



**SECAGEM DA FIBRA DO PSEUDOCAULE DA BANANEIRA: AVALIAÇÃO
DE MODELOS CINÉTICOS, DIFUSIVIDADE EFETIVA, PROPRIEDADES
TERMODINÂMICAS E CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL**

Genardo Queiroz de Oliveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: Rui Nelson Otoni Magno

Belém

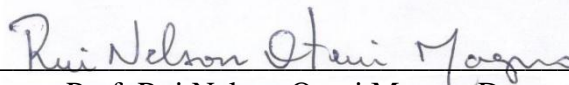
Novembro de 2021

**SECAGEM DA FIBRA DO PSEUDOCAULE DA BANANEIRA: AVALIAÇÃO
DE MODELOS CINÉTICOS, DIFUSIVIDADE EFETIVA, PROPRIEDADES
TERMODINÂMICAS E CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL**

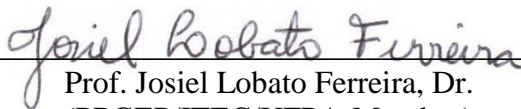
Genardo Queiroz de Oliveira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

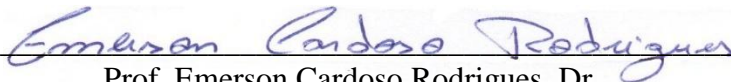
Examinada por:




Prof. Rui Nelson Otoni Magno, Dr.
(PPGEP/ITEC/UFPA-Orientador)



Prof. Josiel Lobato Ferreira, Dr.
(PPGEP/ITEC/UFPA-Membro)



Prof. Emerson Cardoso Rodrigues, Dr.
(FEQ/ITEC/UFPA-Membro)



Prof. Nelson de Souza Amorim, Dr.
(PCT/IEG/UFOPA-Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

NOVEMBRO DE 2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Oliveira, Genardo Queiroz de, 1974-
Secagem da fibra do pseudocaule da Bananeira: avaliação de modelos cinéticos, difusividade efetiva, propriedades termodinâmicas e caracterização estrutural / Genardo Queiroz de Oliveira - 2021.

Orientador: Rui Nelson Otoni Magno

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, 2021.

1. Fibra 2. Pseudocaule 3. Cinética 4. Difusividade 5. Bananeira I. Título

CDD 670.42.

Dedico à minha família, que me apoia em todos os momentos, incentivando-me a alcançar meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade e dom da vida, pela força e coragem, pelo estímulo e interesse ao estudo, pela vocação para a educação, pela humildade e dedicação, crescimento profissional e, por promover todos esses encontros, me permitindo concluir mais uma etapa importante na vida, com realização e felicidade.

A minha amada Mãe, Rita, e a minha querida Avó, Tereza, nada disso teriam acontecido se não fossem elas, que me ensinaram a respeitar as minhas semelhantes e amar a Deus acima de tudo, me ensinaram a correr atrás do meu sonho e nunca desistir.

Ao meu irmão, Marcos, que eu tanto amo, e a minha companheira, Gercilene, que vivemos muitas coisas juntas, momentos alegres e momentos tristes.

Ao tio Gilberto, e tia Toninha, e não poderia deixar de citar e agradecer a importância de cada um é quase impossível, mas a esperança de que a mensagem de gratidão seja reconhecida, serve de acalento e retribuição à essas contribuições.

Ao Professor Dr. Nielson Ribeiro (*In memoriam*), entusiasta inicial deste trabalho que além dos conhecimentos técnicos, partilhou também momentos de descontração e alegria. Seus ensinamentos jamais serão esquecidos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rui Nelson Otoni Magno, fundamental para o término dessa etapa, bem como todos os funcionários da Faculdade de Engenharia Química da UFPA.

Gostaria de agradecer em especial a Elza Santana, Rafael Nascimento, Paulo, Juliana, e a todos que partilharam desse trabalho acadêmico.

Todos são responsáveis pelo sucesso deste trabalho: Muitíssimo Obrigado!

“Há sempre a escolha entre voltar atrás para a segurança ou seguir em frente para o crescimento. O crescimento deve ser escolhido uma, duas, três e infinitas vezes; o medo deve ser superado uma, duas, três e infinitas vezes...”

(Abraham Maslow)

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGEP/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M. Eng.)

SECAGEM DA FIBRA DO PSEUDOCAULE DA BANANEIRA: AVALIAÇÃO DE MODELOS CINÉTICOS, DIFUSIVIDADE EFETIVA, PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS E CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL

Genardo Queiroz de Oliveira

Novembro/2021

Orientador: Rui Nelson Otoni Magno

Área de Concentração: Engenharia de Processos

O processo de secagem das fibras do pseudocaule da bananeira foi experimentalmente investigado em um secador convectivo de leito fixo vertical (60 75 e 90°C). Nove modelos matemáticos (teórico, semi-teóricos e empíricos) foram utilizados para analisar o comportamento da secagem, a difusividade efetiva da umidade, a energia de ativação e as propriedades termodinâmicas. As fibras secas também foram avaliadas por análises termogravimétrica, espectroscópica e morfológica. O modelo de aproximação da difusão foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais em todas as condições de secagem, pois apresentou maiores coeficientes de determinação ajustado ($r^2_{adj} \geq 0,978$) e menores valores de chi-quadrado ($\chi^2 \leq 2,21 \times 10^{-4}$) e erro quadrático médio (RMSE $\leq 0,0140$). Os coeficientes de difusão efetiva (D_e) aumentaram com o incremento da temperatura, apresentando-se na ordem de $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, e sua dependência com a temperatura foi descrita pela Equação de Arrhenius, cuja energia de ativação foi de 47,61 kJ mol⁻¹. Com a elevação da temperatura, a entalpia diminuiu, enquanto a entropia e a energia livre de Gibbs aumentaram, indicando que a secagem é um processo endergônico e não espontâneo. Bandas de absorção características de constituintes lignocelulósicos foram identificadas (1423, 1327, 1160 cm⁻¹) e a degradação desses contituíntes só ocorreu a temperaturas superiores a 190°C, confirmadas pela análise termogravimétrica. Alterações morfológicas foram observadas nas fibras secas, principalmente a 90°C, o que ocasionou danos irreversíveis a estrutura

da amostra, como consequência das tensões geradas devido ao gradiente de temperatura e umidade durante o processo de secagem.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M. Eng.)

DRYING OF BANANA PSEUDO-STEM FIBERS: EVALUATION OF KINETIC MODELS, EFFECTIVE DIFFUSIVITY, THERMODYNAMIC PROPERTIES, AND STRUCTURAL DESCRIPTION

Genardo Queiroz de Oliveira

November/2021

Advisor: Rui Nelson Otoni Magno

Research Area: Process Engineering

The drying process of banana pseudo-stem fibers was studied, experimentally, in a vertical fixed-bed convective dryer (at 60, 75, and 90 °C). Nine mathematical models (theoretical, semi-theoretical and empirical) were used to analyze the drying behavior and effective diffusivity, activation energy and thermodynamic properties were calculated. Dry fibers were evaluated also by thermogravimetric, spectroscopic, and morphological analyses. Diffusion approximation with adjusted coefficient of determination, $r^2_{adj} \geq 0.978$, reduced chi-square $\chi^2 \leq 2.21 \times 10^{-4}$ and root mean square error $RMSE \leq 0.0140$ was the model that better fitted experimental data. The effective diffusion coefficients (D_e) increased with temperature, reaching the order of $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Its dependence on temperature was described by the Arrhenius Equation and its activation energy was $47.61 \text{ kJ mol}^{-1}$. When temperature increases, enthalpy decreases contrarily to entropy and Gibbs free energy, indicating that drying is an endergonic and non-spontaneous process. Characteristic absorption bands of lignocellulosic components were identified (1423, 1327, 1160 cm^{-1}) and the degradation of this material only occurred at temperatures above 190 °C, as confirmed by thermogravimetric analyses. Morphological changes were observed in dry fibers. These mainly occur at 90 °C and led to an irreversible damage of sample structure. Alterations are caused by the tensile strength generated because of temperature and humidity gradient, produced during the drying process.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 - OBJETIVOS.....	2
1.2.1 - Objetivo geral.....	2
1.2.2 - Objetivos específicos.....	3
1.3 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	3
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1 - SECAGEM.....	5
2.1.1 - Conceitos fundamentais.....	5
2.1.1.1 - Umidade.....	6
2.1.1.2 - Difusividade efetiva da umidade.....	7
2.2 - CINÉTICA DE SECAGEM.....	8
2.3 - SECAGEM EM LEITO FIXO.....	10
2.3.1 - Secagem em camada fina.....	11
2.3.1.1 - Modelos teóricos.....	12
2.3.1.2 - Modelos semi-teóricos.....	13
2.3.1.2.1 - Lewis.....	13
2.3.1.2.2 - Page.....	14
2.3.1.2.3 - Page modificado.....	14
2.3.1.2.4 - Henderson e Pabis.....	14
2.3.1.2.5 - Aproximação da difusão.....	15
2.3.1.2.6 - Midilli.....	15
2.3.1.3 - Modelos empíricos.....	16
2.3.1.3.1 - Wang e Singh.....	16
2.3.1.3.2 - Peleg.....	16
2.4 - TERMODINÂMICA DE SECAGEM.....	16
2.5 - SECAGEM DE FIBRAS VEGETAIS.....	17
2.6 - BANANEIRA.....	21
2.6.1 - Pseudocaule da bananeira.....	23
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1 - PREPARAÇÃO DO MATERIAL DE PARTIDA.....	27

3.2 - SECAGEM.....	27
3.2.1 - Sistema operacional.....	27
3.2.1 - Processo de secagem.....	28
3.2.1 - Análise estatística.....	29
3.3 - DIFUSIVIDADE EFETIVA DA UMIDADE.....	30
3.4 - PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS.....	31
3.5 - CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DAS FIBRAS.....	31
3.5.1 - Análises térmicas (TGA/DSC).....	31
3.5.2 - Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	31
3.5.3 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	32
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1 - CINÉTICA E TAXA DE SECAGEM.....	33
4.2 - MODELAGEM MATEMÁTICA.....	34
4.3 - DIFUSIVIDADE EFETIVA E TERMODINÂMICA.....	39
4.4 - CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL.....	42
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	46
5.1 - CONCLUSÃO.....	46
5.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Curvas típicas de secagem de produtos agroindustriais.....	9
Figura 2.2	Exemplificação da secagem em camada fina.....	11
Figura 2.3	Partes da bananeira.....	22
Figura 3.1	Fluxograma do procedimento experimental.....	26
Figura 3.2	Arranjo experimental do secador de leito fixo.....	27
Figura 4.1	Comportamento cinético (a) e taxa de secagem (b) das fibras do pseudocaule da bananeira.....	33
Figura 4.2	Ajuste do modelo de Aproximação da difusão aos dados cinéticos de secagem.....	36
Figura 4.3	Distribuição de resíduos: 60 °C (a), 75 °C (b) e 90 °C (c).....	37
Figura 4.4	Probabilidade normal dos resíduos: 60 °C (a), 75 °C (b) e 90 °C (c).....	38
Figura 4.5	Relação de Arrhenius entre a difusividade efetiva da umidade e a temperatura de secagem das fibras do pseudocaule da bananeira.....	40
Figura 4.6	TGA e DSC das fibras de pseudocaule da bananeira.....	42
Figura 4.7	Espectros de FTIR de amostras secas em 60, 75 e 90 °C.....	43
Figura 4.8	Microscopia eletrônica de varredura das fibras de pseudocaule de bananeira: 60 °C (A), 60°C (B), 75 °C (C) e 90 °C (D).....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Termodinâmica da secagem em diversos materiais agrícolas.....	17
Tabela 2.2	Classificação de fibras vegetais conforme o tipo de vegetal e sua extração.....	18
Tabela 2.3	Temperatura de secagem em fibras naturais vegetais.....	19
Tabela 3.1	Modelos cinéticos de secagem.....	29
Tabela 4.1	Parâmetros e coeficiente de regressão dos diferentes modelos aplicados à cinética de secagem das fibras do pseudocaule da bananeira.....	35
Tabela 4.2	Estimação dos coeficientes de difusão efetiva nas diferentes temperaturas de secagem.....	39
Tabela 4.3	Variações de entalpia, entropia e energia livre de Gibbs obtidos para difusividade efetiva da umidade.....	41

NOMENCLATURA

ASTM	AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
ATR	REFLETÂNCIA TOTAL ATENUADA
ATP	ADENOSINA TRIFOSFATO
D_e	COEFICIENTE DE DIFUSÃO EFETIVA
DQO	DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO
DR	DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS
DSC	CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL
DTG	TERMOGRAVIMETRIA DERIVADA
EMBRAPA	EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA
FAO	FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS
FTIR	FOURIER TRANSFORM INFRARED
LCP	LABORATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS
LSRP	LABORATÓRIO DE SECAGEM E RECOBRIMENTO DE PARTÍCULAS
MDF	MEDIUM DENSITY FIBERBOARD
MEV	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA
MRC	TEOR DE UMIDADE CRÍTICO
NR	NORMALIDADE DOS RESÍDUOS
PID	PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO
RMSE	ERRO QUADRÁTICO MÉDIO
TGA	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA
UFPA	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
XR	RAZÃO DE UMIDADE
W	TAXA DE SECAGEM

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - MOTIVAÇÃO

A banana (*Musa paradisiaca* L., Musaceae) é nativa da região asiática e cultivada em larga escala nas regiões tropicais e subtropicais do planeta. Hoje, é considerada uma das principais culturas agrícolas mundiais, sendo a quarta colheita de frutas mais difundida no mundo, com produção anual de aproximadamente 116,7 milhões de toneladas (FAO, 2019).

A bananicultura gera uma grande quantidade de resíduos, já que cada pseudocaule produz um cacho de bananas (ANHWANGE *et al.*, 2008). Após a colheita, os pseudocaulos são cortados e geralmente deixados no solo da plantação para serem utilizados como material orgânico ou queimado para geração de energia o que poderia ocasionar em problemas ambientais e perdas econômicas. Estima-se que para cada tonelada de banana produzida são geradas aproximadamente três toneladas de pseudocaule (GONÇALVES FILHO, 2011).

Nos últimos anos, alguns estudos estão sendo reportados na literatura a fim de fornecer uma finalidade industrial ao pseudocaule da bananeira. Em geral, a utilização como matéria-prima para a produção de biocombustível (GUPTA *et al.*, 2019), ração animal (OLIVEIRA *et al.*, 2014), papel (CORDEIRO *et al.*, 2004), bioadsorvente (LIU *et al.*, 2019) e até mesmo na alimentação humana (SHARMA *et al.*, 2017) já foram empregados com sucesso. A aplicação mais comumente utilizada do pseudocaule é para a produção de fibras, reconhecida por sua boa qualidade, elevada resistência à tração, e rigidez (JAYAPRABHA *et al.*, 2011; SRINIVASAN *et al.*, 2014). Contudo, existe uma lacuna de conhecimento sobre o processo de secagem desse material, para a conservação e reutilização do mesmo, uma vez que a superfície do pseudocaule de banana é facilmente submetida ao escurecimento após a colheita, o que afeta a sua utilização e valor econômico dos subprodutos fabricados.

A secagem é uma prática comum no processamento de materiais agrícolas, principalmente para prevenir degradação pós-colheita, restringir o crescimento e deterioração microbiana e reduzir os custos de armazenamento, manuseio e facilidade de transporte. O estudo do processo de secagem em materiais biológicos é uma

operação complexa que envolve informações relativas ao processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o material biológico e o elemento de secagem; esses conhecimentos são primordiais para a elaboração de projeto, operação e simulação de sistemas de secagem e secadores (MUJUMDAR, 2006).

Diversos modelos teóricos ou fenomenológicos são aplicados para descrever a cinética de secagem; essas equações podem ser usadas em simulação, controle e otimização estratégicas para processos (TORKI-HARCHEGANI *et al.*, 2016; PILATTI *et al.*, 2016). Para a descrição dos processos de secagem, é fundamentalmente importante usar uma equação que descreva a taxa de transferência de massa, ou a taxa de secagem. No entanto, considerando todos os mecanismos que funcionam internamente nos materiais agrícolas, normalmente torna-se inviável a solução e, conseqüentemente, a aplicação do modelo (CRUZ *et al.*, 2017). Nesse sentido, o uso de modelos matemáticos empíricos que se utilizam de ajustes de dados experimentais para descrever o comportamento da cinética de secagem tem sido cada vez mais utilizado em diferentes produtos agrícolas. Assim, destacam-se o seu uso na cinética de secagem de casca de banana (KUMAR, 2015), sementes de quinoa (MAQUEDA *et al.*, 2018), sementes de *Jatropha curcas* L. (KENENI; HVOSLEF-EIDE e MARCHETTI, 2019), entre outros.

Considerando-se que são escassos os dados na literatura, o presente trabalho investiga a cinética de secagem das fibras do pseudocaule da bananeira em leito fixo vertical nas temperaturas de 60, 75 e 90 °C. Os modelos matemáticos foram ajustados aos dados experimentais de secagem e a difusividade efetiva da umidade, energia de ativação e propriedades termodinâmicas foram calculadas. Os resultados deste trabalho também contribuem para melhorar a compreensão das propriedades estruturais das fibras após a secagem.

1.2 - OBJETIVOS

1.2.1 - Objetivo geral

Avaliar o processo de secagem em leito fixo convectivo vertical de fibras do pseudocaule da bananeira (*Musa paradisiaca* L., Musaceae) em diferentes temperaturas de processo.

1.2.2 - Objetivos específicos

- Obter e analisar as curvas de cinética e taxa de secagem das fibras do pseudocaule da bananeira;
- Determinar o modelo matemático que melhor represente a cinética de secagem em camada fina das fibras;
- Investigar a difusividade efetiva da umidade, a energia de ativação e as propriedades termodinâmicas do sistema de secagem;
- Compreender as propriedades texturais das fibras após o processo de secagem, através de análise termogravimétrica, espectroscópica e morfológica.

1.3 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente capítulo apresenta a motivação e objetivos que contribuíram para a realização do estudo acerca da secagem de fibras de pseudocaule de bananeira em secador de leito fixo convectivo, indicando as principais contribuições da pesquisa, assim como, a forma de organização desta dissertação.

O Capítulo 2, revisão de literatura, apresenta os fundamentos teóricos de secagem e o processo de secagem em leito fixo, as propriedades intrínsecas da técnica e os modelos cinéticos presentes na literatura. Evidencia a secagem de fibras naturais, expondo os principais trabalhos publicados com foco na secagem da bananeira, a prática da bananicultura e seus rejeitos, e entre outros conceitos relevantes para a pesquisa.

No capítulo 3, materiais e métodos, disserta-se sobre a metodologia utilizada para a construção deste estudo, destacando a coleta e o tratamento da matéria-prima, o processo de secagem em leito fixo por diferentes temperaturas, os tratamentos matemáticos e estatísticos para a análise dos dados, bem como, as análises de caracterização estrutural das fibras após o processo de secagem.

O capítulo 4, resultados e discussão, indicam os resultados alcançados no estudo da secagem de fibras de pseudocaule de bananeira como o ajuste dos dados experimentais aos modelos matemáticos de cinética, a difusividade efetiva da umidade, a energia de ativação, as propriedades termodinâmicas do processo e o melhoramento das condições das fibras à aplicação da secagem.

Capítulo 5 apresenta as conclusões gerais da dissertação e as sugestões para possíveis trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - SECAGEM

A secagem é comumente descrita como o processo térmico de remoção de substâncias voláteis de um produto sólido. É considerada uma operação complexa por agregar diversas operações como: transporte de sólidos e de fluidos, fluxos de calor e de massa, difusão de massa, mecanismos fluidodinâmicos, vaporização, cristalização, dentre outros (FOUST *et al.*, 1982; COOK e DUMONT, 1991; BROOKER *et al.*, 1992; McCABE *et al.*, 1993).

De acordo com MUJUMDAR (2006) quando um sólido úmido é submetido à secagem térmica, dois processos ocorrem simultaneamente:

1. Transferência de energia (principalmente como calor) do ambiente circundante para evaporar a umidade superficial.
2. Transferência de umidade interna para a superfície do sólido e sua subsequente evaporação devido ao processo 1.

No processo 1, a remoção de água a superfície do material como vapor, depende das condições externas de temperatura, umidade e fluxo do ar, área da superfície exposta e pressão. No processo 2, o movimento da umidade dentro do sólido, é uma função da natureza física do sólido, da temperatura e seu conteúdo de umidade. Em uma operação de secagem, qualquer um desses processos pode ser o fator limitante que rege a taxa, embora ambos procedam simultaneamente ao longo do ciclo de secagem.

2.1.1 - Conceitos fundamentais

Os principais mecanismos do processo de secagem são a difusão superficial ou difusão líquida nas superfícies dos poros, difusão líquida ou de vapor devido às diferenças de concentração de umidade e ação capilar em alimentos granulares e porosos por efeito das forças superficiais (STRUMILLO e KUDRA, 1986). Para materiais biológicos, em geral, o mecanismo da difusão é a etapa dominante do processo, sofrendo influência de algumas propriedades termofísicas como o teor de umidade e a difusividade efetiva. Essas propriedades termofísicas são extremamente

necessárias para analisar o processo de secagem de sólidos e podem ser incorporadas em um modelo de secagem ou mesmo utilizadas como parâmetros do processo (FARIA 1998).

2.1.1.1 - Umidade

O teor de umidade é uma das propriedades mais importantes no processo de secagem, e sua quantificação e controle adequados são de extrema importância para a manutenção da qualidade do produto. Além disso, com a conservação de suas propriedades físico-químicas pela diminuição da concentração de água para teores em que não exerça papel biológico, a ação de agentes de deterioração, principalmente microrganismos, é inibida (FARIA, 1998).

A umidade contida em materiais biológicos, pode ser classificada de duas maneiras: umidade livre e umidade ligada. A umidade livre é atribuída à água livre ou presente na superfície externa do alimento, facilmente evaporada e a umidade ligada se refere a umidade adsorvida, encontrada no interior do alimento, sem combinar quimicamente com o mesmo (MUJUMDAR, 2006).

Um dos métodos mais utilizados para a determinação do teor de umidade em alimentos envolve uma estufa que tem, por base, a remoção da água através do aquecimento. O ar quente é absorvido por uma camada muito fina do alimento e é então transportado para o interior, por condução. Dessa forma o teor de umidade poder expresso em base úmida $X_t(bu)$ ou em base seca $X_t(bs)$ conforme as Eqs. (2.1) e (2.2).

$$X_t(bu) = \frac{m(t) - m_{ss}}{m_t} \quad (2.1)$$

$$X_t(bs) = \frac{m(t) - m_{ss}}{m_{ss}} \quad (2.2)$$

Onde:

$m(t)$ = representa a variação média da massa de sólidos durante o processo;

m_t = é a massa total inicial (g);

m_{ss} = é a massa de sólido seco (g), obtida posteriormente por método direto de análise.

Graficando-se os valores experimentais de $X_t(bs)$ contra o tempo obtém-se a curva de secagem e diferenciando-se a curva de secagem, tem-se W a taxa de secagem ($g/cm^2.s$) que exemplifica dX/dt , a variação infinitesimal do teor de umidade pelo tempo (s^{-1}), conforme a Eq. (2.3).

$$W = \frac{X_{t+d_t} - X_t}{d_t} \quad (2.3)$$

2.1.2.2 - Difusividade efetiva da umidade

A difusão em sólidos durante a secagem é um processo complexo que pode envolver difusão molecular, fluxo capilar, fluxo de Knudsen, fluxo hidrodinâmico ou difusão de superfície. Com um conceito de concentração de parâmetros, todos esses fenômenos são combinados em um termo denominado como difusividade efetiva da umidade (D_e) (ERBAY e ICIER, 2010).

CRANK (1979) forneceu soluções analíticas para a equação da difusão de Fick, Eq. (2.4), para várias geometrias durante o período de taxa decrescente com a aplicação de várias condições de contorno. A aplicação dessas condições de contorno depende do método de secagem, condição do processo, dimensões do produto e a geometria utilizada. Da literatura, as geometrias mais utilizadas para a secagem de produtos agroindustriais é a geometria plana, conforme a Eq. (2.5) e esférica, conforme a Eq. (2.6) embora outras geometrias já foram reportadas (ONWUDE *et al.*, 2016).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{AB} \nabla^2 X \quad (2.4)$$

$$X_r = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_e t}{4L^2}\right) \quad (2.5)$$

$$X_r = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{(-n)^2 \pi^2 D_e t}{R^2}\right) \quad (2.6)$$

Em que X_r é a razão de umidade, X_t é o teor de umidade no tempo em base seca, X_e é o teor de umidade de equilíbrio, X_0 é o teor de umidade inicial da amostra em base seca, D_e é a difusividade efetiva da umidade em m^2/s , R é o raio da esfera ou a

dimensão característica assumida, L é a semiespessura da placa (m), n é o número de termos da série (um positivo inteiro) e t é o tempo (s).

Como mencionado, a difusividade efetiva é uma propriedade essencial para esclarecer o mecanismo de secagem de um produto biológico e a temperatura é um dos fatores mais fortes que afetam a D_e . Como consequência, muitos pesquisadores estudaram o efeito da temperatura na D_e (MADAMBÁ *et al.*, 1996; DOYMAZ, 2010) e este efeito pode geralmente ser descrito por uma equação de Arrhenius, conforme a equação a seguir.

$$D_e = D_e^0 \exp\left(-\frac{E}{R_g(T + 273,15)}\right) \quad (2.7)$$

Em que D_e^0 é o valor da difusividade para uma temperatura infinita ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), E é energia de ativação para a difusão de umidade (J mol^{-1}), R_g é a constante universal dos gases, ($8,31451 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e T é a temperatura, ($^{\circ}\text{C}$). Um gráfico de $\ln(D_e)$ em função de $(1/(T + 273,15))$ produzirá uma equação da reta com inclinação e intercepto iguais a $(-E/R_g)$ e a $\ln(D_e^0)$, respectivamente, a partir dos quais os parâmetros E e D_e^0 podem ser estimados.

2.2 - CINÉTICAS DE SECAGEM

As condições de secagem são muito diversas, de acordo com as propriedades do ar de secagem e a forma como se faz o contato ar-produto. Uma vez que o produto é colocado em contato com ar quente, ocorre uma transferência de calor do ar ao produto, sob o efeito da diferença de temperatura existente entre eles. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor d'água existente entre o ar e a superfície do produto determina uma transferência de matéria (massa) para o ar, na forma de vapor de água. Uma parte do calor que chega ao produto é utilizada para vaporizar a água (PARK *et al.*, 2014). A evolução destas transferências simultâneas de calor e de massa no decorrer da secagem faz com que esta seja dividida esquematicamente em três períodos, conforme a Figura 2.1.

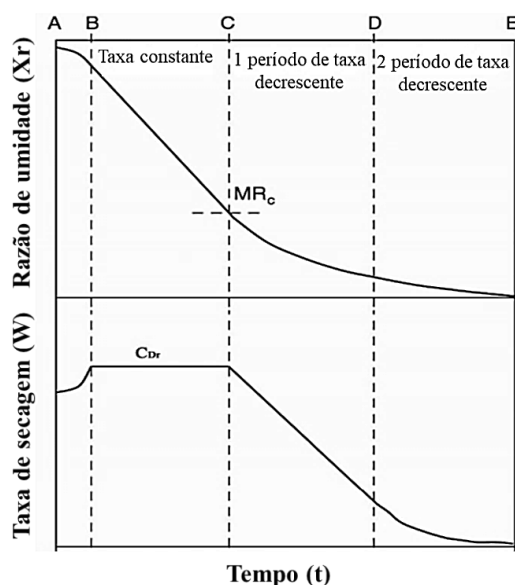


Figura 2.1 - Curvas típicas de secagem de produtos agroindustriais.
 Fonte: Adaptado de CARRIN e CRAPISTE (2009).

O período $A \rightarrow B$ é conhecido como o período de indução ou o período necessário para entrar em regime operacional. No início, o produto é geralmente mais frio do que ar, e a pressão parcial de vapor da água na superfície do produto é fraca, e por consequência, a transferência de massa também. Portanto, a taxa de secagem entre A e B aumenta com o aumento da temperatura do produto até a temperatura da superfície atingir o equilíbrio (correspondendo à linha B para C). A duração deste período é insignificante em relação ao período total de secagem (ERBAY e ICIER, 2010; PARK *et al.*, 2014; ONWUDE *et al.*, 2016).

No período de taxa constante ($B \rightarrow C$), bem como na etapa anterior, a quantidade de água dentro do produto é elevada. Assim, a água evapora-se como água livre. Este período permanece enquanto a migração da água do interior até a superfície do produto seja suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água superficial. Durante esta fase, a forma física do produto é afetada, principalmente a superfície do material. Este período é amplamente controlado por forças capilares e as condições do processo de secagem, como temperatura, velocidade do ar de secagem e umidade relativa, também afetam o sólido. Vale ressaltar que a existência deste período é incomum em materiais biológicos pois as resistências as transferências de massa encontram-se essencialmente no interior do produto, fazendo com que a taxa de evaporação da superfície ao ambiente seja bem superior à taxa de reposição de umidade

do interior à superfície do material (ERBAY e ICIER, 2010; PARK *et al.*, 2014; ONWUDE *et al.*, 2016).

O primeiro período de taxa decrescente (C → D) inicia quando a água começa a ser deficiente na superfície, e o teor de umidade diminuiu para seu teor de umidade crítico (MRc). Alguns autores denominam esse ponto como ponto de inflexão pois é um ponto que depende também das condições operacionais de secagem, não sendo exclusivamente uma propriedade física do material. Conforme a secagem continua, o material experimentará uma mudança do primeiro período de queda para um fenômeno conhecido como o segundo período de taxa decrescente (D → E). De uma forma geral, no primeiro e no segundo período de taxa decrescente, a troca de calor não é mais compensada e, conseqüentemente, a temperatura do produto aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar. Durante todo este período o mecanismo de difusão é o mecanismo de controle dominante do processo de secagem (ERBAY e ICIER, 2010; PARK *et al.*, 2014; ONWUDE *et al.*, 2016).

Diversos trabalhos de secagem em camada fina já foram reportados na literatura, em que o período de taxa decrescente foi o mecanismo dominante do processo. Destacam-se, a secagem de fibras de sisal (CRISPINIANO *et al.*, 2020), folhas de capim-limão (MARTINAZZO *et al.*, 2007), frutos de bacaba (NASCIMENTO *et al.*, 2019) e amendoim (ARAÚJO *et al.*, 2017).

2.3 - SECAGEM EM LEITO FIXO

O leito fixo é um dos sistemas de contato sólido-fluido de concepção mais simples na área de meios porosos e um dos mais utilizados na indústria química, seja como reator de leito catalítico, como adsorvedor, trocador de calor e secador, principalmente de produtos agrícolas, motivo pelo qual vários trabalhos enfocando esse tipo de secador são comumente encontrados no âmbito da engenharia agrícola (FARIA, 1998).

A secagem em leito fixo é um processo no qual as partículas permanecem fixas no secador, e o gás de secagem percola o leito transferindo o calor para a fase sólida e retirando água, mantendo no interior da camada de sólidos gradientes de umidade e temperatura desprezíveis (ALVES, 2015). Possuem diversas vantagens por serem de configurações simples, resultando num baixo custo de implantação e são muito versáteis pois podem ser utilizados para a secagem de diversos produtos agroindustriais. Em

geral, a secagem em leito fixo pode ser realizada de duas maneiras: em leito espesso ou em camada fina (delgada).

Na secagem em camada espessa, o gradiente de temperatura ao longo do leito de sólidos, varia bastante, considerando-se assim um processo no qual a temperatura sofre influência do tempo e da posição. Enquanto na camada fina, o gradiente de temperatura é reduzido, sofrendo influencia somente do tempo e não da posição (CHIRIFE, 1983). Segundo ONWUDE *et al.* (2016) na maioria dos estudos de secagem de produtos agroindustriais o conceito de camada fina é utilizado, o que significa que o tamanho do material é reduzido para dimensões que permitirão distribuição uniforme do ar de secagem e da temperatura ao longo do material.

2.3.1 - Secagem em camada fina

Uma camada fina é uma camada de material totalmente exposta a uma corrente de ar durante a secagem. A espessura da camada deve ser uniforme e não deve exceder 3 camadas de partículas. Presume-se que a distribuição da temperatura de um material de camada fina é uniforme (ONWUDE *et al.*, 2016)

O conceito de camada fina pode ser aplicado a duas situações: (1) um único material ou uma camada do material exposta livremente ao ar de secagem e (2) uma multicamada de diferentes espessuras, desde que temperatura e a umidade relativa do ar de secagem estejam na mesma condição termodinâmica em qualquer momento do processo (ERBAY e ICIER, 2010). A Figura 2.2 exemplifica o processo de secagem em camada fina, onde a velocidade do ar (V_a) e a umidade relativa são consideradas constantes.

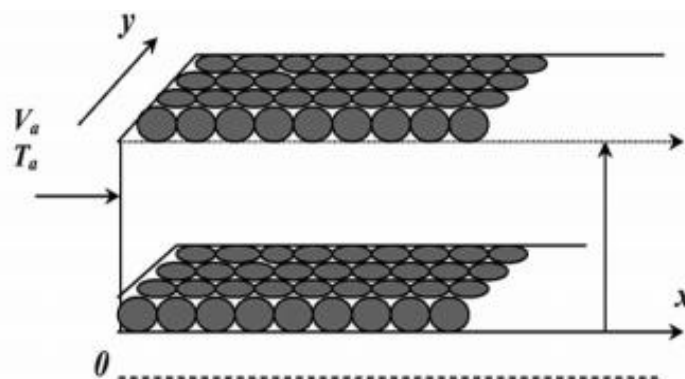


Figura 2.2 - Exemplificação da secagem em camada fina.
Fonte: Adaptado de MABROUK *et al.* (2012).

O estudo do sistema de secagem em produtos agroindustriais é uma operação complexa que envolve informações relativas ao processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o material biológico e o elemento de secagem; esses conhecimentos são primordiais para a elaboração de projeto, operação e simulação de sistemas de secagem e secadores (MUJUMDAR, 2006). Para a descrição do processo, é fundamentalmente importante utilizar um modelo matemático que descreva a taxa de transferência de massa, ou a taxa de secagem; essas equações podem ser usadas em simulação, controle e otimização estratégica de processo (TORKI-HARCHEGANI *et al.*, 2016; PILATTI *et al.*, 2016).

Os principais modelos cinéticos utilizados na secagem de materiais agrícolas podem ser classificados em três grupos, com base em suas vantagens e desvantagens comparativas e o método de derivação. São eles: teóricos, semi-teóricos e empíricos. De uma forma geral, os modelos semi-teóricos e empíricos são os mais aplicados, pois, fornecem resultados mais precisos, apresentam uma melhor previsão de comportamento do processo de secagem e fazem menos suposições devido a sua dependência de dados experimentais (ONWUDE *et al.*, 2016). Entretanto, eles são válidos apenas nas condições de secagem aplicadas e fornecem informações limitadas sobre a transferência de calor e massa durante o processo de secagem. Por outro lado, os modelos teóricos fazem muitas suposições que levam a um número considerável de erros (HENDERSON 1974; BRUCE 1985), limitando assim sua utilização para o desenvolvimento de secadores.

2.3.1.1 - Modelos teóricos

Os modelos teóricos consideram tanto a resistência à transferência de umidade externa quanto a interna. Eles envolvem a geometria, a difusividade de massa e a condutividade do material (CIHAN e ECE, 2001). Assim, as resistências podem ser estimadas a partir de equações que descrevem a transferência de massa. Dessa maneira, segundo KUCUK *et al.* (2014) a solução da segunda lei da difusão, como descrita na Eq. (2.6), assumindo uma geometria esférica, é amplamente aplicada como um modelo teórico na secagem em camada delgada de produtos agroindustriais.

$$X_r = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{(-n)^2 \pi^2 D_e t}{R^2}\right) \quad (2.6)$$

2.3.1.2 - Modelos semi-teóricos

Os modelos semi-teórico, em geral, são derivados da segunda lei da difusão de FICK ou da lei de resfriamento de Newton. Por exemplo, os modelos de LEWIS, PAGE e PAGE modificado são modelos semi-teóricos derivados da lei de resfriamento de Newton, enquanto os modelos de HENDERSON e PABIS, MIDILLI e Aproximação da difusão, são baseados na segunda lei da difusão de FICK. Existem na literatura científica mais de quinze modelos semi-teóricos capazes de descrever a cinética de secagem de produtos agrícolas. Entretanto, os seis mais utilizados, estão descritos a seguir.

2.3.1.2.1 - Lewis

Este modelo é análogo à lei de resfriamento de Newton, então muitos pesquisadores nomearam este modelo como o modelo de Newton. Primeiro, LEWIS (1921) sugeriu que durante a secagem de materiais higroscópicos porosos, a mudança de teor de umidade do material no período de taxa decrescente é proporcional a diferença instantânea entre o teor de umidade e o teor de umidade de equilíbrio. Portanto, este conceito pressupõe que o material é fino o suficiente, ou a velocidade do ar é alta, e as condições de secagem do ar, como a temperatura e a umidade relativa é mantida constante. Eqs. (2.8) e (2.9) mostram, respectivamente, a forma linear e não linear do modelo.

$$\frac{dX}{dt} = -k(X_t - X_e) \quad (2.8)$$

$$X_r = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-kt) \quad (2.9)$$

Em que k é a constante de secagem em (s^{-1}) e nos estudos em camada delgada é a combinação de algumas propriedades de transportes como difusividade da umidade, condutividade térmica e coeficiente de transferência de calor e massa (MUJUMDAR, 2006).

2.3.1.2.2 - Page

O modelo de Page (PAGE, 1949), também conhecido como Lewis modificado, surgiu devido a necessidade de minimizar os erros associados ao modelo de Newton, através da adição de uma constante empírica adimensional (n). O modelo é bi-paramétrico, conforme apresenta a Eq. (2.10).

$$X_r = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-kt^n) \quad (2.10)$$

2.3.1.2.3 - Page modificado

OVERHULTS *et al.* (1973) modificaram o modelo de Page para descrever a secagem da soja. Esta forma modificada é geralmente conhecida como modelo de Page modificado, conforme apresenta a Eq. (2.11).

$$X_r = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-kt)^n \quad (2.11)$$

2.3.1.2.4 - Henderson e Pabis

HENDERSON e PABIS (1961) aprimoraram um modelo para secagem utilizando a segunda lei de difusão de FICK. Para tempos de secagem suficientemente longos, somente o primeiro termo da série ($n = 1$) da Eq. (2.6) pode ser utilizado, assumindo poucos erros, resumindo-se a Eq. (2.12).

$$X_r = A_1 \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_e t}{A_2}\right) \quad (2.12)$$

Sendo D_e a constante durante a secagem, então, a Eq. (2.12) pode ser reorganizada utilizando a constante de secagem k (s^{-1}), conforme a Eq. (2.13). Em que a (adm.) é a constante do modelo de Henderson e Pabis e um indicativo da geometria do material. Ambas as constantes, a e k , são obtidas através de ajustes de dados experimentais.

$$X_r = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = a \exp(-kt) \quad (2.13)$$

2.3.1.2.5 - Aproximação da difusão

HENDERSON (1974) propôs usar os dois primeiros termos da série da solução analítica da segunda lei da difusão de FICK (Eq. 2.14) para corrigir as deficiências do modelo de Henderson e Pabis. Com este argumento, o novo modelo ficou conhecido como modelo de dois termos, onde a e b são indicativos da geometria do material e conhecidas como constante do modelo (adimensionais) e k_1 e k_2 são as constantes de secagem (s^{-1}).

$$X_r = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t) \quad (2.14)$$

SHARAF-ELDEEN *et al.* (1980) modificaram o modelo de dois termos reduzindo o número de constantes e organizando a constante geométrica b do segundo termo exponencial. Eles enfatizaram que a constante b do modelo de dois termos deve ser igual a $(1 - a)$ em $t = 0$ para obter $X_r = 1$. Assim, a Eq. (2.14) resume-se a Eq. (2.15), sendo conhecida como exponencial de dois termos.

$$X_r = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat) \quad (2.15)$$

KASEEM (1998) propôs um novo rearranjo ao segundo termo exponencial da Eq. (2.16) e o modelo ficou conhecido como Aproximação da difusão onde b é uma constante empírica adimensional, como mostra a Eq. (2.16).

$$X_r = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt) \quad (2.16)$$

2.3.1.2.6 - Midilli

MIDILLI, KUCUK e YAPAR (2002) propuseram um modelo que é uma adaptação ao de HENDERSON e PABIS, com a adição de um termo linear (Eq. 2.17). Esse modelo tri-paramétrico também é conhecido como modelo de Midilli-Kucuk. A

constante adimensional a é um indicativo da geometria do material, k é a constante e secagem (s^{-1}) e b é uma constante empírica (s^{-1}).

$$X_r = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = a \exp(-kt) + bt \quad (2.17)$$

2.3.1.3 - Modelos empíricos

2.3.1.3.1 - Wang e Singh

O modelo (Eq. 2.18) foi desenvolvido para interpretar a secagem intermitente de arroz (WANG e SINGH, 1978) e apresentou um bom ajuste aos dados experimentais. Entretanto, por ser um modelo empírico, não possui nenhuma interpretação física ou teórica. As constantes empíricas a (s^{-1}) e b (s^{-2}) são obtidas através de dados experimentais.

$$X_r = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = 1 + at + bt^2 \quad (2.18)$$

2.3.1.3.2 - Peleg

Este modelo (PELEG, 1988) não tem significado físico ou interpretação teórica. No entanto, ele foi aplicado com sucesso apenas na descrição do comportamento de secagem da banana. Calculado pela Eq. 2.19, em que a (s) b (adimensional) são constantes empíricas obtidas através de dados experimentais.

$$X_r = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = 1 - t/(a + bt) \quad (2.19)$$

2.4 - TERMODINÂMICA DE SECAGEM

O conhecimento das propriedades termodinâmicas nos processos de secagem de produtos agrícolas é uma fonte de informação importante para projetar equipamentos de secagem, calcular a energia requerida neste processo, estudar as propriedades da água adsorvida e avaliar a microestrutura dos alimentos bem como o estudo dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos produtos agrícolas (AGUERRE *et al.*, 1986)

A determinação da energia livre de Gibbs, entalpia e entropia, é a chave para entender a quantidade de calor absorvido ou liberado, a energia fornecida pelo sistema e a aleatoriedade na interface sólido-líquido quando ocorre a secagem (CORRÊA *et al.*, 2017). Segundo CORRÊA *et al.* (2012), a forma mais usual para calcular as variações na energia livre de Gibbs (ΔG), entalpia (ΔH) e entropia (ΔS) no processo de secagem, é aplicando as Eqs. (2.20), (2.21) e (2.22) obtidas através do método descrito por JIDEANI e MPOTOKWANA (2009) e SÁNCHEZ *et al.* (1992).

$$\Delta H = E - R_g(T + 273,15) \quad (2.20)$$

$$\Delta S = R_g \left[\ln(D_e^0) - \ln\left(\frac{k_B}{h_p}\right) - \ln(T + 273,15) \right] \quad (2.21)$$

$$\Delta G = \Delta H - \Delta S(T + 273,15) \quad (2.22)$$

Nas quais ΔH e ΔG são expressas em J/mol e ΔS em J/mol.K, o parâmetro k_B é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$) e h_p a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$). A Tabela 2.1 sumariza diversos trabalhos de secagem de produtos agrícolas onde os parâmetros termodinâmicos foram calculados através das Eqs. (2.20), (2.21) e (2.22) a fim de facilitar o entendimento do processo.

Tabela 2.1 - Termodinâmica da secagem em diversos materiais agrícolas.

Material	Autor
Café	CORRÊA <i>et al.</i> (2010)
Morango	OLIVEIRA <i>et al.</i> (2015)
Casca de jabuticaba	COSTA <i>et al.</i> (2016)
Acuri	SANTOS <i>et al.</i> (2019)
Quiabo	DOS SANTOS (2021)
Farinha de Amêndoa	ALVES <i>et al.</i> (2021)

2.5 - SECAGEM DE FIBRAS VEGETAIS

As fibras naturais vegetais ou fibras lignocelulósicas são compostas principalmente de celulose interligada por uma rede de moléculas de hemicelulose

permeada por pectinas, complementada em suas paredes por lignina, a qual oferece firmeza e rigidez estrutural ao conjunto das microfibras celulósicas; e em menor proporção as fibras também são constituídas por compostos extrativos e minerais (FENGEL e WEGENER, 1989; MORAIS *et al.*, 1994; FERREIRA *et al.*, 2009). Estas fibras podem ser classificadas de acordo com sua origem anatômica e extração, como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Classificação de fibras vegetais conforme o tipo de vegetal e sua extração.

Classificação	Segmento de extração	Exemplo
Fibra de caule	Interior da casca do caule	Juta, linho, bananeira, buritizeiro, açazeiro, cânhamo, rami, algodoeiro
Fibra de folhas	Comprimento das folhas	Sisal, piaçava, bananeira, abacaxi, curauá, buritizeiro
Fibra de frutos	Epicarpo, mesocarpo, endocarpo	Coco, açaí, abacá, <i>luffa cylindrica</i>
Fibra de sementes	Semente da planta	algodão, flor-de-cera, sumaúma
Fibra de gramíneas	Hastes de plantas monocotiledôneas	Bambu, trigo, aveia, cevada, milho, cana-de-açúcar
Fibra de madeiras	Xilema dos vegetais (angiospermas e gimnospermas)	Eucalipto, pinus, abetos
Fibra de raiz	Raiz do vegetal	Mandioca, zacatão

Fonte: Adaptado de MOSSARI (1994), YOUNG (1997), FARUK *et al.* (2012), HO *et al.* (2012).

O emprego destas fibras é vantajoso devido sua biodegradabilidade, por ser proveniente de fontes renováveis em abundância, ter baixo custo, maior rigidez, baixa densidade, boa resistência mecânica e menor consumo de energia depreendido na sua produção em relação às fibras sintéticas e entres outras (NABI SAHEB e JOG, 1999; GIACOMINI, 2003; THOMAS *et al.*, 2011). Sendo a absorção de umidade uma das principais desvantagens, a utilização do método de secagem pode promover a remoção da umidade do sólido, deste modo, a sua aplicação torna-se imprescindível para o

reaproveitamento do material orgânico, conservação de suas propriedades e aumento da sua vida útil (KEEY, 1980; MUJUMDAR, 2006).

Envolvendo concomitantemente a transferência de calor e massa, diversas técnicas de secagem podem ser aplicadas as fibras naturais, como: secagem a vácuo, evaporação, troca de solvente, secagem em leito fluidizado, secagem por pulverização (*spray dryer*), liofilização, extração usando fluidos em estado supercrítico ou a combinação de dois ou mais métodos (PENG *et al.*, 2012; DÉLÉRIS e WALLECAN, 2017). A escolha da metodologia depende estritamente da finalidade do material vegetal e da determinação da umidade final a ser obtida, aliada a segurança microbiológica e a viabilidade econômica de implantação (MUJUMDAR, 2006; SRIKIATDEN e ROBERTS, 2007).

BENAMOUN e LI (2018) explicaram que para o processo de secagem ser aplicado, independentemente do modo escolhido, é fundamental avaliar o comportamento do material através do estudo das curvas e cinética de secagem, e posteriormente, realizar a modelagem matemática das mesmas para descrever a variação do teor de umidade durante o procedimento e obter os parâmetros norteadores para a eficiência do sistema.

A Tabela 2.3 mostra as temperaturas utilizadas para secagem de algumas fibras vegetais, observando gradativamente o avanço científico do estudo da taxa de secagem, mecanismos e coeficiente de difusão dos resíduos agrícolas em função da complexidade do processo. A definição da melhor técnica para o estudo do comportamento e tempo de secagem nesses artigos considera o tipo de amostra, em seguida, o pré-tratamento utilizado e os parâmetros de secagem, como: temperatura, velocidade do ar, camada de espessura do material, umidade relativa, estrutura e área da superfície da fibra vegetal. A análise estatística aplicada engloba o coeficiente de determinação, chi-quadrado, erro percentual médio relativo, erro quadrático médio e entre outros critérios de avaliação para obter ajuste satisfatório dos modelos de secagem.

Tabela 2.3 - Temperatura de secagem em fibras naturais vegetais.

Fonte da fibra	Temperatura de secagem (° C)	Autor
Cânhamo	13,7 e 28,7	LIU e CHEN (2000)
Algodão	50, 60 e 70	SOUSA <i>et al.</i> (2004)
Cânhamo	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40	BRUCE <i>et al.</i> (2005)
Linho	30, 50, 70 e 100	GHAZANFARI <i>et al.</i> (2006a, 2006b)

Algodão	50, 60 e 70	SOUSA <i>et al.</i> (2006)
Coco	100	FERNANDES <i>et al.</i> (2008)
Abacaxi	50, 60 e 70	WAUGHON e PENA (2008)
Cana-de-açúcar	50 e 60	GOYALDE <i>et al.</i> (2009)
Linho	40, 60 e 80	NAIR <i>et al.</i> (2011)
Abacaxi	17,19, 29,57	TENORIO e MOYA (2012)
Mandioca	52,9 e 67,1	CASTIGLIONI <i>et al.</i> (2013)
Cana-de-açúcar	60, 70, 80, 90 e 100	GRAEBIN (2014)
Açaí	80, 100 e 120	BARBOSA NETO <i>et al.</i> (2015)
Abacaxi	55 e 70	LOPES e PEREIRA (2015)
Bambu	40	VETTER <i>et al.</i> (2015)
Algodão	50, 60 e 70	CANEDA (2016)
Coco	100, 120, 140, 160, 180, 200, 220 e 240	FERNANDO e AMARASINGHE (2016)
Açaí	36	FLORES <i>et al.</i> (2016)
Sisal	60, 80 e 105	DOS SANTOS <i>et al.</i> (2017)
Bambu	100	MOURA, VALENTINA e VIEIRA (2018)
Coco	30, 45 e 60	SANTOS (2018)
Coco	50, 60, 70 e 80	JONGYINGCHAROEN <i>et al.</i> , (2019)
Pseudocaule da bananeira	50, 60 e 70	LIEBL <i>et al.</i> (2019)
Sisal	60 e 80	CRISPINIANO <i>et al.</i> (2020)
Sisal	50, 60, 70, 80 e 90	DINIZ <i>et al.</i> (2020a; 2020b)
Cânhamo	40	VISCUSI <i>et al.</i> , (2021)
Pseudocaule da bananeira	60, 75 e 90	Este trabalho

As maiorias dos trabalhos supracitados analisaram a perda termogravimétrica das fibras, deste modo, as temperaturas indicadas na Tabela 2.3 demonstram o cuidado dos autores para que não ocorresse a degradação de hemicelulose, celulose, lignina e outras substâncias com o aumento térmico de secagem. Evidenciando que as temperaturas estudadas não modificaram substancialmente as propriedades mecânicas da fibra, nas quais o objetivo principal foi a remoção de água e obtenção da menor porcentagem de umidade e, conseqüentemente, a otimização do tempo e do processo de secagem.

Infere-se que a remoção da umidade pode ser proporcional ao volume da amostra, ou seja, a espessura do material influencia na produtividade da secagem, assim

como, a temperatura avaliada, o teor de umidade inicial, as características físico-químicas dos materiais e a velocidade do fluxo de ar quente (JONGYINGCHAROEN *et al.*, 2019; DINIZ *et al.*; 2020b). E que o aumento da taxa de secagem ocorre com a elevação da temperatura e com a menor umidade relativa do ar, reduzindo o tempo do processo. No entanto, ressalta-se que em alguns casos a maior temperatura analisada não mostrou os melhores resultados na produtividade do processo, causando o aumento desnecessário no consumo de energia (FERNANDO e AMARASINGHE; 2016; LIEBL *et al.*, 2019). Ratificando a importância do estudo da secagem para a eficiência do processo e menor dispêndio econômico.

Em síntese, o estudo de secagem em fibras é majoritariamente aplicado nas fibras de algodão, sisal, coco, linho e abacaxi em razão da maior aplicabilidade em indústria têxtil e compósitos estruturais, corroborando que a análise do comportamento cinético de secagem do pseudocaule da bananeira, neste trabalho, é indispensável para avaliação das propriedades e conservação das fibras para posterior aplicação.

2.6 - BANANEIRA

A banana (*Musa paradisiaca* L), pertencente à família Musaceae, de origem asiática e cultivada nas regiões tropicais e subtropicais do planeta, possuindo cerca de 1000 tipos de espécies. Sua produção anual é aproximadamente 116,7 milhões de toneladas, das quais 44% correspondem a Índia, China, Indonésia e Brasil, estabelecendo-se como a quarta atividade agrícola frutífera mundial (FAO, 2019).

No Brasil, a bananicultura é favorecida pelas ótimas condições climatológicas durante o ano todo, ocupando o segundo lugar em área colhida, com produção anual de 6,9 milhões de toneladas e intenso mercado interno, uma vez que a banana é alimentação básica, com consumo per capita em torno de 25 kg/ano (GASPAROTTO, 2012; FAO, 2019). A região norte representa 13,11% da produção nacional e o estado do Pará concentra 45,74% dessa produção, constituindo uma das atividades de maior relevância para o agronegócio local (IBGE, 2021). As espécies mais cultivadas no Brasil são a banana Nanica (banana-d'água) de sabor mais adocicado e levemente laxante; a banana da Terra com maior quantidade de vitaminas A e C; a banana Ouro de polpa doce e perfumada; a banana Maçã com casca amarelo-clara e formato mais arredondado; e a banana Prata de polpa consistente e pouco doce, tendo como vantagem sua maior durabilidade após colheita (BORGES *et al.*, 2004).

A banana é elemento importante na alimentação de populações pelo alto valor nutritivo, e principalmente, pelo baixo custo. Atualmente, tem sido muito utilizada na alimentação de atletas, por seu alto teor nutricional, contendo, além de açúcares, vitaminas A e o complexo B, potássio elevado, baixo sódio e nenhum colesterol (TACO, 2011). Além das aplicações alimentares, partes da bananeira são utilizadas como matéria-prima na indústria de celulose e papel, de biocombustível, de aromatizantes, como ração animal, fertilizantes orgânicos, medicamentos, na indústria têxtil e como reforço estrutural em materiais compósitos (SILVA, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2014; PADAM *et al.*, 2014; GUPTA *et al.*, 2019).

A bananeira é uma planta herbácea completa, com porte de 2,0-8,0 metros, com raízes fibrosas e superficiais, com caule subterrâneo (rizoma), e ao longo do solo formam-se bainhas foliares com camadas sucessivas e sobrepostas que originam um falso tronco ou pseudocaule. No prolongamento das bainhas foliares encontram-se as folhas e o cachos da fruta, composto pelo engaço, ráquis, pencas de bananas e o botão floral (coração central) (BORGES *et al.*, 2004), como mostra Figura 2.3.

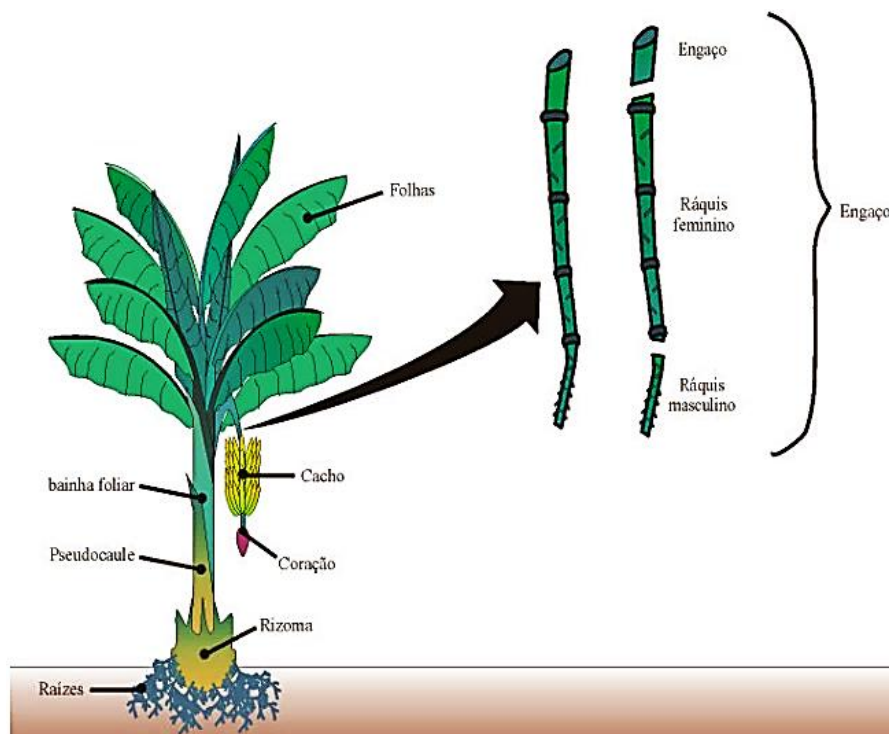


Figura 2.3 - Partes da bananeira.
Fonte: SOFFNER (2001).

Enfatiza-se que a bananicultura produz expressiva quantidade de resíduos, pois o cacho origina frutos uma única vez, por isso, após a colheita os pseudocaulos são

cortados e geralmente depositados na plantação para sua biodegradação ou utilizados para geração de energia por combustão, o que pode resultar em problemas ambientais e inúmeras perdas econômicas (ANHWANGE *et al.*, 2008; RODRIGUES *et al.*, 2011). Segundo GONÇALVES FILHO (2011), estima-se que a quantidade de pseudocaule despejado é aproximadamente três vezes a de banana produzida, corroborando o pseudocaule da bananeira como principal resíduo da bananicultura.

Desta forma, a busca por uma finalidade industrial ao pseudocaule da bananeira vem sendo amplamente avaliada como matéria-prima para os mais diversos fins (SUBAGYO e CHAFIDZ, 2018; ELLENBERGER *et al.*, 2020; BALDA *et al.*, 2021), tendo sua aplicação mais difundida na produção de fibras, sendo esta reconhecida por sua qualidade, elevada resistência à tração, rigidez, alta durabilidade e baixo custo (SILVA, 2011; BINDU e BEENA, 2015; PAPPU *et al.*, 2015; GUPTA *et al.*, 2021).

2.6.1 - Pseudocaule da bananeira

O pseudocaule da bananeira é uma estirpe que fornece e transporta nutrientes do solo para os frutos, além da alta absorção e liberação de umidade, o pseudocaule dispõe em sua composição química celulose, hemicelulose e lignina, e dependendo da espécie e das condições agroclimáticas, possui baixo teor de proteínas, amido e inorgânicos (BILBA *et al.*, 2007; GUIMARÃES *et al.*, 2009; LI *et al.*, 2010; JAYAPRABRA *et al.*, 2011). A extração das fibras pode ser realizada por diferentes métodos: manual, mecânico, químico e/ou biológico, os quais influenciam na qualidade e quantidade da mesma, instituindo assim fibras naturais com boas propriedades químicas e físico-mecânicas em relação às sintéticas (BALDA *et al.*, 2021; SAXENA e CHAWLA, 2021).

As fibras da bananeira, tratadas ou não com aditivos químicos, podem ser utilizadas como reforço em compósitos híbridos e poliméricos, que incluem borrachas, cerâmicas e estruturas da construção civil, oferecendo um aumento nas propriedades mecânicas das matrizes em estudo. Evidencia-se que com o aumento volumétrico das fibras obtém-se maior resistência à tração, compressão e flexão, assim como, seus respectivos módulos de elasticidade, além de superior taxa de deformação e estabilidade (KULKARNI *et al.*, 1983; POTHAN *et al.*, 2007; KIRAN *et al.*, 2007; IDICULA *et al.*, 2010; CADENA *et al.*, 2017; ELBEHIRY *et al.*, 2020; SURESH *et al.*, 2021).

Devido sua alta capacidade de fiação, estas fibras são mais maleáveis a manipulação, recebem integralmente pigmentos e apresentam notável brilho após o tingimento. À vista disso, o uso do pseudocaule da bananeira para fins têxteis é bastante viável, podendo ser utilizado em produtos do setor de moda e de decoração. Logo, a utilização destas fibras da bananeira possibilita uma produção têxtil sustentável, com menor impacto ambiental e significativo valor econômico (MOHAPATRA *et al.*, 2010; LUNA e JUSTO, 2016; ORTEGA *et al.*, 2016).

Como fertilizante orgânico, PHIRKE *et al.* (2001) utilizou as fibras do pseudocaule da bananeira em mistura de compostagem, ela melhorou a capacidade de retenção de água e a nutrição do solo, reduzindo o consumo fertilizantes químicos na plantação e, conseqüentemente, a degradação do solo. Após cominuição e secagem, o resíduo agrícola também apresentou teores de minerais mais elevados em substratos para cultivo de samambaias, quando comparado a compostos com a mesma finalidade (PACHECO *et al.*, 2010).

Sendo uma biomassa abundante, investiga-se a aplicação das fibras do pseudocaule como biossorvente e carvão ativado no processo de adsorção de corantes sintéticos (HARIS e SATHASIVAM, 2009; AKBAR *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2021), metais pesados (NOELINE *et al.*, 2005; LIMA, 2013; BAGALI *et al.*, 2017; MARICHELVAM e AZHAGURAJAN, 2018) e contaminantes emergentes (GURAV *et al.*, 2020; CHAKHTOUNA *et al.*, 2021) contidos em águas residuais, do mesmo modo, na remoção de cor e DQO de lixiviado de aterro (GHANI *et al.*, 2017). Nos quais, verificou-se que a maceração, a ativação química e a pirólise das fibras tendem a promover abertura dos poros proporcionando uma melhor adsorção do fluido.

O pseudocaule da bananeira, por diferentes metodologias, também pode ser utilizado para geração de bioenergia, processando-o principalmente em bioetanol e biometano (GONÇALVES FILHO, 2011; SOUZA *et al.*, 2014; AMADI; IFEANACHO, 2016; BHUSHAN *et al.*, 2019; LIEBL *et al.*, 2019). Como substrato da fermentação alcoólica, segundo GUPTA *et al.* (2019), esta fibra é uma fonte renovável para a produção significativa de etanol, quando incorporado a subprodutos industriais (licor de maceração, extrato de levedura). Estudos indicam a obtenção etanol por hidrólise e destilação das fibras lignocelulósicas, requerendo pesquisas que aprimorem o desempenho do processo para aplicação em escala industrial (VELÁSQUEZ-ARREDONDO *et al.*, 2010).

Outro uso das fibras da bananeira é para a produção de pasta celulósica e papel, em função da potencial fonte de fibras lignocelulósicas e alto teor de mucilagem. Pesquisas demonstram a produção de folhas de papel com rugosidade, necessitando de uma depuração mais criteriosa e menor classificação em peneiras. Contudo, estas fibras podem ser utilizadas para produção de papel manteiga, cartão, sacolas e embalagens (KAROLIA e MALHAN, 2005; KHAN *et al.*, 2014; PIMENTEL *et al.*, 2018). Dessa maneira, quando combinada com outras pastas celulósicas, obtém-se um aumento de índice de ruptura, tração e resistência à brasão, ao óleo e água (GOSWAMI *et al.*, 2005; JACOB e PREMA, 2008; RAMDHONEE e JEETAH, 2017).

SARAVANAN e ARADHYA (2011) isolaram compostos com propriedades nutracêuticas destas fibras, que podem ser comercializados na indústria farmacêutica. Neste contexto, SINGH *et al.* (2007) mostraram o aumento significativo do nível de glicose no sangue após administração de suco oriundo da seiva das fibras pseudocaule da bananeira.

Alguns estudos indicam o pseudocaule como uma fonte de nutrientes alimentícios, rico em fibras dietéticas e macronutrientes para produção de farinhas com excelentes benefícios à saúde (HO *et al.*, 2015; BALDA *et al.*, 2021). Assim como, para a produção de ração, o qual demonstrou ganho de peso em ruminantes, devido ao alto ATP (adenosina trifosfato) e baixo teor de partição (AMARNATH e BALAKRISHNAN, 2007; MARIE-MAGDELEINE *et al.*, 2009), acompanhado de suplementação de proteína bruta (SILVEIRA JÚNIOR, 2018).

Por fim, comprova-se que a fibra natural do pseudocaule da bananeira é amplamente utilizada em diversos processos industriais, devido sua biodegradabilidade, ótimas propriedades químicas e físico-mecânicas. Em decorrência, como na maioria dos resíduos da indústria agrícola, a umidade presente no pseudocaule pode afetar a conservação, a armazenagem adequada e sua reutilização, sendo necessária a aplicação do processo secagem, em alguns casos, como pré-tratamento. Logo, o estudo da secagem e modelagem matemática neste material é fundamental para avaliar suas propriedades e as condições térmicas para não as modificar, assim como, implementar uma melhor operação e simulação de sistemas e equipamentos industriais voltados ao tratamento das fibras naturais do pseudocaule, uma vez que ainda são escassos os estudos de secagem dessas fibras disponíveis na literatura.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo aborda-se o procedimento experimental utilizado para o estudo do processo de secagem das fibras do pseudocaule da bananeira (*Musa paradisiaca* L., Musaceae) em secador convectivo de leito fixo vertical. A Figura 3.1 apresenta as etapas da metodologia realizada, desde a aquisição da matéria-prima até as análises de caracterização estrutural das fibras após a secagem.

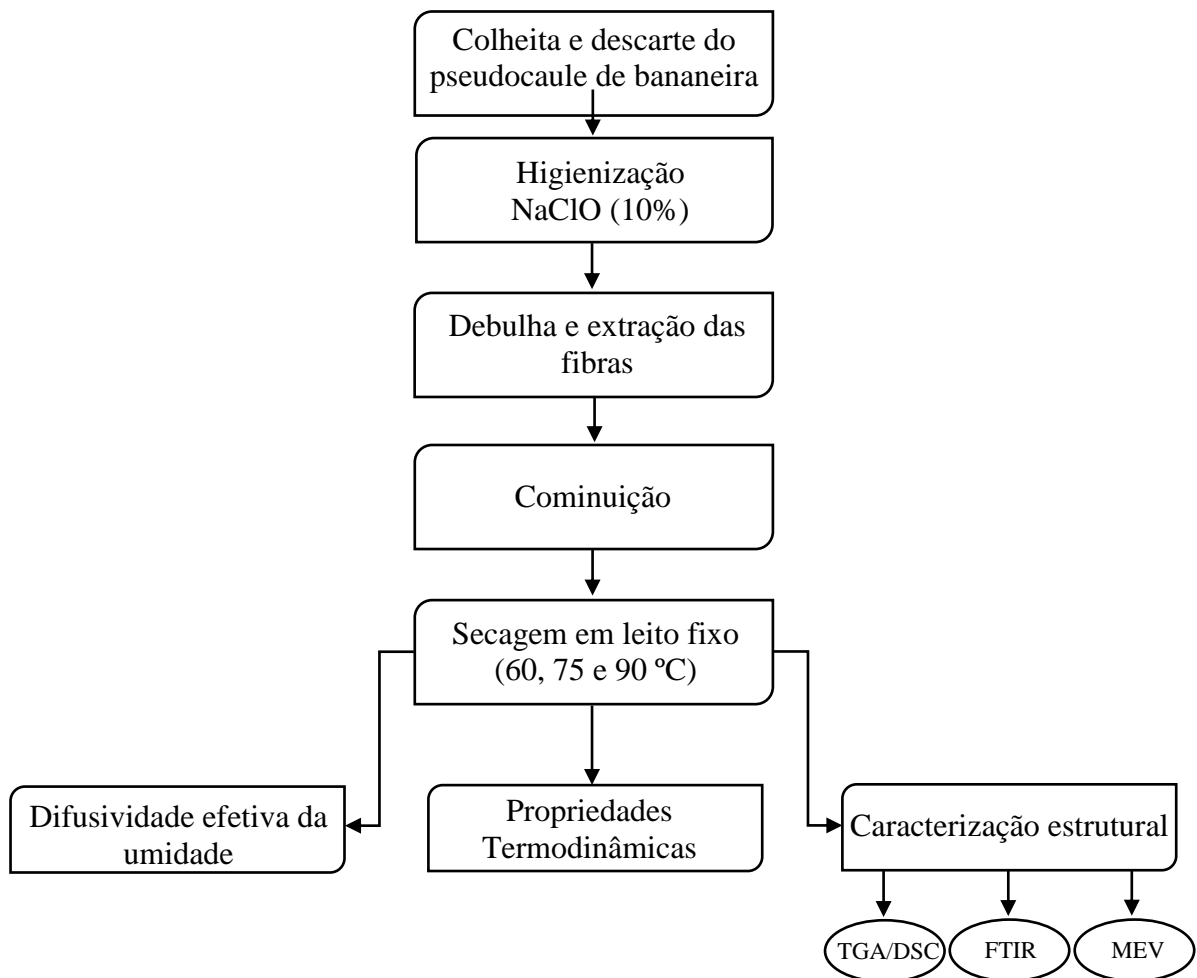


Figura 3.1 - Fluxograma do procedimento experimental.

Os ensaios experimentais foram desenvolvidos no Laboratório de Secagem e Recobrimento de Partículas (LSRP) e no Laboratório de Caracterização de Partículas (LCP), ambos localizados na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará (UFPA).

3.1 - PREPARAÇÃO DO MATERIAL DE PARTIDA

O pseudocaule da bananeira (*Musa paradisiaca* L., Musaceae) foi obtido após colheita e retirada dos seus cachos, fornecido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Amazônia Oriental (EMBRAPA), sediada em Belém, no estado do Pará. Após o recebimento, as amostras foram selecionadas e lavadas com água corrente para remoção de sujidades orgânicas, sanitizadas com hipoclorito de sódio (NaClO) a 10% e, por fim, lavadas com água destilada. Em seguida, as fibras foram extraídas manualmente na forma de tiras, cominuída em moinho de facas, armazenadas em recipientes plásticos e expostas à refrigeração de aproximadamente 3 °C.

3.2 - SECAGEM

3.2.1 - Sistema operacional

As fibras foram submetidas a ensaios de secagem em secador convectivo de leito fixo de fluxo vertical, desenvolvido por FARIA e ROCHA (2000).

- 1 - Controle de velocidade do soprador
- 2 - Soprado centrífugo
- 3 - Controlador de potência
- 4 - Par de resistências de 2 kW
- 5 - Par de resistências de 1 kW
- 6 - Tubo de Pitot
- 7 - Micromanômetro
- 8 - Distribuidor de ar
- 9 - Câmara pelnum
- 10 - Medidor de temperatura do ar de entrada
- 11 - Medidor de temperatura do ar de saída
- 12 - Psicrômetro (Ts e Tu à entrada)
- 13 - Psicrômetro (Ts e Tu à saída)
- 14 - Bomba de vácuo
- 15 - Exaustor
- 16 - Balança eletrônica de precisão
- 17 - Camada de fibras
- 18 - Cesto (leito)
- 19 - Corpo do leito secador
- 20 - Termômetro de máxima e mínima
- 21 - Termohigrômetro
- 22 - Telas difusoras de ar
- 23 - Unidade básica de secagem
- 24 - Seção de acoplamento ao leito
- 25 - Anteparo
- Fluxo de ar

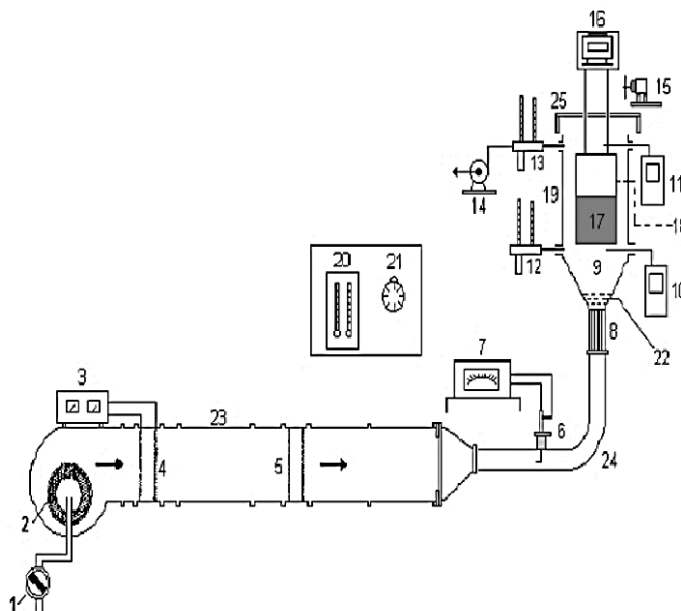


Figura 3.2 - Arranjo experimental do secador de leito fixo.

Fonte: Adaptado de FARIA e ROCHA (2000).

O equipamento consiste de um duto de 25,4 cm de seção quadrada, contendo um soprador centrífugo [2] com controle de velocidade [1] e dois pares de resistência

elétricas de 2 kW [4] e 1kW [5] cada, responsáveis pelo aquecimento do ar, sendo controlado por um sistema PID [3]. Integrado a esta unidade, encontra-se um cesto cilíndrico telado [18], em aço inoxidável com diâmetro interno de 12,5 cm e altura de 25,5 cm, no qual são depositadas as fibras do pseudocaule de bananeira [17]. Este cesto fica suspenso no interior do corpo cilíndrico de vidro [19] conectado a uma balança eletrônica [16], modelo LIBROR EB-620S, através da qual se obtém o decréscimo da massa do material continuamente.

3.2.2 - Processo de secagem

Após higienização e seleção, parte das fibras (~3 g) foi destinada à determinação do teor de umidade. Adotou-se o método gravimétrico padronizado recomendado pela ASTM D2494-13, mantendo o material em estufa de circulação forçada de ar, modelo Quimis Q314M222, a 105 °C por 24 horas. Ao final deste processo obteve-se a massa de sólido seco.

Os ensaios de secagem em leito fixo convectivo foram conduzidos nas temperaturas de 60, 75 e 90 °C, com vazão constante de 0,086 kg.s⁻¹, utilizando uma massa inicial de 150 g de fibras, previamente descongeladas e pesadas em temperatura ambiente, formando uma camada de aproximadamente 5 mm de espessura no cesto. A perda de massa foi acompanhada em intervalos regulares de 5 min, no tempo total de 400 minutos até que o teor de umidade atingisse a umidade de equilíbrio. Todos os ensaios foram realizados em triplicata e o valor médio foi utilizado na análise de secagem.

O cálculo de razão de umidade (X_r) do produto, durante as condições experimentais, foi estimado pela Eq. (3.1), obtido por meio da umidade total em base seca (X_t), estimada pela Eq. (2.2) e multiplicada por 100, para, por fim, determinar as curvas de taxas de secagem (W), calculada pela Eq. (2.3).

$$X_r = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3.1)$$

Nas quais, X_r é a razão de umidade, X_t é o teor de umidade no tempo em base seca (%), X_e é o teor de umidade de equilíbrio (%) que pode ser assumido como zero (KHAN *et al.*, 2017), X_0 é o teor de umidade inicial da amostra em base seca (%).

Os dados obtidos experimentalmente foram ajustados aos modelos matemáticos teóricos, semi-teóricos e empíricos, tradicionalmente utilizados para prever o fenômeno da secagem de produtos agrícolas (RADÜNZ *et al.*, 2010; MEZIANE, 2011; ONWUDE *et al.*, 2016), dispostos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Modelos cinéticos de secagem.

Modelo Teórico		
Fick (1)	$X_r = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{(-n)^2 \pi^2 D_e t}{R^2}\right)$	(2.6)
Modelos Semi-Teóricos		
Lewis (2)	$X_r = \exp(-kt)$	(2.9)
Page (3)	$X_r = \exp(-kt^n)$	(2.10)
Page Modificado (4)	$X_r = \exp(-kt)^n$	(2.11)
Henderson e Pabis (5)	$X_r = a \exp(-kt)$	(2.13)
Aproximação da Difusão (6)	$X_r = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	(2.16)
MIDILLI <i>et al.</i> (7)	$X_r = a \exp(-kt^n) + b.t$	(2.17)
Modelos Empíricos		
Wang and Singh (8)	$X_r = 1 + at + bt^2$	(2.18)
Peleg (9)	$X_r = 1 - \frac{t}{(a + bt)}$	(2.19)

3.2.3 - Análise estatística

Os ajustes dos modelos cinéticos de secagem aos dados experimentais foram realizados utilizando uma estimativa não linear, através do método dos mínimos quadrados, com auxílio do software *Statistica*® 13.0. A escolha do modelo mais adequado foi realizada com base no coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajus}), qui-quadrado (χ^2), o erro quadrado médio (RMSE) e análise dos gráficos da distribuição dos resíduos (aleatório ou tendencioso) (MENKOV, 2000; KUCUK *et al.*, 2014; MONTGOMERY, 2017). Os valores de R^2 , R^2_{ajus} , χ^2 e RMSE foram calculados segundo as Eqs. (3.2), (3.3), (3.4) e (3.5), respectivamente.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_i^N (X_{r,i,exp} - \bar{X}_{r,i,exp})^2 - \sum_i^N (X_{r,i,exp} - \bar{X}_{r,i,pred})^2}{\sum_i^N (X_{r,i,exp} - \bar{X}_{r,i,exp})^2} \right] \quad (3.2)$$

$$R_{ajus}^2 = 1 - (1 - R^2) \left(\frac{N - 1}{df - 1} \right) \quad (3.3)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[\frac{(X_{r,i,exp.} - X_{r,i,pred.})^2}{X_{r,i,pred}} \right] \quad (3.4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{r,exp,i} - X_{r,pred,i})^2} \quad (3.5)$$

Em que N corresponde ao número de observações experimentais, $X_{r,i,exp}$ o valor experimental e $\bar{X}_{r,i,exp}$ a média dos valores obtidos experimentalmente, $X_{r,i,pred}$ o valor predito pelo modelo, $\bar{X}_{r,i,pred}$ é a média dos valores preditos e df os graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros). Ressalta-se que o ajuste do modelo é melhor se o R^2 e R_{ajus}^2 estiverem mais próximos da unidade e se χ^2 e RMSE apresentarem valores mais próximos de zero (ZHAO *et al.*, 2017).

3.3 - DIFUSIVIDADE EFETIVA DA UMIDADE

A difusividade efetiva da umidade das fibras do pseudocaule da bananeira, para as diferentes condições de secagem (60, 75 e 90 °C), foi calculada pela Eq. (2.6), baseada na teoria da difusão líquida. Esta equação é a solução analítica para a segunda Lei de FICK, considerando-se a forma geométrica esférica do produto e com aproximação de oito termos (n = número da série).

A difusividade efetiva da umidade [D_e , ($m^2 s^{-1}$)] foi estimada substituindo os valores de tempo de secagem [t , (s)] juntamente com o raio médio das fibras [R , (m)] para cada teor de umidade correspondente, em diferentes condições de secagem. O diâmetro foi medido utilizando um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. Realizou-se cerca de 100 medições e o valor médio encontrado foi de 0,4531 m.

Para avaliar a influência da temperatura no coeficiente de difusão efetivo utilizou-se a equação de ARRHENIUS (Eq. 2.7). Os parâmetros E e D_e^0 foram estimados pela inclinação ($-E/R_g$) e intercessão $\ln(D_e^0)$ da equação da reta, produzida pelo gráfico de $\ln(D_e)$ em função de $(1/(T + 273,15))$.

3.4 - PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

As propriedades termodinâmicas de entalpia, entropia e energia livre de Gibbs associadas ao processo de secagem de fibras do pseudocaulo em leito fixo convectivo foram determinadas pelo método clássico, utilizando a constante universal dos gases, segundo as Eqs. (2.20), (2.21) e (2.22).

3.5 - CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DAS FIBRAS

A caracterização das fibras do pseudocaulo de bananeira, após o processo de secagem em distintas condições, foi realizada nos Laboratório de Pós-Graduação em Física-Pesquisa e Laboratório de Microscopia (PRODERNA/ITEC), localizados na Universidade Federal do Pará (UFPA).

3.5.1 - Análises térmicas (TGA/DSC)

As amostras foram submetidas a análises térmicas (TGA e DSC) em equipamento modelo TA SDT Q600 (TA Instruments, New Castle, USA). A faixa de temperatura foi acrescida de 22 °C até 970 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹. Utilizou-se aproximadamente 10 mg das fibras durante a análise sob atmosfera de nitrogênio.

3.5.2 - Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de infravermelho das fibras foram obtidos utilizando um espectrômetro de infravermelho com transformada de Fourier da marca Thermo Scientific, modelo Nicolet iS50 FTIR. As regiões espectrais analisadas foram de 4000-400 cm⁻¹, com média de 64 varreduras e resolução de 6 cm⁻¹. A análise foi realizada por

refletância total atenuada (ATR), empregando o módulo ATR iS50 com cristal de diamante com aquisição dos dados através do software OMNIC.

3.5.3 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microestrutura das fibras do pseudocaule da bananeira pós-secagem foi investigada pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo TM3030 Plus Hitachi. As amostras foram metalizadas com Au/Pd para permitir condutividade elétrica necessária no processo de formação das imagens, com ampliação e profundidade focal de imagem de 120x até 600x.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - CINÉTICA E TAXA DE SECAGEM

As curvas de cinética de secagem e taxa de secagem, obtidas experimentalmente nas temperaturas de 60, 75 e 90 °C, estão apresentadas na Figura 4.1. Com o prolongamento do tempo de secagem, a razão de umidade diminuiu devido à remoção gradual da umidade nas fibras (Figura 4.1a). O teor de umidade inicial do material de partida foi de $27,74 \pm 0,25\%$, b.s, e, portanto, reduções para valores de 2,82, 0,14 e 0,16% de umidade foram quantificadas para as respectivas temperaturas de 60, 75 e 90 °C. Para efeito de comparação os teores de umidade estão dentro do padrão estabelecido pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) para diferentes fibras têxteis comerciais, como flax (8,75% b.s), rami (7,6% b.s) and natural cotton yarn (7,0% b.s) (ASTM 1909).

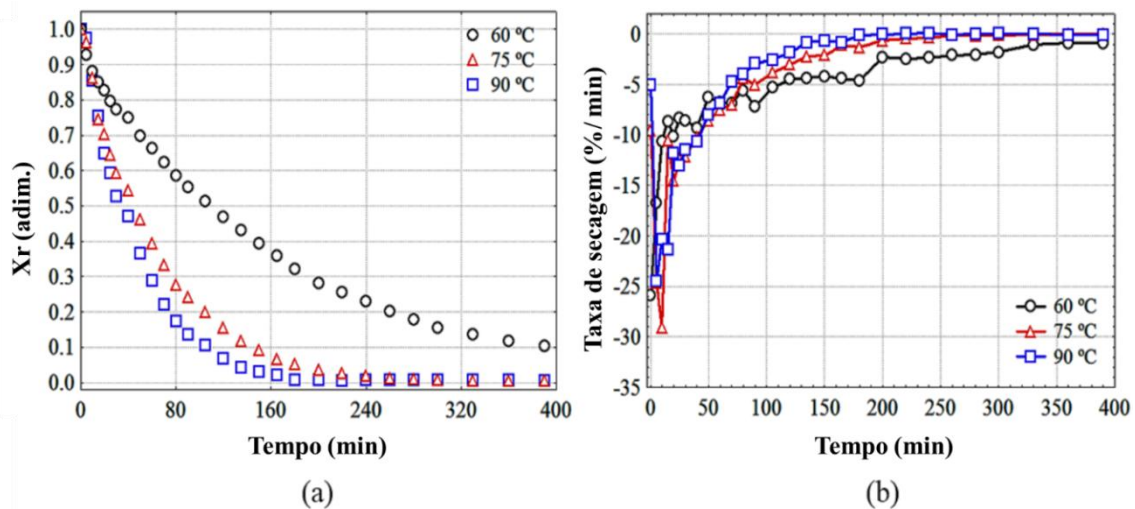


Figura 4.1 - Comportamento cinético (a) e taxa de secagem (b) das fibras do pseudocaule da bananeira.

As fibras submetidas a secagem a 60 °C não atingiram a umidade de equilíbrio e as amostras secas a 75 e 90 °C não apresentaram variações nos valores de umidade após 280 e 180 minutos, respectivamente. Isso se deve às altas taxas de transferência de calor, obtidas nessas condições (75 e 90 °C) que propiciaram a força motriz necessária e suficiente para se estabelecer diferenças positivas de pressão parcial de vapor d'água

entre a umidade contida na superfície do material e a umidade do ar que o envolve, o que torna possível altas taxas de transferência de massa, conforme preconizam os textos clássicos sobre secagem de sólidos (STRUMILLO e KUDRA, 1986; MUJUMDAR, 2006). Este mesmo comportamento foi observado nos estudos de CRISPINIANO *et al.* (2020) para a secagem de fibras de sisal, onde a temperatura mais elevada, proporcionou uma secagem mais eficiente.

A taxa de secagem aumentou simultaneamente com a temperatura ao longo de todo o processo (Figura 4.1b). Altas taxas iniciais (25 a 30%) foram observadas para os primeiros 15 minutos, indicando uma rápida evaporação da umidade livre presente nas fibras. Após esse período, inicia-se o processo de remoção da “umidade ligada”, que segundo ZHOU *et al.* (2018) é influenciado pelo fenômeno da difusão. Nessa etapa uma grande demanda de energia é necessária para remoção da umidade interna devido a resistências estruturais inerentes a textura da fibra que limitam a velocidade do processo de difusão.

Verificou-se que o processo de secagem ocorreu principalmente no período de taxa decrescente, acentuando que a difusão de umidade foi o fator determinante (KASHANINEJAD *et al.*, 2007) para decidir o comportamento de secagem da fibra do pseudocaulo da bananeira. Esse período é quase sempre o único observado para a secagem de produtos agrícolas e alimentícios (PARK *et al.*, 2014) pois é caracterizado pela maior resistência a transferência de água no interior do material, o que torna a taxa de evaporação superficial, superior à taxa de reposição de água (migração) na superfície (STRUMILLO e KUDRA, 1986). Nos estudos de secagem de fibras de sisal e de MDF, realizados por CRISPINIANO *et al.* (2020) e FRITZELL *et al.* (2009) os resultados foram similares, pois o período de taxa decrescente foi predominante, indicando que a difusão é o mecanismo físico que rege o movimento da umidade no material.

4.2 - MODELAGEM MATEMÁTICA

Os ajustes dos modelos cinéticos (teórico, semi-teórico e empírico), estão apresentados na Tabela 4.1, a partir de ajustes não lineares. A maioria dos modelos apresentaram R^2 e $R^2_{ajus} > 0,99$, exceto o modelo Fick (1), Lewis (2), Wang e Singh (8) e Peleg (9).

Tabela 4.1 - Parâmetros e coeficiente de regressão dos diferentes modelos aplicados à cinética de secagem das fibras do pseudocaule da bananeira.

Nº	Parâmetros do modelo	R ²	R ² _{ajus}	χ ² (×10 ⁻⁴)	RMSE	DR	NR
60 °C							
1	$a = 0,0033$	0,9408	0,9385	44,81	0,0657	T	N
2	$k = 0,0064$	0,9901	0,9896	7,85	0,0275	A	S
3	$k = 0,0120; n = 0,8737$	0,9970	0,9967	2,48	0,0152	A	S
4	$k = -0,0771; n = -0,8737; a = 0,9465$	0,9978	0,9976	1,83	0,0128	A	S
5	$k = 0,0059; a = 0,9465$	0,9978	0,9977	1,76	0,0128	A	S
6	$k = 0,2544; a = 0,0693; b = 0,0228$	0,9996	0,9996	0,31	0,0052	A	S
7	$k = 0,0108; n = 0,8769; a = 0,9735; b = -0,0001$	0,9986	0,9983	1,25	0,0104	A	S
8	$a = -0,0054; b = 8,0E-6$	0,9759	0,9740	19,6	0,0427	T	N
9	$a = 125,2499; b = 0,7831$	0,9955	0,9952	3,64	0,0184	T	N
75 °C							
1	$a = 0,0091$	0,9461	0,9440	57,22	0,0742	T	N
2	$k = 0,0160$	0,9978	0,9977	2,32	0,0150	A	N
3	$k = 0,0018; n = 0,9755$	0,9980	0,9978	2,24	0,0144	A	S
4	$k = 0,0160; n = 1,0000, a = 0,9962$	0,9978	0,9976	2,49	0,0149	A	S
5	$k = 0,0160; a = 0,9962$	0,9978	0,9977	2,39	0,0149	A	S
6	$k = 0,0824; a = 0,0347; b = 0,1875$	0,9981	0,9978	2,21	0,0140	A	S
7	$k = 0,0198; n = 0,9511; a = 1,0117; b = -1,7E-5$	0,9981	0,9977	2,30	0,0140	A	S
H	$a = -0,0087; b = 1,7E-5$	0,8861	0,8769	125,7	0,1081	T	N
9	$a = 137,5367; b = 0,8302$	0,9920	0,9913	8,87	0,0287	T	N
90 °C							
1	$a = 0,0119$	0,9322	0,9296	73,64	0,0843	T	N
2	$k = 0,0208$	0,9960	0,9959	4,30	0,0204	A	N
3	$k = 0,0145; n = 1,0917$	0,9976	0,9974	2,73	0,0159	A	S
4	$k = 0,0218; n = 1,0000; a = 1,0410$	0,9975	0,9972	2,88	0,0160	A	S
5	$k = 0,0218; a = 1,0410$	0,9975	0,9973	2,77	0,0160	A	S
6	$k = 1,3993; a = -0,0679; b = 0,0161$	0,9985	0,9983	1,77	0,0126	A	S
7	$k = 0,0170; n = 1,0594; a = 1,0231; b = 1,1E-5$	0,9979	0,9975	2,57	0,0148	A	S
8	$a = -0,0096; b = 2,0E-5$	0,8041	0,7884	221,1	0,1432	T	N
9	$a = 224,2783; b = 0,8480$	0,9781	0,9764	24,70	0,0479	T	N

R²: Coeficiente de determinação; R²_{adj}: Coeficiente de determinação ajustado; χ²: Chi-quadrado; RMSE: Raiz quadrada do erro quadrado médio; DR: Distribuição dos resíduos; A: Aleatória; T: Tendenciosa; NR: Normalidade dos resíduos; S: Sim e N: Não.

O modelo de Aproximação da Difusão (6), foi o que melhor apresentou os valores de R² (> 0,9981), R²_{ajus} (> 0,9978), χ² (< 2,21) e RMSE (< 0,0140) para as temperaturas de 60, 75 e 90 °C, portanto foi o mais indicado para prever os dados de cinética de secagem (Figura 4.2).

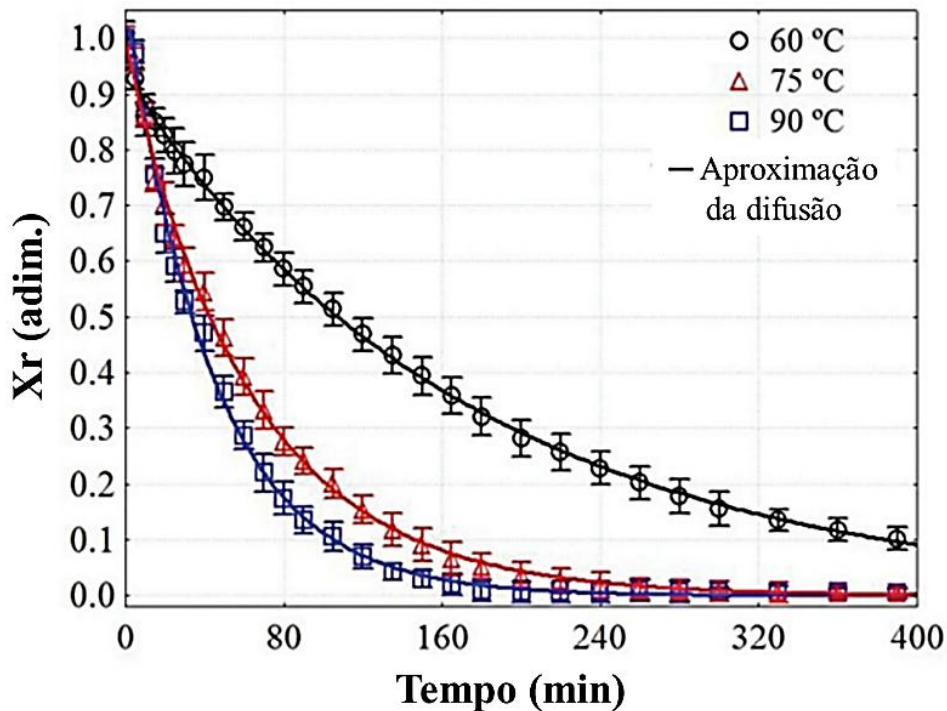
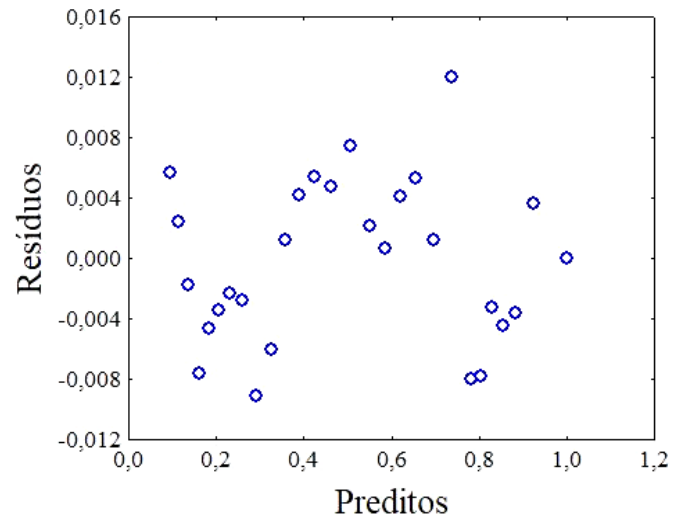
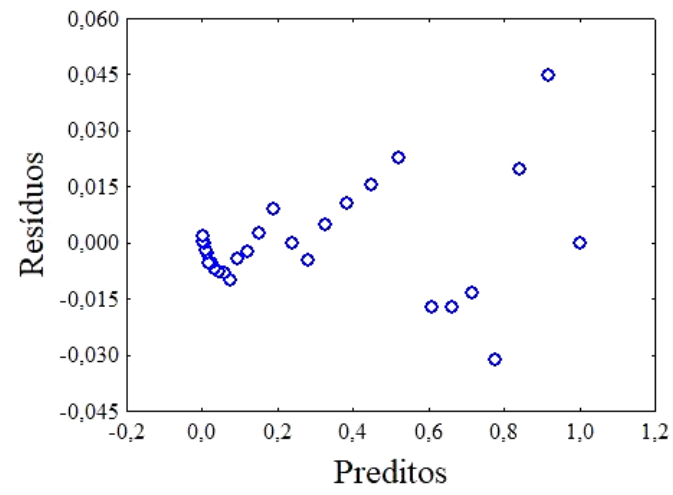


Figura 4.2 - Ajuste do modelo de Aproximação da difusão aos dados cinéticos de secagem.

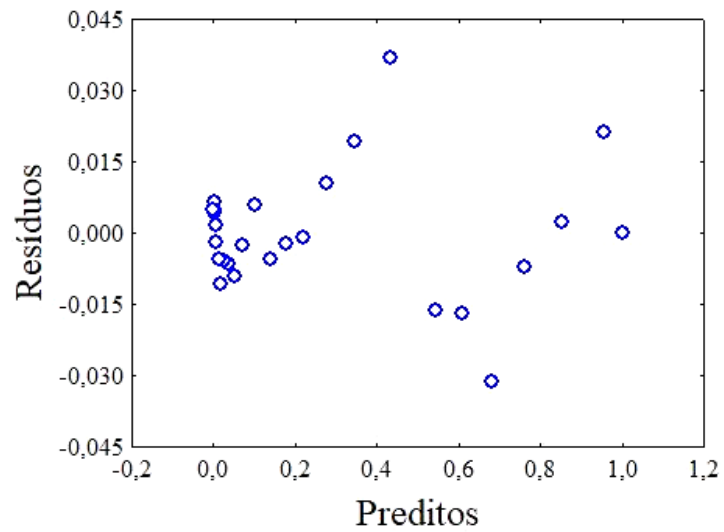
Os pressupostos estatísticos da independência e normalidade dos resíduos foi satisfeita, conforme apresentam as Figuras 4.3 e 4.4. Na Figura 4.3, os resíduos apresentam-se dispersos em torno do zero, sem um padrão definido, ou seja, apresentam uma distribuição aleatória, mostrando claramente que os mesmos não sofrem influência de nenhuma variável; e na Figura 4.4 os pontos estão bem aderidos em torno da reta, seguindo assim uma distribuição normal. A obediência a esses pressupostos da estatística não paramétrica, permite ter uma maior confiabilidade com relação ao ajuste do modelo de Aproximação da Difusão aos dados experimentais, indicando que é o mais adequado para a descrição da cinética de secagem de fibras de pseudocaulo da bananeira, nas temperaturas estudadas.



(a)

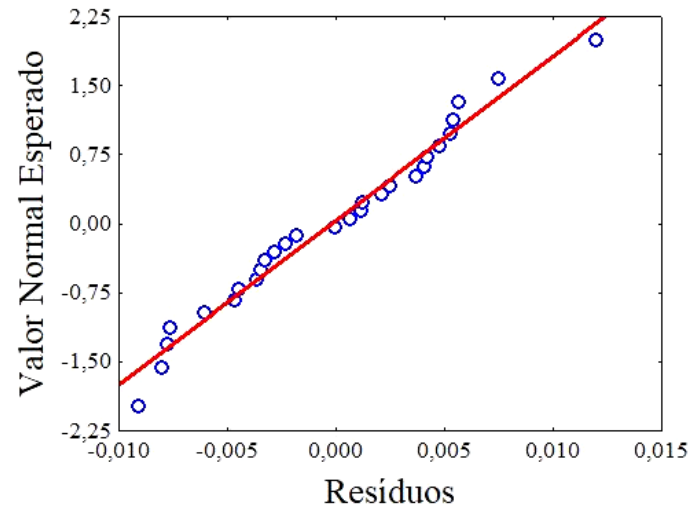


(b)

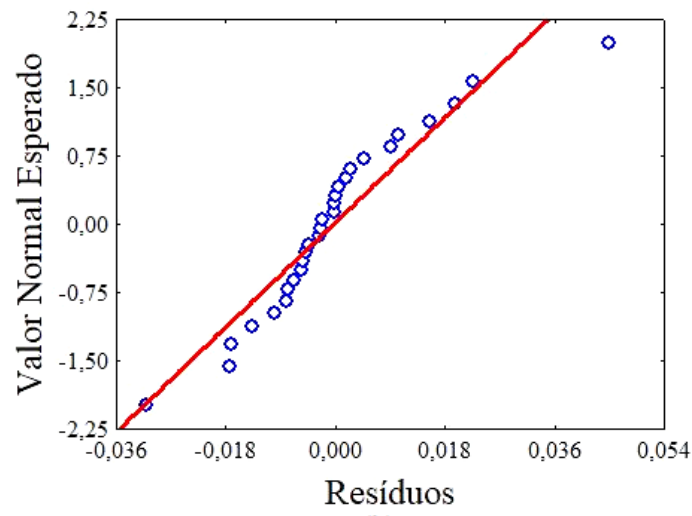


(c)

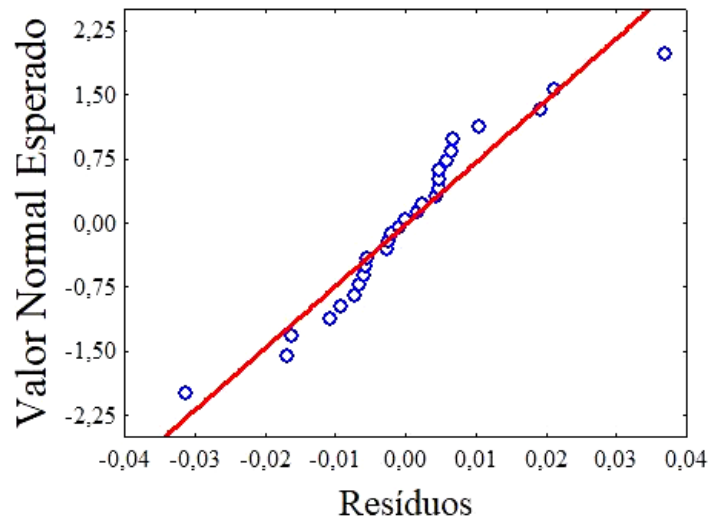
Figura 4.3 - Distribuição de resíduos: 60 °C (a), 75 °C (b) e 90 °C (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.4 - Probabilidade normal dos resíduos: 60 °C (a), 75 °C (b) e 90 °C (c).

O modelo de aproximação da difusão, derivado do modelo de dois termos, é descrito por três coeficientes específicos, nomeadamente, a , b e k . Os parâmetros a e b são termos empíricos de ajuste (em geral não influenciados por condições externas) e a constante de secagem k (min^{-1}), (normalmente influenciada pela temperatura) combina as principais propriedades de transportes na cinética de secagem de sólidos (MUJUMDAR, 2006). Entretanto, em 60 °C, devido à ineficiência em alcançar o segundo estágio da taxa de secagem decrescente (período controlado em grande parte pelo mecanismo de transferência de massa), o valor de k foi elevado em relação a 75 °C (ver Tabela 4.1), pois basicamente estimou somente o primeiro período de secagem, onde a remoção de água é mais rápida, pois é controlada pelos mecanismos de transferência de calor e massa simultaneamente.

4.3 - DIFUSIVIDADE EFETIVA E TERMODINÂMICA

Na Tabela 4.2, são apresentados os valores médios de difusividade efetiva, obtidos durante a secagem das fibras do pseudocaule, para diferentes condições de temperatura do ar, considerando-se o diâmetro de 0,4531 mm.

Tabela 4.2 - Estimação dos coeficientes de difusão efetiva nas diferentes temperaturas de secagem.

Temperatura (°C)	D_e (m^2/s)	R^2
60	$2,417 \times 10^{-7}$	0,8837
75	$7,271 \times 10^{-7}$	0,9083
90	$9,595 \times 10^{-7}$	0,8941

Observou-se na Tabela 4.2 um aumento dos valores de D_e com a elevação da temperatura do ar de secagem. Esse comportamento está em conformidade com os achados de SANTOS *et al.*, (2019) e KUMAR *et al.* (2012) para produtos agroindustriais como bacuri, bagaço de cenoura, dentre outros. Quando há um incremento na temperatura, a viscosidade da água diminui, ocasionando menor resistência do fluido ao escoamento. Isto implica em alterações na difusão da água nos capilares das fibras, de modo a favorecer a movimentação deste fluido no material. Outro fator atenuante que pode ser acrescentado à interpretação deste comportamento é o efeito da agitação térmica que contribui para o aumento da velocidade do processo de

difusão. Dessa maneira, o gradiente de água entre a amostra e o ar de secagem é elevado, promovendo um aumento da difusividade efetiva da umidade (OLANIPEKUN *et al.*, 2015).

Diferenças nos resultados de D_e obtidas para fibras do pseudocaule da bananeira em relação às fibras mais utilizadas comercialmente como as de sisal ($1,17 \times 10^{-10}$), linho ($2,00 \times 10^{-10}$) e juta ($4,02 \times 10^{-10}$), reportados por CÉLINO *et al.* (2013), podem ser explicadas pela divergência da espessura, composição, característica estrutural, modelo difusivo proposto, além da especificidade de cada material, (DOYMAZ, 2013).

A Figura 4.5 exemplifica a relação de $\ln(D_e)$ com o inverso do valor absoluto da temperatura apresentando uma relação do tipo Arrhenius, cuja influência da temperatura no coeficiente de difusão efetivo das fibras é exemplificada pela Eq. (4.1).

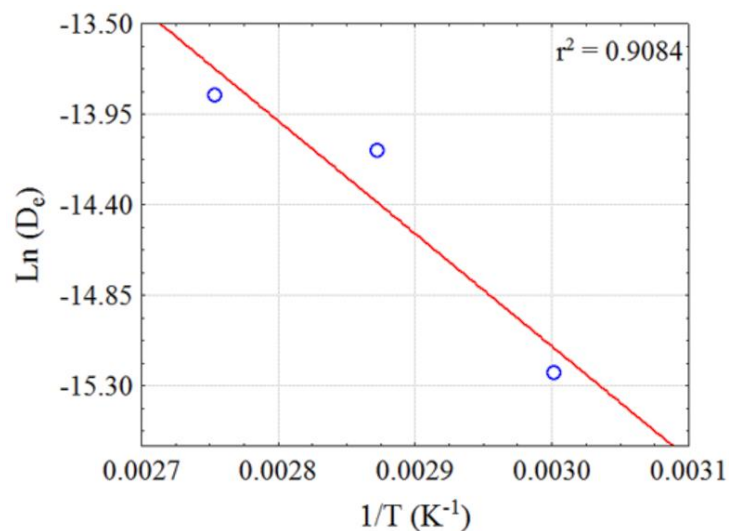


Figura 4.5 - Relação de Arrhenius entre a difusividade efetiva da umidade e a temperatura de secagem das fibras do pseudocaule da bananeira.

$$D_e = 7,923 \exp\left(-\frac{47612,10}{R_g(T + 273,15)}\right) \quad (4.1)$$

A energia de ativação é uma indicadora de demanda energética necessária para iniciar o processo de difusão da umidade no fenômeno de secagem (CORRÊA *et al.*, 2017). O valor calculado ($47,61 \text{ kJ mol}^{-1}$) apresenta-se dentro do intervalo de $12,7$ a 110 kJ mol^{-1} informado por ZOGZAS *et al.* (1996), mostrando-se inferior a energia de ativação da secagem de pimentão vermelho ($48,90 \text{ kJ mol}^{-1}$), pólen de abelha ($49,47 \text{ kJ mol}^{-1}$) e uva sem semente Monukka ($67,29 \text{ kJ/mol}$) (XIAO *et al.*, 2010; DENG *et al.*, 2018, KAYACAM *et al.*, 2018).

Segundo DENG *et al.* (2018) a diferença de energia de ativação nos materiais é intimamente associada aos componentes estruturais dos tecidos, área de superfície, variedade, status de maturação dos produtos e até pré-tratamentos das amostras. Portanto, observado os fatores acima mencionados a contribuição para a diferença de energia de ativação das fibras em relação a outros produtos agrícolas pode ser atribuída em grande parte à elevada umidade interna das frutas e vegetais em contrapartida a das fibras. Dessa forma, a secagem das fibras requer uma menor quantidade de energia para ocorrer a difusão em comparação a outros produtos agroindustriais.

A variação de entalpia, entropia e energia de Gibbs obtidas durante a secagem das fibras estão dispostas na Tabela 4.3. Observou-se uma diminuição dos valores de entalpia com a elevação da temperatura, indicando menor necessidade de energia para ocorrência do fenômeno da difusão em maiores condições térmica. Esses resultados estão em conformidade com os estudos reportados por CORRÊA *et al.* (2017) e SHAF AEI *et al.* (2018) para outros produtos agroindustriais.

Tabela 4.3 - Variações de entalpia, entropia e energia livre de Gibbs obtidos para difusividade efetiva da umidade.

Temperatura (°C)	ΔH (J mol ⁻¹)	ΔS (J mol ⁻¹ K ⁻¹)	ΔG (J mol ⁻¹)
60	44842,12	-228,63	121011,86
75	44717,40	-229,00	124440,15
90	44592,68	-229,35	127881,82

Os valores positivos de entalpia caracterizam o processo como endergônico, apresentando necessidade de absorção energética para ocorrência do mecanismo de transferência de massa. Esses resultados evidenciam a não espontaneidade da difusão, cuja constatação é reforçada pela análise dos valores de energia livre de Gibbs. A energia livre de Gibbs busca medir a totalidade de energia associada a um sistema termodinâmico e o seu valor positivo é explicado por uma adição de energia que envolve o produto para a ocorrência da mudança de fase (líquido para vapor). No caso da secagem não existe reação química, o que torna a operação não espontânea nessas condições estudadas.

Os valores calculados de variação de entropia são negativos, indicando que o mecanismo de difusão foi desenvolvido do estado desordenado (início do processo), caracterizado pela maior existência de sítios disponíveis, seguindo para o estado

ordenado (fim do processo) em que há maior restrição do movimento das moléculas devido à diminuição desses locais de sorção. Portanto, quando $\Delta S < 0$, o mecanismo pode ser caracterizado como não espontâneo e o material sofre algum tipo de modificação física ou química (ANABEL *et al.*, 2018).

4.4 - CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL

As amostras de fibras de pseudocaule pós-secagem, não apresentaram diferenças em relação a análise termogravimétrica, portanto, na Figura 4.6 é apresentado as curvas TGA da amostra seca a 60 °C.

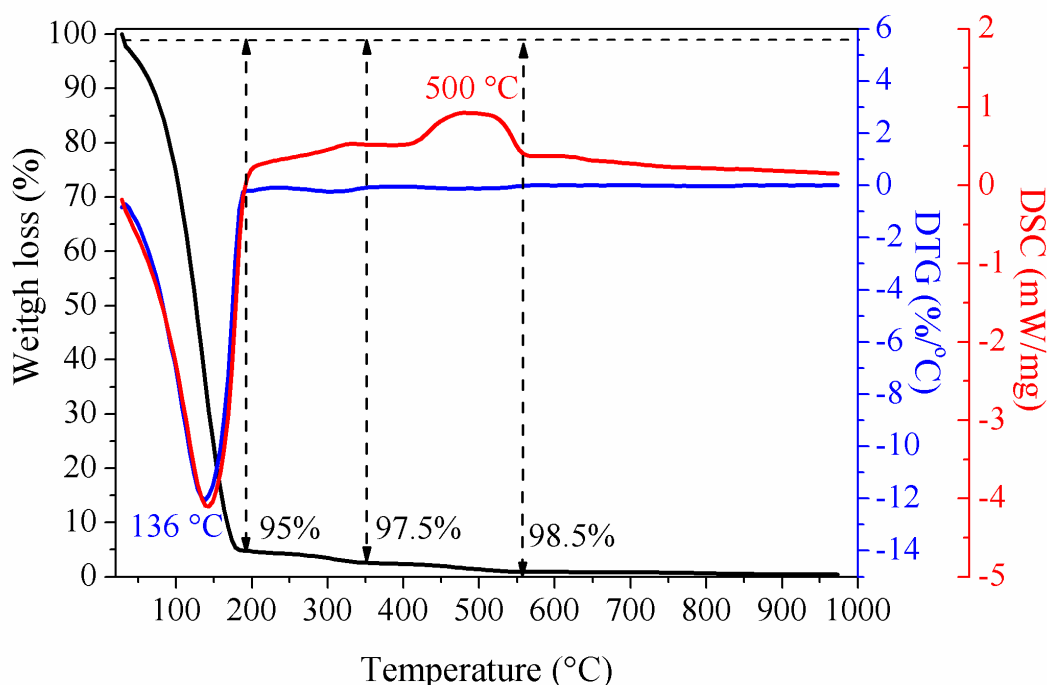


Figura 4.6 - TGA e DSC das fibras de pseudocaule da bananeira.

As curvas de TG e DTG apresentam estágio de degradação que se inicia a temperatura ambiente (30 °C) e finda-se a 180 °C. Esse primeiro estágio de degradação foi responsável por uma perda de massa de 95% e está relacionado com a evaporação da umidade da fibra e decomposição de proteínas e outros compostos de baixo peso molecular presentes no pseudocaule da bananeira (LIEBL *et al.*, 2019). No segundo estágio (190-370 °C), ocorreu a degradação, primeiramente da hemicelulose e posteriormente da celulose, quantificando uma perda em massa de ~ 2,5 %. Esse resultado é similar ao reportado por BRISSAC *et al.* (2018), onde a temperatura de

decomposição da hemicelulose e da celulose, presente na estrutura do pseudocaule da bananeira foi de 220-400 °C, indicando que a hemicelulose é menos resistente à degradação térmica do que a celulose. Segundo SUBAGYO e CHAFIDZ (2018) a menor estabilidade da hemicelulose é provavelmente devida à presença de grupos acetil, que fazem com que a hemicelulose se degrade muito mais rapidamente do que a celulose e lignina por exemplo.

O último estágio é a decomposição da lignina. Geralmente, para qualquer fibra vegetal, a decomposição da lignina ocorre entre as faixas de temperatura 200-500 °C (BREBU e VASILE, 2010). No entanto, segundo SANGO *et al.*, (2018) a lignina presente no pseudocaule da bananeira é mais evidentemente decomposta entre 450 °C e 550 °C, corroborando com os dados deste trabalho, onde a lignina atingiu a temperatura máxima de degradação em 500 °C, evidenciada na formação de um pico exotérmico da calorimetria exploratória diferencial (DSC).

Os espectros de FTIR das fibras pós-secagem, estão apresentados na Figura 4.7. As bandas perceptíveis na faixa de números de onda de 3320 cm^{-1} , 2900 cm^{-1} e 1600 cm^{-1} estão relacionadas respectivamente ao alongamento axial do grupo hidroxila (-OH), alongamento simétrico -CH e ligações COO^- de pectina, muito comum em fibras naturais e atribuído a constituintes de hidrocarbonetos (HAJIHA *et al.*, 2014).

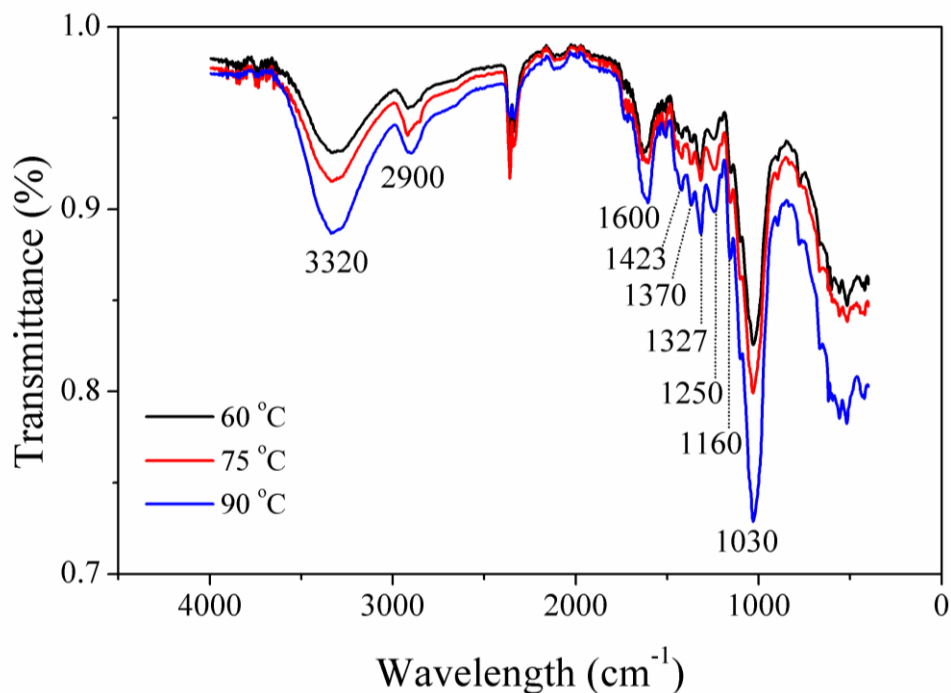


Figura 4.7 - Espectros de FTIR de amostras secas em 60, 75 e 90 °C.

As bandas de 1423 cm^{-1} e 1370 cm^{-1} indicam flexão simétrica de CH_2 e flexão de $-\text{CH}$ no plano, presentes em estrutura de celulose e hemicelulose (KARIMI; TAHERZADEH, 2016; EMANDI *et al.*, 2011). A região de absorção em 1327 cm^{-1} corresponde a presença típica de guaiacol, uma das principais unidades de formação da lignina (FAN; DAI; HUANG, 2012), cuja presença também foi detectada na banda de 1250 cm^{-1} , que representa o alongamento C-O do grupo acetil (SAWPAN; PICKERING; FERNYHOUGH, 2011). As regiões de 1160 cm^{-1} e 1030 cm^{-1} são relacionadas a presença da celulose, respectivamente non-symmetrical bridge C-O-C e alongamento C-O e C-C, presentes em sua estrutura (FAN *et al.*, 2012; LUDUEÑA *et al.*, 2013).

De uma forma geral, a secagem não ocasionou deslocamento ou desaparecimento de bandas de absorção, uma vez que a degradação da hemicelulose e celulose das fibras do pseudocaule só ocorreu a temperaturas superiores a $190\text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 4.6). Entretanto, as amostras com menor teor de umidade, apresentaram maior intensidade das bandas majoritárias, conforme indica a Figura 4.8. Esse comportamento pode ser resultante da reunião e maior empacotamento das microfibrilas no estado seco, uma vez que as cadeias de polissacarídeos presentes na fibra são arranjadas de forma mais estreita com a remoção de água, facilitando assim a identificação dos constituintes poliméricos presentes na fibra (FAN *et al.*, 2012). Resultado similar foi observado no estudo de LIM e CHEONG (2015) durante a secagem de Aloe vera, onde as bandas de absorção seguiram a ordem crescente de intensidade ($30, 50, 80$ e $120\text{ }^\circ\text{C}$).

As micrografias das fibras do pseudocaule pós-secagem são apresentadas na Figura 4.8. A micrografia da Figura 4.8A mostra um conjunto de fibras alinhadas e compactas, com presença de vazios capilares, denominado lúmen (Figura 4.8B), característica peculiar em fibras de pseudocaule da bananeira (SUBAGYO e CHAFIDZ, 2018).

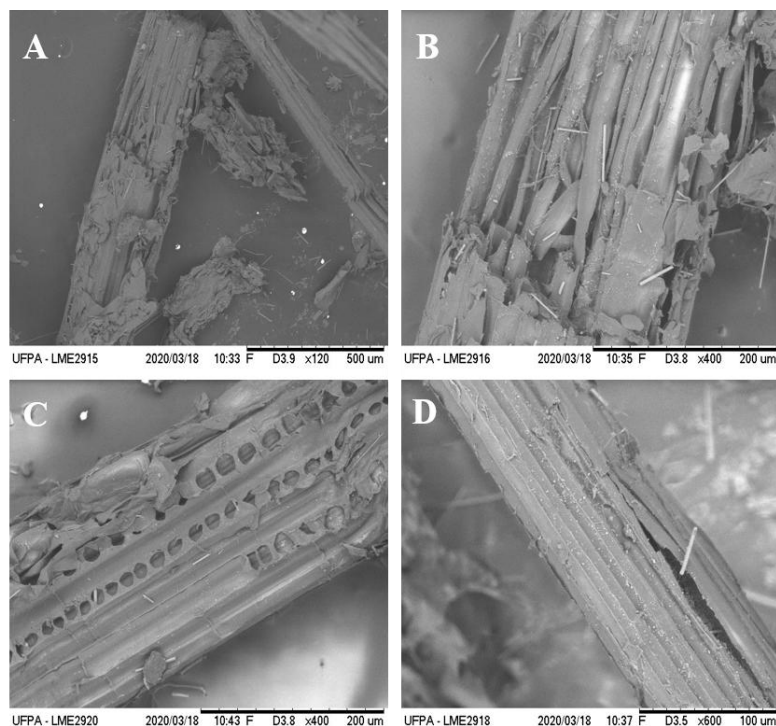


Figura 4.8 - Microscopia eletrônica de varredura das fibras de pseudocaulo de bananeira: 60 °C (A), 60 °C (B), 75 °C (C) e 90 °C (D).

Na micrografia ampliada 400 vezes (Figura 4.8C), podem ser observados pequenos conjuntos de fibras e um corte, ao longo de uma delas, que revela uma sequência de células parcialmente abertas. Essa característica é principalmente devida à perda de umidade e outros compostos voláteis presentes no interior das fibras durante o processo de secagem (LIEBL *et al.*, 2019). As fibras secas a 90 °C apresentaram pequenas fraturas (Figura 4.8D) em sua estrutura ocasionando um colapso irreversível. Esse efeito foi causado provavelmente pelas tensões geradas internamente na amostra devido ao gradiente acentuado de temperatura e umidade entre a superfície do sólido e seu interior durante a secagem (GHAZANFARI *et al.*, 2006b).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 - CONCLUSÕES

Após o processo de secagem de fibras de pseudocaule da bananeira, reduções de umidade para valores de 2,82, 0,14 e 0,16% foram quantificadas para as respectivas temperaturas de 60, 75 e 90 °C. O modelo de Aproximação da difusão foi o mais adequado para descrever a secagem das fibras pois apresentou maiores valores de R^2_{adj} ($\geq 0,978$) e menores valores de χ^2 ($\leq 2,21 \times 10^{-4}$) e RMSE ($\leq 0,0140$). O processo de secagem ocorreu predominante em período de taxa decrescente, comportamento que caracteriza materiais agroindustriais.

O coeficiente de difusão efetivo aumentou com a elevação da temperatura de secagem, evidenciando que o processo de difusão da umidade nas fibras foi mais acentuado em maiores temperaturas. A energia de ativação necessária para iniciar o processo de remoção de umidade das fibras foi igual a 47,61 kJ mol⁻¹ e com a elevação da temperatura, a entalpia diminuiu, enquanto a entropia e a energia livre de Gibbs aumentaram, indicando que a secagem é um processo endergônico e não espontâneo.

A secagem não ocasionou deslocamento ou desaparecimento de bandas de absorção espectroscópicas, uma vez que a degradação dos constituintes lignocelulósicos das fibras do pseudocaule só ocorreu a temperaturas superiores a 190 °C, confirmada pela análise termogravimétrica. As fibras secas a 90 °C apresentaram pequenas fraturas em sua estrutura ocasionando um colapso irreversível, em consequência de altas tensões geradas na estrutura durante o processo de secagem.

5.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Quantificar as propriedades químicas e nutricionais das fibras.
- Avaliar a potencialidade da fibra de pseudocaule como adsorvente para a remoção de contaminantes.
- Realizar análises físico-mecânicas nas fibras de pseudocaule segundo as normas internacionais.

- Investigar o efeito da adição das fibras do pseudocaule em materiais cerâmicos para a formação de compósitos de alto valor agregado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P. E. Enthalpy-entropy compensation in sorption phenomena: Application to the prediction of the effect of temperature on food isotherms. **Journal of Food Science**, v. 51, n. 6, p. 1547-1549, 1986. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1986.tb13856.x>.

AKBAR, N. A.; SABRI, S.; ABU BAKAR, A. A.; AZIZAN, N. S. Removal of colour using banana stem adsorbent in textile wastewater. *In: International Conference on Nanomaterials: Science, Engineering and Technology (ICONSET)*, Malásia, 2019. **Anais [...]. Journal of Physics: Conference Series**. Bristol: IOP Publishing Ltd., v. 1349, 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1349/1/012091>.

ALVES, D. A. S. **Secagem de pimenta-do-reino preta (*Piper nigrum* L.) em secador de leito fixo**. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos: UFSCar, São Carlos, 2015.

ALVES, N. M. C.; ARRUDA-SILVA, T. A.; SANTOS, S. B.; GALLE, N. B. C.; SILVA, I. D. F.; SILVA, M. I. P. Drying kinetics and thermodynamic properties of ‘baru’ almond flours. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 1, p. 30-36, 2021. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p30-36>.

AMADI, P.; IFEANACHO, M.O. Impact of changes in fermentation time, volume of yeast, and mass of plantain pseudo-stem substrate on the simultaneous saccharification and fermentation potentials of African land snail digestive juice and yeast. **Journal of Genetic Engineering and Biotechnology**, v. 14, n. 2, p. 289-297, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2016.09.002>.

AMARNATH, R.; BALAKRISHNAN, V. Evaluation of the banana (*Musa paradisiaca*) plant by-product’s fermentation characteristics to assess their fodder potential. **International Journal of Dairy Science**, v. 2, n. 3, p. 217-225, 2007. <https://doi.org/10.3923/ijds.2007.217.225>.

ANABEL, F.; CELIA, R.; GERMÁN, M.; ROSA, R. Determination of effective moisture diffusivity and thermodynamic properties variation of regional wastes under different atmospheres. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 12, p. 248-257, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.04.015>.

ANHWANGE, B. A.; UGYE, T. J.; NYIAATAGHER, T. D. Chemical composition of *Musa sapientum* (banana) peels. **Journal of Food Technology**. v. 6, n. 6, p. 263-266, 2008.

ARAÚJO, W. D.; GONELI A. L. D.; CORRÊA, P. C.; HARTAMNN FILHO, C. P.; MARTINS, E. A. S. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 3, p. 448-457, 2017. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170052>.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1909-13 (2020)**. Standard tables of commercial moisture regains and commercial allowances for textile fibers. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2494-13 (2020)**. Standard Test Method for Commercial Mass of a Shipment of Yarn or Manufactured Staple Fiber or Tow. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

BAGALI, S. S.; COWRISHANKAR, B. S.; ROY, A. S. Optimization, Kinetics, and Equilibrium Studies on the Removal of Lead (II) from an Aqueous Solution Using Banana Pseudostem as an Adsorbent. **Engineering**, v. 2, n. 3, p. 409-415, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.024>.

BALDA, S.; SHARMA, A.; CAPALASH, N.; SHARMA, P. Banana fibre: a natural and sustainable bioresource for eco-friendly applications. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 23, p. 1389-1401, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02041-y>.

BARBOSA NETO, A. M.; LIMA, J. O.; MARQUES, L. G.; PRADO, M. M. Secagem infravermelho de caroços de açaí para a obtenção de biomassa. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, n. 20, 2014, Florianópolis. **Anais eletrônico [...]**. São Paulo: Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 1, n. 2, 2015. p. 5451-5458. <https://doi.org/10.5151/chemeng-cobeq2014-0554-24974-159341>.

BENAMOUN, L.; LI, J. **Chapter 2 - Drying Process of Food: Fundamental Aspects and Mathematical Modeling**. *In*: Handbook of Food Bioengineering, Natural and Artificial Flavoring Agents and Food Dyes. Academic Press, 2018. p. 29-82. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811518-3.00002-8>.

BHUSHAN, S.; RANA, M.S.; MAMTA; NADAN, N.; PRAJAPATI, S.K. Energy harnessing from banana plant wastes: A review. **Bioresource Technology Reports**, v. 7, e100212, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100212>.

BILBA, K.; ARSENE, M.; OUENSANGA, A. Study of banana and coconut fibers: Botanical composition, thermal degradation and textural observations. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 58-68, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.030>.

BINDU C. S.; BEENA K. S. Influence of natural fibres on the compressive strength of Stone Matrix Asphalt mixtures. **International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS)**. Tamil Nadu, v.1, p. 445-449, 2015.

BORGES, A. L. *et al.* **A cultura da bananeira**. Cruz da Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2004, 279p.

BREBU, M.; VASILE, C. Thermal degradation of lignin – a review. **Cellulose Chemistry and Technology**, v. 44, n. 9, p. 353–363, 2010.

BRISSAC, D. C. D. O., DALONSO, N.; SOUZA, O.; SELLIN, N.; WISBECK, E.; GERN, R. M. M. Deslignificação do pseudocaule da bananeira pelo caldo de cultivo enzimático de *Pleurotus sajor-caju*. **Matéria (Rio de Janeiro)**. v. 23, n. 4 e12220, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0554>.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. 1.ed. Springer Science & Business Media. 45 p., 1992.

BRUCE, D. M. Exposed-layer barley drying: three models fitted to new data up to 150 C. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 32, n. 4, p. 337-348, 1985. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(85\)90098-8](https://doi.org/10.1016/0021-8634(85)90098-8).

BRUCE, D. M.; HOBSON, R. N.; HAMER, P. JC.; WHITE, R. P. Drying of Hemp for Long Fibre Production. **Biosystems Engineering**, v. 91, n. 1, p. 45-59, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.03.002>.

CANEDA, C. M. **Secagem de materiais têxteis**. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos UFSCar, São Carlos: São Paulo, 2016.

CADENA, E. M. C.; VÉLEZ, J. M. R.; SANTA, J. F.; OTÁLVARO, V. G. Natural Fibers from Plantain Pseudostem (*Musa Paradisiáca*) for Use in Fiber-Reinforced Composites. **Journal of Natural Fibers**, v. 14, n. 5, p. 678-690, 2017. <https://doi.org/10.1080/15440478.2016.1266295>.

CARRIN M. E.; CRAPISTE G. H. Convective drying of foods. In: Ratti C (editor). **Advances in food dehydration**. Boca Raton, FL: CRC Press. p 123-152, 2009.

CASTIGLIONI, G. L.; SILVA, F. A.; CALIARI, M.; SOARES JÚNIOR, M. S. S. Modelagem matemática do processo de secagem da massa fibrosa de mandioca. **Revista**

Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.1 7, n. 9, p. 987-994, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000900012>.

CÉLINO, A.; FRÉOUR, S.; JACQUEMIN, F.; CASARI, P. Characterization and modeling of the moisture diffusion behavior of natural fibers. **Journal of Applied Polymer Science**. v. 130, n. 1, p. 297–306, 2013. <https://doi.org/10.1002/app.39148>.

CHAKHTOUNA, H.; BENZEID, H.; ZARI, N.; QAISS, A.E.K.; BOUHFID, R. Functional CoFe₂O₄-modified biochar derived from banana pseudostem as an efficient adsorbent for the removal of amoxicillin from water. **Separation and Purification Technology**, v. 266, e118592, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118592>.

CIHAN, A.; ECE, M. C. Liquid diffusion model for intermittent drying of rough rice. **Journal of Food Engineering**, v. 49, n. 4, p. 327-331, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00230-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00230-2).

CHIRIFE, J. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. **Advances in Drying**. Washington, DC: Hemisphere Publishing Corp. v. 2, p. 73-102, 1983.

COOK, E. M.; DUMONT, H. D. **Process drying practice**. McGraw-Hill Companies. 256 p., 1991.

CORDEIRO, N.; BELGACEM, M. N.; TORRES, I. C.; MOURA, J. C. V. P. Chemical composition and pulping of banana pseudo-stems. **Industrial Crops and Products**. v. 19, n. 2, p. 147-154, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.09.001>.

CORRÊA, P. C.; DE OLIVEIRA, G. H. H.; DE OLIVEIRA, A. P. L.; BOTELHO, R. F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2010000500005>.

CORRÊA, P. C.; DE OLIVEIRA, G. H. H.; DE OLIVEIRA, A. P. L.; BOTELHO, R. F. M.; GONELI, A. L. D. Thermodynamic properties of drying process and water absorption of rice grains. **CyTA-Journal of Food**. v. 15, n. 2, p. 204-210, 2017. <https://doi.org/10.1080/19476337.2016.1238012>.

COSTA, C. F.; CORRÊA, P. C.; VANEGAS, J. D. B.; BAPTESTINI, F. M.; CAMPOS, R. C.; FERNANDES, L. S. Mathematical modeling and determination of thermodynamic properties of jabuticaba peel during the drying process. **Revista**

Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 20, n. 6, p. 576-580, 2016. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n6p576-580>.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. Oxford university press, 1979.

CRISPINIANO, F. F.; XAVIER, C. S. F.; VIEIRA, F. F.; ALMEIDA, M. M. Avaliação da cinética de secagem da fibra do sisal e do uso das fibras na adsorção de corante têxtil sintético. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 4, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1199>.

CRUZ, F. P. B., JOHANN, G.; DE OLIVEIRA, K. C.; PALÚ, F.; DA SILVA, E. A.; GUIRARDELLO, R.; PEREIRA, N. C. Crambe grain drying: Evaluation of a linear and double resistance driving force model and energetic performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1-8, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.170>.

DÉLÉRIS, I.; WALLECAN, J. Relationship between processing history and functionality recovery after rehydration of dried cellulose-based suspensions: A critical review. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 246, p. 1-12, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.06.013>.

DENG, L. Z., YANG, X. H.; MUJUMDAR, A. S.; ZHAO, J. H.; WANG, D.; ZHANG, Q.; WANG, J.; GAO, Z.; XIAO, H. W. Red pepper (*Capsicum annuum* L.) drying: Effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, antioxidant capacity, and microstructure. **Drying Technology**, v. 36, n. 8; p. 893–907, 2018. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1361439>.

DINIZ, J. F. B.; LIMA, E. S.; MAGALHÃES, H. L. F.; LIMA, W. M. P. B.; PORTO, T. R.; GOMEZ, R. S.; GICELIA, M.; LIMA, A. G. B. Drying of sisal fibers in oven with forced air circulation: An experimental study. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, e8639109342, 2020a. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i10.9342>.

DINIZ, J. F. B.; MAGALHÃES, H. L. F.; LIMA, E. S.; GOMEZ, R. S.; PORTO, T. R.; GICELIA, M.; LIMA, W. M. P. B.; LIMA, A. G. B. Drying of sisal fibers in fixed bed: a predictive analysis using lumped models. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, e9469109360, 2020b. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i10.9360>.

DOS SANTOS, D. G.; LIMA, A. G. B.; COSTA, P. S. The Effect of the Drying Temperature on the Moisture Removal and Mechanical Properties of Sisal Fibers. **Defect and Diffusion Forum**, v. 380, p. 66-71, 2017. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.380.66>.

DOS SANTOS, F. S.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; REIS, C. G.; AMADEU, L. T. S.; SILVA, L. P. F. R.; LIMA, T. L. B. Modelagem matemática e propriedades termodinâmicas na secagem do quiabo. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 44, n. 1, 2021. <https://doi.org/10.19084/rca.21469>.

DOYMAZ, İ. Experimental study on drying of pear slices in a convective dryer. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 48, n. 9, p.1909-1915, 2013. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12170>.

ELBEHIRY, A.; ELNAWAWY, O.; KASSEM, M.; ZAHER, A.; UDDIN, N.; MOSTAFA, M. Performance of concrete beams reinforced using banana fiber bars. **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, e00361, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00361>.

ELLENBERGER, A.; BELINI, U. L.; BRESSIANI JÚNIOR, I.; KEINERT, A. C. Utilização das fibras do pseudocaule da bananeira. **Revista Científica Rural**, v. 22, n. 1, 2020. <https://doi.org/10.30945/rcr-v22i1.3168>.

EMANDI, A. N. A.; ILEANA VASILIU, C.; BUDRUGEAC, P.; STAMATI, I. Quantitative investigation of wood composition by integrated FT-IR and thermogravimetric methods. **Cellulose Chemistry and Technology**, v. 45, n. 9, p. 579, 2011.

ERBAY, Z; ICIER, F. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 50, n. 5, p. 441-464, 2010. <https://doi.org/10.1080/10408390802437063>.

FAN, M.; DAI, D.; HUANG, B. Fourier transform infrared spectroscopy for natural fibres. In: **Fourier Transform-Materials Analysis (Ed. Salih)**, v. 3, p. 45-68, 1 ed. Londres: IntechOpen, 2012. <https://doi.org/10.5772/2659>.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS STATISTICS. FAOSTAT agricultural data, 2019. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>>. Acesso em: 22 de abril de 2021.

FARIA, L. J. G. **Análise experimental do processo de secagem de urucum (Bixa Orellana L.) em leito fixo**. 274f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

FARIA, L. J. G.; ROCHA, S. C. S. Optimization of annatto (*Bixa orellana* L.) drying in fixed bed. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 17, n. 4-7, p. 483-496, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322000000400013>.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in Polymer Science**, v. 37, p. 1552-1596, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood-chemistry, ultrastructure, reactions**. 2. ed. Walter de Gruyter, Berlin e New York, 613 p., 1989.

FERNANDES, B. S.; RODRIGUES JR, L. F.; FORTE, M. M. C.; FORNARI JR, C. C. M.; AMADO, F. D. R. Estudo de fibras de coco secas para aplicações tecnológicas em compósitos poliméricos. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA CONEM, n. 5, Salvador, 2008. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2008.

FERNANDO, J.; AMARASINGHE, A. Drying kinetics and mathematical modeling of hot air drying of coconut coir pith. **SpringerPlus**, v. 5, p. 807, 2016. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2387-y>.

FERREIRA, V. F.; ROCHA, D. R.; DILVA, F. C. **Potencialidades e oportunidades na química da sacarose e outros açúcares**. *Química Nova*, v. 32, n. 3, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300007>.

FLORES, L. B.; BAIA, R. T.; GOES, R. O.; MOREIRA, C. K. P.; FERREIRA, A. F. B.; ALVES, J. Cinética e ajustes de modelos matemáticos de secagem do caroço de açaí em túnel solar vertical, n. 21, 2016, Fortaleza. *In*: Congresso Brasileiro de Engenharia Química. **Anais eletrônicos [...]**. Campinas, Galoá, 2016. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobeq/cobeq-2016/papers/cinetica-e-ajustes-de-modelos-matematicos-de-secagem-do-caroco-de-acai-em-tunel-solar-vertical>>. Acesso em: 20 de maio de 2021, 21h45min.

FOUST, A. S.; WENZEL, L.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, B. **Princípios das Operações Unitárias**. 2. ed. LTC-Livros Técnicos e Científicos, Editora AS: Rio de Janeiro, 1982.

FRITZELL, E.; MELANDER, O.; RASMUSON, A. The drying kinetics and equilibrium moisture content of MDF fibers. **Drying Technology**, v. 27, n. 9, p. 993-998, 2009. <https://doi.org/10.1080/07373930902904566>.

GASPAROTTO, L.; PEREIRA, J. R. (ed.). **A cultura da bananeira na região norte do Brasil**. 2. ed. Brasília: Embrapa Amazônia Ocidental, 2012, 310 p.

GHANI, Z. A.; YUSOFF, M. S.; ZAMAN, N. Q.; ZAMRI, M. F. M. A.; ANDAS, J. Optimization of preparation conditions for activated carbon from banana pseudo-stem using response surface methodology on removal of color and COD from landfill leachate. **Waste Management**, v. 62, p. 177-187, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.026>.

GHAZANFARI, A., EMAMI, S.; TABIL, L. G.; PANIGRAHI, S. Thin-Layer Drying of Flax Fiber: I. Analysis of Modeling using Fick's Second Law of Diffusion. **Drying Technology**, v. 24, n. 12, p. 1631-1635, 2006a. <https://doi.org/10.1080/07373930601031430>.

GHAZANFARI, A., EMAMI, S.; TABIL, L. G.; PANIGRAHI, S. Thin-layer drying of flax fiber: II. Modeling drying process using semi-theoretical and empirical models. **Drying Technology**, v. 24, n. 12, p. 1637-1642, 2006b. <https://doi.org/10.1080/07373930601031463>.

GIACOMINI, N. P. **Compósitos reforçados com fibras naturais para a indústria automobilística**. 197f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo USP, São Carlos, 2003.

GONÇALVES FILHO, L. C. **Utilização do pseudocaule de bananeira como substrato da fermentação alcoólica: Avaliação de diferentes processos de despolimerização**. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade da Região de Joinville UNIVILLE, Joinville, 2011.

GOSWAMI, T.; KALITA, D.; RAO, P. G. Greaseproof paper from banana (*Musa paradisiaca* L.) pulp fiber. **Indian Journal Chemical Technology**, v. 15, n. 5, p. 457-461, 2005.

GOYALDE, N. A.; MELO, E. C.; ROCHA, R. P.; GONELI, A. L. D. Mathematical modeling of the drying kinetics of sugarcane slices. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 11, n. 2, p. 117-121, 2009. <http://dx.doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v11n2p117-121>.

GRAEBIN, G. O. **Secagem do bagaço de cana-de-açúcar e estudo da sua aplicação na remoção de metal pesado**. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná UNIOESTE, Toledo - Paraná, 2014.

GUIMARÃES, J.L.; FROLLINI, E.; DA SILVA, C.G.; WYPYCH, F.; SATYANARAYANA, K.G. Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. **Industrial Crops and Products**. v. 30, n. 3, p. 407-415, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.07.013>.

GUPTA, G.; BARANWAL, M.; SAXENA, S.; REDDY, S. Utilization of banana stem juice as a feedstock material for bioethanol production. **CLEAN–Soil, Air, Water**. v. 47 n. 9, e1900047, 2019. <https://doi.org/10.1002/clen.201900047>.

GUPTA, U.S.; DHAMARIKAR, M.; DHARKAR, A.; CHATURVEDI, S.; TIWARI, S.; NAMDEO, R. Surface modification of banana fiber: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 43, n. 2, p. 904-915, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.217>.

GURAV, R.; BHATIA, S. K.; CHOI, T.; PARK, Y.; PARK, J. Y.; HAM, Y.; VYAVAHARE, G.; JADHAV, J.; SONG, H.; YANG, P.; YOON, J.; BHATNAGAR, A.; CHOI, Y.; YANG, Y. Treatment of furazolidone contaminated water using banana pseudostem biochar engineered with facile synthesized magnetic nanocomposites. **Bioresource Technology**, v. 297, e122472, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122472>.

HAJIHA, H.; SAIN, M.; MEI, L. H. Modification and characterization of hemp and sisal fibers. **Journal of Natural Fibers**. v. 11, n. 2, p. 144-168, 2014. <https://doi.org/10.1080/15440478.2013.861779>.

HARIS, M.R.; SATHASIVAM, K. The removal of methyl red from aqueous solutions using banana pseudostem fibers. **American Journal of Applied Sciences**, v. 6, n. 9, p. 1690-1700, 2009. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2009.1690.1700>.

HENDERSON, S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan. v. 17, n. 6, p. 1167-1168, 1974. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.37052>.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v. 6, p. 169–174, 1961.

HO, L.; TAN, T.; AZIZ, N.A. A. BHAT, R. In vitro starch digestibility of bread with banana (*Musa acuminata* X *balbisiana* ABB cv. Awak) pseudo-stem flour and hydrocolloids. **Food Bioscience**, v. 12, p. 10-17, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2015.07.003>.

HO, M.-p.; WANG, H.-j.; LEE, J.; LAU, K.-t.; LENG, J.; HUI, D. Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. **Composites: Part B**, v. 43, p. 3549-3562, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.10.001>.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Brasília, 2021. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/1618>>. Acesso em: 03 de maio de 2021, 22h.

IDICULA, M.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Mechanical Performance of Short Banana/Sisal Hybrid Fiber Reinforced Polyester Composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 29, n. 1, p. 12-29, 2010. <https://doi.org/10.1177/0731684408095033>.

JACOB, N.; PREMA, P. Novel process for the simultaneous extraction and degumming of banana fibers under solid-state cultivation. **Braz J. Microbiol**, v. 39, n. 1, p. 320-326, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822008000100025>.

JAYAPRABHA, J. S.; BRAHMAKUMAR, M.; MANILAL, V. B. Banana Pseudostem Characterization and Its Fiber Property Evaluation on Physical and Bioextraction. **Journal of Natural Fibers**, v. 8, n. 3, p. 149-160, 2011. <https://doi.org/10.1080/15440478.2011.601614>.

JIDEANI, V. A.; MPOTOKWANA, S. M. Modeling of water absorption of Botswana bambara varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, v. 92, n. 2, p. 182-188, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.10.040>.

JONGYINGCHAROEN, J.S.; WUTTIGARN, P.; ASSAWARACHAN, R. Hot air drying of coconut residue: shelf life, drying characteristics, and product quality, *In*: IOP TSAE INTERNATIONAL CONFERENCE, n. 12, Tailândia, 2019. **Anais [...]**. Conference series: earth and environmental science. Bristol: IOP Publishing, v. 301, e012033, 2019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/301/1/012033>.

KARIMI, K.; TAHERZADEH, M. J. A critical review of analytical methods in pretreatment of lignocelluloses: composition, imaging, and crystallinity. **Bioresource Technology**, v. 200, p. 1008-1018, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.022>.

KAROLIA, A.; MALHAN, S. Eco-friendly printing on minor fibre fabrics (jute and banana). **Asian Têxtil Jornal**, v. 48, n. 11, p. 83-86, 2005.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.09.007>.

KASSEM, A. S. Comparative studies on thin layer drying models for wheat. *In: 13th international congress on agricultural engineering*, Marrocos. p. 2-6. 1998.

KAYACAN, S.; SAGDIC, O.; DOYMAZ, I. Effects of hot-air and vacuum drying on drying kinetics, bioactive compounds and color of bee pollen. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 12, n. 2, p. 1274-1283, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9741-4>.

KEEY, R. B. Theoretical Foundations of Drying Technology. **Advances in Drying**, v. 1, p. 1–22, 1980.

KENENI, Y. G.; HVOSLEF-EIDE, A. K. T.; MARCHETTI, J. M. Mathematical modelling of the drying kinetics of *Jatropha curcas* L. seeds. **Industrial Crops and Products**, v. 132, p. 12-20, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.012>.

KHAN, M. I. H.; KUMAR, C; JOARDDER, M. U. H.; KARIM, M. A. Determination of appropriate effective diffusivity for different food materials. **Drying Technology**, v. 35, n. 3, p. 335-346, 2017. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1170700>.

KHAN, M. Z. H.; SARKAR, M. A. R.; AL IMAM, F. I.; ZAHID KHAN, M. H.; MALINEN, R. O. Paper Making from Banana Pseudo-Stem: Characterization and Comparison, **Journal of Natural Fibers**, v. 11, n. 3, p. 199-211, 2014. <https://doi.org/10.1080/15440478.2013.874962>.

KIRAN, C U.; REDDY, G. R.; DABADE, B. M.; RAJESHAM, S. Tensile Properties of Sun Hemp, Banana and Sisal Fiber Reinforced Polyester Composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 26, n. 10, p. 1043-1050, 2007. <https://doi.org/10.1177/0731684407079423>.

KUCUK, H.; MIDILLI, A.; KILIC, A.; DINCER, I. A review on thin-layer drying-curve equations. **Drying Technology**, v. 32, n. 7, p. 757–73, 2014. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.873047>.

KULKARNI, A. G.; SATYANARAYANA, K. G.; ROHATGI, P. K.; KALYANI, V. Propriedades mecânicas das fibras de banana (*Musa sepientum*). **Journal of Materials Science**, v. 18, p. 2290-2296, 1983. <https://doi.org/10.1007/BF00541832>.

KUMAR, N.; SARKAR, B. C.; SHARMA, H. K. Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace. **Journal of Food Science and Technology**, v. 49, n. 1, p. 33-41, 2012. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0266-7>.

KUMAR, S. K. Drying Kinetics of Banana Peel. **Journal of Food Process & Technology**. v. 6, n. 11, e1000514, p. 514-517, 2015. <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000514>.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 13, n. 5, p. 427-432, 1921.

LI, K.; FU, S.; ZHAN, H.; ZHAN, Y.; LUCIA, L. A. Analysis of the chemical composition and morphological structure of banana pseudo-stem. **BioResources**, v. 5, n. 2, p. 576-585, 2010.

LIEBL, G. F., E. L. DE SOUZA, P. Z. UCHÔA, C. MARANGONI, N. SELLIN; O. SOUZA. Study of drying of banana pseudo-stem and influence of particle sizes on biomass saccharification and cellulosic ethanol production. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 3, p. 605-625, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-09995-4>.

LIM, Z. Xi; CHEONG, K. Y. Effects of drying temperature and ethanol concentration on bipolar switching characteristics of natural Aloe vera-based memory devices. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 17, n. 40, p. 26833-26853, 2015. <https://doi.org/10.1039/C5CP04622J>.

LIMA, A. C. **Avaliação da remoção de Cr(III) empregando o pseudocaule da bananeira (*Musa paradisiaca*) como biossorvente**. 68f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

LIU, J.; CHEN, Y. **Drying rate of hemp conditioned with a forage conditioner**. *Canadian Agricultural Engineering*. v. 42, n. 4, 2000.

LIU, S.; LI, J.; XU, S.; WANG, M.; ZHANG, Y.; XUE, X. A modified method for enhancing adsorption capability of banana pseudostem biochar towards methylene blue at low temperature. **Bioresource Technology**, v. 282, p. 48-55, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.092>.

LOPES, F. J.; PEREIRA, N. R. Encolhimento na secagem convectiva de abacaxi com aplicação de micro-ondas variável. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS*

PARTICULADOS ENEMP, n. 37, São Carlos, 2015. **Anais [...]**. São Paulo: Blucher, 2015, p. 1707-1757.

LUDUEÑA, L. N.; VECCHIO, A.; STEFANI, P. M.; ALVAREZ, V. A. Extraction of cellulose nanowhiskers from natural fibers and agricultural byproducts. **Fibers and Polymers**, v. 14, n. 7, p. 1118-1127, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12221-013-1118-z>.

LUNA, S. V. S.; JUSTO, J. L. Experimentos utilizando a fibra de bananeira para fins têxteis. **Revista Projética**, v. 7, n. 2, p. 37-52, 2016.

MABROUK, S. B.; BENALI, E.; OUESLATI, H. Experimental study and numerical modelling of drying characteristics of apple slices. **Food and Bioproducts Processing**, v. 90, n. 4, p.719-728, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.02.001>.

MADAMBA, Ponciano S.; DRISCOLL, Robert H.; BUCKLE, Ken A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00062-3](https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00062-3).

MAQUEDA, R. H.; REDONDO, I. B.; JACOME, S. J.; MORENO, Á. H. Microwave drying of amaranth and quinoa seeds: Effects of the power density on the drying time, germination rate and seedling vigour. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**, v. 52, n. 4, p. 299-311, 2018. <https://doi.org/10.1080/08327823.2018.1534052>.

MARICHELVAM, M. K.; AZHAGURAJAN, A. Removal of mercury from effluent solution by using banana corm and neem leaves activated charcoal. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 10, p. 360-365, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2018.08.005>.

MARIE-MAGDELEINE, C.; LIMEA, L.; ETIENNE, T.; LALLO, C.H.; ARCHIMEDE, H.; ALEXANDRE, G. The effects of replacing Dichantium hay with banana (*Musa paradisiaca*) leaves and pseudostem in carcass traits of Ovin Martinik sheep. **Tropical Animal Health and Production**, v. 41, n. 7, p. 1531-1538, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11250-009-9344-5>.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 301-306, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000300009>.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 5. ed. New York: McGraw-Hill chemical engineering series. 1154 p., 1993.

MENKOV, N. D. Moisture sorption isotherms of chickpea seeds at several temperatures. **Journal of Food Engineering**. v. 45, n. 4, p. 189-94, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00052-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00052-2).

MEZIANE, S. Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 3, p. 1644-1649, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.027>.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002. <https://doi.org/10.1081/DRT-120005864>.

MOHAPATRA, D.; MISHRA, S.; SUTAR, N. Banana and its by-product utilization: An overview. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 69, n. 5, p. 323-329, 2010.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, 2017.

MORAIS, S. A.; NASCIMENTO, E. A.; PILO-VELOSO, D. Determinação do grau de condensação e do número de grupos metoxila por unidade monomérica de Ligninas do *Eucalyptus grandis* por espectroscopia FTIR. *Quím. Nova*, v.17, p.5-8, 1994.

MORASSI, J. O. Fibras naturais: aspectos gerais e aplicação na indústria automobilística. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia E Ciência dos Materiais, CBCIMAT*, n. 11, 1994, São Paulo. *Anais [...]*. São Paulo: ABPol: ABM: ABC, 1994. p.1259-1262.

MOURA, C. R.; VALENTINA, L. V. O. D.; VIEIRA, A. J. T. Avaliação da perda de massa de colmos de bambu durante o processo de secagem. **Engevista**, v. 20, n. 3, p. 476-486, 2018.

MUJUMDAR, A. S. **Principles, classification, and selection of dryers**. In *Handbook of industrial drying*. 3. ed. CRC Press. p. 28-57, 2006.

NABI SAHEB, D.; JOG, J. p. Natural Fiber Polymer Composites: A Review. **Advances in Polymer Technology**, v. 18, n. 4, p. 351-363, 1999. [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).

NAIR, G. R.; LIPLAP, P.; GARIEPY, Y.; RAGHAVAN G. S. V. Microwave Drying of Flax Fibre at Controlled Temperatures. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 1, p. 1103-1115, 2011.

NASCIMENTO, R. A.; SANTOS, E. V. S.; SANTANA, E. B.; ANDRADE, E. L.; FARIA, L. J. G.; COSTA, C. M. L. Cinética de secagem convectiva dos frutos de bacaba (*Oenocarpus bacaba* Mart.): efeitos no teor de antocianinas e fenólicos. In: XXXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados ENEMP 2019, 2019, Belém. **Anais eletrônicos [...]**. Campinas, Galoá, 2019. Disponível em: <<https://proceedings.science/enemp-2019/papers/cinetica-de-secagem-convectiva-dos-frutos-de-bacaba--oenocarpus-bacaba-mart---efeitos-no-teor-de-antocianinas-e-fenolic>>. Acesso em: 30 de fevereiro de 2020, 20h15min.

NOELINE, B. F.; MANOHAR, D. M.; ANIRUDHAN, T. S. Kinetic and equilibrium modelling of lead(II) sorption from water and wastewater by polymerized banana stem in a batch reactor. **Separation and Purification Technology**, v. 45, n. 2, p. 131-140, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.03.004>.

OLANIPEKUN, B. F.; TUNDE-AKINTUNDE, T. Y.; OYELADE, O. J.; ADEBISI, M. G.; ADENAYA, T. A. Mathematical modeling of thin-layer pineapple drying. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 39, n. 6, p. 1431-1441, 2015. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12362>.

OLIVEIRA, G. H. H.; ARAGÃO, D. M. S.; OLIVEIRA, A. P. L. R.; SILVA, M. G.; GUSMÃO, A. C. A. Modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morangos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 18, n. 4, p. 314-321, 2015. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.5315>.

OLIVEIRA, L. N.; CABRAL FILHO, S. L. S.; GERASEEV, L. C.; DUARTE, E. R.; ABDALLA, A. L. Chemical composition, degradability and methane emission potential of banana crop residues for ruminants. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**. v. 17, p. 197-206, 2014.

ONWUDE, D.I.; HASHIM, N.; JANIUS, R.B; NAWI, M.N.; ABDAN, K. Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**. v. 15, n. 3, p. 599-618, 2016. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12196>.

ORTEGA, Z.; MORÓN, M.; MONZÓN, M.; BADALLÓ, P.; PAZ, R. Production of Banana Fiber Yarns for Technical Textile Reinforced Composites. **Materials**, v. 9, n. 5, p. 370-386, 2016. <https://doi.org/10.3390/ma9050370>.

OVERHULTS, D. G.; WHITE, G. M.; HAMILTON, H. E.; ROSS, I. J. Drying soy beans with heated air. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan. v. 16, n. 1, p. 112, 1973. <https://doi.org/10.13031/2013.37459>.

PACHECO, D. D.; RODRIGUES, M. G. V.; DIAS, M. M.; ALMEIDA, E. F. A. A.; SOUZA, F. V.; RODRIGUES, H. P.; MOREIRA, S. A. F. Uso de pseudocaule de bananeira enriquecido com nitrogênio e fósforo como substrato para o cultivo de samambaias. **Pesq. Agropec. Trop.**, v. 40, n. 1, p. 53-60, 2010.

PADAM B.S.; TIN H.S.; CHYE F.Y.; ABDULLAH M.I. Banana by-products: An under-utilized renewable food biomass with great potential. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 12, p. 3527-3545, 2014. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0861-2>.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rate of air drying shelled corn in thin-layers**. M. S. Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1949.

PAPPU, A.; PATIL, V.; JAIN, S.; MAHINDRAKAR, A.; HAQUE, R.; THAKUR, V.K. Advances in industrial prospective of cellulosic macromolecules enriched banana biofibre resources: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 79, p. 449-458, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.05.013>.

PARK, K. J. B., K. J. PARK, L. F. T. ALONSO, F. E. P. CORNEJO, I. M. FABBRO. Secagem: Fundamentos e Equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. v. 16, n. 1, p. 93-127, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v16n1p93-127>.

PELEG, M. An empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Food science**, v. 53, n. 4, p. 1216-1217, 1988. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x>.

PENG, Y.; GARDNER, D. J.; HAN, Y. Nanofibrilas de celulose de secagem: em busca de um método adequado. **Cellulose**, v. 19, p. 91-102, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10570-011-9630-z>.

PHIRKE, N. V.; PATIL, R. P.; CHINCHOLKAR, S. B.; KOTHARI, R. M. Recycling of banana pseudostem waste for economical production of quality banana. **Resources**,

Conservation and Recycling, v. 31, n. 4, p. 347-353, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(00\)00092-6](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(00)00092-6).

PILATTI, D. *et al.* Evaluation of a concentrated parameters mathematical model applied to drying of yerba mate leaves with variable mass transfer coefficient. **Applied Thermal Engineering**, v. 105, p. 483-489, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.139>.

PIMENTEL, C. T.; ANDRADE, A. M.; JÚNIOR A. F. D. Produção de pasta celulósica e papel do pseudocaule de bananeira (*Musa sp.*). **Revista Energia na Agricultura**, v. 33, n. 1, 2018. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2018v33n1p31-36>.

POTHAN, L. A.; CHERIAN, B. M.; ANANDAKUTTY, B.; THOMAS, S. Effect of Layering Pattern on the Water Absorption Behavior of Banana Glass Hybrid Composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 105, n. 5, p. 2540-2548, 2007. <https://doi.org/10.1002/app.25663>.

RADÜNZ, L. L.; MOSSI, A. J.; ZAKRZEWSKI, C. A.; AMARAL, A. S.; GRASSMANN, L. Análise da cinética de secagem de folhas de sálvia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v. 14, n. 9, p. 979-986, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000900010>.

RAMDHONEE, A.; JEETAH, P. Production of wrapping paper from banana fibres. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, n. 5, p. 4298-4306, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.08.011>.

RODRIGUES, M. G. V.; DONATO, S. L. R.; DIAS, M. S. C.; SILVA, J. T. A.; REIS, J. B. R. S. **Banana**. Informe Agropecuário, v. 32, p. 35-48, 2011.

SÁNCHEZ, L. PEIRÓ, J. M.; CASTILLO, H.; PÉREZ, M. D.; ENA, J. M.; CALVO, M. Kinetic parameters for denaturation of bovine milk lactoferrin. **Journal of Food Science**, v. 57, n. 4, p. 873-879, 1992. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1992.tb14313.x>.

SANGO, T., YONA, A. M. C.; DUCHATEL, L.; MARIN, A.; NDIKONTAR, M. K.; JOLY, N.; LEFEBVRE, J. M. Step-wise multi-scale deconstruction of banana pseudo-stem (*Musa acuminata*) biomass and morpho-mechanical characterization of extracted long fibers for sustainable applications. **Industrial Crops and Products**, v. 122, p. 657-668. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.050>.

SANTOS, D. D. C., D. D. D. F. LEITE, J. F. LISBÔA, J. P. D. L. FERREIRA, F. S. D. SANTOS, T. L. B. D. LIMA, R. M. F. D. FIGUEIREDO; T. N. D. COSTA. Modelling and thermodynamic properties of the drying of acuri slices. **Brazilian Journal of Food Technology**. v. 22, e2018031, 2019. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.03118>.

SANTOS, T. C. P. **Estudo da cinética de secagem das fibras de coco verde (*Cocos nucifera* L.)**. 49f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química), Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

SARAVANAN, K.; ARADHYA, S. M. Polyphenols of pseudostem of different banana cultivars and their antioxidant activities. **J. Agric. Food Chem.**, v. 59, n. 8, p. 3613-3623, 2011. <https://doi.org/10.1021/jf103835z>.

SAWPAN, M. A., PICKERING, K. L.; FERNYHOUGH, A. 2011. Effect of various chemical treatments on the fibre structure and tensile properties of industrial hemp fibres. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. v. 42, n. 8, p. 888-895, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.03.008>.

SAXENA, T.; CHAWLA, V.K. Banana leaf fiber-based green composite: An explicit review report. **Materials Today: Proceedings**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.099>.

SHAFAEI, S. M.; NOURMOHAMADI-MOGHADAMI, A.; KAMGAR, S. An insight into thermodynamic aspects of ultrasonication effect on hydration mechanism of wheat. **Journal of Food Process Engineering**, v. 41, n. 7, p. e12862, 2018. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12862>.

SHARAF-ELDEEN, Y. Is; BLAISDELL, J. L.; HAMDY, M. Y. A model for ear corn drying. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan. v. 5, n. 4, p. 1261-1265, 1980.

SHARMA, M.; PATEL, S. N.; SANGWAN, R. S.; SINGH, S. P. Biotransformation of banana pseudostem extract into a functional juice containing value added biomolecules of potential health benefits. **Indian Journal of Experimental Biology**. v. 55, p. 453-62, 2017.

SILVA, L. J. **Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos laminados com fibras vegetais**. 154f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del Rei, 2011).

SILVA, M. C.; SPESSATO, L.; SILVA, T. L.; LOPES, G. K. P.; ZANELLA, H. G.; YOKOYAMA, J. T. C.; CAZETTA, A. L.; ALMEIDA, V. C. H₃PO₄-activated carbon fibers of high surface area from banana tree pseudo-stem fibers: Adsorption studies of methylene blue dye in batch and fixed bed systems. **Journal of Molecular Liquids**. v. 324, e114771, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114771>.

SILVEIRA JUNIOR, J. A. S. **Utilização de feno de pseudocaule de bananeira (*musa sp.*) na alimentação de ovinos confinados**. 101f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - o Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapeinga, 2018.

SINGH, S. K.; KESARI, A. N.; RAI, P. K.; WATAL, G. Assessment of glycemic potential of *Musa paradisiaca* stem juice. **Indian Journal of Clinical Biochemistry**, v. 22, n. 2, p. 48-52, 2007. <https://doi.org/10.1007/BF02913313>.

SOFFNER, M. L. A. P. **Produção de polpa celulósica a partir de engaço de bananeira**. 2001. 70f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SOUSA, L. H. C. D.; LIMA, O. C. M.; PEREIRA, N. C. Analysis of Drying Kinetics and Moisture Distribution in Convective Textile Fabric Drying. **Drying Technology**, v. 24, n. 4, p. 485-497, 2006. <https://doi.org/10.1080/07373930600611984>.

SOUSA, L. H. C.; MONTEIRO, A. S.; LIMA, O. C. M.; PEREIRA, N. C.; MENDES, E. S. Analysis of moisture distribution in convective textile fabric drying. *In*: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM – IDS, n. 14, 2004. **Anais [...]**. São Paulo. v. A, 2004, p. 285-292.

SOUZA, E. L. D.; LIEBL, G. F.; MARANGONI, C.; SELIN, N. MONTAGNOLI, M. D. S.; SOUZA, O. Bioethanol from Fresh and Dried Banana Plant Pseudostem. **Chemical Engineering Transactions**, v. 38, p. 271-276, 2014. <https://doi.org/10.3303/cet1438046>.

SRIKIATDEN, J.; ROBERTS, J. S. Moisture Transfer in Solid Food Materials: A Review of Mechanisms, Models, and Measurements. **International Journal of Food Properties**. v. 10, n. 4, p. 739-777, 2007. <https://doi.org/10.1080/10942910601161672>.

SRINIVASAN, V. S.; BOOPATHY, S. R.; SANGEETHA, D.; RAMNATH, B. V. Evaluation of mechanical and thermal properties of banana-flax based natural fibre composite. **Materials & Design**. v. 60, p. 620-627, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.014>.

STRUMILLO, C.; T. KUDRA. **Drying: principles, applications and design.** *In: Topics in Chemical Engineering.* Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers, v. 3, CRC Press, 1986, 448 p.

SUBAGYO, A.; CHAFIDZ, A. **Banana pseudo-stem fiber: Preparation, characteristics, and applications.** *In: Banana Nutrition-Function and Processing Kinetics,* ed. A. I. O. Jideani and T. A. Anyasi. 1. ed. London: Intechopen, 2018, p.1-19. <https://doi.org/10.5772/intechopen.82204>.

SURESH, A.; JAYKUMAR, L.; DECARAJU, A. Investigation of mechanical and wear characteristic of Banana/Jute fiber composite. **Materials Today: Proceedings.** v. 39, n. 1, p. 3324-330, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.426>.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: Principles, applications and design.** Gordon and Breach Science Publishers: NY. p. 69-89, 1986.

TACO. **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos.** 4. ed. rev. e ampl. Campinas: UNICAMP-NEPA, 2011, 161 p.

TENORIO, C.; MOYA, R. Evaluation of different approaches for the drying of lignocellulose residues. **BioResources,** v. 7, n. 3, 3500-3514, 2012.

THOMAS S.; PAUL, S. A.; POTHAN, L. A.; DEEPA, B. **Natural Fibers: Structure, Properties and Applications.** *In: Kalia S., Kaith B., Kaur I. (ed.) Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites.* Springer, Berlin, Heidelberg. p. 3-42, e20122, 2011 https://doi.org/10.1007/978-3-642-17370-7_1.

TORKI-HARCHEGANI, M. *et al.* Dehydration characteristics and mathematical modelling of lemon slices drying undergoing oven treatment. **Heat and Mass Transfer,** v. 52, n. 2, p. 281-289, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1546-y>.

VELÁSQUEZ-ARREDONDO, H. I.; RUIZ-COLORADO, A. A.; DE OLIVEIRA, S. Ethanol production process from banana fruit and its lignocellulosic residues: Energy analysis. **Energy.** v. 35, n. 7, p. 3081-3087, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.052>.

VETTER, R. E.; RIBEIRO, R. A. S.; RIBEIRO, M. G. A.; MIRANDA, I. P. A. Studies on drying of imperial bamboo. **European Journal of Wood and Wood Products,** v. 73, n. 3, p. 441-414, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0900-6>.

VISCUSI, G.; PANTANI, R.; GORRASI, G. Transport properties of water vapor through hemp fibers modified with a sustainable process: Effect of surface morphology on the thermodynamic and kinetic phenomena. **Applied Surface Science**, v. 541, e148433, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148433>.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. A single layer drying equation for rough rice. **ASAE paper**, St. Joseph, MI, 1978.

WAUGHON, T. G.; PENA, R. S. **Modelagem da secagem em camada delgada da fibra residual do abacaxi**. Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos, v. 26, n. 2, p. 297-306, 2008. <http://dx.doi.org/10.5380/cep.v26i2.13286>.

XIAO, H-W.; PANG, C-L.; WANG, L-H.; BAI, J-W.; YANG, W-X.; GAO, Z-J. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer. **Biosystems Engineering**, v. 105, n. 2, p. 233-240, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.11.001>.

YOUNG, R. A. **Utilization of Natural Fibers: Characterization, Modification and Applications**. In LEÃO, A. L.; CARVALHO, F. X. and FROLINI, E. Eds. Lognocellulosic-Plastic Composites, São Paulo, USP & UNESP, p. 1-21, 1997.

ZHAO, Y.; WANG, W.; ZHENG, B.; MIAO, S.; TIAN, Y. Mathematical modeling and influence of ultrasonic pretreatment on microwave vacuum drying kinetics of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seeds. **Drying Technology**, v. 35, n. 5, p. 553-563, 2017. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1193512>.

ZHOU, F., GAO, X.; FU, Z.; ZHOU, Y. Drying kinetics of poplar lumber during periodic hot-press drying. **Drying Technology**. v. 36, n. 14, p. 1767-1780, 2018. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1426597>.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, v. 14, n. 10, p. 2225-2253, 1996. <https://doi.org/10.1080/07373939608917205>.