

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**Modelagem com difusividade efetiva variável via analogia  
da Lei de Fick para a secagem de sementes de  
*Jacaranda mimosifolia* em camada delgada**

Giovanni Raposo de Faria Merlo

SÃO CARLOS -SP  
Dezembro, 2020

Modelagem com difusividade efetiva variável via analogia da Lei de Fick para a secagem de sementes de *Jacaranda mimosifolia* em camada delgada

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Dias Maia

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências exatas e tecnologia

**Banca Examinadora**

Trabalho de Graduação apresentado no dia 15 de Dezembro de 2020 perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Dias Maia  
Universidade Federal de São Carlos, SP, Brasil

Convidado: Prof. Dr. Marcos P. Felizardo  
Universidade Federal de Mato Grosso, MT, Brasil

Prof<sup>a</sup>. Dra. Paula Rúbia Ferreira Rosa  
Universidade Federal de São Carlos, SP, Brasil

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a Elora, minha namorada e parceira, sempre comigo e que me incentivou nos momentos difíceis.

Dedico aos meus pais e família que sempre me incentivaram a ser minha melhor versão e sem os quais não chegaria até aqui.

Dedico aos meus pets, João, Berenice e Mulan que me fazem levar a vida de forma mais alegre.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Gustavo, que foi fundamental no desenvolvimento não somente deste trabalho, mas na minha formação como engenheiro químico, sempre orientando com dedicação e amizade.

Aos Professores Marcos Felizardo e Paula Rosa, pela atenção e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor trabalho

Finalmente a todos os professores e colegas da UFSCar com quem tive oportunidade de conhecer e aprender ao longo da graduação

## RESUMO

As sementes de *Jacaranda mimosifolia*, têm sido estudadas para diferentes aplicações devido à composição dos seus extratos. Além de possuir madeira nobre com elevado valor comercial, possui potenciais aplicações em remédios anti-inflamatórios, tratamentos para pele e inibição de células cancerígenas. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho consistiu na determinação das características físicas das sementes e do meio poroso por elas constituído, na determinação das isotermas de dessorção, e na análise da cinética de secagem de sementes de *Jacaranda mimosifolia* em camada delgada. As isotermas de dessorção foram determinadas por método estático-gravimétrico e ajuste via modelo GAB para as temperaturas de 20°C, 30°C e 40°C. A modelagem do processo de secagem foi realizada via solução analítica da analogia da Segunda Lei de Fick, considerando difusividade efetiva de umidade constante. Para difusividade variável foi proposta uma técnica de ajustes parciais e sequenciais da solução analítica clássica. A cinética de secagem em camada delgada foi conduzida para temperaturas de 40°C e 50°C. Dos resultados obtidos da caracterização física, foi possível determinar propriedades relevantes da semente e leite, e verificar que a partícula apresenta formato e tamanhos similares entre si, e forma leitos de elevada porosidade. A partir do ajuste obtido para as isotermas de dessorção, foi possível determinar os parâmetros do modelo com  $R^2 \geq 0,99$  e concluir que a semente apresenta um comportamento não-convencional. Em relação a secagem, os ajustes com parâmetro constante apresentaram  $R^2 \geq 0,983$  e  $\chi^2 \leq 1,60 \times 10^{-3}$ , enquanto com parâmetro variável  $R^2 \geq 0,998$  e  $\chi^2 \leq 1,40 \times 10^{-4}$ , demonstrando a melhora obtida na aleatoriedade dos resíduos. O método de ajustes sequenciais proposto mostrou bons resultados, detalhando mecanismos difusivos de transferência de massa e mostrando-se promissor para aplicação em controle de processo e qualidade do produto, além de projetos e dimensionamentos de secadores.

**Palavras-chave:** Sementes. Jacarandá. Secagem camada fina. Modelo difusivo. Isotherma dessorção.

## ABSTRACT

*Jacaranda mimosifolia* seeds have been studied for different applications due to the composition of their extracts. In addition to having noble wood with high commercial value, it has potential applications in anti-inflammatory remedies, skin treatments and inhibition of cancer cells. Considering this, the objective of this work was to determine the physical characteristics of the seeds and the porous medium formed by them, to determine the desorption isotherms, and to analyze the drying kinetics of *Jacaranda mimosifolia* seeds in a thin layer. The desorption isotherms were determined by static-gravimetric method and adjusted using the GAB model for temperatures of 20°C, 30°C and 40°C. The modeling of the drying process was performed by an analytical solution of the analogy of the Second Fick's Law, considering humidity effective diffusivity constant. For variable diffusivity, a partial and sequential adjustment technique of the classic analytical solution was proposed. Thin layer drying kinetics were conducted at temperatures of 40°C and 50°C. From the results obtained from the physical characterization, it was possible to determine relevant properties of the seed and bed, also verify that the particle has similar shape and sizes, and forms beds of high porosity. From the adjustment obtained for the desorption isotherms, it was possible to determine the model's parameters with  $R^2 \geq 0.99$  and conclude that, the seed has an unconventional behavior. Regarding drying, the adjustments with constant parameter showed  $R^2 \geq 0.983$  and  $\chi^2 \leq 1.60 \times 10^{-3}$ , while with variable parameter  $R^2 \geq 0.998$  and  $\chi^2 \leq 1.40 \times 10^{-4}$ , demonstrating the improvement obtained in the randomness of the residues. The proposed sequential adjustment method showed good results, detailing diffusive mass transfer mechanisms and showing promise for application in process control and product quality, in addition to projecting and dimensioning dryers.

Keywords: Seeds. *Jacaranda*. Thin layer drying. Diffusive model. Desorption isotherm.

## LISTA DE FIGURAS/QUADROS

Figura 3.1	Jacarandá-mimoso.....	3
Figura 3.2	Análise da atividade citotóxica de diferentes extratos e frações de folhas de jacarandá contra o crescimento de células de câncer de pulmão (LU-1) .....	4
Figura 3.3	Análise da atividade citotóxica de diferentes extratos e frações de folhas de jacarandá contra o crescimento de células de câncer de próstata (LnCaP-1) .....	5
Figura 3.4	Temperatura ótima de germinação do Jacarandá Mimoso .....	6
Figura 3.5	Plântulas de Jacarandá-mimoso em sementeira após 3 meses de germinação .....	7
Figura 3.6	Diâmetros de Feret .....	9
Figura 3.7	Isoterma de adsorção e dessorção para o trigo .....	12
Figura 3.8	Sorção localizada e seus respectivos níveis entálpicos .....	16
Figura 3.9	Cinética típica de secagem .....	18
Figura 3.10	Variação da difusividade efetiva com a umidade .....	23
Figura 4.1	Sementes de Jacarandá Mimoso em umidade de lote para análise de imagem .....	26
Figura 4.2	Esquema do recipiente utilizado para isoterma de dessorção .....	27
Figura 4.3	Esquematização da unidade de fluidodinâmica e secagem em leito fixo e fluidizado .....	29
Figura 4.4	Método dos ajustes sequenciais .....	30
Figura 4.5	Esquema para o método dos ajustes sequenciais .....	31
Figura 5.1	Variação da densidade de bulk .....	34
Figura 5.2	Distribuição de propriedades de sementes de Jacarandá em umidade de lote para (a) Diâmetro máximo (b) Diâmetro médio (c) Diâmetro mínimo (d) Diâmetro de Feret máximo (e) Diâmetro de Feret médio (f) Diâmetro de Feret mínimo para sementes de Jacarandá em umidade de lote .....	35
Figura 5.3	Distribuição de propriedades de sementes de Jacarandá em umidade de lote para (a) Perímetro médio (b) Área projetada .....	36
Figura 5.4	Distribuição de espessura para sementes de Jacarandá em umidade de lote .....	37
Figura 5.5	Isotermas de dessorção para sementes de Jacarandá-mimoso e o ajuste pelo modelo GAB ...	38
Figura 5.6	Umidade adimensional em função do tempo para a secagem em camada delgada de sementes de Jacarandá-mimoso .....	40
Figura 5.7	Taxa de secagem em função da umidade adimensional para sementes de Jacarandá-mimoso.	41
Figura 5.8	Ajuste do modelo de transferência de massa considerando $Bim \ll 1$ na superfície do leito...	43
Figura 5.9	Variação do parâmetro da difusividade efetiva conforme o número de termos para condição de contorno $Bim \ll 1$ .....	44
Figura 5.10	Variação do coeficiente de determinação conforme o número de termos para condição de contorno $Bim \ll 1$ .....	45
Figura 5.11	Variação do $\chi^2$ conforme o número de termos para condição de contorno $Bim \ll 1$ .....	45



Figura 5.12	Ajuste do modelo de transferência de massa considerando $Bim \rightarrow \infty$ na superfície do leito...	47
Figura 5.13	Distribuição dos resíduos em função do tempo para os dois modelos avaliados nas temperaturas de 40 e 50°C .....	48
Figura 5.14	Variação da difusividade efetiva como função da umidade adimensional pelas diferentes abordagens .....	49
Figura 5.15	Umidades estimadas em função da umidade observada para os diferentes modelos .....	50
Figura 5.16	Resíduos em função da umidade observada para as temperaturas de 40 e 50°C e comparação com os demais métodos .....	51
Quadro 3.1	Equações alternativas para a tortuosidade .....	11
Quadro 3.2	Combinação da magnitude dos parâmetros $C_g$ e $K$ e o correspondente mecanismo de adsorção/dessorção .....	15

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Modelos matemáticos para determinação de isotermas de adsorção/dessorção .....	13
Tabela 4.1	Umidades relativas para soluções saturadas a diferentes temperaturas .....	28
Tabela 5.1	Características físicas médias de sementes de <i>Jacaranda mimosifolia</i> em umidade de lote e seus respectivos desvios padrão .....	33
Tabela 5.2	Umidades relativas para as soluções saturadas em diferentes temperaturas .....	39
Tabela 5.3	Comparação umidades de equilíbrio dinâmicas e estimadas pelo modelo GAB para a temperatura de 40°C .....	39
Tabela 5.4	$De_{eff}$ , $R^2$ e $\chi^2$ considerando $Bim \ll 1$ na superfície do leito (n=15) .....	43
Tabela 5.5	$De_{eff}$ , $R^2$ e $\chi^2$ considerando $Bim \rightarrow \infty$ na superfície do leito .....	47
Tabela 5.6	Parâmetros de ajuste para modelos com difusividade variável para temperaturas de 40 e 50°C..	52

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_w$	atividade de água (-)
$A_s$	área superficial média (mm <sup>2</sup> )
$Bi_m$	número de Biot mássico (-)
$C_g$	parâmetro entálpico GAB (-)
$d_e$	diâmetro equivalente (mm)
$d_p$	diâmetro de uma partícula (mm)
$D_{eff}$	difusividade efetiva (m <sup>2</sup> /s)
$D_{Fm}$	diâmetro de Feret médio (mm)
$D_{Fmax}$	diâmetro de Feret máximo (mm)
$D_{Fmin}$	diâmetro de Feret mínimo
$D_m$	diâmetro médio (mm)
$D_{max}$	diâmetro máximo (mm)
$D_{min}$	diâmetro mínimo (mm)
$G$	aceleração da gravidade (m <sup>2</sup> /s)
$h_m$	coeficiente convectivo de transferência de massa (W/(m <sup>2</sup> .K))
$K$	parâmetro entrópico GAB (-)
$L$	altura do leito (m)
$m$	massa do leito de sementes (kg)
$m_h$	fator de intensidade hidrodinâmica (-)
$Md$	mediana (-)
$n$	número de termos da série
$P_m$	perímetro médio (mm)
$Q1$	primeiro quartil (-)
$Q3$	terceiro quartil (-)
$R^2$	coeficiente de determinação (-)
$S_m$	espessura média da semente (mm)
$t$	tempo (s)
$V$	volume médio das sementes (mm <sup>3</sup> )
$V_{ap}$	volume aparente da partícula (cm <sup>3</sup> )
$V_b$	volume do leito de sementes (cm <sup>3</sup> )
$V_s$	volume da estrutura sólida da partícula (cm <sup>3</sup> )

$\bar{X}(t)$	umidade média (kg/kg)
$X(z,t)$	umidade local (kg/kg)
$X_0$	umidade inicial (kg/kg)
$X_{ad}$	umidade adimensional (-)
$X_c$	umidade crítica (kg/kg)
$X_{eq}$	umidade de equilíbrio (kg/kg)
$X_l$	umidade de lote (kg/kg)
$X_m$	umidade de monocamada (kg/kg)
$X_{obs}$	umidade observada (-)
$X_{est}$	umidade estimada (-)
$Y_{eq}$	umidade do gás de secagem (kg/kg)
$Y_{\infty}$	umidade do gás na saturação (kg/kg)
$z$	coordenada espacial (m)
$\varepsilon$	porosidade de bulk
$\varepsilon_a$	porosidade do leito aerada
$\varepsilon_c$	porosidade do leito compactada
$\lambda n$	autovalores da equação transcendental
$\rho_{ap}$	densidade aparente da semente (g/cm <sup>3</sup> )
$\rho_b$	densidade de bulk (g/cm <sup>3</sup> )
$\rho_{ba}$	densidade de bulk aerada (g/cm <sup>3</sup> )
$\rho_{bc}$	densidade de bulk compactada (g/cm <sup>3</sup> )
$\tau$	fator de tortuosidade (-)
$\sigma$	tempo característico (s)
$\varphi$	esfericidade (-)
$\chi^2$	qui-quadrado (-)

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVO .....	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
3.1 JACARANDÁ-MIMOSO .....	3
3.1.1 Componentes e aplicações .....	4
3.1.2 Germinação e efeitos da secagem .....	5
3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....	7
3.2.1 Propriedades das sementes .....	8
3.2.1.1 Dimensões .....	8
3.2.1.2 Diâmetro de Feret .....	8
3.2.1.3 Esfericidade .....	9
3.2.1.4 Massa específica .....	9
3.2.2 Propriedades do leito .....	10
3.2.2.1 Densidade do leito .....	10
3.2.2.2 Porosidade .....	11
3.2.2.3 Fator de tortuosidade .....	11
3.3 ISOTERMAS DE DESSORÇÃO .....	12
3.3.1 Modelos matemáticos para isotermas .....	13
3.4 SECAGEM EM CAMADA DELGADA .....	17
3.4.1 Camada delgada .....	19
3.4.2 Modelagem com parâmetro constante .....	20
3.4.3 Difusividade variável .....	22
3.4.4 Modelo de Efremov para difusividade variável .....	23
4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	25
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....	25
4.1.1 Espessura com paquímetro .....	25
4.1.2 Densidade e porosidade do leito .....	25
4.1.3 Análise de imagem .....	26
4.1.4 Picnometria .....	27
4.2 ISOTERMAS DE DESSORÇÃO .....	27
4.3 SECAGEM EM CAMADA DELGADA .....	28
4.3.1 Ensaio de secagem .....	28

4.3.2 Modelagem matemática .....	30
4.3.3 Método dos ajustes sequenciais.....	30
4.3.4 Análise estatística do modelo.....	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	33
5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....	33
5.2 ISOTERMAS DE DESSORÇÃO.....	37
5.3 SECAGEM EM CAMADA DELGADA .....	40
5.3.1 Cinética e taxa de secagem.....	40
5.3.2 Modelagem com parâmetro constante.....	42
5.3.3 Modelagem com difusividade efetiva variável .....	49
6 CONCLUSÕES .....	53
REFERÊNCIAS .....	54
APÊNDICE A – Caracterização física: base de dados.....	62
APÊNDICE B – Isotermas de dessecção: base de dados .....	70
APÊNDICE C – Secagem em camada fina: base de dados.....	73

## 1. INTRODUÇÃO

Uma nova despesa deve ser considerada no orçamento do produtor rural: a do reflorestamento das Áreas de Proteção Permanentes (APP) e de Reserva Legal (RL).

O Ministério do Meio Ambiente estima que 35 milhões de hectares no país tenham de ser restaurados – replantados ou induzidos à recuperação – para que as fazendas atendam às normas do novo Código Florestal, e o preço dessa conta pode chegar a R\$ 350 bilhões, calculados a partir do custo médio do reflorestamento com mudas de R\$ 10 mil por hectare (TAGUCHI, 2015).

Entretanto, não há sementes disponíveis para suprir essa demanda. A mão de obra disponível para a coleta de sementes é rara e há poucos viveiros de mudas nativas regularizados no país, o que torna evidente a existência de um nicho de investimento pouco explorado.

Em contrapartida, para produtores rurais, reflorestar as Reservas Legais pode ser uma maneira inteligente de diversificar a propriedade e obter lucros com o comércio de madeiras nobres certificadas, a extração de óleos, a venda de sementes e até o recebimento por prestação de serviços ambientais. Além disso, essas espécies florestais muitas vezes possuem aplicações na saúde, com a fabricação de remédios ou vacinas. No caso do Jacarandá Mimoso, diversos estudos apontam sua potencial utilização em remédios anti-inflamatórios, tratamentos para a pele e até mesmo remédios contra o câncer.

Ainda que uma ampla variedade de estudos tenha sido conduzida nas áreas da biologia e da engenharia florestal, a concepção das sementes como um produto que necessita de processamento, beneficiamento e armazenagem foi pouco explorada academicamente. Segundo Vechiato e Parisi (2013), no contexto dado pelo Programa de Recuperação de Áreas Degradadas (PRADs) é evidente a demanda por sementes de qualidade sanitária, fisiológica e física.

Considerando seu alto valor agregado, sua importância social enquanto fonte de renda para comunidades florestais voltadas à coleta, sua importância ambiental devido a seu risco elevado de extinção, e a ausência de informações técnicas sobre a secagem e estocagem desse material, o presente projeto de pesquisa tem como objetivo geral a obtenção de informações que permitam o dimensionamento de sistemas de armazenamento e secagem mais eficientes como a caracterização física das sementes e do leito de sementes, caracterização termodinâmica, além do estudo e modelagem da secagem em camada fina para sementes de Jacarandá-mimoso (*Jacaranda mimosifolia*, D. Don).

## **2. OBJETIVO**

O objetivo do presente trabalho é a determinação das características físicas de sementes de Jacarandá mimoso, bem como a das características do leito formado por elas. Além disso, será também avaliada a secagem em camada fina considerando uma modelagem com difusividade efetiva constante e variável. Serão também analisadas as isotermas de dessecção com a respectiva análise termodinâmica e classificação dos tipos de água.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 JACARANDÁ-MIMOSO

A família *Bigoniaceae* possui por volta de 120 gêneros e 750 espécies, é uma família de plantas com flores. É comumente conhecida como a família Jacaranda, família *Bignonia* ou a família *Catalã*, sua ocorrência é maior em países tropicais e subtropicais, porém algumas espécies também crescem na América do Norte e Leste Asiático.

As *Bigoniaceae* são importantes devido às diversas atividades farmacológicas e *bioatividade*. Existem casos registrados de aplicações de algumas plantas da família para tratamentos médicos.

No gênero *Jacaranda* são catalogadas 49 espécies encontradas principalmente no Brasil, algumas utilizadas na medicina popular. Os nomes comuns de muitas espécies de *Jacaranda* diferem de “Jacarandá” e apenas *Jacaranda caucana ssp. caucana*, *Jacaranda copaia ssp. spectabilis* e *Jacaranda mimosifolia* são conhecidas como “Jacarandá” (GACHET e SCHÜHLY, 2008).

**Figura 3.1 - Jacarandá-mimoso**



Fonte: Blerick Tree Farm (2019)

A *Jacaranda mimosifolia* (Figura 3.1) é uma árvore subtropical e sua principal ocorrência é no Brasil, Bolívia e Argentina. É uma espécie que se encontra em estado de vulnerabilidade de acordo com a IUCN (*International Union for Conservation of Nature*).

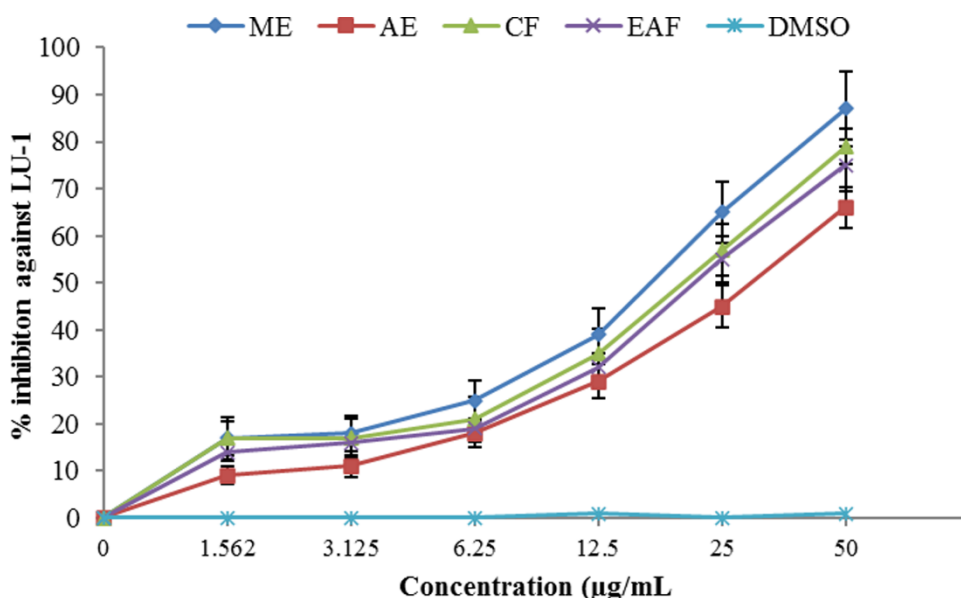
Esta espécie é considerada uma espécie pioneira devido à sua presença em todos os processos de sucessão de uma floresta secundária. No Brasil, é amplamente utilizada para arborização e como planta ornamental em parques.

### 3.1.1 Componentes e aplicações

Nugteren e Christ-Hazelhof (1987) verificaram que um ácido graxo proveniente do *Jacaranda mimosifolia* chamado de ácido jacarândico (*jacarandic acid*), é um bom inibidor com ação semelhante a um remédio anti-inflamatório.

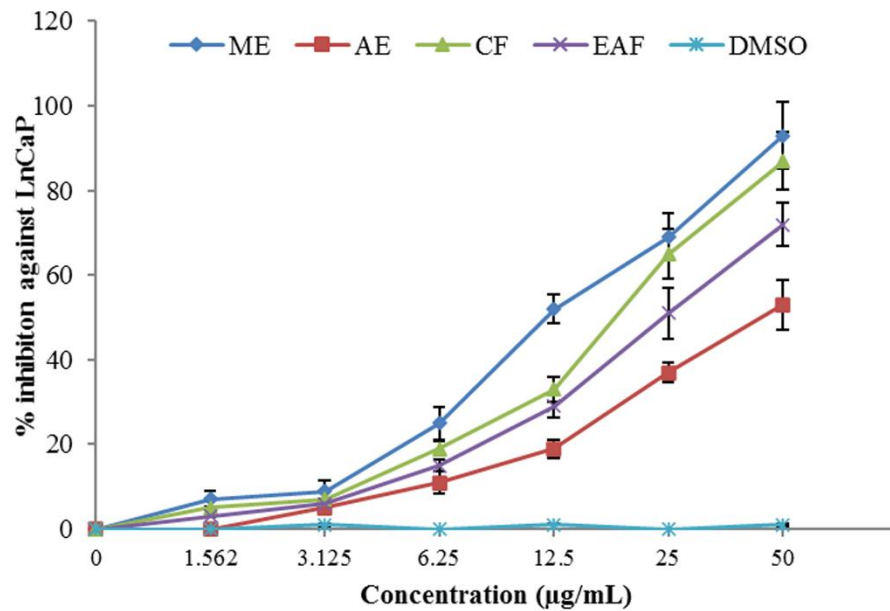
Ademais, um estudo conduzido por Naz et al (2020) revelou que o extrato de folhas de Jacarandá-mimoso, além de potencial uso como antioxidante e anti-inflamatório, tem potencial de combate ao câncer. Foram realizados testes com diferentes extratos como: extrato a partir do metanol (ME), extrato aquoso residual (AE), clorofórmio (CF) e acetato de etila (EAF). As Figuras 3.2 e 3.3, mostram os relevantes efeitos inibitórios em células cancerígenas obtidos a partir desses extratos, principalmente para os solventes metanol e clorofórmio.

**Figura 3.2** - Análise da atividade citotóxica de diferentes extratos e frações de folhas de jacarandá contra o crescimento de células de câncer de pulmão (LU-1).



Fonte: Naz et al (2020)

**Figura 3.3** - Análise da atividade citotóxica de diferentes extratos e frações de folhas de jacarandá contra o crescimento de células de câncer de próstata (LnCaP-1)



Fonte: Naz et al (2020)

Alguns outros componentes de interesse encontrados na raiz da planta são: lupenona, b-sitosterol, ácido ursólico e ácido oleanólico (PRAKASH E GARG, 1980). São encontrados nas folhas: hidroquinona (GACHET e SCHÜHLY, 2009); scutellareína (SANKARA-SUBRAMANIAN et al., 1972); 7-glucuronido de scutellareína (SANKARA-SUBRAMANIAN et al., 1973); isoquercitrina, isovitexina, 7-O-b-D- glucopiranosídeo de apigenina, 7-O-b-D-glucopiranosídeo de luteolina, éster metílico de 7-O-b-Dglucuronopiranosídeo de scutellareína, 7-O-b-D- glucuronopiranosídeo de propigenina. Esses dados revelam o potencial no estudo dessa espécie florestal e o interesse no seu processamento.

### 3.1.2 Germinação e efeitos da secagem

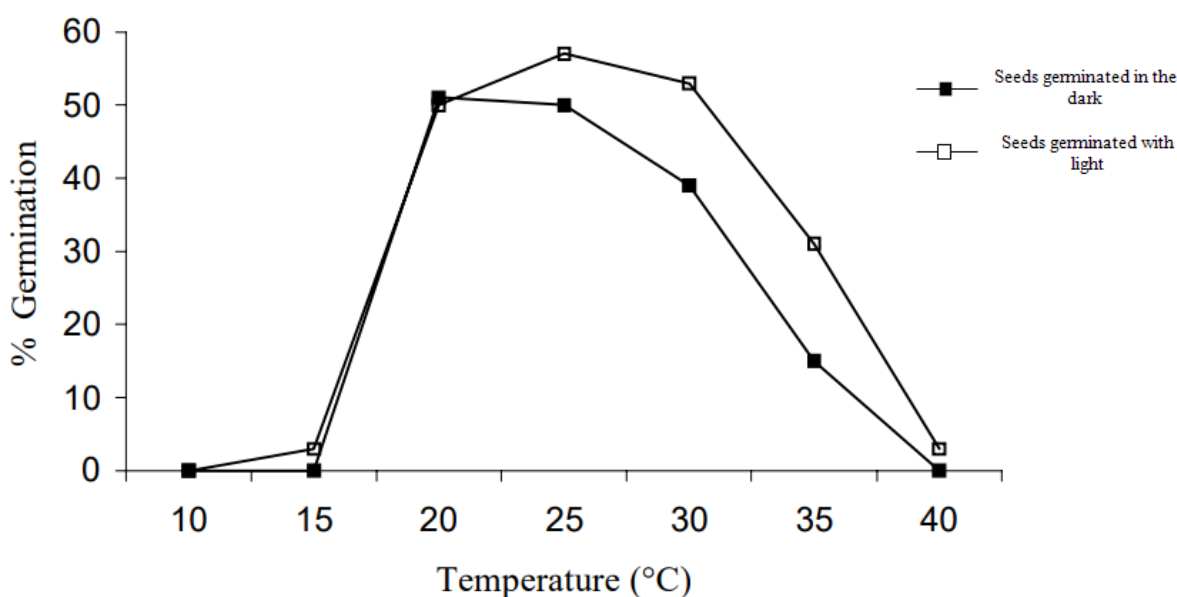
Há uma falta de conhecimentos sobre o controle germinativo do jacarandá. Essa espécie pode germinar e florescer melhor quando cultivado em solo pobre, sendo o substrato comercial e areia os mais recomendados. Maciel et al. (2013) aponta o substrato comercial como o mais interessante para germinação à temperatura de 25°C.

Geralmente a semente do Jacarandá Mimoso apresenta boa germinação, porém, ao longo do tempo a qualidade fisiológica e sanitária do lote ainda ocasiona perdas no ambiente de armazenamento. Quando se deseja produzir mudas, é necessário um estoque de sementes de

boa qualidade fisiológica (MISSIO et al., 2016).

Em se tratando da temperatura, as sementes de *Jacaranda mimosifolia* apresentam temperaturas mínima e máxima de germinação a 15 e a 40°C, respectivamente. Entre 20°C e 30°C, não apresentam diferenças muito significativas. A temperatura ótima é de 25°C, com alta porcentagem e velocidade de germinação. (SOCOLOWSKI; TAKAKI, 2004). Essa recomendação se seguiu nos trabalhos de Maciel et al. (2013).

**Figura 3.4 - Temperatura ótima de germinação do Jacarandá Mimoso**



Fonte: Socolowski e Tatakí (2004)

Segundo Sokolowski e Tatakí, (2004), a luminosidade favorece a germinação, porém com pouca diferença em relação a sua ausência para a temperatura ótima. A luz pode também propiciar um ambiente em que sementes germinem a 35°C, o que quase não ocorre na escuridão. Para germinação em condições de Luminosidade, Maciel et al. (2013) recomenda fotoperíodos de 12h por dia.

A literatura indica que a *Jacaranda Mimosifolia* não lida muito bem com muita umidade, sendo testes conduzidos de 10% a, no máximo 20%, em 95-99% de umidade relativa no ar. A manutenção da umidade do solo deve ser feita com uma rega por dia, preferencialmente pela tarde (ATAÍDE et al., 2014).

A atividade fisiológica das sementes inicia-se pela absorção de água, da qual resulta na reidratação dos tecidos e desencadeamento dos eventos metabólicos da germinação (ATAÍDE

et al., 2014). Nesse contexto, parte do processo de armazenamento de sementes envolve a secagem dessas, para atenuar contaminações, germinações imprevistas ou deterioramento. Merlo, Felizardo e Maia (2019) apontam que a secagem de sementes nas temperaturas de 40 e 50°C não produz a morte significativa de embriões frente a um elevado índice de germinação (~90%). Contudo, deve-se considerar que a secagem pode promover de maneira significativa os efeitos de dormência de sementes armazenadas, que deve ser levada em conta durante o plantio a fim de se obter a quantidade de plântulas desejadas.

**Figura 3.5** - Plântulas de Jacarandá-mimoso em sementeira após 3 meses de germinação.



Fonte: Merlo, Felizardo e Maia (2019)

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A caracterização de uma partícula ou conjunto de partículas é importante para aplicações tecnológicas. Conforme apontado por Pereira (2010), determinando as propriedades do material, é possível a realização do dimensionamento adequado de secadores e de sistemas de armazenamento. É importante também ressaltar a importância dessa caracterização para processos envolvendo transferência de calor e massa, como a secagem.

Adicionalmente, pode-se melhorar a qualidade do produto, agregando valor econômico e consequentemente reduzindo custos com mão de obra e tempo na operação de processamento e de pós-colheita (NUNES et. al, 2014). Devido à importância da caracterização física de sementes e da ausência dessas informações para grande parte das espécies florestais, um dos objetivos deste trabalho foi realizar diversas análises para caracterizar fisicamente as sementes

de *Jacaranda Mimosifolia*.

### **3.2.1 Propriedades das sementes**

#### 3.2.1.1 Dimensões

Quando se tratando de sementes, o tamanho e a forma são características específicas de cada produto, definidas geneticamente e que podem também ser influenciadas pelo ambiente durante e após o período de sua formação (NUNES et. al, 2014). De acordo com Pereira (2010), vários pesquisadores utilizaram micrômetro e paquímetro para determinar o tamanho de grãos e sementes através da medida das dimensões dos três principais eixos da partícula.

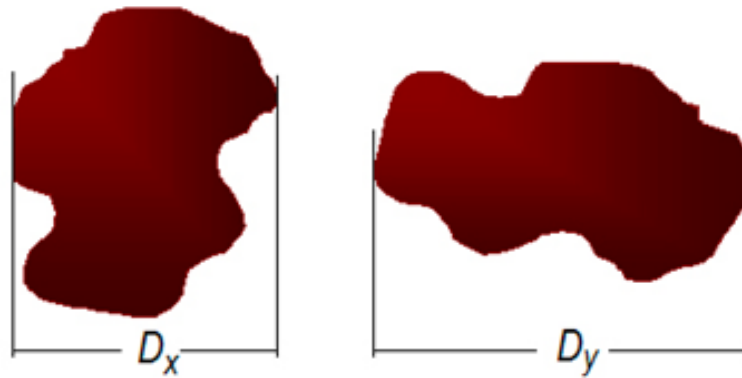
Outro método amplamente utilizado é o de análise de imagens. Esta técnica requer a análise de um número de partículas estatisticamente significativo devido ao grande número de medidas a serem realizadas de forma individual, o que tem demandado a utilização de programas automáticos como o software de análise de imagens Image Pró-Plus®, utilizado por Fumagalli (2007) e Maia et al (2017). As seguintes etapas para o método são propostas por Papini (2003):

- (1) formação da imagem (disposição das partículas);
- (2) aquisição e digitalização da imagem;
- (3) pré-processamento e realce;
- (4) segmentação;
- (5) realização das medidas;
- (6) processamento, análise e apresentação dos dados.

#### 3.2.1.2 Diâmetro de Feret

O diâmetro de Feret é um parâmetro relevante para a caracterização de materiais com geometria diferente de uma superfície esférica. É definido por Caetano (2019) pela distância entre duas tangentes de mesma direção na partícula, conforme exemplificado na Figura 3.6, que aponta um diâmetro mínimo de Feret ( $D_x$ ) e um diâmetro máximo de Feret ( $D_y$ ).

**Figura 3.6 - Diâmetros de Feret**



Fonte: Caetano (2019)

Esse diâmetro é utilizado por diversos autores na caracterização de sementes, como Araújo et. al (2014) que empregaram o diâmetro de Feret na caracterização de sementes de acerola, e Oliveira, Freire e Maia (2016) que utilizam a medida para sementes de lentilha.

#### 3.2.1.3 Esfericidade

A esfericidade é a relação entre a superfície de uma esfera que apresenta o mesmo volume de uma dada partícula e a superfície real dessa partícula (CAETANO, 2018). As técnicas de picnometria e análise de imagens são bastante utilizadas para o fator de forma. Com a área projetada, e o perímetro fornecidos pelo software de análise de imagens, é possível calcular a esfericidade pela Equação 1 (FUMAGALLI, 2007):

$$\varphi = \frac{d_e}{d_p} \quad (1)$$

Na Equação 1,  $\varphi$  é a esfericidade,  $d_e$  é o diâmetro de uma esfera do mesmo volume do objeto e  $d_p$  é o diâmetro da partícula e varia de 0 a 1.

#### 3.2.1.4 Massa específica

A determinação da massa específica de sementes pode ser realizada por picnometria através da medida de sua massa e volume. Segundo Karathanos et. al (1996) existem duas definições de massa específica para materiais porosos, como é o caso de grãos e sementes:

A massa específica real ou absoluta é aquela dada pela razão entre a massa do material e o volume da estrutura sólida, que inclui cadeias poliméricas e líquidas, excluindo os poros da partícula, e pode ser representada pela Equação 2.

$$\rho_s = \frac{m}{V_s} \quad (2)$$

Onde  $\rho_s$  é a massa específica real ou absoluta,  $m$  é a massa e  $V_s$  é o volume da estrutura sólida excluindo os poros. É comumente determinada por picnometria gasosa, em especial no picnômetro a hélio. O gás é capaz de penetrar todos os poros abertos maiores que o diâmetro de sua molécula, sendo por isso o hélio, um átomo com raio de 3Å interessante para essa aplicação (MAIA; PERAZZINI, 2018). A massa específica aparente é definida pela razão da massa da partícula com o volume da mesma, incluindo os poros, conforme a Equação 3.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V_{ap}} \quad (3)$$

Na Equação 3,  $\rho_{ap}$  é a massa específica aparente, e  $V_{ap}$  é o volume da partícula, incluindo seus poros. Para essa propriedade, é comumente empregado o método da picnometria líquida com tolueno ou hexano. Os solventes são utilizados na tentativa de impedir que o material poroso consiga absorver quantidades significativas de líquido (MAIA; PERAZZINI, 2018).

### 3.2.2 Propriedades do leito

#### 3.2.2.1 Densidade do leito

A densidade do leito é dada pela razão entre a massa e o volume do leito empacotado de sementes, dada pela Equação 4 (MAIA, 2017).

$$\rho_b = \frac{m}{V_b} \quad (4)$$

Em que,  $\rho_b$  é a densidade do leito, também chamada de “bulk” e  $V_b$  é o volume do leito de sementes. Pereira (2010) aponta que um método muito empregado na determinação da densidade do leito é a utilização de um recipiente graduado com massa conhecida de sementes, onde é possível a medida da altura nivelando-se a superfície. Pode-se distinguir também, as densidades de leito aerada e compactada, sendo a primeira decorrente da simples acomodação das sementes no leito, e a segunda pela acomodação do leito sem que ocorra deformação das



partículas (ZOTIN, 1985).

### 3.2.2.2 Porosidade

Conforme aponta Maia (2018), a porosidade influencia na área de contato do leito poroso com o fluido, o que impacta diretamente nos mecanismos de transferência de calor e massa. Através da densidade aparente e densidade “bulk”, é possível calcular a porosidade do leito, que é dada pela relação entre o volume de vazios de ar interpartícula e o volume total do leito e se relaciona com as densidade de “bulk” e massa específica aparente pela Equação 5 (MAIA, 2017). O símbolo  $\varepsilon_b$  representa a porosidade do leito.

$$\varepsilon_b = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_{ap}} \quad (5)$$

### 3.2.2.3 Fator de tortuosidade

A determinação de parâmetros importantes para o fluxo de gases é muitas vezes de difícil determinação, sendo muitas vezes métodos indiretos empregados para sua determinação (LE MOS; DA CUNHA; CAVALCANTE, 2019). O fator de tortuosidade é definido por Liu e Masliah (1996) como a razão entre a altura do leito pela real distância percorrida pelo fluido ao percorrer o meio poroso e pode ser calculado pela Equação 6 para meios porosos não consolidados. Equações alternativas são apresentadas no Quadro 3.1.

$$\tau = \sqrt{\varepsilon} \quad (6)$$

Quadro 3.1 – Equações alternativas para a tortuosidade

$\tau = 1/\sqrt{1 - \ln \varepsilon^2}$	Boudreau (1996)
$\tau = 1/(1 - 0,41 \ln \varepsilon)$	Comiti e Renaud (1989)

Fonte: Acervo pessoal

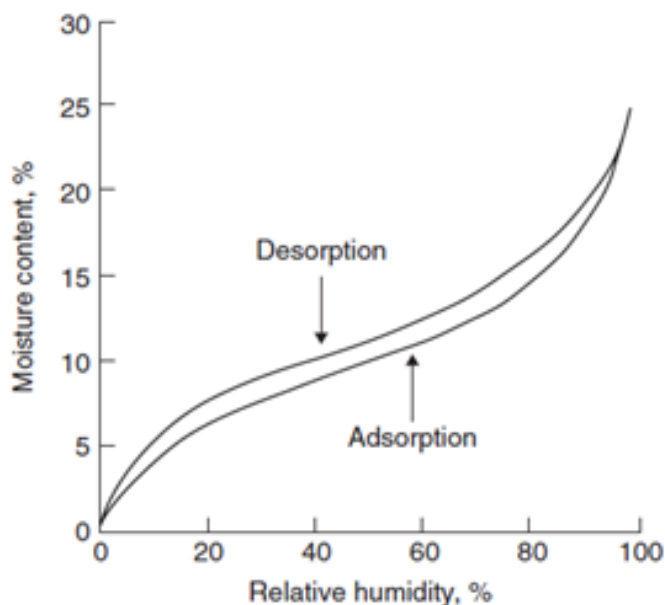
Em todas expressões, a tortuosidade é expressada pelo símbolo  $\tau$ , e  $\varepsilon$  representa a porosidade do leito. Para porosidades de menos de 50%, as equações de Lie Masliah (1996) e Boudreau (1996) apresentam maior proximidade na determinação do parâmetro. Para porosidades superiores, a equação de Liu e Masliah (1996) se aproxima da equação de Comiti e Renaud (1989).

### 3.3 ISOTERMAS DE DESSORÇÃO

Água é um componente dominante em sistemas como alimentos e sementes. Tem uma influência considerável nas variáveis do processo, características do produto e de estabilidade. Todas essas são influenciadas pela concentração e estado da água. O estado da água é estabelecido pela complexa interação existente entre a água presente e os componentes do material, como proteínas, lipídios e carboidratos.

A relação mais fundamental que descreve a interação entre água e o material é a relação entre a atividade da água e o teor de água da mistura água e material, a uma dada temperatura e pressão. Essa relação é chamada de isoterma de adsorção ou dessorção (QUIRIJNS et al., 2005)

**Figura 3.7** - Isoterma de adsorção e dessorção para o trigo



Fonte: Bala (2017)

As isotermas são extremamente importantes na modelagem do processo de secagem, no desenho e otimização do equipamento, em prever a estabilidade da semente, em calcular as mudanças no teor de água que podem ocorrer durante o armazenamento, e em selecionar o material de empacotamento ideal (Gal, 1987). É um meio essencial para prever e avaliar estabilidade física, química e microbiológica, e mudanças na qualidade e poder germinativo da semente durante o processamento, bem como no armazenamento. (QUIRIJNS et al., 2005)

A fim de aplicar esse método é necessário compreender a existência de dois tipos de água: água livre e água ligada. A transição entre essas classes e a termodinâmica correspondente formam

os componentes do modelo de secagem. (QUIRIJNS et al., 2005) A água ligada corresponde à porção da umidade que se encontra fortemente ligada às moléculas do material, enquanto a água livre corresponde àquela porção que apresenta pouca interação energética com as moléculas de material (KIRANOUDIS et al., 1993).

A atividade de água é definida pela razão entre a pressão parcial de vapor em equilíbrio da água presente no material e a pressão de vapor da água pura na mesma temperatura. Dessa forma, as isotermas de adsorção e dessorção permitem a avaliação do quão forte é a ligação entre a água e o adsorvato. (QUIRIJNS, et al. 2005).

### 3.3.1 Modelos matemáticos para isotermas

Numerosos modelos matemáticos são encontrados na literatura descrevendo as isotermas de adsorção ou dessorção em materiais orgânicos. Variam em origem (empírica, semi-empírica ou teórica) e aplicabilidade (limite para umidade relativa e tipo de material) segundo apontam Kiranoudis et al. (1993).

**Tabela 3.1** – Modelos matemáticos para determinação de isotermas de adsorção/dessorção.

Modelo	Equação	Referência
GAB	$\frac{X}{X_m} = \frac{C_g \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w)(1 - K \cdot a_w + C_g \cdot K \cdot a_w)}$	Van den Berg (1985)
BET	$\frac{X}{X_m} = \frac{C_g \cdot a_w}{[(1 - a_w) + (C_g - 1) \cdot (1 - a_w) \cdot a_w]}$	Rizvi (1986)
Halsey	$X = \left( \frac{-K}{\ln(a_w)} \right)^{\frac{1}{n}}$	Halsey (1948)
Henderson	$X = \left( \frac{\ln(1 - a_w)}{-C_g \cdot (273,15 + T)} \right)^{\frac{1}{n}}$	Henderson (1952)
Oswin	$X = K \cdot \left( \frac{a_w}{1 - a_w} \right)^n$	Oswin (1946)
Henderson-thompson	$X = \left[ \frac{\ln(1 - a_w)}{-K \cdot (T + C_g)} \right]^{\frac{1}{n}}$	Barrozo (1995)
Peleg	$X = K \cdot e^{[\ln(a_w) \cdot n]} + C_g \cdot a_w^d$	Nascimento (2008)

Fonte: Elaboração própria

O modelo mais versátil na literatura, é a equação de 3 parâmetros GAB (Guggenheim-Anderson-deBoer), que foi recomendada pelo *European COST 90 project*. Em comparação com

outros modelos, é o melhor para prever dados de adsorção e o mais comumente usado (QUIRIJNS et al., 2005). O modelo GAB é utilizado no trabalho de Hubinger (2008) que também analisa outros modelos apresentados na Tabela 3.1. Yadav et al. (2008) também aplicam o mesmo modelo.

Quirijns et al. (2005) e Van der Berg (1981) sugerem a utilização apenas dos dados de dessorção, desconsiderando possíveis efeitos de histerese, para a determinação de  $\Delta H_{is}$ . Segundo os autores a dessorção representa melhor os fenômenos como um todo. Além disso, os autores argumentam que o estudo de isotermas, visa, sobretudo, fornecer informações práticas para processos de secagem, portanto, um processo de dessorção (MAIA, 2015). O efeito da histerese sugere que a atividade do material não é apenas uma função do ambiente imediato, mas também da condição anterior de umidade (BALA, 2017).

O modelo GAB representa uma extensão refinada das teorias de Langmuir e da extensão proposta por Brunauer, Emmett e Teller no modelo BET. A base teórica para o modelo GAB é a consideração de adsorção física localizada em multicamada, sendo que a primeira camada de água cobre uniformemente a superfície do adsorvato e é fortemente ligada a ele, formando o que se chama de monocamada. As moléculas dispostas na multicamada apresentam interações com o adsorvato em níveis que variam desde a monocamada até a água líquida, ou água de bulk (QUIRIJNS et al., 2005). Dessa forma, sucessivas camadas de água apresentam cada vez mais propriedades semelhantes às da água líquida (RAO, RIZVI e DATTA, 2005). Três considerações são utilizadas para o desenvolvimento do modelo GAB: que o adsorvato apresente sítios independentes e distinguíveis de mesma atividade, isotérmicos e abertos ao vapor adsorvente. (ANDERSON, 1946). A termodinâmica estatística conduz à expressão do modelo GAB, da Tabela 3.1.

Nela, os três parâmetros do modelo GAB,  $C_g$ ,  $K$  e  $X_m$  possuem significado físico.  $C_g$  é definido como a razão entre a função de partição da primeira molécula adsorvida em um sítio e a função de partição das moléculas adsorvidas além da primeira molécula na multicamada. É uma medida da força de ligação da água aos sítios de ligação primários e tem natureza intrinsecamente entálpica. Assim, quanto maior o valor de  $C_g$ , mais fortemente a água estará ligada na monocamada e, conseqüentemente, maior será a diferença de entalpia entre as moléculas da monocamada e as da multicamada (QUIRIJNS et al., 2005). Considerando que as moléculas da monocamada apresentam pouca mobilidade e, conseqüentemente, um restrito número de configurações possíveis, o efeito entrópico associado a  $C_g$  é menor do que o entálpico (VAN DER BERG, 1981).

K é definido como a razão entre a função de partição das moléculas de água líquida e a função de partição das moléculas adsorvidas na multicamada. O conteúdo entrópico associado a K pode ser explicado considerando que as moléculas de água líquida apresentam maiores possibilidades de configuração e mobilidade quando comparadas àquelas na multicamada (VAN DER BERG, 1981). Quando K se aproxima do valor unitário não se observa distinção entre a água líquida e a água presente na multicamada, e o modelo GAB se reduz ao modelo BET, que considera as características da água na multicamada iguais às da água líquida.

Xm é conhecido como valor de monocamada e representa uma medida da disponibilidade de sítios ativos para absorção de água pelo material (VAN DER BERG, 1981). Quirijns (2005) descreve o significado físico do parâmetro Xm como o número de moléculas na monocamada ou, simplesmente, o conteúdo de umidade da monocamada. Hubinger (2008) também descreve o parâmetro como: “a situação no qual os pontos primários de adsorção estão saturados por moléculas de água” (conceito equivalente a camada monomolecular de BET)

A análise qualitativa dos parâmetros GAB torna possível a avaliação do comportamento da umidade adsorvida pela combinação dos valores de Cg e K, conforme descrito no Quadro 3.2. Cg e K são, segundo Hubinger (2008), ligadas as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subsequentes.

**Quadro 3.2** - Combinação da magnitude dos parâmetros Cg e K e o correspondente mecanismo de adsorção/dessorção.

Mo ≈ Mu ≈ Liq	Mo ≈ Mu ≠ Liq	Mo ≠ Mu ≠ Liq	Mo ≠ Mu ≈ Liq
Cg ≈ 1	Cg ≈ 1	Cg >> 1	Cg >> 1
K ≈ 1	K << 1	K << 1	K ≈ 1

Fonte: Maia, Albini e Freire (2016)

Isotermas de dessorção são dependentes da temperatura. Uma temperatura mais alta vai diminuir a energia ligante entre as moléculas. Por causa de um estado de excitação aumentado entre as moléculas, as distâncias mútuas aumentam, e as forças atrativas diminuem. Elas se tornam menos estáveis e as ligações água-material se tornam mais frágeis. Consequentemente, um aumento na temperatura indica redução da umidade de equilíbrio à uma atividade específica. Isso é consistente com a termodinâmica da dessorção (HOSSAIN, 2001).

Devido ao seu caráter termodinâmico, a dependência da temperatura pode ser incorporada nos parâmetros Cg e K:

$$C_g = C_{g0} \cdot e^{\left(\frac{\Delta H_{Cg}}{R.T}\right)} \quad (7)$$

$$K = K_0 \cdot e^{\left(\frac{\Delta H_K}{R.T}\right)} \quad (8)$$

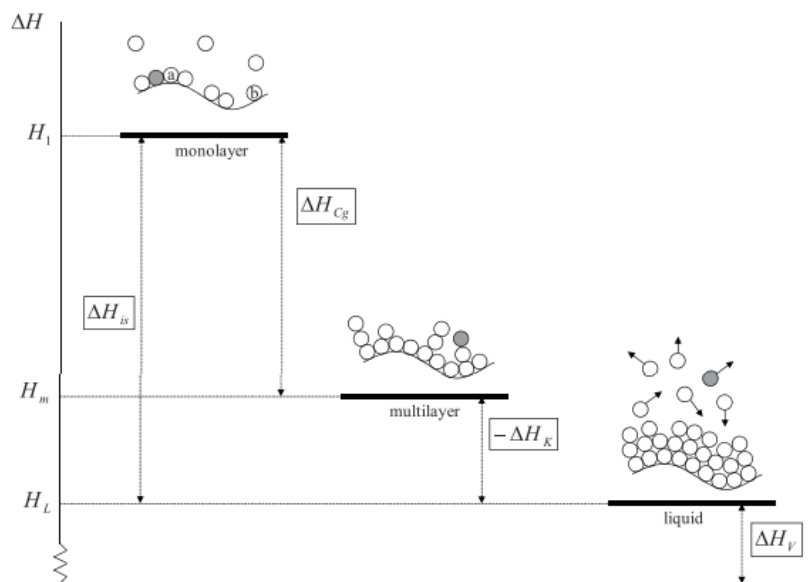
Nos quais:

$C_{g0}$  e  $K_0$  são parâmetros de ajuste,  $T$  é a temperatura e  $R$  é a constante dos gases.

$\Delta H_{Cg} = H_1 - H_m$  = diferença de entalpia entre a adsorção na monocamada e na multicamada. Esse valor é esperado que seja positivo, devido à interação exotérmica da água com locais primários de adsorção.

$\Delta H_K = H_l - H_m$  = diferença entre o calor de condensação da água e o calor de adsorção na multicamada. Esse valor será negativo e menor, já que as moléculas na multicamada são menos fortemente ligadas. Maia, Albini e Freire (2016) sugerem o esquema apresentado na Figura 3.8 para descrever os níveis entálpicos nos sítios.

**Figura 3.8** – Sorção localizada e seus respectivos níveis entálpicos



Fonte: Maia, Albini e Freire (2016)

$C_{g0}$  e  $K_0$  são entrópicos por natureza. Eles são definidos como a proporção de funções de partição reduzidas ou funções de acomodação entre a mono e a multicamada, e entre o líquido e a multicamada, respectivamente.

É comum na literatura o cálculo da entropia de dessecção e do calor isostérico conforme o trabalho feito por Maia (2015). Porém, devido ao comportamento irregular da matriz porosa, comparar a semente nas três temperaturas seria o mesmo que comparar três materiais distintos do ponto de vista da estrutura energética interna, o que é inviável.

### 3.4 SECAGEM EM CAMADA DELGADA

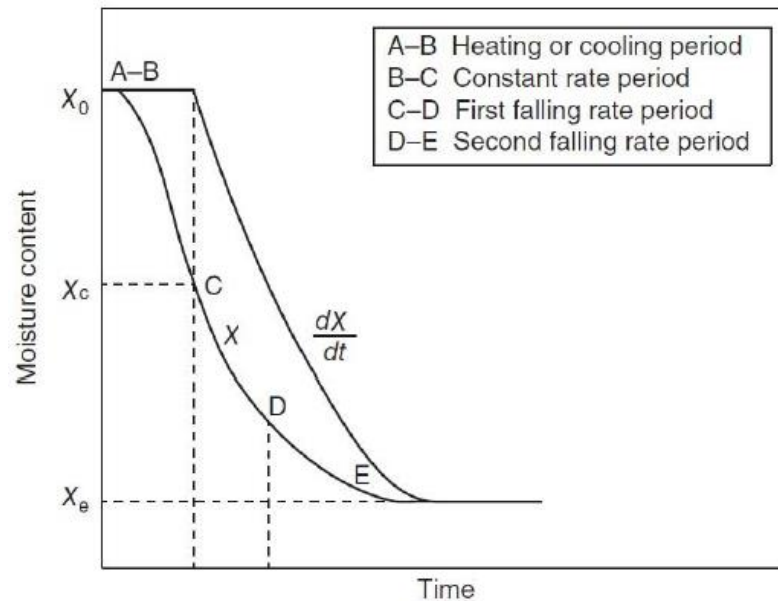
A produção de sementes de alta qualidade possui altos custos, demandando muita mão-de-obra no período de colheita e secagem. Sementes em geral são colhidas com teores de umidade de 40 a 60%, conforme Macedo et al. (1987). Para as condições brasileiras, o teor de umidade ideal para a armazenagem de grãos e sementes é de 13%. Este valor foi estipulado por estabilizar a atividade aquosa do produto e assim inviabilizar, principalmente, o desenvolvimento de fungos e de bactérias (PEREIRA, 2010).

A secagem de produtos agrícolas pode ser realizada de forma natural ou artificial. A secagem natural emprega a radiação solar para aumentar o potencial de secagem do ar. A grande desvantagem dessa modalidade é dependência das condições climáticas e a maior vantagem é o fato de propiciar menor ocorrência de grãos trincados e/ou quebrados. A secagem artificial consiste no emprego de artifícios para acelerar o processo. Isto configura nos secadores que se apresentam sob diferentes configurações e contêm acessórios como: sistema de aquecimento do ar – fornalhas a lenha, ou queimadores de gás; sistema de movimentação do ar – ventiladores, ou sistema de movimentação dos grãos - elevadores de caçambas, transportadores helicoidais ou fitas transportadoras (SILVA, 2008).

Os limites da temperatura do ar de secagem são determinados em função da sensibilidade dos componentes químicos que determinam a viabilidade da semente (GARCIA, 2004). Ao longo do processo de secagem, a temperatura do material se aproxima da temperatura do ar, e esta, se elevada, pode inviabilizar os tecidos, inativando a semente ou reduzindo seu poder germinativo. Além da temperatura do ar de secagem, a velocidade do ar usada no processo de secagem é outro fator relevante na qualidade fisiológica das sementes submetidas à secagem. Em algumas situações, uma vez aumentada a vazão do ar, pode ocorrer o aumento da taxa de água removida, ocasionando diminuição do tempo de secagem e alterações qualitativas no produto. Dessa forma, a combinação desses dois parâmetros irá interferir diretamente na taxa de secagem, podendo contribuir de forma significativa na diminuição do tempo gasto no processo, impedindo a degradação das sementes submetidas à secagem (CARLESSO et al. 2005 apud PEREIRA 2010).

Bala (2017) apresenta um esquema para a curva típica de secagem, representado pela Figura 3.9. Ele inclui no esquema o tempo para que a amostra atinja a temperatura necessária para que a secagem se inicie (período A-B).

**Figura 3.9** – Cinética típica de secagem



Fonte: Bala (2017)

Segundo Massarani e Telles (1992), o estudo de secagem é importante para entender a simulação e o projeto de secadores, além de indispensáveis na predição de taxa de secagem e na modelagem dos fenômenos de transferência de calor e massa em leitos.

Sherwood (1930) descreve as etapas gerais de uma cinética de secagem evidenciadas na Figura 3.9 como:

- 1) Período B-C: Nos estágios iniciais da secagem, o sólido muito úmido possui um filme de líquido, tornando o comportamento da secagem similar a sua evaporação, enquanto a superfície mantém-se úmida. Durante esse período a taxa de secagem é constante.
- 2) Período C-D: Após um certo tempo o conteúdo de água se reduz na superfície e a taxa de secagem começa a decrescer. A umidade final do período de secagem constante, e início do período decrescente é comumente descrita como “umidade crítica”
- 3) Período D-E: A umidade então começa a se aproximar de um valor final, chamado de “umidade de equilíbrio”, que depende das condições do meio como temperatura e



umidade do ar. Com isso, nos aproximamos de um segundo período de taxa decrescente, quando os controles internos da difusão do líquido predominam.

Bala (2017) também afirma que o período de secagem a taxa constante não é característico de secagem de produtos agrícolas, e que é comum nesse tipo de cinética uma rápida diminuição na umidade do material, seguido por uma taxa progressivamente decrescente.

### **3.4.1 Camada delgada**

O estudo em camada fina (ou delgada) é o mais empregado para a determinação da cinética de secagem (PEREIRA, 2010). A secagem em camada delgada consiste em determinar dados de umidade e temperatura do sólido em função do tempo (cinética de secagem) para condições consideradas constantes de temperatura, velocidade superficial e umidade relativa do gás. Nesta situação, o ar de secagem nas condições constantes, percola uma fina camada fixa de material sólido úmido, cuja massa e temperatura é determinada em intervalos de tempo pré-determinados.

O estudo da secagem em camada delgada é um estudo clássico e prévio da cinética de secagem que fornece informações essenciais para compreender os efeitos das condições operacionais de processo, bem como levantar dados e parâmetros de transporte que são aplicados em estudos de modelagem e simulação, bem como no controle de secadores. Muitos secadores e tecnologias de secagem que atualmente estão disponíveis no mercado e na literatura vieram de estudos que empregaram essa abordagem como Silva et al (2009) e D'Avila et al (2019). Assim, a contribuição de estudos de camada delgada na secagem nos mais variados ramos da ciência e da tecnologia é muito importante, incluindo sua aplicação direta na engenharia química (MAIA, 2018).

A camada delgada pode ser tanto um conjunto de partículas (grãos, sementes, granulado orgânico ou inorgânico), quanto uma “fatia” de um material orgânico ou inorgânico (frutas, vegetais, soluções poliméricas, pastas orgânicas e inorgânicas), desde que a espessura da camada de sólidos de ambos os casos seja fina o suficiente a ponto de ser possível inferir com relativa segurança que o tempo de residência do gás no interior dessa camada é muito curto a ponto de não sofrer modificações significativas de temperatura e umidade com relação às suas condições de entrada (MAIA, 2018). A partir dessas condições, tem-se que uma camada delgada apresenta um comportamento próximo ao de uma partícula do leito.

A modelagem com  $Bi_m \ll 1$  nos permite verificar a condição de camada fina. Isso porque, a hipótese da camada delgada parte do pressuposto que o leito poroso é tão fino que o gradiente de concentração dentro do leito se aproxima de zero, ou seja, a maior resistência ocorre na

convecção. Pra sementes em geral, podemos esperar uma condição de  $Bi_m \rightarrow \infty$ , pois na superfície das partículas entende-se que a superfície se aproxima do equilíbrio muito rapidamente. Portanto, como a secagem apresenta um conjunto de efeitos, é importante testar as duas modelagens.

### 3.4.2 Modelagem com parâmetro constante

De maneira análoga à utilizada por Martinho et al. (2017). O meio poroso formado pelas sementes foi aproximado a uma placa plana infinita isotrópica com propriedades constantes. Desta forma, a variação de umidade em relação ao tempo e em relação a posição longitudinal do leito pode ser descrita pela analogia da segunda Lei de Fick, conforme a Equação 9, em que  $D_{eff}$  é a difusividade efetiva,  $X(z,t)$  é a umidade local.  $t$  é o tempo, e  $z$  é a coordenada espacial.

$$\frac{\partial X(z, t)}{\partial t} = D_{eff} \cdot \frac{\partial^2 X(z, t)}{\partial z^2} \quad (9)$$

Para simplificação, com o objetivo de se obter uma solução para a Equação 9, considerou-se uma placa de espessura ( $0 < z < L$ ), em que a base  $z=0$  é a base da célula onde incide o ar de secagem. Impôs-se a condição de contorno de que não há transferência de massa passando pelo plano em  $z=0$ , conforme descrito pela Equação 10.

$$\left[ \frac{\partial X(z, t)}{\partial t} \right]_{z=0} = 0; (t > 0) \quad (10)$$

Além disso, temos a suposição em que a condição inicial é que a umidade é uniforme ao longo do leito, representada pela Equação 11, onde  $X_0$  é a umidade inicial.

$$X(z, t) = X_0; (t = 0) \quad (11)$$

Conforme sugerido por Martinho et al. (2017), para  $z=L$  foram impostas duas abordagens diferentes para a condição de contorno. A primeira considerou que a superfície entra em condições de equilíbrio nos primeiros instantes de secagem ( $Bi_m \ll 1$ ), enquanto a segunda considerou a perda de água na superfície por convecção ( $Bi_m \rightarrow \infty$ ). Aqui o símbolo  $Bi_m$  representa o número de biot de massa.

Modelagem com equilíbrio na superfície: Essa condição pode ser representada pela relação descrita na Equação 12 e consiste em admitir que a umidade de equilíbrio é atingida na superfície do leito logo nos primeiros instantes de secagem. Desta forma, a umidade é uniforme no interior da célula.  $X_{eq}$  é a umidade de equilíbrio.

$$X(z, t)|_{z=L} = X_{eq}; (t > 0) \quad (12)$$

A solução para a modelagem realizada dessa forma é apresentada nas Equações 13 e 14, nas quais  $n$  é o número de termos da série,  $L$  a espessura do leito,  $\bar{X}(t)$  é a umidade média, e  $X_{ad}$  é a umidade adimensional.

$$X_{ad} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cdot e^{\left[-(2n-1)^2 \pi^2 \frac{D_{eff} \cdot t}{L^2}\right]} \quad (13)$$

$$X_{ad} = \frac{\bar{X}(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (14)$$

Efremov e Kudra (2005) afirmam que a partir de  $n=20$ , o erro percentual para a série infinita atinge valores inferiores a 1%.

Modelagem com resistência externa significativa: Nesse modelo considera-se a convecção mássica na superfície do meio e a condição de contorno pode ser escrita conforme apresentado na Equação 15, onde  $h_m$  é o coeficiente convectivo de transferência de massa,  $\rho_p$  é a densidade da partícula,  $Y_{eq}$  é a umidade do gás na saturação e  $Y_{\infty}$  é a umidade do gás de secagem.

$$\left[ \frac{\partial X(z, t)}{\partial t} \right]_{z=L} = - \frac{h_m \cdot \rho_g}{D_{eff} \cdot \rho_p} (Y_{eq} - Y_{\infty}); (t > 0) \quad (15)$$

A solução desse modelo está apresentada nas Equações 16 e 17.

$$X_{ad} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot \text{sen}^2(\lambda_n)}{\lambda_n^2 + \lambda_n \cdot \text{sen}(\lambda_n) \cdot \cos(\lambda_n)} \cdot \exp \left[ -\lambda_n^2 \frac{D_{eff} \cdot t}{L^2} \right] \quad (16)$$

$$Bi_m = \lambda_n \cdot \tan(\lambda_n) \quad (17)$$

Nas quais  $\lambda_n$  são os autovalores da equação transcendental.

O procedimento experimental deve levar em consideração que o leito de partículas obedeça ao comportamento do modelo de camada fina a fim de que os dados possam ser representados e analisados de acordo com esse modelo.

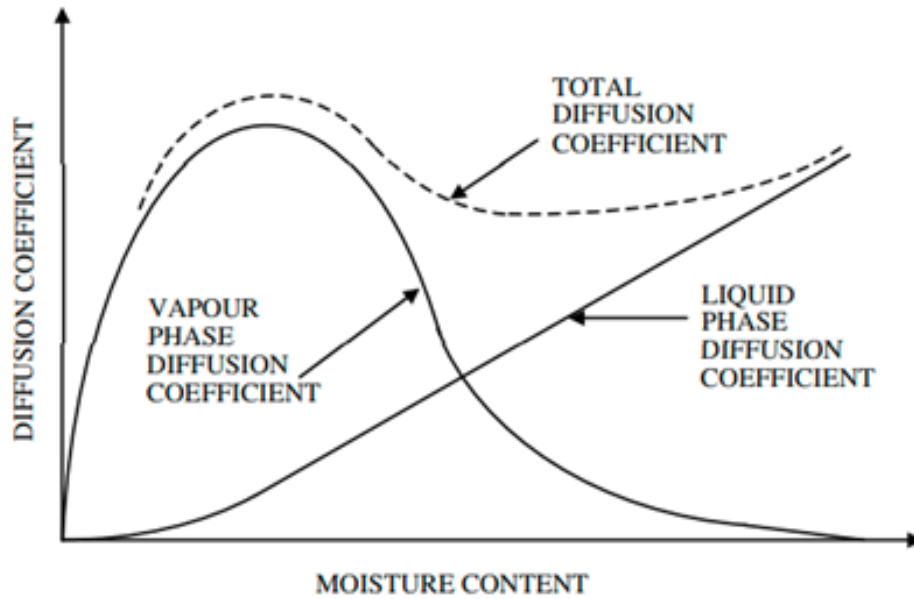
Para tanto é necessário um sistema composto por uma célula de secagem adaptada e compatível com o tipo de material a ser estudado, um sistema compressão e aquecimento do ar de secagem e o sistema de instrumentação capaz de fornecer as informações de queda de pressão, temperatura e velocidade da corrente gasosa ao longo do sistema.

### 3.4.3 Difusividade variável

O processo de difusão de água em produtos agrícolas, inerente a secagem, é um processo complexo que pode envolver diversos mecanismos. Alguns deles são apontados por Resende et al. (2011) como difusão molecular, difusão capilar, difusão de superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e difusão térmica. Pode-se citar também os efeitos do encolhimento (PORTELA et al., 2014). Como a difusividade tratada nas Equações 13 e 16 varia de acordo com a mudança das condições de secagem, convencionou-se chamá-la de Difusividade efetiva (Bala, 2017).

Conforme já citado neste trabalho, nos estágios iniciais da secagem um filme de líquido recobre o sólido tornando o processo difusivo próximo ao da secagem na fase líquida. Entretanto, de acordo com Pickles (2003), conforme o filme líquido se reduz completamente, e os efeitos dos poros passam a predominar, a transferência de massa passa de parcialmente convectiva para puramente difusiva, a umidade está evaporando no interior do material, dependendo da área transversal dos poros e posições dos meniscos. O efeito difusivo na fase vapor atinge um ponto máximo em umidades mais baixas (PHILLIP, 1957). De forma análoga, para a maior parte dos materiais, o coeficiente de difusão da fase líquida aumenta com o teor de umidade e, eventualmente, torna-se o mecanismo dominante de difusão (PHILLIP, 1957). Assim, seria esperado que o coeficiente de difusão efetivo total variasse como mostrado na Figura 3.10. Nota-se que para umidades muito baixas o coeficiente difusivo se reduz drasticamente, devido aos efeitos da água ligada à matriz do material que serão discutidos posteriormente.

**Figura 3.10** – Variação da difusividade efetiva com a umidade



Fonte: Pickles (2003)

D'avila et al, (2019) confirmaram a dependência da difusividade efetiva com relação a umidade para grãos de soja, utilizando um método recorrente na literatura, o método da tangente. Os autores confirmaram que levar em conta os efeitos da umidade ao longo da secagem foi mais efetivo que diversos modelos que levavam em conta modelagem com difusividade constante. O método é resumido pela Equação 18, em que  $\left(\frac{dX_{ad}}{dt}\right)_{exp}$  representa a taxa obtida de forma experimental, e  $\left(\frac{dX_{ad}}{dFo}\right)_{teo}$  representa a tangente do modelo teórico. Vagenas e Karathanos (1991) utiliza o mesmo método para materiais granulares.

$$D_{eff} = \left[ \frac{\left(\frac{dX_{ad}}{dt}\right)_{exp}}{\left(\frac{dX_{ad}}{dFo}\right)_{teo}} \right] \quad (18)$$

#### 3.4.4 Modelo de Efremov para difusividade variável

Com base nos conceitos apresentados, Efremov et al (2008) propuseram um modelo (método pseudo-estacionário modificado) para descrever a difusividade variável baseando-se 2ª lei de Fick e sua solução para condição de equilíbrio na superfície (Equação 13). Segundo os autores, para valores de Fourier  $Fo > 0,08$ , podemos aproximar a solução pelo truncamento no primeiro termo da série infinita (Equação 19), onde  $Fo$  é o número de Fourier, que para placa plana é

representado pela Equação 20.

$$X_{ad} = \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-\pi^2 \cdot Fo} \quad (19)$$

$$Fo = \frac{D_{eff} \cdot t}{L^2} \quad (20)$$

Isso ocorre porque nessa etapa da secagem, após um longo período de tempo, o regime transiente se aproxima de um regime pseudo-estacionário, também referido por Efremov e Kudra (2005) como “regime regular”. No período inicial da secagem, a variação do conteúdo de umidade é muito alta em um curto período de tempo, tornando o sistema altamente transiente e com variação na transferência de massa (EFREMOV, KUDRA 2005).

Baseado nisso, os autores propõem que para valores de  $0 < Fo < 0,08$ , o ajuste é feito pela Equação 18, onde “a” e “b” são parâmetros determinados pelo método dos mínimos quadrados. Para a placa  $a=0,65$  e  $b=0,51$  com um erro máximo de  $\pm 1,2\%$

$$X_{ad} = e^{-\pi^2 \cdot b \cdot Fo^a} \quad (21)$$

Com base nas equações 19, 20 e 21, pode-se isolar o termo da difusividade efetiva, obtendo-se as equações 22 e 23, para  $Fo > 0,08$  e  $0 < Fo < 0,08$  respectivamente.

$$D_{eff} = -\frac{L^2}{\pi^2 \cdot t} \cdot \ln\left(\frac{\pi^2 \cdot X_{ad}}{8}\right) \quad (22)$$

$$D_{eff} = \frac{L^2}{\pi^{(\frac{2}{a})} \cdot b^{(\frac{1}{a})} \cdot t} \cdot [\ln X_{ad}]^{-\frac{1}{a}} \quad (23)$$

Com base na teoria proposta por Efremov (1998), da hipótese de regime pseudo-estacionário, obtemos que:

$$X_{ad} = \frac{1}{1 + (t/\sigma)^{m_h}} \quad (24)$$

Combinando as fórmulas 22 e 20 com a fórmula 24, obtemos para valores de Fourier  $0 < Fo < 0,08$  e  $Fo > 0,08$  respectivamente dados pelas equações 25 e 26:

$$D_{eff} = \frac{L^2}{\pi \left(\frac{2}{a}\right) \cdot b \left(\frac{1}{a}\right) \cdot t} \left\{ \ln \left[ 1 + \left( \frac{t}{\sigma} \right)^{m_h} \right] \right\}^{1/a} \quad (25)$$

$$D_{eff} = \frac{L^2}{\pi^2 \cdot t} \ln \left\{ \frac{8}{\pi^2} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{t}{\sigma} \right)^{m_h} \right] \right\} \quad (26)$$

Onde  $\sigma$  é o tempo característico, e  $m$  é um fator de ajuste referido por Efremov (1999) como “fator de intensidade hidrodinâmica”.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

As sementes de Jacarandá-mimoso utilizadas foram adquiridas da empresa Arborcenter com atestado de pureza da espécie.

#### 4.1.1 Espessura com paquímetro

Devido ao formato da semente, é difícil a utilização de métodos de análise de imagem para a determinação de sua espessura. Portanto, utilizou-se um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm para a medição da espessura de 184 sementes de uma amostra escolhida aleatoriamente em meio ao lote, tomando-se o cuidado de evitar deformações. A partir dos dados foi possível determinar a espessura média e desvio padrão, além da elaboração de um histograma para descrever a variabilidade do lote.

#### 4.1.2 Densidade e porosidade do leito

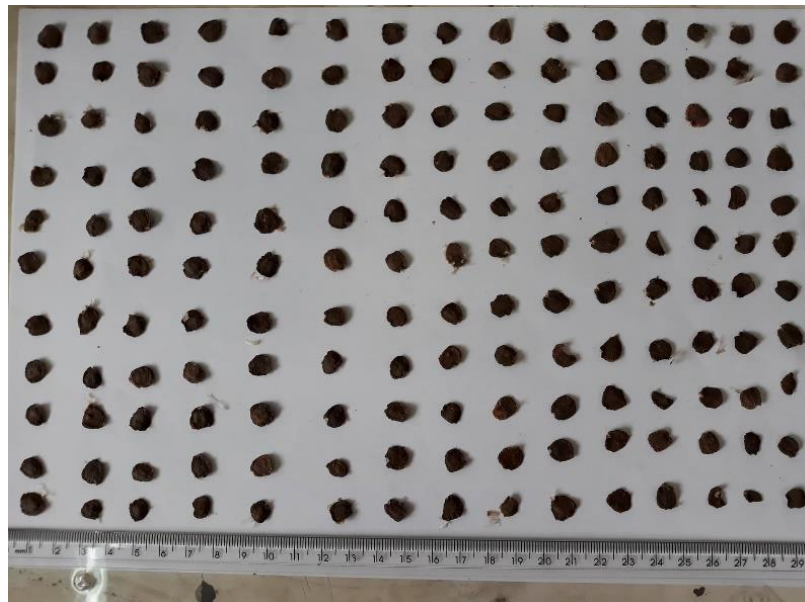
Para tal determinação foram realizados ensaios em triplicata utilizando uma proveta de 1000 ml. Foram determinadas as densidades do leito aerada e compactada. A densidade do leito aerada foi obtida com a medida do volume após o despejo de uma massa conhecida de sementes entre 46 e 47 gramas, com a simples acomodação do leito. Para a densidade bulk compactada,

as sementes foram acomodadas no seu interior com a elevação e queda sucessiva da proveta, mantendo-se uma altura de queda constante e com algumas batidas na lateral para acomodação da amostra. As batidas foram realizadas até que o leito atingisse um valor mínimo, após o qual as batidas não mais tivessem impacto na densidade do leito. O método foi empregado por Maia (2017). Através desses valores foi possível calcular a porosidade do leito, que é dada pela Equação 5.

#### 4.1.3 Análise de imagem

As imagens das sementes de Jacarandá foram obtidas com uma câmera digital Samsung, com definição de 13 megapixels. Foram selecionadas 165 sementes de forma aleatória, e dispostas sobre um fundo branco com uma régua de 30 cm como gabarito conforme ilustrado na Figura 4.1. Foi então aplicado um filtro preto e branco com o uso do Photoshop CS6, para propiciar uma maior precisão na análise de imagem pelo software Image Pro Plus 6. Os parâmetros determinados pelo software foram os diâmetros máximo, médio e mínimo, os diâmetros de Feret máximo, médio e mínimo, perímetro e área.

**Figura 4.1** - Sementes de Jacarandá Mimoso em unidade de lote para análise de imagem



Fonte: Acervo pessoal



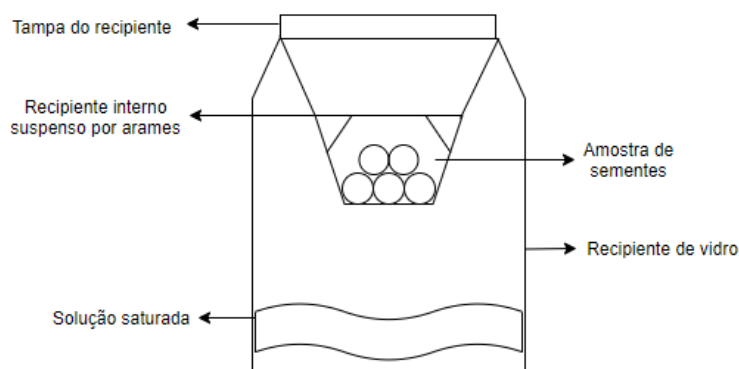
#### 4.1.4 Picnometria

A massa específica aparente foi determinada por picnometria líquida utilizando o tolueno como fluido percolante em um picnômetro de 100 mL previamente calibrado com água purificada. O procedimento foi realizado em tréplica.

#### 4.2 ISOTERMAS DE DESSORÇÃO

Para a realização das isotermas de dessorção, foi utilizado o método gravimétrico estático. Amostras de 6 sementes foram inseridas em recipientes com soluções saturadas a temperatura constante, e inseridas de maneira que não houvesse contato da solução com a amostra, no topo do frasco. A Figura 4.2 mostra um esquema ilustrativo dos recipientes utilizados no experimento. Foram utilizados 3 recipientes para cada solução, totalizando 24 frascos.

**Figura 4.2** – Esquema do recipiente utilizado para isoterma de dessorção



Fonte: Acervo pessoal

Os recipientes foram inseridos então em câmara climática da marca Binder, modelo KMF 720, que possui precisão de 0,1°C, com a umidade relativa e temperatura do ambiente fixado. Foram então realizadas medidas de massa das amostras de sementes inicialmente, e após um período de 2 semanas, tempo suficiente para que se atinja o equilíbrio no sistema em questão. Ao longo do período foram realizadas checagens diárias para garantir que a solução se mantivesse em condições de saturação, por meio do acréscimo de uma quantidade do sal quando necessário. As pesagens foram realizadas em balança com precisão de 0,0001 g. As soluções, e as umidades relativas na condição de saturação foram as apresentadas na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** - Umidades relativas para soluções saturadas a diferentes temperaturas

<b>Temperatura</b>	<b>20 °C</b>	<b>30 °C</b>	<b>50 °C</b>
KOH	0,08	0,07	0,06
CH <sub>3</sub> COOK	0,21	0,20	0,19
MgCl <sub>2</sub>	0,33	0,32	0,31
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,43	0,43	0,43
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,55	0,48	0,47
NaNO <sub>2</sub>	0,65	0,62	0,60
NaCl	0,76	0,75	0,75
KCl	0,85	0,82	0,80

Fonte: Maia et al. (2016)

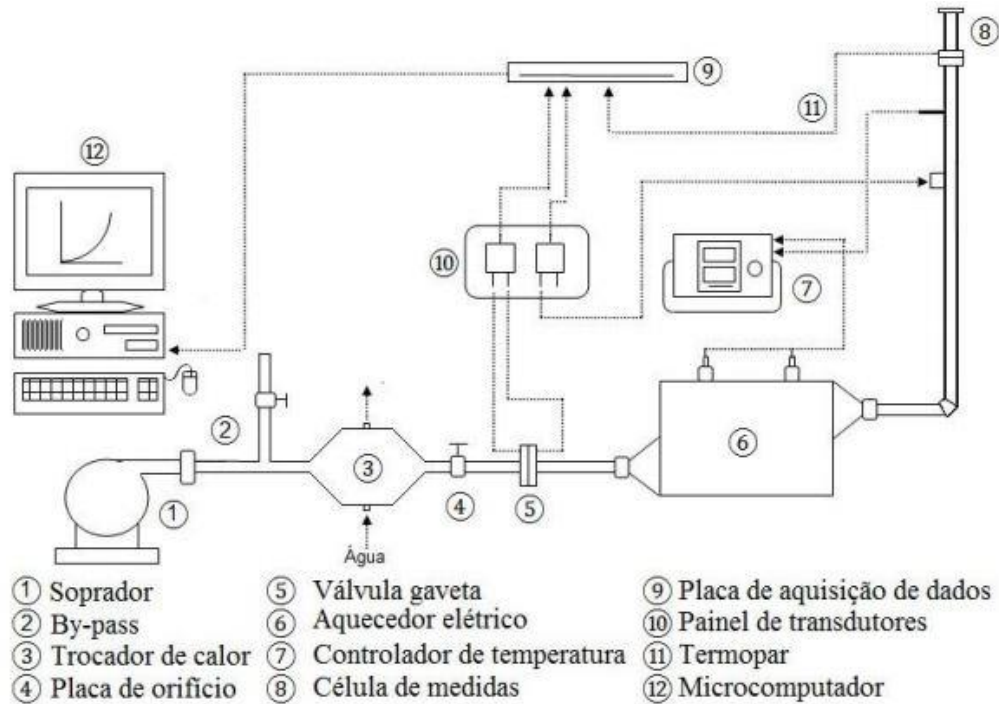
Como o experimento foi realizado também para a temperatura de 40°C, adotou-se a média entre os valores de umidade relativa para 30 e 50°C.

### 4.3 SECAGEM EM CAMADA DELGADA

#### 4.3.1 Ensaios de secagem

Para os ensaios de secagem, primeiro foi determinada a umidade média do lote por meio da massa seca em triplicata. Com base nisso, as sementes foram separadas em lotes de aproximadamente 7,5 g e reumidificadas por adição de água em um recipiente selado por 2 dias a uma temperatura de 5°C. A quantidade de água adicionada foi de forma que a umidade final atingida fosse de 1 kg/kg na base seca. Foram excluídas do processo experimental sementes que apresentaram ruptura na casca a fim de se assegurar homogeneidade das amostras em relação à resistência oferecida pela casca. Amostras em triplicata foram utilizadas para o procedimento de secagem em camada fina no qual foi utilizada a linha esquematizada na Figura 4.3.

**Figura 4.3** - Esquemática da unidade de fluidodinâmica e secagem em leito fixo e fluidizado.



Fonte: Felizardo (2018)

As amostras foram inseridas em uma célula cilíndrica de 5,1 cm de diâmetro. A fim de se obter um leito poroso, com características da camada delgada, a camada de sementes adotada possuía aproximadamente 1 cm de espessura.

Maia e Perazzini (2018) descrevem uma metodologia simples para a determinação de uma espessura adequada para camada delgada. Porém, considerando a natureza do material, optou-se por utilizar um valor fixo mínimo a fim de que o leito apresentasse as características de um meio poroso. Segundo Fyhr e Kemp (1998) as condições para uma condição de camada fina são que a espessura do leito tenha entre 5 e 10 vezes o tamanho do diâmetro da partícula. A espessura de 1 cm, conforme será verificado posteriormente, é de aproximadamente 7,5 vezes o tamanho da espessura das sementes de Jacarandá se enquadrando nas condições apresentadas.

A velocidade do ar foi ajustada para 0,25 m/s, de modo que o leito não se fluidizasse. Devido à distância entre o sistema de aquecimento (6) e a saída de ar para secagem, a fim de fixar a temperatura de secagem em 40 e 50°C, foi necessário ajustar o aquecimento para 48 e 64°C respectivamente, para que o termopar indicado por (11) no esquema apontasse a temperatura desejada. Uma parte da amostra obtida foi separada para realização dos testes germinativos pós-processamento, e a outra para determinação da massa seca das sementes que foi determinada pelo método gravimétrico, com secagem em estufa a 105 °C por 24h.

### 4.3.2 Modelagem matemática

Os modelos matemáticos da camada fina foram ajustados no software MatLab®, utilizando a função nlinfit. Para a determinação da difusividade efetiva constante na Equação 15 (2ª cc), foram feitas varreduras de valores de Bim entre 0,05 e 2 para determinação dos autovalores ( $\lambda_n$ ) pela Equação 17.

Para difusividade efetiva variável, o ajuste foi realizado pelo método dos ajustes sequenciais que será proposto nesse trabalho. O ajuste foi realizado também pelo método pseudo-estacionário modificado proposto por Efremov para comparação e validação. A variação do número de termos da série foi de 1, 5, 10, 15 e 20 termos, que conforme apontado no tópico 3.3, garante um erro menor que 1%.

### 4.3.3 Método dos ajustes sequenciais

O método dos ajustes sequenciais consiste em ajustar os pontos obtidos na cinética de secagem pela Equação 13 com parâmetro constante para cada conjunto de 3 pontos. Foram feitas as suposições de que para um tempo inicial ( $t = 0$  s), que  $D_{eff} = 0$  m/s<sup>2</sup>, pois o processo de secagem não foi iniciado. Da mesma forma, para o tempo final, o processo difusivo já foi finalizado e, portanto, supõe-se  $D_{eff} = 0$  m/s<sup>2</sup>. As Figuras 4.4 e 4.5 mostram um esquema para o método.

**Figura 4.4** – Método dos ajustes sequenciais



Fonte: Acervo pessoal

Considerando K medidas de umidade, obtemos por meio de K-2 ajustes, uma matriz 3xK de difusividades efetivas, da qual é possível obter a média aritmética para os K pontos. Para cada ajuste é determinado um valor de difusividade efetiva com parâmetro constante. Esse valor então é alocado na matriz 3xK conforme apontado na Figura 4.5. Esse processo é realizado sucessivamente até que a matriz seja completa. A partir da matriz 3xK, a média aritmética de cada coluna é calculada, obtendo-se um vetor de de K pontos, que representa a Difusividade efetiva variando com a umidade.

**Figura 4.5** – Esquema para o método dos ajustes sequenciais

		Ponto, i = 1, 2, 3... K														
Ajuste	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13=K-2	14=K-1	15=K	
2	x	x	x													
3			x	x												
4			x	x	x											
5				x	x	x										
6					x	x	x									
7						x	x	x								
8							x	x	x							
9								x	x	x						
10									x	x	x					
11										x	x	x				
12											x	x	x			
13												x	x	x		
14=K-1													x	x	x	

Deff	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13=K-2	14=K-1	15=K
1			D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14
2		D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	
3	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14		
Média	Dm1	Dm2	Dm3	Dm4	Dm5	Dm6	Dm7	Dm8	Dm9	Dm10	Dm11	Dm12	Dm13	Dm14	Dm15

Fonte: Acervo pessoal

#### 4.3.4 Análise estatística do modelo

O ajuste dos modelos matemáticos foi realizado por meio do método dos mínimos quadrados para ajuste de funções não-lineares. Os resíduos ( $\delta$ ) observados entre a umidade medida ( $X_{obs}$ ) e estimada ( $X_{est}$ ) foram calculadas pela Equação 27

$$\delta(t) = X_{obs}(t) - X_{est}(t) \quad (27)$$

A análise gráfica dos resíduos ao longo do tempo permite analisar as tendências durante o processo de secagem. Para indicar que não há um problema de ajuste pela homogeneidade dos resíduos, é esperado que um ajuste adequado tenha uma distribuição aleatória (MENDENHALL; REINMUTH; BEAVER., 1993)

Usando o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o teste qui-quadrado ( $\chi^2$ ), dadas pelas equações 28 e 29 respectivamente, foi possível avaliar o ajuste para K observações e P parâmetros ajustados. Os melhores ajustes são dados por  $R^2$  mais próximo de 1, e o menor  $\chi^2$  (CAETANO, 2012; DA ROCHA et al. 2020)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_1^K \delta_i^2}{\sum_1^K (X_i - \bar{X})^2} \quad (28)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_1^K \delta_i^2}{K - P} \quad (29)$$

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A Tabela 5.1 reúne o conjunto de informações referentes à análise de imagem e caracterização física das sementes de Jacarandá-mimoso na unidade de lote.

**Tabela 5.1** - Características físicas médias de sementes de *Jacaranda mimosifolia* em unidade de lote e seus respectivos desvios padrão.

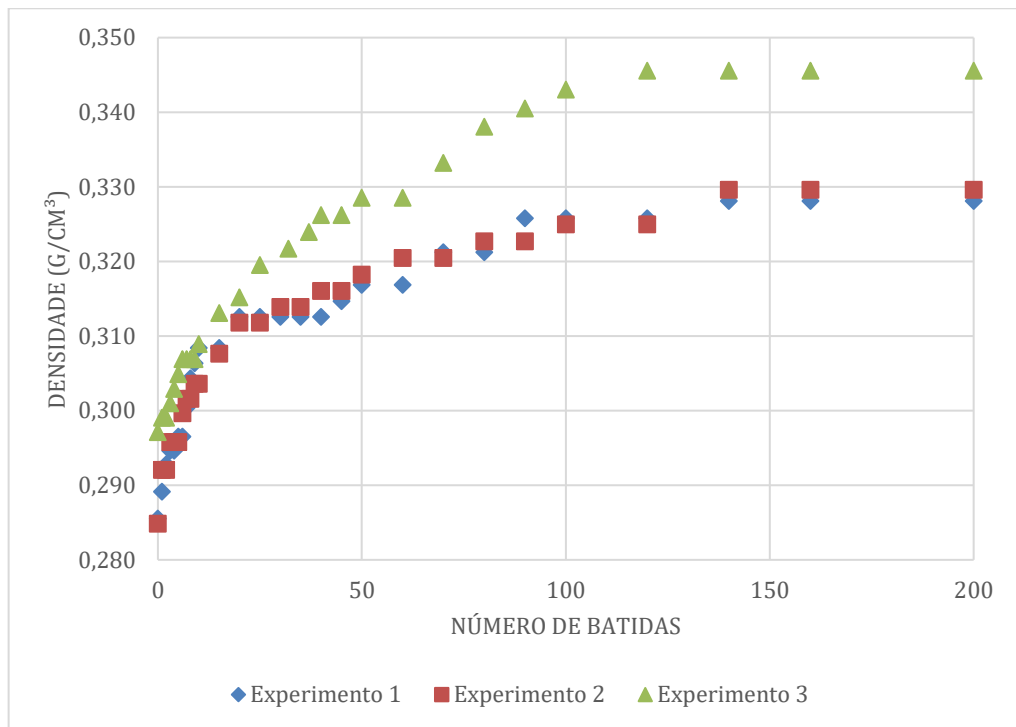
Parâmetro	Valor	Desvio Padrão
$X_1$ (kg/kg)	0,082	0,002
$D_{\max}$ (mm)	8,4	0,7
$D_m$ (mm)	7,4	0,6
$D_{\min}$ (mm)	6,4	0,8
$D_{F\max}$ (mm)	8,6	0,7
$D_{Fm}$ (mm)	7,9	0,7
$D_{F\min}$ (mm)	7,1	0,8
$P_m$ (mm)	26,6	2,9
$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	45,8	7,8
$\rho_{ap}$ (g/ml)	1,179	0,04
$\rho_{ba}$ (g/ml)	0,289	0,01
$\rho_{bc}$ (g/ml)	0,334	0,01
$\epsilon_a$	0,755	0,01
$\epsilon_b$	0,717	0,01
$S_m$ (mm)	1,34	0,31
$V$ (mm <sup>3</sup> )	61,37	2,4
$\tau$	0,86	0,01
$\phi$	0,447	0,01

Fonte: Acervo pessoal

Conforme observado, os desvios das médias em todas as dimensões analisadas demonstram que as sementes apresentam pouca variação de tamanho e forma, sobretudo pelo fato dos valores de diâmetro e diâmetro de Feret apresentarem valores próximos entre si. Uma vez que os diâmetros de Feret representam a distância entre duas linhas paralelas tangentes à projeção da partícula, a compatibilidade de valores com os diâmetros tradicionais sugere que as partículas

apresentam formato semelhante a um disco, ou cilindro achatado. O valor obtido para a esfericidade é de 0,447, e segundo Maia e Perazzini (2018), valores abaixo de 0,874 para a esfericidade são adequados para geometrias cilíndricas. Em relação ao leito, verifica-se que a acomodação representa um aumento na densidade bulk, sendo que com aproximadamente 50 batidas, já se observa um aumento de 9% na densidade. É válido pontuar que, o leito de sementes apresenta alta porosidade, tanto em sua forma aerada quanto na forma compactada. A Figura 5.1 mostra a variação da densidade do leito conforme as batidas para acomodação. Para todos ensaios, após 200 batidas, não se observa mais variação na densidade do leito, e o aumento total observado na densidade é de 15,6%.

**Figura 5.1** – Variação da densidade do leito

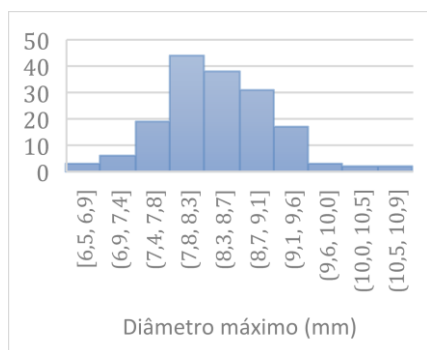


Fonte: Acervo pessoal

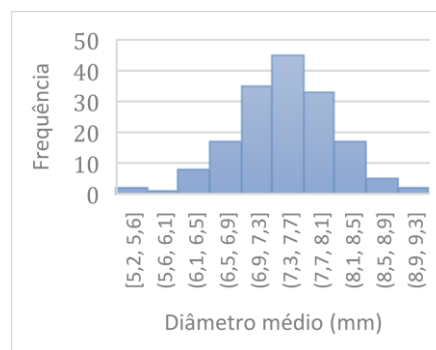
Tratando da análise de imagem, foi possível observar pelos gráficos das Figuras 5.2 a 5.4 em conjunto com as informações da Tabela 5.1, que o desvio padrão observado para os diâmetros encontrou-se uma ordem de grandeza abaixo da medida, o que indica uma baixa dispersão.



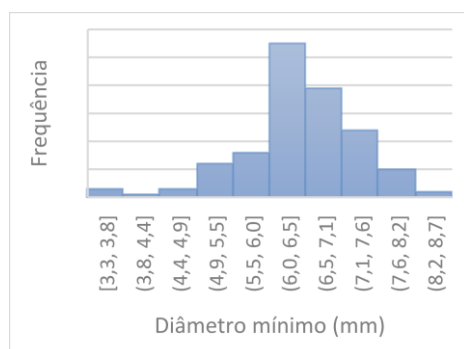
**Figura 5.2** – Distribuição de propriedades de sementes de Jacarandá em unidade de lote para (a) Diâmetro máximo (b) Diâmetro médio (c) Diâmetro mínimo (d) Diâmetro de Feret máximo (e) Diâmetro de Feret médio (f) Diâmetro de Feret mínimo para sementes de Jacarandá em unidade de lote



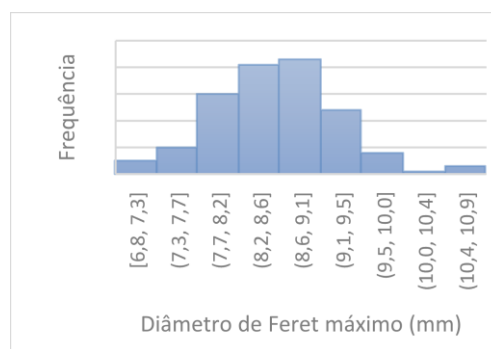
(a)



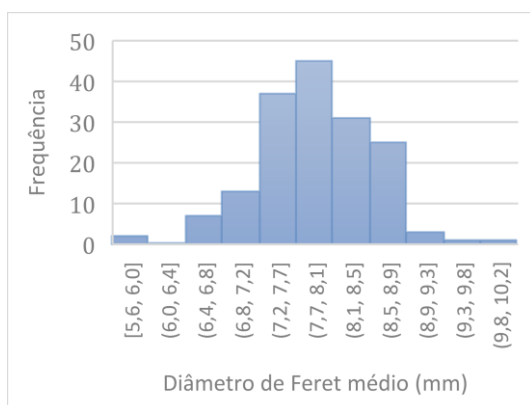
(b)



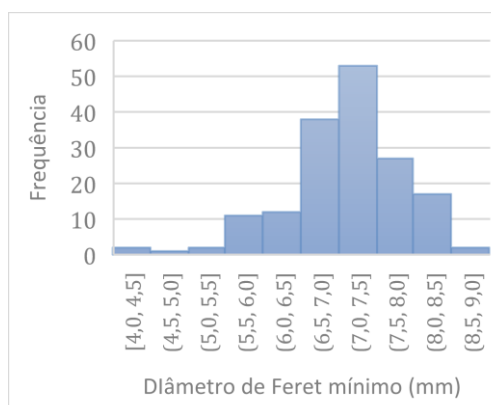
(c)



(d)



(e)

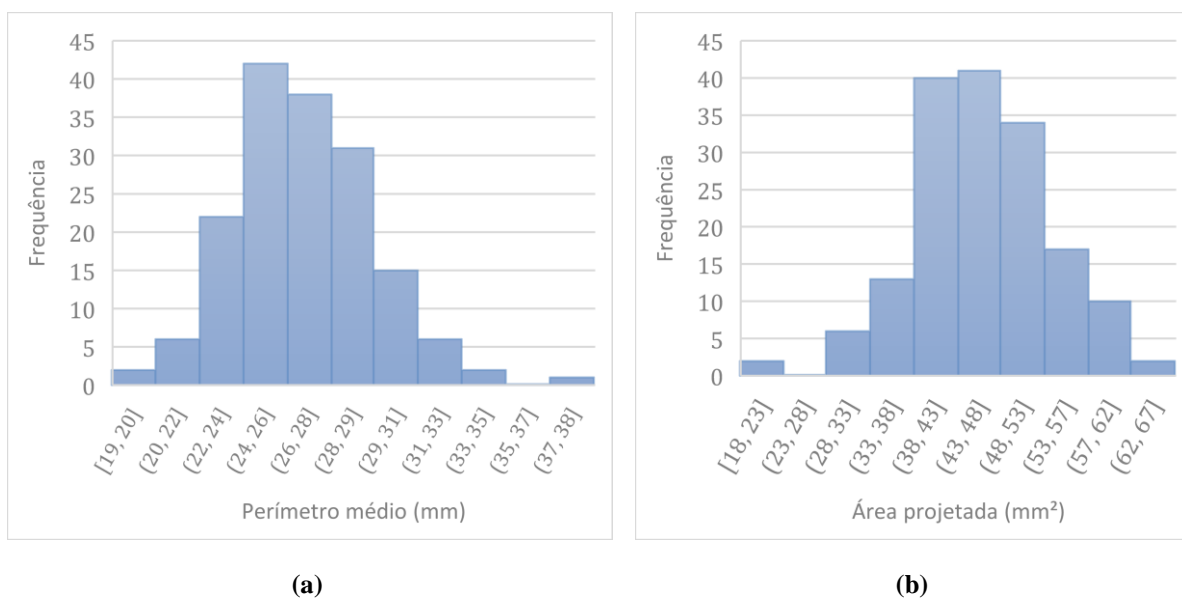


(f)

Fonte: Acervo pessoal

A determinação do diâmetro médio teve por objetivo unicamente estabelecer uma análise para a forma da partícula em comparação com seu respectivo diâmetro de Feret. Analisando o Diâmetro máximo e Diâmetro de Feret máximo, observamos um valor muito próximo, de 8,4 e 8,6 mm aproximadamente, e em ambas as medidas, aproximadamente 50% das amostras se encontra em uma pequena faixa de 8 a 8,6 mm. São os parâmetros que apresentam menor amplitude. Analogamente, podem ser realizadas observações para os diâmetros mínimo e médio, que também apresentam proximidade dos diâmetros de Feret mínimo e médio. Observa-se que o diâmetro mínimo apresenta uma amplitude 23% maior que os diâmetros médio e máximo, o que pode ser explicado com uma maior irregularidade nessa medida, ou do resultado de pequenas fissuras nas sementes causadas no manuseio devido a sua constituição frágil.

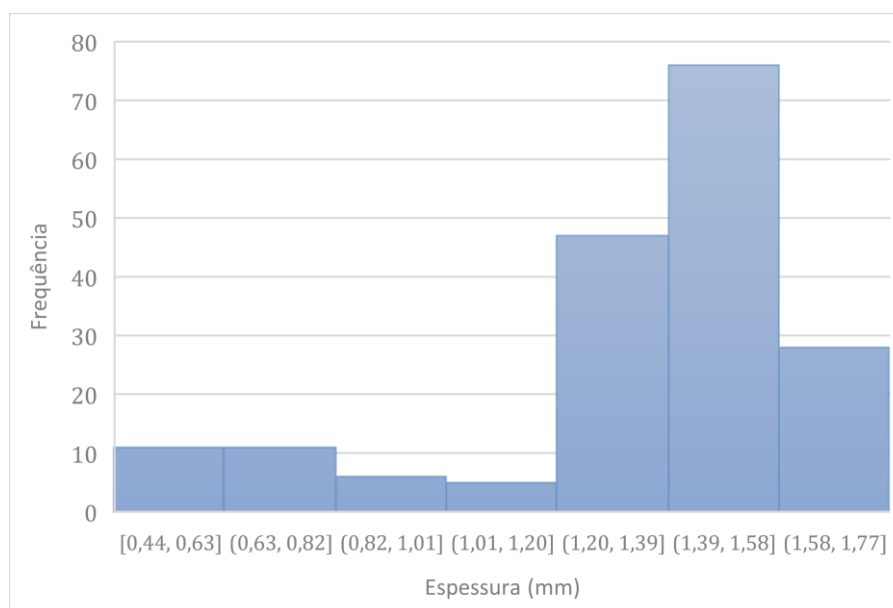
**Figura 5.3** – Distribuição de propriedades de sementes de Jacarandá em unidade de lote para (a) Perímetro médio (b) Área projetada



Fonte: Acervo pessoal

No que condiz as Figuras 5.3a e 5.3b, verifica-se que a amplitude dos dados é maior principalmente para a área projetada, havendo certa variabilidade em relação ao tamanho das sementes de Jacarandá. A variabilidade é pequena, o que pode novamente representar a presença de pequenas irregularidades no formato das sementes. Entretanto, levando em conta as análises realizadas para os valores dos diâmetros e diâmetros de Feret, bem como uma análise visual das sementes, pode constatar-se que as sementes apresentam tamanho similar.

**Figura 5.4** – Distribuição de espessura para sementes de Jacarandá em unidade de lote



Fonte: Acervo pessoal

Na Figura 5.4, apresenta-se a distribuição da espessura determinada pelo paquímetro digital. Uma frequência significativa ocorre numa pequena faixa de aproximadamente 1,2 a 1,7 mm, reforçando a análise de que as sementes são homogêneas, contudo, também apresenta uma cauda à esquerda. Outro parâmetro a ser considerado é o coeficiente de variação, que é de 22,93% para a espessura. Esse coeficiente é classificado por Rigonatto (2020) como representativo de uma média dispersão.

Finalmente, a tortuosidade apresenta um valor de 0,86 indicando que o caminho real percorrido por um gás é 16% maior que a altura de um leito, o que é natural devido a presença do sólido particulado. A alta porosidade indica uma maior facilidade para o gás passar pelo leito que outro mais compacto. O parâmetro calculado pelas expressões de Boudreau (1996) e Comiti e Renaud (1989) se aproxima da definição utilizada, em especial para a de Comiti e Renaud (1989), em que a diferença no resultado dos parâmetros é menor que o desvio padrão.

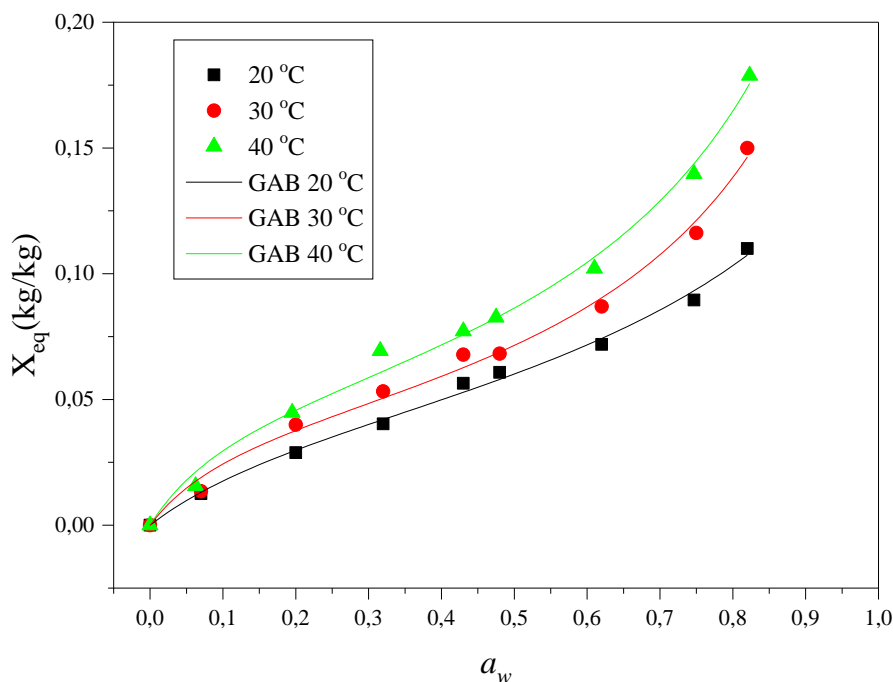
## 5.2 ISOTERMAS DE DESSORÇÃO

A Figura 5.5 apresenta as isotermas de dessecção para sementes Jacarandá-mimoso nas temperaturas de 20°C, 30°C e 40°C e o ajuste do modelo GAB realizado com o software Origin®.

Através do gráfico foi possível observar que as isotermas para as sementes de Jacarandá-mimoso apresentam comportamento similar ao observado em alguns tipos de folhas (Maia et

al. 2017) no que se refere à sua umidade de equilíbrio. O comportamento padrão esperado é que, na medida em que a temperatura aumenta, a umidade de equilíbrio diminui para uma mesma atividade de água, uma vez que o sistema apresenta mais energia, favorecendo a saída de água do sistema.

**Figura 5.5** - Isotermas de dessecção para sementes de Jacarandá-mimoso e o ajuste pelo modelo GAB.



Fonte: Acervo pessoal

Porém, essa análise só é válida se a estrutura da matriz porosa que constitui o material se mantém igual na faixa de temperaturas estudadas. Isso acontece com sementes de cevada, conforme demonstrado por Maia et al. (2016). Aqui, considerando a não conformidade de comportamento, é possível admitir que o aumento da temperatura desempenhe um importante papel na estrutura dos sítios de adsorção ativos. Podemos então inferir que esse aumento permite o acesso a sítios de adsorção não disponíveis em temperaturas mais baixas, mudando de maneira significativa a estrutura do material em termos energéticos.

Esse efeito também pode estar relacionado com a atividade biológica do material, pois, nessa faixa de temperaturas, o aumento de temperatura deve vir acompanhado de uma maior capacidade hídrica da semente para dar início ao processo germinativo. Do contrário, o abaixamento de temperatura contribui para a ativação de mecanismos biológicos de defesa e dormência, no sentido de impedir o acúmulo de água e inibir o processo germinativo. Uma

análise semelhante pode ser obtida através os parâmetros ajustados pelo modelo GAB, apresentados na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2** - Umidades relativas para as soluções saturadas em diferentes temperaturas

Parâmetros	Temperaturas		
	20°C	30°C	40°C
$X_m$	0,050	0,047	0,057
$C_g$	6,37	9,71	9,78
$K$	0,71	0,84	0,84
$R^2$	0,99	0,99	0,99

Fonte: Acervo pessoal

Considerando  $X_m$  como a umidade de formação da monocamada, na temperatura de 40°C observamos o maior valor entre os ajustados para a faixa de temperatura estudada. Isso corrobora a informação de que há uma maior quantidade de sítios de adsorção ativos nessa temperatura. Valores de  $C_g$  maiores que um, indicam que as moléculas da monocamada se encontram fortemente ligadas aos sítios de adsorção primários. Os valores de  $K$  indicam a presença de uma multicamada com moléculas de água apresentando energia superior às da água líquida na mesma temperatura. Ainda que essencial para o conhecimento da umidade de equilíbrio, o principal direcionamento da análise das isotermas de sorção no presente trabalho consiste em compreender melhor a natureza da estrutura energética das sementes e de sua relação com a água.

Com os parâmetros estimados para a temperatura de 40°C, podemos comparar a umidade de equilíbrio estimada pelo modelo GAB com a umidade de equilíbrio dinâmica observada na secagem a 40°C. Os resultados obtidos da comparação podem ser observados na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3** – Comparação umidades de equilíbrio dinâmicas e estimadas pelo modelo GAB para a temperatura de 40°C

$a_w$	$X_{eq} \text{ exp}$	$X_{eq} \text{ GAB}$	Diferença (%)
0,900	0,110	0,226	-51,4%
0,850	0,120	0,191	-37,3%
0,900	0,100	0,226	-55,8%
Média	0,110	0,215	-48,7%

Fonte: Acervo pessoal

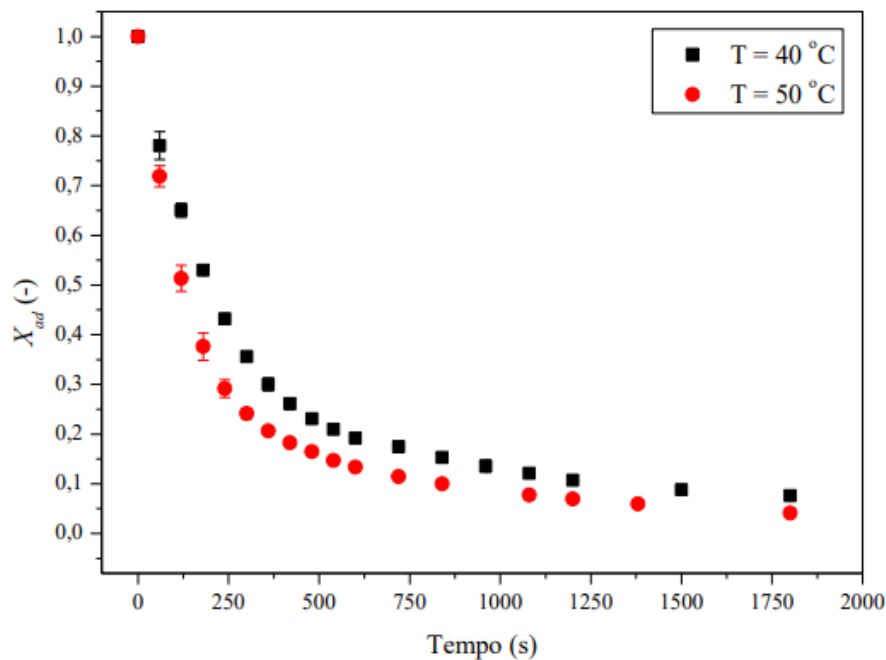
Observa-se que, a umidade experimental dinâmica é em média 48,7% menor que a umidade estimada pelo modelo GAB. Um resultado menor para a umidade observada é esperado, pois há o efeito do fluido percolante envolvido na secagem e alterando as condições do meio.

### 5.3 SECAGEM EM CAMADA DELGADA

#### 5.3.1 Cinética e taxa de secagem

A Figura 5.6 apresenta o comportamento da umidade adimensional em função do tempo para as temperaturas de secagem de 40 e 50°C.

**Figura 5.6** - Umidade adimensional em função do tempo para a secagem em camada delgada de sementes de Jacarandá-mimoso.

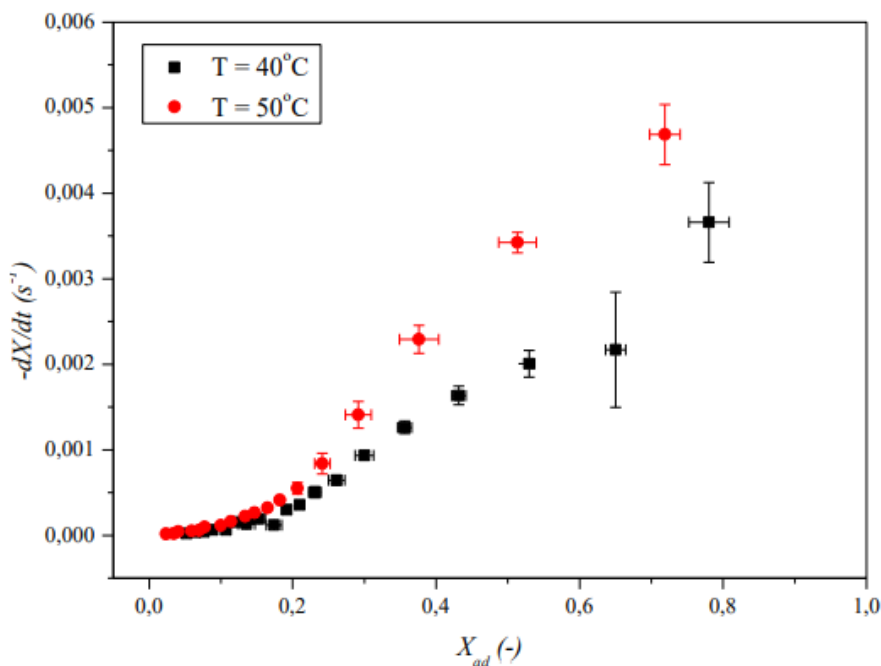


Fonte: Acervo pessoal

Observou-se um comportamento convencional para as curvas de secagem de forma que, na temperatura de 50°C, a umidade adimensional apresentou valores menores, quando comparadas em um mesmo tempo, em todo o intervalo de tempo estudado. Quanto maior a temperatura, maior a pressão de vapor da água na superfície, resultando em um processo de secagem mais rápido. Essa diferença entre as temperaturas foi maior que o desvio padrão dos resultados.

A umidade de equilíbrio dinâmico do material foi atingida em aproximadamente 30 minutos. A Figura 5.7 mostra a taxa de secagem como função da umidade adimensional nas temperaturas estudadas.

**Figura 5.7** - Taxa de secagem em função da umidade adimensional para sementes de Jacarandá-mimoso.



Fonte: Acervo pessoal

De forma similar ao observado para a cinética de secagem, a taxa de secagem é maior na temperatura de  $50^{\circ}C$ . No início do processo de secagem, em valores de umidade adimensional próximos de 1, a taxa de secagem a  $50^{\circ}C$  é aproximadamente 30% maior. Considerando que a umidade de lote em que a semente é comercializada e armazenada é de 0,082 kg/kg de massa seca, a secagem a  $40^{\circ}C$  levou aproximadamente 25 minutos para atingir esse valor. As mesmas condições foram atingidas em aproximadamente 16 minutos a  $50^{\circ}C$ , um tempo 56% menor.

Esse comportamento da taxa de secagem pode ser explicado uma vez que em temperaturas maiores há mais energia disponível para a remoção da água da matriz porosa do material. Dessa forma, quanto maior a umidade do material, mais água livre ele possui, o que torna a taxa de secagem especialmente elevada. Na medida em que a água livre é removida e a água ligada começa a ser retirada, a taxa de secagem também cai. Pelo gráfico da Figura 5.12, a taxa de secagem decai de maneira aproximadamente linear para as duas temperaturas até uma umidade adimensional de aproximadamente 0,2. Como a umidade inicial da amostra é padronizada em

1,0 kg/kg de material seco, uma umidade adimensional de 0,2 corresponde a uma umidade real de 0,2 kg/kg de material seco.

Observando os dados obtidos pelas isotermas de dessorção, a formação de monocamada completa que apresenta a água mais fortemente ligada da matriz porosa, ocorre a uma umidade de aproximadamente 0,05 kg/kg de massa seca. Dessa forma, foi possível observar que a taxa de secagem para umidades abaixo de 0,2 kg/kg de massa seca apresenta valores aproximadamente constantes, pois se trata da remoção de água da multicamada, que é energeticamente distinta da água livre e, conseqüentemente, mais difícil de ser removida. Além disso, é necessário observar que a umidade de lote se encontra dentro dessa região, o que implica na inclusão dos efeitos associados à remoção de água ligada no projeto de secadores.

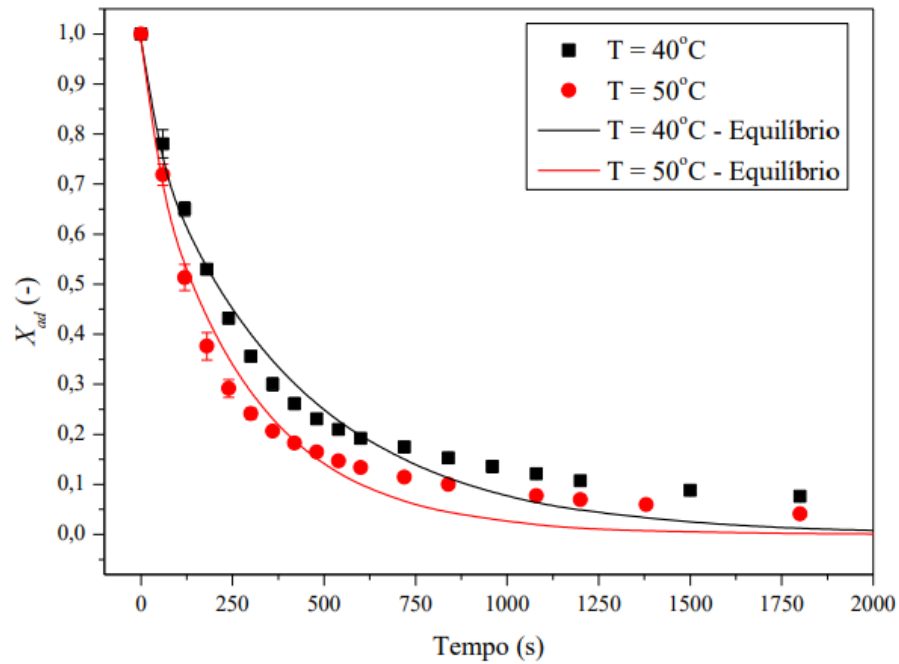
Finalmente, é importante ser cauteloso ao comparar transferência de massa em diferentes condições de secagem, pois podemos estar comparando estruturas porosas com mecanismos de transporte diferentes.

### **5.3.2 Modelagem com parâmetro constante**

Para a consideração de  $Bim \ll 1$  e difusividade efetiva constante, a Equação 13 foi ajustada aos dados experimentais levando em conta a análise estatística para estabelecer a quantidade de termos da série de forma a maximizar o  $R^2$  e minimizar o  $\chi^2$ . Além disso, tomou-se o cuidado de estabelecer um número de termos que assegurasse o valor da umidade adimensional inicial tão próxima de um quanto possível. Para atender a essas três imposições, constatou-se que o número mínimo de termos da série que melhor as atende é  $n = 15$ . O ajuste pode ser observado na Figura 5.8 e a Tabela 5.4 apresenta os valores de  $D_{eff}$ ,  $R^2$  e  $\chi^2$  para o ajuste.



**Figura 5.8** - Ajuste do modelo de transferência de massa considerando  $Bim \ll 1$ .



Fonte: Acervo pessoal

**Tabela 5.4** –  $D_{eff}$ ,  $R^2$  e  $\chi^2$  considerando  $Bim \ll 1$  na superfície do leito ( $n=15$ ).

Parâmetros	Temperaturas	
	40°C	50°C
$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)	2,40.10-8	3,55.10-8
$R^2$	0,984	0,983
$\chi^2$	1,6.10-3	1,56.10-3

Fonte: Acervo pessoal

Felizardo (2014) sugere que valores abaixo de 0,1 seriam considerados satisfatórios para o  $\chi^2$ . Conforme observado, os valores são considerados adequados para ajustes de modelo de secagem. Portanto, do ponto de vista do parâmetro, o ajuste é capaz de reproduzir de maneira satisfatória os dados experimentais.

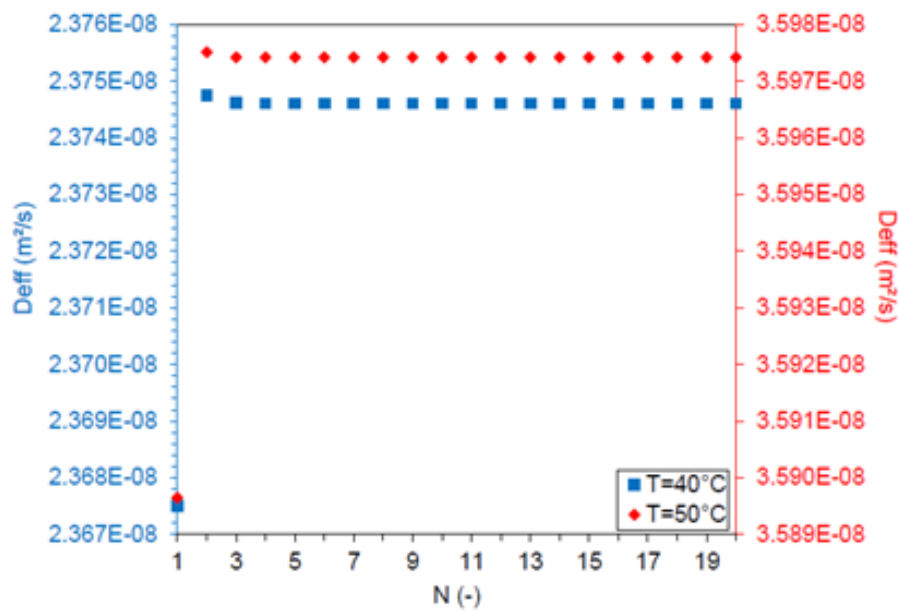
O modelo proposto leva em conta que o meio seja isotrópico e que suas propriedades sejam constantes. Conforme já discutido no tópico 3.3, essas suposições podem não ocorrer na prática. Nos períodos iniciais de secagem o modelo superestima os valores de umidade, enquanto que para tempos de secagem maiores que 750 s o modelo os subestima. No último caso, constatando-se que a umidade no meio poroso é maior que a prevista num dado tempo, isso

pode sugerir que o mecanismo de difusão na matriz porosa das sementes apresenta, na prática, uma resistência ao transporte maior do que a prevista. Isso pode significar que a difusividade efetiva varia durante o processo de secagem, porém é importante frisar que o modelo em questão não leva em conta os efeitos da variação da difusividade.

Vale ressaltar que o objetivo do ajuste de um modelo teórico não é o de se encontrar necessariamente um modelo perfeitamente ajustado. Nesse sentido seriam utilizados modelos empíricos com maior convergência de resultados e melhores parâmetros estatísticos. Entretanto, optou-se por uma abordagem teórica dos fenômenos a fim de se analisar as conformidades e não conformidades do ajuste em relação àquilo que o modelo estabelece.

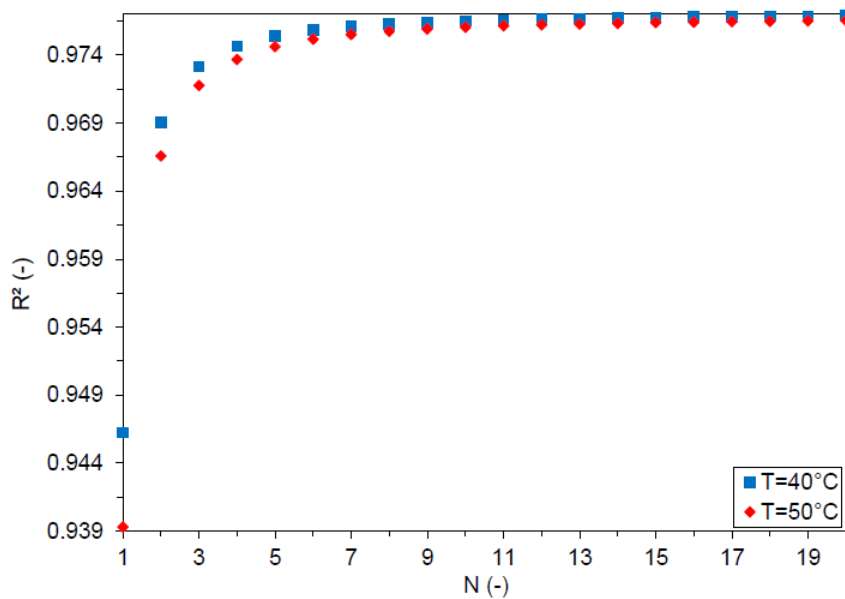
As Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 indicam a variação dos parâmetros ajustados conforme o número de termos. Após 20 termos a variação é desprezível.

**Figura 5.9** – Variação do parâmetro da difusividade efetiva conforme o número de tempos para condição de contorno  $Bim \ll 1$



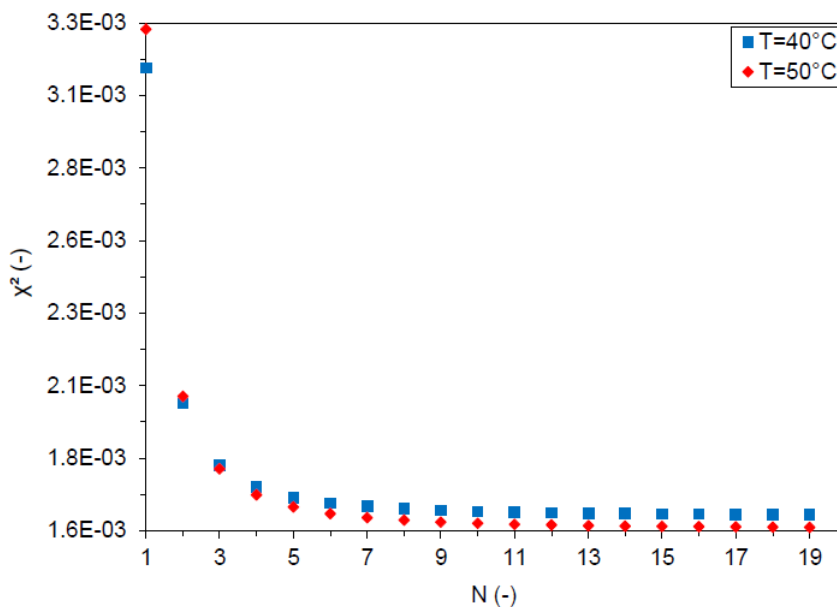
Fonte: Acervo pessoal

**Figura 5.10** – Variação do coeficiente de determinação conforme o número de termos para condição de contorno  $Bim \ll 1$



Fonte: Acervo pessoal

**Figura 5.11** – Variação do  $\chi^2$  conforme o número de termos para condição de contorno  $Bim \ll 1$



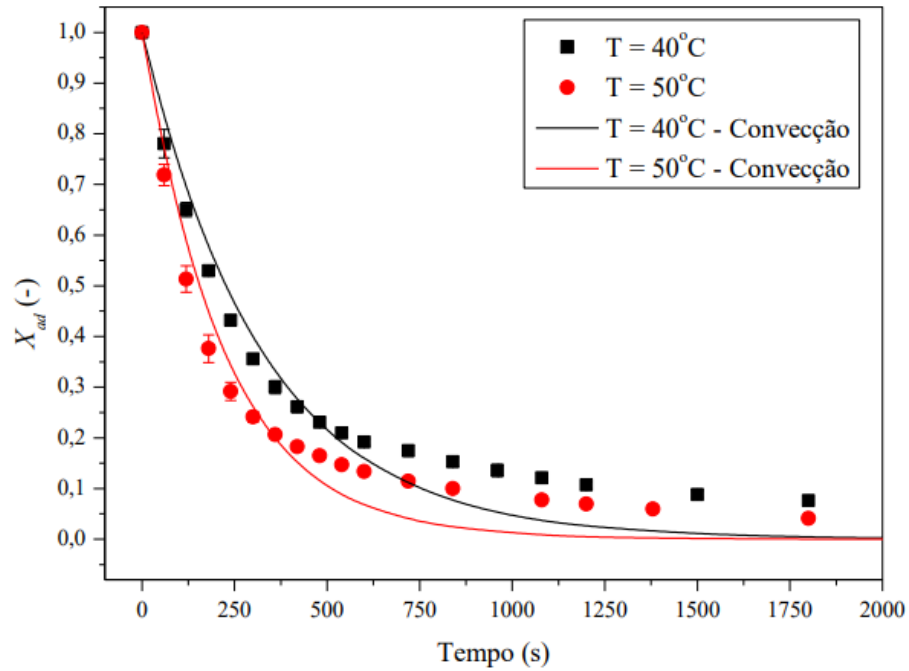
Fonte: Acervo pessoal

Considerando a natureza do material, os valores de  $D_{\text{eff}}$  ajustados estão de acordo com o esperado. Carmo e Lima (2005) determinaram a difusividade para sementes de lentilha, que apesar de mais espessas em média, apresentam característica geométricas similares às sementes de Jacarandá-mimoso. Os autores determinaram  $D_{\text{eff}} = 6,92 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  a uma temperatura de  $40^\circ\text{C}$ . Considerando outro material biológico de origem vegetal com pequena espessura, Rosanova et al. (2017) obtiveram, para folhas de hortelã,  $D_{\text{eff}} = 5,07 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ . As duas ordens de grandeza de diferença podem ser explicadas considerando que as sementes de Jacarandá-mimoso são planas, mas apresentam mecanismos mais sofisticados de controle de umidade interna do que as folhas, que já não possuíam atividade fisiológica durante o estudo. Da mesma forma, em relação às sementes de lentilha, a diferença se dá principalmente pela diferença entre as matrizes porosas, uma vez que as lentilhas apresentam encolhimento durante a secagem, fato que não foi observado nas sementes de Jacarandá-mimoso.

A mesma análise foi realizada para o ajuste ao modelo considerando  $Bi_m \rightarrow \infty$ . Nesse caso, a determinação do melhor ajuste levou em conta a melhor relação possível entre a análise estatística e fenomenológica. Considerou-se o melhor ajuste que respeitasse a natureza do fenômeno e que simultaneamente atendessem aos critérios de maior  $R^2$  e menor  $\chi^2$ .

Também foram levados em conta o número de autovalores empregados e as variações possíveis no  $Bi_m$ . Através dessas análises considerou-se como o melhor ajuste aquele que utilizou 15 autovalores e considerou  $Bi_m = 0,02$ . Para esse número de  $Bi_m$  foi possível estabelecer a dominância do mecanismo difusivo frente ao convectivo no topo do leito. O ajuste desse modelo aos dados experimentais encontra-se na Figura 5.12. A Tabela 5.5 apresenta os valores de  $D_{\text{eff}}$ ,  $R^2$  e  $\chi^2$  para o ajuste.

**Figura 5.12** - Ajuste do modelo de transferência de massa considerando  $Bi_m \rightarrow \infty$  na superfície do leito.



Fonte: Acervo pessoal

**Tabela 5.5** -  $D_{eff}$ ,  $R^2$  e  $\chi^2$  considerando  $Bi_m \rightarrow \infty$  na superfície do leito

Parâmetros	Temperaturas	
	40°C	50°C
$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$2,27 \cdot 10^{-5}$
$R^2$	0,975	0,973
$\chi^2$	$1,63 \cdot 10^{-3}$	$1,57 \cdot 10^{-3}$

Fonte: Acervo pessoal

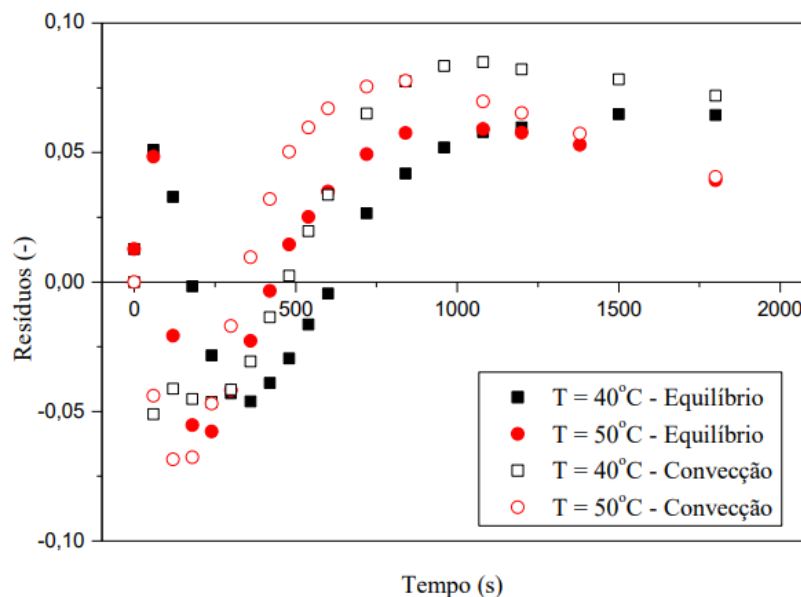
As mesmas análises realizadas para o primeiro ajuste são válidas aqui. De outro modo, o modelo que leva em conta os efeitos convectivos no topo do leito superestima os dados nos instantes iniciais de secagem, ao contrário do que se observou para o modelo que considera  $Bi_m \rightarrow \infty$ . Além disso, apesar de superestimar e subestimar os dados de secagem nas mesmas regiões, o modelo que considera  $Bi_m \rightarrow \infty$  apresenta maior discrepância no ajuste, sobretudo na região que apresenta tempos de secagem superiores a 750 s para ambas as temperaturas. Isso é esperado pois a modelagem com parâmetro  $Bi_m \ll 1$  parte da hipótese que a célula de secagem está em equilíbrio na superfície, o que se verifica mais facilmente com maiores tempos de

secagem.

Observou-se que a distribuição dos resíduos em ambos os modelos, para ambas as temperaturas, apresentou tendência ao invés do comportamento aleatório desejado. Rigorosamente falando, isso significa que nenhum dos dois modelos representa adequadamente o fenômeno observado. Entretanto, para efeito de determinação da difusividade efetiva nessas condições, um modelo deve ser utilizado já que a diferença dos valores ajustados para esse parâmetro é diferente em três ordens de grandeza.

Apesar da não aleatoriedade da distribuição dos resíduos, sobretudo nos instantes iniciais de secagem, o modelo que considera  $Bim \ll 1$  apresenta menor amplitude, podendo ser considerado ligeiramente mais adequado que o outro modelo nessas condições.

**Figura 5.13** - Distribuição dos resíduos em função do tempo para os dois modelos avaliados nas temperaturas de 40 e 50°C.



Fonte: Acervo pessoal

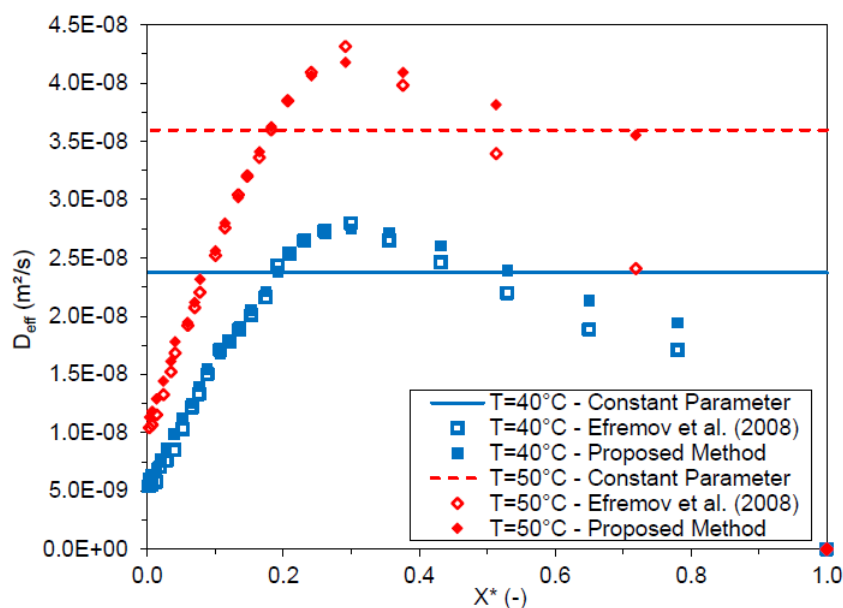
É importante fazer a ressalva que, ao realizar uma análise física do problema, considerando as características físicas das sementes e do leito, a condição mais provável a consideração de  $Bim \rightarrow \infty$  devido ao fato de que a porosidade do leito e, conseqüentemente seu fator de tortuosidade, fazem com que o tempo de residência da fase gasosa no interior do leito seja pequeno. Isso pode significar que o gás chega ao topo do leito sem estar completamente saturado de umidade, o que favoreceria sobremaneira quaisquer efeitos convectivos contribuindo para um aumento no  $Bim$  nesse ponto. Entretanto, este não é o caso observado.

Ainda que nenhum dos modelos de fato represente adequadamente os dados experimentais, pelos motivos já citados, optou-se por escolher o modelo que considera a umidade de equilíbrio no topo do leito para estabelecer os valores de difusividade efetiva, sendo este o que melhor descreve o fenômeno observado na célula de secagem. Para tanto, além da análise dos valores de  $R^2$  e  $\chi^2$  foi utilizada a análise de distribuição dos resíduos dos ajustes, conforme apresentado na Figura 5.13. Assim, adotaram-se os valores de difusividade efetiva apresentados na Tabela 5.4 como os mais adequados, porém, com a ressalva de que provavelmente esses valores não são constantes durante o processo de secagem. Vale também ressaltar que os resultados permitem a confirmação da condição de camada fina para o sistema.

### 5.3.3 Modelagem com difusividade efetiva variável

A Figura 5.14 mostra a variação da difusividade efetiva com a umidade, para as três abordagens: modelagem com parâmetro constante, modelo de Efremov e método dos ajustes sequenciais. A primeira observação é a de que o modelo de Efremov e o método dos ajustes sequenciais tiveram um comportamento muito próximo, principalmente nas regiões de menor umidade, onde a secagem é mais lenta, e a hipótese de estado pseudo-estacionário é satisfeita. Aproximadamente acima de uma umidade de 0,35, o modelo de Efremov passa a calcular valores inferiores que o método dos ajustes sequenciais.

**Figura 5.14** – Variação da difusividade efetiva como função da umidade adimensional pelas diferentes abordagens.

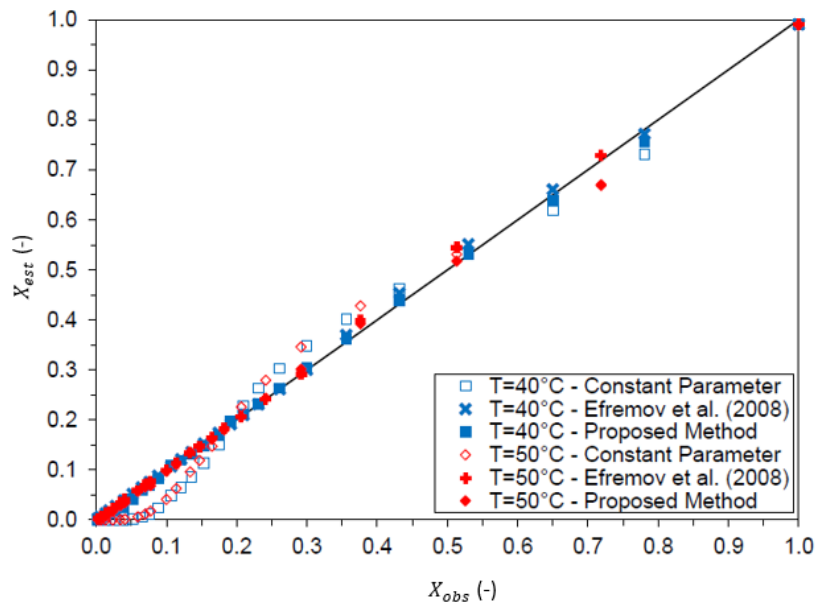


Fonte: Acervo pessoal

Na Figura 5.15, é possível observar a relação entre a umidade observada e a umidade estimada pelo modelo para as diferentes abordagens. As maiores diferenças para o modelo com parâmetro constante são observadas principalmente na região com menores umidades, onde os mecanismos internos da semente de resistência a transferência de massa começam a ter maior efeito na variação do parâmetro da difusividade.

Na Figura 5.16 a principal observação é a de que, ao contrário do modelo de parâmetro constante, há a aleatoriedade esperada nos resíduos observados para os modelos de Efremov e ajustes sequenciais, comprovando que não há problemas no ajuste. A amplitude dos resíduos é maior para umidades mais altas. Comparando com o modelo de parâmetro constante, a partir de uma umidade superior a 0,5, as amplitudes dos resíduos são equivalentes. Daí pode ser inferido que, quanto maior a interferência dos efeitos convectivos na secagem, menor a precisão do modelo que foi baseado na predominância de mecanismos difusivos.

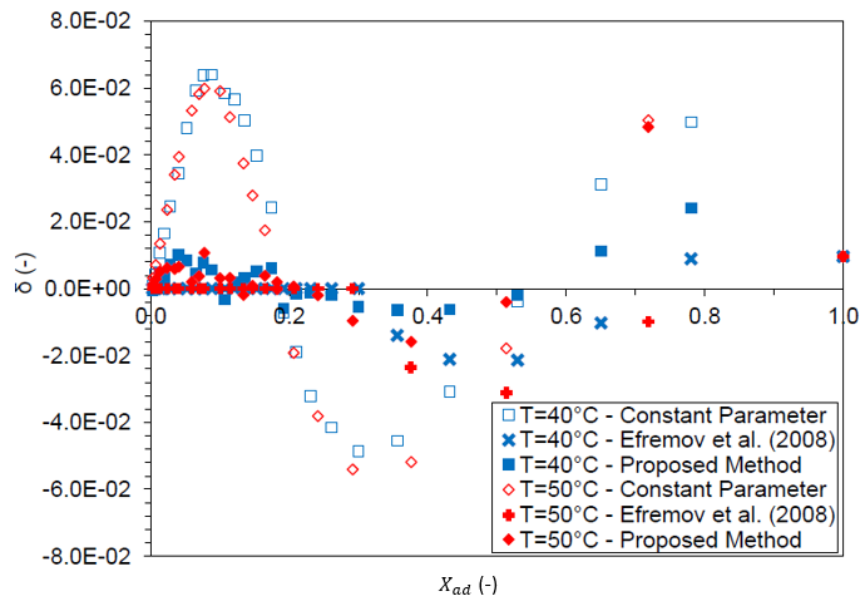
**Figura 5.15** – Umidades estimadas em função da umidade observada para os diferentes modelos.



Fonte: Acervo pessoal



**Figura 5.16** – Resíduos em função da umidade observada para as temperaturas de 40 e 50°C e comparação com os demais métodos.



Fonte: Acervo pessoal

A Tabela 5.6 mostra os resultados obtidos para os parâmetros  $R^2$  e  $\chi^2$ . Observa-se uma melhora significativa, ambos os modelos tiveram excelente aderência aos dados ajustados. Os valores obtidos para qui-quadrado foram superiores para na temperatura de 50°C, o que pode ser relacionado com uma cinética de secagem mais rápida. De Oliveira et. al (2012) analisaram 10 modelos empíricos para a secagem de grãos de milho, e obtiveram no melhor ajuste valores de da ordem de  $10^{-5}$ . Silva et. al (2015), realizaram os ajustes para a secagem de folhas de jenipapo obtendo um  $\chi^2$  da ordem de  $10^{-4}$ . A mesma ordem de grandeza é encontrada no trabalho de Felizardo (2014) no estudo realizado com sementes de Embaúba. Considerando isso, é possível considerar os valores obtidos como adequados.

Baseado nesses resultados, pode-se afirmar que a hipótese de difusividade variável explica melhor a cinética de secagem observada e fornece um entendimento melhor dos mecanismos de transferência de massa. Ademais, aumenta a precisão na estimativa da umidade adimensional, observado na Figura 5.15.

**Tabela 5.6** – Parâmetros de ajuste para modelos com difusividade variável para temperaturas de 40 e 50°C.

		Temperatura do Ar	
		40°C	50°C
Efremov et al. (2008)	R <sup>2</sup>	0,999	0,999
	$\chi^2$	5,52x10 <sup>-5</sup>	7,79x10 <sup>-5</sup>
Método dos ajustes sequenciais	R <sup>2</sup>	0,999	0,998
	$\chi^2$	6,89x10 <sup>-5</sup>	1,4x10 <sup>-4</sup>

Fonte: Acervo pessoal

É necessário acrescentar que, o método dos ajustes sequenciais, envolve uma simplificação no ajuste, pois é uma extensão do modelo com parâmetro constante o que simplifica a modelagem do ponto de vista teórico. Foi possível observar também, que o modelo proposto apresenta bons resultados, tanto na estimativa da difusividade quando da umidade adimensional.

## 6 CONCLUSÕES

Frente ao exposto foi possível concluir que:

- As sementes de Jacarandá-mimoso são homogêneas no tamanho e constituem leitos com elevada porosidade.
- Termodinamicamente a umidade de equilíbrio não apresenta comportamento trivial, podendo estar associado a mecanismos biológicos de manutenção da umidade.
- As isotermas de dessecção para as temperaturas de 20, 30 e 40°C podem ser bem representadas pelo modelo GAB.
- Os ensaios de secagem em camada delgada previram um aumento na difusividade efetiva com o aumento da temperatura.
- A modelagem com parâmetro constante revelou uma tendência de não-aleatoriedade nos resíduos e verificou que o fenômeno observado se aproxima ao de uma condição com  $Bim \ll 1$ .
- Os métodos para difusividade efetiva variável representam uma melhoria considerável na descrição dos fenômenos físicos envolvidos na secagem.
- O método dos ajustes sequenciais proposto neste trabalho foi muito satisfatório na estimativa de umidade e difusividade efetiva, mostrando-se promissor para outras aplicações e no projeto e dimensionamento de secadores.

## REFERÊNCIAS

- AL-MUHTASEB, A. H.; McMINN, W. A.; MAGEE, T. R. Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Food Products: A Review. *Trans IChemE*, v.80, p.118-128, 2002.
- ANDERSON, R. B. (1946), “Modification of the Brunauer, Emmett and Teller Equation”. *Journal of American Chemical Society*, v.68, n.4, p.686-691.
- ARALDI, Altamir A. R. Assimetria e Curtose. *Revista Ensino e Informação*, Florianópolis, p. 1, 22 set. 2018.
- ARAÚJO, Kellen O. et al. CARACTERIZAÇÃO DAS SEMENTES DE ACEROLA. XIX Jornada em engenharia química, MG, Brasil, p. 1-6, 8 ago. 2014.
- ATAÍDE, Glauciana da Mata et al. Avaliação preliminar da embebição de sementes de jacarandá-da-bahia. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Viçosa, Brazil, p. 133-139, jul. 2014. Disponível em: Acesso em: 25 jul. 2018.
- BALA, B. K. *Drying and Storage of Cereal Grains*. 2. ed. Jessore University of Science and Technology, Bangladesh: John Wiley & Sons, Ltd, 2017. ISBN 9781119124238.
- BARROZO, M.A.S., 1995. Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leitos deslizantes e escoamento cruzado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos-SP. (Tese de doutorado), 163p.
- BLERICK TREE FARM. Jacaranda mimosifolia. Austrália, 2019. Disponível em: <http://www.onlinetrees.com.au/p/4107452/jacaranda-mimosifolia---jacaranda-tree.html>. Acesso em: 11 jul. 2019.
- BOUDREAU, Bernard P. The diffusive tortuosity of fine-grained unlithified sediments. Pergamon press, USA, p. 3139-3142, 2 nov. 1996.
- BRANCALION, Pedro Henrique Santin; NOVENBRE, Ana Dionísia da Luz Coelho; RODRIGUES, Ricardo Ribeiro. Temperatura ótima de germinação de sementes de espécies arbóreas brasileiras. *Revista Brasileira de Sementes*, Universidade de São Paulo, Brazil, v. 32, n. 4, p. 15-21, jan. 2010. Disponível em: Acesso em: 18 jul. 2018.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Departamento Nacional de Produção Vegetal. Coordenação de Laboratório Vegetal. Regras para Análise de Sementes. Brasília, DF, 1992. 365p.
- BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. (1938), “Adsorption of gases in multimolecular layers”. *J. Am. Chem. Soc.*, Vol.60, n.1, p.309–319
- CAETANO, Graciene de Souza et al. Higroscopicidade de sementes de caju-de-árvore-do-

cerrado. Pesquisa agropecuária tropical, [S. l.], p. 437-445, 4 dez. 2012.

CAETANO, Mário J. L. Forma das partículas. CTB, Brasil, 2018. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/materias-primas/cargas/cargas-e-propriedades/principais-caracteristicas-das-cargas/forma-das-particulas/>. Acesso em: 28 dez. 2020.

CAETANO, Marcio J. L. Tamanho das partículas e sua distribuição. Brasil, 2019. Disponível em: [www.ctborracha.com](http://www.ctborracha.com). Acesso em: 13 out. 2020.

CARLESSO, V. O.; BERBERT, P. A.; SILVA, R. F.; VIANA A. P.; DETMANN, E.; DIONELLO, R. G. Secagem de sementes de maracujá em camada delgada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 27, n. 3, p. 444-448, 2005.

CARMO, J. E. F.; LIMA, A. G. B. (2005) "Drying of lentil including shrinkage: a numerical simulation". *Drying technology*, v.23, p.1977-1922.

COMITI, Jacques; RENAUD, Maurice. A new model for determining mean structure parameters of fixed bed from pressure drops measurements, application to beds peckets with parallelepipedal particles. Pergamon press, Great britain, v. 44, n. 7, p. 1539-1545, 1989.

D'AVILA, F. et al. ANÁLISE DE CORRELAÇÕES DA DIFUSIVIDADE EFETIVA DE GRÃOS DE SOJA SUBMETIDOS A SECAGEM EM CAMADA FINA. COBEQ-IC, Uberlândia, MG, p. 1-6, 24 jul. 2019.

D.H.NUGTEREN; E.CHRIST-HAZELHOF. Naturally occurring conjugated octadecatrienoic acids are strong inhibitors of prostaglandin biosynthesis. Elsevier, Vlaardingen, v. 33, n. 3, p.403-417, mar. 1987.

DA ROCHA, Jeferson C. et al. Effects of mass compaction on airflow resistance through paddy rice grains. *Biosystems Engineering*, [S. l.], p. 28-39, 11 mar. 2020.

DE OLIVEIRA, DANIEL EMANUEL CABRAL et al. CINÉTICA DE SECAGEM DOS GRÃOS DE MILHO. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, Rio Verde, GO, p. 190-201, 29 dez. 2012.

EFREMOV, G. (1998) "Mathematical modeling of processes: kinetics of convective drying of fibre materials based on solution of a diffusion equation". *Fibre Chemistry*, v.30, p. 417- 421.

EFREMOV, G.; KUDRA, T. Model-Based Estimate for Time-Dependent Apparent Diffusivity. Taylor & Francis, Moscow, Russia, p. 2513-2522, 2005.

EFREMOV, German et al. Approach to calculation time-dependent moisture diffusivity for thin layered biological materials. Elsevier, Russia, p. 1069-1072, 29 ago. 2008.

ETHUR, L. Z. ROCHA, D. K.; MILANESI, P.; MUNIZ, M. F. B.; BLUME, H. Sanidade de sementes e emergência de plântulas de nabo forrageiro, aveia preta e centeio submetidas a

tratamentos com bioprotetor e fungicida. *Ciência e Natura*, v. 28, n.2, p. 17 - 27, 2006.

FELIZARDO, M. P. “Caracterização física e secagem de sementes de Embaúba (*Cecropia glaziovii* Snethlage)”. PPGEQ/UFSCar – Campus São Carlos, São Carlos – SP, 88p. (dissertação de mestrado).

FELIZARDO, M. P. Secagem de cevada: uma análise experimental da anatomia e do meio de transporte (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 146p, 2018.

FUMAGALLI, L. Estudo da Secagem de Sementes de *Brachiaria brizantha* (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 149p, 2007.

FYHR, C.; KEMP, I. C. EVALUATION OF THE THIN-LAYER METHOD USED FOR MEASURING SINGLE PARTICLE DRYING KINETICS. *Institution of Chemical Engineers*, v. 76, p. 815-822, 1998.

GACHET, María Salomé; SCHÜHLY, Wolfgang. Jacaranda—An ethnopharmacological and phytochemical review. *Journal Of Ethnopharmacology*, Graz, v. 1, n. 1, p.15-25, nov. 2008.

Gal, S. (1987) The need for, and practical applications of sorption data. In R. Jowitt, F. Escher, B. Hallstrom, H. Mefert, W. Spiess & G. Vos (Eds.), *Physical properties of foods-2* (pp. 13-25). London: Elsevier Applied Science.

GARCIA, D. C.; BARROS, A. C. S. A.; PESKE, S. T.; MENEZES, N. L. M. A secagem de sementes. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 603-608, mar-abr, 2004.

HALSEY, G. Physical adsorption on non-uniform surfaces. *The Journal of Chemical Physics*, New York, v. 16, n. 10, p. 931-937, 1948.

HENDERSON, S. M. A basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural Engineering*, Saskatoon, v. 33, p. 29-32, 1952.

HOSSAIN MD, Bala BK, Hossain MA and Mondol MRA, Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple. *J Food Eng* 48:103–107 (2001).

HUBINGER, Míriam D. et al. Isotermas de dessecção de filé de bonito (*Sarda sarda*) desidratado osmoticamente e defumado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 13, n. 3, p. 305-311, 9 out. 2008.

IGLESIAS, H. A.; CHIRIFE, J. Isothermic Heats of Water Vapour Sorption on Dehydrated Foods. Part I: Analysis of the Differential Heat Curves. *Lebens Wiss Technol*, v.9, p.116-122, 1976.

JAYAS, S. D.; CENKOWSKI, S.; PABIS, S.; MUIR, W. E. Review of Thin-Layer Drying and Wetting Equations. *Drying Technology*, v.9, n.3, p.551-588, 1991.

KARATHANOS, V. T.; KANELLOPOULOS, N. K.; BELESSIOTIS, V. G. Development of porous structure during air drying of agricultural plant products. *Journal of Food Engineering*, v. 29, p. 167-183, 1996.

KIRANOUDIS, C. T.; MAROULIS, Z. B.; TSAMI, E.; MARINOS-KOURIS, D. Equilibrium Moisture Content and Heat of Desorption of Some Vegetables. *Journal of Food Engineering*, v.20, p.55-74, 1993.

LANGMUIR, I. (1918), "The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum". *J. Am. Chem. Soc*, Vol.40, n.9, p.1361–1403.

LEMOS, Moisés Antônio da Costa; DA CUNHA, Luciano Soares; CAVALCANTE, André Luís Brasil. Abordagem analítica para obtenção de parâmetros relevantes do fluxo e transporte de gases em meio poroso não-saturado. *Geocentro*, Brasília, p. 1-7, 24 out. 2019.

Lima CR, Pacheco MV, Bruno RLA, Ferrari CS, Braga Júnior JM, Bezerra AKD. Temperaturas e substratos na germinação de sementes de *Caesalpinia pyramidalis* TUL. *Revista Brasileira de Sementes* 2011; 33(2): 216-222. <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-31222011000200003>

LIU, S.; MASLIAH, J. H. (1996) "Single phase fluid flow in porous media". *Chemical Engineering Communications*, v.148-150, p.653-732

MACEDO, G. A. R.; MARQUES NETO, J.; BATISTA, J. S. Secagem à sombra e ao sol de sementes de gramíneas forrageiras. *Revista Brasileira de Sementes*, ano 9, n. 3, Brasília, DF, 29-37, 1987.

MACIEL, Caciara Gonzatto et al. Avaliação de Temperaturas e Substratos na Germinação de Sementes de *Jacaranda mimosifolia* D. Don. *Floresta e Ambiente*, Santa Maria, Brazil, p. 55-61, mar. 2013.

MAIA, CLAUBER LUCIAN DA SILVA. DETERMINAÇÃO DE EQUAÇÃO EMPÍRICA PARA PREDIÇÃO DE PERDA DE CARGA NO MÓDULO DE LEITO FIXO DE AULAS PRÁTICAS. 2018. 47 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Química) - Universidade Federal da Paraíba, Brasil 2018.

MAIA, Gustavo; ALBINI, G.; FREIRE, J. T. ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO MODELO DE ADSORÇÃO EM MULTICAMADA, CALOR ISOSTÉRICO E ENTROPIA DE DESSORÇÃO PARA ISOTERMAS DE CEVADA. São Carlos: ENEMP, 2015. 1-10 p.

MAIA, G. D.; PERAZZINI, H. (2018) "Aspectos primordiais do estudo da secagem". In: FREIRE, J. T. "Tópicos em Secagem de Produtos Naturais: Experimental e Modelagem". São Carlos: Novas Edições Acadêmicas, p.231-273.

MAIA, G.D. et al. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE SEMENTES DE COPAÍBA NA UMIDADE DE LOTE E DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM. In: ENEMP, 2017, Maringá - Paraná. . [...]. São Carlos: Departamento de Engenharia Química UFSCar, 2017.

MAIA, Gustavo; ALBINI, G.; FREIRE, J. T. Thermodynamic Analysis for the Hygroscopic Behavior of Barley Seeds (*Hordeum vulgare* L.) . São Carlos: Japan Journal Of Food Engineering, 2016. 131-138 p. v. 17.

MARTINHO M. V.; FELIZARDO, M. P.; FREIRE, J. T.; FREIRE, F. B. (2017) “Avaliação de uma estufa convencional para a secagem convectiva de sólido”. XXXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Maringá – PR.

MASSARANI, G. e SILVA TELLES, A. Aspectos da secagem de material sólido particulado. Tópicos Especiais de Secagem, São Carlos, SP, 1992. P. 2-39.

McMINN WAM and Magee TRA, Moisture sorption characteristics of starch materials. Dry Technol 15:1527–1551 (1997).

MENDENHALL, William; REINMUTH, James E.; BEAVER, R. J. STATISTICS FOR MANAGEMENT & ECONOMICS. 2. ed. USA: Prindle Weber & Schmid Publishers, 1993. ISBN YUVVRS3V0J.

MERLO, G. R. F.; FELIZARDO, M. P.; MAIA, G. D. CARACTERIZAÇÃO E SECAGEM DE SEMENTES DE JACARANDÁ-MIMOSO. XXXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São Carlos, 30 out. 2019.

MISSIO, Evandro Luiz et al. VIGOR E GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE Jacaranda mimosifolia D. Don. (BIGNONIACEAE) APÓS O TRATAMENTO E ARMAZENAMENTO. Caderno de Pesquisa Série Biologia, Santa Maria, v. 28, n. 3, p.42-53, 2016.

MOHSENIN, M. M. Physical Properties of Plant and Animal Materials. New York: Gordon and Breach Scientific Publishers, 1970.

NASCIMENTO, F.R., TOSATO, P.G., CORRÊA, J.L.G., 2008. Sorption isotherms for food stocks: study of food models agreement. In: International Drying Symposium, 16., Hyderabad, Índia, Proceedings...

NAZ, Rabia et al. GC-MS analysis, antimicrobial, antioxidant, antilipoxygenase and cytotoxic activities of Jacaranda mimosifolia methanol leaf extracts and fractions. PLOS ONE, [S. l.], p. -, 29 jul. 2020. DOI <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236319>. Disponível em: [journals.plos.org](https://journals.plos.org). Acesso em: 7 out. 2020.



NUGTEREN, D.H.; CHRIST-HAZELHOF, E. Naturally occurring conjugated octadecatrienoic acids are strong inhibitors of prostaglandin biosynthesis. Elsevier, Vlaardingen, v. 33, n. 3, p.403-417, mar. 1987.

NUNES, João Angelo Silva et al. Determinação do ângulo de repouso, volume unitário, eixos ortogonais e esfericidade de trigo. Acta Iguazu, Mato Grosso, p. 77-86, 1 jul. 2014.

OLIVEIRA, F. A. M.; FREIRE, J. T.; MAIA, G. D. EFEITO DA TEMPERATURA DE SECAGEM NO ENCOLHIMENTO DE SEMENTES DE LENTILHA. COBEQ, Fortaleza, CE, Brasil, p. 1-8, 29 set. 2016.

OSWIN, C. R. The kinetics of package life III. The isotherm. Journal of the Society of Chemical Industry, London, v. 65, p. 419-421, 1946.

PAPINI, CLAUDEMIR JOSÉ. ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULA. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de tecnologia nuclear-materiais) - IPEN-USP, São Paulo, 2003. Disponível em: [http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Claudemir%20Jose%20Papini\\_M.pdf](http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Claudemir%20Jose%20Papini_M.pdf). Acesso em: 13 jul. 2019.

PASSERO, L. F. D. Anti-leishmania activity of semi-purified fraction of Jacaranda puberula leaves. Parasitol Res, -, v. 1, n. 1, p.677-680, mar. 2007.

PEREIRA, Abigail Vasconcelos. Caracterização e secagem de sementes de painço. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - UFSCar, São Carlos, 2010.

PHILLIP, J. R. et al. Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients. American Geophysical Union, USA, v. 38, n. 2, p. 222-232, 1 abr. 1957.

PORTELA, Juliana V. F. et al. Modelagem matemática e difusividade efetiva do processo de secagem do miolo da macambira. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, RN, Brasil, p. 271-278, 5 mar. 2014.

PRADO, D. (1998).” Jacaranda mimosifolia”. In: IUCN 2018. 2018 IUCN Red list of Threatened Species. Downloaded on 01 february 2019.

PRAKASH, L.; GARG, G. Chemical examination of the root barks of Jacaranda mimosaeifolia D. Don. and Tabebuia pentaphylla (Linn) Hemsl. Pharmazie, v.35, n.10, p.649, 1980.

QUIRIJNS, E. J.; VAN BOXTEL, A, J.; VAN LOON, W. K.; VAN STRATEN, G. An Improved Experimental and Regression Methodology for Sorption Isotherms. Journal of the Science of Food and Agriculture, n.85, p.175-185, 2005.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M. A.; RIZIVI, S. S. H. (Ed.). Engineering properties of foods. New York: Marcel Dekker, 1986. p. 133-214.

RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H.; DATTA, A. K Engineering Properties of Foods. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2005.

RESENDE, Osvaldo et al. MODELAGEM MATEMÁTICA E DIFUSIVIDADE EFETIVA DAS SEMENTES DE PINHÃO-MANSO (*Jatropha curcas* L.) DURANTE A SECAGEM. Eng. Agríc., Jaboticabal, Jaboticabal, v. 31, n. 6, p. 1123-1135, 15 ago. 2011.

ROSANOVA, A. H.; MAIA, G. D.; FREIRE, F. B.; FERREIRA, M. C. (2017) A “Neural based modeling approach for drying kinetics of mint branches and their fractions (leaves and stems)”. Advances in Chemical Engineering and Science, v.7, p.154-174.

RIGONATTO, Marcelo. Coeficiente de variação. [S. l.]: Mundo educação, 9 jun. 2020. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/matematica/coeficiente-variacao.htm>. Acesso em: 22 nov. 2020.

SANKARA-SUBRAMANIAN, S.; NAGARAJAN, S.; SULOCHANA, N. Flavonoids of eight Bignoniaceous plants. Phytochemistry, v.11, n.2, p.1499, 1972.

SILVA, Adriano S. et al. Cinética de secagem em camada fina da banana maçã em secador de leito fixo. REVISTA DE BIOLOGIA E CIÊNCIAS DA TERRA, [S. l.], v. 9, p. 107-115, 15 dez. 2009.

SHERWOOD, T. K. The Drying of Solids - III Mechanism of the Drying of Pulp and Paper. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Worcester, p. 132-136, 1 fev. 1930.

SILVA, L. C. Secagem de grãos. Boletim técnico – Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal do Espírito Santo, Disponível em: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAACBEAC/ag0405-secagem-graos>. Acessado em 12 de Julho de 2019.

SILVA, L. A. et al. Cinética de secagem e difusividade efetiva em folhas de jenipapo (*Genipa americana* L.). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde, GO, p. 953-963, 14 abr. 2015.

SOCOLOWSKI, Fábio; TAKAKI, Massanori. Germination of *Jacaranda mimosifolia* (D. Don - Bignoniaceae) seeds: effects of light, temperature and water stress. Brazilian Archives Of Biology And Technology, Curitiba, v. 47, n. 5, p.00-00, set. 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1516-89132004000500014>>. Acesso em: 30 ago. 2017.

SUBRAMANIAN, S.S.; NAGARAJAN, S.; SULOCHANA, N. Hydroquinone from the leaves of *Jacaranda mimosifolia*. Phytochemistry, v.12, n.4, p.220-1, 1973.

TAGUCHI, M.; Fábrica de Árvores. Globo Rural, 2015. Disponível em <<http://revistagloborural.globo.com/Revista/>>, 2016.

TOLABA, MARCELA P., PELTZER, MERCEDES, ENRIQUEZ, NATALIA AND POLLIO MARÍA LUCÍA, Grain sorption equilibria of quinoa grains, *Journal of Food Engineering*, 61,365–371, 2004.

TSAMI E., Net isosteric heat of sorption in dried fruits, *J. Food Eng.*, 14, 327–335, 1991.

VAGENAS, G. K.; KARATHANOS, V. T. Prediction of Moisture Diffusivity in Granular Materials, with Special Applications to Foods. *Blotechnol. Prog*, New Jersey, p. 419-426, 1991.

VAN DER BERG, C. Vapour Sorption Equilibria and Other Water-Starch Interactions; a Physico-chemical Approach. 1981, p.201. PhD Tese - Wageningen Agricultural University, Wageningen.

VAN DEN BERG, C. Development of B.E.T. like models for sorption of water of foods: theory and relevance. In: SIMATOS, D.; MULTON, J. L. (Ed). *Properties of water in foods*. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1985. p. 119-135.

VECHIATO, M. H.; PARISI, J. J. IMPORTÂNCIA DA QUALIDADE SANITÁRIA DE SEMENTES DE FLORESTAIS NA PRODUÇÃO DE MUDAS. *Instituto Biológico, São Paulo*, v. 75, n. 1, p. 27-32, 1 jun. 2013.

WOLF W, Spiess WEL, Jung G, Weisser H, Bizot H and Duckworth RB, The water-vapour sorption isotherms of microcrystalline cellulose (MCC) and of purified potato starch. Results of a collaborative study. *J Food Eng* 3:51–73 (1984).

YADAV, Santosh et al. Thermodynamics of water interactions with human stratum corneum. II. Interpretation via the Guggenheim–Anderson–deBoer isotherm. *Chemical Engineering Science*, Cincinnati, p. 1480-1487, 27 nov. 2008.

ZOTIM, F. M. Z. Efeito de Parede em Colunas de Recheio. (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 85p, 1985.

## APÊNDICE A – Caracterização física: base de dados

### Quadro A1 – Picnometria líquida

Parâmetro	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Massa Picnômetro	59,000	59,194	59,000
Massa Picnômetro+Água	162,613	162,685	162,613
Massa Água	103,613	103,491	103,613
Volume Real Picnômetro (ml)	103,841	103,719	103,841
Massa Picnômetro+Tolueno (g)	148,374	148,38	148,374
Massa Tolueno (g)	89,374	89,186	89,374
$\rho$ real Tolueno (g/ml)	0,861	0,860	0,861
Massa sementes (g)	30,276	26,952	30,705
Massa sementes+tolueno (g)	97,518	97,323	96,617
Volume ocupado Tolueno (ml)	78,127	81,838	76,582
Volume sementes (ml)	25,715	21,881	27,260
$\rho$ sementes (g/ml)	1,177	1,232	1,126

**Quadro A2 – Medidas de espessura com paquímetro digital**

Semente	Espessura (mm)	Semente	Espessura (mm)	Semente	Espessura (mm)	Semente	Espessura (mm)
1	0,44	24	0,83	47	1,30	70	1,37
2	0,45	25	0,96	48	1,30	71	1,37
3	0,49	26	0,97	49	1,30	72	1,37
4	0,52	27	0,97	50	1,32	73	1,38
5	0,55	28	1,00	51	1,32	74	1,39
6	0,56	29	1,05	52	1,32	75	1,39
7	0,56	30	1,08	53	1,32	76	1,39
8	0,57	31	1,09	54	1,32	77	1,39
9	0,61	32	1,09	55	1,33	78	1,39
10	0,61	33	1,11	56	1,33	79	1,39
11	0,63	34	1,21	57	1,33	80	1,39
12	0,64	35	1,21	58	1,34	81	1,40
13	0,66	36	1,23	59	1,34	82	1,40
14	0,67	37	1,24	60	1,34	83	1,40
15	0,69	38	1,24	61	1,35	84	1,40
16	0,69	39	1,24	62	1,35	85	1,40
17	0,72	40	1,26	63	1,35	86	1,41
18	0,73	41	1,27	64	1,35	87	1,41
19	0,74	42	1,27	65	1,35	88	1,41
20	0,77	43	1,27	66	1,36	89	1,41
21	0,79	44	1,28	67	1,36	90	1,41
22	0,81	45	1,29	68	1,36	91	1,41
23	0,83	46	1,29	69	1,37	92	1,41

Fonte: Acervo pessoal

**Quadro A2 (continuação) – Medidas de espessura com paquímetro digital**

Semente	Espessura (mm)	Semente	Espessura (mm)	Semente	Espessura (mm)	Semente	Espessura (mm)
93	1,41	116	1,46	139	1,52	162	1,61
94	1,42	117	1,47	140	1,53	163	1,61
95	1,42	118	1,47	141	1,53	164	1,61
96	1,42	119	1,48	142	1,53	165	1,61
97	1,42	120	1,48	143	1,54	166	1,62
98	1,42	121	1,48	144	1,54	167	1,62
99	1,43	122	1,49	145	1,54	168	1,62
100	1,43	123	1,49	146	1,54	169	1,64
101	1,43	124	1,49	147	1,55	170	1,64
102	1,43	125	1,50	148	1,55	171	1,66
103	1,43	126	1,50	149	1,57	172	1,66
104	1,43	127	1,50	150	1,57	173	1,66
105	1,43	128	1,50	151	1,57	174	1,67
106	1,44	129	1,50	152	1,57	175	1,67
107	1,44	130	1,50	153	1,57	176	1,67
108	1,45	131	1,50	154	1,57	177	1,67
109	1,45	132	1,51	155	1,58	178	1,68
110	1,45	133	1,51	156	1,58	179	1,71
111	1,46	134	1,51	157	1,59	180	1,71
112	1,46	135	1,51	158	1,60	181	1,72
113	1,46	136	1,51	159	1,60	182	1,73
114	1,46	137	1,52	160	1,60	183	1,74
115	1,46	138	1,52	161	1,61	184	1,74

Fonte: Acervo pessoal

**Quadro A3 – Análise de imagem**

Semente	Area (mm <sup>2</sup> )	Dmax (mm)	Dmin (mm)	Dm (mm)	Perimeter (mm)	Roundness	Dfmin (mm)	Dfmax (mm)	Dfm (mm)
1	30,52	6,50	5,37	6,07	20,71	1,12	5,82	6,84	6,50
2	42,91	8,17	6,39	7,21	25,34	1,19	7,09	8,50	7,72
3	49,62	8,46	7,24	7,74	26,91	1,16	7,54	9,00	8,34
4	49,81	8,73	7,08	7,79	27,46	1,20	7,35	9,01	8,20
5	57,17	9,04	7,75	8,34	29,43	1,21	8,04	9,16	8,71
6	43,47	8,03	6,85	7,29	25,01	1,15	7,00	8,20	7,57
7	48,25	8,09	6,99	7,69	25,47	1,07	7,53	8,23	7,95
8	50,89	8,78	7,24	7,87	26,63	1,11	7,67	8,95	8,21
9	40,14	7,57	6,37	7,02	23,70	1,11	7,09	7,71	7,34
10	41,86	7,45	6,75	7,13	23,36	1,04	7,10	7,63	7,41
11	36,84	8,36	5,32	6,77	26,06	1,47	6,11	8,60	7,33
12	33,48	6,92	5,98	6,34	21,91	1,14	6,25	7,07	6,71
13	47,23	8,23	7,01	7,59	25,63	1,11	7,38	8,35	7,95
14	51,93	8,92	7,04	7,94	27,85	1,19	8,03	8,92	8,39
15	37,80	7,34	5,90	6,74	23,32	1,14	6,39	7,77	7,23
16	49,01	9,05	6,84	7,74	27,06	1,19	7,14	9,24	8,21
17	58,28	9,23	7,68	8,44	27,78	1,05	8,20	9,36	8,73
18	42,26	8,20	5,96	7,20	25,59	1,23	6,85	8,26	7,77
19	49,54	8,28	7,11	7,79	25,77	1,07	7,59	8,37	8,07
20	53,30	9,19	6,03	8,08	34,30	1,76	8,02	9,38	8,72
21	41,48	7,85	6,28	7,12	23,84	1,09	6,94	7,91	7,40
22	59,89	9,27	7,91	8,56	29,29	1,14	8,36	9,32	8,90
23	38,98	7,68	6,22	6,90	23,23	1,10	6,85	7,78	7,23
24	32,91	7,70	5,59	6,34	22,18	1,19	5,96	7,94	6,81
25	45,27	8,07	6,73	7,42	24,39	1,05	7,20	8,15	7,76
26	57,25	9,76	7,35	8,36	29,18	1,18	8,24	9,78	8,92
27	41,78	7,79	6,53	7,12	23,90	1,09	6,72	7,99	7,42
28	40,97	7,84	6,40	7,06	23,06	1,03	6,72	8,03	7,30
29	47,47	8,96	6,53	7,61	25,49	1,09	6,86	9,05	7,96
30	48,17	8,36	6,76	7,67	25,40	1,07	7,18	8,45	7,99
31	44,52	8,93	6,01	7,38	24,68	1,09	6,23	9,02	7,76
32	50,73	8,39	7,20	7,85	26,42	1,09	7,91	8,65	8,27
33	57,07	8,84	7,85	8,35	28,37	1,12	8,34	9,04	8,71
34	51,34	9,19	5,91	7,89	27,73	1,19	7,30	9,39	8,38
35	40,14	7,93	5,92	6,97	23,50	1,09	6,24	8,03	7,39
36	44,81	7,93	6,91	7,42	24,37	1,05	7,13	8,07	7,65
37	41,13	8,53	5,71	7,19	25,48	1,26	5,98	8,94	7,61
38	40,52	8,22	5,94	6,98	24,90	1,22	6,62	8,88	7,70
39	41,75	7,85	5,74	7,12	29,56	1,67	7,13	7,99	7,57
40	48,01	8,41	7,18	7,65	25,95	1,12	7,54	8,65	8,01
41	35,28	7,23	5,81	6,47	24,88	1,40	6,48	7,71	7,04
42	45,92	8,68	6,89	7,50	27,60	1,32	7,59	8,68	8,16
43	41,62	7,96	4,96	7,11	26,99	1,39	6,78	8,17	7,67
44	31,70	7,70	5,25	6,23	23,51	1,39	5,77	7,73	6,79
45	43,15	7,88	6,10	7,27	26,36	1,28	7,21	8,04	7,67
46	52,18	8,71	7,09	8,00	27,54	1,16	7,98	8,73	8,32
47	46,70	8,50	6,91	7,54	26,51	1,20	7,34	8,55	7,97
48	58,19	9,14	7,46	8,45	28,42	1,10	8,27	9,42	8,88

49	44,71	8,14	6,84	7,37	27,07	1,30	7,05	8,22	7,71
50	42,48	7,87	6,37	7,20	23,68	1,05	6,62	7,91	7,44
51	41,54	7,48	6,40	7,11	23,25	1,04	7,05	7,56	7,34
52	40,65	7,86	6,31	7,06	25,20	1,24	6,54	7,98	7,35
53	38,21	7,63	6,14	6,83	23,29	1,13	6,70	7,77	7,18
54	47,66	8,14	7,22	7,63	26,34	1,16	7,54	8,25	7,91
55	55,91	9,28	7,65	8,28	27,85	1,10	7,90	9,36	8,59
56	48,36	8,73	6,69	7,65	26,55	1,16	7,48	8,87	8,15
57	46,53	8,04	6,85	7,50	26,10	1,17	7,59	8,23	7,91
58	45,75	8,17	6,39	7,45	25,26	1,11	6,96	8,29	7,87
59	38,15	7,68	6,14	6,79	24,94	1,30	6,50	7,78	7,21
60	37,88	7,33	6,24	6,76	22,67	1,08	6,59	7,40	7,10
61	37,88	8,00	5,25	6,83	23,94	1,20	5,96	8,31	7,43
62	38,10	7,65	6,01	6,82	22,72	1,08	6,20	7,91	7,16
63	44,92	8,24	6,84	7,41	25,11	1,12	7,07	8,40	7,72
64	18,46	6,73	3,29	5,24	18,68	1,50	3,99	6,99	5,61
65	40,44	7,91	6,37	7,04	23,95	1,13	6,72	8,11	7,39
66	45,86	8,55	6,39	7,48	24,87	1,07	6,77	8,58	7,80
67	44,01	8,47	6,23	7,41	25,74	1,20	6,49	8,67	7,74
68	33,10	7,06	5,71	6,42	21,66	1,13	5,89	7,25	6,67
69	46,99	8,37	6,56	7,55	25,66	1,11	7,35	8,46	7,90
70	52,36	8,92	7,22	8,01	26,56	1,07	7,65	8,97	8,27
71	67,20	10,55	8,28	9,04	32,96	1,29	8,97	10,73	9,93
72	48,93	8,71	6,61	7,70	30,95	1,56	7,53	8,87	8,22
73	39,20	8,73	5,12	6,98	24,51	1,22	5,78	8,88	7,53
74	47,21	8,04	7,04	7,59	25,14	1,07	7,44	8,17	7,88
75	45,00	8,25	6,51	7,42	25,24	1,13	7,13	8,42	7,79
76	44,14	8,36	6,37	7,37	25,05	1,13	7,36	8,55	7,73
77	65,69	10,66	7,87	8,96	31,82	1,23	8,32	10,83	9,53
78	34,61	8,40	4,50	6,63	24,88	1,42	5,46	9,31	7,65
79	46,21	8,74	6,53	7,45	27,06	1,26	7,14	9,18	8,00
80	47,77	8,44	6,93	7,62	25,46	1,08	7,52	8,49	7,99
81	38,74	7,96	6,10	6,86	23,41	1,13	6,56	8,09	7,32
82	38,80	8,14	5,97	6,86	29,79	1,82	6,52	8,28	7,41
83	44,57	8,86	5,81	7,35	27,95	1,39	6,45	8,98	8,02
84	50,32	8,50	7,41	7,83	26,91	1,14	7,71	8,68	8,13
85	38,47	8,22	6,03	6,86	24,45	1,24	6,50	8,21	7,33
86	47,53	8,25	7,09	7,64	25,31	1,07	7,28	8,39	7,91
87	51,67	8,85	6,86	7,93	27,64	1,18	7,53	9,04	8,36
88	49,14	8,50	6,85	7,71	29,59	1,42	7,60	8,73	8,26
89	52,58	8,87	7,20	7,98	31,08	1,46	7,86	9,13	8,50
90	37,45	8,16	5,61	6,72	26,70	1,51	6,50	8,22	7,21
91	52,28	8,59	7,19	7,98	27,62	1,16	7,87	8,79	8,39
92	42,13	8,41	6,14	7,19	27,58	1,44	6,93	8,55	7,79
93	61,66	10,20	7,36	8,70	29,66	1,14	7,68	10,41	9,15
94	41,46	8,12	6,00	7,11	24,32	1,14	6,40	8,36	7,55
95	46,45	8,43	6,18	7,51	27,34	1,28	7,39	8,82	7,95
96	54,38	9,38	7,32	8,13	29,09	1,24	7,64	9,41	8,64
97	50,67	8,65	6,88	7,87	27,31	1,17	7,81	8,79	8,34
98	42,85	7,88	6,41	7,27	24,39	1,10	6,77	8,18	7,58
99	53,39	10,37	6,26	8,02	30,98	1,43	7,09	10,63	8,83



100	41,89	7,92	6,38	7,14	24,14	1,11	6,98	8,07	7,44
101	41,48	8,16	6,12	7,07	24,80	1,18	6,39	8,24	7,53
102	41,99	8,53	5,28	7,17	28,31	1,52	7,18	8,59	7,98
103	53,33	9,09	6,97	8,08	26,93	1,08	7,40	9,22	8,40
104	47,21	8,80	6,40	7,56	26,76	1,21	7,34	9,02	8,20
105	46,18	8,53	6,39	7,49	27,82	1,33	6,89	8,78	7,92
106	55,29	9,62	7,48	8,22	30,75	1,36	7,68	9,97	8,81
107	45,22	8,07	6,61	7,44	25,81	1,17	7,00	8,20	7,80
108	47,53	8,76	6,66	7,63	26,15	1,14	7,41	8,92	8,16
109	51,91	9,91	6,85	7,95	28,79	1,27	7,30	9,95	8,67
110	48,09	8,40	6,48	7,63	26,44	1,16	7,30	8,57	8,08
111	42,53	8,75	4,50	7,47	28,97	1,57	6,61	9,07	8,19
112	47,31	8,33	6,74	7,62	25,46	1,09	7,09	8,55	7,91
113	49,89	8,73	6,55	7,83	26,22	1,10	7,00	8,88	8,21
114	40,97	8,14	5,41	7,07	27,95	1,52	6,55	8,34	7,63
115	49,19	8,80	6,61	7,76	28,79	1,34	7,38	8,96	8,10
116	45,14	8,55	6,16	7,43	25,69	1,16	6,96	8,65	7,76
117	49,09	8,35	7,04	7,73	27,71	1,25	7,42	8,55	8,07
118	40,38	8,14	5,74	6,96	32,28	2,05	6,76	8,55	7,73
119	52,61	9,41	7,12	8,00	28,79	1,25	7,42	9,51	8,48
120	40,22	7,68	6,43	6,98	24,11	1,15	6,72	7,79	7,28
121	29,20	7,58	5,09	6,10	20,77	1,18	5,25	7,78	6,48
122	58,14	9,10	7,72	8,42	28,25	1,09	8,40	9,50	8,87
123	49,41	8,83	6,92	7,73	27,59	1,23	7,21	8,95	8,16
124	45,27	8,07	6,43	7,34	26,46	1,23	7,32	8,25	7,86
125	31,33	8,05	4,17	6,32	22,45	1,28	4,81	8,37	6,98
126	58,81	9,10	7,45	8,48	29,80	1,20	8,05	9,30	8,80
127	52,53	9,34	6,53	8,04	30,28	1,39	7,07	9,56	8,51
128	45,35	9,07	6,16	7,41	29,38	1,51	6,56	9,08	7,95
129	59,59	9,22	7,68	8,54	28,94	1,12	8,33	9,43	8,85
130	39,74	7,43	6,14	6,94	26,31	1,39	6,95	7,82	7,34
131	57,50	9,07	7,59	8,34	29,82	1,23	8,45	9,26	8,90
132	40,11	7,55	6,26	6,97	25,81	1,32	6,90	7,73	7,35
133	45,92	8,61	6,17	7,46	27,12	1,28	7,17	8,65	7,96
134	54,94	9,42	6,69	8,16	28,87	1,21	7,70	9,53	8,64
135	45,51	8,96	4,41	7,34	34,70	2,11	6,97	9,27	8,25
136	50,35	9,34	6,20	7,87	28,52	1,29	7,33	9,55	8,30
137	47,15	8,69	6,70	7,60	27,09	1,24	7,19	8,73	8,03
138	44,28	7,99	6,74	7,36	25,27	1,15	7,01	8,24	7,73
139	36,06	8,10	5,29	6,68	23,01	1,17	5,57	8,28	7,08
140	38,80	7,82	6,03	6,90	23,43	1,13	6,37	8,00	7,26
141	55,51	9,23	7,70	8,23	29,44	1,24	7,97	9,71	8,67
142	55,99	8,88	7,26	8,25	31,73	1,43	8,47	9,25	8,82
143	57,44	9,18	7,52	8,35	27,70	1,06	8,06	9,27	8,69
144	46,59	8,56	6,17	7,52	30,22	1,56	7,43	8,68	8,06
145	48,41	8,40	6,73	7,63	30,00	1,48	7,62	8,65	8,18
146	50,27	8,69	6,91	7,80	28,72	1,31	7,30	8,89	8,24
147	46,27	8,25	6,95	7,49	25,47	1,12	7,14	8,52	7,83
148	36,57	7,84	5,61	6,66	23,27	1,18	5,98	8,10	7,09
149	55,00	8,67	7,07	8,17	32,14	1,49	8,05	9,00	8,60
150	37,56	8,00	5,09	6,63	37,67	3,01	6,39	8,10	7,41

151	51,61	9,44	6,46	7,88	28,70	1,27	6,98	9,70	8,51
152	31,14	7,44	3,45	5,76	31,57	2,55	5,76	7,57	6,97
153	41,97	7,81	6,39	7,11	24,22	1,11	7,04	7,86	7,55
154	54,38	8,69	7,48	8,16	27,73	1,12	7,96	8,92	8,54
155	19,51	7,12	3,61	5,23	19,91	1,62	4,10	7,19	5,57
156	60,18	9,39	7,71	8,56	29,35	1,14	8,03	9,59	9,00
157	51,69	9,19	6,74	7,86	30,91	1,47	7,17	9,53	8,55
158	62,25	9,22	8,25	8,74	29,88	1,14	8,96	9,44	9,16
159	42,05	8,43	6,17	7,14	24,62	1,15	6,85	8,50	7,57
160	33,80	7,37	5,38	6,39	21,95	1,13	5,90	7,60	6,78
161	42,58	8,35	6,43	7,17	27,22	1,38	7,05	8,45	7,60
162	44,73	8,67	6,14	7,44	27,69	1,36	7,05	8,76	8,03
163	38,39	7,61	6,01	6,84	23,56	1,15	6,59	7,70	7,13
164	48,58	8,55	6,51	7,69	27,34	1,22	7,30	8,81	8,20
165	41,00	7,73	6,46	7,06	26,33	1,35	6,95	7,94	7,45

Fonte: Acervo pessoal

### Quadro A4 – Densidade Bulk

Batidas	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
	Volume (mL)	Densidade (g/mL)	Volume (mL)	Densidade (g/mL)	Volume (mL)	Densidade (g/mL)
0	162	0,286	162	0,285	157	0,297
1	160	0,289	158	0,292	156	0,299
2	158	0,293	158	0,292	156	0,299
3	157	0,295	156	0,296	155	0,301
4	157	0,295	156	0,296	154	0,303
5	156	0,297	156	0,296	153	0,305
6	156	0,297	154	0,300	152	0,307
7	154	0,300	153	0,302	152	0,307
8	152	0,304	153	0,302	152	0,307
9	151	0,306	152	0,304	152	0,307
10	150	0,308	152	0,304	151	0,309
15	150	0,308	150	0,308	149	0,313
20	148	0,313	148	0,312	148	0,315
25	148	0,313	148	0,312	146	0,320
30	148	0,313	147	0,314	145	0,322
35	148	0,313	147	0,314	144	0,324
40	148	0,313	146	0,316	143	0,326
45	147	0,315	146	0,316	143	0,326
50	146	0,317	145	0,318	142	0,329
60	146	0,317	144	0,320	142	0,329
70	144	0,321	144	0,320	140	0,333
80	144	0,321	143	0,323	138	0,338
90	142	0,326	143	0,323	137	0,341
100	142	0,326	142	0,325	136	0,343
120	142	0,326	142	0,325	135	0,346
140	141	0,328	140	0,330	135	0,346
160	141	0,328	140	0,330	135	0,346
200	141	0,328	140	0,330	135	0,346

Fonte: Acervo pessoal

## APÊNDICE B – Isotermas de dessorção: base de dados

### Quadro B1 – Dados para isoterma de dessorção na temperatura de 20°C

Sal	Atividade (20°C)	Umidade Inicial 1	Umidade Inicial 2	Umidade Inicial 3	Xe 1 (b.s.)	Xe 2 (b.s.)	Xe 3 (b.s.)
MgCl <sub>2</sub>	0,33	0,8260	0,8483	0,8577	0,0599	0,0593	0,0548
NaCl	0,76	0,9147	0,9797	0,8810	0,2671	0,1122	0,1024
CH <sub>3</sub> COOK	0,21	0,8943	1,0076	0,9262	0,0456	0,0506	0,0461
NaNO <sub>2</sub>	0,65	1,0300	0,8972	1,0783	0,0909	0,0910	0,0878
KCl	0,85	0,9934	1,0109	0,9006	0,1334	0,1411	0,5515
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,43	0,7993	0,8824	0,8605	0,0401	0,0599	0,0652
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,55	0,8879	0,9390	0,8359	0,0722	0,0727	0,0811
KOH	0,08	0,8765	0,8726	0,9093	0,0331	0,0311	0,0318

Fonte: Acervo pessoal

**Quadro B2 – Dados para isoterma de dessorção na temperatura de 30°C**

Sal	Atividade (30°C)	Umidade Inicial 1	Umidade Inicial 2	Umidade Inicial 3	Xe 1 (b.s.)	Xe 2 (b.s.)	Xe 3 (b.s.)
MgCl <sub>2</sub>	0,32	0,9648	0,9153	0,9372	0,0450	0,0396	0,0364
NaCl	0,75	0,8555	1,1301	1,0279	0,0919	0,0946	0,0822
CH <sub>3</sub> COOK	0,20	0,9114	0,9439	1,0184	0,0314	0,0287	0,0265
NaNO <sub>2</sub>	0,62	0,8471	0,9471	0,9499	0,0705	0,0722	0,0730
KCl	0,82	0,8584	0,8093	1,0015	0,1678	0,6338	0,1812
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,43	1,0416	0,9182	0,7730	0,0609	0,0536	0,0549
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,48	0,9021	0,9630	0,8763	0,0733	0,0599	0,0616
KOH	0,07	0,9628	0,7858	0,7935	0,0088	0,0388	0,0162

Fonte: Acervo pessoal

**Quadro B3 – Dados para isoterma de dessorção na temperatura de 40°C**

Sal	Atividade (40°C)	Umidade Inicial 1	Umidade Inicial 2	Umidade Inicial 3	Xe 1 (b.s.)	Xe 2 (b.s.)	Xe 3 (b.s.)
MgCl <sub>2</sub>	0,32	0,9048	0,7910	0,9736	0,0430	0,0490	0,0467
NaCl	0,75	0,9538	0,9641	0,8125	0,0956	0,0934	0,0904
CH <sub>3</sub> COOK	0,20	1,0364	1,0374	0,9388	0,0277	0,0273	0,0345
NaNO <sub>2</sub>	0,61	0,9416	0,9558	0,8842	0,0622	0,0693	0,0727
KCl	0,82	1,1838	1,2559	1,0530	0,1192	0,2743	0,2421
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,43	0,9331	0,5959	1,1100	0,0468	0,1336	0,0562
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,48	0,8260	1,0559	0,8870	0,0555	0,0566	0,0532
KOH	0,06	0,8289	0,9872	0,8661	0,0102	0,0104	0,0106

Fonte: Acervo pessoal

## APÊNDICE C – Secagem em camada fina: base de dados

### Quadro C1 – Determinação da condição inicial da semente

Amostra	1	2	3
Massa recipiente	20,2	13,6	13,8
Massa inicial (g)	1,45	1,42	1,46
Massa final (g)	1,33	1,31	1,35
Umidade inicial (g/g)	0,08	0,08	0,08
Umidade média (g/g)	0,08		

Fonte: Acervo pessoal

**Quadro C2** – Medidas de secagem para temperatura de 40°C, experimento 1

t (min)	m (g)	m sem (g)	Umidade	Voltagem	Velocidade (m/s)	T (°C)
0	124,45	8,52	1,04	1,20	0,25	39,6
1	123,47	7,54	0,81	1,20	0,25	39,6
2	123,14	7,21	0,73	1,20	0,25	39,6
3	122,63	6,7	0,61	1,20	0,25	40,1
4	122,22	6,29	0,51	1,20	0,25	40,3
5	121,91	5,98	0,43	1,20	0,25	39,7
6	121,68	5,75	0,38	1,20	0,25	39,5
7	121,53	5,6	0,34	1,20	0,25	39,2
8	121,42	5,49	0,32	1,20	0,25	39,5
9	121,35	5,42	0,30	1,20	0,25	39
10	121,28	5,35	0,28	1,20	0,25	39,2
12	121,19	5,26	0,26	1,20	0,25	39,2
14	121,12	5,19	0,24	1,20	0,25	42
16	121,04	5,11	0,23	1,20	0,25	40,8
18	121	5,07	0,22	1,20	0,25	39,7
20	120,97	5,04	0,21	1,20	0,25	40
25	120,89	4,96	0,19	1,20	0,25	41,1
30	120,85	4,92	0,18	1,20	0,25	40,9
35	120,81	4,88	0,17	1,20	0,25	40,4
45	120,76	4,83	0,16	1,20	0,25	41,2
60	120,7	4,77	0,14	1,20	0,25	40,7
75	120,66	4,73	0,13	1,20	0,25	40,2
90	120,63	4,7	0,13	1,20	0,25	40,2
120	120,61	4,68	0,12	1,20	0,25	40,7
150	120,58	4,65	0,12	1,21	0,26	40,4
180	120,57	4,64	0,11	1,21	0,26	40,3
200	120,56	4,63	0,11	1,20	0,25	39,9
220	120,56	4,63	0,11	1,20	0,25	

Fonte: Acervo pessoal



**Quadro C3** – Medidas de secagem para temperatura de 40°C, experimento 2

t (min)	m (g)	m sem (g)	Umidade	Voltagem	Velocidade (m/s)	T (°C)
0	124,51	8,65	1,06	1,25	0,31	38
1	123,71	7,85	0,87	1,20	0,25	42
2	123,07	7,21	0,72	1,21	0,26	39,1
3	122,62	6,76	0,61	1,21	0,26	38,4
4	122,24	6,38	0,52	1,21	0,26	39,7
5	121,96	6,1	0,45	1,21	0,26	41
6	121,74	5,88	0,40	1,21	0,26	40,6
7	121,6	5,74	0,37	1,20	0,26	39,2
8	121,49	5,63	0,34	1,20	0,26	39,4
9	121,4	5,54	0,32	1,20	0,25	40,6
10	121,34	5,48	0,31	1,20	0,25	40,1
11	121,28	5,42	0,29	1,20	0,25	39,5
13	121,2	5,34	0,27	1,20	0,25	39,9
15	121,14	5,28	0,26	1,20	0,25	39,4
17	121,08	5,22	0,24	1,20	0,25	39,6
20	121,01	5,15	0,23	1,20	0,25	39,9
25	120,94	5,08	0,21	1,20	0,25	39,2
30	120,89	5,03	0,20	1,20	0,25	41,2
35	120,84	4,98	0,19	1,20	0,25	39,4
40	120,79	4,93	0,18	1,20	0,25	40,76
45	120,76	4,9	0,17	1,20	0,25	40,6
60	120,7	4,84	0,15	1,20	0,25	40,5
75	120,66	4,8	0,14	1,20	0,25	40,7
90	120,63	4,77	0,14	1,20	0,25	41,3
120	120,6	4,74	0,13	1,20	0,25	40,55
150	120,58	4,72	0,13	1,20	0,25	40,9
180	120,56	4,7	0,12	1,21	0,26	41
200	120,56	4,7	0,12	1,21	0,26	40,67

Fonte: Acervo pessoal

**Quadro C4** – Medidas de secagem para temperatura de 40°C, experimento 3

t (min)	m (g)	m sem (g)	Umidade	Voltagem	Velocidade (m/s)	T (°C)
0	125,20	9,31	1,043	1,19	0,24	39,7
1	124,32	8,43	0,850	1,20	0,25	39,4
2	123,70	7,81	0,714	1,20	0,25	39,6
3	123,20	7,31	0,604	1,20	0,25	39,6
4	122,80	6,91	0,517	1,20	0,25	39,7
5	122,47	6,58	0,444	1,20	0,25	39,8
6	122,24	6,35	0,394	1,20	0,25	39,9
7	122,06	6,17	0,354	1,20	0,25	39,6
8	121,91	6,02	0,321	1,20	0,25	39,7
9	121,81	5,92	0,299	1,20	0,25	39,99
10	121,72	5,83	0,280	1,20	0,25	40,2
11	121,66	5,77	0,266	1,20	0,25	40,1
13	121,55	5,66	0,242	1,20	0,25	39,9
15	121,48	5,59	0,227	1,20	0,25	39,7
18	121,40	5,51	0,209	1,20	0,25	39,8
21	121,33	5,44	0,194	1,20	0,25	39,6
25	121,25	5,36	0,176	1,20	0,25	40,1
30	121,19	5,3	0,163	1,20	0,25	39,9
35	121,15	5,26	0,154	1,20	0,25	40,5
45	121,09	5,2	0,141	1,20	0,25	40,3
60	121,03	5,14	0,128	1,20	0,25	39,8
75	120,99	5,1	0,119	1,20	0,25	39,8
90	120,95	5,06	0,111	1,20	0,25	39,6
120	120,93	5,04	0,106	1,20	0,25	39,8
150	120,90	5,01	0,100	1,20	0,25	39,3
180	120,89	5	0,097	1,20	0,25	39,6
200	120,89	5	0,097	1,20	0,25	39,6

Fonte: Acervo pessoal

**Quadro C5** – Medidas de secagem para temperatura de 50°C, experimento 1

t (min)	m (g)	m sem (g)	Umidade	Voltagem	Velocidade (m/s)	T (°C)
0	124,85	8,89	1,04	1,21	0,26	48,0
1	123,62	7,66	0,75	1,20	0,25	47,7
2	122,76	6,80	0,56	1,20	0,25	49,9
3	122,16	6,20	0,42	1,20	0,25	49,0
4	121,79	5,83	0,34	1,20	0,25	50,0
5	121,6	5,64	0,29	1,20	0,25	49,5
6	121,44	5,48	0,26	1,20	0,25	49,9
7	121,34	5,38	0,23	1,20	0,25	49,6
8	121,26	5,30	0,21	1,20	0,25	50,6
9	121,19	5,23	0,20	1,20	0,25	50,1
10	121,13	5,17	0,18	1,20	0,25	50,9
12	121,05	5,09	0,17	1,20	0,25	51,0
14	120,99	5,03	0,15	1,20	0,25	50,9
16	120,94	4,98	0,14	1,20	0,25	50,7
18	120,89	4,93	0,13	1,20	0,25	51,5
20	120,86	4,90	0,12	1,20	0,25	50,9
23	120,81	4,85	0,11	1,20	0,25	50,6
26	120,77	4,81	0,10	1,20	0,25	51,9
30	120,73	4,77	0,09	1,20	0,25	50,9
35	120,7	4,74	0,09	1,20	0,25	51,3
45	120,65	4,69	0,07	1,20	0,25	51,1
60	120,6	4,64	0,06	1,20	0,25	52,1
75	120,58	4,62	0,06	1,20	0,25	51,1
90	120,56	4,60	0,05	1,20	0,25	51,0
120	120,56	4,60	0,05	1,20	0,25	50,9

Fonte: Acervo pessoal

**Quadro C6 – Medidas de secagem para temperatura de 50°C, experimento 2**

t (min)	m (g)	m sem (g)	Umidade	Voltagem	Velocidade (m/s)	T (°C)
0	124,33	8,42	1,04	1,20	0,25	50,3
1	123,14	7,23	0,76	1,20	0,25	50,0
2	122,29	6,38	0,55	1,20	0,25	50,2
3	121,77	5,86	0,42	1,20	0,25	50,7
4	121,46	5,55	0,35	1,20	0,25	50,4
5	121,28	5,37	0,30	1,20	0,25	50,6
6	121,16	5,25	0,27	1,20	0,25	50,2
7	121,06	5,15	0,25	1,20	0,25	49,9
8	120,97	5,06	0,23	1,20	0,25	51,0
9	120,92	5,01	0,22	1,20	0,25	50,7
10	120,87	4,96	0,20	1,20	0,25	49,8
12	120,79	4,88	0,18	1,20	0,25	50,1
14	120,74	4,83	0,17	1,20	0,25	50,8
17	120,68	4,77	0,16	1,20	0,25	49,7
20	120,62	4,71	0,14	1,20	0,25	49,8
23	120,59	4,68	0,14	1,20	0,25	49,8
26	120,56	4,65	0,13	1,20	0,25	50,3
30	120,52	4,61	0,12	1,20	0,25	50,0
35	120,50	4,59	0,11	1,20	0,25	50,3
45	120,46	4,55	0,10	1,20	0,25	49,9
60	120,42	4,51	0,09	1,20	0,25	50,7
75	120,39	4,48	0,09	1,20	0,25	50,0
90	120,37	4,46	0,08	1,20	0,25	49,8
105	120,36	4,45	0,08	1,20	0,25	49,9
120	120,35	4,44	0,08	1,20	0,25	51,4
135	120,35	4,44	0,08	1,20	0,25	51,0

Fonte: Acervo pessoal

**Quadro C7 – Medidas de secagem para temperatura de 50°C, experimento 3**

t (min)	m (g)	m sem (g)	Umidade	Voltagem	Velocidade (m/s)	T (°C)
0	125,05	9,12	1,06	1,20	0,25	49,0
1	123,89	7,96	0,80	1,20	0,25	49,0
2	122,98	7,05	0,59	1,20	0,25	49,0
3	122,33	6,40	0,44	1,20	0,25	48,6
4	121,92	5,99	0,35	1,20	0,25	49,0
5	121,67	5,74	0,29	1,20	0,25	48,0
6	121,50	5,57	0,26	1,20	0,25	49,0
7	121,39	5,46	0,23	1,20	0,25	48,3
8	121,30	5,37	0,21	1,20	0,25	47,7
9	121,23	5,30	0,20	1,20	0,25	48,0
10	121,17	5,24	0,18	1,20	0,25	48,1
12	121,08	5,15	0,16	1,20	0,25	47,9
14	121,01	5,08	0,15	1,20	0,25	49,6
16	120,94	5,01	0,13	1,20	0,25	49,2
18	120,90	4,97	0,12	1,20	0,25	49,9
20	120,87	4,94	0,11	1,20	0,25	49,1
22	120,83	4,90	0,11	1,20	0,25	49,2
24	120,80	4,87	0,10	1,20	0,25	48,0
27	120,77	4,84	0,09	1,20	0,25	49,1
30	120,73	4,80	0,08	1,20	0,25	49,2
35	120,70	4,77	0,08	1,20	0,25	48,9
45	120,65	4,72	0,06	1,20	0,25	49,1
60	120,61	4,68	0,06	1,20	0,25	50,2
75	120,58	4,65	0,05	1,20	0,25	49,9
90	120,57	4,64	0,05	1,20	0,25	50,8
105	120,55	4,62	0,04	1,20	0,25	50,6

Fonte: Acervo pessoal