

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

PEDRO GOBBO FEDRIZZI

**ANÁLISE DO IMPACTO TÉRMICO E MECÂNICO NA
SECAGEM DE SEMENTES DE MARACUJÁ**

SÃO CARLOS -SP
2024

PEDRO GOBBO FEDRIZZI

**ANÁLISE DO IMPACTO TÉRMICO E MECÂNICO NA SECAGEM DE SEMENTES DE
MARACUJÁ**

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química
da Universidade Federal de São Carlos
para obtenção do Bacharelado em
Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Dias Maia

SÃO CARLOS -SP
2024

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia de 2024 perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Dias Maia, DEQ/UFSCar

Convidada: Profa. Mra. Thalyne de Almeida Ferreira Rocha, DEQ/UFSCar

Professora da Disciplina: Profa. Dra. Adriana Paula Ferreira Palhares, DEQ/UFSCar

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer minha família por todo o suporte durante esses anos de graduação. Minha mãe, Samanta, pela ajuda, paciência e ser meu exemplo na vida acadêmica; meu pai, Ricardo, pelos ensinamentos e sempre estar comigo quando preciso; meu irmão, Lucas, pela amizade e minha avó, Herminia, pelas comidas e ajuda. Minha namorada, Ornella, obrigado por tudo que fez por mim, por ser minha inspiração e meu porto seguro.

Gostaria de agradecer o DEQ/UFSCAR e seus professores pelos ensinamentos e suporte durante esses anos que me fizeram melhor como pessoa e profissional. Em especial ao meu orientador Gustavo, obrigado pela enorme paciência, pelos ensinamentos e amizade durante esses 3 anos trabalhando juntos.

Aos meus amigos de São Carlos, em especial Diego, Giovanna, Luanna e Lucas, obrigado pela companhia, amizade, risadas, viagens e de fazer dessa cidade minha casa durante esses anos, que essa amizade dure para sempre.

Agradeço aos meus amigos da minha cidade natal, Piracicaba, por sempre estarem comigo sempre que precisei, em especial à Alfredo, Felipe, Gustavo, Henrique, Leonardo, Matheus, Marina, Stefano e Thiago.

Espero que essa pequena homenagem consiga retribuir tudo o que fizeram por mim.

RESUMO

O Brasil lidera a produção global de maracujá, uma fruta rica em vitamina C, magnésio, potássio e vitamina A. Além disso, seu óleo apresenta propriedades antioxidantes, isso a torna valiosa tanto na indústria alimentícia como na farmacêutica. As sementes são preferencialmente colhidas em sua maturidade fisiológica, com máximo poder germinativo, junto ao excesso de umidade, o hilo (onde ocorre o fluxo de água) da semente pode ser danificado, possibilitando contaminação microbiológica, como infecções fúngicas. Desse modo, a secagem é essencial para manter as qualidades fisiológicas da semente. Neste trabalho foram realizadas 10 secagens de sementes de maracujá, em leito fixo e fluidizado, a fim de obter as melhores condições de secagem para as sementes. Cada secagem ocorreu com uma massa inicial de sementes de 50 gramas e foi finalizada quando a amostra atingiu sua umidade de equilíbrio. Foram analisadas as variáveis temperatura (40,9; 45,0; 55,0; 65,0 e 69,1° C) e vazão de ar (0,8; 1,7; 3,9 e 7,1 m³/min). As sementes secas também serão submetidas a uma caracterização física por imagem. Calculou-se a difusividade pela segunda lei de Fick para cada experimento e, as curvas de secagem foram ajustadas pelos modelos de secagem Henderson e Pabis, Newton, Page, Overhults, dois termos e exponencial de dois a fim de se determinar as condições em que seus coeficientes de ajuste apresentam valores máximos. As sementes apresentaram boa homogeneidade entre si. Na secagem, o leito fluidizado obteve melhores resultados em relação ao fixo e a temperatura teve mais influência do que a vazão no tempo de secagem. O modelo de difusividade utilizado não se ajustou bem aos dados de secagem e o modelo de dois termos foi o que obteve melhores ajustes.

Palavras-chave: *Passiflora edulis f. flavicarpa*; secagem; leito fixo; leito fluidizado; curvas de secagem.

ABSTRACT

Brazil leads the global production of passion fruit, a fruit rich in vitamin C, magnesium, potassium, and vitamin A. Additionally, its oil has antioxidant properties, making it valuable in both the food and pharmaceutical industries. The seeds are preferably harvested at their physiological maturity, with maximum germinative power. However, when there is excess moisture, the hilum (where water flow occurs) of the seed can be damaged, allowing microbiological contamination, such as fungal infections. Thus, drying is essential to maintain the physiological qualities of the seed. In this study, 10 drying processes of passion fruit seeds were carried out, using both fixed and fluidized bed drying methods, to determine the best drying conditions for the seeds. Each drying process began with an initial seed mass of 50 grams and was completed when the sample reached its equilibrium moisture content. The variables analyzed were temperature (40,9; 45,0; 55,0; 65,0 and 69,1°C) and air flow rate (0,8; 1,7; 3,9 and 7,1 m³/min). The dried seeds were also subjected to a physical characterization by imaging. Diffusivity was calculated using Fick's second law for each experiment, and the drying curves were fitted using the Henderson and Pabis, Newton, Page, Overhults, two-term, and exponential models to determine the conditions in which their adjustment coefficients presented maximum values. The seeds showed good homogeneity among themselves. In drying, the fluidized bed yielded better results compared to the fixed bed, and temperature had a greater influence than air flow rate on drying time. The diffusivity model used did not fit the drying data well, and the two-term model provided the best fits.

Keywords: *Passiflora edulis f. flavicarpa*; drying; fixed bed; fluidized bed; drying curves.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Produção brasileira de maracujá nos anos de 1988 a 2019.....	3
Figura 2 - Curva característica de um leiteo fluidizado.....	14
Figura 3 - Microtomografia de semente de Jequitibá-branco em baixa umidade.....	18
Figura 4 - Desenho esquemático de um esferoide para as medidas de circularidade.....	23
Figura 5 - Representação esquemática do leiteo utilizado.....	24
Figura 6 - Sistema de adaptação e fixação da célula de secagem (a) sistema de vedação e adaptação, (b) prendedor e (c) indicação da área que será fixada.....	25
Figura 7 - Sementes utilizadas para a caracterização física.....	29
Figura 8 - Histograma e distribuição populacional do diâmetro de Feret mínimo, máximo e médio das sementes de maracujá.....	30
Figura 9 - Histograma e distribuição populacional da circularidade das sementes de maracujá.....	31
Figura 10 - Histograma e distribuição populacional da área das sementes de maracujá.....	31
Figura 11 – Cinéticas de secagem.....	32
Figura 12 - Curvas de taxa de secagem em função da umidade relativa.	34
Figura 13 – Curvas de cinética de secagem linearizadas.....	35
Quadro 1 - a) Imagem projetada de uma partícula com os quadros formados pelas retas tangentes ao contorno; b) Área e perímetro projetados digitalmente.....	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção em cada país de maracujá.....	4
Tabela 2 - Perfil de ácidos graxos do óleo da semente de maracujá.....	6
Tabela 3 - Parâmetros utilizados para cada experimento de secagem.....	26
Tabela 4 - Modelos de secagem.....	27
Tabela 5 - Coeficientes de difusividade efetiva e análise estatística.....	36
Tabela 6 - Parâmetros da análise estatística para o ajuste dos modelos de secagem.....	38
Tabela 7 - Parâmetros da análise estatística para o ajuste dos modelos de secagem.....	38
Tabela 8 - Coeficientes de secagem para o modelo de Henderson e Pabis.....	39
Tabela 9 - Coeficientes de secagem para o modelo de Newton.....	39
Tabela 10 - Coeficientes de secagem para o modelo de Page.....	39
Tabela 11 - Coeficientes de secagem para o modelo de Overhults.....	40
Tabela 12 - Coeficientes de secagem para o modelo exponencial de dois termos.....	41
Tabela 13 - Coeficientes de secagem para o modelo de dois termos.....	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Aspectos gerais sobre o maracujá amarelo	3
2.1.1 Histórico e mercado do maracujá amarelo	3
2.1.2 Usos do maracujá	5
2.1.3 Germinação da semente de maracujá	7
2.2 Fundamentos de secagem	8
2.3 Fluidização	13
2.3.1 Caracterização fluidodinâmica leitos fluidizados	14
2.3.2 Secagem em leito fluidizado	15
2.4 Umidade de equilíbrio	16
2.5 Caracterização física das sementes	17
2.6 Secagem de sementes de maracujá	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 Obtenção dos materiais	21
3.2 Caracterização das sementes	21
3.3 Secagem	23
3.3.1 - Unidade de secagem	23
3.3.2. Parâmetros de operação	25
3.3.3 Cinética de secagem	26
3.4 Análise estatística	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1. Caracterização das sementes	29
4.2 Secagem	32
4.2.1. Curvas de cinética e taxa e secagem	32
4.2.2. Ajuste do modelo teórico de difusividade	35
4.2.3 Curvas de secagem ajustadas aos modelos empíricos	37
4.2.4 Observações durante a secagem	42
5. CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS	44
APÊNDICE	50

Dados de secagem do experimento 1	50
Dados de secagem do experimento 2	51
Dados de secagem do experimento 3	52
Dados de secagem do experimento 4	53
Dados de secagem do experimento 5	54
Dados de secagem do experimento 6	55
Dados de secagem do experimento 7	56
Dados de secagem do experimento 8	57
Dados de secagem do experimento 9	58
Dados de secagem do experimento 10	59

1. INTRODUÇÃO

O maracujá amarelo possui diversos usos, sendo o principal o suco da sua polpa e outros menos explorados como a utilização da sua casca e semente para consumo e produção de bens de consumo (ZERAİK *et al.*, 2010). Entretanto, para que as suas sementes possam ser comercializadas para produção da fruta, elas devem passar por um processo de secagem para diminuir sua umidade e reduzir a chance de infecção.

O processo de secagem de particulados é complexo, ele depende das características físicas da partícula e das condições de secagem que são aplicadas a elas. Desse modo, se vê necessária uma caracterização física da partícula para analisar como suas dimensões influenciam a difusividade da água de dentro para fora dela e, um estudo de diversos parâmetros de secagem, variando a temperatura e vazão do ar de secagem e, principalmente, o tipo de leito que é utilizado, comparando suas vantagens e desvantagens em relação a partícula específica. Bem como ajustar modelos teóricos e semi-teóricos de secagem para a secagem da partícula em específico.

Estudos sobre a secagem de sementes de maracujá amarelo foram analisados (ARAÚJO *et al.*, 2020; CARLESSO *et al.*, 2005; CARLESSO *et al.*, 2007; CARLESSO *et al.*, 2008; OLIVEIRA *et al.*, 2013) porém ainda se observa a necessidade de uma análise maior sobre as condições de secagem, principalmente comparando diferentes tipos de leito de secagem e seus impactos nas sementes de maracujá.

Dessa forma, o presente trabalho visa construir no estudo da secagem de sementes de maracujá amarelo (*P. edulis f. flavicarpa Degener*) com os seguintes objetivos:

- Caracterização física das sementes de maracujá amarelo, avaliando diâmetro de Feret médio, circularidade, perímetro, área e espessura;
- Determinação e análise de curvas de secagem e taxa de secagem com temperaturas variando entre 40,9 e 69,1 °C e vazões variando entre 0,8 e 7,1 m³/min, variando também o tipo de leito: fixo, fluidizado suave e fluidizado;

- Determinação da difusividade efetiva de umidade das sementes de maracujá amarelo de todos os experimentos através da Lei de difusividade de Fick;
- Ajuste e análise estatística de modelos de secagem: Henderson e Pabis, Newton, Page, Overhults, dois termos e exponencial de dois termos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

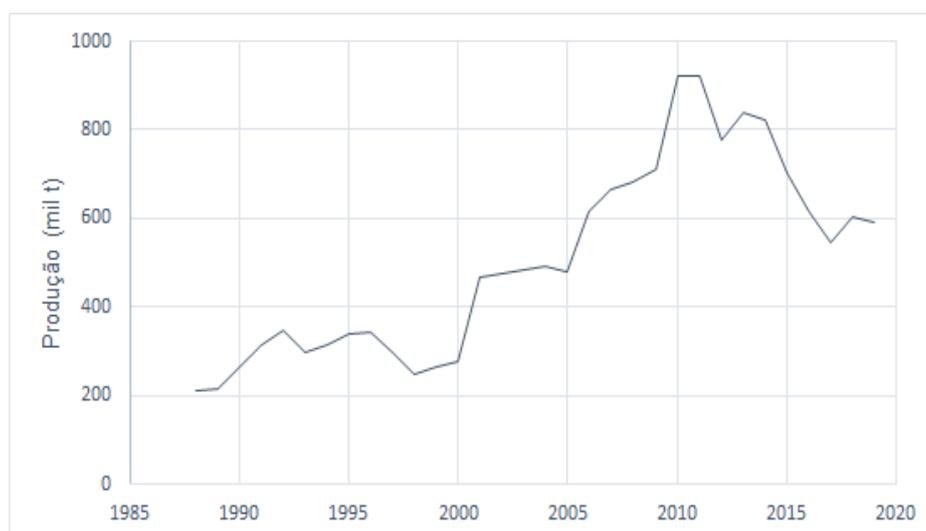
2.1 Aspectos gerais sobre o maracujá amarelo

2.1.1 Histórico e mercado do maracujá amarelo

A família *Passifloraceae* possui cerca de 500 espécies, sendo a mais importante a de maracujá (*Passiflora edulis*), a qual pode ser dividida em duas formas distintas, o maracujá roxo (*P. edulis f. edulis*) e o amarelo (*P. edulis f. flavicarpa Degener*) (VANDERPLANK, 1996). O maracujá amarelo é uma mutação da forma roxa ou um híbrido entre *P. edulis f. edulis* e outra espécie parecida, sua origem é provavelmente a região amazônica (MORTON, 1987). Essa espécie, em relação ao maracujá roxo, possui um crescimento mais rápido, melhor resistência a fungos e maior rendimento do fruto e da polpa (RODRIGUEZ-AMAYA, 2003).

A produção do maracujá no Brasil é relativamente recente, começou em meados da década de 80 e com uma grande expansão nas décadas seguintes devido a boa rentabilidade, como pode ser observado na Figura 1. Segundo o IBGE, em 2019 o maracujá foi a 12ª fruta mais produzida, porém com a 9ª maior área plantada, isso se dá pelo maracujá possuir um rendimento baixo, 14 toneladas/ha/ano, entretanto, novas espécies híbridas da fruta podem chegar a um rendimento de 50 toneladas/ha/ano (MELETTI, 2011).

Figura 1 - Produção brasileira de maracujá nos anos de 1988 a 2019



Fonte: IBGE, 2019.

Atualmente, o Brasil é o maior produtor e consumidor mundial do maracujá amarelo, com cerca de 50 a 60% da produção (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Entretanto, a produção brasileira é focada no mercado interno, grande parte da exportação da fruta é realizada por outros países tropicais, como Equador, Colômbia e Peru (WIJERATNAM, 2016). A produção de cada país pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 - Produção de maracujá por continente e país.

PAÍS	TONELADAS x 1000
Ásia	165,8
Indonésia	127,4
Israel	1,1
Malásia	5
Paquistão	0,2
Filipinas	0,6
Sri Lanka	0,5
Tailândia	10
Vietnã	21
África	35,3
Quênia	32,8
África do Sul	0,4
Zimbábue	2,1
América Central e Caribe	4,8
República Dominicana	4,8
América do Sul	1072,5
Brasil	563,7
Colômbia	93,7
Equador	394,1
Peru	15,7
Suriname	0,3
Venezuela	5
Oceania	0,1
Nova Zelândia	0,1

Fonte: WIJERATNAM, 2016.

Antigamente, de 80 a 90% produção mundial de maracujá era do Havaí, Fiji, Quênia, Austrália, África do Sul, Papua-Nova Guiné e Nova Zelândia; entretanto após a década de 80, o cerne da produção mudou para o Brasil, Equador, Indonésia e Colômbia (ISAACS, 2009 apud SCHOTSMANS *et al.*, 2011).

2.1.2 Usos do maracujá

O maracujá pode ser comercializado de várias maneiras, as principais no Brasil são: *in natura*, a qual corresponde a 60% do comércio, produção de sucos, utilizando a polpa, ou extração do óleo da semente do fruto. Contudo, ainda que o óleo seja o menos comercializado, a sua utilização na indústria alimentícia, cosmética e farmacêutica pode gerar um retorno financeiro maior que a comercialização do suco da fruta (BASTOS, 2014). No mundo, mais de 95% da produção é do maracujá amarelo para a extração de suco, por ser o derivado da fruta com maior mercado para exportação (WIJERATNAM, 2016).

A polpa é a parte mais consumida do maracujá, seja pelo processamento da fruta, para a produção de suco, ou com a fruta fresca, para o consumo próprio e utilização em doces (SCHOTSMANS *et al.*, 2011). Segundo a USDA (2019), o suco da espécie amarela é rico em vitamina C (18,2 mg/100g), magnésio (17 mg/100g), potássio (278 mg/100g) e vitamina A (2410 IU/100g).

Por outro lado, segundo OLIVEIRA *et al.* (2002), os outros subprodutos do maracujá (casca e sementes) são mal aproveitados e representam em torno de 70% do peso do fruto, desse modo, geram toneladas de resíduos agroindustriais. A casca e a semente são ricas em proteínas e fibras solúveis, compostas principalmente de celulose, substâncias pécticas e hemicelulose (CHAU & HUANG, 2004; YAPO & KOFFI, 2006).

Uma dieta adequada de fibras solúveis está relacionada a alguns benefícios à saúde, como melhora da função gastrointestinal e diminuição do colesterol, reduzindo o risco de doenças cardiovasculares, câncer de cólon e obesidade (MARLETT, 2001; SLAVIN, 2001).

Os subprodutos do maracujá podem ser utilizados na alimentação de frangos para corte (TOGASHI *et al.*, 2007) e de bovinos, aumentando a produção de leite e diminuindo problemas digestivos (PAIVA, 2008 apud ZERAIK *et al.*, 2010).

A casca para alimentação humana é, geralmente, utilizada na produção da farinha de maracujá, a qual pode substituir hidrocoloides comerciais para produção de cremes, doces e sobremesas geladas (COELHO *et al.*, 2016). Além disso, como a farinha de maracujá é rica em fibras solúveis, ela pode ajudar a reduzir o nível de colesterol e triglicerídeos em pacientes com síndrome de lipodistrofia (redistribuição da gordura corporal) causada pela terapia antiretroviral para tratamento de HIV (MARQUES *et al.*, 2016).

A semente do maracujá, segundo Zeraik *et al* (2010, apud TOCCHINI *et al* 1994), é uma fonte rica em carboidratos, proteínas, minerais e óleos. O óleo é obtido através do farelo da semente, correspondendo a 25,7% da massa do produto. Ferrari *et al.* (2004) determinou que, o óleo da semente possui um alto teor de ácidos graxos, sendo 87,54% insaturados, desse modo, trazem benefícios à saúde como aumento do HDL (“*High Density Lipoproteins*”) e diminuição do LDL (“*Low Density Lipoprotein*”). A Tabela 2 apresenta o perfil de ácidos graxos do óleo da semente de maracujá amarelo.

Tabela 2 - Perfil de ácidos graxos do óleo da semente de maracujá

ÁCIDO GRAXO	QUANTIDADE NO ÓLEO DE SEMENTE DE MARACUJÁ (%)
C14:0 (mirístico)	0,08
C16:0 (palmítico)	12,04
C18:0 (esteárico)	tr*
C18:1 (oleico)	18,06
C18:2 (linoleico)	68,79
C18:3 (linolênico)	0,69
Σ saturados	12,46
Σ insaturados	87,54

Fonte: FERRARI *et al.* 2004

Além disso, o óleo de maracujá é uma rica fonte de ácidos fenólicos, principalmente ácido rosmarínico, os quais possuem um grande potencial antioxidante, protegendo o corpo dos danos causados pelo excesso de radicais livres (LOURITH & KANLAYAVATTANAKUL, 2020). Os radicais livres são moléculas produzidas pelo organismo com elétrons não pareados, se tornando instáveis e reativas. O metabolismo celular naturalmente libera radicais livres como um

mecanismo de autodefesa para neutralizar as moléculas reativas; entretanto, esse mecanismo diminui com a idade e hábitos não saudáveis (como excesso de exercício físico e má alimentação), causando estresse oxidativo (LOURITH & KANLAYAVATTANAKUL, 2020; HALLIWELL & GUTTERIDGE, 2015). O estresse oxidativo pode causar danos ao corpo como: problemas do sistema imunológico, aterosclerose, Alzheimer, doença cardíaca, artrite, demência e diabetes (WIJERATNAM, 2016).

A exposição a raios UV causa danos a pele, fazendo o corpo produzir enzimas metaloproteinase para reparar esses danos, entretanto, algumas dessas enzimas degradam as fibras de colágeno e elastina; os radicais livres incitam a produção dessas enzimas prejudiciais, causando o envelhecimento da pele. Dito isso, há uma crescente demanda de produtos naturais nas indústrias cosmética e farmacêutica, principalmente, em cosméticos “antienvhecimento”, ricos em antioxidantes (LOURITH & KANLAYAVATTANAKUL, 2020; WIJERATNAM, 2016). Desse modo, há um grande potencial de uso do óleo da semente de maracujá nesta indústria.

Na indústria, é comum a secagem da semente para melhor armazenamento e uso posterior. Entretanto, a secagem pode causar danos físicos em sementes, ocasionando maior sensibilidade a tratamentos químicos, maior suscetibilidade à infecção por microrganismos, menor qualidade física e tempo de armazenamento das sementes (GOMES-JUNIOR *et al.*, 2019).

2.1.3 Germinação da semente de maracujá

Os testes de germinação são realizados para determinar o potencial máximo de uma safra, análises realizadas em laboratório são mais eficazes que as em campo pois é possível controlar as condições experimentais (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2009). Com os testes pode-se analisar os impactos térmicos e mecânicos para diferentes condições de secagem.

Os testes, geralmente, são feitos em germinadores, os quais são uma câmara isolada com suportes para as sementes serem colocadas e no seu fundo é colocado a água. A principal função da germinadora é o controle de temperatura sendo que alguns modelos também controlam a umidade. As sementes devem ser envoltas por um substrato, o qual influencia a germinação dependendo das suas características físicas, capacidade de reter água, dentre outros, o substrato pode ser de papel ou

areia (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2009; NASCIMENTO *et al.*, 2003 apud GOMES *et al.*, 2016).

Para espécie botânica há substratos e condições específicas para o teste germinativo, segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2009), para o maracujá (*Passiflora edulis*) são recomendadas temperaturas entre 25 e 30°C, um tempo de contagem de 7 dias para primeira análise e 28 dias para a final, o substrato recomendado é papel plissado ou rolo de papel.

2.2 Fundamentos de secagem

As sementes são preferencialmente colhidas em sua maturidade fisiológica, com máximo poder germinativo, vigor, e peso de matéria seca; nesse ponto, em geral, possuem cerca de 30% de umidade (MIRANDA *et al.*, 1999). Junto ao excesso de umidade, o hilo (onde ocorre o fluxo de água) da semente pode ser danificado, possibilitando contaminação microbiológica, como infecções fúngicas.

A redução da umidade da semente aumenta sua durabilidade e diminui os efeitos da sazonalidade, condições essenciais para seu armazenamento e para extração do seu óleo.

A secagem pode ser simplificada em dois processos simultâneos: transferência de energia (calor) do ambiente e transferência de massa (umidade) do interior para a superfície do sólido e sua subsequente evaporação. A taxa em que os dois processos são realizados é o que governa a taxa de secagem. Entretanto esse processo é complexo, a taxa de secagem varia durante o processo, podendo ocasionar em transformações físicas (como encolhimento e expansão) ou químicas (reações alterando as propriedades físicas da amostra), comprometendo a qualidade do produto final (MUJUMDAR, 2015).

A secagem pode ser realizada de forma natural ou artificial, sendo a segunda a mais utilizada. A secagem artificial, proporciona uma maior qualidade do produto, menos mão de obra e área necessária, entretanto, requer o uso de máquinas secadoras, desse modo, um custo e quantidade de energia necessária elevada. A secagem industrial é um processo complexo, com vários tipos de secadores variando o método de transferência de calor utilizado; a seleção do tipo de secador e método de secagem são dependentes de características da amostra sólida utilizada, como resistência a impacto e calor, e qual será a utilidade do produto seco.

Como citado anteriormente, a secagem ocorre por meio de dois processos simultâneos, transferência de massa e calor, desse modo, devido a complexidade do processo, já foram desenvolvidos modelos matemáticos para analisar a secagem em diferentes amostras.

Em termos gerais, esses modelos são aplicados de dois modos: balanços de massa e energia ou sistema de equações diferenciais. O primeiro é geralmente utilizado em simulações no leito fixo, para secagem a temperaturas e velocidades de fluxo de ar baixas, resultando em uma baixa taxa de secagem. O sistema de equações diferenciais geralmente é utilizado para altas temperaturas e velocidades de fluxo de ar, para quando a temperatura do ar e do grão não estão em equilíbrio (BUCKLIN *et al.*, 2013).

Modelos baseados em equações diferenciais utilizam expressões para secagem em camada delgada, ou fina. A camada pode ser considerada fina quando não apresenta gradientes significativos de temperatura e umidade relativa, isso se dá, pois, a razão entre a temperatura na entrada e saída do leito é mínima (VIEIRA, 2012). A camada fina pode ser aplicada quando: apenas um único produto ou uma única camada é exposto ao ar de secagem; ou uma multicamada em que o estado termodinâmico (temperatura e umidade relativa) permanece constante durante o processo (KUCUK *et al.*, 2014).

Os pontos de maior importância da secagem em camada fina são na modelagem matemática do processo de secagem e na seleção das melhores condições de funcionamento para o desenvolvimento de equipamentos (ONWUDE *et al.*, 2016).

Os dois modelos que servem como base para outros empíricos e semiempíricos são o da difusividade efetiva e o modelo de Lewis (ONWUDE *et al.*, 2016). O modelo da difusividade efetiva abrange todos os fenômenos de transferência de massa na amostra. O fenômeno difusivo efetivo pode ser definido pela “segunda lei de Fick”.

Crank (1975) apresentou soluções do modelo para diferentes formas geométricas, sendo a Equação 1 para a esférica. Considerações são feitas como a umidade da superfície é constante e umidade inicial conhecida.

$$MR = \frac{X - X_0}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^2} \exp \left[- \left(\frac{i\pi}{r} \right)^2 D_{ef} t \right] \quad (1)$$

Sendo:

MR – Umidade adimensional

X – Umidade em determinado tempo t

X₀ – Umidade inicial

X_{eq} – Umidade quando atingido o equilíbrio

n – Número de termos da somatória

D_{ef} – Coeficiente de difusividade efetiva de líquido, m²/s

t – Tempo de hidratação, s

r – Raio equivalente da amostra, m

Chayjan *et al.* (2013), apresentou o modelo de difusividade efetiva de umidade de Fick para partículas com geometria de placa plana, quando o diâmetro menor da partícula é muito menor que seu diâmetro maior.

A Equação de Fick para descrever a difusividade efetiva de umidade de partículas planas segue:

$$MR = \frac{X - X_0}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i - 1)^2} \exp \left[- \frac{D_{ef} (2i - 1)^2 \pi^2 t}{4L^2} \right] \quad (2)$$

Sendo L o comprimento característico da partícula, em metros. Kinsley *et al.*, 2007 simplificou a Equação 3 considerando um longo período de secagem, resultando na Equação a seguir. A simplificação consiste no truncamento no primeiro termo da série. Os efeitos desta simplificação serão discutidos nos resultados.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[- \frac{D_{ef} \pi^2 t}{4L^2} \right] \quad (3)$$

Além disso, a Equação 4 pode ser linearizada para:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{X - X_0}{X_0 - X_{eq}}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left[\frac{D_{ef}\pi^2 t}{4L^2}\right] \quad (4)$$

Sendo a energia de ativação (E_a) expressada por uma Equação do tipo Arrhenius (BABALIS & BELESSIOTIS, 2004):

$$D_{ef} = D_0 \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right] \quad (5)$$

Para determinar a energia de ativação a Equação 5 pode ser linearizada como:

$$\ln(D_{ef}) = \ln(D_0) - \left(\frac{E_a}{R}\right)\left(\frac{1}{T}\right) \quad (6)$$

A energia de ativação é dada em (kJ/mol), R é constante universal dos gases (8,3143 kJ/mol.K), T é a temperatura absoluta do ar (K), D_0 é o fator pré-exponencial da Equação (m^2/s).

Outros modelos foram desenvolvidos para abranger também secagem em camada espessa, além da camada fina. É o proposto por Lewis (1921), também chamado de modelo de Newton, o qual sugere que a taxa de variação da umidade seja proporcional à diferença da umidade da amostra com sua esperada umidade no equilíbrio com o meio.

$$MR = \exp(-kt) \quad (7)$$

onde,

$$k = \alpha \exp(-b/T_f) \quad (8)$$

O modelo de Lewis foi empiricamente modificado por Page (1949) para diminuir os erros do modelo original pela adição da constante n , como pode ser observado na Equação 9. Do modelo de Page, surgiram modificações para melhorar o estudo da secagem em alimentos específicos, chamado modelo de Overhults ou Page modificado, Equação 10.

$$MR = \alpha \exp(-kt^n) \quad (9)$$

onde k é o mesmo da Equação 8.

$$MR = \exp[-(kt^n)] \quad (10)$$

onde,

$$k = \alpha \exp(\alpha + b/T_f) \quad (11)$$

Como o modelo difusivo é uma série de funções exponenciais, é possível truncar a série no primeiro termo sem que se perca muita precisão nos resultados (VIEIRA, 2012). Dessa forma, os modelos empíricos foram propostos para condições específicas como o de Henderson e Pabis (1961), inicialmente utilizado para secagem de milho, o qual é o modelo de Fick truncado no primeiro termo.

$$MR = \alpha \exp(-kt) \quad (12)$$

Já o modelo de Midilli e Kucuk é uma modificação de Henderson e Pabis (1961) com a adição de um coeficiente em função de t , o modelo possui três constantes sendo preciso na secagem de algumas frutas como maçã, abacaxi e manga (ONWUDE *et al.*, 2016).

$$MR = \alpha \exp(-kt) + bt \quad (13)$$

Outra modificação do modelo de Henderson e Pabis é o logaritmo, também simples, mas com a adição de um termo empírico.

$$MR = \alpha \exp(-kt) + c \quad (14)$$

Outro modelo, utilizado por Arabhosseini *et al.* (2009) na secagem de estragão é o modelo de dois termos, expressado por:

$$MR = \alpha \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t) \quad (15)$$

Já Akpinar, 2010 utilizou o modelo exponencial de dois termos exponencial para a modelagem da secagem de hortelã, o modelo está descrito na Equação 16.

$$MR = \alpha \exp(-kt) + (1 - b) \exp(-kct) \quad (16)$$

Entretanto, por mais que os modelos empíricos e semiempíricos citados sejam de fácil utilização, eles não são indicados para todos os processos de secagem. Processos em que há um gradiente significativo de umidade ou temperatura não podem ser simulados em camada fina. Desse modo, modelos mais complexos e abrangentes foram desenvolvidos por Thompson *et al.* (1968) (Modelo de Thompson) e Massarani e Silva Telles (1992) em camada espessa com base nos balanços de massa e energia.

O modelo de duas fases de Massarani e Silva Telles é mais preciso pois separa o sistema em uma fase sólida (matéria seca e água líquida) e uma fluida (ar e vapor de água), cada uma com sua respectiva umidade e velocidade para cada ponto do sistema. Massarani e Silva Telles (1992) faz algumas considerações: escoamento unidirecional do ar de secagem, gradientes de pressão desprezível no meio poroso, comportamento ideal da fase fluida, transporte convectivo de massa e calor entre as fases, transporte de calor e massa por condução e difusão desprezível, capacidades caloríficas constantes, transferência de calor pelas paredes do secador é desprezível; temperatura, velocidade e umidade uniformes na seção de alimentação do ar; ausência de interação de movimento entre a fase fluida e sólida (GENARO, 2021).

Entretanto, considerando a complexidade do modelo a duas fases e os objetivos propostos, optou-se por não o utilizar, considerando que sua complexidade não faria sentido no tipo de aplicação em questão e nas metas a serem alcançadas com a análise desse tipo de modelo em particular.

2.3 Fluidização

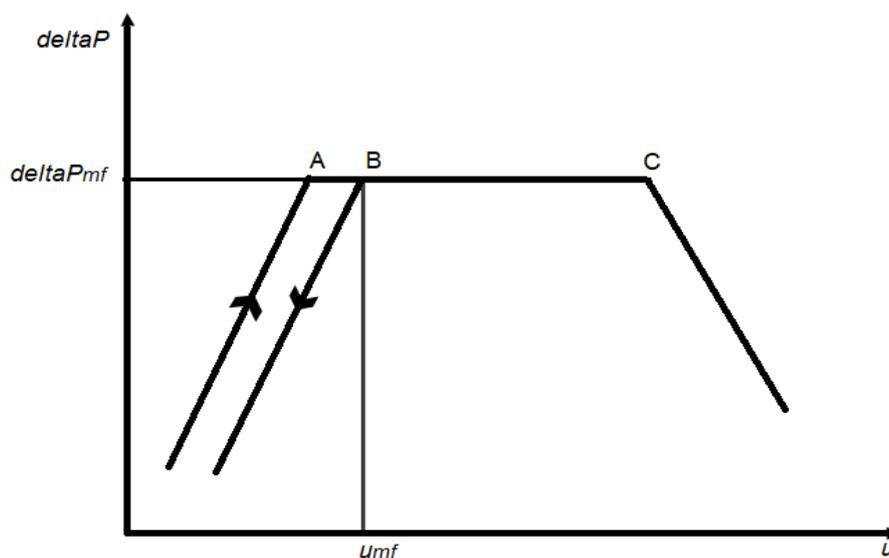
A fluidização é uma operação unitária realizada pela passagem de um líquido ou um vapor de gás por uma coluna de partículas sólidas estacionárias, conforme o aumento da velocidade do fluido, há um ponto de mínima fluidização em que as

partículas ficam suspensas pelo fluxo se comportando como líquido em vários aspectos, como a escoabilidade (WERTHER, 2007). O processo possui uma boa mistura das partículas e altas taxas de transferência de calor e massa, e é comumente utilizado no processamento de produtos químicos, alimentícios, farmacêuticos, agroquímicos, entre outros (MUJUMDAR, 2015).

2.3.1 Caracterização fluidodinâmica leitos fluidizados

A caracterização fluidodinâmica é realizada a partir da curva característica do leito, a qual relaciona a queda de pressão com a velocidade do fluido. Como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Curva característica de um leito fluidizado



Fonte: Acervo pessoal

Com o aumento da velocidade do fluxo (v), há um aumento da queda de pressão no leito até que a força de pressão do fluido se iguale à força peso do leito (MUJUMDAR, 2015). A partir do ponto A na Figura 2, o leito já pode ser considerado fluidizado, pois a queda de pressão varia pouco com o aumento de v .

Devido ao fenômeno de histerese, com o aumento da velocidade do fluxo, é alcançado um ponto (ponto B na Figura 2) em que a diminuição da velocidade acaba com a condição de fluidização, retornando ao estado de leito fixo, esse ponto é

chamado de condição mínima de fluidização e a velocidade do fluxo correspondente, velocidade mínima de fluidização, v_{mf} . Entretanto, a partir de um ponto (ponto C na Figura 2) a alta velocidade faz com que as partículas sejam arrastadas com o fluido fazendo com que a queda de pressão diminua com o aumento da velocidade. Geralmente, o leito fluidizado opera com velocidades o fluido entre 2 e 4 vezes a v_{mf} (MUJUMDAR, 2015).

Voltando para o ponto da condição de mínima fluidização, a queda de pressão de mínima fluidização pode ser calculada por dois métodos: Equação de Ergun (Equação 17) ou balanços de forças (Equação 18).

$$\frac{\Delta P_{mf}}{L_{mf}} = 150\mu \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2 \cdot v_{mf}}{\varepsilon_{mf}^2 \cdot Dp^2} + 1.75 \cdot \rho \frac{(1 - \varepsilon_{mf}) \cdot v_{mf}^2}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot Dp} \quad (17)$$

$$\frac{\Delta P_{mf}}{L_{mf}} = (\rho_p - \rho)(1 - \varepsilon_{mf})g \quad (18)$$

Para a Equação de Ergun é necessário o cálculo da velocidade de mínima fluidização a qual pode ser feita experimentalmente, como pela curva característica, ou por correlações.

Devido à dificuldade de se determinar a porosidade no leito, as correlações utilizam ajustes pelas constantes empíricas C_1 e C_2 e número de Arquimedes, Ar .

$$Re_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1 \quad (19)$$

Uma das correlações mais utilizadas, a de Wen e Yu (1966) utiliza valores de C_1 e C_2 de 33,7 e 0,0408 respectivamente; já a correlação de Richardson (1971) utiliza 25.7 para a primeira constante e 0,0365 para a segunda.

2.3.2 Secagem em leito fluidizado

Secadores de leito fluidizado são muito usados na indústria para secagem de leitos particulados e granulares úmidos, pastas e suspensões que podem ser fluidizadas. Vantagens da secagem em leito fluidizado em relação ao fixo é boa

mistura de sólidos, altas taxas de transferência de calor e massa, e fácil transporte de materiais (MUJUMDAR, 2015).

O processo de secagem desejado é o qual preserva as qualidades físicas e fisiológicas das sementes, para isso a seleção da temperatura de fluido é essencial. Temperaturas que promovem uma alta taxa de secagem também são as que podem causar danos às sementes devido à exposição. Sementes muito úmidas expostas a altas temperaturas ou a uma faixa crítica de temperaturas por longos períodos. Umidade relativa baixa do fluido de secagem também pode danificar a qualidade das sementes (NELLIST & HUGHES, 1973 apud BARROZO, MUJUMDAR e FREIRE, 2014).

Contudo, esse tipo de secador possui algumas desvantagens, como: alto consumo energético pela necessidade de suspender o leito por um vapor com uma grande queda de pressão; muito atrito entre as partículas, podendo causar granulação ou aglomeração; não é recomendado quando os solventes orgânicos precisam ser removidos durante a secagem (MUJUMDAR e DEVAHASTIN, 2003).

Geldart (1973) classificou o comportamento de partículas fluidizadas por sólidos em quatro categorias: A, aeradas e fáceis de fluidizar quando secas; B, semelhantes a areia e fáceis de fluidizar quando secas; C, finas e ultrafinas, difíceis de fluidizar pelas fortes ligações entre as partículas; D, grandes e densas, difíceis de fluidizar pela grande formação de bolhas no leito (MUJUMDAR, 2015).

Avanços foram feitos para melhorar a fluidização das partículas de categorias C e D. Segundo Daud (2008), para partículas tipo C pode ser auxiliada por vibração (mais comum), agitação, rotação e centrifugação; sendo os dois primeiros utilizados na indústria. Para melhorar a fluidização de partículas da categoria D, segundo Mujumdar (2015) pode-se utilizar o modo jorro do secador.

2.4 Umidade de equilíbrio

O teor de umidade de uma semente possui uma certa pressão de vapor, dependente da natureza da umidade, do sólido e da temperatura. Essa semente exposta a um fluxo de vapor de menor umidade “perderá” água até que a pressão de vapor do líquido dentro do sólido seja igual a pressão parcial da umidade do vapor no fluxo. Nessa condição as duas fases estão em equilíbrio e a umidade da semente é chamada de umidade de equilíbrio, a partir desse ponto, mesmo que a secagem

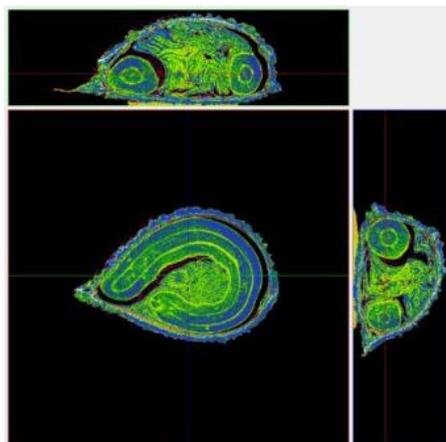
continue a umidade da semente não diminuirá se as condições do processo, temperatura e umidade relativa do ar, se mantiverem as mesmas e é possível obter a umidade mínima que o sólido pode atingir no processo. Portanto, quando é atingido o equilíbrio a semente não perderá mais umidade na secagem, seria necessário alterar os parâmetros do processo (MUJUMDAR, 2015; VIEIRA, 2012).

2.5 Caracterização física das sementes

Para todos os possíveis usos da semente de maracujá já citados, a qualidade desses produtos é diretamente dependente da qualidade física das sementes secadas. A mudança de umidade afeta as propriedades físicas e qualidade das sementes, desse modo, se vê necessário um estudo das características físicas da partícula para se obter um processo de secagem mais eficiente e que não prejudique possíveis usos futuros das sementes (ARAÚJO *et al.*, 2020). Como a secagem de alimentos é um processo complexo que envolve transferência de massa e energia em meios porosos, é preciso conhecer os aspectos físicos da amostra para que se possam verificar modelos e parametrizar o processo (GONELI, *et al.*, 2011).

Porém, uma dificuldade para a caracterização de meios particulados é a irregularidade das partículas, o que demanda de métodos específicos para que as partículas sejam descritas de forma satisfatória. A complexidade das sementes pode ser observada na Figura 3, existem diferentes camadas nas sementes e a umidade se aloca de forma não uniforme. Além disso, Camargos Filho (2022) observou que a semente de jequitibá-branco durante a secagem perde umidade de forma não homogênea, com algumas partes tendo uma maior resistência a perda de umidade.

Figura 3 - Microtomografia de semente de Jequitibá-branco em baixa umidade



Fonte: CAMARGOS FILHO, 2022

Métodos para o cálculo do diâmetro da partícula de forma estatística foram criados, como o de Feret. Este representa o valor médio para uma partícula individual através de medições de distância entre um par de retas paralelas tangentes à área projetada externa de uma partícula em uma determinada direção fixa (FREIRE, 2018).

2.6 Secagem de sementes de maracujá

Carlesso *et al.* (2005), fez o estudo da secagem de sementes de maracujá-amarelo em camada delgada em leito fixo, foi utilizado o modelo matemático proposto por Page (1949) para chegar em uma Equação específica para essas sementes. O equipamento utilizado foi um protótipo de secador de leito fixo, sendo a câmara de secagem composta por uma bandeja circular com fundo perfurado de aço inoxidável. As condições de secagem variaram a temperatura e o fluxo do ar de secagem. Foi concluído que a vazão não influenciou no tempo necessário para diminuir o teor de umidade das sementes, mas o aumento da temperatura sim. Porém, o modelo obtido através do modelo de Page não se ajustou como era desejado.

Já Carlesso *et al.* (2008), além de analisar os efeitos imediatos e latentes da temperatura de secagem, estudaram os efeitos de dois tipos de armazenamento (vidro e polietileno) na qualidade fisiológica das sementes de maracujá amarelo após 90 e 180 dias da secagem. O processo de secagem foi realizado utilizando um secador protótipo de leito fixo em camada delgada, com ar de secagem em 4 níveis

(ambiente a sombra, 30, 35 e 40 °C) e fluxo de ar constante ($48 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$). Após a secagem, parte das sementes foi armazenada em frascos de vidro e outra parte em plásticos de polietileno do tipo *Ziplock*. Foi concluído que a secagem das sementes, em todas as condições utilizadas, não afetou as suas qualidades fisiológicas e germinativas. Além disso, as sementes podem ser armazenadas em recipientes de vidro ou polietileno por períodos de 90 e 180 dias sem afetar a germinação e o vigor das plântulas.

Araújo *et al.* (2020), analisaram o impacto da secagem nas propriedades físicas das sementes de maracujá-amarelo e, avaliar a viabilidade do uso do método por imagens digitais para determinar as propriedades dimensionais das sementes em comparação a um paquímetro. O equipamento de secagem foi um secador cilíndrico de bandeja operando a temperatura de 45°C atingindo diferentes níveis de umidade, para serem realizadas caracterizações físicas das sementes através de imagens com o auxílio de um software em *Python*. Os resultados obtidos foram que o método por imagens foi satisfatório para a caracterização das sementes, além de prover resultados mais aproximados para as medidas de área projetada e circularidade, as dimensões das sementes tiveram uma variação insignificante durante a secagem, contração de 4% em relação ao volume inicial e, redução de 21% da massa total da amostra.

Oliveira *et al.* (2013) fez um estudo sobre a secagem e extração do óleo da semente de maracujá-amarelo. As sementes foram secas por um secador de convecção com um ar de secagem a 60 °C e vazão de $4.54 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e, em seguida, passaram por um moedor Marconi (Modelo T345) por 30 segundos. Com as sementes já secas e moídas, foram usados três métodos para extração do óleo (Soxhlet, ultrassom e agitador) com solventes verdes (acetona, etanol e isopropanol) e hexano, que é o solvente convencional. Foi concluído que o melhor rendimento foi com o hexano através da extração Soxhlet, de 26.4%, já usando acetona e isopropanol foi de 15%. Porém com a técnica de ultrassom e utilizando acetona como solvente, o rendimento foi de 23,8%, sendo superior ao uso do hexano com a mesma técnica, desse modo, conclui-se que o ultrassom é uma técnica de muito potencial para extração do óleo da semente de maracujá.

Carlesso *et al.* (2007), comparou 5 modelos de secagem em camada delgada: Lewis, Page, exponencial simples com dois parâmetros, exponencial simples com três parâmetros e exponencial duplo com quatro parâmetros. Foram analisadas diferentes

temperaturas (30°C, 37°C, e 40°C) e velocidades de ar (0,4 m/s, 0,8 m/s, e 1,0 m/s) para identificar as condições ideais de secagem. O estudo concluiu que o modelo que se melhor ajustou foi o modelo exponencial duplo de quatro parâmetros.

Entretanto, todos os estudos citados utilizam apenas um método de secagem, em leito fixo ou leito fluidizado. Vieira (2012), realizou um estudo sobre a secagem de grãos de linhaça marrom em leito fixo e fluidizado e comparou quatro modelos de secagem (Lewis, Page, Overhults e difusivo). O equipamento utilizado consiste em um soprador radial, o qual joga o ar para uma câmara que se encontra embaixo do leito, constituído por uma tela de aço sobre rolamentos, possibilitando a secagem ser contínua ou em batelada. As temperaturas do ar de secagem foram de 50, 65 e 80°C, já a sua vazão foi de 85% do valor da velocidade mínima de fluidização (leito fixo) e 115% (leito fluidizado). Os resultados obtidos foram que a 50°C a espessura da camada delgada foi entre 3 a 5 cm, já a 65 e 80°C foi superior a 5 cm. A altura máxima do leito era de 5 cm, desse modo, apenas a secagem a 50°C também foi realizada fora da camada delgada, o que resultou em uma taxa de secagem maior para o leito fluidizado em relação ao fixo. Em relação aos modelos de secagem, o de melhor aproximação foi o de Overhults.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo foram descritos os materiais e métodos utilizados para a caracterização física e fisiológica das sementes de *Passiflora edulis f. flavicarpa Degener* (maracujá amarelo).

As análises foram realizadas para sementes inteiras de maracujá e as secagens feitas para leito fixo e fluidizado, variando temperatura e vazão do ar, a fim de se comparar qual a condição de secagem mais eficaz para as sementes.

3.1 Obtenção dos materiais

Para cada experimento, cerca de 3 kg de maracujá amarelo maduros foram utilizados. Primeiramente, o fruto foi partido ao meio com uma faca e as sementes foram retiradas junto com a polpa da fruta e colocadas em um liquidificador, depois este foi ligado em intervalos de baixa rotação para a separação das sementes da polpa do fruto, em sequência, com o auxílio de uma peneira de propileno, as sementes foram separadas da polpa. Esse método foi realizado diversas vezes até que as sementes fossem separadas totalmente da polpa e da mucilagem, os excessos de mucilagem ainda presentes eram retirados manualmente.

Em sequência, as sementes foram lavadas e colocadas em uma fina camada sobre folhas de papel, para absorver o excesso de umidade, deixando-as na sombra. Com as sementes sem excesso de umidade, foram retiradas a mucilagem residual.

3.2 Caracterização das sementes

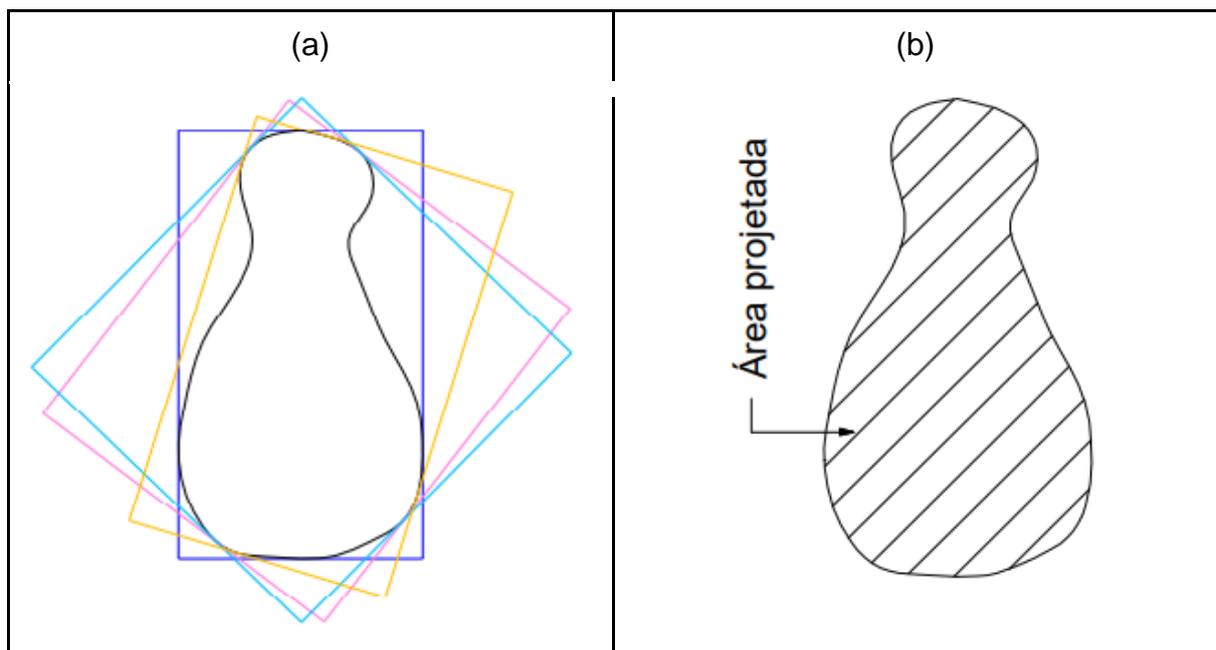
Para a análise da melhor condição de secagem é necessário conhecer as características da semente, os parâmetros analisados foram: Diâmetro de Feret, circularidade e área.

Devido a irregularidade da semente de maracujá-amarelo foi utilizada a técnica de análise por imagem para determinar esses parâmetros. O método já foi usado na literatura para outras sementes e grãos (FELIZARDO, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2016; CAMARGOS FILHO, 2022) e se mostrou eficaz devido a dificuldade de se determinar o contorno dessas partículas por meio de paquímetros e micrômetros. Como já citado, Araújo *et al.* (2020), fez a caracterização da semente de maracujá-amarelo por

imagem e com paquímetro, foi realizado um ANOVA comparando os dois métodos resultando em nenhuma diferença significativa entre eles ($P \leq 0,05$)

Para se determinar esses parâmetros, foram tiradas fotos de 100 sementes colocadas em cima de uma folha sulfite em paralelo com uma régua de 30 cm e, pela análise do software *Image Pro Plus* foi possível obter esses parâmetros para as sementes de maracujá. Os métodos de medida utilizados para cada medida estão descritos abaixo e no Quadro 1.

Quadro 1 - a) Imagem projetada de uma partícula com os quadros formados pelas retas tangentes ao contorno; b) Área e perímetro projetados digitalmente



Fonte: Felizardo, 2014; Felizardo, 2018

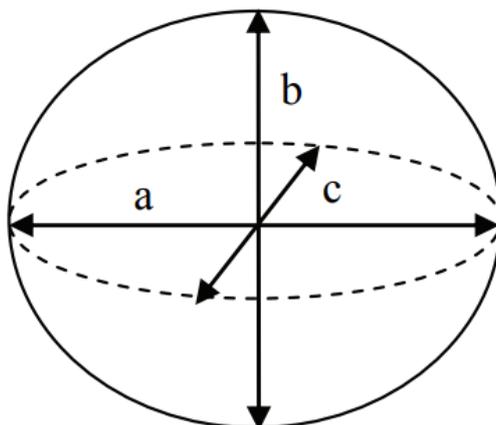
A área projetada é a área limitada pela borda da projeção da partícula e o perímetro é a medida do comprimento da borda.

Diâmetros de Feret máximo e mínimo representam, respectivamente, a maior e a menor medida possível da partícula. E o diâmetro de Feret médio é a média entre o máximo e o mínimo.

Já a circularidade (C) é quanto a partícula se assemelha a um círculo, e seu cálculo é feito através da Equação 20 e esquematizado na Figura 4.

$$C = \frac{b}{a} \quad (20)$$

Figura 4 - Desenho esquemático de um esferoide para as medidas de circularidade.



Fonte: Gonelli, 2011

3.3 Secagem

3.3.1 - Unidade de secagem

O equipamento de secagem, Figura 5, foi o mesmo utilizado em trabalhos como Corrêa (2012) e Felizardo (2014) para a secagem de sementes da espécie *Cecropia glaziovii* Snethlage. O equipamento consiste em um soprador (1), da marca ZAULI de 10 HP de potência e vazão máxima de $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, controlado por uma válvula (2) para a regulagem da vazão, a vazão foi medida por um manômetro (7) e uma placa de orifício (6), conforme a Equação 21:

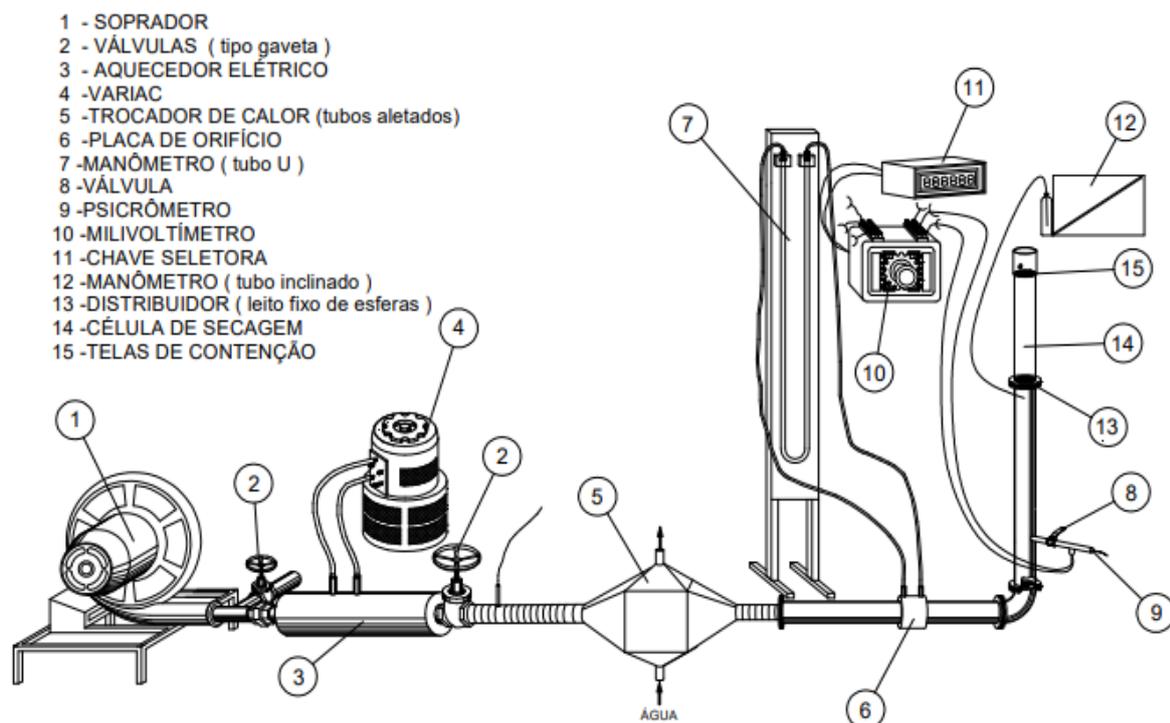
$$\dot{V}[\text{m}^3/\text{min}] = a \cdot \sqrt{\Delta h} [\text{cm coluna de água}] \quad (21)$$

Sendo, a da Equação 21 $(0,281 \pm 0,002) \text{ m}^3/(\text{min}\cdot\text{cm}^{1/2})$

O ar expelido pelo soprador passará pelo aquecedor elétrico (3), o qual, aquece o ar na temperatura definida pelo *setpoint* do controlador (4) em rampa, o resfriamento do ar ocorre no trocador de calor (5) usando água como fluido

manométrico. Em sequência, como pode haver perda de temperatura do ar até chegar nesse ponto, o ar escoa por um tubo de aço passando por uma válvula (8) conectada psicrômetro, a qual se conecta com um psicrômetro (9) em que os dois termopares tipo T foram ligados ao milivoltímetro (10) e a chave seletora (11). Depois, o ar aquecido passar por um distribuidor com um leito fixo de esferas (13) para sua homogeneização até chegar na célula de secagem (14), a qual possui uma tela de contenção (15) para limitar seu volume e a movimentação das sementes, até sair para a atmosfera (CORRÊA, 2012; FELIZARDO, 2014; FELIZARDO, 2018).

Figura 5 - Representação esquemática do leito utilizado.

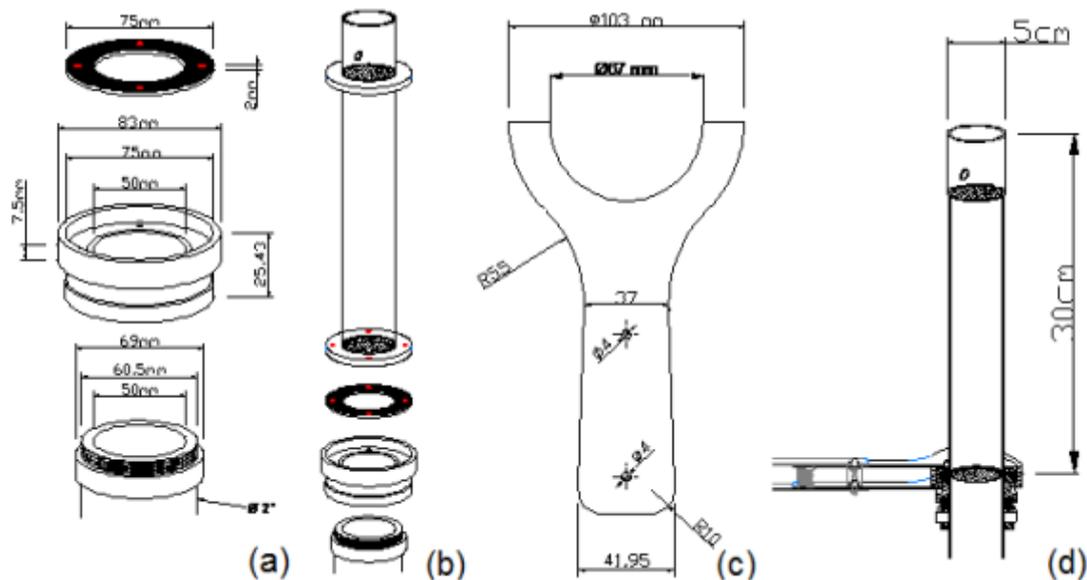


Fonte: Felizardo, 2014

A célula de secagem é de geometria cilíndrica de acrílico com dimensões de 5 cm de diâmetro e 30 cm de altura. Para que a célula fique fixa na tubulação e não aconteça vazamento do ar de secagem, foi colocado um adaptador na parte inferior da célula e um prendedor, conforme mostrado na Figura 6. O adaptador possui um diâmetro externo de 8,3 cm, altura de 2,543 cm e uma vedação de borracha para ajudar na fixação. Já o prendedor se fixa entre a célula e a tubulação, aumentando a estabilidade da célula de secagem e seu funcionamento, em que pode ser expandido,

auxilia para retirá-lo do sistema de secagem e desafixar a célula de secagem (CORRÊA, 2012).

Figura 6 - Sistema de adaptação e fixação da célula de secagem (a) sistema de vedação e adaptação, (b) prendedor e (c) indicação da área que será fixada.



Fonte: Corrêa 2012 adaptado Felizardo, 2014

3.3.2. Parâmetros de operação

Foi definido um planejamento fatorial para os testes de secagem a fim de se comparar 3 temperaturas do ar de secagem: 45, 55 e 65 °C e 3 vazões diferentes definidas pela placa de orifício: 6,00, 14,00 e 22,00. Foram realizados 10 testes em duplicata com os parâmetros mostrados na Tabela 3.

Experimentos com impacto menor ou igual a 6.00 foram realizados em leito fixo, visto que, a vazão era muito baixa para que a semente entre em estado de fluidização, desse modo, foi colocada uma pequena camada de metal em cima do leito para diminuir a movimentação das sementes e auxiliar na secagem. Já para experimentos com vazão maior que 6 foram realizados em leito fluidizado.

Para cada teste foram pesadas 50 gramas de sementes úmidas com o auxílio de uma balança analítica e um béquer e, em sequência colocadas na célula de secagem. Depois, eram ajustados os parâmetros de secagem e a célula de secagem era fixada no sistema com o auxílio do prendedor.

Durante a secagem a célula de secagem era removida em intervalos variáveis para ser pesada na balança analítica e ter sua massa anotada para determinado tempo t . Nos primeiros pontos, como a queda de umidade acontece de forma rápida, os intervalos de tempo entre as medidas eram menores, sendo os primeiros intervalos de 30 segundos. Com a variação de umidade entre as medidas diminuindo, os intervalos de tempo eram aumentados para que houvesse uma variação significativa de massa entre as medições. As medições ocorreram até que em um período de secagem de pelo menos 10 minutos não houvesse uma perda significativa de umidade das sementes, desse modo, atingindo a umidade de equilíbrio. Cada experimento foi realizado em duplicata.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados para cada experimento de secagem.

Nº do experimento	Temperatura (°C)	Vazão (cm ³ /Água)	Vazão (m ³ /min)
1	45,0	6,0	1,7
2	65,0	6,0	1,7
3	45,0	22,0	6,2
4	65,0	22,0	6,2
5	55,0	2,7	0,8
6	55,0	25,3	7,1
7	40,9	14,0	3,9
8	69,1	14,0	3,9
9	55,0	14,0	3,9
10	55,0	14,0	3,9

Fonte: Acervo pessoal

3.3.3 Cinética de secagem

Após a secagem, a umidade da semente em base seca (X_{bs}) no tempo t foi calculada pela Equação 22, sendo $m_{úmida}$ a massa da amostra de semente antes da secagem e, m_{seca} a massa da amostra de sementes após o processo de secagem.

$$X_{bs} = \frac{m_{úmida} - m_{seca}}{m_{seca}} \quad (22)$$

E a umidade adimensional (MR) foi definida pela Equação 23, sendo X_{bs0} a umidade em base seca no início da secagem e X_{eq} a umidade de equilíbrio da semente nas condições de secagem definidas.

$$MR = \frac{X_{bs} - X_{eq}}{X_{bs0} - X_{eq}} \quad (23)$$

Com isso, foi possível obter as curvas de secagem para cada um dos parâmetros, a curva é realizada com a umidade adimensional no eixo Y pelo tempo no eixo X. A umidade de equilíbrio para cada experimento foi determinada pelo ponto final de cada secagem, após um intervalo de secagem em que a umidade da amostra teve uma variação de umidade insignificante.

Com isso foi possível obter os gráficos de taxas de secagem e os de curvas de secagem. Em sequência, o modelo de difusão de Fick foi linearizado e, os modelos de secagem Henderson e Pabis, Newton, Page, Overhults, dois termos e exponencial de dois termos de secagem foram ajustados a todas as curvas de secagem através do *software Origin*TM, os modelos estão apresentados na Tabela 4. Desse modo, pode-se obter o melhor modelo de secagem e a constante de secagem, k, para cada um dos experimentos e comparar as condições de secagem e qual seria a de maior eficiência.

Tabela 4 – Modelos de secagem

Modelo	Equação
Henderson e Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = a \exp(-kt^n)$
Overhults	$MR = \exp[-(kt)^n]$
Dois termos	$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$
Exponencial de dois termos	$MR = a \exp(-kt) + (1 - b) \exp(-kct)$

Fonte: Acervo pessoal

3.4 Análise estatística

A definição do modelo que melhor se ajusta se dá pelo teste do qui-quadrado (χ^2) e o Erro Quadrático Médio (RMSE).

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{teo,i})^2}{N - Z} \quad (24)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{teo,i})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

Sendo, MR_{exp} a umidade observada no experimento, MR_{teo} a umidade calculada pelo modelo de secagem, N o número de observações e Z o número de parâmetros ajustados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos pelos métodos já apresentados.

4.1. Caracterização das sementes

Na Figura 7 são mostradas as 100 sementes utilizadas para a análise de imagem, a caracterização foi conduzida conforme explicado na metodologia.

Figura 7 - Sementes utilizadas para a caracterização física



Fonte: Acervo pessoal

Com o auxílio do software *Image Pro Plus* foram obtidos dados brutos (de todas as sementes) de diâmetro de Feret máximo, mínimo e médio, circularidade e área. Em sequência os dados foram tratados com o auxílio do software *Excel 2016*. Os histogramas feitos estão mostrados na sequência.

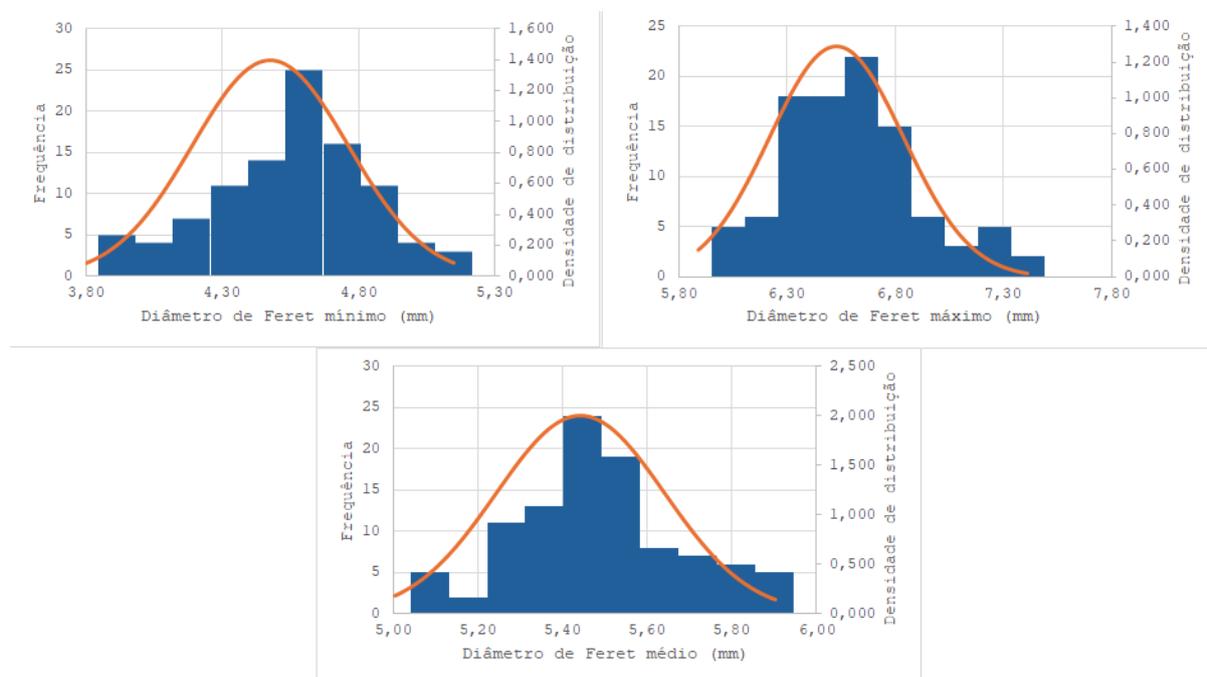
Pela Figura 8 podemos ver os resultados dos diâmetros de Feret máximo, mínimo e médio. Os valores do diâmetro de Feret mínimo, ficaram entre 3,8 e 5,2 mm e, o intervalo de com maior frequência foi entre 4,5 e 4,6 mm, sendo medido em 25 sementes, com um desvio padrão de 0,286 mm e variância de 0,082 mm². Já para o

diâmetro de Feret máximo, os valores ficaram entre 7,4 e 5,9 mm, o intervalo de maior frequência ocorreu 22 vezes, com valor de 6,5 e 6,6 mm, com desvio padrão de 0,31 mm e variância de 0,096 mm².

O diâmetro médio de Feret foi o que melhor se comportou em relação a curva de distribuição populacional, obtendo a menor variância e menor desvio padrão (0,039 mm² e 0,199 mm, respectivamente).

Analisando o diâmetro de Feret médio, o qual é o mais utilizado, pode-se notar uma pequena variação entre as sementes.

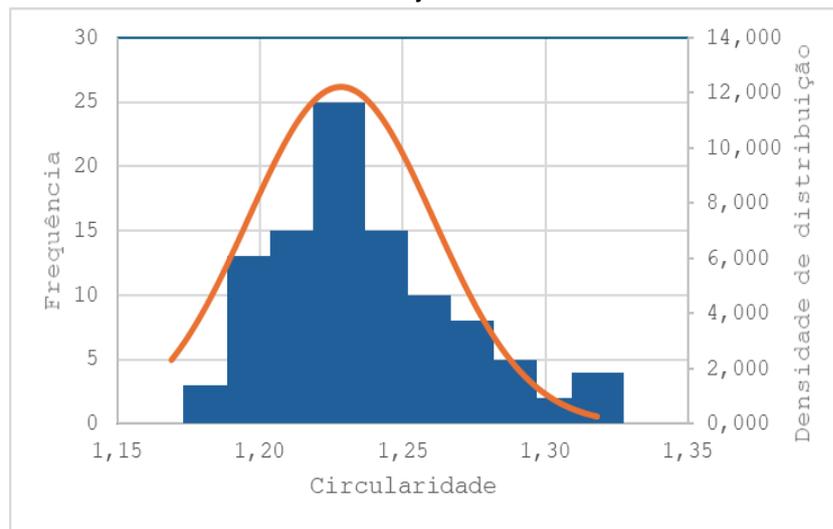
Figura 8 - Histograma e distribuição populacional do diâmetro de Feret mínimo, máximo e médio das sementes de maracujá.



Fonte: Acervo pessoal

Em relação a circularidade da partícula, podemos ver o histograma e distribuição normal na Figura 9. O valor mínimo obtido foi de 1,2 e o máximo de 1,3, a média foi de 1,22 e o intervalo com maior repetição, 25, foi entre 1,21 e 1,23. Pode-se notar que os valores obtidos tiveram pouca discrepância, com um desvio padrão de 0,033 e uma variância de 0,001, e com a média próxima a 1, apresentando boa circularidade.

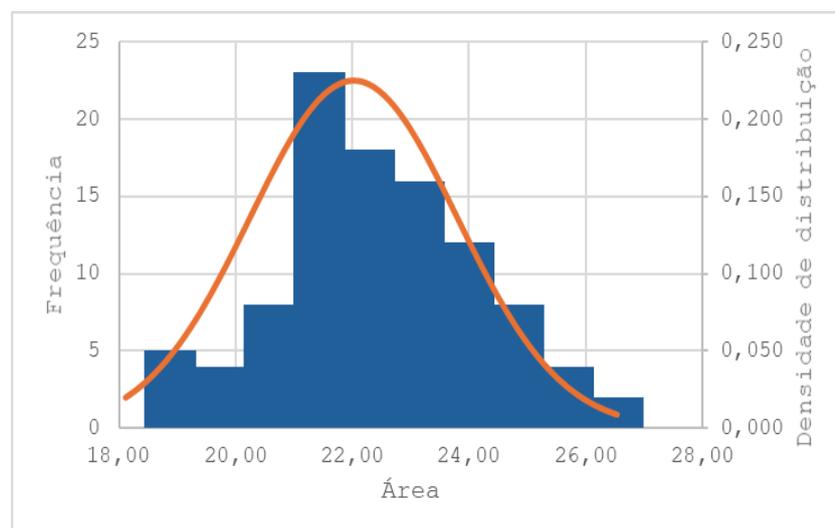
Figura 9 - Histograma e distribuição populacional da circularidade das sementes de maracujá.



Fonte: Acervo pessoal

A última análise foi da área das sementes, como pode ser observado na Figura 10, o histograma está mostrado a seguir. Determinar a área das partículas é importante para a determinação de suas densidades e volumes, o que influencia no seu empacotamento.

Figura 10 - Histograma e distribuição populacional da área das sementes de maracujá.



Fonte: Acervo pessoal

O menor valor obtido foi de 18,0 mm², o maior 26,5 mm² e a média 22,0 mm², o desvio padrão foi de 1,8 mm² e a variância 3,1 mm⁴. A área, como pode ser

observado pelos valores e pelo histograma, foi a medida que mais obteve variação, isso ocorreu devido a irregularidade das partículas, seja por algum excesso de mucilagem que restou na semente ou por algumas sementes não estarem totalmente maduras. Essa diferença nas áreas pode afetar a secagem, visto que no início a secagem é comandada pela difusão da umidade superficial.

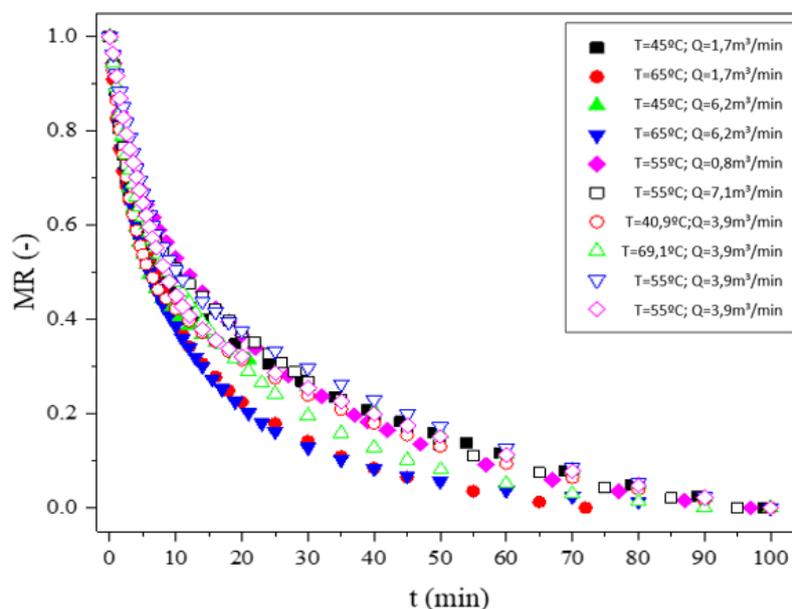
4.2 Secagem

Como já discutido, foi feito um planejamento fatorial para os testes de secagem, a fim de se comparar as condições de secagem com o índice germinativo das sementes. Entretanto, não foi possível realizar o teste germinativo, desse modo, foi feita a análise de secagem, comparando a taxa de secagem em diferentes condições, portanto alguns experimentos estão fora da zona de temperatura e alguns fora da zona de vazão. Os dados dos 10 experimentos estão apresentados no Apêndice.

4.2.1. Curvas de cinética e taxa e secagem

As cinéticas de secagem e as curvas das taxas de secagem para os dez experimentos delineados pelo planejamento fatorial estão apresentadas nas Figuras 11 e 12 respectivamente.

Figura 11 – Cinéticas de secagem.



Fonte: Acervo pessoal

Através das cinéticas de secagem para sementes de maracujá nas condições dos experimentos de 1 a 10 foi possível observar que a temperatura exerceu uma influência de destaque no processo. Analisando as curvas dos experimentos 2 e 4, foi possível observar que para um dado t , a umidade da semente apresentou valores menores do que os observados em outros experimentos em toda a faixa de tempo. Considerando que os experimentos 2 e 4 foram realizados em uma temperatura de 65 °C, isso pode sugerir que uma melhor cinética de secagem pode ser atingida quanto maior for a temperatura de operação, principalmente se levarmos em conta que o experimento 2 acontece na configuração de leito fixo, com uma vazão de ar de 1,7 m³/min enquanto o experimento 4 acontece com o leito fluidizado, a uma vazão de 6,2 m³/min.

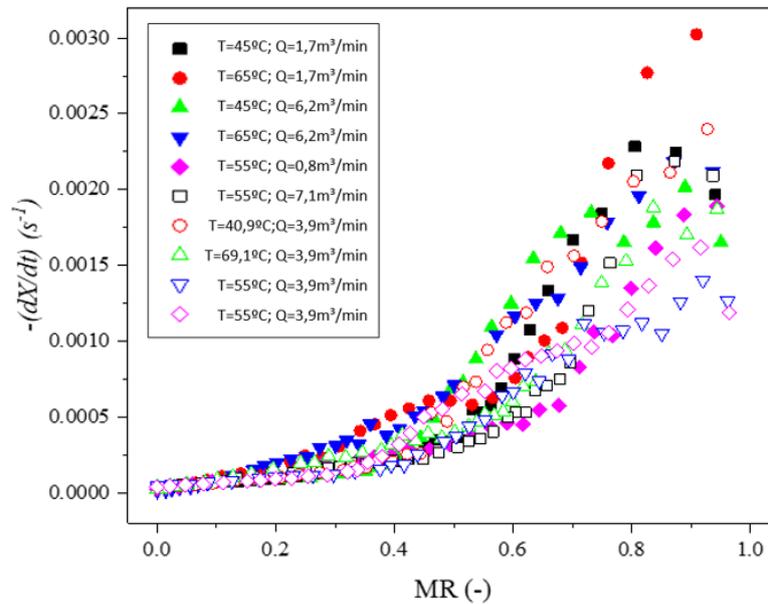
Isso está de acordo com o descrito por Felizardo (2018), no sentido de que as condições internas da semente e a temperatura do meio são fatores relevantes no processo de secagem em detrimento das condições convectivas externas. Ainda que a vazão seja mais que o triplo no experimento 4 em comparação ao 2, seu efeito na cinética de secagem é irrelevante.

Digno de nota é a posição do experimento 8. Considerando sua temperatura de 69,14 °C, esperava-se que essa configuração promovesse uma maior remoção de umidade em relação aos experimentos 2 e 4. Contudo, do ponto de vista da influência da temperatura, é possível que a faixa de temperatura entre 60 e 70 °C não contribua de forma tão evidente na melhoria da cinética de secagem. Dessa forma, ainda que a curva correspondente ao experimento 8 apresente valores de umidade maiores num dado tempo de operação, a diferença entre as curvas 2, 4 e 8 está mais relacionada aos desvios experimentais, do que no efeito da temperatura propriamente dita, isso também pode ter ocorrido devido a um mecanismo interno de defesa da semente para impedir a perda da umidade.

Isso não acontece quando comparamos os experimentos 2, 4 e 8 com os demais. A influência da temperatura fica nítida, sobretudo quando identificamos experimentos com vazões elevadas (experimento 6) com desempenho inferior aos experimentos com vazões menores e temperaturas maiores.

Os experimentos 1 e 3 foram realizados a 45°C, o experimento 1 ocorreu a uma vazão de 1,7 m³/min, já o experimento 3 a 6,2 m³/min, entretanto, a diferença na cinética de secagem não foi tão destacada em relação à diferença da vazão que foi 3 vezes maior.

Figura 12 - Curvas de taxa de secagem em função da umidade relativa.



Fonte: Acervo pessoal

Segundo Freire (2018), para a água evaporar mais rapidamente necessita de um aumento da temperatura do ar ou diminuição da umidade relativa ou quando o ar quente é soprado sobre a partícula úmida, o vapor de água se difunde pela camada limite sendo levado pelo ar de secagem, desse modo, também quanto maior a velocidade do ar de secagem, menor a espessura da camada limite e, maior a taxa de secagem.

Observando as taxas de secagem, podemos notar um leve crescimento e constância dela quando a umidade absoluta está em valores mais elevados e depois há uma diminuição até chegar em zero, o período de taxa constante é relevante quando o potencial de secagem é muito baixo ou a umidade da partícula muito alta, o período de taxa constante acaba quando a umidade crítica é atingida e a migração interna de água para a superfície não consegue mais compensar a taxa de evaporação da água não ligada. Após esse ponto, entramos no período de taxa decrescente e a difusão é controlada pela difusão interna da umidade da partícula, a taxa decresce lentamente até se aproximar de zero e a partícula atingir a umidade de equilíbrio (CHIRIFE, 1983; FREIRE, 2018). Podemos notar que a inclinação das

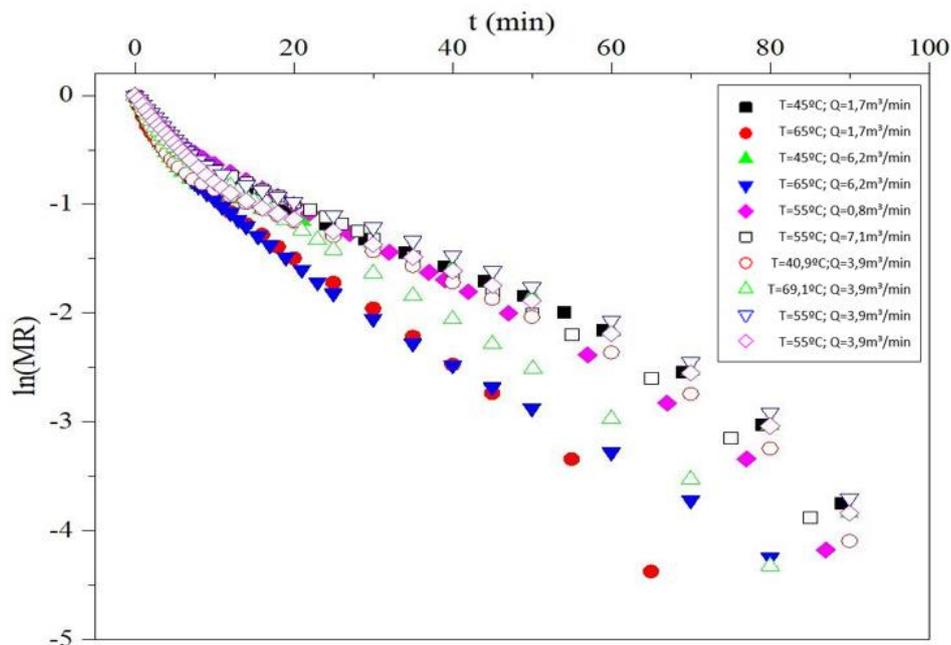
curvas aumentou proporcionalmente à medida que a temperatura de secagem aumenta.

4.2.2. Ajuste do modelo teórico de difusividade

Considerando que a semente de maracujá apresenta espessura muito menor do que a sua largura e que a difusão acontece fundamentalmente na direção da espessura, podemos considerar como condição de contorno a semente de maracujá como uma placa plana infinita com fluxo de umidade bilateral através de sua espessura, como foi demonstrado pelas Equações 2, 3 e 4.

Na Figura 13 temos o gráfico de linearizado da umidade absoluta pelo tempo, podemos notar que houve uma taxa decrescente para todas as cinéticas de secagens. Resultados similares foram obtidos na secagem de sementes de abóbora, Chayjan *et al.* (2013), e na secagem de cenouras, Aghbashlo *et al.* (2009).

Figura 13 – Curvas de cinética de secagem linearizadas



Fonte: Acervo pessoal

Com o gráfico foi possível obter os valores de difusividade (D_{ef}) através do ajuste da Equação da reta para todos os experimentos juntamente com o coeficiente de determinação (R^2).

Os valores da difusividade efetiva estão listados na Tabela 5. O coeficiente de determinação foi obtido automaticamente utilizando o software *Origin*TM 8.

Tabela 5 – Coeficientes de difusividade efetiva e análise estatística

Experimento	D_{ef} (m^2s^{-1})	R^2	T da secagem ($^{\circ}C$)
1	2,38E-09	0,96	45,0
2	4,12E-09	0,99	65,0
3	2,39E-09	0,94	45,0
4	3,54E-09	0,97	65,0
5	2,91E-09	0,99	55,0
6	2,69E-09	0,98	55,0
7	2,59E-09	0,96	40,9
8	3,36E-09	0,99	69,1
9	2,40E-09	0,98	55,0
10	2,49E-09	0,96	55,0

Fonte: Acervo pessoal

A determinação da difusividade foi feita da mesma forma que Chayjan *et al.* (2013), o qual estudou a difusividade de sementes de abóbora na secagem em leito fluidizado e fluidizado suave, resultando em uma difusividade similar para as duas condições de secagem e concluindo a melhor condição de secagem a partir disso. Entretanto, considerar apenas esses dados para se determinar as melhores condições de secagem é um equívoco, visto que foram feitas aproximações que afetam o resultado.

Entre as aproximações equivocadas, considerar a Equação de difusividade truncada no primeiro termo da somatória constitui erro de grande magnitude. Felizardo *et al* (2021) avaliaram que uma quantidade de termos superior a 15 deve ser empregada no estudo ao se considerar a difusividade efetiva constante. Isso se deve aos efeitos cumulativos que os termos da série têm sobre o valor da difusividade efetiva considerada constante no modelo.

A própria consideração de que a difusividade efetiva é constante é altamente alarmante. Isso acontece, pois, a difusividade efetiva é um parâmetro que não

apresenta identidade física própria, mas congrega uma série de efeitos de resistência à difusão e não apenas a difusão e Fick. A resistência interna à transferência de massa é um parâmetro que depende não apenas da temperatura da semente, mas também e fundamentalmente da sua estrutura. Assim, sementes cuja estrutura se altera durante o processo de secagem não tendem a apresentar difusividade efetiva constante. Isso significa que, apesar do trabalho de Chayjan *et al.* (2013) ter sido publicado em uma revista conceituada com revisão por pares, as suas considerações são completamente desprovidas de fundamento científico e não devem ser levadas a cabo sem uma análise criteriosa sobre os objetivos a serem atingidos com essa análise. Isso pode justificar os baixos valores dos coeficientes de correlação para alguns dos ajustes, considerando que eles representam de maneira superficial a verdadeira resistência à transferência de massa apresentada pelas sementes nas condições experimentais adotadas.

Entretanto, apesar de imprecisos em seus valores, os valores de difusividade acompanharam a tendência de serem maiores quanto maior a temperatura pelas mesmas razões já discutidas quando da análise das curvas de cinética de secagem. Os experimentos 2, 4 e 8 apresentaram as maiores difusividades efetivas de água em toda a faixa experimental estudada.

Aqui, é importante destacar que a análise foi realizada quase que do ponto de vista qualitativo, admitindo que o método empregado é insuficiente para garantir que os valores obtidos tenham a precisão adequada para uma análise aprofundada. Uma análise aprofundada das variações da difusividade efetiva em função do teor de umidade, não apenas aprofundaria o nosso conhecimento sobre as mudanças estruturais a que a semente é submetida durante a secagem, como permitiria uma análise de possíveis impactos deletérios na estrutura interna dos grãos, com reflexos imediatos sobre sua capacidade germinativa.

4.2.3 Curvas de secagem ajustadas aos modelos empíricos

Os coeficientes dos modelos empíricos ajustados aos dados linearizados das curvas de secagem estão apresentados nas Tabelas 6 a 11. Destaca-se o fato de que, apesar dos ajustes de modelos empíricos não revelarem quaisquer informações sobre a natureza dos fenômenos envolvidos no processo de secagem das sementes

de maracujá, eles podem auxiliar de maneira expressiva no ajuste de dados experimentais quando diferentes configurações de operação são comparadas.

Tabela 6 - Coeficientes de secagem para o modelo de Henderson e Pabis.

Experimentos	Parâmetros	
	a	k
Exp1	0,8050	0,0461
Exp2	0,9340	0,0759
Exp3	0,8663	0,0652
Exp4	0,8991	0,0831
Exp5	0,8775	0,0417
Exp6	0,8335	0,0421
Exp7	0,8174	0,0542
Exp8	0,8859	0,0584
Exp9	0,8864	0,0442
Exp10	0,9000	0,0558

Fonte: Acervo pessoal

Tabela 7 - Coeficientes de secagem para o modelo de Newton.

Experimentos	Parâmetro
	k
Exp1	0,0810
Exp2	0,0852
Exp3	0,0903
Exp4	0,0988
Exp5	0,0531
Exp6	0,0594
Exp7	0,0855
Exp8	0,0726
Exp9	0,0580
Exp10	0,0698

Fonte: Acervo pessoal

Tabela 8 - Coeficientes de secagem para o modelo de Page.

Experimentos	Parâmetros		
	a	k	n
Exp1	1,0384	0,2364	0,5422
Exp2	1,0161	0,1461	0,7740
Exp3	1,0654	0,2454	0,5625
Exp4	1,0328	0,2008	0,6932
Exp5	0,9792	0,1102	0,7265
Exp6	0,9909	0,1560	0,6386
Exp7	1,0394	0,2442	0,5546
Exp8	1,0080	0,1488	0,7087
Exp9	1,0415	0,1518	0,6479
Exp10	1,0581	0,1777	0,6386

Fonte: Acervo pessoal

Tabela 9 - Coeficientes de secagem para o modelo de Overhults.

Experimentos	Parâmetros	
	k	n
Exp1	0,0645	0,5693
Exp2	0,0813	0,7939
Exp3	0,0723	0,6075
Exp4	0,0936	0,7239
Exp5	0,0498	0,7009
Exp6	0,0555	0,6299
Exp7	0,0726	0,5821
Exp8	0,0671	0,7175
Exp9	0,0506	0,6882
Exp10	0,0604	0,6898

Fonte: Acervo pessoal

Tabela 10 - Coeficientes de secagem para o modelo exponencial de dois termos.

Experimentos	Parâmetros			
	a	b	c	k
Exp1	0,4336	0,4149	0,0672	0,4082
Exp2	0,3441	0,3479	0,2108	0,2436
Exp3	0,5380	0,5045	0,0837	0,3006
Exp4	0,4154	0,4100	0,1632	0,3056
Exp5	0,2346	0,2228	0,0630	0,5500
Exp6	0,3002	0,2902	0,0614	0,5376
Exp7	0,4664	0,4509	0,0776	0,3739
Exp8	0,2757	0,2665	0,1036	0,4263
Exp9	0,3939	0,3749	0,1133	0,2363
Exp10	0,5061	0,4883	0,1306	0,1969

Fonte: Acervo pessoal

Tabela 11 - Coeficientes de secagem para o modelo de dois termos.

Experimentos	Parâmetros			
	k1	k2	a	b
Exp1	0,4082	0,0274	0,4336	0,5851
Exp2	0,0514	0,2436	0,6522	0,3441
Exp3	0,3008	0,0252	0,5379	0,4957
Exp4	0,3056	0,0499	0,4154	0,5900
Exp5	0,0346	0,5500	0,7773	0,2346
Exp6	0,5376	0,0330	0,3002	0,7098
Exp7	0,3738	0,0290	0,4663	0,5491
Exp8	0,0442	0,4263	0,7335	0,2757
Exp9	0,0268	0,2364	0,6253	0,3937
Exp10	0,0257	0,1968	0,5115	0,5062

Fonte: Acervo pessoal

Modelos empíricos são todos baseados em expressões exponenciais. Geralmente, a análise do fator pré exponencial e do coeficiente interno ao exponencial podem ser feitas de maneira semelhante para todos os modelos, lembrando que essa análise é meramente matemática e não contribui para quaisquer informações sobre o transporte de massa do processo.

Ao analisarmos matematicamente os fatores pré-exponenciais, se seu valor for maior que 1, o valor inicial da função (em $t=0$) será maior que 1. Isso significa que a função começa em um valor elevado e depois decresce exponencialmente. Quanto maior o valor do fator exponencial, maior será o valor inicial da função. Se os valores estiverem numa faixa entre 0 e 1, o valor inicial da função será menor que 1. Isso implica que a função começa com um valor inicial reduzido e depois decresce exponencialmente, mas partindo de um valor mais próximo de zero. No caso de o fator ser igual a 1, como é o caso do modelo de Newton, a função começa exatamente em 1 no instante $t=0$ e geralmente é uma situação de referência, onde a função não é ampliada nem reduzida no início por qualquer fator.

Por outro lado, analisando os fatores internos ao exponencial (a , b , c , $k1$ e $k2$), eles controlam a taxa de decaimento da função ao longo do tempo. Quando esses parâmetros são positivos, a função decresce exponencialmente à medida que t aumenta. Valores maiores desses parâmetros fazem a função decrescer mais rapidamente, o que significa que a função se aproxima de zero mais rápido. Se os parâmetros tendem a zero, a função se torna uma constante independentemente do tempo t . Não há decaimento exponencial neste caso, e a função permanece fixa no

valor inicial. Se os parâmetros forem negativos, a função, em vez de decrescer, cresce exponencialmente ao longo do tempo, o que não é o caso nos ajustes apresentados nas tabelas 6 a 11.

Além dos valores obtidos para os parâmetros dos modelos empíricos foi realizada uma análise estatística do ajuste através dos cálculos do qui-quadrado (X^2) e o Erro Quadrático Médio (RMSE). Os cálculos estão apresentados nas tabelas 12 e 13.

Pode-se observar que o modelo que melhor se ajustou foi o de dois termos, já que apresentou os menores valores de X^2 e RMSE foi o modelo exponencial de dois termos.

Tabela 12 – Parâmetros da análise estatística para o ajuste dos modelos de secagem

Experimentos	Henderson e Pabis		Newton		Page	
	X^2	RMSE	X^2	RMSE	X^2	RMSE
Exp1	0,0058	0,0734	0,0114	0,1050	0,0008	0,0266
Exp2	0,0031	0,0539	0,0051	0,0702	0,0017	0,0390
Exp3	0,0071	0,0812	0,0097	0,0968	0,0017	0,0385
Exp4	0,0017	0,0405	0,0029	0,0534	0,0001	0,0112
Exp5	0,0017	0,0404	0,0045	0,0659	0,0005	0,0219
Exp6	0,0026	0,0499	0,0082	0,0893	0,0005	0,0224
Exp7	0,0056	0,0727	0,0105	0,1007	0,0008	0,0276
Exp8	0,0019	0,0417	0,0043	0,0643	0,0002	0,0136
Exp9	0,0034	0,0568	0,0058	0,0750	0,0006	0,0235
Exp10	0,0038	0,0595	0,0052	0,0710	0,0007	0,0261

Fonte: Acervo pessoal

Tabela 13 – Parâmetros da análise estatística para o ajuste dos modelos de secagem

Experimentos	Overhults		Dois termos		Exp. de dois termos	
	X^2	RMSE	X^2	RMSE	X^2	RMSE
Exp1	0,0008	0,0278	0,0001	0,0089	0,0001	0,0089
Exp2	0,0016	0,0385	0,0019	0,0402	0,0019	0,0402
Exp3	0,0018	0,0412	0,0003	0,0169	0,0003	0,0169
Exp4	0,0002	0,0131	0,0000	0,0044	0,0000	0,0044
Exp5	0,0005	0,0220	0,0003	0,0163	0,0003	0,0164
Exp6	0,0005	0,0224	0,0001	0,0068	0,0001	0,0068
Exp7	0,0009	0,0290	0,0001	0,0090	0,0001	0,0090
Exp8	0,0002	0,0137	0,0000	0,0039	0,0000	0,0039
Exp9	0,0007	0,0257	0,0002	0,0120	0,0002	0,0120
Exp10	0,0009	0,0295	0,0001	0,0115	0,0001	0,0115

Fonte: Acervo pessoal

4.2.4 Observações durante a secagem

Como já dito, não foi possível realizar os testes germinativos devido a danificação das sementes secas que foram separadas, desse modo, o planejamento fatorial foi feito resultando em várias faixas de temperaturas analisadas, isso impossibilitou o cálculo da energia de ativação pela Equação de Arrhenius (Equação 6) pela pouca repetição de temperaturas. Entretanto, por esse planejamento foi possível comparar essas temperaturas e, principalmente, diferentes tipos de leito. Como pode ser observado pelas curvas de secagem, o leito fluidizado resulta em uma secagem sem gradientes de umidade e mais rápida, com as sementes atingindo a umidade de equilíbrio antes se comparado ao leito fixo e fluidizado suave, porém o leito fluidizado, com sua vazão mais alta resultou em um impacto bem maior nas sementes durante a secagem, foram observados danos em algumas sementes, isso possivelmente pode prejudicar a germinação das mesmas. Os mesmos danos não foram observados nos outros tipos de leito. A mesma análise pode ser feita para a temperatura, pois por mais que o aumento da temperatura resulte em uma secagem mais rápida, esse aumento pode prejudicar a germinação da partícula, entretanto, nenhum dano às sementes foi observado durante a secagem a temperaturas mais altas.

5. CONCLUSÕES

Pela caracterização física, as sementes de maracujá apresentaram pouca variação no diâmetro de Feret médio e circularidade, sendo os valores de circularidade próximos a 1, a única medida que obteve uma variação significativa foi a área da partícula, mas no geral as sementes apresentaram uma homogeneidade entre si.

Pelas taxas e curvas de secagem pode-se concluir que as variáveis que mais influenciam no aumento da taxa de secagem e, conseqüentemente, na diminuição do tempo de secagem são o aumento da temperatura, principalmente, e a utilização do leito fluidizado, mas, em geral, a vazão teve pouca influência nos resultados. Entretanto, ainda há a necessidade de fazer essa análise junto ao índice germinativo das sementes de maracujá, já que o leito fluidizado apresentou danos físicos à algumas sementes.

O método utilizado para o cálculo da difusividade através da segunda lei de Fick, considerando a difusividade constante, não foi satisfatório pois não considerou a variação da difusividade durante a secagem, entretanto, ele pode ser utilizado para comparar a difusividade de forma mais abrangente, e pode-se concluir que o aumento da temperatura resultou de modo geral no aumento da difusividade. Desse modo, esse método não pode ser o único levado em consideração a fim de se comparar diferentes tipos de secagem.

O modelo de secagem que melhor se ajustou aos dados foi o de dois termos.

REFERÊNCIAS

- AGHBASHLO, M.; KIANMEHR, M. H.; KHANI, S.; GHASEMI, M. **Mathematical modeling of thin-layer drying of carrot**. International Agrophysics, v. 23, n. 4, p. 313–317, 2009.
- AKPINAR, E. K. **Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: modelling, performance analyses**. Energy Conversion and Management, v. 51, n. 12, p. 2407-2418, 2010.
- ARABHOSSEINIA, A.; HUISMANB, W.; VAN BOXTEL, A.; MÜLLER, J. **Modeling of thin layer drying of tarragon (*Artemisia dracunculus* L.)**. Industrial Crops and Products, New Forests, v.29, n.1, p.53-59, 2009.
- ARAÚJO, M. E. V. DE; BARBOSA, E. G.; OLIVEIRA, A. C. L. DE; MILAGRES, R. S.; CARVALHO PINTO, F. D. A; CORRÊA, P. C. **Physical properties of yellow passion fruit seeds (*Passiflora edulis*) during the drying process**. Scientia Horticulturae, v. 261, p. 109032. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109032>
- BUCKLIN, R.; THOMPSON, S.; MONTROSS, M.; ABDEL-HADI, A. **Grain Storage Systems Design**. Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering. p.123–175, 2013. Elsevier. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385881-8.00007-0>.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para Análise de Sementes (RAS)**. Brasília: Mapa/Assessoria de Comunicação Social, 2009.
- BASTOS, ALINE. **Biscoitos e cosméticos dos resíduos do maracujá**. Embrapa, 19 de set. 2014. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2071280/biscoitos-e-cosmeticos-dos-residuos-do-maracujá>
- BARROZO, M.A.S.; MUJUMDAR, A.; FREIRE, J.T. **Air-Drying of seeds: A review**. Drying Technology: An International Journal, London, v. 32, n. 10, p. 1127-1141, Jun., 2014.
- BABALIS, S.J.; BELESSIOTIS, V.G. **Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs**. Journal of Food Engineering, London, v.65, n.3, p.449-58, 2004.
- CAMARGOS FILHO, Anselmo Nogueira de. **Análise da hidratação de sementes de Jequitibá-branco (*Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze) via modelo difusivo associado a imagens de microtomografia computadorizada**. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) - Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

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.

CARLESSO, V. O. E. *et al.* **Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo.** *Revista Brasileira de Sementes*, Londrina, v. 29, n. 2, p. 28-37, 2007.

CARLESSO, V. O.; BERBERT, P. A.; SILVA, R. F.; DETMANN, E. **Secagem e armazenamento de sementes de maracujá amarelo (*Passiflora edulis Sims f. flavicarpa Degener*).** *Rev. Bras. Sementes*, v. 30, n. 2, p. 65-74, 2008.

CHAYJAN, R.A., SALARI, K., ABEDI, Q. and SABZIPARVAR, A.A. **Modeling moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of squash seeds in a semi fluidized and fluidized bed drying.** *J. Food Sci. Technol.*v. 50, 667–677, 2013.

CHAU, C. F.; HUANG, Y. L. **Characterization of passion fruit seed fibress: A potential fibre source.** *Food Chem*, v.85, p.189-194, 2004.

CHIRIFE, J. **Fundamentals on the drying mechanism during air dehydration of food.** In: MUJUMDAR, A. S. *Advances in Drying*. New York: Hemisphere Publishing Corporation. 1983, p. 73 - 102.

COELHO, E. M.; GOMES, R. G.; MACHADO, B. A. S.; OLIVEIRA, R. S.; LIMA, M. dos S.; DE AZÊVEDO, L. C.; GUEZ, M. A. U. **Passion fruit peel flour - technological properties and application in food products.** *Food Hydrocolloids*, v. 62, p. 158-164, 2016.

CORRÊA, L. J. **Estudo da secagem de sementes de embaúba em leito fluidizado.** 2012. 86 f. Dissertação (Mestrado em pesquisa e desenvolvimento de processos químicos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

DAUD, W.R. Wan, **Fluidized bed dryers — recent advances**, *Advanced Powder Technology*, p. 403–418, 2008.

FELIZARDO, M. P. **Caracterização física e secagem de sementes de Embaúba (*Cecropia glaziovii Sneathlge*)** (dissertação de mestrado), Universidade Federal de São Carlos, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, 88p, 2014.

FELIZARDO, M. P. **Secagem de cevada: análise da anatomia e do meio de transporte.** 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal

de São Carlos, São Carlos, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/9819>.

FELIZARDO, M. P.; MERLO, G. R. F.; MAIA, G. D. **Modeling drying kinetics of Jacaranda mimosifolia seeds with variable effective diffusivity via diffusion model**. Biosystems Engineering, v. 205, p. 234-245, 2021.

FERRARI, R. A.; COLUSSI, F.; AYUB, R. A. **Caracterização de subprodutos da industrialização do maracujá – aproveitamento das sementes**. Rev. Bras. Frutic., v. 26, n. 1, p.101-102, 2004.

FREIRE, J. F. **Tópicos em secagem de produtos naturais**. 2018.

GENARO, L. B. **Leito fixo com reversão do ar de secagem: estudo experimental e numérico da secagem de alumina**. Dissertação - Mestrado. Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 2021.

GELDART, D. **Types of Gas Fluidization**. Powder Technology, v.7, pp.285-292, 1973.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; MAGALHÃES, F.E.A.; BAPTESTINI, F.M. **Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem**. Acta Scientiarum Agronomy, Maringá, v.33, n.1, p.1-8, 2011.

GOMES, J. P.; OLIVEIRA, L. M.; FERREIRA, P. I.; BATISTA, F. **Substratos e temperaturas para teste de germinação em sementes de Myrtaceae**. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 26, n. 4, p. 285-293, 2016.

GOMES JUNIOR, F. G.; CÍCERO, S. M.; VAZ, C. M. P.; LASSO, P. R. O. **X-ray microtomography in comparison to radiographic analysis of mechanically damaged maize seeds and its effect on seed germination**. Acta Scientiarum. Agronomy, v. 41, n. 1, p. e42608, 13 mar. 2019.

HALLIWELL, B.; GUTTERIDGE, J. M. C. **Free radicals in biology and medicine**. 5ed. Oxford University Press. Oxford, p.22-55, 2015.

ISAACS, Marcela. Mercados nacionales e internacionales de las frutas pasifloráceas. In: MIRANDA, D.; FISCHER, G.; CARRANZA, C.; MAGNITSKIY, S.; CASIERRA, F.; PIEDRAHÍTA, W.; FLÓREZ, L.E. (Ed.) **Cultivo, poscosecha y comercialización de las passifloráceas en Colombia: maracuyá, granadilla, gulupa y curuba**. Bogotá, Colômbia: Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas, p. 324-345, 2009.

KINGSLY, R. P. *et al.* **Original article Effects of pretreatments and drying air temperature on drying behaviour of peach slice**. International Journal of Food Science and Technology, p. 65–69, 100, 2007.

KUCUK, H.; MIDILLI, A.; KILIC, A.; DINCER, I. **A Review on Thin-Layer Drying-Curve Equations**. *Drying Technology*, v. 32, n. 7, p. 757–773, 2014.

LOURITH, N.; KANLAYAVATTANAKUL, M. **Passion fruit seed: Its antioxidative extracts and potency in protection of skin aging**. Chapter 28 – Aging, 2nd Edition, p. 283-288, 2020.

LUCAS, A.; ARNALDOS, J.; CASAL, J.; PUIGJANER, L. Improved equation for the calculation of the minimum fluidization velocity. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 1986. 426-429.

MARQUES, S. D. S. F., LIBONATI, R. M. F., SABAA-SRUR, A. U. O., LUO, R., SHEJWALKAR, P., HARA, K., ... & SMITH, R. E. **Evaluation of the effects of passion fruit peel flour (*Passiflora edulis fo. flavicarpa*) on metabolic changes in HIV patients with lipodystrophy syndrome secondary to antiretroviral therapy**. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, v. 26, n. 4, p. 420-426, 2016.

MARLETT, J. A. Dietary fibre and cardiovascular disease. In CHO, Susan Sungsoo.; DREHER, Mark. L. (Eds.), **Handbook of dietary fibre**. New York: Marcel Dekker, p. 17-30, 2001.

MASSARANI, G., SILVA TELLES, A. Aspectos da secagem de material sólido particulado. In: FREIRE, J. T., SARTORI, D.J.M. **Tópicos especiais em secagem**. São Carlos: Editora UFSCar, 1992.

MELETTI, L. M. M. **Avanços na cultura do maracujá no Brasil**. *Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal*. V. 33, n. spe1, p. 83-91, 2011.

MIRANDA, L.C.; SILVA, W.R.; CAVARIANI, C. **Secagem de sementes de soja em silo com distribuição radial do fluxo de ar**. I. Monitoramento físico. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.34, n.11, p.2097-2108, 1999.

MORTON, J. F. Passion fruit. In: Morton JF, editor. **Fruits of warm climates**. Winterville: Creative Resource Systems Inc., 1987.

MUJUMDAR, A. S. (editor). **Handbook of Industrial Drying**. 4 ed. Nova York (EUA): Taylor & Francis Group, LLC., 2015.

MUJUMDAR, A.S.; DEVAHASTIN, S., **Applications for fluidized bed drying, em Handbook of Fluidization and Fluid Systems**, Yang, W.C., Ed., Marcel Dekker, New York, 2003, cap. 18, 2003.

NASCIMENTO, W. M. O. *et al.* **Temperatura e substrato para a germinação de sementes de *Parkia platycephala* Benth. (Leguminosae-Mimosoideae).** Revista Agropecuária Tropical, Cuiabá, v. 7, n. 1, p. 119-129, 2003.

NELLIST, M. E.; HUGHES, M. Physical and biological processes in the drying of seed. **Seed Science and Technology**, Zurich: v.1, n1, p.613-643,1973.

OLIVEIRA L. F.; NASCIMENTO, M.R.F.; BORGES, S.V.; RIBEIRO, P.C.N.; RUBACK, V. R. **Aproveitamento alternativo da casca do maracujá amarelo (*Passiflora edulis* F. *Flavicarpa*) para produção de doce em calda.** Cien Tecnol Aliment, v.22, p.259-262, 2002.

OLIVEIRA, F. A. M.; FREIRE, J. T.; MAIA, G. D. **Efeito da temperatura de secagem no encolhimento de sementes de lentilha.** In: Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Fortaleza, Brasil, 2016.

OLIVEIRA, R. C.; BARROS, S. T. D.; GIMENES, M. L. **The extraction of passion fruit oil with green solvents.** Journal of Food Engineering, v. 117, n. 4, p. 458-463, 2013.

ONWUDE, D. I. *et al.* Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 15, p. 599-618, 2016.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers.** West Lafayette: Purdue University, 1949.

PAIVA, R. **Leite com maracujá.** Rev Globo Rural, v. 152, p. 9-15, 1998.

RODRIGUEZ-AMAYA, D.B. Passion Fruit, Editor(s): Benjamin Caballero, **Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition**, v.2, Academic Press, p. 4368-4373, 2003.

SCHOTSMAN, W.C.; FISCHER, G. Passion fruit (*Passiflora edulis* Sim.). In: YAHIA, E.M. (ed.). **Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits.** Cambridge: Woodhead Publishing, p.125-143, 2011.

SLAVIN, J. L. Dietary fibre and colon cancer. In CHO, Susan Sungsoo.; DREHER, Mark. L. (Eds.), **Handbook of dietary fiber** . New York: Marcel Dekker, p. 31-45, 2001.

TOCCHINI, R.P; NISIDA, ALAC; HASHIZUME, T; MEDINA, J.C; TURATTI, J.M. III. **Processamento: Produtos, caracterização e utilização.** In: **ITAL (Org.) Maracujá -**

Cultura, matéria-prima, processamento e aspectos econômicos. Campinas: ITAL, p. 161-164, 1994.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. **Mathematical Simulation of Corn Drying — A New Model.** Transactions of the ASAE, v. 11, n. 4, p. 0582–0586, 1968.

TOGASHI, C.K.; FONSECA, J.B.; SOARES, R.T.N. *et al.* **Composição em ácidos graxos dos tecidos de frangos de corte alimentados com subprodutos de maracujá.** Revista Brasileira de Zootecnia, v.36, p.2063-2068, 2007.

USDA. **Food Composition Databases**, 2019. Disponível em: <https://fdc.nal.usda.gov/>. Acessado em: 08 de outubro de 2023.

VANDERPLANK J. **Passion flowers.** 2nd ed. Cambridge (MA): MIT Press, 1996.

VIEIRA, G. N. A. **Caracterização e secagem de grãos de linhaça marrom (*Linum usitatissimum* L.) em leite fixo e fluidizado** (dissertação de mestrado). Universidade Federal de São Carlos, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, 82p, 2012.

WERTHER, Joachim. **Fluidized- Bed Reactors em Ullmann 's Encyclopedia of Industrial Chemistry**, p. 320-342 2007.

WIJERATNAM, S.W. Passion Fruit, Editor(s): Benjamin Caballero, Paul M. Finglas, Fidel Toldrá, **Encyclopedia of Food and Health**, Academic Press, p. 230-234, 2016.

YAPO, B. D.; KOFFI, K. L. K. **Yellow passion fruit rind a potential source of lowmethoxyl pectin.** Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 54, p. 2738-2744, 2006.

ZERAIK, M. L.; PEREIRA, C. A., ZUIN, V. G.; YARIWAKE, J. H. **Maracujá: um alimento funcional?** Rev. Bras. Farmacogn. V. 20, n. 3, p.459-471, 2010.

APÊNDICE

Dados de secagem do experimento 1

n	Secagem 1				Secagem 2			
	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR
0	167,358	50,01	0	1,000	167,742	50,006	0	1,000
1	166,588	49,24	0,52	0,919	167,174	49,438	0,5	0,941
2	165,966	48,618	1,02	0,854	166,526	48,79	1	0,874
3	165,417	48,069	1,52	0,796	165,866	48,13	1,5	0,805
4	164,969	47,621	2,02	0,749	165,334	47,598	2	0,750
5	164,581	47,233	2,52	0,708	164,852	47,116	2,5	0,700
6	164,272	46,924	3,02	0,676	164,467	46,731	3	0,660
7	163,99	46,642	3,52	0,646	164,156	46,42	3,5	0,628
8	163,763	46,415	4,02	0,622	163,901	46,165	4	0,601
9	163,539	46,191	4,52	0,599	163,701	45,965	4,5	0,581
10	163,33	45,982	5,02	0,577	163,535	45,799	5	0,563
11	163,026	45,678	6,02	0,545	163,381	45,645	5,5	0,547
12	162,787	45,439	7,02	0,520	163,223	45,487	6	0,531
13	162,566	45,218	8,02	0,496	163,021	45,285	7	0,510
14	162,357	45,009	9,02	0,475	162,827	45,091	8	0,490
15	162,161	44,813	10,02	0,454	162,625	44,889	9	0,469
16	161,844	44,496	12,02	0,421	162,45	44,714	10	0,451
17	161,578	44,23	14,02	0,393	162,197	44,461	12	0,424
18	161,331	43,983	16,02	0,367	161,957	44,221	14	0,400
19	160,91	43,562	21	0,322	161,459	43,723	19	0,348
20	160,425	43,077	26,02	0,272	161,06	43,324	24	0,306
21	160,102	42,754	29,02	0,238	160,696	42,96	29	0,269
22	159,513	42,165	39,02	0,176	160,383	42,647	34	0,236
23	159,207	41,859	44,02	0,144	160,115	42,379	39	0,208
24	158,256	40,908	64,02	0,044	159,868	42,132	44	0,183
25	157,841	40,493	74,02	0,000	159,639	41,903	49	0,159
26					159,428	41,692	54	0,137
27					159,222	41,486	59	0,116
28					158,867	41,131	69	0,079
29					158,575	40,839	79	0,049
30					158,334	40,598	89	0,024
31					158,107	40,371	99	0,000

Dados de secagem do experimento 2

n	Secagem 1				Secagem 2			
	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR
0	167,235	50,021	0	1,000	167,116	49,902	0	1,000
1	166,497	49,283	0,5	0,939	166,02	48,806	0,5	0,909
2	165,872	48,658	1	0,888	165,016	47,802	1	0,826
3	165,286	48,072	1,5	0,840	164,228	47,014	1,5	0,761
4	164,758	47,544	2	0,796	163,678	46,464	2	0,716
5	164,322	47,108	2,5	0,760	163,284	46,07	2,5	0,683
6	163,923	46,709	3	0,727	162,92	45,706	3	0,653
7	163,484	46,27	3,5	0,691	162,59	45,376	3,51	0,626
8	163,109	45,895	4	0,660	162,321	45,107	4	0,603
9	162,512	45,298	5	0,611	161,867	44,653	5	0,566
10	161,933	44,719	6	0,564	161,446	44,232	6	0,531
11	161,396	44,182	7	0,520	161,006	43,792	7	0,494
12	160,912	43,698	8	0,480	160,566	43,352	8	0,458
13	160,516	43,302	9	0,447	160,163	42,949	9	0,425
14	160,169	42,955	10	0,419	159,793	42,579	10	0,394
15	159,85	42,636	11	0,392	159,466	42,252	11	0,367
16	159,583	42,369	12	0,370	159,168	41,954	12,01	0,342
17	159,069	41,855	14	0,328	158,729	41,515	14	0,306
18	158,638	41,424	16	0,293	158,39	41,176	16	0,278
19	158,257	41,043	18	0,261	158,035	40,821	18	0,249
20	157,911	40,697	20	0,233	157,739	40,525	20	0,224
21	157,348	40,134	25	0,186	157,192	39,978	25	0,179
22	156,876	39,662	30	0,148	156,735	39,521	30	0,141
23	156,45	39,236	35	0,113	156,346	39,132	35	0,109
24	156,121	38,907	40	0,085	156,047	38,833	40	0,084
25	155,856	38,642	45	0,064	155,812	38,598	45	0,065
26	155,473	38,259	55	0,032	155,456	38,242	55	0,035
27	155,201	37,987	65	0,010	155,181	37,967	65	0,013
28	155,082	37,868	70	0,000	155,029	37,815	72	0,000

Dados de secagem do experimento 3

n	Secagem 1				Secagem 2			
	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR
0	286,772	50,01	0	1,000	286,664	49,902	0	1,000
1	286,216	49,454	0,5	0,954	286,083	49,321	0,5	0,950
2	285,457	48,695	1	0,892	285,374	48,612	1	0,890
3	284,782	48,02	1,5	0,837	284,747	47,985	1,5	0,837
4	284,15	47,388	2	0,785	284,166	47,404	2	0,787
5	283,634	46,872	2,5	0,743	283,516	46,754	2,5	0,732
6	283,025	46,263	3	0,693	282,914	46,152	3	0,680
7	282,462	45,7	3,5	0,647	282,371	45,609	3,5	0,634
8	281,957	45,195	4	0,606	281,932	45,17	4	0,597
9	281,523	44,761	4,5	0,570	281,547	44,785	4,5	0,564
10	281,177	44,415	5	0,542	281,237	44,475	5	0,537
11	280,875	44,113	5,5	0,517	280,981	44,219	5,5	0,516
12	280,591	43,829	6	0,494	280,741	43,979	6	0,495
13	280,229	43,467	7	0,464	280,394	43,632	7	0,466
14	279,928	43,166	8	0,440	280,138	43,376	8	0,444
15	279,676	42,914	9	0,419	279,928	43,166	9	0,426
16	279,425	42,663	10,5	0,399	279,677	42,915	10,5	0,405
17	279,203	42,441	12	0,381	279,486	42,724	12	0,388
18	278,987	42,225	14	0,363	279,252	42,49	14	0,368
19	278,783	42,021	16	0,346	279,048	42,286	16	0,351
20	278,346	41,584	21	0,310	278,623	41,861	21	0,315
21	277,991	41,229	25	0,281	278,304	41,542	25	0,287
22	277,647	40,885	30	0,253	277,955	41,193	30	0,258
23	276,993	40,231	40	0,200	277,338	40,576	40	0,205
24	276,42	39,658	50	0,153	276,778	40,016	50	0,157
25	275,902	39,14	60	0,110	276,272	39,51	60	0,114
26	275,475	38,713	70	0,075	275,863	39,101	70	0,079
27	275,126	38,364	80	0,047	275,498	38,736	80	0,048
28	274,813	38,051	90	0,021	275,184	38,422	90	0,022
29	274,554	37,792	100	0,000	274,931	38,169	100	0,000

Dados de secagem do experimento 4

n	Secagem 1				Secagem 2			
	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR
0	286,595	50,006	0	1,000	286,406	49,817	0	1,000
1	285,517	48,928	0,5	0,944	285,241	48,652	0,5	0,936
2	284,262	47,673	1	0,879	284,041	47,452	1	0,871
3	283,08	46,491	1,5	0,818	282,964	46,375	1,5	0,812
4	281,609	45,02	2,38	0,742	281,983	45,394	2	0,759
5	281,052	44,463	2,5	0,713	281,165	44,576	2,5	0,714
6	280,275	43,686	3	0,673	280,46	43,871	3	0,676
7	279,501	42,912	3,5	0,633	279,772	43,183	3,5	0,638
8	278,768	42,179	4	0,595	279,132	42,543	4	0,603
9	278,109	41,52	4,5	0,561	278,559	41,97	4,5	0,572
10	277,554	40,965	5	0,532	78,074	-158,515	5	-10,364
11	277,107	40,518	5,5	0,509	277,641	41,052	5,5	0,522
12	276,7	40,111	6	0,488	277,25	40,661	6	0,501
13	276,334	39,745	6,5	0,469	276,901	40,312	6,5	0,482
14	276,009	39,42	7	0,452	276,55	39,961	7,1	0,462
15	275,708	39,119	7,5	0,436	276,312	39,723	7,5	0,449
16	275,409	38,82	8	0,421	276,034	39,445	8	0,434
17	274,937	38,348	9	0,396	275,569	38,98	9	0,409
18	274,47	37,881	10	0,372	275,156	38,567	10	0,386
19	274,034	37,445	11	0,349	274,658	38,069	11	0,359
20	273,583	36,994	12	0,326	274,306	37,717	12	0,340
21	273,182	36,593	13	0,305	273,927	37,338	13	0,319
22	272,823	36,234	14	0,287	273,587	36,998	14	0,301
23	272,468	35,879	15	0,268	273,095	36,506	15,5	0,274
24	271,926	35,337	17	0,240	272,703	36,114	17	0,253
25	271,447	34,858	19	0,215	272,211	35,622	19	0,226
26	270,98	34,391	21	0,191	271,775	35,186	21	0,202
27	270,616	34,027	23	0,172	271,374	34,785	23	0,180
28	270,262	33,673	25	0,154	271,044	34,455	25	0,162
29	269,629	33,04	30	0,121	270,427	33,838	30	0,128
30	269,135	32,546	35	0,096	269,951	33,362	35	0,102
31	268,791	32,202	40	0,078	269,607	33,018	40	0,084
32	268,511	31,922	45	0,063	269,328	32,739	45	0,068
33	268,292	31,703	50	0,052	269,108	32,519	50	0,056
34	267,955	31,366	60	0,035	268,762	32,173	60	0,038
35	267,728	31,139	70	0,023	268,517	31,928	70	0,024
36	267,543	30,954	80,05	0,013	268,335	31,746	80	0,014
37	267,286	30,697	100	0,000	268,073	31,484	100	0,000

Dados de secagem do experimento 5

n	Secagem 1				Secagem 2			
	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR
0	167,43	49,997	0	1,000	167,205	49,772	0	1,000
1	166,846	49,413	0,5	0,947	166,583	49,15	0,5	0,943
2	166,308	48,875	1	0,899	165,979	48,546	1	0,888
3	165,764	48,331	1,5	0,849	165,448	48,015	1,5	0,840
4	165,292	47,859	2	0,807	165,004	47,571	2	0,799
5	164,912	47,479	2,5	0,772	164,663	47,23	2,5	0,768
6	164,567	47,134	3	0,741	164,31	46,877	3,005	0,736
7	164,295	46,862	3,5	0,716	164,04	46,607	3,5	0,712
8	164,057	46,624	4	0,695	163,66	46,227	4,5	0,677
9	163,839	46,406	4,51	0,675	163,3	45,867	5,5	0,644
10	163,529	46,096	5,5	0,647	163,003	45,57	6,5	0,617
11	163,228	45,795	6,5	0,620	162,7	45,267	7,5	0,590
12	162,97	45,537	7,5	0,597	162,42	44,987	8,5	0,564
13	162,752	45,319	8,5	0,577	162,051	44,618	10	0,530
14	162,522	45,089	9,5	0,556	161,634	44,201	12	0,492
15	162,343	44,91	10,5	0,540	161,263	43,83	14	0,459
16	162,153	44,72	11,5	0,523	160,887	43,454	16	0,424
17	161,813	44,38	13,5	0,492	160,564	43,131	18	0,395
18	161,503	44,07	15,5	0,464	160,254	42,821	20	0,367
19	161,198	43,765	17,5	0,436	159,962	42,529	22	0,340
20	160,891	43,458	19,5	0,409	159,316	41,883	27	0,281
21	160,593	43,16	21,5	0,382	158,829	41,396	32	0,237
22	160,3	42,867	23,5	0,355	158,388	40,955	37	0,197
23	159,966	42,533	26	0,325	158,241	40,808	39	0,183
24	159,373	41,94	31	0,271	158,035	40,602	42	0,164
25	158,872	41,439	36	0,226	157,713	40,28	47	0,135
26	158,442	41,009	41	0,187	157,24	39,807	57	0,092
27	158,062	40,629	46	0,153	156,878	39,445	67	0,059
28	157,766	40,333	51	0,126	156,619	39,186	77	0,035
29	157,283	39,85	61	0,082	156,398	38,965	87	0,015
30	156,9	39,467	71	0,048	156,23	38,797	97	0,000
31	156,6	39,167	81	0,021				
32	156,373	38,94	91	0,000				

Dados de secagem do experimento 6

n	Secagem 1				Secagem 2			
	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR
0	286,645	49,999	0	1,000	283,209	46,563	0	1,000
1	285,76	49,114	0,5	0,945	282,314	45,668	0,5	0,937
2	284,887	48,241	1	0,891	281,377	44,731	1	0,872
3	284,093	47,447	1,5	0,841	280,481	43,835	1,5	0,809
4	283,41	46,764	2	0,799	279,832	43,186	2	0,764
5	282,752	46,106	2,5	0,758	279,319	42,673	2,5	0,728
6	282,197	45,551	3	0,724	278,876	42,23	3,1	0,697
7	281,711	45,065	3,5	0,693	278,619	41,973	3,5	0,679
8	281,326	44,68	4	0,669	278,315	41,669	4	0,657
9	280,98	44,334	4,5	0,648	278,027	41,381	4,5	0,637
10	280,664	44,018	5	0,628	277,801	41,155	5	0,621
11	280,382	43,736	5,5	0,611	277,572	40,926	5,5	0,605
12	280,087	43,441	6	0,592	277,358	40,712	6	0,590
13	279,631	42,985	7	0,564	277,014	40,368	7	0,566
14	279,243	42,597	8	0,540	276,71	40,064	8	0,545
15	278,894	42,248	9	0,518	276,421	39,775	9	0,525
16	278,554	41,908	10,01	0,497	276,165	39,519	10	0,507
17	278,277	41,631	11	0,480	275,704	39,058	12,05	0,474
18	277,995	41,349	12	0,462	275,334	38,688	14	0,449
19	277,524	40,878	14	0,433	274,959	38,313	16	0,422
20	277,1	40,466	16	0,408	274,596	37,95	18	0,397
21	276,718	40,072	18	0,383	274,261	37,615	20	0,373
22	276,329	39,683	20	0,359	273,944	37,298	22	0,351
23	275,965	39,319	22	0,336	273,614	36,968	24	0,328
24	275,601	38,955	24	0,314	273,323	36,677	26	0,308
25	275,259	38,613	26	0,292	273,047	36,401	28	0,288
26	274,944	38,298	28	0,273	272,755	36,109	30	0,268
27	274,644	37,998	30	0,254	272,19	35,544	35,02	0,228
28	274,03	37,384	35,02	0,216	271,679	35,033	40	0,193
29	273,472	36,826	40	0,181	271,243	34,597	45	0,162
30	273,012	36,366	45	0,153	270,848	34,202	50	0,134
31	272,577	35,931	50	0,126	270,516	33,87	55	0,111
32	272,223	35,577	55	0,104	269,993	33,347	65	0,075
33	271,632	34,986	65	0,067	269,542	32,896	75	0,043
34	271,207	34,561	75	0,041	269,224	32,578	85	0,021
35	270,836	34,19	85	0,018	268,928	32,282	95	0,000
36	270,552	33,906	95	0,000				

Dados de secagem do experimento 7

n	Secagem 1				Secagem 2			
	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR
0	286,646	50,001	0	1,000	287,717	51,072	0	1,000
1	285,968	49,323	0,5	0,936	286,871	50,226	0,5	0,928
2	285,341	48,696	1	0,877	286,126	49,481	1	0,865
3	284,843	48,198	1,5	0,830	285,402	48,757	1,5	0,803
4	284,354	47,709	2	0,784	284,771	48,126	2	0,749
5	283,856	47,211	2,5	0,737	284,22	47,575	2,5	0,703
6	283,383	46,738	3	0,692	283,694	47,049	3	0,658
7	282,948	46,303	3,5	0,651	283,275	46,63	3,5	0,622
8	282,553	45,908	4	0,614	282,879	46,234	4	0,589
9	282,212	45,567	4,5	0,582	282,507	45,862	4,56	0,557
10	281,919	45,274	5	0,554	282,28	45,635	5	0,538
11	281,661	45,016	5,5	0,530	282,034	45,389	5,5	0,517
12	281,445	44,8	6	0,509	281,702	45,057	6,5	0,488
13	281,124	44,479	7	0,479	281,4	44,755	7,31	0,463
14	280,84	44,195	8	0,452	281,183	44,538	8,5	0,444
15	280,667	44,022	9	0,436	280,914	44,269	10	0,421
16	280,334	43,689	11	0,404	280,626	43,981	12	0,397
17	280,064	43,419	13	0,379	280,334	43,689	14	0,372
18	279,852	43,207	15	0,359	280,102	43,457	16	0,352
19	279,396	42,751	20	0,316	279,86	43,215	18	0,332
20	278,96	42,315	25	0,275	279,649	43,004	20	0,314
21	278,578	41,933	30	0,239	279,185	42,54	25	0,274
22	278,194	41,549	35	0,202	278,768	42,123	30	0,239
23	277,909	41,264	40	0,176	278,41	41,765	35	0,208
24	277,583	40,938	45	0,145	278,069	41,424	40	0,179
25	277,361	40,716	50	0,124	277,774	41,129	45	0,154
26	276,909	40,264	60	0,081	277,495	40,85	50	0,131
27	276,577	39,932	70	0,050	277,068	40,423	60	0,094
28	276,252	39,607	80	0,019	276,716	40,071	70	0,064
29	276,048	39,403	90	0,000	276,418	39,773	80	0,039
30					276,156	39,511	90	0,017
31					275,96	39,315	100	0,000

Dados de secagem do experimento 8

n	Secagem 1				Secagem 2			
	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR
0	286,527	50,015	0	1,000	286,499	49,987	0	1,000
1	285,345	48,833	0,5	0,934	285,564	49,052	0,5	0,944
2	284,105	47,593	1	0,865	284,713	48,201	1	0,893
3	282,998	46,486	1,5	0,803	283,771	47,259	1,5	0,837
4	282,05	45,538	2	0,750	283,006	46,494	2	0,791
5	281,199	44,687	2,5	0,703	282,313	45,801	2,5	0,749
6	280,442	43,93	3	0,661	281,759	45,247	3	0,716
7	279,769	43,257	3,5	0,623	281,289	44,777	3,5	0,688
8	279,229	42,717	4	0,593	280,829	44,317	4	0,660
9	278,745	42,233	4,5	0,566	280,463	43,951	4,5	0,638
10	278,358	41,846	5	0,544	280,113	43,601	5	0,617
11	277,945	41,433	5,5	0,521	279,813	43,301	5,5	0,599
12	277,555	41,043	6	0,500	279,545	43,033	6	0,583
13	277,193	40,681	6,5	0,479	279,29	42,778	6,5	0,568
14	276,867	40,355	7	0,461	279,031	42,519	7	0,553
15	276,539	40,027	7,5	0,443	278,798	42,286	7,5	0,539
16	276,198	39,686	8	0,424	278,579	42,067	8	0,525
17	275,69	39,178	9	0,395	278,18	41,668	9	0,502
18	275,218	38,706	10	0,369	277,818	41,306	10	0,480
19	274,751	38,239	11	0,343	277,426	40,914	11	0,456
20	274,329	37,817	12	0,320	277,085	40,573	12	0,436
21	273,927	37,415	13	0,297	276,706	40,194	13	0,413
22	273,591	37,079	14	0,278	276,394	39,882	14	0,395
23	273,264	36,752	15	0,260	276,114	39,602	15	0,378
24	272,742	36,23	17	0,231	275,585	39,073	17	0,346
25	272,348	35,836	19	0,209	275,116	38,604	19	0,318
26	271,962	35,45	21	0,188	274,636	38,124	21	0,289
27	271,629	35,117	23	0,169	274,237	37,725	23	0,265
28	271,331	34,819	25	0,152	273,848	37,336	25	0,242
29	270,768	34,256	30,1	0,121	273,072	36,56	30	0,196
30	270,384	33,872	35	0,100	272,454	35,942	35	0,159
31	270,044	33,532	40	0,081	271,94	35,428	40	0,128
32	269,779	33,267	45	0,066	271,502	34,99	45	0,101
33	269,422	32,91	55	0,046	271,161	34,649	50,13	0,081
34	269,151	32,639	65	0,031	270,663	34,151	60	0,051
35	268,95	32,438	75	0,020	270,298	33,786	70	0,029
36	268,791	32,279	85	0,011	270,029	33,517	80	0,013
37	268,6	32,088	100	0,000	269,808	33,296	90	0,000

Dados de secagem do experimento 9

n	Secagem 1				Secagem 2			
	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR
0	286,712	50,016	0	1,000	286,64	49,944	0	1,000
1	286,043	49,347	0,5	0,950	286,16	49,464	0,5	0,962
2	285,392	48,696	1	0,901	285,628	48,932	1	0,920
3	284,752	48,056	1,5	0,853	285,15	48,454	1,5	0,882
4	284,202	47,506	2	0,812	284,752	48,056	2	0,851
5	283,682	46,986	2,5	0,773	284,327	47,631	2,5	0,817
6	283,221	46,525	3	0,739	283,921	47,225	3	0,785
7	282,803	46,107	3,5	0,708	283,52	46,824	3,5	0,754
8	282,448	45,752	4	0,681	283,096	46,4	4	0,720
9	282,099	45,403	4,5	0,655	282,762	46,066	4,5	0,694
10	281,763	45,067	5	0,630	282,414	45,718	5	0,666
11	281,451	44,755	5,5	0,606	282,134	45,438	5,5	0,644
12	281,164	44,468	6	0,585	281,835	45,139	6	0,620
13	280,878	44,182	6,5	0,564	281,582	44,886	6,5	0,600
14	280,627	43,931	7	0,545	281,339	44,643	7	0,581
15	280,189	43,493	8	0,512	280,974	44,278	8	0,552
16	279,808	43,112	9	0,484	280,642	43,946	9	0,526
17	279,494	42,798	10	0,460	280,36	43,664	10	0,504
18	279,205	42,509	11	0,438	280,107	43,411	11	0,484
19	278,954	42,258	12	0,420	279,533	42,837	14	0,439
20	278,589	41,893	14	0,392	279,253	42,557	16	0,417
21	278,266	41,57	16	0,368	278,977	42,281	18	0,395
22	277,979	41,283	18	0,347	278,739	42,043	20	0,376
23	277,739	41,043	20	0,329	278,198	41,502	25	0,333
24	277,213	40,517	25	0,289	277,743	41,047	30	0,297
25	276,754	40,058	30	0,255	277,308	40,612	35	0,263
26	276,349	39,653	35	0,225	276,888	40,192	40	0,230
27	275,974	39,278	40	0,197	276,506	39,81	45,05	0,200
28	275,63	38,934	45	0,171	276,156	39,46	50	0,172
29	275,307	38,611	50	0,147	275,578	38,882	60	0,126
30	274,769	38,073	60	0,107	275,074	38,378	70	0,086
31	274,309	37,613	70	0,072	274,668	37,972	80	0,054
32	273,927	37,231	80	0,044	274,292	37,596	90	0,025
33	273,619	36,923	90	0,021	273,98	37,284	100	0,000
34	273,343	36,647	100	0,000				
35	268,95	32,438	75	0,020				
36	268,791	32,279	85	0,011				
37	268,6	32,088	100	0,000				

Dados de secagem do experimento 10

n	Secagem 1				Secagem 2			
	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR	mt (g)	m semente (g)	t (min)	MR
0	286,794	50,005	0	1,000	286,694	49,905	0	1,000
1	286,21	49,421	0,5	0,958	286,218	49,429	0,5	0,964
2	285,56	48,771	1	0,910	285,57	48,781	1	0,916
3	284,823	48,034	1,5	0,857	284,953	48,164	1,5	0,870
4	284,22	47,431	2	0,813	284,406	47,617	2	0,829
5	283,64	46,851	2,5	0,771	283,922	47,133	2,5	0,792
6	283,134	46,345	3	0,734	283,499	46,71	3	0,761
7	282,687	45,898	3,5	0,702	283,114	46,325	3,5	0,732
8	282,258	45,469	4	0,671	282,719	45,93	4	0,702
9	281,862	45,073	4,5	0,642	282,344	45,555	4,5	0,674
10	281,501	44,712	5	0,616	281,983	45,194	5	0,647
11	281,178	44,389	5,5	0,592	281,631	44,842	5,5	0,621
12	280,85	44,061	6	0,569	281,303	44,514	6	0,596
13	280,526	43,737	6,5	0,545	280,98	44,191	6,5	0,572
14	280,234	43,445	7	0,524	280,712	43,923	7	0,552
15	279,737	42,948	8	0,488	280,191	43,402	8	0,513
16	279,297	42,508	9	0,456	279,751	42,962	9	0,480
17	278,918	42,129	10	0,428	279,35	42,561	10	0,450
18	278,574	41,785	11	0,403	279,037	42,248	11	0,427
19	278,326	41,537	12	0,385	278,782	41,993	12	0,408
20	277,907	41,118	14	0,355	278,4	41,611	14	0,379
21	277,579	40,79	16	0,331	278,08	41,291	16	0,355
22	277,293	40,504	18	0,310	277,841	41,052	18	0,337
23	277,028	40,239	20	0,291	277,62	40,831	20	0,321
24	276,467	39,678	25	0,250	277,161	40,372	25	0,286
25	275,983	39,194	30	0,215	276,732	39,943	30	0,254
26	275,561	38,772	35,05	0,185	276,359	39,57	35	0,226
27	275,142	38,353	40	0,154	275,998	39,209	40	0,199
28	274,797	38,008	45	0,129	275,666	38,877	45,05	0,174
29	274,495	37,706	50	0,107	275,362	38,573	50	0,152
30	273,998	37,209	60	0,071	274,832	38,043	60	0,112
31	273,568	36,779	70	0,040	274,377	37,588	70	0,078
32	273,299	36,51	80	0,020	273,974	37,185	80	0,048
33	273,018	36,229	90	0,000	273,622	36,833	90	0,021
					273,335	36,546	100	0,000