

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**



**Coordenação de Engenharia Química/CCET**

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC

**RAFHAEL SILVA BRAGA**

**ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DO CAULE DA  
BANANEIRA (*Musa spp.*)**

São Luís

2021

**RAFHAEL SILVA BRAGA**

**ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DO CAULE DA  
BANANEIRA (*Musa spp.*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Curso da Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Romildo Martins Sampaio

São Luís

2021

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Braga, Rafael Silva.

ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DO CAULE DA BANANEIRA  
Musa spp / Rafael Silva Braga. - 2021.  
59 p.

Orientador(a): Romildo Martins Sampaio.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do  
Maranhão, São Luis, 2021.

1. Bananeira. 2. Cinética. 3. Difusividade. 4.  
Modelos. 5. Secagem. I. Sampaio, Romildo Martins. II.  
Título.

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. ROMILDO MARTINS SAMPAIO

Orientador – COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. HARVEY ALEXANDER VILLA VELEZ

COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. PAULO HENRIQUE DA SILVA LEITE COELHO

COEQ/CCET/UFMA

**26 de agosto de 2021**

**DADOS CURRICULARES****Raphael Silva Braga****NASCIMENTO** 06/11/1994 – São Luís/MA**FILIAÇÃO** Jorge Luís de Holanda Braga

Edna Maria Alves Silva

**2013/2021** Curso de Graduação

Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

*Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me apoiaram e acreditaram no poder transformador da educação.*

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e em primeiro lugar agradeço a Deus, razão de tudo e de todos nós.

Ao meu orientador, Prof. Romildo Sampaio, pelo incentivo, orientação e auxílio.

Ao Prof. Harvey Villa, que cedeu seu laboratório para que algumas análises pudessem ser realizadas e sempre se mostrou disponível para esclarecer as dúvidas que teimavam em existir, sendo sempre disposto em ajudar em toda a construção deste trabalho.

Aos meus amigos Antonio Feliciano dos Passos Neto e Marcos Vinicius Costa (em nome dos meus amigos da Vila Passos) e Thaynara Costa que estiveram presentes nos momentos alegres e tristes, sendo fonte contínua de apoio e incentivo.

Aos meus demais amigos, do meu tão amado bairro e companheiros de luta que colecionei ao longo da vida, pelos sorrisos, acolhimento e momentos de apoio.

Aos meus pais e família, em especial à Jorge Braga e Edna Silva, que ao longo da vida deram-me todo o suporte para que eu pudesse seguir meus sonhos e lutar para cravar meu espaço nesse mundo.

“Hasta la victoria, siempre!”

*Pertenço a uma geração que quis mudar o mundo, fui esmagado, derrotado, pulverizado, mas continuo sonhando que vale a pena lutar para que as pessoas possam viver um pouco melhor e com um maior senso de igualdade.*

*Pepe Mujica*

BRAGA, R. S. **Estudo da Cinética de Secagem do caule da Bananeira (*Musa Sp.*)**. 2021. 73f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2020.

## RESUMO

Atualmente a fibra de bananeira é bastante utilizada na produção de peças de artesanato, cordames, na alimentação e em papéis como sacos de chá, cédulas, papel de filtro, isolantes elétricos, cigarros, fibras para reforço de polímeros, substituintes biodegradáveis e atóxicos de outras fibras inorgânicas como a fibra de vidro. Alguns artigos já tratam do estudo do caule da bananeira, através de tentativas de adsorção de suas fibras naturais, aplicando-as na área de construção civil como material para aumentar flexibilidade de concreto. Outra utilização mais comum é como aditivo para tintas artesanais, a fim de aumentar a fixação das mesmas. Além de utilização como ração volumosa para gado. Buscando conhecer um pouco mais sobre as características das fibras e do caule da bananeira, o presente trabalho visa estudar o comportamento da cinética de secagem do talo do caule da bananeira às temperaturas de 40, 50 e 60 °C. Os dados experimentais foram ajustados através de dez diferentes modelos matemáticos empíricos de camada fina, empregando-se para isso, o software Matlab® 7.1. Para o cálculo do coeficiente difusivo utilizou-se o desenvolvimento de Crank (1975) para a segunda lei de Fick para placa plana infinita. A energia de ativação foi obtida por meio da linearização da equação de Arrhenius, que descreve a relação da difusividade com a temperatura. Para a secagem, as amostras foram definidas como A, B, C e D para cada ensaio de temperatura, cortadas na forma de discos finos e postas para secar em estufa nas temperaturas previamente definidas. Para determinação do teor de umidade das amostras de caule, utilizou-se placas finas de 2,0 g (desvio padrão = 0,0704g), secas à 105°C até peso constante. O teor de umidade do caule foi de 0,99 kg água/kg caule. Os resultados indicaram que o processo de secagem ocorreu em um período de taxa decrescente. Os modelos em camada fina de Midilli e Page foram os que melhor ajustaram os dados experimentais. O coeficiente de difusividade efetiva para a secagem do caule da bananeira foi de  $1.92 \times 10^{-09}$ ,  $3.0 \times 10^{-09}$  e  $4.06 \times 10^{-09}$ , para 40, 50 e 60 °C, respectivamente. Com esses resultados, encontrou-se um valor de energia de ativação de 29,7961 kJ/mol para o sistema com geometria de cilindro finito e infinito, e de 32,3910 kJ/mol para placa infinita, todos dentro dos valores descritos na literatura.

**Palavras-chave:** Caule de Bananeira. Cinética de Secagem. Coeficiente de Difusividade. Energia de ativação. Modelos Matemáticos de Secagem.

BRAGA, R. S. **Study of drying kinetics of banana tree stem stalk (*Musa sp.*)**. 2021. 73 f. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2020.

### ABSTRACT

The banana fiber is widely used in the production of handicrafts, rigging, food and papers such as tea bags, banknotes, filter paper, electrical insulators, cigarettes, fibers for polymer reinforcement, biodegradable and non-toxic substitutes of others inorganic fibers such as fiberglass. Some articles already deal with the study of the banana tree stem, through attempts to adsorb its natural fibers, applying them in the civil construction area as a material to increase concrete flexibility. Another most common use is as additive for handmade paints, in order to increase their fixation. In addition to being used as bulky feed for cattle. In order to know more about the characteristics of the fibers and the stem of the banana tree, this work aims to study the behavior of the drying kinetics of the stem of the banana tree at temperatures of 40, 50 and 60 °C. The experimental data were fitted using ten different thin-layer empirical mathematical models, using the Matlab® 7.1 software. To calculate the effective moisture diffusivity it was used the development of Crank (1975) for Fick's second law for infinite flat plate. The activation energy was obtained through the linearization of the Arrhenius equation, which describes the relationship between diffusivity and temperature. For drying, the samples were defined A, B, C and D, before are cut into thin discs and put to dry in previously defined temperatures. To determine the moisture content of the stem samples, thin plates of 2.0 g were dried at 105°C to constant weight. The stem moisture content was 0.99 kg water/kg stem. The results indicated that the process occurred in a falling rate period. Midilli and Page thin-layer models were the ones that best fit the experimental data. The effective moisture diffusivity for drying the banana stem was  $1.92 \times 10^{-09}$ ,  $3.0 \times 10^{-09}$  and  $4.06 \times 10^{-09}$  for 40, 50 and 60 °C, respectively. With these results, it was found an activation energy value of 29.7961 kJ/mol for the system with finite and infinite cylinder geometry, and 32.3910 kJ/mol for infinite plate, all within the values described in the literature.

**Keywords:** Banana stalk. Drying Kinetics. Effective Moisture Diffusivity. Activation Energy. Drying Mathematical Models.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fisiologia da planta de banana (IPGRI, 2001).....	5
Figura 2 - Esquema de estabilidade dos alimentos em função da atividade de água (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007). .....	7
Figura 3 - Curva típica de secagem. Fonte: Prato (2010) .....	11
Figura 4 - Curvas das taxas de secagem ( $dX/dt$ ) em função da umidade do material ( $X_{bs}$ , kg/kg) para temperatura de 40(■), 50(▲), e 60°C (●).(a) e Curva das cinéticas de secagem da fibra de bananeira para temperatura de 40(■), 50 (▲), e 60°C (●) (b).....	21
-Figura 5 - Ajuste do modelo de Midilli aos dados experimentais de secagem de caule de bananeira nas temperaturas de 40 (●), 50(▲) e 60 °C (■) e gráfico comparativo de resíduos e dados experimentais.....	25
Figura 6 - Ajuste do modelo de Dois Termos aos dados experimentais de secagem de caule de bananeira nas temperaturas de 40°C (●) 50 (▲) e 60 °C (■) e gráfico comparativo de resíduos e dados experimentais. ....	25
Figura 7 - Expansão do modelo de Midilli para as temperaturas de 40 (●), 50(▲) e 60 °C (■).....	26
Figura 8 - Comparativo entre dados experimentais (■) e estimativa pela solução de CRANK (1975) para o modelo difusivo de placa infinita (-) à 40°C (a), 50°C (b) e 60°C (c). .....	28
Figura 9 - Ajuste linear do logaritmo da difusividade efetiva em função do inverso da temperatura para geometria de placa plana. ....	29

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Características das amostras de caule de bananeira utilizados na secagem	16
Tabela 2 - Valores de umidade X (kg/kg, b.s) ao longo do tempo, obtidos nos ensaios de secagem às temperaturas 40, 50 e 60°C.....	20
Tabela 3 - Quantidade de água retirada durante a secagem às temperaturas de 40, 50 e 60°C.....	21
Tabela 4 - Parâmetros cinéticos estimados dos modelos de camada fina para secagem de fibra de caule de bananeira para as temperaturas de 40, 50 e 60°C.....	23
Tabela 5 - Parâmetros estatísticos estimados dos modelos de camada fina para secagem de fibra de caule de bananeira para as temperaturas de 40, 50 e 60°C.....	24
Tabela 6 - Coeficientes de difusão efetiva (Def) e coeficiente de determinação (R <sup>2</sup> ) calculados para as geometrias de placa infinita, cilindro infinito e cilindro finito, na secagem de talos de bananeira às temperaturas de 40, 50 e 60°C. ....	27
Tabela 7 - Energia de ativação (Ea), fator pré-exponencial (D0) e coeficiente de correlação (R <sup>2</sup> ) para a secagem de caule de bananeira em diferentes geometrias e temperaturas de 40, 50 e 60°C. ....	29

## SUMÁRIO

<b>FOLHA DE APROVAÇÃO.....</b>	<b>II</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>VII</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
2.1 Objetivo geral .....	3
2.2 Objetivos específicos .....	3
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
3.1. Generalidades da cultura da Banana.....	4
3.1.1. TAXONOMIA E CARACTERÍSTICAS GERAIS .....	4
3.1.2 APROVEITAMENTOS TECNOLÓGICOS DE RESÍDUOS PROVENIENTES DO CULTIVAR DA BANANA .....	5
3.1.3 A ÁGUA NOS ALIMENTOS.....	7
3.2 Secagem.....	8
3.3 Cinética de Secagem e Difusividade Efetiva ( $D_{ef}$ ) .....	9
3.4 Modelagem Matemática .....	12
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>15</b>
4.1 Preparo do Sistema de Secagem .....	15
4.2 Local e Condições Experimentais .....	15
4.3 Secagem da fibra do caule de bananeira.....	15
4.4 Determinação do teor de umidade .....	16
4.5 Modelagem Matemática .....	16

4.6 Coeficiente de Difusividade Efetiva e Energia de Ativação.....	17
4.7 Análise estatística .....	17
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>19</b>
5.1 Secagem do caule da bananeira .....	19
5.2 Ajustes pelo modelos matemáticos da secagem do talo da bananeira.....	22
5.3 Coeficientes de Difusividade e Energia de ativação em diferentes geometrias ....	26
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>30</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>31</b>
<b>APÊNDICE A – GRÁFICOS DOS DIFERENTES MODELOS MATEMÁTICOS USADOS PARA REPRESENTAR OS DADOS EXPERIMENTAIS DE SECAGEM DO CAULE E FIBRA DE BANANEIRA .....</b>	<b>38</b>
<b>APÊNDICE B – CÓDIGOS-FONTE DOS PROGRAMAS UTILIZADOS NO MATLAB PARA CÁLCULO DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO E AJUSTE AOS MODELOS CINÉTICOS UTILIZANDO GEOMETRIA DE PLACA PLANA, CILINDRO INFINITO E CILINDRO FINITO.....</b>	<b>42</b>
<b>APÊNDICE C – AJUSTES ÀS GEOMETRIAS DE CILINDRO INFINITO E CILINDRO FINITO, EM DIFERENTES TEMPERATURAS, PARA O CÁLCULO DAS DIFUSIVIDADES EFETIVAS.....</b>	<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A bananeira é uma denominação genérica para as plantas do gênero *Musa*, família das Musáceas. Cada espécie tem sua particularidade em termos de consistência e sabor. Estas podem ser consideradas como “ervas gigantes”, cujos rizomas dão origem a raízes subterrâneas e pseudocaulas que emergem do solo em bainhas de folhas. Os cachos geram frutos abundantes, em forma de bagas alongadas, cujo formato lembra dedos (SEBRAE, 2008).

A banana é um fruto que está presente em toda a extensão do território nacional e é facilmente encontrada. Com diversos nutrientes, costuma ser aproveitado por inteiro, tanto o fruto quanto a casca. A sua árvore, a bananeira (*Musa spp*), é um bom abrigo para animais ou para oferecer sombra quando é cultivada de maneira doméstica. Mas, é muito mais que isso por também oferecer uma fruta saborosa.

Pouca atenção tem sido dada a estudos do caule da bananeira, sendo este considerado de maneira muito comum como resíduo sólido, tendo algumas aplicabilidades comuns citadas acima. Já existe um forte movimento das indústrias farmacêuticas e de cosméticos em financiar estudos, a fim de utilizar este subproduto e agregar valor ao mesmo.

Segundo Bezerra (2016), além de também ser utilizada como ração volumosa para gado, pesquisas já estudaram o caule da bananeira, através de tentativas de adsorção de suas fibras naturais, aplicando-as na área de construção civil como material para aumentar flexibilidade de concreto como a exemplo o uso de cinzas de bananeira no concreto de Bezerra (2019). Costa (2010) mostra outra utilização como aditivo para tintas artesanais, a fim de aumentar a fixação destes produtos.

O caule de bananeira pode ser utilizado como alimento uma vez que é fonte de potássio, sendo consumido principalmente na Ásia. A cultura popular atribui seu uso medicinal para prevenir pedras nos rins. Em alguns países também é usado para problemas de gastrite e para reduzir açúcares no sangue, lembrando que o uso é quase inexistente no Brasil, devido à necessidade de rápida e adequada preparação.

Logo, um breve estudo sobre a cinética de secagem dessas fibras pode abrir espaço para estudos mais específicos sobre sua constituição química e benefícios, possibilitando o uso em escala industrial destes conhecimentos, como já ocorre artesanalmente (BEZERRA 2019).

A secagem ajuda a determinar em quais condições esses caules podem ser armazenados e o tempo de validade dessas fibras, além de claro poder garantir que haja uma maior vida útil, uma vez que compostos com baixo teor de umidade, ou seja, com menor atividade de água, têm menor possibilidade de contaminação e de desenvolver reações indesejáveis. (HOFSKY, 2013)

Atualmente a fibra de bananeira é bastante utilizada na produção de peças de artesanato, cordames, na alimentação e em papéis como sacos de chá, cédulas, papel de filtro, isolantes elétricos, cigarros, fibras para reforço de polímeros, substituintes biodegradáveis e atóxicos de outras fibras inorgânicas como a fibra de vidro (SOUSA; CAMARGO; GAVA. 2017).

O reaproveitamento de resíduos como insumos em outras áreas apresenta um impacto ambiental extremamente positivo. Observar subprodutos como possibilidades de pesquisa buscando novas formas de aplicações é uma forma de justificar este interesse.

Para avaliar a aplicação do processo de secagem dos talos do caule da bananeira, é fundamental entender o comportamento da cinética e curvas de secagem em diferentes temperaturas, a fim de determinar modelos empíricos e teóricos que possam facilitar a compreensão desta operação. Conhecer a energia utilizada no processo também é importante para estudos posteriores, tais como utilização das cinzas desta fibra em processos de adsorção como é realizado em cimento Portland apresentado por Bezerra (2019) ou para conter derramamentos de petróleo utilizando a fibra como adsorvente como apresentado em Borges (2013).

## **2 OBJETIVOS**

O desenvolvimento deste trabalho auxiliará no estudo da cinética de secagem da fibra do caule da bananeira, cuja ocorrência no estado do Maranhão é frequente. O presente estudo apresentará condições para uma maior utilização do caule da bananeira, e conseqüente preparo da fibra do vegetal.

### **2.1 Objetivo geral**

Estudar experimental e matematicamente (através de modelagem) a cinética de secagem do talo do caule da bananeira em diferentes temperaturas.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Determinar experimentalmente as cinéticas de secagem às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C;
- Modelar a cinética de secagem nas temperaturas 40°C, 50°C e 60°C, empregando diferentes modelos de secagem teóricos e empíricos;
- Calcular o coeficiente de difusividade efetivo às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C.
- Determinar a energia de ativação do processo de secagem do talo da bananeira;

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Generalidades da cultura da Banana

##### 3.1.1. TAXONOMIA E CARACTERÍSTICAS GERAIS

A banana pertence à ordem *Zingiberales*, à família das *Musaceas* e ao gênero *Musa*, que inclui, aproximadamente, 1000 espécies. A família das *Musaceas* contém dois gêneros: o gênero *Musa*, que é o mais cultivado no mundo, e o gênero *Ensete*, cultivado no sul da Etiópia (CRONQUIST, 1981). No gênero *Musa*, encontra-se o grupo da *Eumusa*, do qual quase todas as variedades de banana têm surgido. Este grupo é o maior e mais propagado geograficamente, com espécies que crescem desde a Índia até o Pacífico (DEVOUARD, 2001).

No Brasil, as espécies mais difundidas do grupo *Eumusa* são: Prata, Pacovan, Prata Anã, Maçã, Mysore, Terra e D'Angola que pertencem ao grupo de AAB e Nanica, Nanicão e a Naine grande, que pertencem ao grupo do AAA ou Cavendish (OLIVEIRA E SILVA et al., 2001).

A cultivar da banana é catalogada como uma erva grande, que não possui tronco real, mas com bainhas folhares que se desenvolvem em uma estrutura chamada pseudocaule. Quando ele está na fase de crescimento (26 a 32 folhas), do rizoma nasce diretamente uma inflorescência, a qual se posiciona no centro do pseudocaule em forma vertical, de cor roxa ou violeta e vai desde o pedúnculo até o ráquis (figura 1). O fruto encontra-se ao longo do engaço em forma axial e demora entre 80 e 180 dias para desenvolver-se completamente. Todas as flores femininas são frutos, tendo uma aparência de mãos. Cada inflorescência pode ter entre 5 a 20 mãos por espiga, mas geralmente é truncada para evitar o desenvolvimento do fruto imperfeito e impedir a entrada de mais energia causando uma diminuição na produção. O corte é normalmente fixado na “falsa mão”, onde começam a aparecer frutos anões. No total, ele pode produzir 300-400 frutos por espiga, com um peso superior a 50 kg (BEZERRA-LIMA, 2004).

As espécies do subgrupo Cavendish igualmente conhecidas como “bananas de água” são, geralmente, frutas finas longas e arqueadas, com cores que variam do verde ao amarelo, quando maduras, e de polpa muito doce, as quais em sua maioria são usadas para a exportação. A cultivar da banana nanica é caracterizada por ter um porte médio (2 m de altura), com um espaçamento de 2.0-2.5 m<sup>2</sup>, sendo o peso de seu cacho de 15-30 kg, dando uma produtividade de 30-40 t/ha/ano. Este produto é muito utilizado para consumo *in natura* e para processamento, apresenta problema de “engasgamento” no lançamento dos cachos no inverno e tem alta

tolerância ao mal do Panamá (OLIVEIRA E SILVA et al., 2001; RANGEL; CAMPOS; MONCORVO, 2020).

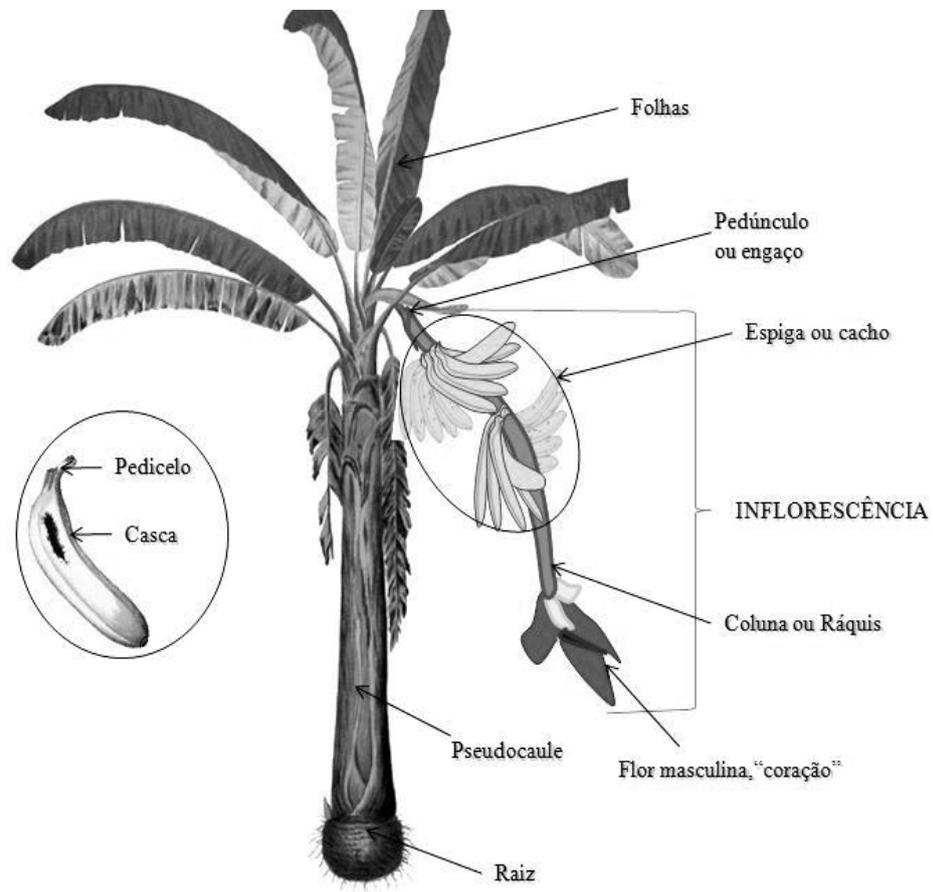


Figura 1 - Fisiologia da planta de banana (IPGRI, 2001).

### 3.1.2 APROVEITAMENTOS TECNOLÓGICOS DE RESÍDUOS PROVENIENTES DO CULTIVAR DA BANANA

A indústria agrícola e de processamento de alimentos ocupam uma importante posição econômica no mundo, mas possuem grandes problemas com a geração de enormes quantidades de resíduos biodegradáveis (CANCHÉ-ESCAMILLA et al., 2005). A banana contém muitos carboidratos, com baixas porcentagens de fibra, tornando-se uma possível matéria-prima na produção de combustíveis biodegradáveis como o hidrogênio (WEN-HSING et al., 2006), o biodiesel (LIU, 2007) e o etanol (VELÁSQUEZ-ARREDONDO; RUIZ-COLORADO; DE OLIVEIRA JUNIOR, 2010).

Brent-Hammond (1996) apresentou informações sobre a composição físico-química da polpa de banana, casca de banana e fruto completo (mistura de polpa e casca), encontrando

valores aproximados de: carboidratos totais de 16,8 a 21,7% (p/p), matéria seca de 20,0 a 28,4% p/p, fibra crua de 0,5 a 1,6% p/p, proteína total de 1,0 a 21,7% p/p e extrato etéreo de 0,2 a 1,4% p/p. Só na América do Sul, os resíduos de banana são estimados em uma média de 25 a 50% da produção total, devido ao fato de que muitos destes frutos não chegam a ter os padrões de qualidade para sua exportação e pelo excesso produzido existente no mercado interno (GUYLE'NE; PARFAIT; FAHRASMANE, 2009; ZHANG et al., 2005).

A área da fermentação para a obtenção de biocombustíveis vem sendo explorada fortemente. Esta área que se desenvolve a um ritmo acelerado procura atualmente alternativas para o aproveitamento dos resíduos da agricultura e da indústria dos alimentos, dando-lhes um valor como subproduto industrial (STEINER, 2006). Pesquisadores como Rajeev et al., (2009) e Wilkins (2009) mostraram que é possível obter etanol através do material hemicelulósico, como a partir de cascas de banana e laranja. A conversão do material celulósico em açúcar é possível mediante a fermentação do material por microrganismos como *Trichoderma reesei* RUT C30, um fungo que atua como agente degradante do material celulósico, produzindo como resíduo uma biomassa de polissacarídeos redutores. Embora o campo das fermentações esteja desenvolvido, a conversão do material celulósico para açúcar redutor apresenta a maior dificuldade na hora de padronizar o processo, sendo que os processos mais eficientes chegam até a 70% de conversão (BOUALLAGUI et al., 2005).

Na indústria das fermentações, são considerados três métodos como os mais viáveis na obtenção de matéria-prima a partir de biomassa de resíduos agrícolas: hidrólise enzimática, hidrólise ácida e hidrólise alcalina (MOSIER et al., 2005). A hidrólise enzimática é empregada para a quebra do açúcar da celulose. Microorganismos incluindo bactérias, actinomicetes e fungos produzem celulasas, mas só um número limitado desses é capaz de produzir grandes quantidades desta enzima. Algumas das bactérias celulolíticas mais estudadas pertencem aos gêneros *Celulomonas*, *Termobifida* (formadora de Termomonospora) e *Clostridium* (ZHANG et al., 2005; BOYER, 1973). A hidrólise alcalina e hidrólise ácida têm como principal característica a quebra não específica da estrutura celulósica e hemicelulósica do material biológico (também a causa de seus grandes inconvenientes), o que significa que todas as amostras de celulose podem ser hidrolisadas a glicose com uma única aplicação de ácido/base. Através da hidrólise da celulose, podem-se obter alguns oligossacarídeos com cadeias terminais redutoras e não-redutoras. Com sucessivas hidrólises destes, obtêm-se compostos menores como a celobiose (dissacarídeo redutor) e a glicose. Da quebra de uma ligação glicosídica, há

a formação de um grupo aldeído hidratado (reductor) e de um grupo alcoólico (não reductor) (HENDRIKS; ZEEMAN, 2009; BAIG et al., 2004; LASER et al., 2002).

Propriedades como o tamanho, a forma, a porosidade, o grau de polimerização, a área superficial, a conformação molecular e a cristalinidade são fatores que influenciam na hidrólise da celulose, sendo que estes dependerão da origem e dos processos a que esse polissacarídeo for submetido (CHANG; HOLTZAPPLE, 2000; CAULFIELD; MOORE, 1974).

### 3.1.3 A ÁGUA NOS ALIMENTOS

Numerosos tipos de reações químicas podem ocorrer em alimentos, resultando na deterioração do produto em pouco tempo. Muitos ingredientes são suscetíveis à hidrólise ou ao rompimento com adição de água como, por exemplo, a acidificação do carbonato em bebidas causada pelo ambiente promove a hidrólise do aspartame obtendo-se uma diminuição do sabor. A oxidação é outra reação encontrada mais comumente: ácidos graxos e ácido ascórbico podem ser oxidados fornecendo mudanças na aparência do produto final e diminuindo o potencial das matérias primas (BRENNAN, 2006).

A função da água na estabilidade dos alimentos é muito importante devido ao potencial que esta tem para contribuir nos processos de deterioração nas reações químicas, físicas e microbiológicas, como mostrado na figura 2. Atividade de água ( $a_w$ ) é a medida do estado da água nos alimentos e é definida como o potencial químico no sistema que fornece equilíbrio na maioria da estrutura do alimento (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007).

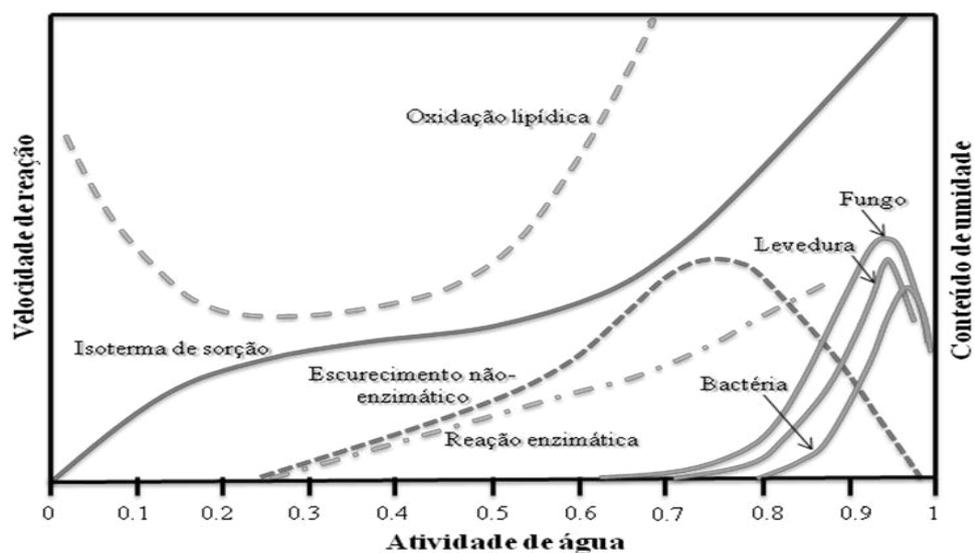


Figura 2 - Esquema de estabilidade dos alimentos em função da atividade de água (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007).

Porém, a  $a_w$  pode ser obtida pela razão da pressão de vapor de água do alimento  $P$  e a pressão de vapor de água  $P_0$  pura, a uma única condição de temperatura e pressão (equação 1). Assim, a relação entre potencial químico, pressão de vapor e  $a_w$  indica que a  $a_w$  é uma propriedade do alimento dependente da temperatura:

$$a_w = \frac{P}{P_0} = \frac{\text{Umidade relativa}}{100} \quad (1)$$

### 3.2 Secagem

A secagem é o processo comercial mais utilizado para conservação de alimentos e, comparado com outros métodos como a centrifugação, o enlatamento, os tratamentos químicos e a irradiação, entre outros, são de baixo custo e de operação mais simples. De acordo com Ferreira (2010) trata-se de um fenômeno complexo que envolve simultaneamente a transferência de calor e massa podendo abranger ainda a transferência de quantidade de movimento.

É a operação unitária mais empregada na conservação de alimentos, com objetivo de reduzir a quantidade de água livre responsável pelas principais causas de deterioração nos alimentos possibilitando o aumento de sua vida de prateleira (ANDRADE et al., 2003). A redução do volume do produto facilita seu transporte e armazenamento (RIBAS et al., 2000).

A diminuição do teor de água também afeta as características microbiológicas do alimento por dificultar o crescimento de diversos microrganismos, através do aumento da sua fase lag, além de inibir alterações enzimáticas. Produtos secos são caracterizados por baixa porosidade e alta densidade aparente. Sofrem significativa mudança na coloração durante o processo e frequentemente têm baixa capacidade de sorção (KROKIDA et al., 2003).

Todo alimento possui água em sua estrutura, seja ela livre ou ligada em outras moléculas. A água livre é facilmente removida pelo processo de secagem. Já a água ligada necessita de grande aplicação energética para a quebra das moléculas e assim liberação desta. Em geral altas temperaturas ou radiação infravermelha são utilizadas para este fim; contudo, ressalta-se que toda a estrutura do alimento é comprometida, incluindo o sabor, aroma ou propriedades nutricionais. (BOUALLAGUI et al., 2005).

A avaliação da capacidade de um alimento eliminar água através da secagem pode ser feita através da atividade de água. Segundo Romanini et al. (2007), a atividade de água é

expressa como a relação entre a pressão de vapor de água em equilíbrio sobre o alimento e a pressão de vapor de água pura à mesma temperatura. Água pura possui atividade igual a uma unidade, e a medida que solutos são nela dissolvidos, este valor diminui devido às propriedades tonoscópicas. A atividade de água é por definição igual a umidade relativa de equilíbrio (URE). Assim,  $A_w = URE/100$ .

Oliveira et al. (2010) assinalaram que a remoção de umidade durante a secagem é muito afetada pela temperatura do ar e pelas características dimensionais do material, o que pode ocasionar alterações de qualidade no produto, como o aumento de oxidação lipídica.

O mecanismo geral da secagem compreende duas fases: a fase convectiva e a difusiva. A secagem por convecção é um processo complexo que envolve transferência de calor e massa. Durante o processo o calor evapora a água do alimento e o ar remove o vapor d'água, reduzindo a umidade e a atividade de água e aumentando a vida de prateleira do produto final (FIOREZE, 2004). Os modelos teóricos que descrevem a taxa decrescente de secagem de um sólido consideram, geralmente, como mecanismo principal, a difusão baseada na segunda Lei de Fick, onde o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água (PARK et al., 2002, ROMERO-PEÑA et al., 2003).

Saravacos e Marouls (2001) afirmam que apesar de existir diversos estudos sobre o fenômeno do transporte de massa em alimentos, ainda há muitas dúvidas decorrentes da complexidade desses sistemas, sendo imprescindível conhecer as características da secagem e os modelos que melhor descrevem o comportamento de cada alimento pesquisado.

### **3.3 Cinética de Secagem e Difusividade Efetiva ( $D_{ef}$ )**

Midilli, Kucuk e Yapaz. (2002) estabeleceram três tipos de modelo de secagem, usados para descrever a cinética de secagem em camada fina de produtos: o modelo teórico, que considera apenas a resistência interna à transferência de calor e massa entre o produto e o ar quente; e os modelos semiempíricos e empíricos, que consideram somente a resistência externa à temperatura e a umidade relativa do ar de secagem

A teoria da difusão líquida assume que não há influência da capilaridade e despreza os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro, devido à dificuldade de se quantificar esses múltiplos efeitos na massa do produto. Considera que os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar instantaneamente, o que pode induzir a discrepâncias entre os

resultados encontrados. Portanto, quando a difusão líquida é utilizada para produtos biológicos, referidas condições são normalmente consideradas satisfatórias (AFONSO JUNIOR, 2001).

Segundo Geankoplis (1998), é comum na literatura, a utilização de curvas de secagem, que permitem a visualização do processo e compreensão das etapas envolvidas, e até mesmo sua utilização em projetos de secadores. As curvas de secagem demonstram claramente as quatro etapas deste processo: adaptação, de velocidade constante, de velocidade decrescente e velocidade lenta, até quando o produto atinge a umidade de equilíbrio. A umidade de equilíbrio é a umidade cuja remoção não é possível por meios convencionais como a secagem, requerendo o uso de mais energia. A figura 3 é um exemplo típico de uma curva de secagem de um produto que contenha as quatro etapas bem definidas. Alguns tipos de produtos não apresentam a fase de adaptação, tais como diversos alimentos.

Segundo Vilela e Artur (2008) as informações contidas nas curvas de secagem são de fundamental importância para o desenvolvimento de processos e para o dimensionamento de equipamentos; com elas, pode-se estimar o tempo de secagem de certa quantidade de produtos e, com o tempo necessário para a produção, calcular o gasto energético que refletirá no custo de processamento e influenciará no preço final do produto.

As curvas de secagem em camada delgada variam com a espécie, variedade, condições ambientais e métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores; neste sentido, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas cuja aplicabilidade na predição de dados experimentais alcança grande importância na prática já que permite a redução dos exaustivos ensaios de laboratório. É considerável o número de modelos matemáticos teóricos, semiempíricos e empíricos na literatura, que podem ser empregados na predição de dados de secagem em camada delgada (AKPINAR et al., 2003; MOHAPATRA et al., 2005; RESENDE et al., 2008).

Doymaz (2003) juntamente com diversos outros autores correlacionaram satisfatoriamente o coeficiente de difusão com os coeficientes dos modelos ajustados aos parâmetros de secagem, principalmente temperatura, umidade relativa e vazão do ar.

Diversos autores estudaram o coeficiente de difusão por meio da modelagem e simulação dos processos de secagem de produtos agrícolas, porém os dados disponíveis na literatura apresentam elevada variação nos seus valores, não só devido à complexidade dos

produtos, mas também em função dos diferentes métodos de estimação, tipo de matéria, teor de água, processo de secagem e metodologia utilizada para sua obtenção (ZOGZAS et al., 1996).

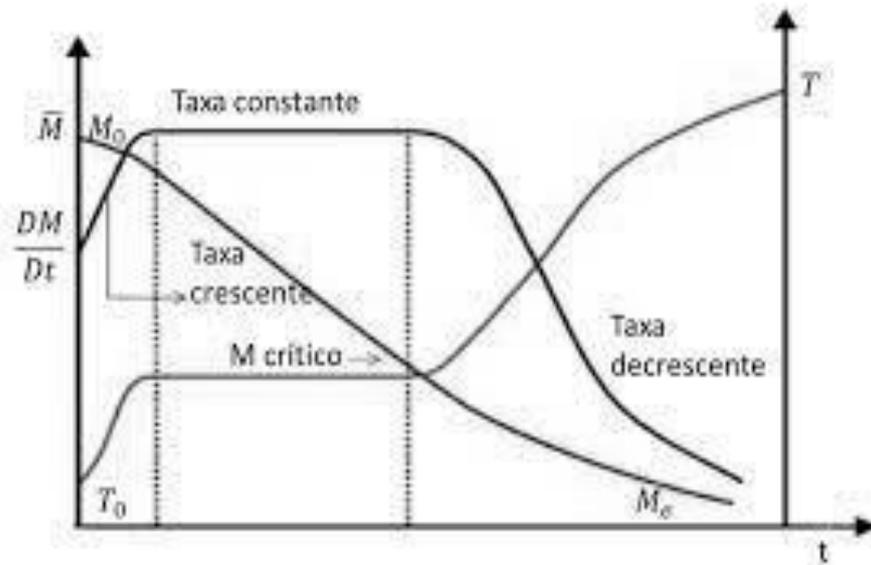


Figura 3 - Curva típica de secagem. Fonte: Prato (2010)

O coeficiente de difusão ou de difusividade ( $D_{ef}$ ) é uma difusividade efetiva que engloba os efeitos de todos os fenômenos que podem intervir sobre a migração da água, sendo o resultado obtido pelo ajuste de valores experimentais (OLIVEIRA et al., 2006). O estudo da difusividade efetiva é importante na determinação da evolução de sistemas que sofrem processos de aquecimento ou resfriamento. Porém, devido à complexa composição e à estrutura física dos alimentos, não são conseguidas estimativas precisas desta propriedade, sendo assim necessárias medidas experimentais, como observado em vários trabalhos encontrados na literatura (ARÉVALO-PINEDO; MURR, 2005).

Azoubel e Silva. (2008) propuseram uma solução analítica para a Lei de Fick (equação 2), assumindo que a resistência à transferência de umidade do produto para o meio é uniformemente distribuída através do interior do material isotrópico homogêneo, que o coeficiente de Difusão é constante e independente do conteúdo de umidade local e que o encolhimento do produto é desprezível:

$$MR = \frac{X_i - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[\frac{-(2n+1)^2 * \pi^2 * Def * t}{4L^2}\right] \quad (2)$$

onde:

- MR = razão de umidades;
- $X_i$  = umidade em um tempo t (kg/kg matéria seca);
- $X_0$  = umidade inicial (kg/kg matéria seca);
- $X_e$  = umidade no equilíbrio (kg/kg matéria seca);
- D = difusividade efetiva ( $m^2/s$ );
- L = meia espessura da placa hipotética formada pelo material (m);
- t = tempo de processo (s); e
- n= número de termos da série da equação.

Essa propriedade permite prever a velocidade da penetração de calor no interior do material, sendo assim de fundamental importância para o projeto de equipamentos e para o cálculo do processamento térmico (CARBONERA et al., 2003). A energia de ativação é definida como a facilidade com que as moléculas de água superam a barreira de energia durante a migração no interior do produto. Singh et. al (2006) relatara que a energia de ativação diminui com a elevação do teor de água do produto. Nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação maior será a difusividade de água no produto.

O estudo e a modelagem matemática da cinética de secagem têm despertado o interesse de vários pesquisadores para os mais diferentes produtos. Na literatura, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever a cinética de secagem em camada fina para produtos agrícolas: pimenta cumari (REIS et al., 2011), resíduos de abacaxi enriquecido (HOFSKY, 2013), frutos de lichia (JANJAI et al., 2010), polpa de cupuaçu (PEREZ, 2013), feijão caupi (MORAIS, 2010), fruta do lobo (PRATES, 2012), sementes de cambre (FARIA et al, 2012), folhas de capim limão (MARTINAZZO et al., 2007), grãos de trigo parabolizados (MOHAPATRA et al., 2005), folha de sálvia (RADÜNZ, 2010), sementes de feijão (AFONSO JÚNIOR et al., 1999), dentre outros.

### **3.4 Modelagem Matemática**

A secagem de produtos higroscópicos pode ser descrita por métodos teóricos, semiteóricos e empíricos. Nos métodos teóricos normalmente se consideram as condições externas sob as quais a operação ocorre como também os mecanismos internos de transferência de energia e massa e seus efeitos. Os modelos matemáticos podem assumir diferentes formas dependendo do sistema considerado e das circunstâncias particulares (PRATES, 2007).

Brooker et al. (1992) citam como exemplos de modelos teóricos o fluxo hidrodinâmico e as difusões líquida, capilar, superficial, de vapor e térmica. Os modelos semiteóricos se baseiam na Lei de Newton para resfriamento aplicada à transferência de massa, presumindo-se que as condições sejam isotérmicas e que a resistência à transferência de água se restrinja apenas à superfície do produto.

Entre os modelos semiteóricos, o modelo de Dois Termos (HENDERSON, 1974), o de Henderson et al.(1961) e o de Page (1949) e Midilli (2007) têm sido amplamente utilizados para produtos agrícolas (PANCHARIYA et al., 2002). De acordo com Queiroz, Pereira e Melo (1995) o método empírico consiste em formar grupos físicos adimensionais que podem ser facilmente investigados por experimentos de laboratório, e baseia-se nas condições externas, como temperatura, razão da mistura e velocidade do ar de secagem. Dentre esses modelos, tem-se o de Thompson, Peart e Foster (1968) e o de Wang e Singh (1978), tradicionalmente utilizados nos estudos de secagem de alimentos (MARTINAZZO et al., 2007).

As equações de 3 a 12, apresentam alguns dos modelos matemáticos empíricos de camada fina mais empregados para ajustar dados de secagem, assim denominados: Weibull (equação 3), Peleg (equação 4), Henderson-Pabis (equação 5), Logarítmica (equação 6), Wang e Sing (equação 7), Lewis (equação 8), Page (equação 9), Midilli (equação 10), Dois Termos (equação 11) e Aproximação por Difusão (equação 12).

$$X = X_e + (X_0 - X_e)\exp\left(-\frac{t}{k_1}\right) \quad (3)$$

$$X_0 = \left(\frac{t}{k_1 + k_2 t}\right) \quad (4)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e)k_2 \exp(-k_2 t) \quad (5)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e)(k_2 \exp(-k_2 t) + k_3) \quad (6)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e)(k_1 t^2 + k_2 t + 1) \quad (7)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e)\exp(-k_1 t) \quad (8)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e)\exp(k_1 t^{k_2}) \quad (9)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e)(\exp(k_1 t^{k_2}) + k_3 t) \quad (10)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e)(k_1 \exp(k_2 t) + k_3 \exp(k_4 t)) \quad (11)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e)(k_1 \exp(-k_2 t) + (1 - k_1)\exp(-k_2(k_3 t))) \quad (12)$$

onde,  $X$  é o conteúdo de umidade (kg/kg, b.s.),  $X_e$  é o conteúdo de umidade de equilíbrio (kg/kg, b.s.),  $X_0$  é o conteúdo de umidade inicial (kg/kg, b.s.),  $t$  é o tempo (s) e  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$  são as constantes de secagem (s,  $s^{-1}$ , adimensional).

Os modelos de cálculo da cinética de secagem são aplicados de modo diferente, dependendo do período considerado. Na literatura vários modelos foram propostos para analisar a secagem de produtos higroscópicos (MARTINAZZO et al., 2007).

Roca (2008) define que uma vez que os modelos baseados na segunda Lei de Fick não são rigorosamente representativos dos diversos mecanismos que prevalecem no transporte de água em produtos agrícolas, e a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem (temperatura e velocidade do ar), ou seja, não é intrínseca ao material, convencionou-se chamá-la de difusividade efetiva.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Preparo do Sistema de Secagem**

Os caules de Bananeira (*Musa spp.*) do tipo Nanica, foram obtidos na Vila Militar de São Luís - MA, localizada no bairro do Tirirical, durante o mês de outubro de 2020. Caules de aproximadamente 1,5m, dos quais foram retiradas as amostras utilizadas no presente estudo, foram extraídos e envoltos em papel filme para serem armazenados em freezer com temperatura de aproximadamente 5°C, até a realização dos testes de secagem, o que geralmente ocorria em até 48h após a extração. Os caules foram cortados em formato de pequenas placas e a seguir, definiu-se as amostras como A, B, C e D para facilitar a coleta de dados.

### **4.2 Local e Condições Experimentais**

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Petróleo e Sistemas Complexos do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da UFMA, localizado na cidade de São Luís, Maranhão.

Durante o procedimento de determinação da cinética de secagem, utilizou-se para a determinação das massas uma balança semianalítica modelo UX220H (Shimadzu, Japão), higrômetro modelo INS-28 (Instrusul, Brasil) e um desidratador de alimentos com circulação de ar forçado modelo PE14 (Pardal), com faixa de temperatura de até 75°C. Ao se executar o procedimento de determinação do teor de umidade, utilizou-se uma estufa de secagem e esterilização modelo TE 39311 (Tecnal), com faixa de 5 a 300°C e precisão de 0,5°C.

### **4.3 Secagem da fibra do caule de bananeira**

Amostras do caule da bananeira foram retiradas e cortadas em formato de pequenas placas discoides. Definiu-se as amostras como A, B, C e D, dispondo-as em placas de alumínio. Em seguida, realizou-se as medições das espessuras e diâmetros das amostras, em diferentes posições, com um paquímetro (Vis, Polônia). Cada conjunto de amostras foi seco separadamente em secador convectivo modelo PE14 (Pardal, Brasil) nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C. Durante o experimento foram mensuradas as massas e a umidade relativa, utilizando a balança semianalítica modelo UX220H (Shimadzu, Japão) e um higrômetro modelo INS-28 (Instrusul, Brasil), respectivamente, em intervalos de tempo de 5 minutos durante a primeira hora, 10 minutos após a segunda hora e a cada 30 minutos após a terceira hora, até atingir cinco horas de secagem.

A tabela 1 apresenta as características gerais das amostras utilizadas nos ensaios de secagem. Os ensaios ocorreram nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C com uma variação de  $\pm 2^\circ\text{C}$ .

Tabela 1 - Características das amostras de caule de bananeira utilizados na secagem

	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Área da seção transversal (m <sup>2</sup> )
<b>Média</b>	1,480	6,675	0,0052
Desvio-Padrão	0,1606	0,1708	0,0013

#### 4.4 Determinação do teor de umidade

Determinou-se também o teor de umidade relativa do caule utilizando-se uma estufa de secagem e esterilização na temperatura de 105°C/3,5h, sendo as amostras pesadas a cada 20 min em uma balança semianalítica, até alcançar peso constante. Para o cálculo do teor de umidade em base úmida e de umidade em base seca da amostra, foram empregadas as equações 13 e 14, respectivamente.

$$W_{bu}\% = 100 \left( \frac{m_{úmida} - m_{seca}}{m_{úmida}} \right) \quad (13)$$

$$X_{ss} = M_{amostra} \left( 1 - \left( \frac{W_{bu}\%}{100} \right) \right) \quad (14)$$

onde,  $W_{bu}$  é a umidade em base úmida em percentual,  $m_{úmida}$  é a massa da amostra úmida,  $m_{seca}$  é a massa da amostra após a secagem,  $X_{ss}$  é a umidade em base seca da amostra e  $M_{amostra}$  é a massa inicial da amostra no experimento de secagem. Efetuou-se a determinação da água evaporada no decorrer do experimento de secagem por meio da equação 15.

$$X_{evaporado} = \frac{X_0 - X_e}{X_0} \quad (15)$$

onde,  $X_{evaporado}$  é o percentual de líquido evaporado,  $X_0$  é a conteúdo de umidade inicial (kg/kg, b.s.) e  $X_e$  é o conteúdo de umidade no equilíbrio (kg/kg, b.s.).

#### 4.5 Modelagem Matemática

Para ajustar os dados experimentais, foram utilizados os seguintes modelos matemáticos empíricos de camada fina: Weibull (equação 3), Peleg (equação 4), Henderson-Pabis (equação 5), Logarítmica (equação 6), Wang e Sing (equação 7), Lewis (equação 8), Page (equação 9),

Midilli (equação 10), Dois Termos (equação 11) e Aproximação por Difusão (equação 12). Os ajustes dos modelos testados foram realizados por meio do software Matlab® 7.1 (The MathWorks Inc., Natick, MA, EUA), utilizando as temperaturas de 40, 50 e 60 °C.

#### 4.6 Coeficiente de Difusividade Efetiva e Energia de Ativação

Para o cálculo do coeficiente de difusividade efetiva utilizou-se a segunda lei de Fick para placa plana infinita, cilindro infinito e cilindro finito (CRANK, 1975), conforme apresentado nas equações (16), (17) e (18). Para isso utilizou-se o software interativo MATLAB versão R2019a, utilizando os dados experimentais de tempo (s) e umidade (kg/kg, b.s.) para cada temperatura, além das funções de Bessel para as geometrias de cilindro infinito.

$$Y_{(x,t)L} = \frac{C_{(x,t)} - C_{\infty}}{C_0 - C_{\infty}} = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\gamma_n L} e^{-\alpha \gamma_n^2 t} \cos(\gamma_n x) \quad (16)$$

onde:  $\gamma_{n=(2n+1)\frac{\pi}{2}}$

$$Y_{(r,t)C} = \frac{C_{(r,t)} - C_{\infty}}{C_0 - C_{\infty}} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\gamma_n R J_1(\gamma_n R)} e^{-\alpha \gamma_n^2 t} J_0(\gamma_n r) \quad (17)$$

onde:  $J_v$  é função de Bessel de primeira espécie de ordem  $v$  e  $\gamma_n$  tal que  $J_0(\gamma_n R) = 0$

$$Y_{(x,r,t)CF} = Y_{(x,t)L} Y_{(r,t)C} \quad (18)$$

A energia de ativação foi obtida por meio da linearização da relação tipo Arrhenius, que descreve a dependência da  $D_{ef}$  com a temperatura, conforme mostra a equação (19), onde  $D_{ef}$  é o coeficiente de difusão efetivo,  $D_0$  coeficiente de difusão máximo,  $E_A$  energia de ativação para difusão (J/mol),  $T$  temperatura (K) e  $R$  constante dos gases ideais (J/Kmol).

$$\ln D_{ef} = \frac{-E_a}{RT} + \ln D_0 \quad (19)$$

#### 4.7 Análise estatística

O coeficiente de determinação ajustados “ $R^2_{adj}$ ” (equação 20) e o erro médio relativo “ $MRE, \%$ ” (equação 21) foram empregados para avaliar a qualidade do ajuste e selecionar os melhores modelos matemáticos testados. (VILLA-VELEZ et al., 2012)

$$R^2_{adj} = 1 - \left( \frac{n-1}{n-n_p} \right) (1 - R^2) \quad (20)$$

$$MRE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_i - X_i^*}{X_i^*} \right| \quad (21)$$

onde,  $X_i^*$  representa os valores experimentais;  $X_i$  representa os valores estimados;  $n$  é o número de valores experimentais,  $m$  é o número de parâmetros estimados e  $R^2_{adj}$  é o coeficiente de determinação ajustado.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Secagem do caule da bananeira

Através da realização do experimento para determinação do teor de umidade, constatou-se, com auxílio das equações (13) e (14), que as fibras do caule da bananeira são constituídas de 94,63% de água, o que permite determinar a quantidade de sólidos secos, das amostras submetidas aos experimentos de secagem

Constatou-se que após cinco horas de secagem nenhuma das temperaturas alcançou a massa de equilíbrio. A tabela 2 apresenta os resultados de umidade  $X$  (kg/kg, b.s) obtidos experimentalmente. A taxa de secagem ( $dX/dt$ ), foi obtida através da relação entre a umidade, tempo e área da seção transversal média das amostras. Na figura 4 (a) observa-se o comportamento da taxa de secagem ( $dX/dt$ ) em função da umidade das fibras, e na figura 4 (b), a curva de secagem em função do tempo.

Através dos dados da tabela 2, constata-se que a temperatura de 60 °C possui a maior variação na redução da massa. Verificou-se ainda que a maior perda de água das amostras ocorreu na primeira hora de secagem. Por meio da figura 4 (a), nota-se que a secagem está ocorrendo a um período de taxa decrescente. Segundo Marcinkowski (2006), nesta fase a secagem ocorre devido à evaporação da água na superfície do sólido e do transporte de líquido do interior para o exterior. No caso de materiais fibrosos, se dá pela difusão através do sólido.

Calculou-se o percentual de água evaporado no decorrer de cada ensaio para os dados experimentais por meio da equação (15). Os resultados obtidos estão dispostos na tabela 3.

Tabela 2 - Valores de umidade X (kg/kg, b.s) ao longo do tempo, obtidos nos ensaios de secagem às temperaturas 40, 50 e 60°C.

Tempo (h)	X, bs 40°C	X, bs 50°C	X, bs 60°C
0,000	17,629	17,629	17,629
0,083	17,157	17,180	16,926
0,167	16,807	16,871	16,499
0,250	16,613	16,476	15,883
0,333	16,356	16,030	15,282
0,417	16,060	15,733	14,728
0,500	15,679	15,340	14,109
0,583	15,439	15,005	13,490
0,667	15,299	14,498	12,993
0,750	15,123	14,274	12,566
0,833	14,914	13,977	12,113
0,917	14,706	13,566	11,692
1,000	14,499	13,223	11,187
1,167	14,052	12,516	10,515
1,333	13,575	11,922	9,637
1,500	13,321	11,183	9,160
1,667	12,675	10,597	8,550
1,833	12,394	9,950	7,998
2,000	12,096	9,428	7,466
2,333	11,440	8,340	6,358
2,667	10,837	7,390	5,653
3,000	10,254	6,588	4,977
3,500	9,361	5,548	4,057
4,000	8,563	4,750	3,331
4,500	7,879	4,034	2,823
5,000	7,112	3,440	2,597

Fonte: Próprio autor (2021)

Tabela 3 - Quantidade de água retirada durante a secagem às temperaturas de 40, 50 e 60°C.

<b>Água evaporada</b>			
T (°C)	40	50	60
Redução do teor de umidade (Kg/Kg, b.s)	10,517	14,189	15,023
Redução do teor de umidade (%)	59,7%	80,5%	85,2%

Fonte: Próprio autor (2021)

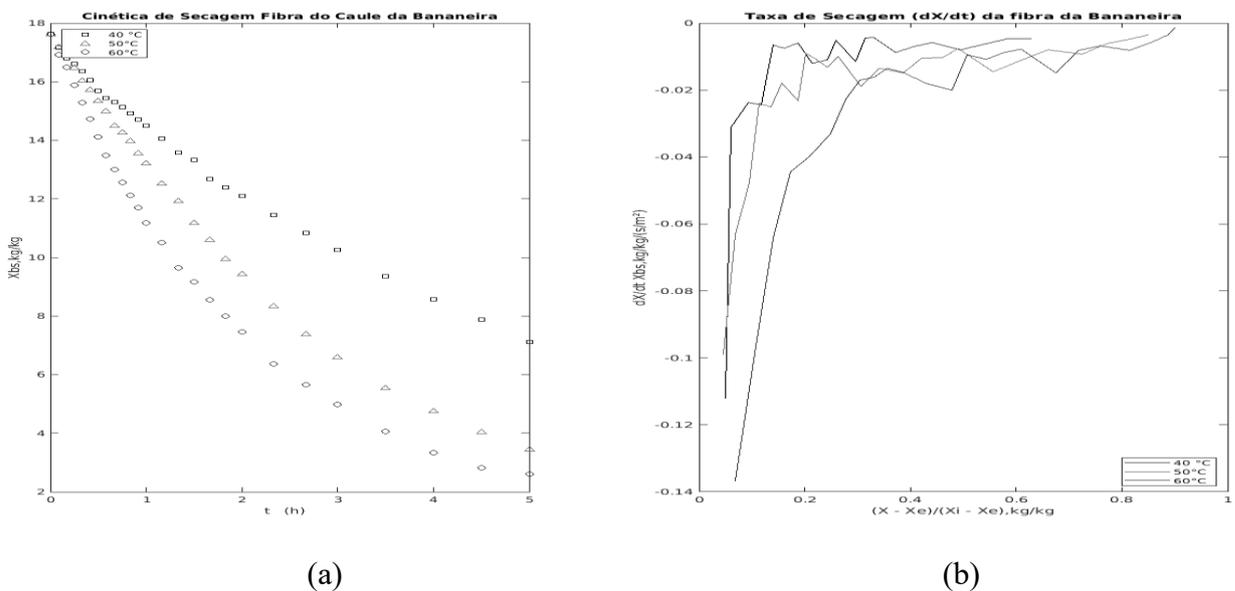


Figura 4 - Curvas das taxas de secagem ( $dX/dt$ ) em função da umidade do material ( $X_{bs}$ , kg/kg) para temperatura de 40(■), 50(▲), e 60°C (●). (a) e Curva das cinéticas de secagem da fibra de bananeira para temperatura de 40(■), 50 (▲), e 60°C (●) (b)

Fonte: Próprio Autor (2021)

Constatou-se que o processo foi bastante eficaz para secagem das fibras do caule da bananeira, uma vez que possibilitou grande remoção de líquido do material, principalmente na temperatura de 60°C, que atingiu aproximadamente 85% de remoção de umidade ao longo de 300 min. A temperatura de 40°C não seguiu o perfil por ter tido um menor teor de umidade retirado em comparação às outras temperaturas de estudo. Prato (2010) apresenta que quanto

mais distante da parte assintótica da curva menor o ajuste dos dados experimentais, o que sugere que a curva para a temperatura de 40°C após 5h de secagem ainda não estava próxima à parte assintótica da curva de secagem.

Santos (2018) conseguiu resultados satisfatórios para fibras de coco verde atingindo uma taxa de 98% de remoção de líquido após 600 min de secagem à temperatura de 60°C, demonstrando que tempos maiores permitem maiores reduções de umidade.

## **5.2 Ajustes aos modelos matemáticos dos dados de secagem das fibras do talo da bananeira**

Para ajustar os dados experimentais, empregou-se os modelos cinéticos de secagem em camada fina de Weibull, Peleg, Henderson-Pabis, Logarítmica, Wang e Singh, Lewis, Page, Midilli, Dois Termos e Aproximação por Difusão, aplicando-se as umidades iniciais ( $X_i$ ) e de equilíbrio ( $X_e$ ), determinadas no item 4.5. As tabelas 4 e 5 apresentam, a partir dos ajustes, os parâmetros cinéticos e estatísticos de cada um dos modelos, respectivamente, em todas as temperaturas de estudo.

De acordo com a tabela 5 todos os modelos experimentais ajustaram adequadamente os dados experimentais de secagem do caule de bananeira. Ainda assim, o modelo de Midilli ( $R^2_{adj} \geq 0,9994$  e  $RMSE \leq 0,0067$ ) e de Dois Termos ( $R^2_{adj} \geq 0,9993$  e  $RMSE \leq 0,0837$ ) acabaram apresentando resultados ligeiramente superiores considerando o conjunto de temperaturas testadas. De acordo com Panchariya et al. (2002) os modelos de Midilli, Page e Dois Termos são comumente utilizados para ajustar curvas de secagem de produtos agrícolas fibrosos, como é o caso da fibra de bananeira. Resultados semelhantes foram obtidos por Santos (2018) na secagem de fibras de coco verde e Moscon et al. (2017) quando estudaram a secagem de grãos de quinoa.

Tabela 4 - Parâmetros cinéticos estimados dos modelos de camada fina para secagem de fibra de caule de bananeira para as temperaturas de 40, 50 e 60°C.

Modelo	Parâmetros cinéticos	T °C		
		40	50	60
Weilbull	k	4,8925	2,8872	2,0539
Peleg	k <sub>1</sub>	0,2721	0,1873	0,1149
	k <sub>2</sub>	0,0424	0,0309	0,0416
Henderson-	k <sub>1</sub>	0,9838	1,0284	1,0043
Pabis	k <sub>2</sub>	0,1962	0,3640	0,4902
	k <sub>1</sub>	0,9681	1,1733	1,0106
Logarítmica	k <sub>2</sub>	0,2012	0,2810	0,4821
	k <sub>3</sub>	0,2718	-2,6684	-0,1308
Wang e Sing	k <sub>1</sub>	0,0156	0,0251	0,0470
	k <sub>2</sub>	-0,2013	-0,2970	-0,4090
Lewis	k <sub>1</sub>	0,2044	0,3446	0,4869
Page	k <sub>1</sub>	0,2164	0,3161	0,4842
	k <sub>2</sub>	0,9368	1,1319	1,0116
Midilli	k <sub>1</sub>	0,1877	0,3124	0,4825
	k <sub>2</sub>	0,8407	1,1162	1,0063
	k <sub>3</sub>	-0,3973	-0,0507	-0,0156
Dois Termos	k <sub>1</sub>	0,9796	1,4596	1,0562
	k <sub>2</sub>	0,1942	0,4631	0,4930
	k <sub>3</sub>	0,3298	-7,6459	-0,8586
Aproximação por Difusão	k <sub>4</sub>	10,4438	0,9039	0,5520
	k <sub>1</sub>	0,9830	1,0228	1,0037
	k <sub>2</sub>	0,1970	0,3478	0,4881
	k <sub>3</sub>	-0,7896	-2,0918	-1,2713

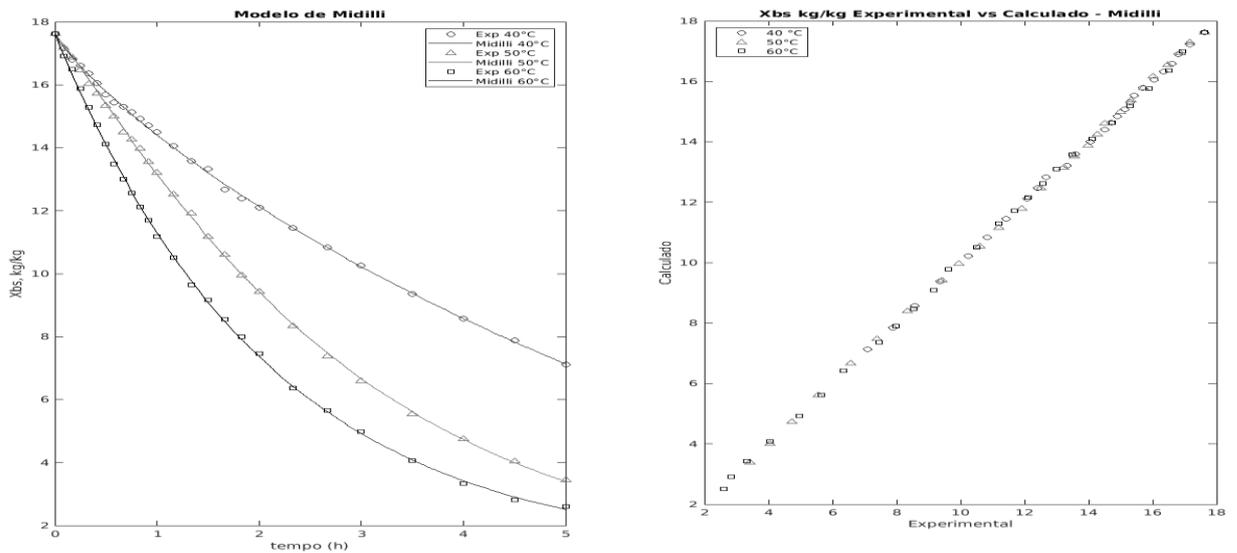
Fonte: Próprio autor (2021)

Tabela 5 - Parâmetros estatísticos estimados dos modelos de camada fina para secagem de fibra de caule de bananeira para as temperaturas de 40, 50 e 60°C.

Modelo	Parâmetros estatísticos	T °C		
		40	50	60
Weibull	$R^2_{adj}$	0,9964	0,9931	0,9996
	$RMSE$	0,1733	0,3499	0,0893
Peleg	$R^2_{adj}$	0,9982	0,9977	0,9986
	$RMSE$	0,1210	0,1983	0,1609
Henderson-Pabis	$R^2_{adj}$	0,9989	0,9959	0,9996
	$RMSE$	0,0921	0,2648	0,0838
Logarítmica	$R^2_{adj}$	0,9989	0,9989	0,9996
	$RMSE$	0,0916	0,1318	0,0888
Wang e Sing	$R^2_{adj}$	0,9953	0,9997	0,9934
	$RMSE$	0,1924	0,0701	0,3566
Lewis	$R^2_{adj}$	0,9964	0,9931	0,9996
	$RMSE$	0,1733	0,3499	0,0893
Page	$R^2_{adj}$	0,9987	0,9996	0,9996
	$RMSE$	0,1025	0,0771	0,0829
Midilli	$R^2_{adj}$	0,9994	0,9997	0,9996
	$RMSE$	0,0043	0,0053	0,0067
Dois Termos	$R^2_{adj}$	0,9993	0,9999	0,9996
	$RMSE$	0,0696	0,0477	0,0837
Aproximação por Difusão	$R^2_{adj}$	0,9989	0,9978	0,9996
	$RMSE$	0,0919	0,1891	0,0814

Fonte: Próprio autor (2021)

As figuras 5 e 6 apresentam respectivamente os ajustes aos dados experimentais obtidos com os modelos de Midilli e Dois Termos. Os demais modelos e seus ajustes são apresentados no Apêndice A.



-Figura 5 - Ajuste do modelo de Midilli aos dados experimentais de secagem de caule de banana nas temperaturas de 40 (●), 50(▲) e 60 °C (■) e gráfico comparativo de resíduos e dados experimentais.

Fonte: Próprio autor (2021)

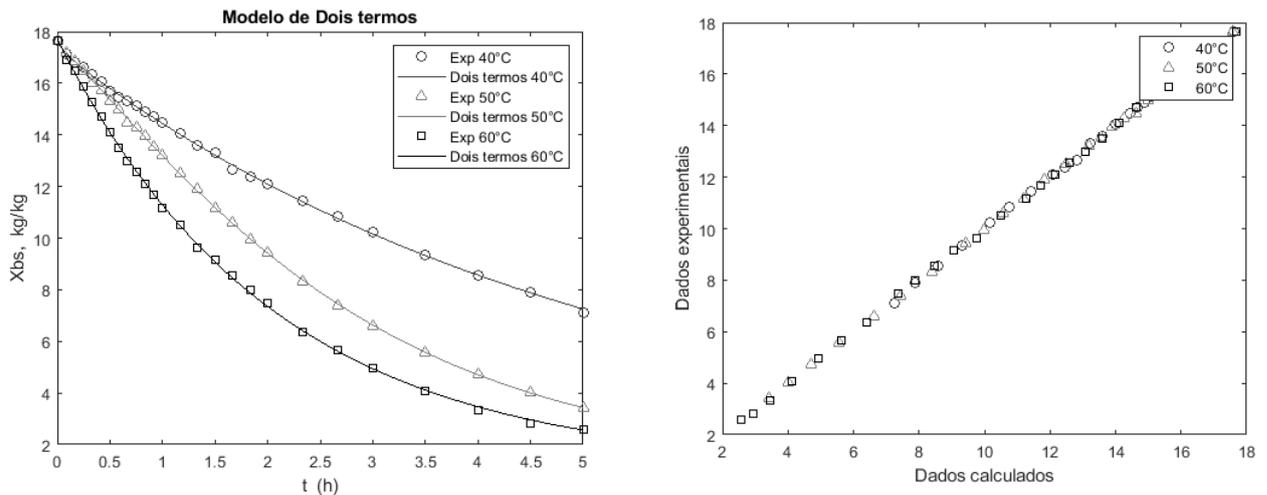


Figura 6 - Ajuste do modelo de Dois Termos aos dados experimentais de secagem de caule de banana nas temperaturas de 40°C (●) 50 (▲) e 60 °C (■) e gráfico comparativo de resíduos e dados experimentais.

Fonte: Próprio autor (2021)

Ao utilizar os parâmetros cinéticos contidos na tabela 4, foi possível realizar para o modelo de Midilli, buscando prever a que momento atingiriam a unidade de equilíbrio. Verificou-se então que para às temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C a unidade de equilíbrio seria atingida por volta de 10,66h, 9h e 8,33h respectivamente. O modelo foi selecionado por representar melhor o sistema e ser o mais utilizado em secagem de produtos agrícolas.

Analisando-se os dados, constata-se que a temperatura de 40°C estava mais longe da

umidade de equilíbrio após corridas 5h de secagem. Esta afirmação justifica o menor ajuste da curva de 40°C em todos os modelos e o formato menos assintótico. A figura 7 apresenta o comportamento da curva de secagem com os dados expandidos.

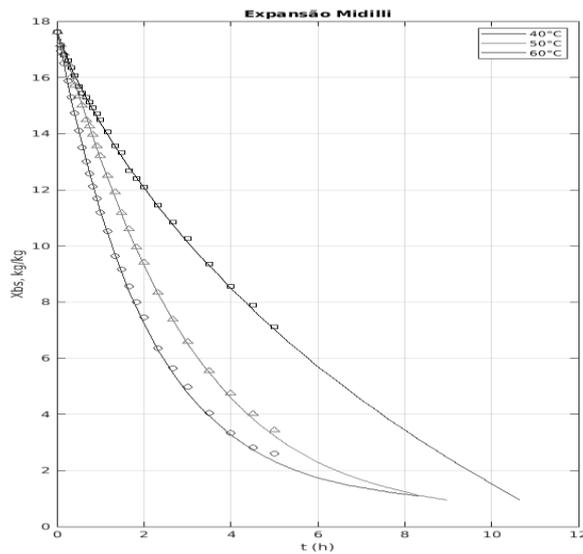


Figura 7 - Expansão do modelo de Midilli para as temperaturas de 40 (●), 50(▲) e 60 °C (■).

Fonte: Próprio autor (2021)

### 5.3 Coeficientes de Difusividade e Energia de ativação em diferentes geometrias

Os coeficientes de difusividade e a energia de ativação foram determinados para as geometrias de placa infinita, cilindro infinito e cilindro finito, como descrito no item 4.6. Para determinar os coeficientes de difusão, utilizou-se o software MATLAB, ajustando os dados da secagem aos modelos de cada uma das geometrias. Os resultados estão apresentados na tabela 6 e o código-fonte do programa no Apêndice B. O modelo utilizando uma geometria de placa infinita (figuras 8a, 8b e 8c) apresentou um ajuste melhor aos dados experimentais de secagem, com coeficiente de determinação ajustado em torno de 90%.

Tabela 6 - Coeficientes de difusão efetiva ( $D_{ef}$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) calculados para as geometrias de placa infinita, cilindro infinito e cilindro finito, na secagem de talos de bananeira às temperaturas de 40, 50 e 60°C.

Geometria	T (°C)	$D_{ef}$ (m <sup>2</sup> /s)	$R^2$	$R^2_{adj}$	Erro Abs
Cilindro finito	40	$2,08 \times 10^{-11}$	0,6608	0,6466	2,4354
	50	$3,13 \times 10^{-11}$	0,9033	0,9033	1,8392
	60	$4,13 \times 10^{-11}$	0,8787	0,8787	2,1884
Placa infinita	40	$1,92 \times 10^{-09}$	0,8108	0,803	1,8129
	50	$3,01 \times 10^{-09}$	0,9608	0,9591	1,1033
	60	$4,06 \times 10^{-09}$	0,9457	0,9434	1,4398
Cilindro infinito	40	$2,08 \times 10^{-11}$	0,6618	0,6477	2,4258
	50	$3,13 \times 10^{-11}$	0,9035	0,8995	1,8342
	60	$4,13 \times 10^{-11}$	0,8789	0,8738	2,1854

Fonte: Próprio autor (2021)

A tabela 6 mostra que o coeficiente de difusividade efetivo aumenta com o aumento da temperatura, efeito também observado por Gomes et al. (2017) usando folhas de capim-cidreira, e Silva et al. (2017), ao estudar sementes de uva bordô. De acordo com Madamba et al. (1996), os produtos agrícolas costumam ter coeficientes de difusividade efetivos na ordem de  $10^{-12}$  a  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. Os valores aqui obtidos para o coeficiente de difusividade da secagem de caule e fibra de bananeira situaram-se na faixa de  $4,13 \times 10^{-11}$  e  $1,92 \times 10^{-09}$ , e podem ser atribuídos à composição química do caule, menos rica em carboidratos, facilitando a passagem de água entre os tecidos do caule durante o processo de secagem, trazendo resultados semelhantes aos encontrados na literatura para outros tipos de fibra.

Determinando-se a difusividade para os dados obtidos numericamente com a expansão do modelo de Midilli (figura 7) se obteve resultados de aproximadamente 2% (desvio de 0,0026) dos valores determinados somente com os dados determinados experimentalmente.

Segundo Crank (1975), a geometria da amostra pode afetar a secagem, uma vez que a difusão pode ser radial, para o caso de cilindros, ou no sentido da espessura, para o caso de uma placa. A amostra se assemelhava a um cilindro finito, portanto os testes em geometrias diversas conseguiram apresentar que o modelo para placa infinita representava maior o sistema, uma vez que as partículas de água devem atravessar os tecidos da fibra no sentido da espessura da amostra, justificando valores bem próximos entre as difusividades do cilindro infinito e cilindro

finito, porém com ajustes menores em relação ao modelo de placa infinita.

A determinação da energia de ativação foi feita a partir dos coeficientes de difusividade efetiva em função da temperatura, usando a equação de Arrhenius. Seus valores variaram de 29,7961 a 32,3910 kJ/mol, a depender da geometria testada. A tabela 7 apresenta os valores de energia de ativação para cada geometria, bem como seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ). A figura 7 apresenta o ajuste para a geometria de placa infinita, que gerou os maiores coeficientes de determinação, e, portanto, um melhor ajuste da geometria ao modelo de secagem baseado na segunda lei de Fick. Os demais ajustes às geometrias e correlação entre as difusividades estão apresentados no apêndice C

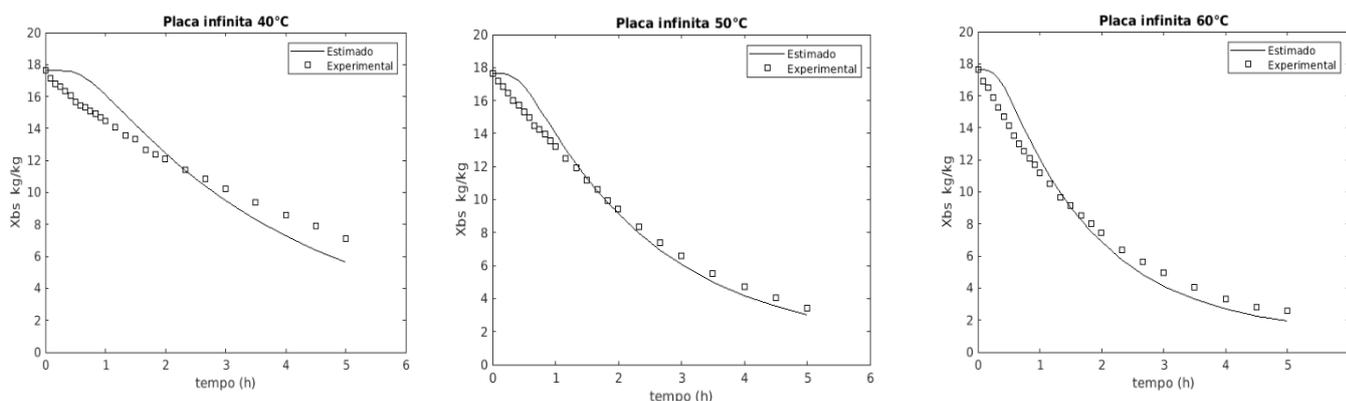


Figura 8 - Comparativo entre dados experimentais (■) e estimativa pela solução de CRANK (1975) para o modelo difusivo de placa infinita (-) à 40°C (a), 50°C (b) e 60°C (c).

Fonte: Próprio Autor (2021)

Segundo Corrêa et al. (2007), a energia de ativação indica a facilidade com que as moléculas de água superam as barreiras de tecido durante a migração no interior do produto. Logo, quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade de água no produto.

A geometria de cilindro finito é calculada como um produto entre a aproximação da solução da segunda lei de Fick para placa infinita e cilindro infinito. A sobreposição de valores do cilindro infinito com o cilindro finito demonstra que a secagem acontece, majoritariamente, no sentido da espessura da amostra. (CRANK, 1975)

A tabela 7 apresentou os valores da energia de ativação para cada geometria, considerando a constante dos gases reais ( $R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), com valor médio na faixa de  $30 \text{ kJ mol}^{-1}$ ,

em consonância com o que descreve a literatura, conforme Zogzas et al. (1996), que afirmou que produtos agrícolas possuem valores de energia de ativação entre 12,7 a 120,0 kJ/mol.

Tabela 7 - Energia de ativação (Ea), fator pré-exponencial (D0) e coeficiente de correlação (R<sup>2</sup>) para a secagem de caule de bananeira em diferentes geometrias e temperaturas de 40, 50 e 60°C.

Geometria	Ea (kJ/mol)	D <sub>0</sub> (m <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>
Cilindro Finito	29,7961	1,99 x 10 <sup>-06</sup>	1,0000
Placa Infinita	32,3910	5,00 x 10 <sup>-04</sup>	0,9906
Cilindro Infinito	29,7961	1,99 x 10 <sup>-06</sup>	0,9918

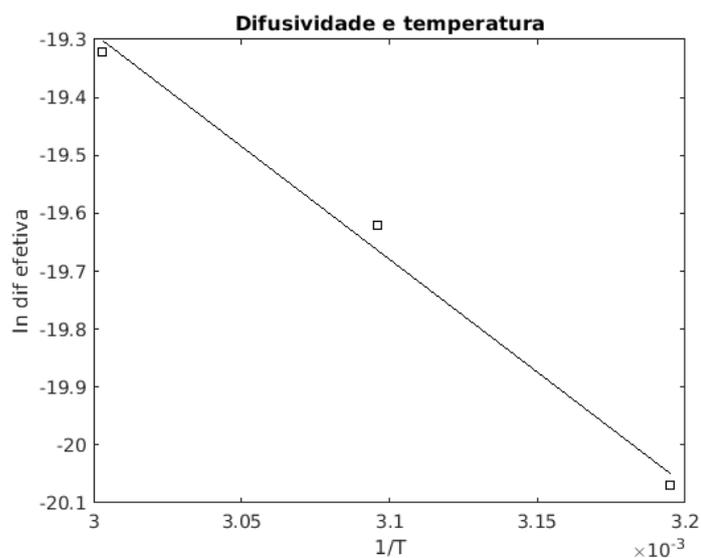


Figura 9 - Ajuste linear do logaritmo da difusividade efetiva em função do inverso da temperatura para geometria de placa plana.

Fonte: Próprio autor (2021)

## 6 CONCLUSÕES

Ainda que apresentasse elevado teor de água (94,63 %), a secagem mostrou-se uma opção viável para redução do teor de água das fibras do caule da bananeira. À temperatura de 60 °C e tempo de secagem de aproximadamente 5 horas, foi possível uma redução de 85% do teor inicial de umidade.

Com o estudo da cinética de secagem às temperaturas de 40, 50 e 60 °C, verificou-se que o processo de secagem ocorreu através de um período de taxa decrescente, com a evaporação do líquido acontecendo principalmente na superfície do material.

Os modelos matemáticos testados permitiram, em geral, um bom ajuste aos dados experimentais em todas as temperaturas. No entanto, os modelos em camada fina de Midilli e Dois Termos apresentaram resultados ligeiramente superiores aos demais.

A partir dos dados experimentais, também foi possível calcular o coeficiente de difusividade efetiva para a secagem do caule da bananeira. A partir de uma geometria de placa plana, a que melhor representou o sistema estudado.

Desta forma, o presente trabalho pode se apresentar como base para a realização de estudos mais aprofundados da secagem do caule da bananeira, de forma a conhecer as propriedades termodinâmicas e analisar outras variáveis que possam influenciar no processo, como a velocidade do ar e a espessura do material, possibilitando assim a apresentação de um sistema de tratamento que propicie sua reutilização.

## REFERÊNCIAS

- AFONSO JÚNIOR, P. C. **Aspectos físicos, fisiológicos e de qualidade do café em função da secagem e do armazenamento**. Viçosa: UFV, 2001. 373p. Tese Doutorado.
- AFONSO JÚNIOR, P. C. CORRÊA, P. C. **Descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental. P.349-353. 1999.
- AKPINAR, E. K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. **Thin layer drying of red pepper**. Journal of Food Engineering, v.59, p.99-104, 2003.
- ANDRADE, S. A. et al. **Desidratação osmótica do jenipapo (*Genipa americana L.*)**. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 23, n. 02, p. 276-281, 2003.
- ARÉVALO-PINEDO, A.; MURR, F. E. X. **Influência da pressão, temperatura e pré-tratamentos na secagem a vácuo de cenoura e abóbora**. Universidade de Campinas. Campinas. 2005.
- AZOUBEL, P. M. SILVA, F. O. da; **Optimization of osmotic dehydration of ‘Tommy Atkins’ mango fruit**. International Journal of Food Science & Tecnology. v.43. p.1276-1289. 2008.
- BADRELDIN, H. A.; WABEL, N. A.; BLUNDEN, G. **Phytochemical, pharmacological and toxicological aspects of Hibiscus sabdariffa L.: a review**. Phytotherapy Research, v. 19, p. 369 – 375, 2005.
- BAIG, M. M. V. et al. Saccharification of banana agro-waste by cellulolytic enzymes. **African Journal of Biotechnology**, Abraka, v. 3, n. 9, p. 447-450, 2004.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. et al. **Water activity in foods: fundamentals and applications**. Ames: Blackwell Publishing Profesional, 2007. 100 p.
- BEZERRA, L. J. D; SOUZA, E. C. de; **Estudo bromatológico da bananeira (musa sp) e sua utilização na alimentação de bovinos**. Paraíba. 2016;
- BEZERRA, F. T . C. G. **Estudo das propriedades mecânica de concretos de cimento Portland com a incorporação da cinza de bananeira**. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pau dos Ferros. 2019.
- BEZERRA-LIMA, M. **Banana em foco**. Brasília, DF: Embrapa, 2004. Disponível em: <[www.cnpmf.embrapa.br](http://www.cnpmf.embrapa.br)>. Acesso em: 20 fev. 2010.
- BRENNAN, J. G. **Food processing handbook**. Weinheim: Wiley-VCH, 2006. 119 p.
- BRENT-HAMMOND, J. et al. **Alcohol from bananas**. Bioresource Technology, Essex, v. 56, n. 1, p. 125-130, 1996.
- BORGES, T. da S. **Utilização da fibra de bananeira como adsorvente em derramento de petróleo**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Bahia. Salvador. 2015.

BOUALLAGUI, H. et al. **Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes**. Process Biochemistry, Vandoeuvre-les-Nancy, v. 40, n. 3-4, p. 989-995, 2005.

BOYER, P. D. **The enzymes**. 4. ed. New York: Academic Press, 1973. 543 p.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450p.

CANCHÉ-ESCAMILLA, G. et al. **Obtención de celulosa a partir de los desechos agrícolas del banano**. Información Tecnológica, Costa Rica, v. 16, p. 83-88, 2005.

CARBONERA, L. et al. **Determinação experimental da difusividade térmica de uma massa de tomate comercial**. Brazilian Journal of Food Technology, v.6, n.2, p.285-90, 2003.

CARVAJAL-ZARRABAL, O; et al. **The consumption of *Hibiscus sabdariffa* dried calyx ethanolic extract reduced lipid profile in rats**. Plant Foods for Human Nutrition, vol. 60, no. 4, pp. 153–159, 2005.

CAULFIELD, D.; MOORE, W. E. Effect of varying crystallinity of cellulose on enzyme hydrolysis. **Wood Science**, Kyoto, v. 6, p. 375-379, 1974.

CHANG, V. S.; HOLTZAPPLE, M. T. **Fundamental factors affecting biomass enzymatic reactivity**. Applied Biochemistry and Biotechnology, Duluth, v. 84-86, n. 1-9, p. 5-37, 2000

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO A. P.; GONELI, A. L. G.; BOTELHO, F. M. **Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas**. Engenharia Agrícola, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.

COSTA, A. S. **Tingimento da celulose produzida do pseudocaule da bananeira (*Musa sp*) com corantes naturais**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2010.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. Clarendon Press. Oxford. 1975.

CRONQUIST, A. The divisions and classes of plants. Botanical Review, New York, v. 26, n. 4, p. 425-482, 1981.

DEVOUARD, A. Taxonomía de bananos. Disponível em: <<http://www.inibap.org>>. Acesso em: 20 jun 2021.

DOYMAZ; I.; PALA, M. **The thin-layer drying characteristics of corn**. Journal of Food Engineering, v.60, p.125-130, 2003.

DUKE, J.A., 1983. **Handbook of Energy Crops**. Centre for new crops and plants products. Purdue University, Indiana.

FARIA, R. Q. TEXEIRA, I. R.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R.; RESENDE, O. **Cinética de secagem de sementes de crambe**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.16, n.5, p.573 – 583, 2012

FERREIRA, M. F; PEREIRA, R.S. **Estudo da secagem da casca do maracujá amarelo**. Revista brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.12, n-1, p.15-28, 2010.

FIGLIANO, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. João Pessoa: Editora UFPB, 2004. 229 p.

GEANKOPLIS, C. J. **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**. México: CECSA, 1998.

GOMES, N. H. F.; SILVA NETO, H. C. DA; ALVES, J. J. L.; RODOVALHO, R. S.; SOUSA, C. M. **Cinética de Secagem de Folhas de *Cymbopogon Citratus***. ENGEVISTA, V. 19, n.2, p. 328-338, Maio 2017

GUYLE'NE, A. PARFAIT, B. FAHRASMANE, L. **Bananas, raw materials for making processed food products**. Université des Antilles et de la Guyane. Trends in Food Science & Technology. P. 78-91. 2005

HENDERSON, S. M. **Progress in developing the thin layer drying equation**. Transactions of the ASAE, v.17, n.6, p.1167-1172, 1974.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I. **Temperature effect on drying coefficient**. Journal of Agriculture Engineering Research, v.6, n.3, p.169-174, 1961.

HENDRIKS, A. T. W.; ZEEMAN, M. G. **Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass**. Bioresource Technology, Trivandrum, v. 100, p. 10-18, 2009.

HOFISKY V. A. **Cinética de secagem do resíduo de abacaxi enriquecido**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.17, n.6, p.640–646, 2013.

INTERNATIONAL PLANT GENETIC RESOURCES INSTITUTE (IPGRI). Descriptors for Banana (Musa spp). 2001. Disponível em: <[http://staff.aub.edu.lb/~webeco/ipgri\\_international.htm](http://staff.aub.edu.lb/~webeco/ipgri_international.htm)>. Acesso em: 01 jan. 2021.

JANJAI, S.; et al. **Diffusivity, shrinkage and simulated drying of litchi fruit (*Litchi chinensis* Sonn.)**. Journal of Food Engineering, v.96, p.214-221, 2010.

KOOLI, S.; FHADEL, A.; FARHAT, A.; BELGHIT, A. **Drying of red pepper in open sun and greenhouse conditions mathematical modeling and experimental validation**. J. Food Engineering, (79) 1094-1103, 2007.

KROKIDA, M.K.; KARATHANOS, V.T.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. **Drying kinetics of some vegetables**. Journal of Food Engineering, London, v.59, n.4, p.391-403, 2003.

LASER, M. et al. A comparison of liquid hot water and steam pretreatments of sugar cane bagasse for bioconversion to ethanol. **Bioresource Technology**, Trivandrum, v. 81, p. 33-44, 2002.

LIU, S. X. **Food and agricultural wastewater utilization and treatment**. New York: Blackmell Publishing Professional, 2007. 20 p.

MADAMBIA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. **The thin layer drying characteristic of garlic slices**. Journal of Food Engineering, London, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.

MAHADEVAN, N; et al. **Hibiscus sabdariffa Linn – an overview**. Natural Product Radiance. v.8. 2009. p.77-83.

MARCINKOWSKI, E. de A. **Estudo da Cinética de Secagem, Curvas de Sorção e Predição de Propriedades Termodinâmicas da Proteína Texturizada de Soja**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

MARTINAZZO, A. P. et al. **Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 11, n. 03, p. 301-306, 2007.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAZ, Z. **A new model for single-layer drying**. *Drying Technology*, (20) 1503-1513, 2002.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. **A thin layer drying model of parboiled wheat**. Journal of Food Engineering, v.66, n.4, p.513-518,2005.

MORAIS, S. J. M. **Cinética de secagem de grãos de feijã caupi**. 2010. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Goiás, Goiás, 2010.

MORTON, J.F., 1987. **Roselle**. Fruits of warm climates. Published by Morton, J.F., Miami.

MOSCON, E. S.; MARTIN, S.; SPEHAR, C. R.; DEVILLA, I. A.; RODOLFO JUNIOR, F. **Cinética de Secagem de Grãos de Quinoa (Chenopodium Quinoa W.)**. Revista Engenharia na Agricultura. V.25, n.04, p.318-328, 2017.

MOSIER, N. et al. **Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass**. Bioresource Technology, Trivandrum, v. 96, p. 673-686, 2005.

OLIVEIRA, E.G. et al. **Optimization of Spirulina platensis convective drying: evaluation of phycocyanin loss and lipid oxidation**. International Journal of Food Science & Technology, v.45, p.1572-1578, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02299.x>>. Acesso em: 13 jul. 2013.

OLIVEIRA E SILVA, S. et al. Banana breeding program at Embrapa. Crop Breeding and Applied Biotechnology, Viçosa, v. 1, n. 4, p. 399-436, 2001.

OLIVEIRA, R.A.; OLIVEIRA, W.P.; PARK, K.J. **Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória**. Engenharia Agrícola, v.26, n.1, p.181-9, 2006.

OKAZAKI, V. H. A. **Material de apoio para a elaboração de monografia/TCC**. fev. 2013. Disponível em: <<http://okazaki.webs.com/>>. Acesso em: 25 abr. 2016.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. Indiana: Purdue University, 1949. M. Sc. Thesis

PALOMARES, S. G.; ESPINOSA, M. E.; LEYVA, J. F. G.; GONZALES, I. A. **Effect of the temperature on the spray drying of Roselle Extracts (Hibiscus sabdariffa L.)**, Plant Foods Hum. Nutr., v. 64, p. 62-67, 2009.

PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. **Thin-layer modeling of black tea drying process**. Journal of Food Engineering, v.52, p.349-357, 2002.

PARK, K. J.; VOHNIKOZA, Z.; BROD, F. P. R. **Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa L.*)**. Journal of Food Engineering, v. 51, n. 03, p. 193-199, 2002.

PEREZ, L. G. et al. **Cinética de secagem da polpa cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) pré desidratada por imersão-impregnação**. Revista Ciência Agrônoma. v. 44, n.1, p. 102-106, jan-mar, 2013.

PINHEIRO, E. M. **Estudo da qualidade nutricional e de ferro total da folha de vinagreira (*Hibiscus sabdariffa*) comercializada na cidade de São Luís - MA**. São Luís. Monografia (Graduação em Nutrição), UFMA, 2008.

PRATES, M.F.O. **Cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (fruta-de-lobo)**. Rev. Bras. Pl. Med., Botucatu, v.14, n.3, p.514-521, 2012.

PRATES, M. O.; PIZZILOLO, T. A.; TÔRRES, A. G.; MELO, C. E. **Modelagem matemática de um sistema de secagem de plantas medicinais e aromáticas**. Engenharia na Agricultura, Viçosa, v.15, n.2, p. 96-108, 2007.

PRATO, T. S. **Influência da secagem sobre compostos medicinais e de pungência do gengibre**. 87 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, 2010.

QUEIROZ, D. M.; PEREIRA, J. A. M.; MELO, E. C. **Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos**. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1995. 59 p.

RADÜNZ, L.L.; et al. **Análise da cinética de secagem de folhas de sálvia**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.14, n.9, p.979-986, 2010

RAJEEV, K. S. et al. Cellulase production using biomass feed stock and it's application in saccharification for bio-ethanol production. **Renewable Energy**, Oxford, v. 34, p. 421-424, 2009.

RANGEL, A.; CAMPOS PENTEADO, L. A.; MONCORVO TONET, R. Banana (*Musa sp.*). Disponível em: <<http://www.agrobyte.com.br/banana.htm>>. Acesso em: 10 nov. 2020.

REIS, R.C. et al. **Modelagem matemática da secagem da pimenta cumari do Pará**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, n.4 p.347-53, 2011.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; RODRIGUES, S. **Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*)**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v.10, p.17-26, 2008.

RIBAS, A. I.; CÁNOVAS, G. V. B.; GARZA, S. G.; AÑÓ, V. G. **Métodos experimentales en la ingeniería alimentaria**. Zaragoza: Acribia, 2000. 292p.

ROCA, E. et al. **Effective moisture diffusivity modeling food structure and hygroscopicity**. Food Chemistry, v. 106, n. 4, p. 1428-1437, 2008.

ROMANINI, J. A. et al. **Avaliação da inoculação de rizóbio e adubação nitrogenada no desenvolvimento do feijoeiro, sob sistema plantio direto.** Bioscience Journal, Uberlândia, DF, V.23. Nº4, p 74 a 82. 2007.

ROMERO-PEÑA, L. M.; KIECKBUSCH, T. G. **Influência de condições de secagem na qualidade de fatias de tomate.** Brazilian Journal of Food Technology, v. 06, n. 01, p. 69-76, 2003.

SANTOS, T. C. P. **Estudo de cinética de secagem das fibras do coco verde.** São Luís, 2018. Universidade Federal do Maranhão. 2018. 49p.

SARAVACOS, G. D.; MAROULIS, Z. B. **Transport properties of food.** New York: Marcel Dekker, 2001. 415p.

SEBRAE. **Estudos de mercado sebrae/espm 2008, banana relatório completo.** Sistema Brasileiro de Apoio ao Empreendedorismo. São Paulo. 2008;

SILVA, M. P. SALVADOR, A. T. SGORLON, J. G. GOMES, M. C. S. MENEZES, M. L. **Determinação da difusividade e da energia de ativação de sementes de uva bordô.** Congresso brasileiro de engenharia química. Universidade de São Carlos. São Carlos. 2017.

SINGH, S., RAINA, C. S., BAWA, A. S., & SAXENA, D. C. **Effect Of Pretreatments On Drying And Rehydration Kinetics And Color Of Sweet Potato Slices.** Drying Technology. 24, p. 1487e1494. 2006.

SOUSA, Luiz H. A.; CAMARGO, Felipe R.; GAVA, Maristela. **Produção de painel mdp a partir de fibras de bananeira.** Universidade Nacional do Noroeste. Buenos Aires, Argentina. 2017.

STEINER, R. **Utilización energética de residuos orgánicos en la industria bananera, cafetalera e azucarera en Costa Rica.** Costa Rica: Fachhochschule Nordwestschweiz Hochschule Fur Life Sciences, 2006. 25 p.

TSAI, P.J. et al. **Anthocyanin and antioxidant capacity in roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) extract.** Food Research International, v.35, p.351, 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963-996901001296>>. Acesso em: 12 jul. 2013.

TSENG, T.H. et al. **Protective effects of dried flower extracts of *Hibiscus sabdariffa* L. against oxidative stress in rat primary hepatocytes.** Food and Chemical Toxicology, v.35, p.1159-1164,1997. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278691597854683>>. Acesso em: 12 jul. 2010.

THOMPSON, T.L.; PEART, R.M.; FOSTER, G.H., **Mathematical simulation of corn drying—a new model.** Transcrição:ASAE, 11(4):582–586. 1968.

VELÁSQUEZ-ARREDONDO, H. I.; RUIZ-COLORADO, A. A.; OLIVEIRA JUNIOR, S. **Ethanol production process from banana fruit and its lignocellulosic residues: energy analysis.** Energy, Oxford, v. 35, n. 7, p. 3081-3087, 2010.

VILLA-VÉLEZ, H.A. Aplicações de Secagem Para o Aproveitamento de Resíduos da Banana, Visando Sua Aplicação na Indústria. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. São José do Rio Preto, 2011. Disponível em: <[http://200.145.6.238/bitstream/handle/11449/90754/villavelez\\_ha\\_me\\_sjrp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://200.145.6.238/bitstream/handle/11449/90754/villavelez_ha_me_sjrp.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: Maio de 2018.

VILELA, C. A. A.; ARTUR, P. O. **Secagem do açafrão (*Curcuma longa L.*) em diferentes cortes geométricos**. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.28, p.387- 394, 2008.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. **Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying**. Transaction of ASAE, v.11, n. A, 1978.

WEN-HSING, C. et al. Kinetic study of biological hydrogen production by anaerobic fermentation. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 31, p. 2170-2178, 2006.

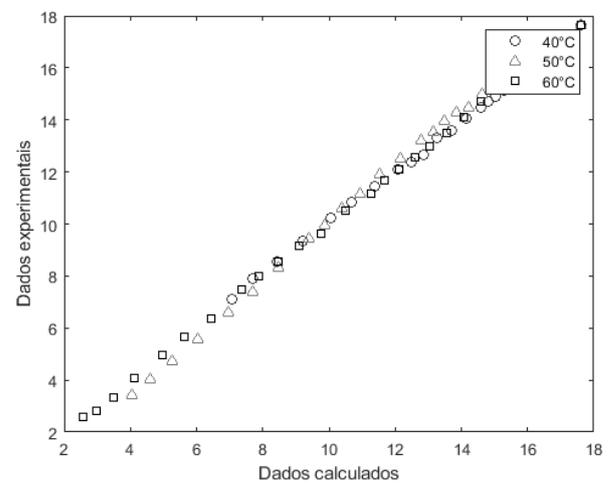
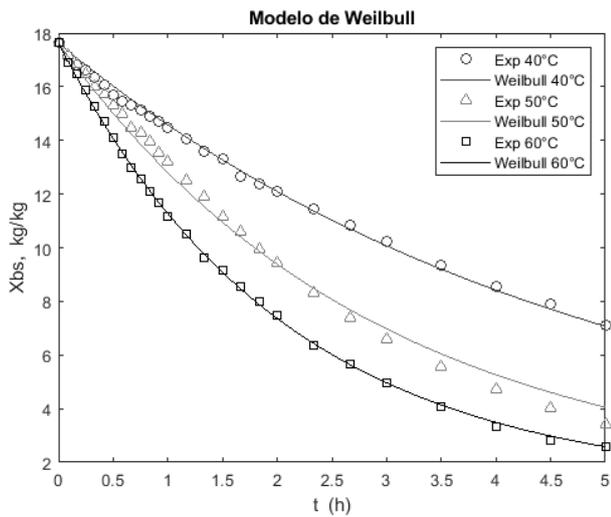
WILKINS, M. R. **Effect of orange peel oil on ethanol production by *Zymomonas mobilis***. Biomass and Bioenergy, Oxford, v. 33, p. 538-541, 2009.

ZHANG, P. et al. **Banana starch: production, physicochemical properties, and digestibility-a review**. Carbohydrate Polymers, Barking, v. 59, p. 443-458, 2005.

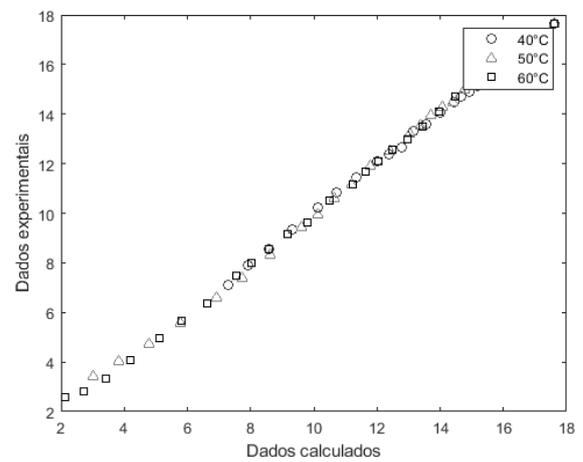
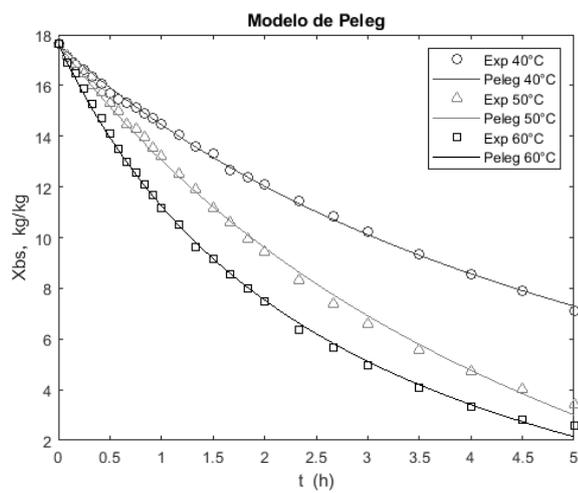
ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. **Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs**. Drying Technology, v.14, p.2225-2253, 1996.

## APÊNDICE A – Gráficos dos diferentes modelos matemáticos usados para representar os dados experimentais de secagem do caule e fibra de bananeira

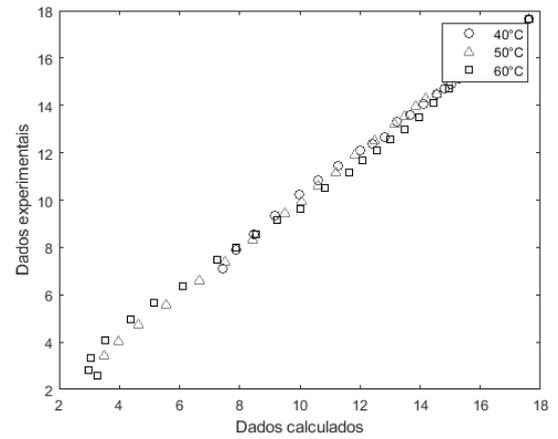
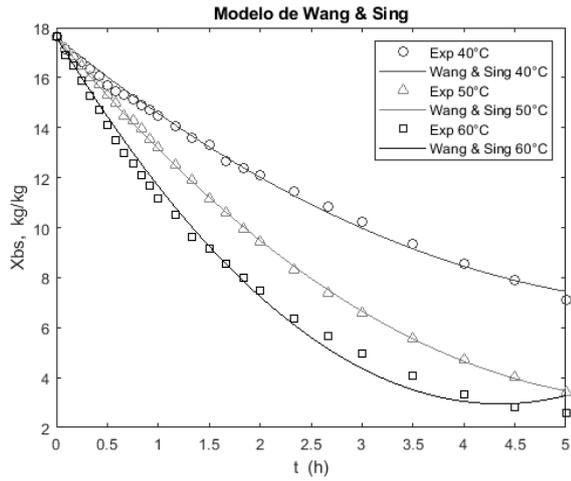
### Weibull



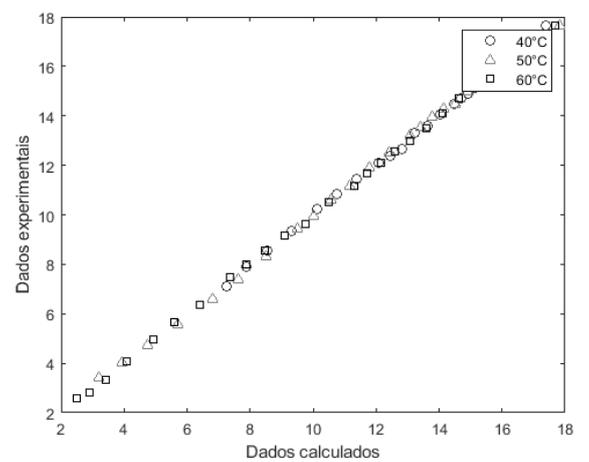
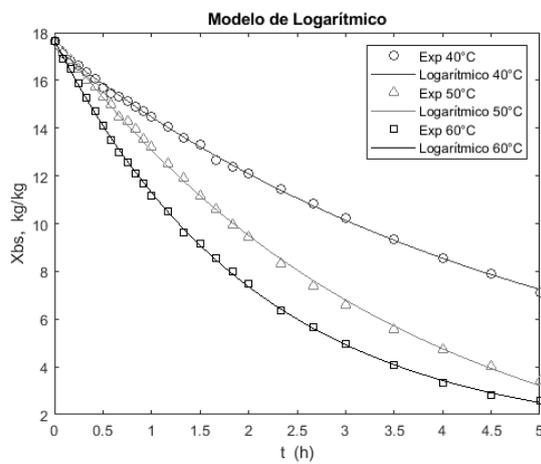
### Peleg



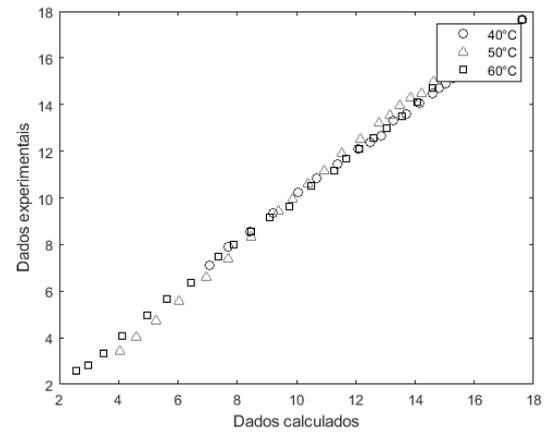
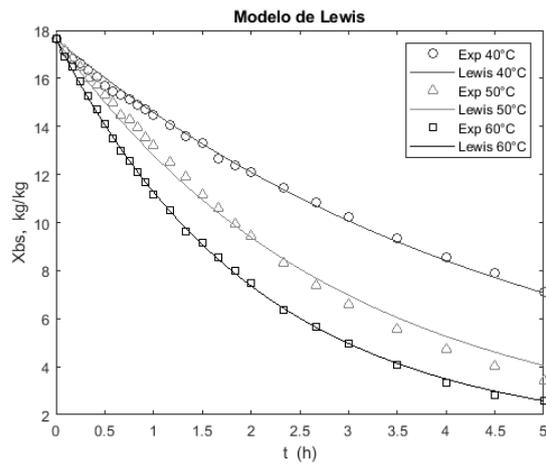
## Wang & Sing



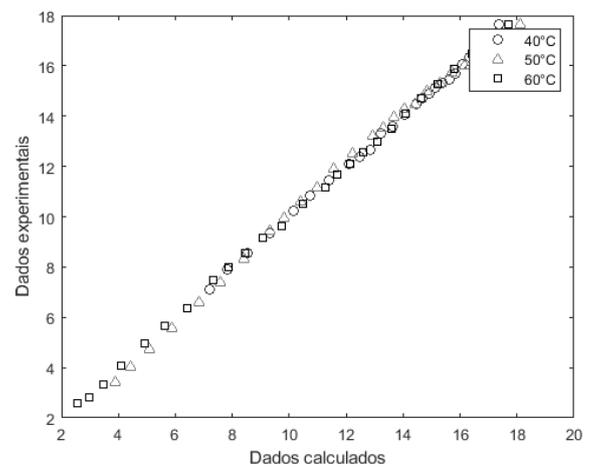
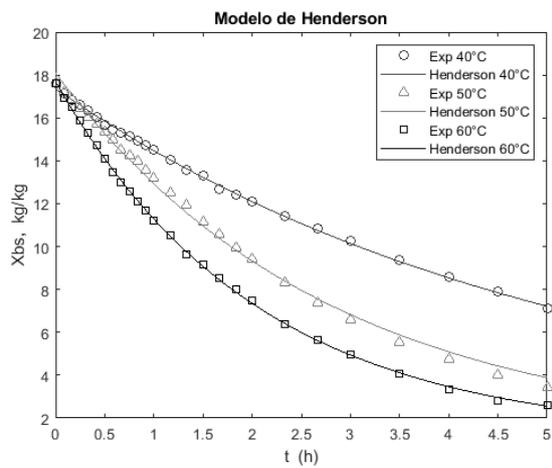
## Logarítmico



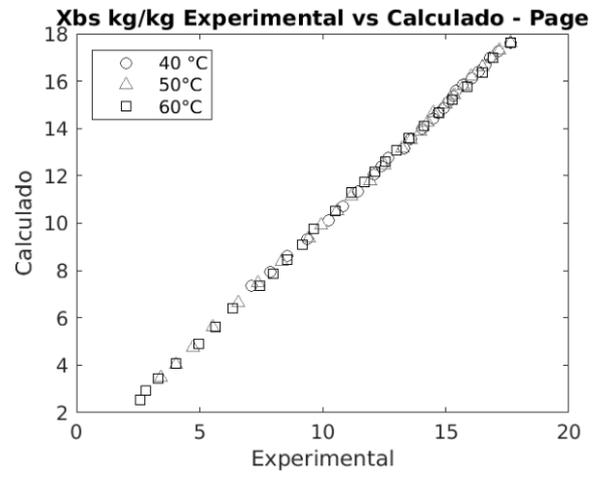
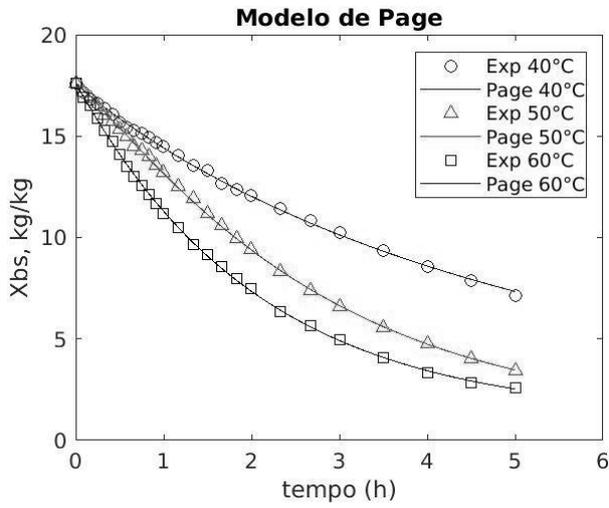
## Lewis



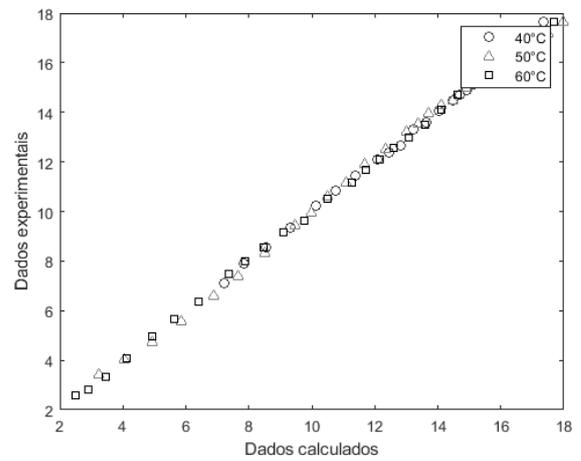
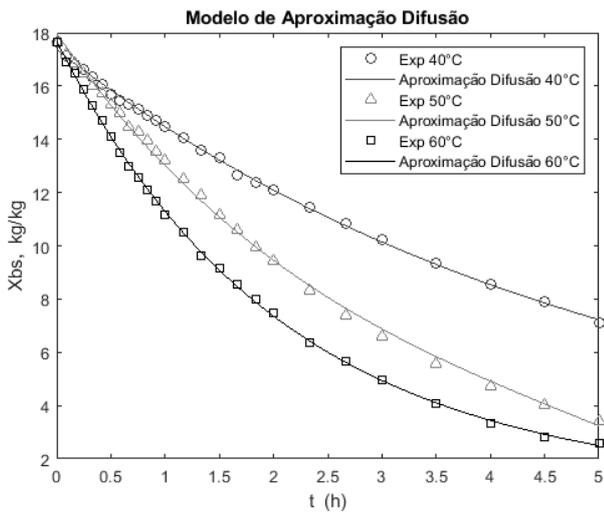
## Henderson-Pabis



Page



Aproximação por Difusão



**APÊNDICE B – Códigos-fonte dos programas utilizados no matlab para cálculo da energia de ativação e ajuste aos modelos cinéticos utilizando geometria de placa plana, cilindro infinito e cilindro finito.**

**Placa infinita**

```

%Função placainfinita

%

% Retorna os valores de  $Y = (X-X_{eq})/(X_i-X_{eq})$  conteúdo de umidade adimensional da
secagem usando a solução de Krank para uma placa finita

%

% Sintaxe:

% [Ypf,t] = placainfinita(t,L,x,a);

% Onde: t é o tempo em horas,

% L a espessura da amostra em m,

% x o ponto de troca de massa(Considerar  $x = 0$  m se considerar a difusão apenas
na superficie)

% def a difusividade efetiva em  $m^2/h$ ;

%

function [placa] = placainfinita(t,L,x,def)

    Ypf = 0; L = L/2;

    for n = 0:length(t)

        yL = (2.*n+1)*(pi/2); yp=yL/L;

        Ypf = Ypf + (-1).^n./yL.*cos(yp.*x).*exp(-yL.^2.*def/L^2.*t);

    end

    placa=2*Ypf;placa(1)=1;

end

```

```

% 1 Dados experimento

dados = xlsread('/MATLAB Drive/TCC/dados.xlsx'); %Leitura planilha de dados

a = 3.6E-9; % difusividade chute inicial m²/h

L = 1.49E-2; % Espessura média das amostras

t = dados(:,1); % Tempo (h)

m40 = placainfinita(t,L,0,a);m50 = placainfinita(t,L,0,a);m60 =
placainfinita(t,L,0,a); % Função placa infinita criada para cálculo do conteúdo de
umidade teórico

x40= dados(:,2);x50=dados(:,3);x60=dados(:,4);%dados de Xbs Kg/Kg

xeq=1.135; %Xbs de equilíbrio

w40 = (x40-xeq)/(x40(1)-xeq);w50 = (x50-xeq)/(x50(1)-xeq);w60 = (x60-
xeq)/(x60(1)-xeq); %Conteúdo de umidade

e40=abs(w40-m40);e50=abs(w50-m50);e60=abs(w60-m60);% Resíduos

erro40(1)=sum(e40);erro50(1)=sum(e50);erro60(1)=sum(e60);% Erro absoluto

%Iteração 40°C

a40 = a; a50=a40;a60=a40;% difusividade chute inicial 3.6E-9m²/h = 1E-12 m²/s

h = 1.01; %Valor do passo crescendo 1% no chute de difusividade

i40=0;

while (i<=9999) %Iteração max de 10000 pontos

    i40 = i40+1;

    a40 = h*a40;

    m40 = placainfinita(t,L,0,a40);

    erro40(i40+1) = sum(abs(w40-m40));

    if (erro40(i40+1)>=erro40(i40))

        break

    end

end

i50=0;

while (i<=9999) %Iteração max de 10000 pontos

```

```

        i50 = i50+1;

        a50= h*a50;

        m50 = placainfinita(t,L,0,a50);

        erro50(i50+1) = sum(abs(w50-m50));

        if (erro50(i50+1)>=erro50(i50))

            break

        end

    end

end

i60=0;

while (i<=9999) %Iteração max de 10000 pontos

    i60 = i60+1;

    a60= h*a60;

    m60 = placainfinita(t,L,0,a60);

    erro60(i60+1) = sum(abs(w60-m60));

    if (erro60(i60+1)>=erro60(i60));

        break

    end

end

end

% 2 Erros e parâmetros de ajuste

d40 = a40/3600; %difusividade

eabs40 = erro40(i40); %Erro absoluto

x40e = xeq+(x40(1)-xeq).*m40; %Valores estimados de Xbs com difusividade ótima

r240 = 1 - (sum((m40-w40).^2))/sum((w40-sum(w40)/length(w40)).^2); %R²

r2adj40 = 1 - (length(w40)-1)/(length(w40)-2).*(1-r240); %R²adj

d50 = a50/3600; %difusividade

eabs50 = erro50(i50); %Erro absoluto

x50e = xeq+(x50(1)-xeq).*m50; %Valores estimados de Xbs com difusividade ótima

r250 = 1 - (sum((m50-w50).^2))/sum((w50-sum(w50)/length(w50)).^2); %R²

```

```

r2adj50 = 1 - (length(w50)-1)/(length(w50)-2).*(1-r250); %R²adj

d60 = a60/3600; %difusividade

eabs60 = erro60(i60); %Erro absoluto

x60e = xeq+(x60(1)-xeq).*m60; %Valores estimados de Xbs com difusividade ótima

r260 = 1 - (sum((m60-w60).^2)/sum((w60-sum(w60)/length(w60)).^2)); %R²

r2adj60 = 1 - (length(w60)-1)/(length(w60)-2).*(1-r260); %R²adj

eabs=[eabs40 eabs50 eabs60];r2=[r240 r250 r260];r2adj=[r2adj40 r2adj50
r2adj60];

% 4 Plotar dados

plot(t,x40e,'-k',t,x40,'sk');

legend('Estimado','Experimental');

xlabel('tempo (h)');ylabel('Xbs kg/kg');

axis([0 6 0 20]);

title('Placa infinita 40°C');

figure

plot(t,x50e,'-k',t,x50,'sk');

legend('Estimado','Experimental');

xlabel('tempo (h)');ylabel('Xbs kg/kg');

axis([0 6 0 20]);

title('Placa infinita 50°C');

figure

plot(t,x60e,'-k',t,x60,'sk');

legend('Estimado','Experimental');

xlabel('tempo (h)');ylabel('Xbs kg/kg');

axis([0 6 0 20]);

title('Placa infinita 60°C');

%Energia de ativação

d = [d40 d50 d60]; %Vetor difusividade

T = [40 50 60]; %Temperaturas

```

```
[Eact] = energyact(d,T) %Função energia de ativação

A = [T' d' eabs' r2' r2adj']; %Matrix agrupando valores calculados

cab = string({'T °C' 'd m²/s' 'Erro Absoluto' 'r2' 'r2adj'}); %Célula cabeçalho

result=[cab;A]; % Tabela de resultados

disp(result) %mostrar resultados
```

### Cilindro Finito

```
function [cilindrofinito] = cilindrofinito(t,L,R,r,x,def)
```

```
Ypf = 0; L = L/2;
```

```
for n = 0:length(t)
```

```
yl = (2.*n+1)*(pi/2); yp=yl/L;
```

```
Ypf = Ypf + (-1).^n./yl.*cos(yp.*x).*exp(-yl.^2.*def/L^2.*t);
```

```
end
```

```
placa=2*Ypf;placa(1)=1;
```

```
Ycinf=0;dados = xlsread('bessel.xlsx');
```

```
for n = 1:length(t)+1;
```

```
ynR = dados(n,2);yn=ynR/R;
```

```
Ycinf = Ycinf + besselj(0,yn.*r)./(ynR.*besselj(1,ynR)).*exp(-yn.^2.*...
    def.*t/R^2);
```

```
end
```

```
cilindro = 2*Ycinf;times=t;
```

```
cilindro(1)=1;
```

```

        cilindrofinalito = placa.*cilindro;
end

close all;clear;clc;

% 1 Dados experimento

dados = xlsread('/MATLAB Drive/TCC/dados.xlsx'); %Leitura planilha de dados

a = 3.6E-9; % difusividade chute inicial m²/h

L = 1.49E-2;R=3.22E-2; % Espessura e Raio médio das amostras

t = dados(:,1); % Tempo (h)

% Função cilindro infinito criada para cálculo do conteúdo de umidade teórico

m40 = cilindrofinalito(t,L,R,0,0,a);

m50 = cilindrofinalito(t,L,R,0,0,a);

m60 = cilindrofinalito(t,L,R,0,0,a);

x40=dados(:,2);x50=dados(:,3);x60=dados(:,4);%dados de Xbs Kg/Kg

xeq=1.135; %Xbs de equilíbrio

w40 = (x40-xeq)/(x40(1)-xeq);w50 = (x50-xeq)/(x50(1)-xeq);w60 = (x60-xeq)/(x60(1)-xeq); %Conteúdo de
umidade

e40=abs(w40-m40);e50=abs(w50-m50);e60=abs(w60-m60);% Resíduos

erro40(1)=sum(e40);erro50(1)=sum(e50);erro60(1)=sum(e60);% Erro absoluto

%Iteração 40°C

a40 = a; a50=a40;a60=a40;% difusividade chute inicial 3.6E-9m²/h = 1E-12 m²/s

h = 1.01; %Valor do passo crescendo 1% no chute de difusividade

i40=0;

while (i<=9999) %Iteração max de 10000 pontos

    i40 = i40+1;

    a40 = h*a40;

    m40 = cilindrofinalito(t,L,R,0,0,a40);

    erro40(i40+1) = sum(abs(w40-m40));

    if (erro40(i40+1)>=erro40(i40))

```

```

        break
    end
end
i50=0;
while (i<=9999) %Iteração max de 10000 pontos

    i50 = i50+1;
    a50= h*a50;
    m50 = cilindrofinito(t,L,R,0,0,a50);
    erro50(i50+1) = sum(abs(w50-m50));
    if (erro50(i50+1)>=erro50(i50))
        break
    end
end
i60=0;
while (i<=9999) %Iteração max de 10000 pontos

    i60 = i60+1;
    a60= h*a60;
    m60 = cilindrofinito(t,L,R,0,0,a60);
    erro60(i60+1) = sum(abs(w60-m60));
    if (erro60(i60+1)>=erro60(i60));
        break
    end
end

n = [i40 i50 i60]
% 2 Erros e parâmetros de ajuste
d40 = a40/3600; %difusividade
eabs40 = erro40(i40); %Erro absoluto
x40e = xeq+(x40(1)-xeq).*m40; %Valores estimados de Xbs com difusividade ótima

```

```

r240 = 1 - (sum((m40-w40).^2))/sum((w40-sum(w40)/length(w40)).^2); %R²
r2adj40 = 1 - (length(w40)-1)/(length(w40)-2).*(1-r240); %R²adj

d50 = a50/3600; %difusividade
eabs50 = erro50(i50); %Erro absoluto
x50e = xeq+(x50(1)-xeq).*m50; %Valores estimados de Xbs com difusividade ótima
r250 = 1 - (sum((m50-w50).^2))/sum((w50-sum(w50)/length(w50)).^2); %R²
r2adj50 = 1 - (length(w50)-1)/(length(w50)-2).*(1-r250); %R²adj

d60 = a60/3600; %difusividade
eabs60 = erro60(i60); %Erro absoluto
x60e = xeq+(x60(1)-xeq).*m60; %Valores estimados de Xbs com difusividade ótima
r260 = 1 - (sum((m60-w60).^2))/sum((w60-sum(w60)/length(w60)).^2); %R²
r2adj60 = 1 - (length(w60)-1)/(length(w60)-2).*(1-r260); %R²adj

eabs=[eabs40 eabs50 eabs60];r2=[r240 r250 r260];r2adj=[r2adj40 r2adj50 r2adj60];

% 4 Plotar dados

plot(t,x40e,'-k',t,x40,'sk');
legend('Estimado','Experimental');
xlabel('tempo (h)');ylabel('Xbs kg/kg');
axis([0 6 0 20]);
title('Cilindro infinito 40°C');
figure
plot(t,x50e,'-k',t,x50,'sk');
legend('Estimado','Experimental');
xlabel('tempo (h)');ylabel('Xbs kg/kg');
axis([0 6 0 20]);
title('Cilindro infinito 50°C');
figure
plot(t,x60e,'-k',t,x60,'sk');
legend('Estimado','Experimental');

```

```

xlabel('tempo (h)');ylabel('Xbs kg/kg');

axis([0 6 0 20]);

title('Cilindro infinito 60°C');

%Energia de ativação

d = [d40 d50 d60]; %Vetor difusividade

T = [40 50 60]; %Temperaturas

[Eact] = energyact(d,T) %Função energia de ativação

A = [T' d' eabs' r2' r2adj']; %Matrix agrupando valores calculados

cab = string({'T °C' 'd m²/s' 'Erro Absoluto' 'r2' 'r2adj'}); %Célula cabeçalho

result=[cab;A]; % Tabela de resultados

disp(result) %mostrar resultados

```

## Cilindro Infinito

```

%Função cilindroinfinito

%

% Retorna os valores de  $Y = (X-Xeq)/(Xi-Xeq)$  conteúdo de umidade adimensional da
secagem usando a solução de Krank para um cilindro infinito

%

% Sintaxe:

% [cilindro,times] = cilindroinfinito(t,R,r,def);

% Onde: t é o tempo em horas

% R o raio da amostra em m

% r regio do raio R onde há a troca de massa em m (Considerar r = 0 se considerar
a difusão apenas na superficie)

% def a difusividade efetiva em m²/h;

%

function [cilindro] = cilindroinfinito(t,R,r,def)

    Ycinf=0;dados = xlsread('bessel.xlsx');

```

```

for n = 1:length(t)+1;
    ynR = dados(n,2);yn=ynR/R;
    Ycinf = Ycinf + besselj(0,yn.*r)./(ynR.*besselj(1,ynR)).*exp(-yn.^2.*...
        def.*t/R^2);
end
cilindro = 2*Ycinf;
cilindro(1)=1;
end

close all;clear;clc;

% 1 Dados experimento

dados = xlsread('/MATLAB Drive/TCC/dados.xlsx'); %Leitura planilha de dados

a = 3.6E-9; % difusividade chute inicial m²/h

L = 1.49E-2;R=3.22E-2; % Espessura e Raio médio das amostras

t = dados(:,1); % Tempo (h)

m40= cilindroinfinito(t,R,0,a);m50 = cilindroinfinito(t,R,0,a);m60 = cilindroinfinito(t,R,0,a); % Função cilindro
infinito criada para cálculo do conteúdo de umidade teórico

x40= dados(:,2);x50=dados(:,3);x60=dados(:,4);%dados de Xbs Kg/Kg

xeq=1.135; %Xbs de equilíbrio

w40 = (x40-xeq)/(x40(1)-xeq);w50 = (x50-xeq)/(x50(1)-xeq);w60 = (x60-xeq)/(x60(1)-xeq); %Conteúdo de
umidade

e40=abs(w40-m40);e50=abs(w50-m50);e60=abs(w60-m60);% Resíduos

erro40(1)=sum(e40);erro50(1)=sum(e50);erro60(1)=sum(e60);% Erro absoluto

%Iteração 40°C

a40 = a; a50=a40;a60=a40;% difusividade chute inicial 3.6E-9m²/h = 1E-12 m²/s

h = 1.01; %Valor do passo crescendo 1% no chute de difusividade

i40=0;

while (i<=9999) %Iteração max de 10000 pontos

    i40 = i40+1;

    a40 = h*a40;

```

```

m40 = cilindroinfinito(t,R,0,a40);
erro40(i40+1) = sum(abs(w40-m40));
if (erro40(i40+1)>=erro40(i40))
    break
end
end
i50=0;
while (i<=9999) %Iteração max de 10000 pontos

    i50 = i50+1;

    a50= h*a50;

    m50 = cilindroinfinito(t,R,0,a50);
erro50(i50+1) = sum(abs(w50-m50));
if (erro50(i50+1)>=erro50(i50))
    break
end
end
i60=0;
while (i<=9999) %Iteração max de 10000 pontos

    i60 = i60+1;

    a60= h*a60;

    m60 = cilindroinfinito(t,R,0,a60);
erro60(i60+1) = sum(abs(w60-m60));
if (erro60(i60+1)>=erro60(i60));
    break
end
end

% 2 Erros e parâmetros de ajuste

```

```

d40 = a40/3600; %difusividade
eabs40 = erro40(i40); %Erro absoluto
x40e = xeq+(x40(1)-xeq).*m40; %Valores estimados de Xbs com difusividade ótima
r240 = 1 - (sum((m40-w40).^2))/sum((w40-sum(w40)/length(w40)).^2); %R²
r2adj40 = 1 - (length(w40)-1)/(length(w40)-2).*(1-r240); %R²adj

d50 = a50/3600; %difusividade
eabs50 = erro50(i50); %Erro absoluto
x50e = xeq+(x50(1)-xeq).*m50; %Valores estimados de Xbs com difusividade ótima
r250 = 1 - (sum((m50-w50).^2))/sum((w50-sum(w50)/length(w50)).^2); %R²
r2adj50 = 1 - (length(w50)-1)/(length(w50)-2).*(1-r250); %R²adj

d60 = a60/3600; %difusividade
eabs60 = erro60(i60); %Erro absoluto
x60e = xeq+(x60(1)-xeq).*m60; %Valores estimados de Xbs com difusividade ótima
r260 = 1 - (sum((m60-w60).^2))/sum((w60-sum(w60)/length(w60)).^2); %R²
r2adj60 = 1 - (length(w60)-1)/(length(w60)-2).*(1-r260); %R²adj

eabs=[eabs40 eabs50 eabs60];r2=[r240 r250 r260];r2adj=[r2adj40 r2adj50 r2adj60];

% 4 Plotar dados
plot(t,x40e,'-k',t,x40,'sk');
legend('Estimado','Experimental');
xlabel('tempo (h)');ylabel('Xbs kg/kg');
axis([0 6 0 20]);
title('Cilindro infinito 40°C');

figure
plot(t,x50e,'-k',t,x50,'sk');
legend('Estimado','Experimental');
xlabel('tempo (h)');ylabel('Xbs kg/kg');
axis([0 6 0 20]);
title('Cilindro infinito 50°C');

```

```

figure
plot(t,x60e,'-k',t,x60,'sk');
legend('Estimado','Experimental');
xlabel('tempo (h)');ylabel('Xbs kg/kg');
axis([0 6 0 20]);
title('Clindro infinito 60°C');

%Energia de ativação
d = [d40 d50 d60]; %Vetor difusividade
T = [40 50 60]; %Temperaturas
[Eact] = energyact(d,T) %Função energia de ativação

A = [T' d' eabs' r2' r2adj']; %Matrix agrupando valores calculados
cab = string({'T °C' 'd m²/s' 'Erro Absoluto' 'r2' 'r2adj'}); %Célula cabeçalho
result=[cab;A]; % Tabela de resultados
disp(result) %mostrar resultados

```

## Energia de ativação

```

%Função energyact
%
%Retorna o valor da energia de ativação em Joules e o valor da constante pré
exponencial da difusão
%
%[result] = energyact(Def,T);
%
% ans
%
%Eact = [J]
%D0 = [m²/s ]

```

```

%R² = [ ]
%
%
function [result] = eact(Def,T);
lnDef = log(Def);Tinv = (1./(T+273));E0 = [0 0];
f = @(x,Tinv)x(1)+x(2)*Tinv;
x = lsqcurvefit(f,E0,Tinv,lnDef);
    Eact = -x(2)*8.314;
    D0 = exp(x(1));

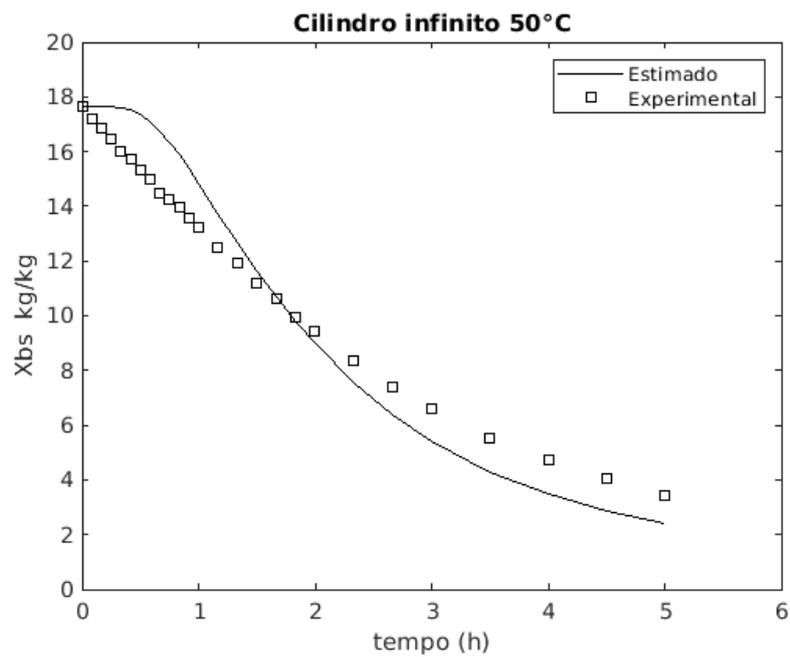
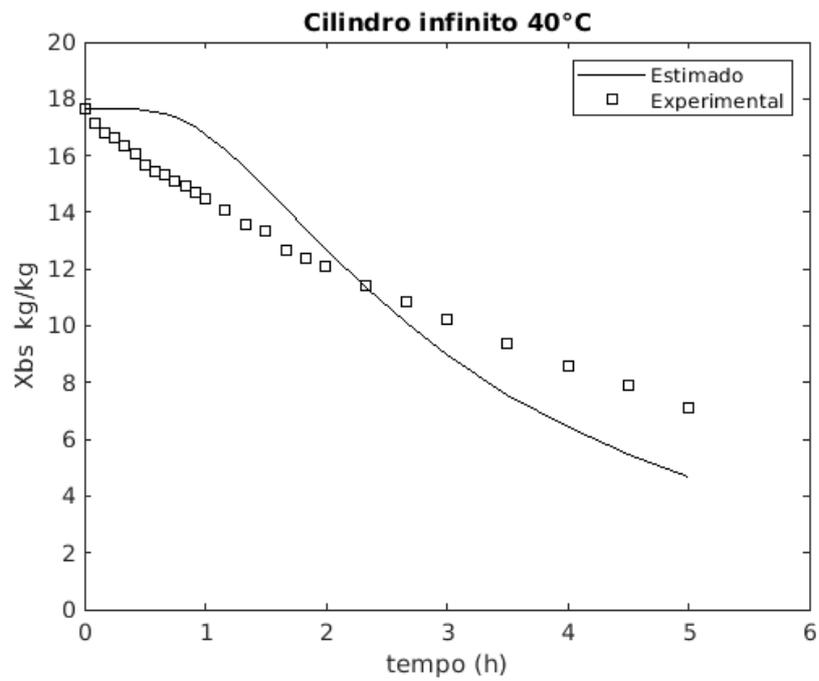
logD = log(D0) - Eact/8.314*Tinv;
media = sum(lnDef)/length(lnDef);
erromedio = lnDef - media;erro=lnDef - logD;
rsquared = 1 - sum(erro.^2)/sum(erromedio.^2);
A = string({'Eact J/mol' 'D0 m²/s' 'R²'});
P = [Eact D0 rsquared];
result = [A;P];

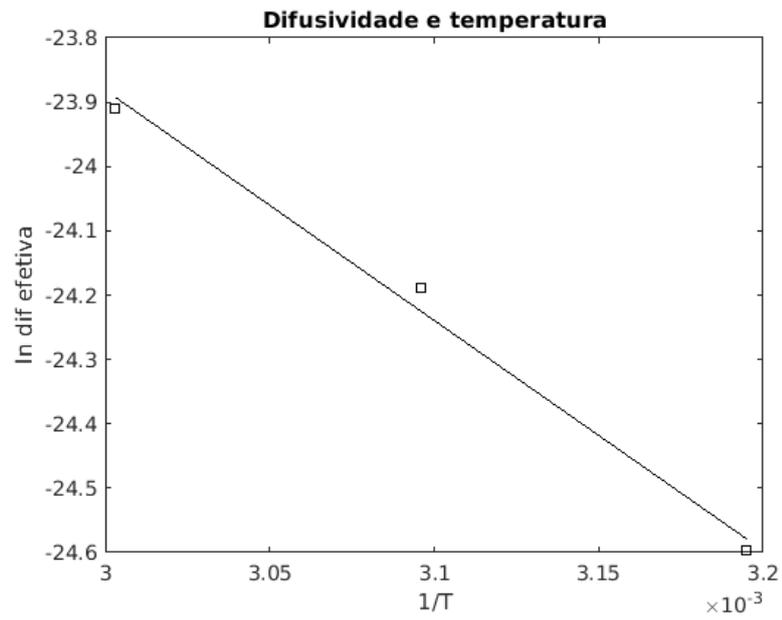
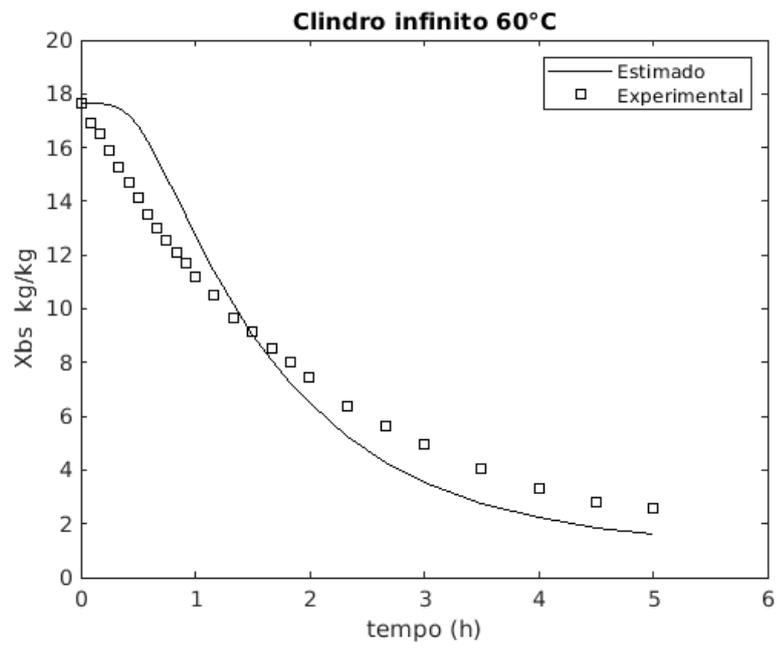
figureplot(Tinv,logD,'-k',Tinv,lnDef,'sk');xlabel('1/T');ylabel('ln
...efetiva');title('Difusividade e temperatura');
end

```

**APÊNDICE C – Ajustes às geometrias de cilindro infinito e cilindro finito, em diferentes temperaturas, para o cálculo das difusividades efetivas**

**Cilindro Infinito**





## Cilindro Finito

