



ALESSA SALES DA SILVEIRA

**SECAGEM CONVECTIVA DE CAFÉS ESPECIAIS EM
DIFERENTES SECADORES**

**LAVRAS – MG
2021**

ALESSA SALES DA SILVEIRA

SECAGEM CONVECTIVA DE CAFÉS ESPECIAIS EM DIFERENTES SECADORES

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior
Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

ALESSA SALES DA SILVEIRA

SECAGEM CONVECTIVA DE CAFÉS ESPECIAIS EM DIFERENTES SECADORES

CONVECTIVE DRYING OF SPECIAL COFFEES IN DIFFERENT DRYERS

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 20 de novembro de 2021.

Banca:

Msc. Paula Giarolla Silveira – UFLA

Prof.^a Dr.^a Renata de Aquino Brito Lima Correa – UFLA

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior - UFLA

**LAVRAS – MG
2021**

*Aos meus pais.
Às minhas avós.
Ao meu avô.
Dedico*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Silvano e Conceição, por todo o apoio e incentivo durante a minha graduação, principalmente por nunca soltarem minha mão nos momentos difíceis e por estarem sempre prontos para uma comemoração dos bons momentos.

À minha família por estar ao meu lado no sucesso e no fracasso, sempre apoiando independentemente da situação.

Aos meus amigos, Julia e Matheus, por estarem comigo nesse caminho e serem minhas duplas nas disciplinas.

As minhas amigas de infância, por me apoiarem e auxiliarem em todas as dificuldades e principalmente por estarem presentes em todas as comemorações.

Aos meus amigos que tive o privilégio de encontrar nesse caminho, vocês tornaram a graduação mais leve e divertida. Obrigada por serem minha família em Lavras.

A todos os professores, principalmente ao Professor Irineu, que foi meu orientador neste trabalho e também um grande apoiador de todas as tarefas e desafios que tive durante a graduação. Obrigada, você foi essencial para o meu desenvolvimento.

À Universidade Federal de Lavras, Crea Minas Junior, ProcEQ Jr. e NEPetro pelos enormes aprendizados que foram proporcionados durante esses cinco anos e contribuíram imensamente na minha construção profissional.

Enfim, muito obrigada a todos envolvidos!

RESUMO

O processo de secagem é fundamental para a conservação de alimentos e materiais pelo fato de promover a retirada de água e, conseqüentemente, o retardo de processos químicos e biológicos. A secagem convencional por terreiros é capaz de promover a retirada de umidade, porém apresenta alto tempo de exposição e condições operacionais instáveis. Já secagem artificial é capaz de promover controle de temperatura, reduzir o tempo do processo, bem como garantir uma maior qualidade do produto seco. Dentre os secadores artificiais, há o leito fixo, leito fluidizado e leito de jorro, que promovem a secagem do produto com eficiência através do contato homogêneo do ar de secagem com o material a ser seco. Deste modo, este trabalho objetivou o estudo da secagem de grãos de café especial em diferentes leitos de secagem, como fixo, fluidizado e de jorro, com o intuito de obter dados da cinética de secagem, transferência de calor e massa e queda de pressão do grão ao longo do processo. O material a ser seco, café arábica (*coffea arabica l. cv. Catuai*), foi proveniente de um lote de cafés especiais da Agência de Inovação do Café (Inovacafé) que foi submetido ao processo de secagem por 8 horas em cada leito à uma temperatura de 45 °C com retirada de amostras de grãos a cada 30 minutos. Dentre os resultados, a taxa de secagem em todos os leitos obteve um comportamento transiente na maior parte do experimento. O valor de difusividade obtido está de acordo com a literatura, demonstrando que a metodologia é útil para determinação em grãos de café. Os modelos de cinética de secagem com melhor desempenho foram de Midilli et al. (2002) e Page (1949), estando de acordo com demais trabalhos que os utilizaram. Para o leito de jorro, foi possível obter o gráfico de comportamento fluidodinâmico, entretanto, o mesmo não apresentou o comportamento esperado devido a ineficácia no processo de despulpamento. Ademais, foi feito o ajuste de queda de pressão máxima no leito de jorro e o ambos modelos, Becher (1961) e Yokawa e Isaka (1971), apresentaram bom ajuste. Portanto, resultados experimentais foram condizentes com os apresentados nas literaturas abordadas, demonstrando uma metodologia bastante útil para estudo de secagem de grãos em secadores artificiais.

Palavras-chave: Grão. Leito fixo. Leito fluidizado. Leito de jorro. Cinética de secagem. Difusividade.

ABSTRACT

The drying process is essential for the conservation of food and materials as it promotes the removal of water and, consequently, delays chemical and biological processes. Conventional drying by terraces is capable of promoting the removal of moisture, but it has a long exposure time and unstable operating conditions. Artificial drying, on the other hand, is capable of promoting temperature control, reducing process time, as well as ensuring a higher quality of the dry product. Among the artificial dryers, there is the fixed bed, fluidized bed and spouted bed, which promote the drying of the product efficiently through the homogeneous contact of the drying air with the material to be dried. Thus, this work aimed to study the drying of special coffee beans in different drying beds, such as fixed, fluidized and spouted, in order to obtain data on the drying kinetics, heat and mass transfer and pressure drop of the grain throughout the process. The material to be dried, arabica coffee (*coffea arabica* l. cv. Catuai), came from a batch of specialty coffees from the Coffee Innovation Agency (Inovacafé) which was subjected to a drying process for 8 hours in each bed at one time. temperature of 45 °C with removal of grain samples every 30 minutes. Among the results, the drying rate in all beds obtained a transient behavior in most of the experiment. The obtained diffusivity value is in agreement with the literature, demonstrating that the methodology is useful for determination in coffee beans. The drying kinetic models with the best performance were from Midilli et al. (2002) and Page (1949), being in agreement with other works that used them. For the spouted bed, it was possible to obtain the fluid dynamic behavior graph, however, it did not present the expected behavior due to inefficiency in the pulping process. Furthermore, the adjustment of the maximum pressure drop in the spouted bed was made and both models, Becher (1961) and Yokawa and Isaka (1971), presented a good adjustment. Therefore, experimental results were consistent with those presented in the literature, demonstrating a very useful methodology for the study of grain drying in artificial dryers.

Keywords: Grain; Fixed bed; Fluidized bed; Stream bed; Drying Kinetics; Diffusivity;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Isoterma de equilíbrio de umidade em diferentes materiais.	15
Figura 2 - Curva do tempo de secagem vs teor de umidade.....	16
Figura 3 - Curva do teor de umidade vs taxa de secagem.	16
Figura 4 - Carta psicrométrica para determinação da umidade absoluta.....	18
Figura 5 - Esquema de secagem leito fixo.....	22
Figura 6 - Esquema de secagem leito fixo.....	23
Figura 7 - Esquema de secagem leito de jorro.	25
Figura 8 - Bancada leito fixo-fluidizado.....	27
Figura 9 - Bancada leito de jorro.	27
Figura 10 - Painel de controle da bancada de secagem leito fixo-fluidizado e jorro.	28
Figura 11 - Perfil de velocidade em função das frequências da bancada de leito fixo-fluidizado.....	29
Figura 12 - Leito de secagem fixa.	30
Figura 13 - Leito de secagem fluidizado.	30
Figura 14 - Leito de secagem de jorro.....	31
Figura 15 - Pontos de medida de temperatura no equipamento de forma manual.	33
Figura 16 - Temperaturas do café no centro do leito fixo.	35
Figura 17 - Temperaturas do café nas laterais do leito fixo.	35
Figura 18 - Curva de razão de umidade em base seca por tempo.	36
Figura 19 - Taxa de secagem leito fixo.	39
Figura 20 - Taxa de secagem leito fluidizado.....	39
Figura 21 - Taxa de secagem leito de jorro.	39
Figura 22 - Regressão linear dos resultados de razão de umidade para leito fixo, leito fluidizado e leito de jorro.....	40
Figura 23 - Queda de pressão em função pressão do leito de jorro com carga de café úmido.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de ajuste dos modelos da cinética de secagem dos grãos de café e coeficientes de determinação (R^2).	37
Tabela 2 - Queda de pressão máxima (ΔP_{max}).....	42

LISTA DE SÍMBOLOS

u^*	Umidade de equilíbrio	[kg/kg]
T	Temperatura do ar de secagem	[°C]
u_a	Umidade relativa do ar	[kg/kg]
u_{bs}	Umidade em base seca	[kg/kg]
u_{bu}	Umidade em base úmida	[kg/kg]
m_h	Massa de água no sólido	[g]
m_s	Massa do sólido seco	[g]
RU	Razão de Umidade	[-]
u	Umidade em um dado tempo	[kg/kg]
u_o	Umidade inicial	[kg/kg]
h	Tempo de secagem	[h]
X	Teor de umidade	[-]
ρ_p	Massa específica da partícula	[kg/m ³]
ρ_s	Massa específica do ar de secagem	[kg/m ³]
D_{ef}	Difusividade efetiva	[m ² /s]
η	Comprimento característico	[m]
λn	Valores característicos	[-]
n	Número de termos	[-]
L	Espessura da célula de secagem	[m]
d_{ss}	Diâmetro partícula calculado pela área superficial	[m]
k	Constante do modelo matemático	[min ⁻¹]
n	Constante do modelo matemático	[-]
a	Constante do modelo matemático	[-]
b	Constante do modelo matemático	[-]
V_{mj}	Velocidade mínimo de jorro	[m/s]
H_{max}	Altura máxima de jorro estável	[m]
ΔP	Perda de carga em função da velocidade do ar	[Pa]
V_{mi}	Velocidade mínima de fluido	[m/s]
ΔP_j	Queda de pressão no jorro estável	[Pa]
ΔP_{max}	Máximo de queda de pressão	[Pa]
ε	Fração de vazios no leito em mínima fluidização	[-]

g	Gravidade	[m/s ²]
ρ_p	Massa específica da partícula	[kg/m ³]
ρ	Massa específica do ar de secagem	[kg/m ³]
D_c	Diâmetro da coluna do leito de jorro	[m]
D_i	Diâmetro de entrada do fluxo de ar	[m]
ρ_R	Densidade real da partícula	[kg/m ³]
ρ_A	Densidade bulk da partícula	[kg/m ³]
H	Altura do jorro	[m]
R	Taxa de secagem	[kg água/kg sólido seco.h]

SUBÍNDICES

f	Final
i	Inicial
bs	Base seca
bu	Base úmida
s	Sólido seco
p	Partícula
n	Número de termos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1 Secagem.....	14
2.1.1 Difusividade efetiva.....	18
2.1.2 Cinética de secagem	20
2.2 Seleção dos secadores.....	21
2.2.1 Secador de leito fixo e fluidizado	21
2.2.2 Secador de leito jorro.....	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1 Unidades experimentais.....	27
3.2 Caracterização do café.....	28
3.3 Calibração do soprador.....	29
3.4 Procedimento pré-secagem.....	29
3.5 Secagem.....	30
3.5.1 Cinética de secagem	31
3.5.2 Difusividade efetiva.....	31
3.5.3 Taxa de secagem.....	32
3.5.4 Queda de pressão leito de jorro	32
3.6 Transferência de calor	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
4.1 Transferência de calor e massa no leito.....	33
4.2 Cinética de secagem	36
4.3 Taxa de secagem.....	38
4.4 Difusividade efetiva.....	39
4.5 Queda de pressão	41
5 CONCLUSÕES	43
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	44
REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

O consumo de café em nível mundial atualmente é em torno de 10 bilhões kg/ano, com crescimento médio anual de 1,3%. Dentro desse mercado, há o consumidor de café atual que busca por uma bebida que entregue aspectos sensoriais que o agradam. Para o resultado esperado é necessário o estudo dos processos envolvidos, desde a colheita do grão até a entrega da bebida. Um dos mais importantes processos é a secagem do grão, que tem influência direta em questões comerciais e de qualidade (CAVATON, 2021).

No que se refere a espécie *coffea arábica*, a importância é ressaltada ao falarmos de sua representatividade no mercado cafeeiro. Em 2021, o *coffea arábica* teve área cultivada de 1.778,6 mil hectares, o que corresponde a cerca de 81% da área total destinada à cafeicultura nacional. Ao tratar sobre a estimativa de produção mundial na safra 2020/21, há o volume de 175,4 milhões de sacas de 60 quilos, sendo que 101,9 milhões de sacas são representadas pelo café arábica (CONAB, 2021).

De acordo com Palancin et al. (2009), o café é um dos produtos com maior custo de secagem, não só pelo seu elevado teor inicial de água livre, mas também pelo fato de as características estruturais dos frutos e grãos estarem suscetíveis a danos que podem depreciar a qualidade do produto seco, diminuindo o seu valor comercial. Vários estudos sinalizam que a composição química dos grãos de café é dependente do tipo de processamento utilizado (BYTOF et al., 2005; KNOPP et al., 2006).

Dentre os parâmetros envolvidos no sucesso do processo de secagem há a temperatura e umidade do ar, bem como de exposição do grão ao ar de secagem. É necessário que esses parâmetros sejam bem controlados a fim de ter o desempenho desejado do processo. Na literatura, existem relatos sobre os danos na estrutura do grão causados pela secagem em grãos de café que comprometem a obtenção de uma bebida de boa qualidade. Acredita-se que o principal motivo desses danos é a desorganização e a desestruturação das membranas celulares, permitindo que os componentes químicos entrem em contato com enzimas hidrolíticas e oxidativas, afetando as características de cor, sabor e aroma da bebida (MARQUES, 2018).

A secagem artificial, em secadores mecânicos, apresenta as vantagens de diminuir o tempo de secagem, viabilizar o processo em regiões úmidas e em períodos de chuva, reduzir a influência das condições climáticas sobre a qualidade e permitir a redução da área de terreiros e da mão-de-obra (FREIRE, 1985). O fenômeno de redução do teor de água de grãos é complexo e envolve, simultaneamente, a transferência de calor e massa que podem alterar de

forma substancial a qualidade e as propriedades físicas do grão dependendo do método e das condições de secagem (PESSOA, 2011).

Existem vários tipos de secadores artificiais que variam de acordo com o objetivo final e tipo de material a ser seco. Dentre eles, há o secador de leito fixo, em que a secagem ocorre com o material a ser seco em repouso e o ar de secagem percola entre os espaços vazios do leito. Há também o secador de leito fluidizado, em que a velocidade do ar de secagem é suficiente para provocar movimento aleatório nas partículas do leito, ou seja, o material a ser seco estará em constante movimento. Além destes, há o leito de jorro, em que o material a ser seco é depositado em uma geometria de tronco de cone, formando uma região de jorro e outra região anular adjacente com altas taxas de recirculação de sólidos, havendo mistura intensa das partículas, contato íntimo gás-partícula e altas taxas de transferência de calor e massa (SILVA, 2007).

Devido à escassez de trabalhos que abordam o tema secagem de cafés especiais em secadores artificiais, um estudo sobre perfis térmicos, cinéticos, taxas de secagem e estimativa de difusividade efetiva se faz necessário. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo analisar a secagem convectiva do café especial, *coffea arabica l. cv. catuai*, em leito fixo, leito fluidizado e leito de jorro, a fim de obter dados da cinética de secagem, transferência de massa e queda de pressão. Serão verificados tempo de secagem, umidade do grão ao longo do processo e a validação de modelagens matemáticas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção é apresentada uma fundamentação teórica sobre o processo de secagem e os principais parâmetros relacionados aos secadores de leito fixo, fluidizado e de jorro.

2.1 Secagem

A secagem dos produtos é o processo mais utilizado para assegurar sua qualidade e sua estabilidade, considerando que a diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento. O fenômeno de redução do teor de água de grãos envolve, simultaneamente, a transferência de calor e massa, que podem alterar de forma substancial a qualidade e as propriedades físicas do produto, dependendo do método e das condições de secagem (CORRÊA, 2007).

A secagem é uma operação na qual é descrito o processo de remoção térmica de substâncias voláteis (umidade) para produzir um produto sólido seco (MUJUMDAR, 1995). Deste modo, a secagem tem a finalidade de eliminar um líquido volátil contido num corpo não volátil por meio de evaporação. Durante a secagem é necessário um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material, além de haver, também, um sorvedor de umidade para remover o vapor água que se forma na superfície do material a ser seco (PARK et al., 2014).

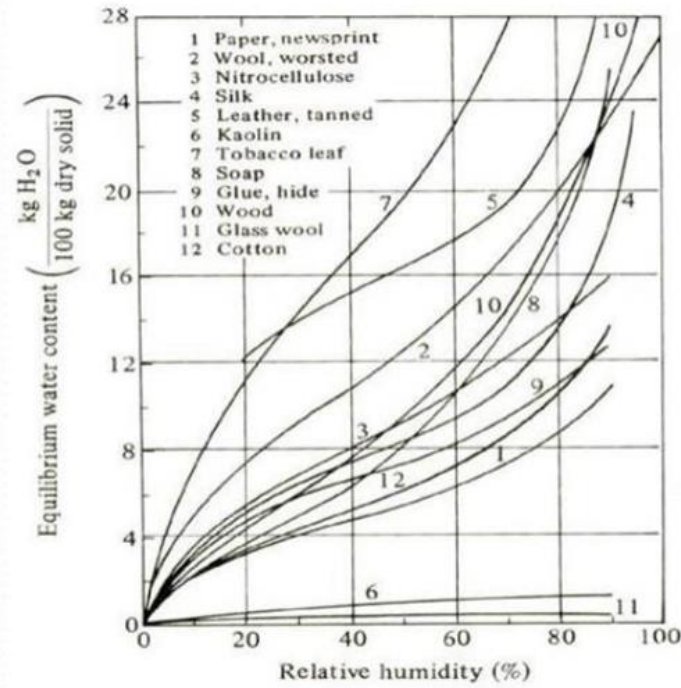
Ao analisar a secagem de grãos e frutos, há água em sua composição em duas formas: água ligada e água não-ligada - sendo a água total a soma dessas duas parcelas. A água não ligada está presente nos espaços intergranulares e entres os poros do material. Essa água mantém suas propriedades físicas e serve como agente dispersante para substâncias coloidais e como solvente para compostos cristalinos, podendo ser removida mais facilmente no processo de secagem por permitir o contato direto entre a água e o ar de secagem, viabilizando o processo de transferência de calor e massa. A água não-ligada é conhecida como atividade de água e corresponde à relação entre a pressão parcial de vapor de água pela pressão de vapor de água saturado (CELESTINO, 2010).

Já a água ligada está presente na superfície das macromoléculas como amido, pectina, celulose e proteína, que apresentam ligação através de forças de Van der Waals e pontes de hidrogênio. Esta associa-se quimicamente com outras substâncias do grão e não é eliminada na maioria dos métodos de secagem (CELESTINO, 2010).

A umidade de interesse no processo de secagem é a umidade a ser retirada do material, ou seja, a umidade livre, definida como a umidade adicional à umidade de equilíbrio. A umidade

de equilíbrio trata-se da porção da umidade total que não pode ser retirada pela secagem e depende da umidade relativa do ar de secagem e da temperatura (MUJUMDAR, 1995). A umidade de equilíbrio de um material, pode ser obtida experimentalmente através das isotermas de equilíbrio, como demonstrado na Figura 1. Nela podemos relacionar as umidades de materiais sólidos às umidades relativas do ar de secagem (MUJUMDAR, 1995).

Figura 1 - Isoterma de equilíbrio de umidade em diferentes materiais a 25°C.



Fonte: Mujumdar (1995).

Também pode-se obter a umidade de equilíbrio através da correlação demonstrada na Equação 1. A mesma obtida por Afonso Júnior (2001), pelo ajuste matemático exponencial de dados experimentais para café cereja descascado que passaram pelo processo de dessorção.

$$u^* = (1,0862 + 0,027T - 9,872u_a^{7,0075})^{-2,4999} \quad (1)$$

sendo: u^* a umidade de equilíbrio, T a temperatura do ar de secagem e u_a a umidade relativa do ar.

Para realizar a secagem de um grão e determinar a umidade, o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento indica, através das Regras para Análise de Sementes, que se pode usar o método da estufa. Os grãos devem ser colocados em uma estufa a 105°C durante 24 horas (BRASIL, 2012). Com as massas anteriores e posteriores é possível determinar a umidade, em base seca (Equação 2) e em base úmida (Equação 3).

$$u_{bs} = \frac{m_h}{m_s} \quad (2)$$

$$u_{bu} = \frac{u_{bs}}{1+u_{bs}} \quad (3)$$

sendo: u_{bs} a umidade em base seca; u_{bu} a umidade em base úmida; m_h a massa de água no sólido; m_s a massa do sólido seco

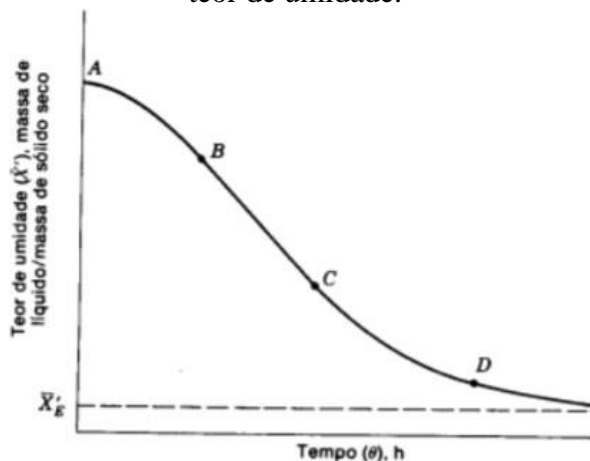
Para encontrar a curva característica que demonstra a cinética de secagem do processo, é utilizada a razão de umidade em base seca, obtida através dos dados experimentais e aplicado a Equação 4.

$$RU = \frac{u-u^*}{u_o-u^*} \quad (4)$$

onde: u é a umidade em um dado tempo t ; u_o a umidade inicial.

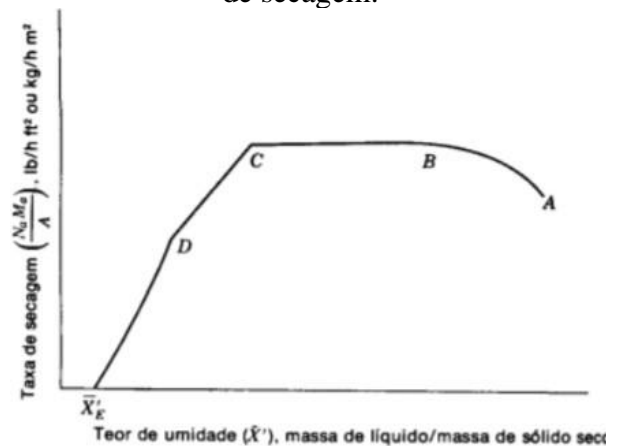
O processo de secagem pode ser representado por uma curva que relaciona o tempo de secagem (t) versus teor de umidade (X), ou seja, cinética de secagem. Esse comportamento é observado ao analisar toda a curva da Figura 2 (FOUST et al., 1982). Ademais, há também outro modo de se analisar o processo de secagem, que é por meio da curva de taxa de secagem elucidada na Figura 3.

Figura 2 - Curva do tempo de secagem vs teor de umidade.



Fonte: Foust et al. (1982).

Figura 3 - Curva do teor de umidade vs taxa de secagem.



Fonte: Foust et al. (1982).

Conforme Prado et al. (2000), a evolução das transferências simultâneas de calor e de massa na operação de secagem faz com que esta seja dividida, esquematicamente, em três períodos de secagem: período 0, período de secagem à taxa constante e período de secagem à taxa decrescente.

O período 0 (AB) é a fase que há o crescimento inicial da taxa de secagem durante a etapa de aquecimento do ar até atingir temperatura constante (MUJUMDAR, 1995). Já o período de velocidade de secagem constante (BC) é quando a taxa de transporte interno de água é no mínimo igual a taxa de evaporação. Deste modo, a evaporação é inferior ao transporte de água do interior para a superfície do grão e o processo é isentálpico, ou seja, a quantidade de energia que chega até o grão é aquela que sai do grão (PORTELLA et al., 2001)

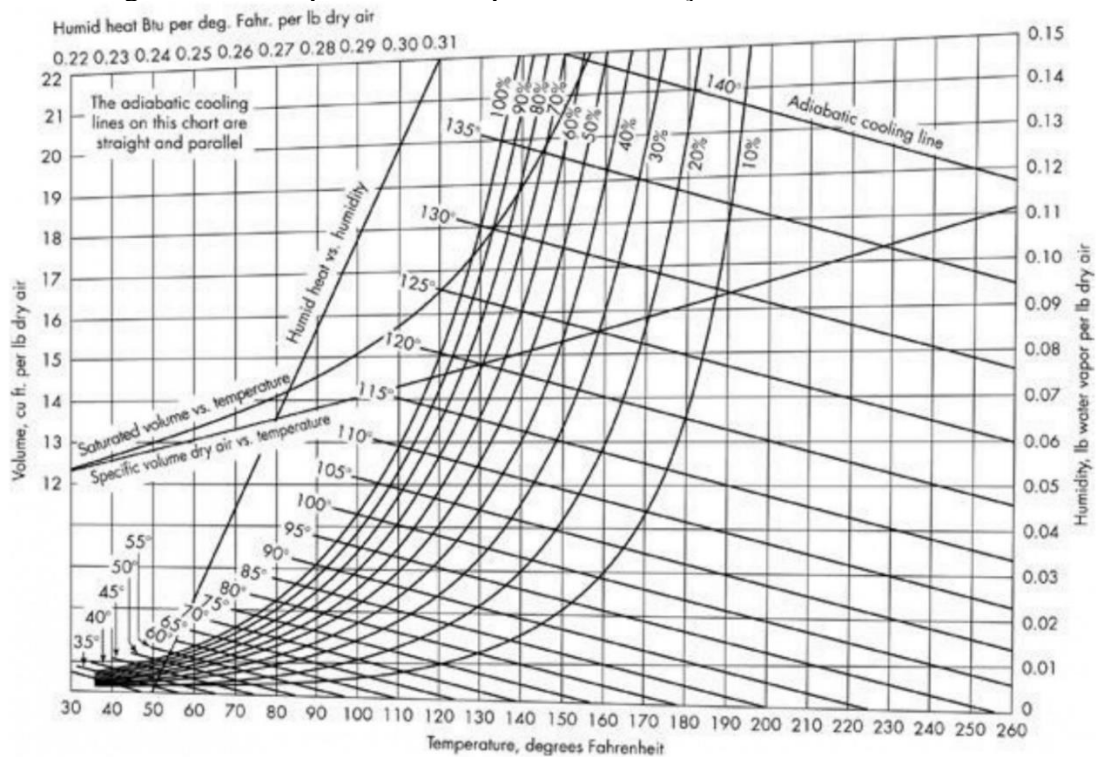
Baseado em Portella et al. (2001), há o período de velocidade de secagem decrescente (CD) em que taxa de transporte interno da água passa a ser inferior a taxa de evaporação, pois não existe mais água na superfície do grão para que seja evaporada. A quantidade de energia que chega no grão passa a ser superior a que sai do grão e, por conseguinte, a transferência de calor não é compensada pela transferência de massa. A temperatura do grão aumenta e a tendência é de ser igual à do ar de secagem até que o processo se encerre.

Em suma, o processo de secagem envolve a retirada parcial da água do grão por transferência de calor do ar para o grão e, ao mesmo tempo, por fluxo de vapor de água do grão para o ar. A particularidade da secagem, comparada com outras técnicas de separação, é que a remoção das moléculas de água é obtida por uma movimentação de vapor de água em razão da diferença entre as pressões parciais de vapor da superfície do grão e do ar que o envolve (PORTELLA et al., 2001).

Mantendo-se as condições físicas do ar ambiente, temperatura do ar de secagem e o fluxo de ar, é possível determinar a eficiência do fluxo térmico. Essa eficiência está diretamente ligada a umidade absoluta do ar antes e depois da passagem pela massa de grãos úmidos (PORTELLA et al., 2001). A determinação da umidade absoluta do ar de secagem é feita de maneira gráfica usando-se o gráfico psicrométrico da Figura 4.

A umidade absoluta representa a quantidade de água eliminada a cada quilo de ar seco. Quanto maior for a diferença de umidade absoluta entre o ar de entrada e o de saída do secador maior será a quantidade de água evaporada do grão e absorvida pelo ar durante a sua passagem pela massa de grãos úmidos (PORTELLA et al., 2001).

Figura 4 - Carta psicrométrica para determinação da umidade absoluta.



Fonte: MCCABE (1993).

2.1.1 Difusividade efetiva

Existem várias teorias que descrevem o mecanismo de migração de umidade do interior dos sólidos. Na solução prática do modelo difusivo, assume-se que o grão é uma esfera com um teor de umidade inicial uniforme e que, assim que a secagem começa, a superfície é mantida constante. As propriedades médias das sementes são consideradas válidas em toda a camada fina ou no elemento de volume analisado de uma camada delgada (FREIRE, 2005).

Deste modo, uma vez que o tempo de residência é considerado curto e o equilíbrio térmico é atingido rapidamente, a variação de umidade e temperatura da fase gasosa em todo o leito pode ser considerada desprezível, sendo apenas o balanço de massa para a água contida na fase sólida considerado na modelagem do processo. A modelagem matemática da transferência de umidade em meios porosos pode ser convenientemente tratada através da Segunda Lei de Fick.

Com base na Teoria da Difusão, supondo um sistema isotérmico e convertendo a concentração de soluto que difunde no conteúdo de umidade do sólido em base seca, tem-se a Equação 5 do balanço de massa (ALBINI, 2015).

$$\frac{\partial(\rho_p X)}{\partial t} = \nabla(D_{ef} \rho_s \nabla X) \quad (5)$$

em que: ρ_p é massa específica da partícula, t é o tempo, ρ_s é a massa específica do ar de secagem e D_{ef} a difusividade efetiva.

Portanto, assumindo a difusividade efetiva e as propriedades do sólido constantes, geometria cartesiana visto que está sendo tratado um elemento de volume de uma camada delgada, encolhimento do material desprezível e transferência de massa unidirecional (direção z), a Equação 5 fica reduzida a forma da Equação 6 (ALBINI, 2015).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (6)$$

A Equação 6 está sujeita a condição inicial (C.I.) de $X = X_0$ em $t = 0$, $0 < z < L$, primeira condição de contorno de $\left(\frac{\partial X}{\partial t}\right) = 0$ em $z = 0$, $t > 0$ e segunda condição de contorno de $X = X_{eq}$ em $z = L$, $t > 0$.

em que: X é a umidade do sólido em base seca, X_0 é a umidade em $t = 0$, e z coordenada cartesiana de transferência de massa.

Deste modo, a Equação 6 tem sua solução analítica obtida por separação de variáveis demonstrado na Equação 7 (ALBINI, 2015).

$$X(t) = X_{eq} + (X_0 - X_{eq}) 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\lambda_n} \cos(\eta \lambda_n) \exp\left(\lambda_n^2 \frac{D_{ef}}{L^2} t\right) \quad (7)$$

em que: η é o comprimento característico e λ_n os valores característicos.

A umidade média é obtida pela Equação 8, pois em estudos de camada delgada, o que se obtém é a concentração média espacial de umidade da célula de secagem ao longo do tempo (ALBINI, 2015).

$$\bar{X}(t) = \frac{1}{L} \int_0^L X(z) dz \quad (8)$$

Substituindo a Equação 8 na Equação 7 e realizando a integração, a razão de umidade adimensional (RU) em função do tempo é dada pela Equação 9.

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\left(n + \frac{1}{2}\right)^2 \pi^2 \frac{D_{ef}}{L^2} t\right] \quad (9)$$

Em que t é o tempo de secagem, n é o número de termos e L é espessura da célula de secagem.

Ao analisar um meio poroso, a difusividade efetiva pode ser calculada através da regressão da curva de razão de umidade adimensional (RU), visto que barreiras adicionais para a transferência de massa se dão pela porosidade e tortuosidade da partícula. De acordo com Silva et al. (2014), a difusividade efetiva (D_{ef}) da água no interior de grãos é determinada pressupondo um modelo esférico para os grãos com valores constantes e, dessa maneira, a espessura da célula de secagem pode ser definida como o raio da partícula calculado pela área superficial.

Com base nos dados experimentais, é obtida a curva de razão de umidade. A partir da regressão, a difusividade é obtida através do coeficiente angular (CHEN, et al. 2012).

$$\ln RU = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{ef}}{4\left(\frac{d_{sS}}{2}\right)^2}\right) t \quad (10)$$

Sendo: d_{sS} o diâmetro da partícula calculado pela área superficial

2.1.2 Cinética de secagem

As curvas de secagem, em camada delgada, variam com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores. Neste sentido, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas. Esses modelos, geralmente, baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Entretanto, não fornecem indicações detalhadas sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos e consideram que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente (RESENDE et al., 2008).

Segundo Midilli et al. (2002), existem três tipos de modelos de secagem em camada delgada que visam a descrever a cinética de secagem de produtos agrícolas. O modelo teórico, que considera apenas a resistência interna, a transferência de calor e a água entre o produto e o ar quente. Os modelos semiteóricos e os empíricos, que consideram somente a resistência interna, a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem.

De acordo com Pessoa et al. (2011), os modelos de Page (1949) e de Henderson e Pabis (1961) são modelos empíricos bastante utilizados para a representação da secagem de produtos agrícolas. Já o modelo de Midilli et al. (2002) é um modelo semi-empírico obtido

experimentalmente a partir do estudo da secagem de cogumelos, pólen e pistache, sendo uma simplificação do modelo teórico de Fick.

O modelo de Page (1949) é definido conforme a Equação 11, o modelo de Henderson e Pabis (1961) conforme a Equação 12 e Midilli et al. (2002) conforme a Equação 13:

$$RU = e^{-kt^n} \quad (11)$$

$$RU = aexp(-kt) \quad (12)$$

$$RU = aexp(-kt^n) + bt \quad (13)$$

em que: RU é a razão de umidade (adimensional) k, n, a, b são constantes do modelo e t é o tempo em minutos.

Embora várias teorias tenham sido propostas para prever o comportamento da secagem de grãos e sementes, na maioria das vezes, as relações semi-empíricas e empíricas têm-se mostrado como melhores opções para prever o processo de secagem, apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER et al., 1992).

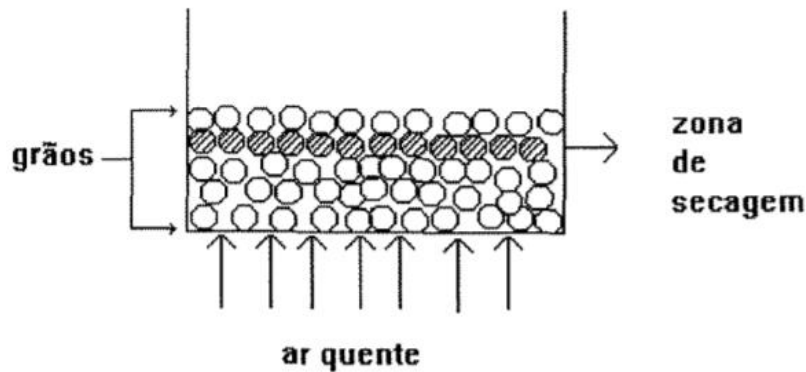
2.2 Seleção dos secadores

2.2.1 Secador de leito fixo e fluidizado

De acordo com Lima (1995), o leito fixo, também chamado de leito estático, consiste em um arranjo de partículas em determinado espaço de forma que um fluido passe através destas das partículas, geralmente em sentido ascendente, sem arrastá-las. O secador de leito fixo é um dos tipos de secadores mais utilizados para secagem de grãos, pois é um método de simples operação e que acarreta em baixos custos de instalação. Pode-se citar como exemplo a utilização do sistema de secagem em silos, uma vez que é muito utilizado como secador em propriedades rurais de pequeno e médio porte.

CreMASCO (2012) reforça que o leito fixo é formado por uma coluna preenchida pela fase particulada que permanece imóvel quando colocada em contato com o escoamento de uma fase fluída, conforme a Figura 5.

Figura 5 - Esquema de secagem leito fixo.



Fonte: Lima (1995).

No secador em leito fixo o ar de secagem move-se do fundo ao topo do leito. A transferência de umidade do grão para o ar acontece em uma faixa finita ou zona de grão. No início da secagem, esta faixa encontra-se no fundo do leito, movendo-se através da massa de grãos em sentido ascendente de forma que, ao final, toda a massa se encontre seca. Os grãos abaixo desta zona apresentam um valor de umidade em equilíbrio com o ar de secagem, enquanto que os acima da zona de secagem apresentam umidade inicial. Quando se move através da zona de secagem, o ar de retira a umidade do grão por evaporação e é resfriado (LIMA, 1995). Nota-se, então, dois gradientes ao longo da zona de secagem: gradiente de umidade e gradiente de temperatura (LIMA, 1995).

Quando a camada de grãos entra em movimento, a secagem passa a ser caracterizada como de leito fluidizado. Desde as primeiras aplicações na década de 40 do século XX, o leito fluidizado demonstrou ser uma técnica versátil no processamento de produtos particulados com 28 destaques para a secagem (WONG, 2002). A fluidização como técnica de processamento surgiu no século XVI, registrando-se a primeira patente em 1910 na indústria petroquímica, como método de craqueamento do petróleo (USTRA, 2005).

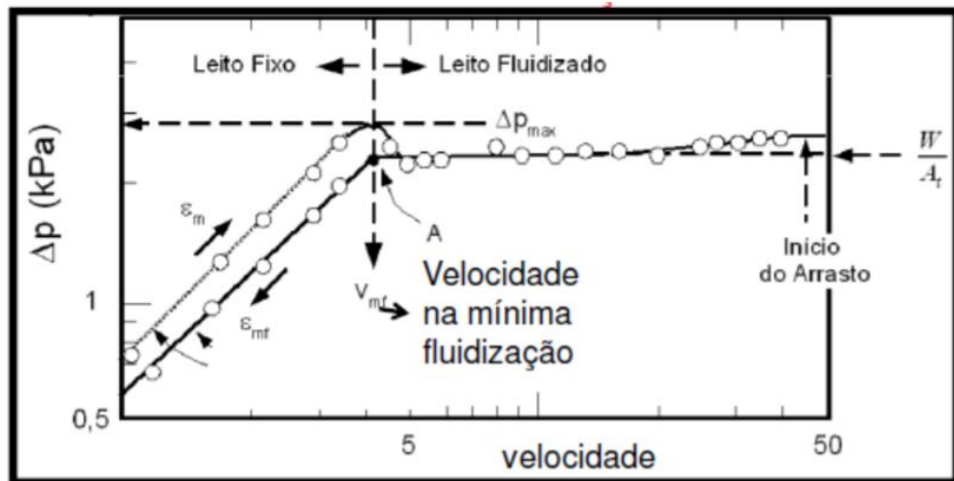
Segundo Parikh (1991), o fator de maior influência no leito fluidizado é o fluxo de fluido que, ao atravessar o distribuidor, é injetado de forma homogênea a uma velocidade que é capaz de provocar a suspensão e o movimento das partículas e maximizando a exposição de suas superfícies. A velocidade de mínima fluidização é o principal parâmetro no comportamento do leito e é definida como a velocidade na qual um leito fixo torna-se fluidizado.

O fluido na velocidade mínima de fluidização exerce uma força de arraste que suspende e separa as partículas, onde as forças e a componente vertical de forças compressivas entre partículas são anuladas. O leito se expande e a queda de pressão através de qualquer seção do leito é, aproximadamente, igual ao peso do fluido e das partículas daquela seção, denominando-a de fluidização mínima (RHODES, 2001). Até atingir este ponto, o leito é denominado fixo.

Novos incrementos da velocidade não alteram esta condição até as partículas atingirem a velocidade terminal, quando serão transportadas pelo fluido (USTRA, 2005).

A fluidização ideal apresenta uma curva característica da queda de pressão no leito pela vazão do fluido, onde se nota a região de expansão de leito até a velocidade de mínima fluidização, depois o regime de fluidização e por último o arraste de partículas, conforme a Figura 6 (BORGES, 2017).

Figura 6 – Curva fluidodinâmica de leito fluidizado.



Fonte: Kunii e Levenspiel (1991).

Atingida a fluidização com a separação das partículas e a expansão do leito, a perda de carga se reduz e posteriormente permanece constante, sendo menor que a pressão exercida pelo peso do material, deixando de existir a proporcionalidade entre a velocidade superficial e a perda de carga (USTRA, 2005).

Secadores em leito fluidizado destacam-se por apresentarem grande eficiência em virtude da alta mobilidade e intensa mistura dos sólidos, que promovem, por sua vez, altíssimas taxas de transferência de calor e massa, assim como uma uniformidade de temperatura no interior do leito (ALMEIDA, 1993).

2.2.2 Secador de leito jorro

O secador do tipo leito de jorro foi desenvolvido no ano de 1954 por Gishler e Mathur. Esse equipamento foi inicialmente projetado para a secagem de grãos de trigo em um processo que permite a aplicação de maiores quantidades de calor sem a ocorrência de perda de qualidade do material. Em seguida, os pesquisadores em questão, prevendo o grande potencial de aplicação da nova técnica, iniciaram um estudo mais profundo sobre o regime fluidodinâmico

de jorro e concluíram que o mecanismo de fluxo dos sólidos assim como de fluxo de ar no leito de jorro é diferente ao observado para a fluidização. Entretanto, o leito de jorro possui as mesmas aplicações do leito fluidizado, só que para as partículas de dimensões mais elevadas (MARRETO, 2006).

O regime de jorro é estabelecido pela entrada de um jato de fluido em um leito de sólidos particulados. O menor diâmetro dos sólidos recomendável para garantir o estabelecimento de um regime fluidodinâmico estável é de 1 mm. Após a entrada do fluido, normalmente constituído por ar, observa-se a aceleração ascendente das partículas sólidas com a formação de um canal central diluído, onde as mesmas apresentam elevada velocidade. Essa região é denominada de região de jorro. Ao redor do canal central, verifica-se a presença de um leito denso de partículas, que se deslocam contra o fluxo ascendente de ar, traçando uma trajetória parabólica em relação a região central do equipamento. A região que compreende esse leito deslizante de partículas recebe a denominação de anulo ou região anular (MATHUR, 1971). É possível verificar todas as regiões ao observar a Figura 6.

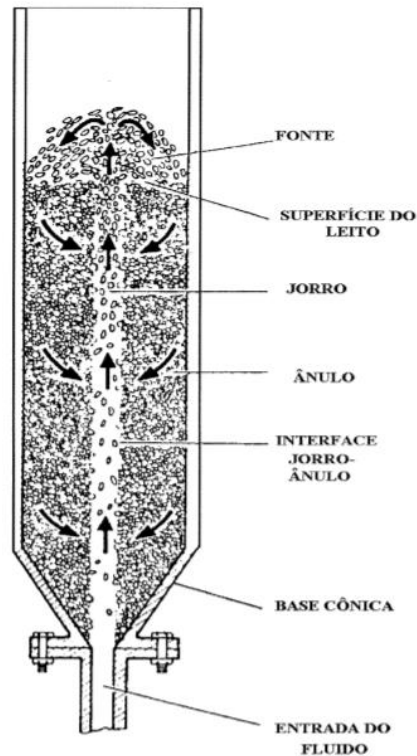
De acordo com Marreto (2006), os parâmetros fluidodinâmicos de maior importância no estudo dos regimes de jorro são: velocidade mínimo de jorro (V_{mj}), a altura máxima de jorro estável (H_{max}) e a perda de carga em função da velocidade do ar de entrada (ΔP). A velocidade mínima de fluido necessária para manutenção do regime de jorro (V_{mf}) é função das propriedades dos sólidos, da geometria do leito e do próprio fluido. Quando se considera um conjunto fluido-sólido-geometria do leito, observa-se a existência de uma altura máxima de partículas inertes, acima da qual não é possível observar a ocorrência do regime de jorro e sim uma fluidização de má qualidade, ou seja, a altura máxima de jorro estável (H_{max}).

Outro parâmetro fluidodinâmico de grande importância no estudo dos regimes de jorro é a queda de pressão no leito em função da velocidade de ar. Existe um pico máximo de queda de pressão (ΔP_{max}) gerado pela elevada demanda energética necessária para estabelecer o regime de jorro. Outro parâmetro que deve ser considerado é a queda de pressão no jorro estável (ΔP_j) (MATHUR, 1974).

De acordo com Cremasco (2012), o contato de partículas em leito de jorro apresenta a sua curva característica, no qual é estabelecida a relação de queda de pressão e velocidade superficial do fluido. Com baixas velocidades de ar de entrada, o fluido percola entre as partículas e o sistema se comporta como leito fixo. Com o incremento de velocidade superficial, surge uma cavidade em decorrência da ação do jato de fluido que é o bastante para deslocar as partículas e provocar a mistura entre as fases. Essa cavidade alonga à medida que aumenta a

velocidade superficial do fluido originando o jorro e, ao mesmo tempo, há o aumento da queda de pressão até a situação de queda de pressão máxima do sistema. Nesse ponto, a altura do jorro interno é bem maior do que aquela em que as partículas estão compactadas na parte superior do leito, de modo que, incrementos no valor da velocidade superficial do fluido acarretam decréscimos na queda de pressão.

Figura 7 - Esquema de secagem leito de jorro.



Fonte: Lima (1995).

Continuando com o aumento dessa velocidade, a queda de pressão diminui até um ponto em que corresponde ao jorro, onde existe a instabilidade no jorro interno em virtude da oscilação da sua altura. O jorro está próximo à superfície do leito, mas é instável em decorrência da formação frequente de bolhas na região anular. Após essa etapa, qualquer aumento de velocidade do ar de entrada faz com a queda de pressão caia bruscamente, porque o jorro aflora através da superfície desse leito (CREMASCO, 2012).

No processo inverso, com a redução da velocidade superficial do fluido, o jorro se mantém até o ponto de jorro mínimo. Na situação de jorro mínimo, tem-se o menor valor para a velocidade superficial do fluido com o qual se pode obter o jorro estável. Seguindo o processo de redução da velocidade, chegamos ao ponto de menor valor de queda de pressão, visto que essa pressão é devido à interação fluido-partícula, não havendo ruptura do jato de fluido através do leito (CREMASCO, 2012).

Cresmasco (2012) ainda cita que a descrição da fluidodinâmica do leito de jorro é uma das mais desafiadoras e complexas de sistema particuladas, visto que há no mínimo cinco regiões de contato entre fluido e a partícula. A abordagem mais simples para estabelecer a fluidodinâmica de um leito de jorro é considerá-lo como um sistema particulado constituído pelas regiões de jorro e anular.

Diante os parâmetros de estudos em leito de jorro, há na literatura algumas correlações para a determinação da queda de pressão máxima. A partir da queda de pressão máxima pode-se determinar a potência do soprador necessária para promover a formação do jorro. Essa variável de queda de pressão depende das características dos fluidos e dos sólidos envolvidos no processo, bem como a geometria do leito (EVANGELISTA NETO, 2013).

Há as correlações encontradas na literatura que descrevem a queda de pressão máxima. Na Equação 14 é descrito por Becher (1961) e na Equação 15 é descrito por Yokawa e Isaka (1971).

$$-\Delta P_{max} = (\rho_p - \rho)(1 - \varepsilon)gH \quad (14)$$

$$\frac{-\Delta P_{max}}{(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho)gH} = \left[\frac{D_i}{D_c} \right]^{0,14(D_c - D_i)H} \quad (15)$$

em que: ρ_p é a massa específica da partícula, ρ é a massa específica do fluido, ε fração de vazios no leito, H altura do leito equivalente a mínima fluidização, o D_c diâmetro da coluna do leito de jorro e D_i o diâmetro de entrada do fluxo de ar.

A fração de espaços vazios é descrita de acordo com a Equação 16:

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{\rho_R}{\rho_A} \quad (16)$$

em que: ρ_R a densidade real e ρ_A a densidade *bulk*.

Autores como Evangelista Neto (2013), Simioni et al. (2015) e Nelson e Gay (1969) realizaram a secagem de produtos agrícolas utilizando o secador de leito de jorro com o intuito de estimar as propriedades fluidodinâmicas para secagem.

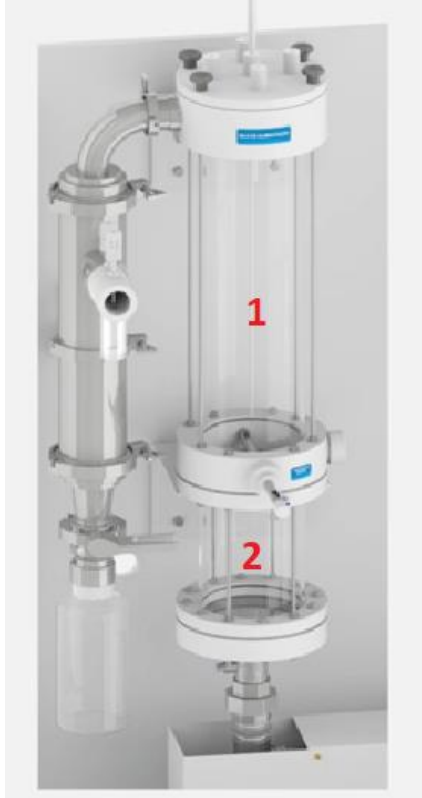
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são descritos detalhes da unidade experimental, especificadas as dimensões de seus componentes e apresentado o procedimento experimental. Além disso, é demonstrado como foi feito o preparo do material a ser secado.

3.1 Unidades experimentais

As unidades experimentais são bancadas de secagem: secador de leito fixo-fluidizado e secador de jorro da empresa ECO Educacional modelo MD019, localizada no Laboratório de Operações e Sistemas Térmicos da Universidade Federal de Lavras. A bancada é dividida em dois compartimentos cilíndricos no sentido vertical, assim como visto na Figura 8 e 9.

Figura 8 - Bancada leito fixo-fluidizado.



Fonte: ECO Educacional (2017).

Figura 9 - Bancada leito de jorro.



Fonte: ECO Educacional (2017).

O primeiro compartimento (Figura 8) trata-se do leito fixo-fluidizado que apresenta dois cilindros de vidro. O cilindro maior (1), com diâmetro de 15,7 cm e altura de 55 cm, é localizado acima do cilindro menor (2) e separado por um compartimento que apresenta furos, e uma peneira de 1 mm, onde o café foi depositado para secagem. O menor (2), localizado na parte inferior, possui diâmetro de 15,7 cm e altura de 25 cm. Este se encontra preenchido com sílica gel, sendo que no fundo desse cilindro há uma tela que impede que esta caia nas tubulações de alimentação.

O segundo compartimento (Figura 9) trata-se do leito de jorro, que apresenta uma estrutura de metal em formato de funil (3) com altura de 25 cm, diâmetro de entrada de 5 cm e

diâmetro de saída de 21 cm. Logo acima, há o compartimento de vidro (4) separado por uma tela com furos onde o material será depositado. Este apresenta diâmetro de 21 cm e altura de 56 cm.

O ar de secagem é alimentado no fundo do equipamento (5) por um compressor de 5,5 kW de potência com vazão 6,3 m³/min. O ar é aquecido por resistência elétrica na saída do soprador e o valor da temperatura é controlado por meio um painel de controle, conforme Figura 10.

Figura 10 - Painel de controle da bancada de secagem leito fixo-fluidizado e jorro.



Fonte: Do autor (2021).

A unidade possui termopares integrados na entrada do cilindro inferior do leito fixo-fluidizado e da seção funil do leito de jorro, porém os mesmos estão localizados atrás dos cilindros. Há também um termopar na saída do cilindro superior de cada compartimento, entretanto, o termopar localizado no topo dos cilindros superiores foi retirado de sua disposição inicial e foi utilizada para as medições no interior do cilindro de forma manual.

3.2 Caracterização do café

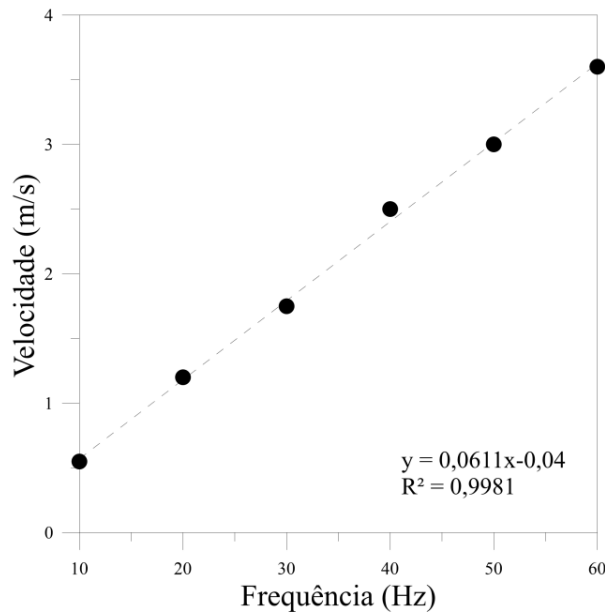
O material a ser seco foi o café arábica (*coffea arabica l. cv. Catuai*), proveniente de um lote de cafés especiais da Agência de Inovação do Café (Inovacafé), localizada nas coordenadas 21°13'38.7"S 44°57'58.0"W na Universidade Federal de Lavras. Este café passou por um processo de colheita manual pelo sistema de derriça no pano e foram selecionados somente os grãos maduros. Esses grãos passaram por um sistema de descascamento e despulpamento via úmida e, posteriormente, foram armazenados de forma refrigerada para os testes experimentais

com o intuito de garantia de suas propriedades. Antes de iniciar o experimento, o material ficou durante 1 hora em temperatura ambiente depositado sobre a bancada e espalhado de forma homogênea. Foram utilizados 1625,43g de grãos descascado e desmucilado, resultando em uma altura de grãos de 13 cm no modulo de leito fixo-fluidizado e de 25 cm no leito de jorro no compartimento de geometria de tronco de cone.

3.3 Calibração do soprador

A fim de garantir o regime de leito fixo, foi obtida a curva de calibração da vazão de entrada em função da frequência do motor. O perfil de velocidade foi obtido com 6 medições em 6 diferentes frequências, com o uso de um anemômetro da marca *Instrutherm* modelo TAD-500 de precisão $\pm 0,1$ no topo do leito com ausência de partículas de café. Variou-se a frequência do soprador de 10 a 60 Hz e, então, foi obtido o perfil linear de 0,55 à 3,6 m/s como demonstrado na Figura 11.

Figura 11 - Perfil de velocidade em função das frequências da bancada de leito fixo-fluidizado.



Fonte: Do autor (2021).

3.4 Procedimento pré-secagem

Antes de iniciar o processo de secagem dos grãos, a sílica em gel, localizada no compartimento inferior do equipamento, foi exposta ao ar de secagem à 105°C e 4,8 m/s por 45 minutos. Após a secagem da sílica e estabilização da temperatura do ar de secagem, a umidade relativa do ar de secagem foi medida. Isso foi realizado com o intuito de garantir que o ar de secagem entre em contato com a sílica em gel antes da sua passagem pelos grãos, garantindo menor umidade do ar de secagem.

O procedimento de secagem com a presença da sílica em gel foi realizado apenas no leito fixo e no leito fluidizado, sendo o leito de jorro impossibilitado devido à geometria dos compartimentos do módulo experimental utilizado.

Realizou-se, também, um teste com a camada de grãos de café, $H_o = 13$ cm para monitorar a frequência máxima que não houvesse movimentação de partícula, ou seja, leito fixo (Figura 11). A frequência máxima obtida foi de 20 Hz, equivalente a 1,8 m/s de velocidade do ar na entrada.

3.5 Secagem

Após ajustes de todos os parâmetros, iniciou-se o experimento de secagem e obtenção da cinética de secagem. Durante 8 horas, à uma temperatura de ar de secagem de 45 °C e velocidade de 1,8 m/s, foram retiradas amostras de grãos a cada 30 minutos de experimento. Essas amostras foram depositadas em placas de Petri, pesadas e destinadas a uma estufa à 105°C por cerca de 24 horas.

Para o experimento de secagem em leito fluidizado e leito de jorro, repetiu-se todos os procedimentos realizados no leito fixo, utilizando-se, contudo, a velocidade do ar de entrada como sendo 40 Hz, ou seja, 2,4 m/s. O aumento da velocidade do ar de entrada proporcionou a fluidização do leito de secagem conforme Figura 13. No caso do leito de jorro, o fluxo de ar foi destinado ao segundo compartimento (Figura 9) através do fechamento da válvula de acesso ao leito fixo-fluidizado. O leito de jorro é demonstrado na Figura 14.

Figura 12 - Leito de secagem fixa.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 13 - Leito de secagem fluidizado.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 14 - Leito de secagem de jorro.



Fonte: Do autor (2021).

3.5.1 Cinética de secagem

Para fins de modelagem matemática, considerou-se a secagem do café por no mínimo 8 horas. A determinação da razão de umidade foi feita através da Equação 4 e o ajuste dos modelos matemáticos (Equações 12, 13 e 14) foi feito pela análise de regressão não-linear, utilizando o método Gauss Newton, por meio do *software* STATISTICA 8.0®. A escolha do melhor modelo baseou-se no parâmetro estatístico do coeficiente de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) demonstrado através da Equação 17.

$$DQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RU_{pre} - RU_{exp})^2} \quad (17)$$

em que: DQM é o desvio quadrático médio, RU_{pre} é a pré-razão de umidade predito, RU_{exp} é a razão de umidade experimental e N é o número de dados experimentais.

3.5.2 Difusividade efetiva

Utilizando o *software* STATISTICA 8.0®, foi possível realizar a regressão linear da curva de razão de umidade adimensional, Equação 10, com os dados experimentais de cada leito. Conhecendo o coeficiente angular da regressão, é possível determinar a difusividade efetiva e, de acordo com Madamba et al (1996), os valores de coeficientes de difusividade

efetiva para secagem de produtos agrícolas apresentam-se valores entre $10^{-9} m^2s^{-1}$ a $10^{-10} m^2s^{-1}$.

3.5.3 Taxa de secagem

Os ensaios de secagem foram realizados em secador de leito fixo, leito fluidizado e leito de jorro, com as variáveis do processo monitoradas manualmente. Deste modo, como as amostras eram pesadas a cada 30 minutos, determinou-se os teores de umidade (base seca) inicial e final pelo método da estufa a $105^{\circ}C$ por 24 horas. Para a determinação da taxa de secagem (X) dos grãos foi utilizada a Equação 18.

$$R = \frac{m_a}{m_s \cdot t} \quad (18)$$

onde: R é a umidade em base seca, m_a é a massa de água presente no grão, m_s é a massa de sólido seco e t é o tempo de secagem.

Posteriormente, plotou-se o gráfico de taxa de secagem de acordo com a umidade de base seca obtida ao longo do período de secagem. Por meio de pesagens periódicas do grão, foi possível, também, determinar as curvas de umidade versus tempo (curvas de secagem).

3.5.4 Queda de pressão no leito de jorro

O leito de jorro foi preenchido com grãos de café úmido e iniciou-se o processo com a menor velocidade do ar de secagem até a máxima velocidade, a cada aumento da velocidade foi coletada a pressão do leito através de um tubo em U, manômetro, com dados em mm de água. Realizou-se também a coleta de dados com o retorno da velocidade até a parada de fornecimento de ar, deste modo, obteve-se dados de pressão do aumento da velocidade e queda da velocidade do ar de secagem.

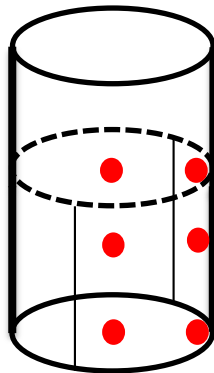
3.6 Transferência de calor

Com intuito de mensurar a transferência de calor envolvida no processo, a cada retirada de amostra, era feita a aferição de umidade do ar por meio da medição das temperaturas de bulbo úmido e seco, usando um termopar tipo K e algodão embebido em água. As coletas de temperaturas foram feitas no topo do módulo, ou seja, na saída do ar de secagem após percolar

o leito. A partir dos dois valores de temperatura, a umidade do ar é obtida por carta psicométrica (Figura 4).

Durante os primeiros 90 minutos do experimento de leito fixo em intervalos de 10 minutos, foi medida a temperatura por meio de um termopar no centro e nas extremidades do equipamento em 3 diferentes alturas a fim de analisar a variação de temperatura de forma radial e axial no equipamento, até que a temperatura se estabilizasse. Na Figura 15 é possível verificar, indicado por pontos vermelhos, os pontos de medida de temperatura utilizados no experimento.

Figura 15 - Pontos de medida de temperatura no equipamento de forma manual.



Fonte: Do autor (2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção foram analisados os resultados encontrados experimentalmente de secagem em leito fixo, fluidizado e de jorro e a cinética de secagem. Também foi realizada uma comparação entre os resultados experimentais de cada leito.

4.1 Transferência de calor e massa

Após a dessaturação da sílica, foi feita a medição das temperaturas de bulbo seco e úmido, sendo elas, respectivamente, 44,1 °C e 22,1 °C. Essas temperaturas foram similares para os experimentos no leito fixo e no leito fluidizado, podendo observar um padrão de absorção de umidade da sílica. Porém, é possível concluir que o ar de secagem, mesmo após a passagem pela sílica, não é isento de umidade, apresentando 0,010 kg de vapor de água/kg de ar seco (umidade relativa de 15,6%).

Ao analisar a temperatura de bulbo seco e bulbo úmido após inserção dos grãos úmidos na secagem do leito fixo e leito fluidizado, foi observado que elas não se alteram drasticamente ao longo do experimento, sendo justificado pela taxa de evaporação do leito de secagem. As

temperaturas de bulbo seco e úmido durante o experimento de leito fixo foram em média de 39,4 °C e 25,6 °C, resultando na umidade absoluta de 0,018 kg de vapor de água/kg de ar seco (umidade relativa de 35,3%). Para o leito fluidizado foram medidas as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido em média de 42,9 °C e 24,7 °C, resultando na umidade absoluta de 0,015 kg de vapor de água/kg de ar seco (umidade relativa de 24,4%).

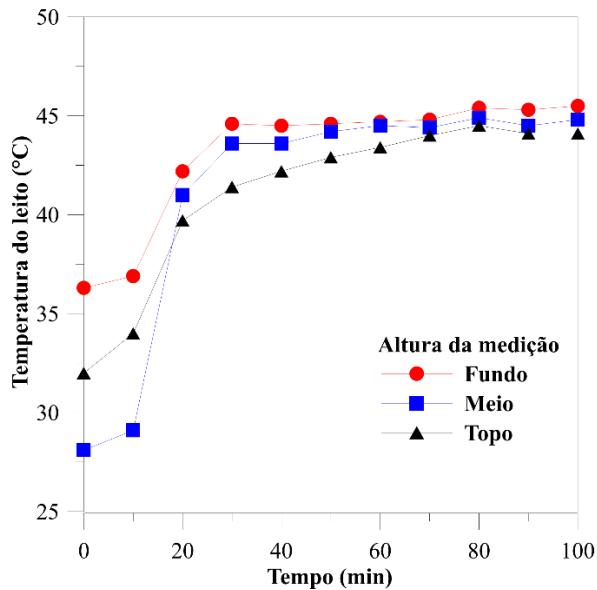
Já para o leito de jorro, não houve o processo de dessaturação da sílica ou presença da mesma e, por conseguinte, a temperatura de bulbo seco e úmido foram, antes de ser inserido o grão úmido de, respectivamente, 41,3 °C e 23,8 °C. O resultado é a umidade absoluta de 0,014 kg de vapor de água/kg de ar seco (umidade relativa de 25%), observadas na entrada do equipamento. Já após a inserção dos grãos, as temperaturas passaram a ter uma média de bulbo seco e úmido de 43,4 °C e 24,9 °C, resultando na umidade absoluta de 0,015 kg de vapor de água/kg de ar seco (umidade relativa de 24,9%). A justificativa para a queda de umidade relativa do ar é devido ao fato de a primeira aferição de umidade relativa de 25% ter sido realizada no início do dia em que a umidade do ar ambiente encontrava-se com valores maiores, deste modo, durante o processo de secagem houve a queda da umidade do ar ambiente que consequentemente favoreceu o processo de secagem no leito de jorro. Como é observado ao longo do processo de secagem no leito de jorro, a queda de umidade dos grãos, pode-se dizer que houve o processo de secagem mesmo que os dados de umidade absoluta do ar estejam contraditórios.

Deste modo, observa-se que a presença da sílica no leito fixo e fluidizado foi fundamental para a redução da umidade do ar de secagem, visto que no leito de jorro a umidade relativa inicial se apresentou-se de forma elevada e que foi fortemente influenciada pela umidade do ar ambiente. Observando o valor de umidade relativa do ar ao longo do processo, é possível verificar que o leito fluidizado e leito de jorro apresentaram valores próximos durante a realização do experimento, demonstrando cordialidade nos resultados, visto que ambos os leitos apresentam movimentação das partículas.

No leito fixo, foi realizada a medição de temperatura conforme indicado na Figura 14 e os resultados são elucidados na Figura 16 e 17.

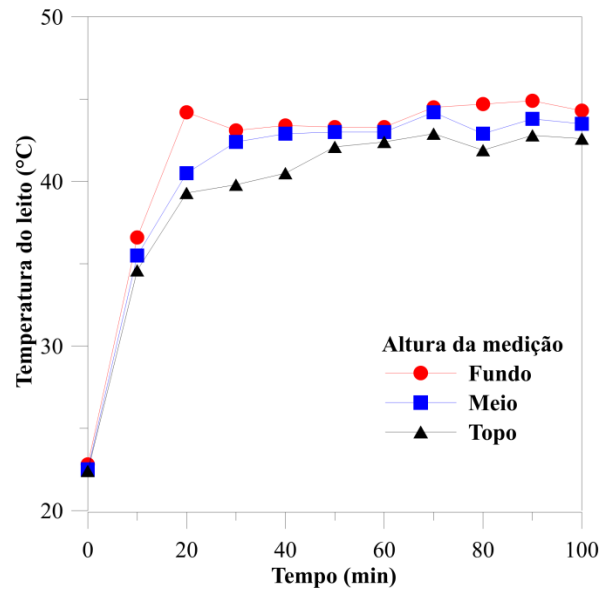
Pode-se observar que o comportamento inicial de temperatura no leito é justificado pelo fato da temperatura inicial da partícula ser de 22,4 °C, ou seja, menor que a temperatura ambiente, 26°C, e menor que a temperatura do ar de secagem, 45°C, favorecendo o equilíbrio térmico dos meios. Esse fenômeno é justificado pelo fato de a diferença de temperatura ser maior, fazendo com que o sistema procure um equilíbrio de temperatura de forma rápida.

Figura 16 - Temperaturas do café no centro do leito fixo.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 17 - Temperaturas do café nas laterais do leito fixo.



Fonte: Do autor (2021).

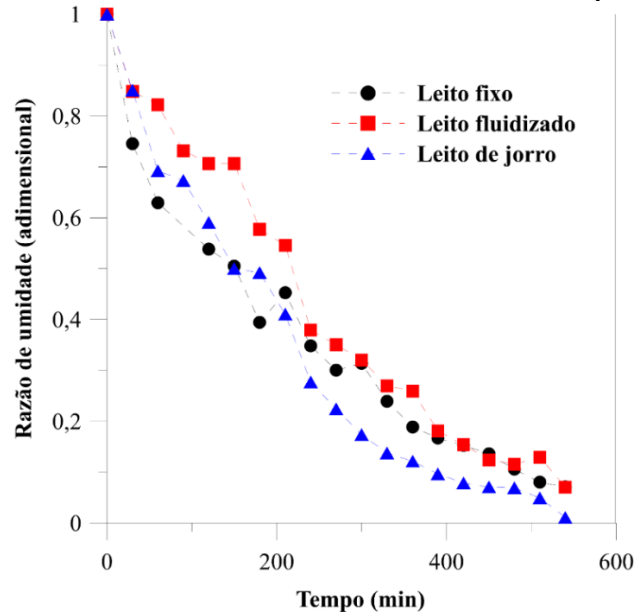
Outro ponto observado é que a camada de grãos localizada na parte inferior e ao centro do leito tende a apresentar maiores temperaturas devido ao contato com o ar de secagem ser direto, demonstrando que em secadores de leito fixo, há a tendência de formação de gradiente de temperatura.

A análise de variação da temperatura de forma axial demonstra alguns comportamentos de acordo com o quanto o ar percola os espaços vazios do leito. No topo, tem-se um comportamento minimamente mais homogêneo de temperatura em todos os pontos e isso se deve ao fato de o leito estar em contato direto com a temperatura ambiente devido ao equipamento ser destampado, bem como pelo fato de ser o caminho mais longo a ser percorrido pelo ar de secagem. Porém, esse comportamento é observado com pequenas variações, visto que o leito não apresentou uma altura suficiente para que houvesse grandes diferenças de temperatura. No fundo, é possível observar que a temperatura apresenta-se mais próxima a do ar de secagem e conseqüentemente, há uma maior taxa de secagem por se tratar da região de primeiro contato. Portanto, áreas ao centro e em alturas menores são favorecidas pelo processo de secagem em leito fixo.

4.2 Cinética de secagem

Com intuito de verificar o melhor desempenho entre os leitos, foi obtido o gráfico de razão de umidade por tempo de cada leito, demonstrado na Figura 18.

Figura 18 - Curva de razão de umidade em base seca por tempo.



Fonte: Do autor (2021).

O perfil de razão de umidade ao longo do tempo apresentou alguns pontos em que essa umidade teve um aumento. Por conseguinte, esse fato pode ser devido a imprecisões nas medidas e coletas de amostras. No caso do leito fixo, as amostras foram retiradas no mesmo local do equipamento, porém de forma manual. Já no leito fluidizado e de jorro, não foi possível a retirada de amostras no mesmo local visto que a partícula estava em movimento e, então, os resultados não demonstram com precisão a umidade do grão em um mesmo local de coleta.

Como a retirada das amostras foi feita de forma manual, pode-se ter a fonte de erro em seu peso. Diante de todos os pontos colocados, ainda assim foi obtido um perfil de razão de umidade satisfatório em que houve uma redução significativa da umidade em pouco tempo.

Comparando a umidade final da partícula entre os três leitos, foi observado o menor valor nas partículas secas em leito de jorro, sendo a razão de umidade próxima a zero após 9 horas. O leito fixo e leito fluidizado apresentou razão de umidade final bem próxima com valores em torno de 0,1 após 9 horas de processo. O melhor resultado do leito de jorro é justificado pelo fato do processo proporcionar um movimento da partícula de forma sistemática

e cíclica, além de apresentar uma base cônica, proporcionando aumento do movimento da partícula e a eliminação de zonas mortas.

Na Tabela 1 encontram-se os valores dos parâmetros dos modelos de Page (1949), Henderson & Pabis (1961) e Midilli et al. (2002), ajustados aos dados experimentais das cinéticas de secagem dos grãos de café em leito fixo, leito fluidizado e leito de jorro, bem como os coeficientes de determinação (R^2) e desvio quadrático médio (DQM).

Tabela 1 - Parâmetros de ajuste dos modelos da cinética de secagem dos grãos de café e coeficientes de determinação (R^2).

Modelo	Leito	Parâmetros					
		k (min^{-1})		n	R^2	DQM	
Page	Fixo	0,015110		0,791123	0,981833	0,0016	
	Fluidizado	0,000469		1,363718	0,968730	0,0032	
	Jorro	0,002177		1,157912	0,985112	0,0014	
Henderson e Pabis	Fixo	k		a	R^2	DQM	
	Fluidizado	0,004283		0,912328	0,977949	0,0018	
	Jorro	0,003802		1,044598	0,945772	0,0051	
Midilli et al.	Fixo	0,005251		1,021318	0,979559	0,0019	
	Fixo	k	a	b	n	R^2	DQM
	Fluidizado	0,049951	0,998932	-0,000474	0,500795	0,994725	0,0009
Jorro	0,000102	0,922084	-0,000003	1,615365	0,975754	0,0026	
Jorro	0,002389	0,969824	-0,000093	1,118721	0,987927	0,0013	

Fonte: Do autor (2021).

Ao realizarmos a análise por leito utilizado para a secagem, verificou-se que o melhor ajuste foi encontrado para o leito fixo e o modelo foi o de Midilli et al. (2002), com quatro parâmetros e com maior valor de R^2 e menor valor de DQM, ajustando-se melhor aos dados observados. Para o leito fluidizado e leito de jorro, o modelo de Midilli et al. (2002) também obteve bom ajuste, visto que de acordo com Pessoa et al. (2011), todos os modelos que mostraram valores de R^2 superiores a 0,95 podem ser utilizados na estimativa das curvas de secagem dos grãos. Para os modelos de dois parâmetros, o de Page (1949) se ajustou melhor em relação ao modelo de Henderson & Pabis (1961), sendo o seu maior valor de R^2 e menor valor de DQM encontrados para o leito de jorro.

Ademais, Pessoa *et al* (2011) realizaram a secagem de grãos de sorgo em leito fixo com temperatura de 50°C e o modelo que mais se adequou foi o de Midilli et al. (2002) com R^2 de 0,99923. Bitti (2020), realizou a secagem de cafés especiais à temperatura de 50°C e o modelo de Midilli et al. (2002) apresentou o melhor ajuste, com R^2 acima de 0,9998.

Corrêa et al. (2010) secaram frutos de café *Coffea arabica* L. e concluíram que o modelo de Midilli et al. (2002) é o que melhor se ajusta a dados experimentais da secagem desse grão, com valores de R^2 em torno de 0,9966 - para a secagem realizada a 45 °C. Deste modo, podemos considerar que o modelo de Midilli et al. (2002) tem a melhor equação para descrever a secagem de café em leito fixo.

Não foram encontrados trabalhos que verificassem a adequabilidade de modelos cinéticos a secagem de grãos de café em leito de jorro. Contudo, o modelo de Page (1949), apresentou bom ajuste para a secagem de grãos de girassol em leito de jorro no trabalho realizado por Evangelista Neto (2013), em que foi encontrado R^2 acima de 0,98, demonstrando, portanto, coerência com os resultados encontrados no presente trabalho.

4.3 Taxa de secagem

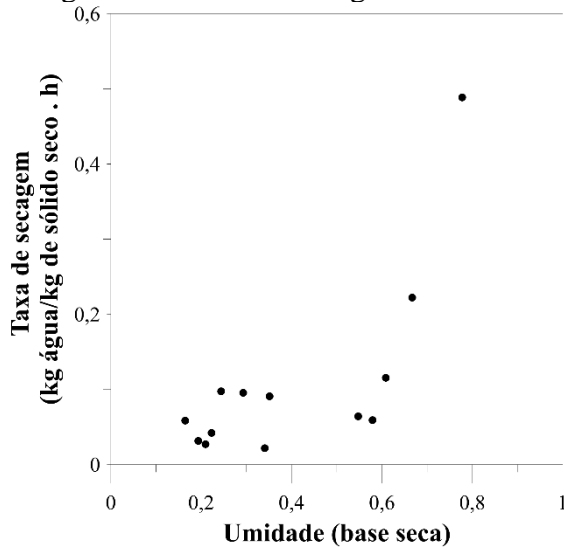
Com a coleta de amostras foi possível verificar a taxa de secagem de cada leito, sendo elas demonstradas nas Figuras 19, 20 e 21.

Para avaliar a taxa de secagem, o cálculo foi realizado excluindo os *outliers* no perfil de umidade. Para todos os leitos, a taxa de secagem se mostrou fortemente decrescente no início da operação quando os valores de umidade eram maiores, sugerindo um período transiente. Esse comportamento é apresentado para todos os leitos analisados, seguindo como o esperado, uma vez que no início do processo ocorre a perda de água não ligada do grão. A remoção da água não ligada acontece de forma rápida e por isso, após toda a sua remoção, o processo passa a apresentar um comportamento de mínimas variações da taxa de secagem.

A partir de valores de umidade em torno de 0,2, é possível observar que há pequenas variações na taxa de secagem, sugerindo uma região decrescente. O comportamento analisado é o mesmo que foi observado na literatura por Lima *et al.* (1995) ao secar grãos de feijão em que as curvas apresentaram o mesmo comportamento inicial para leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado.

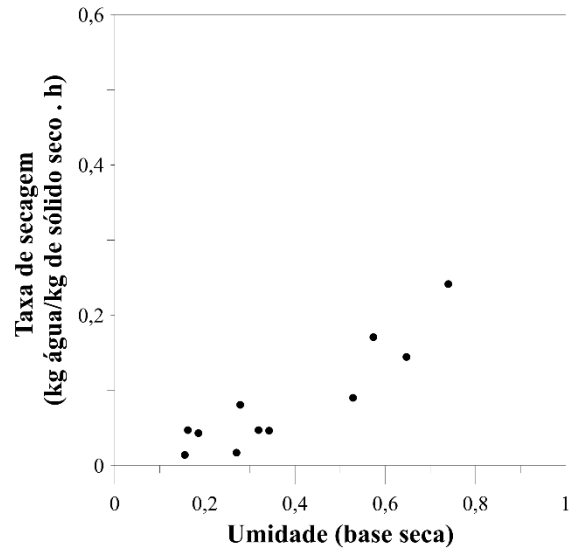
O comportamento fluidodinâmico do leito de jorro na secagem de feijão verde foi estudado por Medeiros et al. (2004), que observaram que as taxas de evaporação são mais elevadas no início da secagem, tendendo a se estabilizarem ao longo do processo. Evangelista Neto (2013) também observou que a secagem em leito de jorro apresenta uma curva decrescente até a faixa de 0,2 e 0,3 de umidade base seca e, a partir desse ponto, as taxas de secagem apresentam valores praticamente coincidentes.

Figura 19 - Taxa de secagem leito fixo.



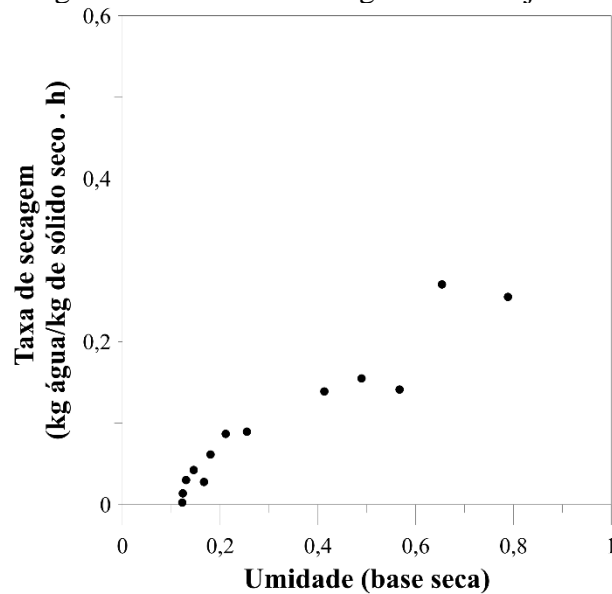
Fonte: Do autor (2021).

Figura 20 - Taxa de secagem leito fluidizado.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 216 - Taxa de secagem leito de jorro.

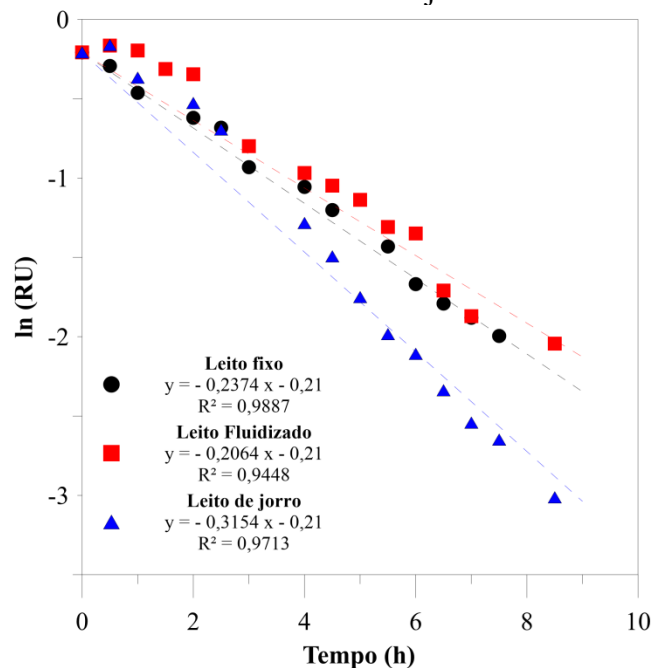


Fonte: Do autor (2021).

4.4 Difusividade efetiva

Conforme apresentado na Seção 3.5.2, a curva de razão de umidade adimensionalizada vs tempo, foi construída e é elucidada na Figura 22, em que é possível observar os pontos utilizados para a linearização e a reta de linearização.

Figura 22 - Regressão linear dos resultados de razão de umidade para leito fixo, leito fluidizado e leito de jorro.



Fonte: Do autor (2021).

A regressão linear teve resultado satisfatório, com valor de R^2 razoavelmente próximo a 1 para o leito fixo. Já no leito fluidizado e leito de jorro, é possível verificar que os valores de R^2 estão próximos a 0,95. A justificativa dos resultados encontrados no leito fluidizado e leito de jorro são devido ao modo com que as amostras foram coletadas, sem um padrão a ser seguido, pois o leito se encontrava em constante movimento. Há também a falta de repetições a fim de validar os dados coletados. De acordo com Mateus (2021), o valor de diâmetro da partícula é calculado pela área superficial de $5,32 \pm 0,57$ mm e, assim, utilizando-se do coeficiente angular obtido, foi possível obter uma difusividade efetiva do leito fixo de $1,88 \cdot 10^{-10} m^2 s^{-1}$.

Já para o leito fluidizado e leito de jorro, os valores obtidos de difusividade efetiva do leito foram, respectivamente, $1,64 \cdot 10^{-10} m^2 s^{-1}$ e $2,51 \cdot 10^{-10} m^2 s^{-1}$. De acordo com Bitti (2020), quando a regressão apresenta R^2 superior a 0,95 o mesmo pode ser considerado para descrever o processo de secagem. Logo, os valores encontrados para difusividade efetiva do leito fixo e de jorro foi de forma satisfatória e efetiva.

Segundo Madamba et al. (1996) para a secagem de produtos agrícolas os valores de difusividade efetiva variam entre $10^{-9} m^2 s^{-1}$ à $10^{-10} m^2 s^{-1}$, o que demonstra que o processo de secagem empregado no presente trabalho está de acordo com a principal literatura utilizada para secagem de grãos. E, de acordo com Zogzas et al. (1996), para alimentos, encontramos os valores na faixa de $10^{-12} m^2 s^{-1}$ a $10^{-8} m^2 s^{-1}$,

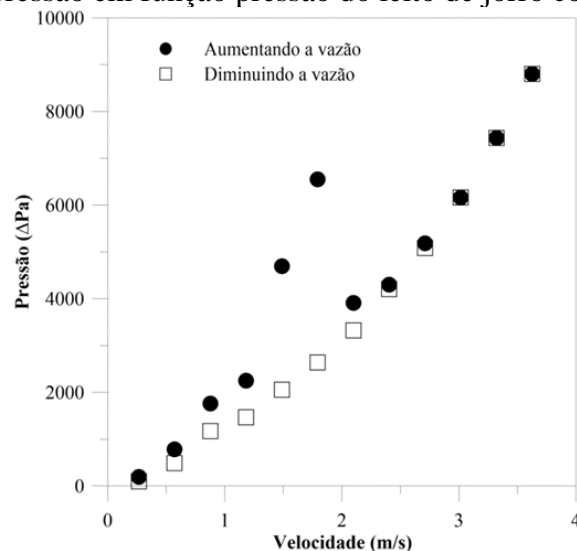
Por fim, Corrêa (2006) realizou a secagem de café cereja e obteve o valor de difusividade efetiva para a secagem a 40°C de $2,91 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, corroborando, assim, com os resultados apresentados no presente trabalho.

4.5 Queda de pressão

Conforme apresentado na Seção 3.3.4, com o aumento da velocidade do ar no leito de jorro, chega-se a um ponto de máxima pressão do leito que se mantém até o início da expansão do leito. Esse comportamento é apresentado na Figura 23.

É possível observar que a queda de pressão máxima correspondente a 6.552 Pa, quando o ar de entrada está na velocidade de 1,79 m/s. Essa queda de pressão máxima ocorreu antes de haver o estabelecimento do jorro e é nessa velocidade do ar que se inicia o movimento de jorro. No processo de decréscimo da velocidade do ar de entrada, é possível verificar que não houve semelhança com a curva de aumento da velocidade do ar de entrada, confirmando o fenômeno de histerese em que as curvas de ida e de volta se diferenciam. Esse fenômeno ocorre porque não é necessária a quebra de pressão do leito para iniciarmos o processo de fluidização na curva de volta.

Figura 23 - Queda de pressão em função pressão do leito de jorro com carga de café úmido.



Fonte: Do autor (2021).

Com o aumento da velocidade do ar de entrada é possível verificar que há um aumento da pressão de forma elevada, justificado pelo fato das partículas estarem coesas devido à ineficácia no processo de despulpamento, fazendo com que o leito tenha pressões elevadas de acordo com a velocidade do ar de entrada. Outro fenômeno que ocorre é o pico muito elevado quando ocorre a quebra do leito e, após esse fenômeno, não há a queda de pressão esperada,

conforme é visto na literatura. Esse mesmo comportamento é observado por Simioni et al. (2015), em que as curvas de pressão permanecem em alta mesmo após o início do jorro. De acordo com o autor, o motivo desse fenômeno é devido a entrada do ar e a elevada umidade inicial dos grãos, pois há uma perda de carga elevada. Esse comportamento também é observado por Nelson e Gay (1969).

Baseado nos experimentos de Mateus (2021), pode-se considerar a densidade real e de densidade de bulk dos grãos de café de, respectivamente, 1.110 kg/m³ e 590 kg/m³. Deste modo, é possível calcular através da Equação 18 a fração de espaços vazios, sendo o valor encontrado de 0,88.

A fluidodinâmica do equipamento foi caracterizada por meio da queda de pressão máxima no leito e, na Tabela 2, é possível verificar os valores encontrados para cada modelo.

Tabela 2 - Queda de pressão máxima (ΔP_{max}).

Experimental (Pa)	Becher (1961) (Pa)	Erro relativo (%)	Yokawa e Isaka (1971) (Pa)	Erro relativo (%)
6.552,98	5.069,54	23%	5.028,97	23%

Fonte: Do autor (2021).

Foi possível obter uma boa relação dos valores experimentais com os valores teóricos para queda de pressão máxima no leito de jorro (Tabela 2), sendo ambos os modelos com o mesmo erro relativo, ou seja, capazes de fornecer a melhor previsão para queda de pressão máxima no leito de jorro. A justificativa do melhor ajuste de um modelo é devido a peculiaridade do leito, em que parâmetros geométricos e dinâmicos do sistema de secagem podem variar ao longo do processo de forma imperceptível.

Evangelista Neto (2013) realizou a secagem de grãos de girassol e o melhor ajuste para queda de pressão máxima foi, também, na equação descrita por Becher (1961) com desvio de 27,7%. O comportamento fluidodinâmico do leito de jorro é utilizado em diversos trabalhos na literatura, como exemplo, há a secagem de feijão verde estudado por Medeiros et al. (2004), em que o regime fluidodinâmico não comportou de maneira estável, conforme o presente trabalho, devido à alta umidade inicial dos grãos.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho realizou a análise da secagem de grãos de café especial, *coffe arábica l. cv. catuai*, em leito fixo, leito fluidizado e leito de jorro, demonstrando que a secagem do café foi realizada com êxito em todos os leitos, obtendo baixos teores de umidade de acordo com as condições operacionais utilizadas. Reforça-se a importância dos dados aqui apresentados devido à escassez de trabalhos na literatura que abrangem a secagem de produtos agrícolas em secadores artificiais.

A secagem com ar à 45°C no leito fixo resultou em pequenos gradientes de temperatura dos grãos, ou seja, em locais com leve variações de umidade ao longo do processo. Contudo, na secagem em leito fluidizado e de jorro, os gradientes de temperatura não foram medidos, pois o leito se encontrava em constante movimento. Mesmo diante das variações de condições de secagem, os leitos apresentaram valor final de umidade coerente entre si, demonstrando a efetividade de cada leito quanto ao tempo de secagem.

Para todos os leitos, a taxa de secagem se mostrou fortemente decrescente no início da operação. Assim, pode-se inferir que o experimento demonstrou resultados satisfatórios visto que o material a ser seco foi o mesmo para os três processos e esse mesmo comportamento também foi observado na literatura por Lima et al. (1995) ao secar grãos de feijão em três diferentes processos.

A regressão realizada para obtenção da difusividade efetiva de cada leito de secagem obteve um R^2 satisfatório para o leito fixo de 0,9887, resultando em uma difusividade efetiva de $1,88 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, coerente com valores previstos na literatura para produtos agrícolas - de acordo com Madamba, et al. (1996). Para os demais leitos, os valores obtidos de difusividade efetiva do leito foram, respectivamente, $1,64 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $2,51 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Por conseguinte, os valores encontrados para difusividade efetiva foram satisfatórios e efetivos para os leitos de secagem utilizados.

Quando analisado sobre a cinética de secagem dos leitos, verificou-se que o melhor ajuste foi encontrado para o leito fixo sendo o modelo de Midilli et al. (2002) com maior valor de R^2 e menor valor de DQM, ajustando-se melhor aos dados observados. Ademais, para o leito fluidizado e leito de jorro, tivemos valores de R^2 próximos a 0,95 nos modelos de Midilli et al. (2002) e Page (1949), podendo ser justificado pela imprecisão em que as amostras foram coletadas durante o experimento.

No estudo da fluidodinâmica do leito de jorro foi analisada a queda de pressão máxima ao aumentar a velocidade do ar de entrada, sendo a mesma de 6.552 Pa. Já no processo de

decréscimo da velocidade do ar de entrada, é possível verificar que não houve semelhança com a curva de aumento da velocidade do ar de entrada, confirmando o fenômeno de histerese. Outro ponto observado é que o comportamento gráfico da variação de pressão no leito de jorro confirma que, devido ao fato das partículas estarem coesas por conta da ineficácia no processo de despulpamento, há um aumento da pressão de forma elevada, sendo esse mesmo comportamento observado também por Simioni et al. (2015). Diante a modelagem fluidodinâmica, o modelo de Becher (1961) e Yokawa e Isaka (1971) apresentaram bom ajuste para a queda de pressão máxima do jorro

Conclui-se que, a secagem em leito fixo, leito fluidizado e leito de jorro ocorre de forma efetiva para grãos de café. Parâmetros obtidos no processo informam o quão satisfatório foram os resultados, pois os valores de diversas literaturas demonstram paridade e proximidade com os obtidos experimentalmente.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados observados no presente trabalho demonstram que a realização da experimentação com variações de altura do leito, vazão do ar de secagem e temperatura de secagem, iriam agregar aos resultados, demonstrando a eficácia da secagem e ajuste das modelagens matemáticas a diferentes parâmetros.

Durante a secagem, os grãos de café são expostos a temperaturas elevadas que podem afetar propriedades físico-químicas. Portanto, sugere-se que seja feita análise físico-química dos grãos secos de cada processo de secagem para validação de sua qualidade. Além disso, a secagem do café é uma etapa importante no processo de obtenção da bebida final, logo, a sugestão é de que haja também a avaliação por meio de análise sensorial da bebida oriunda dos grãos secos.

A queda de pressão máxima obtida para o leito de jorro foi satisfatória, porém o leito não apresentou a curva de comportamento esperado que é vista na maior parte das literaturas, indicando um maior acompanhamento do processo de despulpamento para que a coesão dos grãos seja eliminada e os parâmetros fluidodinâmico sejam melhores ajustados. Uma indicação é a secagem prévia em terreiro ou, de acordo com Palacin (2009), a realização de uma pré-secagem do grão em um secador de camada fixa para que o café apresente a característica de descascado e desmucilado.

REFERÊNCIAS

- AFONSO JÚNIOR, P. C. **Aspectos físicos, fisiológicos e de qualidade do café em função da secagem e do armazenamento**. 2001. 384 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2001.
- ALBINI, G. et al. Secagem de cevada (*Hordeum vulgare*): Análise da difusividade efetiva. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 6098-6105, 2015. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.5151/chemeng-cobeq2014-1634-18305-140306> >. Acesso em: 27 agosto 2021.
- ALMEIDA, C.; ROCHA, S. C. S. Fluidodinâmica de sementes de brócolis em leito fluidizado e leito de jorro. **Scientia Agricola**, v.59, n. 4, p.645-652, 2002. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000400004> >. Acesso em: 06 set. 2021.
- ALMEIDA, F. A. C.; GOUVEIA, J. P. G., J.E.; VILLAMIL, J. M. P.; SILVA, M. M. Secagem natural e artificial de vagens de algaroba. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.27, n.1, p.48-57, 2002. Disponível em: < <http://www.deag.ufcg.edu.br/rbpa/rev5e/Art5e7.pdf> >. Acesso em: 10 set. 2021.
- ALMEIDA, M.M. Processamento de urucum em leito de jorro: Estudos fluidodinâmicos. Campina Grande-PB: Universidade Federal da Paraíba, 1993. 90p. (Dissertação de Mestrado), 1993.
- BECHER, P. Nonionic surface-active compounds IV. Micelle formation by polyoxyethylene alkanols and alkyl phenols in aqueous solution. **Journal of Colloid Science**, v. 16, n. 1, p. 49-56, 1961. Disponível em: < <https://doi.org/10.1021/j100838a025> >. Acesso em: 28 agosto 2021.
- BITTI, V. S. **Modelagem matemática da secagem de café cereja em leito fixo**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Agrícola e Ambiental) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.
- BORGES, Pedro W S. **Readequação da prática de laboratório de engenharia química 1: Leito fluidizado**. 207.34 f. Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação em Engenharia Química). 2017 - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- BROOKER, D.B.; BAKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oil seeds**. Springer Science & Business Media, New York: AVI Book Puvlisher, 450p., 1992.
- CAVATON, T. **Consumo mundial de café ultrapassa 166 milhões de sacas em doze meses**. [2021]. Disponível em: < <https://bityli.com/pbuXh> > Acesso em: 28 ago. 2021
- CELESTINO, S. M. C. **Princípios de secagem de alimentos**. Embrapa Cerrados - Documentos (INFOTECA-E). Planaltina: INFOTECA-E, 2010.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**. CONAB, 2021. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info->

[agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe/item/download/35523_38fae3bc88d9b5f875d991b8be1490da](http://dx.doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v8n1p1-10) > Acesso em: 27 out. 2021.

CORRÊA, P. C. et al. Drying characteristics and kinetics of coffee berry. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.8, n.1, p.1-10, 2006. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v8n1p1-10> >. Acesso em: 10 set. 2021.

CORRÊA, P. C. et al. Modelagem Matemática para a descrição do processo de secagem de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, v.27, p. 501-510, 2007. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000300020> >. Acesso em: 07 set. 2021.

CORRÊA, P. C. et al. Modelagem Matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arábica* L.) durante processo de secagem. **Revista Ceres**, v.57, p. 595-601, 2010. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2010000500005> >. Acesso em: 10 set. 2021.

CREMASCO, Marco Aurélio. **Fundamentos de transferência de massa**. 3. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2016.

EVANGELISTA NETO, A. A. **Secagem de grãos de girassol em leito fixo e em leito de jorro**. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Regionais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

FREIRE, F. B. et al. Study of the Drying Kinetics in Thin Layer: Fixed and Moving Bed, **Drying Technology: An International Journal**, v. 23, n. 7, p. 1451-1464, 2005. Disponível em: < <https://doi.org/10.1081/DRT-200063508> > Acesso em: 20 nov. 2021.

GAY, E. C.; NELSON, P. A; ARMSTRONG, W.P. Flow properties of suspensions with high solids concentration. **AIChE Journal**, v. 15, n. 6, p. 815-822, 1969. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/aic.690150606> >. Acesso em: 30 set. 2021.

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

LIMA, A. C. C.; ROCHA, S.C.S. Análise Experimental da Secagem de Feijão em Leito Fixo, Leito de Jorro e Leito de Jorro Fluidizado. In: XXIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados 1 Maringá, 1995. **Anais [...]**. Maringá: UEM, p. 259-270, 1995.

MARQUES, E. R. et al. Eficácia do teste de acidez graxa na avaliação da qualidade do café arábica (*Coffea arabica* L.) submetido a diferentes períodos e temperaturas de secagem. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, p. 1557-1562, 2008. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000500030> >. Acesso em: 30 set. 2021.

MARRETO, R. N. **Estudo da técnica de leito de jorro convencional para secagem de microcápsulas de caseína e pectina**. 2006. Tese (Doutor em Ciências Farmacêuticas, área de concentração: medicamentos e cosméticos) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

- MATEUS, F. L. B. **Simulação CFD da secagem de cafés especiais em leito fixo e camada espessa**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2021.
- MEDEIROS, Uliana Karina Lopes de. **Estudo da secagem do feijão verde (*Vigna unguiculata* L. Walp)-análise experimental do processo combinado leito fixo/leito de jorro**. 2004. Dissertação (Mestre em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2004.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying technology**, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002. Disponível em: < <https://doi.org/10.1081/DRT-120005864> >. Acesso em: 28 agosto 2021.
- PAGE, G. E. 1949. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. Unpublished M.S. thesis, Purdue University, West Lafayette, Ind., 1949.
- PALACIN, J. J. F. et al. Secagem combinada de café cereja descascado. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 17, n. 3, p. 244- 258, 2009. Disponível em: < <https://doi.org/10.13083/reveng.v17i3.45> >. Acesso em: 28 agosto 2021.
- PARIKH, D.M. Airflow in Batch Fluid-Bed Processing. **Pharma Tech**, v15, n. 3, p. 100-100, 1991.
- PARK, K. J. B. et al. Secagem: fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 16, n. 1, p. 93-127, 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v16n1p93-127> >. Acesso em: 20 set. 2021.
- PESSOA, T. et al. Secagem convectiva de grãos de sorgo em camada fina por secador de leito fixo. **Revista Verde**, v. 6, n. 1, p. 247-255, 2011. Disponível em: < <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/422> >. Acesso em: 23 set. 2021.
- PHITAKWINAI, S.; THEPA, S.; NILNONT, W. Thin-layer drying of parchment Arabica coffee by controlling temperature and relative humidity. **Food Science & Nutrition**, v. 7, p. 2921–2931, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/fsn3.1144> >. Acesso em: 07 set. 2021.
- PORTELLA, J. A.; EICHELBERGER, L. **Secagem de grãos**. Passo Fundo: Empraba Trigo (INFOTECA-E), 2001.
- PRADO, M.E.T.; PARK, K.J.; ALONSO, L.F.T. Shrinkage of dates (*Phoenix dactylifera*). **Drying Technology**, v.18, n.1/2, p. 295-310, 2000. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1080/07373930008917705> >. Acesso em: 11 out. 2021.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande**, v.10, n.1, p.17-26, 2008. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v10n1p17-26> >. Acesso em: 20 nov. 2021.

- RHODES M. **Fluidization of Particles by Fluids**. Austrália: Monash University, 2001.
- SILVA, A. S. et al. Cinética de Secagem em camada fina de banana maçã em secador de leito fixo. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 9, n. 2, p. 107- 115, 2009. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v11n2p129-13> > Acesso em: 10 set. 2021.
- SILVA, L. M. M. et al. Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 17, p. 310-318, 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/1981-6723.3014> >. Acesso em: 30 set. 2021.
- SILVA, V. M. **Estudo da secagem em leito fixo e de jorro do resíduo industrial do processamento de suco de frutas cítricas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- SIMIONI, T. et al. **Estudo comparativo da secagem de microalgas *scenedesmus acuminatus* em camada delgada e leito de jorro**. Dissertação (Mestre em Engenharia Química) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- USTRA, L. A. R. **Secagem de grãos de arroz em leito fluidizado**. 2005. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) –Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2005.
- WONG, A.C. Use of angle of repose and bulk densities for powder characterization and prediction of minimum fluidization and minimum bubbling velocities. **Chemical Engineering Science**, v. 57, n. 14, p. 2635-2640, 2002. Disponível em: < <https://www.researchgate.net/journal/Chemical-Engineering-Science-0009-2509> >. Acesso em: 29 agosto 2021.
- YOKOWA A.; ISAKA, M. Pressure drop and distribution of static pressure in the spouted bed. **Hitachi Zosen Giho**, v. 23, n. 1, p. 47-53, 1971.
- ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, v.14, n.10, p. 2225-2253, 1996. Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/07373939608917205> >. Acesso em: 10 set. 2021.