Society and Development*, 9(10), 1-25. doi: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i10.9342>

Fengel, D., Wegener, G. (1989). *Wood: chemistry ultrastructure reactions*. Berlin: Walter de Gruyter. Recuperado de <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/2424>

Ferreira, S. R., Lima, P. R. L., Silva, F. A., Toledo Filho, R. D. (2012). Influência de ciclos molhados-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland. *Revista Matéria*, 17(2), 1024-1034. doi: <https://doi.org/10.1590/S1517-70762012000200008>.

Fortes, M., Okos, M. R. (1980). *Advances in drying*. Washington: Hemisphere Publishing Corporation. Chapter Five: Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains.

Ganjollo, A., Rahman, R. A., Bakar, J., Osman, A., Bimakd, M. (2011). Kinetics modeling of mass transfer using Peleg's equation during osmotic dehydration of seedless guava (*Psidium guajava* L.): Effect of process parameters. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 2151-2159. doi: <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0546-2>

Hall, C. W. (1980). *Drying and storage of agricultural crops*. Connecticut: AVI publishing company.

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>

Ishizaki, M.H., Leila L. Y. Visconte, Cristina R. G. Furtado, Márcia C.A. M., Leite Jean L. Leblanc. (2006). Caracterização Mecânica e Morfológica de Compósitos de Polipropileno e Fibras de Coco Verde: Influência do Teor de Fibra e das Condições de Mistura. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 16(3), 182-186. doi: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282006000300006>

Keey, R. B. (1992). *Drying of Loose and Particulate Materials*. New York, Hemisphere Publishing Corporation.

Koprivica, G., Misljenovic, N., Bera, O., Levic´ L. (2013). Modeling of water loss during osmotic dehydration of apple cubes in sugar beet molasses. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(4), 1745-4549. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpp.12119>

Lima, A. G. B. (1995). Estudo da secagem e dimensionamento de secador de casulos do bicho-da-seda. 1995. *Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica*. Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, Brasil. Recuperado de <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/8697>

Lima, A. G. B. (1999). Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de bananas. *Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica*. UNICAMP, São Paulo. Recuperado de <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/265133>

Lopes, F. F. M., Araújo, G. T., Nascimento, J. W. B., Gadelha, T. S., Silva, V. R. (2010). Estudo dos efeitos da acetilação em fibras de sisal. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(7), 783-788. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010000700015>

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: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282009000100011>

Meneghetti, V. L., Aosani, E., Rocha, J. C., Oliveira, M., Elias, M. C., Pohnorf, R. S. (2012). Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(10), 1115-1120. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012001000012>

Mercali, G. D., Kechinski, C. P., Coelho, J. A., Tessaro, I. C., Marczak, L. D. F. (2011). Estudo da transferência de massa durante a desidratação osmótica de mirtilo. *Brazilian Journal of Food Technology*, 13(2), 91-97. doi: 10.4260/BJFT2010130200012

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, 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)

Nascimento, J. J. S. (2002). Fenômenos de difusão transiente em sólidos paralelepípedos. Estudos de caso: secagem de materiais cerâmicos. *Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica*, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil.

Nóbrega, M. M. S. (2007). Compósitos de matriz poliéster com fibras de caroá neoglaziovia variegata: caracterização mecânica e sorção de água. *Tese de Doutorado em Engenharia de Processos*, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande. Obtido de <https://core.ac.uk/download/pdf/250089258.pdf>

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)

Romero, L. L., Vieira, J. O. W. M., Martins, R. A., Medeiros, L. A. R. (1995). *Fibras artificiais e sintéticas*. Relato setorial. 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 de Doutorado em Engenharia de Processos*. Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande. Recuperado de https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFCG_3a541f663ef78f9702c2cc4a4a30d119

Silva, J. B. (2009). Simulação e Experimentação de Secagem de Tijolos Cerâmicos Vazados. *Tese de Doutorado em Engenharia de Processo*, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande. Recuperado de https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFCG_7f87c846c85fb2412ce24a4350689be9

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: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392012005000134>

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

Silva, W. P., Amaral, D. S., Duarte, M. E. M., Mata, M. E. R. M. C., Silva, C. M. D. P. S., Pinheiro, R. M. M., Pessoa, T. (2013). Description of the osmotic dehydration and convective drying of coconut (*Cocos nucifera* L.) pieces: A three-dimensional approach. *Journal of Food Engineering*. 115(1), 121-131. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.007>

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. Recuperado de <http://www.s bq.org.br/32ra/>

Strumillo, C., Kudra, T. (1986). *Drying: principles, science and design*. Gordon and Breach Science Publishers, New York, USA.

Wei, J., Meyer, C. (2014). Improving degradation resistance of sisal fiber in concrete through fiber surface treatment. *Applied Surface Science*, 289, 511-523. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.11.024>

Zhou, F., Cheng, G., Jiang, B. (2014). Effect of silane treatment on microstructure of sisal fibers. *Applied Surface Science*, 292, 806-812. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.12.054>

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Jacqueline Félix de Brito Diniz – 40%

Hortência Luma Fernandes Magalhães – 10%

Elisiane Santana de Lima – 5%

Ricardo Soares Gomez – 5%

Túlio Rafael Nascimento Porto - 5%

Gicelia Moreira – 5%

Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima – 5%

Antonio Gilson Barbosa de Lima – 25%