

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

THALYNE DE ALMEIDA FERREIRA ROCHA

**CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DA SECAGEM DA BORRA DE CAFÉ EM LEITO
VIBROFLUIDIZADO**

SÃO CARLOS

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DA SECAGEM DA BORRA DE CAFÉ EM LEITO
VIBROFLUIDIZADO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Química, área concentrada em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire.

SÃO CARLOS

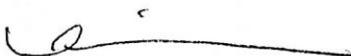
2019

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE THALYNE DE ALMEIDA FERREIRA ROCHA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 15 DE MARÇO DE 2019.

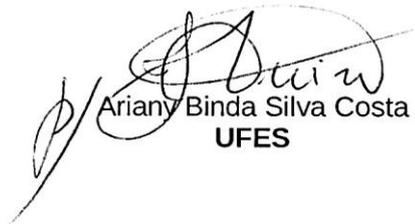
BANCA EXAMINADORA:



José Teixeira Freire
Orientador, UFSCar



Maria do Carmo Ferreira
UFSCar



Ariany Binda Silva Costa
UFES

*À doce Santa Terezinha do Menino Jesus,
dedico.*

AGRADECIMENTOS

Agradecer é antes de tudo um ato de fé, fé na generosidade de quem consegue ir além si mesmo em benefício dos outros, neste sentido segue os agradecimentos.

Ao meu orientador, Professor Freire, pela paciência, incentivo, carinho e principalmente por sua incansável preocupação com a formação humana e acadêmica.

À professora Maria do Carmo, pelo acompanhamento, por ser tão gentil e por cada detalhe ao longo destes dois anos.

Aos técnicos Edilson Milaré, Oscar da Silva e Samuel Ferro por serem sempre solícitos e amistosos.

À professora Ariany Costa por aceitar compor a banca de avaliação.

À Barbara com quem morei durante o mestrado e aos amigos de Alagoas: Karla, Raíssa e Neto, depois que vocês chegaram São Carlos ficou mais feliz.

Aos amigos das disciplinas do mestrado, do Centro de Secagem, da Legião de Maria e do Centro Cultural Paineiras, por serem a minha família e por sempre saber que eu podia contar com vocês.

Aos meus amigos da graduação que a cada volta para casa sempre faziam o possível para compensar o tempo que passamos distantes.

À toda família, por que, só a distância, compreendi a graça de ter um lar, eu amo a todos vocês.

Ao meu irmão, Telmo Olímpio, pelos conselhos, paciência e oração, mas sobretudo, por sermos irmãos.

Aos meus pais, Telmo e Creuza, por todo amor e dedicação muitas vezes acompanhados de firmeza e abnegação.

À Santa Terezinha do Menino Jesus, que tem minha devoção e carinho.

À sempre doce Virgem Maria.

À Deus que aqui em São Carlos se fez mais próximo, toda a minha gratidão.

Por fim, à pós-graduação do Departamento de engenharia química da UFSCar pela oportunidade, ao Centro de Secagem nas pessoas dos professores e pós-graduandos, ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado – processo:132056/2017-8, e à CAPES – código de financiamento 001.

RESUMO

O Brasil é o maior produtor de café do mundo, metade desta produção é destinada a indústria do café solúvel, onde o principal resíduo gerado é a borra do café. A borra sai do processo de fabricação do café solúvel a umidade de 70% (b.u.), a redução da umidade presente é essencial para diminuir custos de armazenamento e transporte, além de aumentar o poder calorífico para queima direta. Então este trabalho caracterizou a borra de café seca e úmida através da análise granulométrica, densidade aparente e bulk, índice de Hausner e porosidade do leito. Fez uma análise da fluidodinâmica da borra de café em função da umidade com o objetivo de delinear o comportamento do material em leito fluidizado, identificando a mudança no comportamento de fluidização entre 40 e 60% de conteúdo de umidade (b.u.). Analisou a elutrição do leito seco classificando as partículas em função da velocidade do ar. Posteriormente fez um estudo do desague por via mecânica obtendo uma redução de umidade de 0,70 para 0,45 (b.u.) da borra, obtendo que a pressão aplicada e o tempo de prensagem exercem influência estatisticamente significativa nesta etapa. Por fim fez-se o estudo da secagem por via térmica com planejamento experimental 2² e tréplica no ponto central em um secador de leito vibrofluidizado utilizando: três configurações vibracionais distintas (vibrofluidizado com $\Gamma=4$ formado por $A=0,015\text{m}$ e $f=8,14\text{Hz}$; vibrofluidizado, $\Gamma=4$ para $A=0,003\text{m}$ e $f=18,20\text{Hz}$ e leito fluidizado, $\Gamma=0$), a velocidade do ar entre 4 e 6 U_{mf} e temperatura entre 50 e 70°C. Com um planejamento para cada configuração pode-se verificar estatisticamente as principais respostas do sistema: taxa de alimentação, produção de elutriado, umidade e diâmetro das partículas. Para as baixas velocidades do ar foram obtidas altas taxas de alimentação e aumento da produção de elutriado favorecido principalmente pela amplitude de vibração de 0,003mm. Em todos os ensaios foram obtidas umidades a baixo de 30% onde já se tem queima eficiente na caldeira industrial. Ao se avaliar o diâmetro do pó para escoamento e queima, as melhores condições foram encontradas à altas velocidades e temperaturas e maior amplitude de vibração.

PALAVRAS-CHAVE: Borra de café; secagem; fluidização; leito fluidizado; leito vibrofluidizado; fluidodinâmica.

ABSTRACT

Brazil is the largest producer of coffee in the world, half of this production is destined to the soluble coffee industry, that generates a amount of waste. The spent coffee grounds leave the fabrication process of the soluble coffee with 70% (w.b.) moisture content, the reduction of moisture present is essential to reduce storage and transport costs, as well as increase the heating value for direct burning. This work presents characterized the dry and wet spent coffee grounds, through particle size analysis, apparent and bulk density, Hausner index and bed porosity. The analysis of the fluid dynamics of coffee grounds as a function of moisture content was done, with the purpose of delineating the behavior of the fluidized bed material, identifying the change in fluidization behavior between 40 and 60% moisture content (w.b.). It analyzed the dry bed elutriation by classifying the particles depending on the speed of the air. Subsequently a mechanical dewatering study was carried out, obtaining a moisture reduction of 0.70 to 0.45 (w.b.) of the spent coffee grounds, obtaining that the pressure applied and the pressing time exerts a statistically significant influence in this step. Finally, the study of thermal drying with experimental design 2^2 and replica at the central point in a vibrated fluid bed dryer using three different vibrational configurations (vibrofluidized with $\Gamma=4$ formed by $A=0.015\text{m}$ and $f=8.14\text{Hz}$; vibrofluidized, $\Gamma=4$ for $A=0.003\text{m}$ and $f=18.20\text{Hz}$ and fluidized bed, $\Gamma=0$) using the air velocity between 4 and 6 U_{mf} and temperature between 50 and 70°C. Through the individual planning of each configuration one can verify statistically the main responses of the system: feed rate, elutriate production, moisture content and particle diameter. For the low air velocities, high feed rates and increased elutriate production were obtained, favored mainly by the vibration amplitude of 0.003mm. In all tests, moisture was obtained below 30%, where the industrial boiler has already been burned efficiently. When evaluating the diameter of the powder for flow and burning, the best conditions were found at high speeds and temperatures and greater amplitude of vibration.

KEYWORDS: Spent coffee grounds; drying; fluidization; fluidized bed; vibrofluidized bed; fluid dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fruto do café.....	19
Figura 2 - Processo de fabricação do café solúvel.....	20
Figura 3 - Curva de Secagem: conteúdo de umidade em função do tempo.	26
Figura 4 - Taxa de secagem em função da umidade.....	26
Figura 5 - Regimes de fluidização.....	30
Figura 6 - Diagrama de Geldart.....	31
Figura 7 - Regimes de fluidização.....	33
Figura 8 - Curva fluidodinâmica de queda de pressão no leito ideal em função da velocidade superficial do ar.	34
Figura 9 - Curvas fluidodinâmicas: queda de pressão em função da velocidade do ar.....	37
Figura 10 - Fração de sólidos em função da posição ao longo da espessura da torta.....	39
Figura 11 - Secador de leito vibrofluidizado do Centro de Secagem DEQ/UFSCar.	42
Figura 12 - Adaptação do leito e acoplamento do alimentador.	44
Figura 13 - Distribuição granulométrica da borra seca.	53
Figura 14 - Umidade adimensional em função do tempo.....	54
Figura 15 - Taxa de secagem em função do teor de umidade.	55
Figura 16 - (a) escoamento pistonado da borra úmida (b) fluidização da borra seca (c) teste borra e polipropileno (d) fluidização da borra úmida na presença da borra seca.....	56
Figura 17 - Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para a borra de café seca.....	57
Figura 18 - Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar: borra de café seca, partículas de polipropileno e de vidro.	57
Figura 19 - Curva fluidodinâmica para a fluidização da borra de café parametrizada na umidade: queda de pressão e flutuações em função da velocidade do ar.....	59
Figura 20 - Fração de sólidos seco elutriada em função da razão U/U_{mf}	60
Figura 21 - Distribuição granulométrica do elutriado parametrizado na velocidade imposta ao leito.	61
Figura 22 - Umidade da borra em função da pressão aplicada: dados experimentais e ajuste do modelo.	63
Figura 23 -Deslocamento do pistão em função da pressão aplicada.	65
Figura 24 - Vazão de alimentação em função da U/U_{mf}	68

Figura 25 - Diagrama de Pareto para a influência de T e U_s na vazão de alimentação para: (a) configuração 1 e (b) configuração 2.....	69
Figura 26 - Produção de elutriado em função do tempo (a)temperatura de 50° e (b)temperatura de 70°.....	72
Figura 27 - Diagrama de Pareto para a influência de T e U_{mf} na fração de elutriado: (a)configuração 1, (b)configuração 2 e (c)configuração 3.	74
Figura 28 - Diagrama de Pareto para a influência de T e U_{mf} no conteúdo de umidade: (a)configuração 1 e (b)configuração 2.....	76
Figura 29 - Umidade do elutriado em função do tempo (a)temperatura de 50° e (b)temperatura de 70°.....	77
Figura 30 - Fração de finos em função do diâmetro de Sauter.....	80
Figura A1 - Taxa de produção de elutriado em função do tempo para a configuração 1 ($\Gamma=4$, $A=0,015m$ e $f=8,14Hz$).	89
Figura A2 - Teor de umidade em função do tempo para a configuração 1 ($\Gamma=4$, $A=0,015m$ e $f=8,14Hz$).	89
Figura A3 - Taxa de produção de elutriado em função do tempo para a configuração 2 ($\Gamma=4$, $A=0,003m$ e $f=18,20Hz$).	90
Figura A4 - Teor de umidade em função do tempo para a configuração 2 ($\Gamma=4$, $A=0,003m$ e $f=18,20Hz$).	90
Figura A5 - Taxa de produção de elutriado em função do tempo para a configuração 3 ($\Gamma=0$)..	91
Figura A6 - Teor de umidade em função do tempo para a configuração 3 ($\Gamma=0$).	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estudos sobre aplicações da borra de café.	23
Quadro 2 - Considerações sobre o acoplamento alimentador leito.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da borra de café.	21
Tabela 2 - Poder calorífico de biomassas da indústria brasileira.	22
Tabela 3 - Equações de cinética de secagem.	28
Tabela 4 - Planejamento experimental para análise da influência de pressão e tempo de prensagem.	47
Tabela 5 - Planejamento experimental para análise da influência da temperatura e da velocidade do ar na secagem.	51
Tabela 6 - Dados de caracterização da borra de café.	52
Tabela 7 - Valores de R^2 e RSME do ajuste dos dados experimentais aos modelos de secagem.	55
Tabela 8 - Diâmetro de Sauter das amostras do pó elutriado relacionado com a velocidade superficial do ar.	62
Tabela 9 - Dados de umidade para testes de prensagem contínua.	65
Tabela 10 - Análise estatística da influência da pressão e tempo sobre a umidade.	66
Tabela 11 - Vazão de alimentação calculada por balanço de massa para as 3 configurações experimentais.	67
Tabela 12 - Capacidade de escoamento para as 3 configurações experimentais.	70
Tabela 13 – Taxa de produção de elutriado para as 3 configurações experimentais.	70
Tabela 14 - Altura final do leito para as 3 configurações experimentais.	72
Tabela 15 – Fração elutriada para as 3 configurações experimentais.	73
Tabela 16 - Conteúdo de umidade para as 3 configurações experimentais.	75
Tabela 17 – Diâmetro de Sauter do elutriado.	79

NOMENCLATURA

A	Amplitude de vibração	m
a	Parâmetro de ajuste	-
b	Parâmetro de ajuste	-
c	Parâmetro de ajuste	1/MPa
d_p	Diâmetro médio da partícula	mm
\bar{d}_s	Diâmetro médio de Sauter	mm
f	Frequência de vibração	Hz
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
IH	Índice de Hausner	-
m	massa	g
Q	Vazão Volumétrica	m ³ /min
T	Temperatura	°C
U	Velocidade do ar	m/s
U_{mf}	Velocidade de mínima fluidização	m/s
x_i	Fração de sólidos de tamanho i retidos na peneira	-
XR	Adimensional de umidade	-
Γ	Adimensional de vibração	-
Δh	Diferença de altura no deslocamento de água no medidor de venturi padrão	cm
ρ	Massa específica	g/m ³
ε	Porosidade	-

subscrito

a	Aparente
exp,i	Dado experimental i
f	Dado final
lb	Leito aerado
pre,i	Dado previsto i pela equação
s	seco
t	Dado no tempo t

tb	Leito compactado
u	Úmido
0	Inicial

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE QUADROS	x
LISTA DE TABELAS.....	xi
NOMENCLATURA.....	xii
SUMÁRIO.....	xiv
CAPÍTULO 1	16
INTRODUÇÃO.....	16
CAPÍTULO 2 – A BORRA DE CAFÉ	18
2.1 O processamento do café	18
2.2 A borra do café.....	21
2.3 Aplicações do resíduo	22
CAPÍTULO 3 – ASPECTOS SOBRE SECAGEM E FLUIDODINÂMICA.....	25
3.1 Cinética de Secagem.....	25
3.2 Leito Fluidizado	28
3.2.1 Regimes de Fluidização.....	29
3.2.2 Classificação de Geldart.....	31
3.2.3 Velocidade de mínima fluidização	33
3.3 Leito vibrofluidizado	34
3.4 Redução de umidade por via mecânica.....	38
CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1 Descrição do material	40
4.2 Caracterização.....	40
4.2.1 Distribuição granulométrica.....	40
4.2.2 Massa específica.....	41
4.2.3 Umidade	41

4.2.4	Massa específica do leito.....	41
4.2.5	Índice de Hausner (IR)	41
4.3	Unidade experimental	41
4.4	Procedimentos experimentais	44
4.4.1	Testes preliminares.....	44
4.4.2	Redução do teor de umidade por prensagem.....	46
4.4.3	Considerações sobre o acoplamento alimentador e leito.....	48
4.4.4	Secagem.....	50
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES		52
5.1	Caracterização.....	52
5.2	Testes preliminares	54
5.2.1	Cinética de secagem.....	54
5.2.2	Testes de fluidização com inertes	56
5.2.3	Influência da umidade na fluidodinâmica do leito.....	58
5.2.4	Elutriação do leito seco em função da velocidade superficial do ar	60
5.3	Redução do teor de umidade por prensagem	62
5.3.1	Prensagem rápida.....	62
5.3.2	Análise da influência do tempo de prensagem	65
5.4	Sistema de alimentação.....	66
5.5	Secagem.....	70
5.5.1	Produção de elutriado	70
5.5.2	Conteúdo de umidade	74
5.5.3	Diâmetro da partícula.....	78
CAPÍTULO 6		81
CONCLUSÕES		81
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS		82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		83
APÊNDICE A.....		90

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O café é um importante produto agrícola mundial, atingindo na safra 2015/16 a produção de 153 milhões de sacas de 60kg, das quais o Brasil, que é o maior produtor do mundo, foi responsável por 52 milhões (ICO, 2018). Desta forma o café está entre os principais produtos agrícolas do país, junto com a cana-de-açúcar, a soja, o milho e outros. Os estados de Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Bahia, Rondônia e Paraná, juntos respondem por 98% da produção nacional (CONAB, 2017).

Parte da produção é destinada à indústria do café instantâneo e a outra vai para cafeterias, restaurantes e lares, onde o café é feito diretamente a partir do grão processado (CRUZ et al., 2012). Por ter grande demanda, a indústria do café também gera grande quantidade de resíduos. A borra do café, principal resíduo da indústria do café solúvel, é um sério problema ambiental, por apresentar alto teor de compostos orgânicos (PUJOL et al., 2013) os resíduos são poluentes e necessitam de oxigênio para se degradar, além disso a presença de cafeína, taninos e polifenóis confere natureza tóxica, dificultando a sua deposição em aterros sanitários (MUSSATTO et al.; 2011).

Diante desses problemas ambientais, várias vias de utilização da borra de café vêm sendo estudadas com intuito de dar um destino viável e rentável a este resíduo, tais como sua utilização como biomassa para a produção de biocombustíveis: biodiesel obtido por transesterificação, bio-óleo e biochar obtidos por pirolise lenta (VARDON et al., 2013), bio-álcool obtido por fermentação (ROCHA et al., 2014) e uso como combustível sólido em caldeiras, por queima direta (KANG et al., 2017). Também tem usos como fertilizantes na agroindústria (CRUZ et al., 2014), ração animal (SEO et al., 2015), carvão ativado (JUNG et al. 2016), adsorvente (FRANCA et al., 2009) e como matéria prima para a extração de compostos fenólicos (ZUORRO e LAVECCHIA, 2012).

No entanto, entre esses destinos para o resíduo, o único que vem de fato sendo aplicado industrialmente é a reutilização da borra como combustível sólido para as próprias caldeiras da indústria do café solúvel. Ao sair dos percoladores onde o café é extraído, a borra passa por

uma etapa de prensagem para diminuir a umidade de 80% para 50%, segue para um secador onde sua umidade é diminuída de 50% para 25%, para posteriormente ser queimada nas caldeiras (SILVA et al., 1998). A diminuição do teor de água é importante para aumentar o poder calorífico da borra e a eficiência das caldeiras (KANG et al.; 2017). Apesar da importância da secagem no aprimoramento do resíduo para a queima, poucos trabalhos são encontrados na literatura sobre a secagem da borra de café.

Pelas características da borra de café, diferentes tipos de secadores podem ser utilizados, como o rotativo, leito fixo, pneumático, ciclone e os de leito fluidizado, contudo devido ao caráter pastoso da borra úmida, vê-se a necessidade de estudo das condições de secagem apropriadas para esse material, tendo em vista as suas possíveis aplicações posteriores e o seu processamento em escala industrial. Segundo Silva et al. (1998), das 7 plantas de café solúvel analisadas pelos autores, todas poderiam ter o processo de queima da caldeira melhorado para atingir eficiências maiores através apenas do aperfeiçoamento da etapa de secagem.

O secador de leito fluidizado tem aplicações bastante amplas nos processos industriais devido as suas elevadas taxas de remoção de umidade por unidade de volume do secador, a uniformidade do produto final e a facilidade de transportar o material, além de ser recomendado seu uso para a secagem de algumas pastas (LAW e MUJUNDAR, 2006). Por outro lado, a adição de vibração mecânica reduz a velocidade mínima de fluidização, diminui o volume das bolhas formadas, minimiza o aparecimento de zonas mortas, aglomerações e canais preferencias e possibilita a fluidização de materiais adesivos, coesivos e pastosos (MEILI, 2009). No entanto a secagem térmica é sempre muito dispendiosa e representa um grande consumo energético industrial, assim pré-tratamentos como a redução do teor de água por via mecânica, além de modificar as características reológicas do material no sentido de melhorar a qualidade da fluidização, representam um ganho energético para o processo.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivos uma análise fluidodinâmica da borra de café em função da umidade para caracterizar o seu comportamento fluidodinâmico no leito fluidizado, efetuar um estudo da secagem por via mecânica para reduzir o seu teor de umidade como uma etapa que antecede a secagem térmica, e avaliar a secagem em leito vibrofluidizado através da umidade, da produção e da granulometria do pó, identificando condições de secagem adequadas para este material.

CAPÍTULO 2

A BORRA DE CAFÉ

Neste capítulo serão abordados o processamento industrial do grão do café e o seu destino com ênfase na indústria do café solúvel, a produção de borra e os principais avanços científicos para aplicações deste resíduo.

2.1 O processamento do café

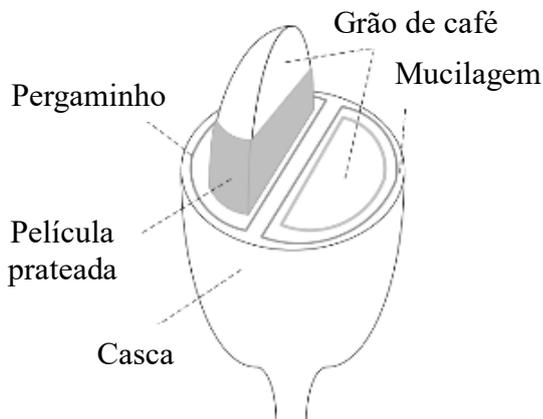
Existe uma variedade de espécies de café pertencentes ao gênero *coffea*, mas as espécies *coffea arabica* (café arábica) e *coffea canephora* (café robusta ou conilon) são as mais cultivadas no mundo, e ambas representam bem a totalidade do café comercializado. O café arábica tem seu cultivo favorecido por altitudes elevadas e temperaturas mais amenas, entre 18 e 21°C, seu teor de cafeína é em torno de 1,2%. Já o café robusta é de regiões mais quentes, úmidas e de baixas altitudes, seu teor de cafeína é aproximadamente 4%. Por ter maior teor de cafeína o café robusta é direcionado para a indústria do café solúvel e da cafeína, matéria-prima para indústria farmacêutica e alimentícia, além de ser torrado e moído (GUERREIRO et al., 2007).

Cada fruto contém dois grãos de café encapsulados por uma fina película prateada, que por sua vez é revestida por outra camada pergaminho. O pergaminho está em contato direto com a polpa do fruto, ou mucilagem, que por fim é recoberta por uma casca externa, o exocarpo (Figura 1). O produto de maior interesse comercial são os grãos, esses representam 50-55% da matéria seca do fruto, assim todo material remanescente é subproduto do processamento (FRANCA e OLIVEIRA, 2016; ALVES, 2007).

Em geral, o processamento do café está dividido em dois: o processamento primário e o secundário. O processamento primário envolve as operações pós-colheita até que o grão de café seja obtido, o que pode ser feito por via seca ou molhada. Por via seca, o fruto depois de colhido é seco até uma umidade de aproximadamente 10-11% e então o grão é separado pela remoção dos revestimentos. Por via molhada, o fruto é primeiro descascado, depois passa por uma etapa de fermentação para melhor retirada da polpa, por fim é seco, e segue para ser torrado e moído.

A depender do método adotado, os subprodutos destas etapas também mudam (FRANCA; A. S.; OLIVEIRA, 2016).

Figura 1 - Fruto do café.

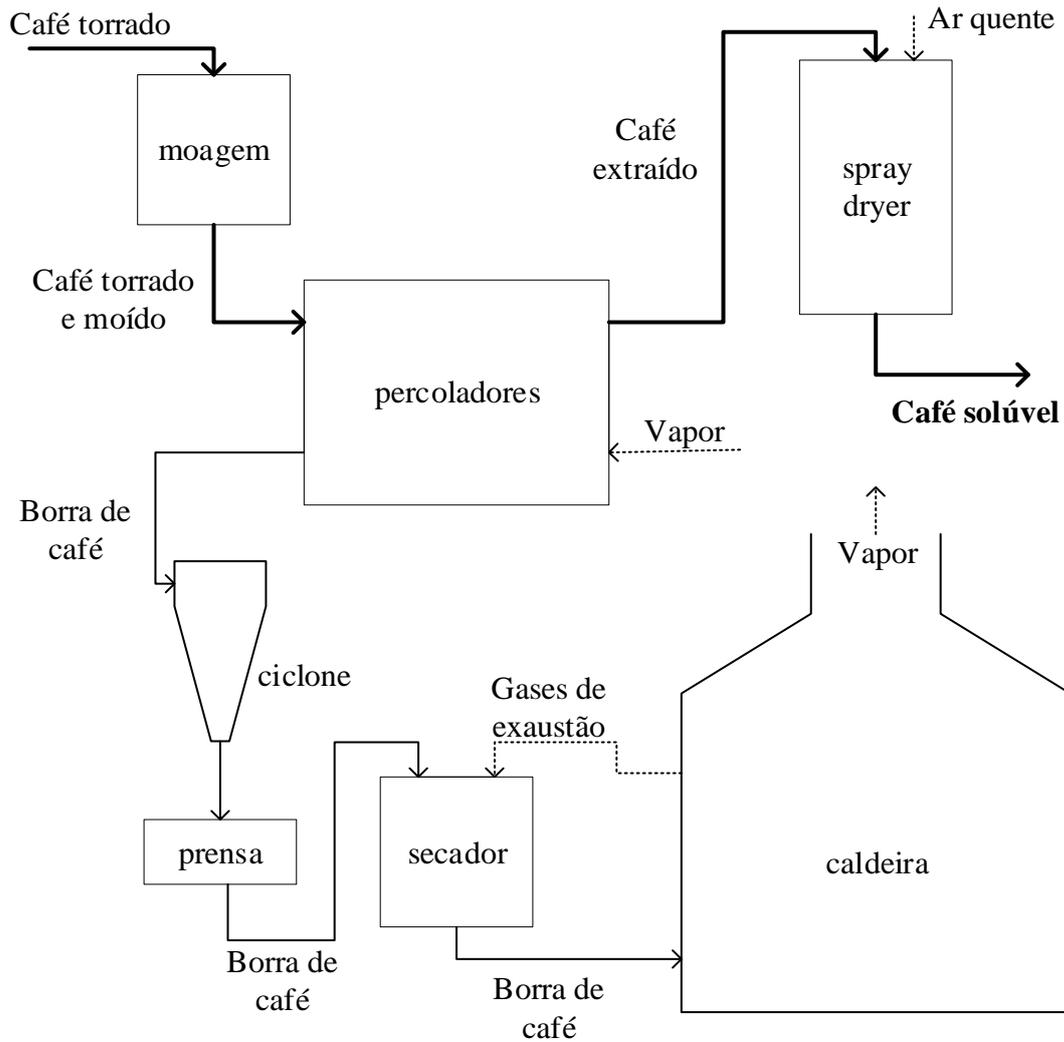


Fonte: Adaptado de FRANCA e OLIVEIRA, 2016.

O processamento secundário é o que se refere à produção de café instantâneo (Figura 2), os grãos torrados e moídos são introduzidos em percoladores contracorrente com água quente pressurizada para extração das substâncias solúveis. O extrato é seco por *spray drying* ou liofilização para obtenção do café solúvel ou instantâneo, respectivamente (FRANCA; OLIVEIRA, 2016). O resíduo sólido da extração, a borra do café, tem teor de umidade de 75-80% (ADAMS; DOUGAN, 1987), é encaminhado para um ciclone para separar a borra do vapor de exaustão, em seguida para uma prensa parafuso onde a umidade é reduzida a 50% e depois para um secador. Normalmente, a borra serve de combustível sólido para a caldeira, assim no secador a umidade da borra é reduzida para 25-30% afim de melhorar a eficiência de queima na fornalha e evitar o uso de combustível auxiliar (SILVA et al., 1998), no entanto umidades inferiores a 15% são indesejáveis pelo risco de combustão espontânea (SIVETZ, 1963).

A caldeira poderia queimar a borra molhada da maneira que ela sai dos percoladores, mas para isso seriam necessárias grandes câmaras de combustão, excesso de ar e de combustível auxiliar para manter a temperatura para secagem na mesma câmara em que a borra seria queimada. O combustível suplementar e o aumento da capacidade de ventilação têm alto custo, fazendo com que a combustão da borra molhada seja ineficiente e cara (SIVETZ, 1963).

Figura 2 - Processo de fabricação do café solúvel.



Fonte: Adaptado de SILVA et al., 1998.

Silva et al. (1998) estudaram 7 plantas de produção de café solúvel no Brasil, todas utilizam a borra como combustível para a caldeira e fazem a etapa de prensagem, cinco utilizam secadores de leito fluidizado, apenas uma utiliza o tambor rotativo, e outra encaminha a borra da prensa direto para a caldeira. Neste trabalho é relatado também que nenhuma fábrica atingiu eficiência adequada para queima de biomassa, que é 65 a 85%, o que indica que em todos os casos o processo pode ser melhorado. Sivertz (1963) relata que as indústrias norte-americanas utilizam secadores rotativos com tubos após a etapa de prensagem e secadores de leito fluidizado que reduzem a umidade de 70 para 25%, sem a etapa de prensagem. Viotto (1991) comparou a secagem da borra em leito fluidizado e pneumático, relata inúmeras dificuldades de fluidização e opta pelo segundo como economicamente mais viável. Por fim, Silva (1991) e Santos (2009) experimentalmente estudam a secagem da borra em secador ciclônico de

diferentes geometrias obtendo resultados concordantes, e que mostram que o ciclone é uma alternativa eficiente e adequada para a secagem da borra.

2.2 A borra do café

Estima-se que 1 tonelada de grãos de café produza 480kg de borra (assumindo 20% de perda na torra e 40% de eficiência na extração), assim o destino deste resíduo é um fator importante, e a expansão do mercado do café instantâneo conduz à produção de quantidades crescentes dele (ADAMS e DOUGAN, 1987).

A Tabela 1 mostra a composição da borra do café expresso de cafeterias que correspondem a blends de grãos Arábica/Robusta em proporções desconhecidas e a da borra de café industrial (robusta). Nota-se que a composição química da borra varia pouco, levando em consideração o fato de ser um produto agrícola que facilmente muda a sua composição química a depender da região da plantação, dos nutrientes do solo e das condições climáticas. A borra oriunda do processo industrial tem menor teor de cafeína, isso se deve à melhor extração alcançada na indústria, onde as condições de temperatura e pressão são mais controladas. Por outro lado, apesar do maior rigor industrial, as gorduras ficam mais retidas no processo industrial. Sendo o café uma bebida pobre em gorduras, porque a extração é feita com água que não é solúvel na composição lipídica, estudos apontam o uso da borra de café para a produção de biodiesel.

Tabela 1 - Composição química da borra de café.

Componente da borra	Expresso	Industrial
(g/100g)	Cruz et al. (2014)	Martinez-Saez et al. (2017)
Nitrogênio	2,3	1,79
Proteína	14,2	11,2
Gorduras totais	12,5	24,3
Cafeína	0,453	0,2
Cinzas totais	1,9	0,5
Minerais	1,3207	-
Ácidos clorogênicos totais	0,479	0,33

Fonte: Autor, 2017.

Outro aspecto relevante da borra de café é o seu poder calorífico, a característica mais importante de um combustível. Comparando o poder calorífico inferior de várias biomassas e alguns combustíveis fósseis, observa-se que a borra de café a 10% de umidade tem poder calorífico em torno de 20 MJ/kg e que é menor somente que o da gasolina (47 MJ/kg), do gás natural (39 MJ/kg), do carvão (26 MJ/kg) e o da colza (24 MJ/kg), entre os materiais estudados por Kang et al. (2017). A Tabela 2 apresenta uma comparação entre as biomassas mais comuns exploradas nas indústrias brasileiras como biocombustível sólido, e o poder calorífico da borra é o maior entre os comparados, maior inclusive que o do bagaço da cana de açúcar.

Tabela 2 - Poder calorífico de biomassas da indústria brasileira.

Biomassa	Poder calorífico superior (MJ/kg)
Casca de arroz	15,6
Bagaço de cana de açúcar	16,7
Serragem	18
Borra de café	21,8

Fonte: SANCHEZ; LORA, 1994.

Como o poder calorífico diminui à medida que o teor de água aumenta, o poder calorífico da borra cai para 8MJ/kg para umidades próximas a 60% (Kang et al., 2017), semelhante à umidade com que a borra sai dos percoladores, assim se faz necessário um processo de secagem para que, reduzindo a umidade, o poder calorífico da borra aumente e a queima na caldeira seja mais eficiente.

2.3 Aplicações do resíduo

Tendo em vista a sua composição química e o seu caráter tóxico, muitos estudos científicos vêm sendo realizados nos últimos anos para avaliar a viabilidade de possíveis aplicações da borra. Estes estudos são apresentados no Quadro 1, para ressaltar as diversas aplicações.

Quadro 1 - Estudos sobre aplicações da borra de café.

Autor, Ano	Aplicação	Observações e Conclusões
FRANCA et. al, 2009	Adsorvente de azul metileno de soluções aquosas.	O estudo indica que a borra de café é um adsorvente de custo baixo e adequado para a remoção de corantes catiônicos.
JEGUIRIM et. al, 2014	Pelletes de borra de café, de serragem e da mistura dos dois para a produção de energia.	Mostra que as características térmicas dos pellets de borra de café são da mesma ordem de grandeza de outras biomassas convencionais, apontando-a como biocombustível promissor.
ROCHA et al., 2014	Produção de biodiesel e etanol.	O óleo foi extraído da borra de café por ultrassom assistido, este mostrou viabilidade para produção de biodiesel e a borra livre de óleo para a produção de etanol por fermentação com <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .
CRUZ et al., 2014	Melhoramento da composição elementar de vegetais.	A adição de 5%(v/v) de borra ao solo melhora o teor elementar de potássio, manganês, magnésio e sódio nos vegetais cultivados.
CHO et al., 2015	Processo de pirólise.	Identifica uma influência significativa da presença de CO ₂ durante a pirólise para alcançar um aumento da eficiência térmica na gaseificação.
PARK et al., 2016	Produção de biodiesel por transesterificação <i>in-situ</i> .	Mostra a viabilidade da produção do biodiesel a partir do óleo extraído e que o aumento de umidade da borra de café diminui a produção relativa de biodiesel.
PHIMSEN et al., 2016	Extração de óleo para a produção de biodiesel hidratado.	O óleo extraído com hexano apresentou alto teor de ácidos graxos (6,14%), o biodiesel produzido alcançou propriedades consistentes com as especificações comerciais.
YANG et al., 2016	Liquefação hidrotérmica da borra para a produção de bio-óleo.	O bio-óleo foi produzido em um compressor quente de água, foi avaliada temperatura, tempo, razão mássica e pressão da reação, a melhor condição de bio-óleo produzido, este teve poder calorífico da ordem de 30 MJ/kg.
LÓPEZ-BARRERA et al., 2016	Fonte de compostos fermentáveis que inibem	Mostra que a borra é rica em fibras dietéticas que podem ser fermentadas pela microbiota do

	inflamações no colón do intestino <i>in vitro</i> .	colón produzindo ácidos graxos de cadeias curtas que previnem inflamações.
DAVILA-GUZMAN et al., 2016	Adsorvente de metais pesados.	Mostra a viabilidade do uso da borra de café como adsorvente de baixo custo em um sistema contínuo de remoção de íons Cd ⁺² , Cu ⁺² e Pb ⁺² contidos em águas residuais.
BALLESTEROS et al., 2017a	Extração de compostos fenólicos antioxidantes.	Sob condições otimizadas de temperatura, razão sólido líquido e tempo de extração, constata que a auto hidrólise (usando somente água como solvente) é um método eficiente para extração dos compostos fenólicos da borra de café.
BALLESTEROS et al., 2017b	Encapsulação dos compostos fenólicos extraídos da borra de café	Mostra a viabilidade da encapsulação usando diferentes materiais de recobrimento dos compostos fenólicos por freeze-drying e spray-drying, apontando para a melhor resultado obtido no spray-drying com recobrimento de maltodextrina.

CAPÍTULO 3

ASPECTOS SOBRE SECAGEM E FLUIDODINÂMICA

Este capítulo trata dos principais aspectos envolvidos neste trabalho com relação à redução do teor de umidade, inicia-se abordando a cinética de secagem, descreve os principais aspectos do leito fluidizado, os regimes de fluidização e fluidodinâmica, em seguida descreve o leito vibrofluidizado e a sua fluidodinâmica, e por fim apresenta a redução de umidade por via mecânica.

3.1 Cinética de Secagem

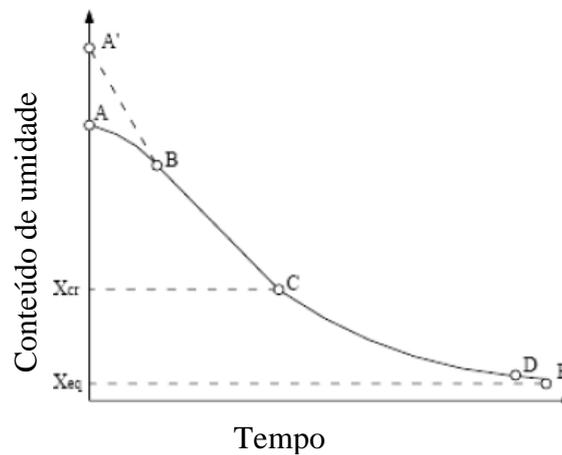
A secagem é uma operação unitária presente em muitos setores da indústria, pode estar presente nas etapas intermediárias do processo, mas geralmente está inserida nas etapas finais do processamento do produto, uma vez que a remoção da água do produto final controla as condições e reduz custos de estocagem, armazenamento e transporte. Processos de secagem podem ser classificados basicamente em dois tipos: naturais e artificiais. A secagem natural ocorre ao ar livre, é um processo relativamente simples pois consiste na exposição do material à radiação solar e ao vento natural, é muito comum esse tipo de secagem em produtos agrícolas como após a colheita do grão de café, no entanto requer grandes áreas de exposição e não há controle das variáveis devido à dependência das condições climáticas. Na secagem artificial por sua vez, são utilizados equipamentos com controle das condições do processo, que proporcionam um produto com características finais mais uniformes em tempos de secagem reduzidos.

Durante a secagem do material úmido ocorre simultaneamente a transferência de calor e massa entre o sólido e o agente secante. A cinética de secagem está associada à mudanças médias no teor de umidade durante o tempo de secagem de uma batelada (STRUMILLO e KUDRA, 1986). As curvas de cinética de secagem são apresentadas nas Figuras 3 e 4, na

primeira, tem-se o teor de umidade em função do tempo de secagem e na segunda a taxa de secagem em função do conteúdo de umidade.

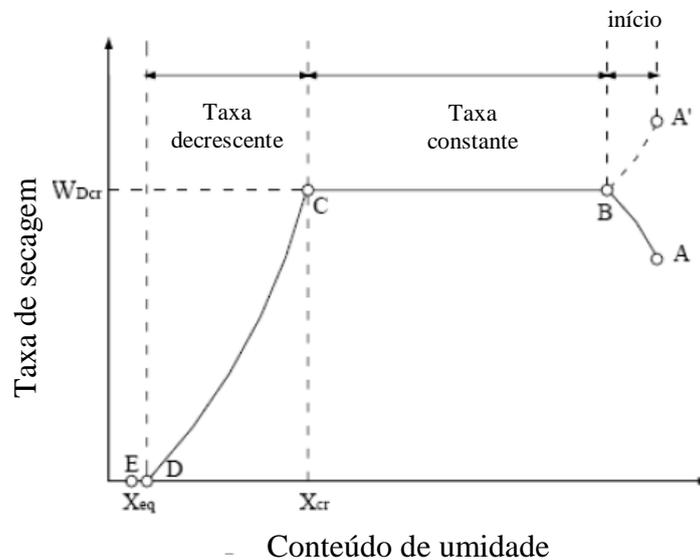
O período de A-B ou A'-B é chamado de período de secagem inicial e consiste na estabilização da temperatura do material úmido com a temperatura do ar de secagem, quando o ar de secagem é mais quente que sólido tem-se o intervalo A-B, que na Figura 4 é uma curva crescente, mas se o ar de secagem está a uma temperatura inferior então esse período passa a ser decrescente, simbolizado por A'-B.

Figura 3 - Curva de Secagem: conteúdo de umidade em função do tempo.



Fonte: Adaptado de STRUMILLO e KUDRA, 1986.

Figura 4 - Taxa de secagem em função da umidade.



Fonte: Adaptado de STRUMILLO e KUDRA, 1986.

No seguimento B-C toda a superfície externa do sólido está saturada de água, então a secagem ocorre pela a evaporação do líquido puro, de modo que o coeficiente angular da reta B-C da Figura 3 corresponde à taxa de evaporação constante da Figura 4, por isso este período é chamado de período de taxa constante. Então a temperatura do sólido atinge a temperatura de bulbo úmido, a massa de água retirada da superfície do sólido pelo agente secante é substituída pela água do interior do sólido e o mecanismo do deslocamento do líquido varia acentuadamente com a estrutura do sólido. Nos sólidos com espaços vazios mais abertos, possivelmente o movimento será controlado pela tensão superficial e pelas forças de gravidade no interior do sólido; já nos sólidos com estrutura fibrosa ou amorfa, o movimento do líquido deverá ocorrer por difusão. No ponto C, o teor de umidade do sólido é o mínimo possível (X_{cr}) para suprir a totalidade da superfície, a partir deste ponto taxa de secagem é controlada pelas condições internas de transporte, que dependem do gradiente da concentração de umidade. A partir de C, inicia-se o primeiro período de taxa decrescente, C-D, nesse período a superfície fica vagarosamente mais pobre em líquido porque a velocidade de transferência de líquido do interior para a superfície é menor que a da superfície para o meio externo. Até que se chega ao ponto D, quando não há mais água na superfície do sólido, e deste ponto em diante o vapor que está nos níveis mais internos da amostra migra para a superfície, que não está saturada, por difusão, esse mecanismo é muito lento em comparação com a transferência convectiva. X_E é o conteúdo de umidade no equilíbrio, onde a secagem cessa, ele é atingido quando a pressão de vapor da água se iguala a do gás secante (FOUST et al., 1982).

Como a secagem é um processo complexo e dependente dos fenômenos convectivo e difusivo para a transferência de calor e massa, modelos físicos que descrevam a umidade em função do tempo de secagem também são muito complexos e estão sempre sujeitos a simplificações. É muito importante que o modelo descreva a cinética de secagem de forma eficiente, assim no lugar de modelos físicos é comum adotar modelos matemáticos empíricos e semiempíricos (Tabela 3) para descrever o processo e obter melhor ajuste aos dados experimentais.

Tabela 3 - Equações de cinética de secagem.

Referência	Modelo	Equação
Lewis (Lewis, 1921)	$XR = \exp(-kt)$	(1)
Page (Tulasidas et al.,1993)	$XR = \exp(-kt^n)$	(2)
Page Modificada (Overhults et al.,1973)	$XR = \exp(-(kt)^n)$	(3)
Henderson e Pabis (Westerman et al., 1973)	$XR = a \exp(-kt)$	(4)
Logarítmica (Yağcıoğlu et al., 1999)	$XR = a \exp(-kt) + c$	(5)
Dois termos (Henderson, 1974)	$XR = a \exp(-k_0t) + c \exp(-k_1t)$	(6)
Midilli (Midilli et al., 2002)	$XR = a \exp(-kt^n) + bt$	(7)

Com as curvas cinética de secagem consegue-se avaliar se o transporte da umidade no material é predominantemente convectivo ou difusivo e ajustar parâmetros do processo para que a secagem seja favorecida, bem como calcular a quantidade de água evaporada, o tempo de secagem, a energia consumida (STRUMILLO e KUDRA, 1986) e direciona a escolha do secador.

3.2 Leito Fluidizado

A fluidização acontece quando um leito de partículas sólidas é suspenso por um gás ou um líquido sem que os sólidos sejam arrastados pelo fluido, mas o sistema sólido-fluido adquira comportamento como que líquido. A fluidização é um fenômeno utilizado em processos de reações catalíticas de síntese, craqueamento de hidrocarbonetos, calcinação, combustão, incineração e também em processos físicos como a adsorção e a secagem (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

A ampla utilização do leito fluidizado está relacionada aos seguintes fatores (GUPTA e SATHIYAMOORTHY, 1999; KUNII e LEVENSPIEL, 1991; STRUMILLO e KUDRA, 1986):

- As altas taxas de transferência de calor e massa por causa da boa mistura do leito;
- Grande resistência a mudanças rápidas de temperatura, devido a rápida mistura dos sólidos, o leito responde muito lentamente a mudanças abruptas nas condições operacionais, o que lhe confere a condição isotérmica com grande margem de segurança;
- É adequado para operações em grande escala;
- Não há o desgaste mecânico de partes móveis;
- Baixos custos de manutenção e economia do espaço físico.

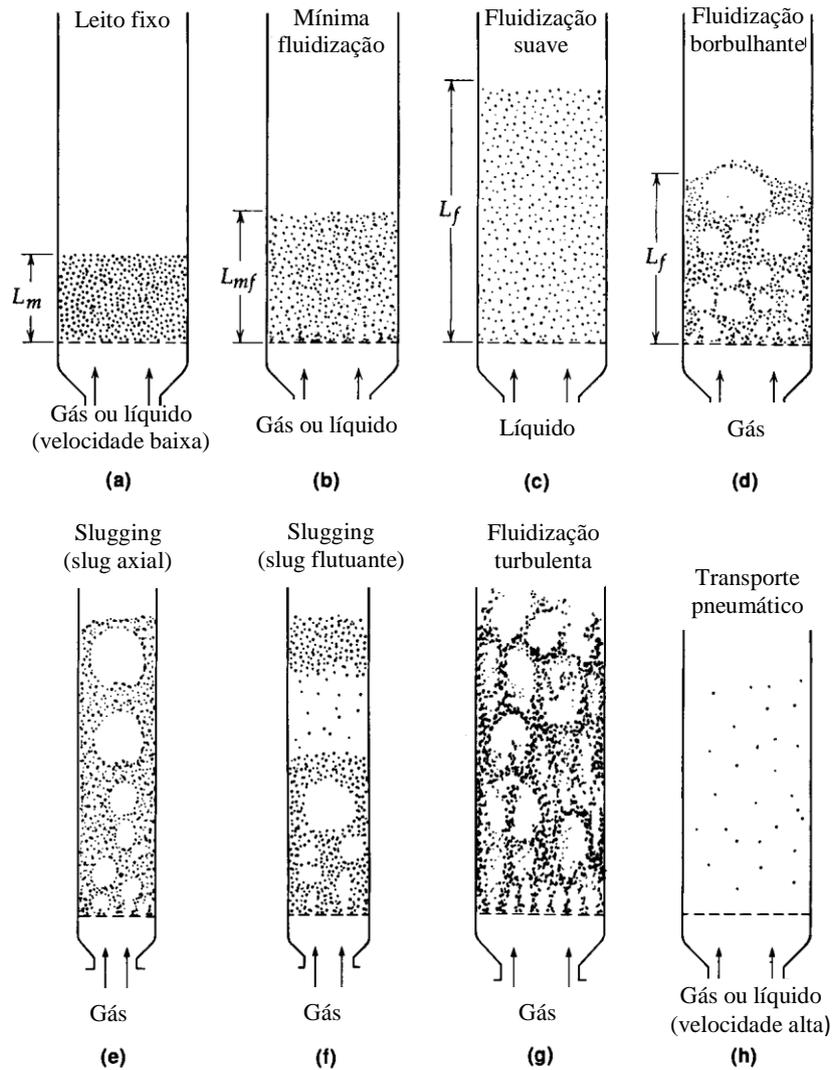
No entanto é limitada por:

- Partículas muito finas podem não fluidizar ou se aglomerar devido às altas forças coesivas associadas a estes materiais, apresentando contato ineficiente;
- Características fluidodinâmicas do leito fluidizado são complexas, o que dificulta a modelagem e a ampliação de escala;
- Erosão dos tubos e vasos por causa da abrasão das partículas;

3.2.1 Regimes de Fluidização

Quando um fluido atravessa um leito de partículas, a depender das características do fluido e das partículas e da velocidade do fluido, vários regimes distintos de fluidização podem ocorrer, apresentados na Figura 5. Se o fluido a baixas velocidades atravessa um leito de partículas sólidas através dos seus espaços vazios, mantendo as partículas em estado estacionário, tem-se um arranjo de leito fixo (Figura 5.a). A medida que se aumenta a velocidade do fluido, os sólidos se separam e começam a vibrar em regiões delimitadas, aumentando a altura do leito, este estado é chamado leito expandido. Aumentando ainda mais a velocidade, alcança-se um estado onde todas as partículas estão suspensas e as forças de fricção entre as partículas e o fluido são equilibradas pela força peso das partículas, neste ponto tem-se o leito fluidizado incipiente ou leito na mínima fluidização (Figura 5.b). A configuração da Figura 5.c, de fluidização suave, ocorre quando, em um sistema sólido-líquido, há um aumento progressivo da altura do leito.

Figura 5 - Regimes de fluidização.



Fonte: Adaptado de KUNII E LEVENSPIEL, 1991.

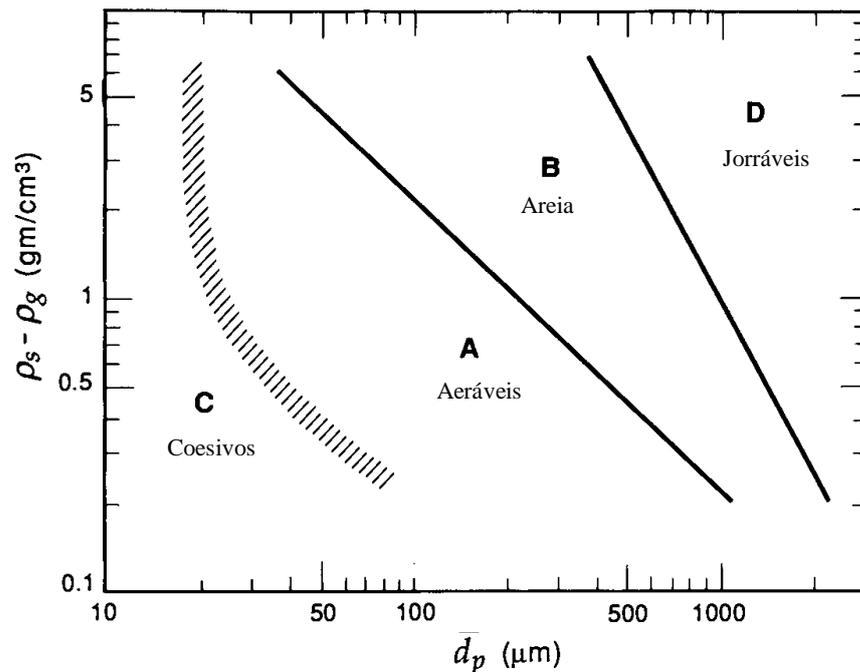
Já para um sistema gás-sólido só é observada em condições bem particulares, para partículas muito finas, com gás de elevada massa específica a altas pressões. Geralmente o sistema gás-sólido tem comportamento um pouco diferente, o aumento da velocidade acarreta a formação de bolhas, canais preferenciais, a agitação torna-se intensa e o movimento do sólido mais vigoroso, porém o leito não expande muito além da altura na mínima fluidização, na Figura 5.d o leito é apresentado um leito do tipo borbulhante. Quando as bolhas formadas aumentam de tamanho na direção axial do leito tem-se o que se chama de slugs axiais (Figura 5.e) e se uma bolha se torna tão grande que provoca um movimento “pistonado” nos sólidos acima dela, este fenômeno denomina-se slug flutuante (Figura 5.f). O leito turbulento (Figura 5.g) inicia-se quando a velocidade do gás já excede a velocidade terminal dos sólidos e as bolhas começam a ter formato de canais carregando alguns sólidos consigo, conseqüentemente a

superfície superior do leito desaparece. Por fim o transporte pneumático, Figura 5.h, onde os sólidos são transportados (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). Nos processos de secagem, o fluido utilizado é sempre gás, que é o agente secante, as transferências de calor e massa ocorrem simultaneamente, o calor é transferido do gás para o sólido e a massa (a umidade) do sólido para o gás durante a fluidização, quanto menos bolhas e mais uniformemente distribuídas, melhor é o contato fluido partícula.

3.2.2 Classificação de Geldart

Inúmeros estudos foram feitos com o intuito de estabelecer um critério para prever o comportamento de fluidização e o mais utilizado, por sua simplicidade e facilidade de aplicação, é a classificação de Geldart (1973). A Figura 6 apresenta o diagrama de Geldart em escala logarítmica com quatro regiões delimitadas, segundo as quais o regime de fluidização é caracterizado em função da diferença de densidade entre o sólido e o fluido ($\rho_s - \rho_f$) e o diâmetro médio da partícula (d_p).

Figura 6 - Diagrama de Geldart.



Fonte: Adaptado de GELDART, 1973.

Grupo A: pertencem a esse grupo materiais com pequenos diâmetros e/ou partículas com densidades menores que 1,4g/cm³. Esses sólidos fluidizam facilmente, expandem visivelmente

antes do regime borbulhante, a baixas velocidade do gás fluidizam em regime suave, a altas velocidades no regime borbulhante aparecem bolhas pequenas e controladas.

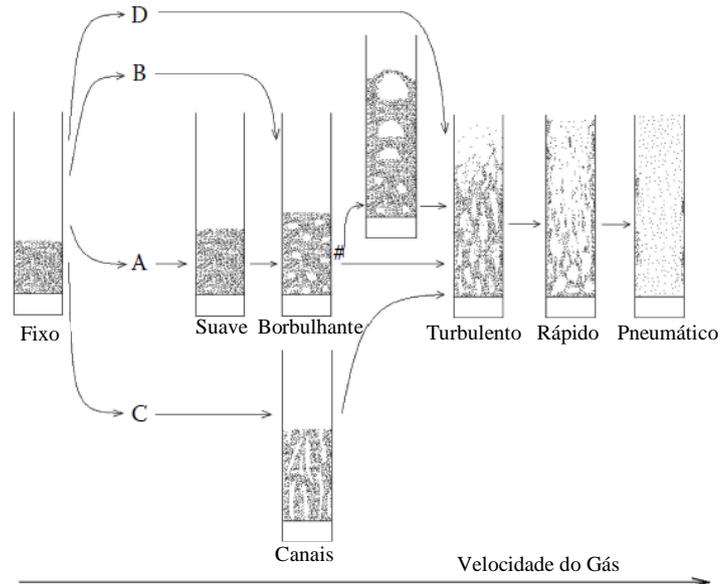
Grupo B: este grupo contém os materiais com o diâmetro médio entre $40\mu\text{m}$ e $500\mu\text{m}$ e a densidade entre $1,4\text{g}/\text{cm}^3$ e $4\text{g}/\text{cm}^3$, eles fluidizam bem com uma ação borbulhante vigorosa. Ao contrário do grupo A, que apresenta a expansão do leito e a fluidização suave, no grupo B a fluidização borbulhante é muito próxima do início da fluidização, a expansão do leito é muito pequena.

Grupo C: é formado por partículas ultrafinas e muito coesivas, a fluidização normal desses pós é bastante difícil, isto acontece porque as forças interpartículas são maiores do que a força que resulta da ação do fluido, produzindo fenômenos de transferência pouco efetivos. Este fenômeno está relacionado ao pequeno tamanho das partículas e à ação das cargas eletroestáticas.

Grupo D: incluem as partículas muito grandes e/ou densas, a fluidização desses sólidos é complexa por causa da forma irregular e do tamanho das partículas, que se comportam de maneira aleatória, gerando explosões de bolhas e canais ou comportamento de jorro quando a entrada do gás é desforme. Assim, para estas partículas, é recomendado o leito de jorro, por sua facilidade em jorrar. Exemplos são grãos em geral, como ervilhas e grãos de café.

De modo geral, o comportamento do leito fluidizado depende da velocidade do fluido e do tipo de partícula, na Figura 7, por exemplo, um material Geldart A primeiro se expande, em seguida forma bolhas que vão ficando maiores e alcança a fluidização turbulenta e depois transporte pneumático. Por se tratar dos aeráveis não há formação de canais preferenciais devido a sua baixa natureza coesiva, diferente do Geldart C que faz resistência a passagem do ar provocando a ruptura do leito e a formação de caminhos, não de bolhas.

Figura 7 - Regimes de fluidização.



Fonte: Adaptado de LAW e MUJUMDAR, 2006.

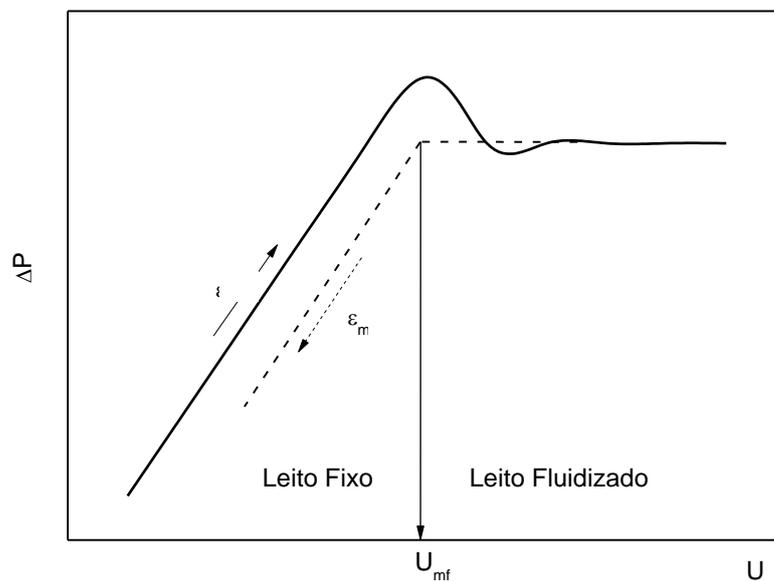
3.2.3 Velocidade de mínima fluidização

Um dado importante de projeto é a velocidade em que a fluidização do leito inicia, velocidade mínima de fluidização (U_{mf}), pois marca a transição do leito fixo para o leito fluidizado. A U_{mf} pode ser encontrada experimentalmente e por previsões teóricas como listado por GUPTA e SATHIYAMOORTHY (1999). As previsões teóricas dependem de dados como diâmetro da partícula (d_p), dimensão do vaso e parâmetros operacionais, o que significa que elas só são válidas sob certas condições operacionais e em intervalos definidos e o efeito da umidade do material não é incluído (LAW e MUJUMDAR, 2006). Dessa forma, é comum a determinação da U_{mf} por métodos experimentais, preferivelmente pela curva característica da fluidização. A curva característica é construída pela velocidade do gás em função da perda de carga no leito (Figura 8).

A velocidade do gás é proporcional à queda de pressão nas condições iniciais, onde o leito se comporta como fixo. Quando as partículas começam a vibrar, o aumento da velocidade provoca a expansão do leito e a fluidização, neste ponto alcança-se um pico de pressão, que é levemente maior do que a pressão estática do leito e deste ponto em diante a queda de pressão varia muito pouco, permanecendo quase que constante. Ao fazer o caminho inverso, no leito estável já fluidizado, ao se diminuir a velocidade do gás até a velocidade de mínima fluidização, não será obtido o valor máximo da queda de pressão no leito, uma vez que o fluido não precisa

vencer a inércia das partículas para a expansão do leito. Assim, a fração de vazios ou porosidade no leito fixo compactado (ϵ) aumenta para a porosidade de mínima fluidização (ϵ_{mf}) quando a curva é construída ao reduzir-se a velocidade do gás, isto explica a diminuição da queda de pressão.

Figura 8 - Curva fluidodinâmica de queda de pressão no leito ideal em função da velocidade superficial do ar.



Fonte: Autor, 2017.

3.3 Leito vibrofluidizado

Afim de resolver limitações no processo de fluidização, como o tipo da partícula, formação de aglomerados e canais preferenciais, é comum a modificação na estrutura do leito fluidizado, seja pela adição de vibração, de pulsos, agitação, recirculação dos sólidos ou a fluidização em multiestágios, entre outras modificações possíveis (LAW e MUJUMDAR, 2006). Especificamente quando se adiciona vibração ao leito fluidizado são intensificadas as trocas de quantidade de movimento, calor e massa no leito, minimizando as fluidizações irregulares.

Em comparação com o leito fluidizado convencional, o leito vibrofluidizado apresenta as seguintes características (ERDÉSZ et al.; 1986):

- A velocidade de mínima fluidização e a queda de pressão são menores para o leito vibrofluidizado, conseqüentemente o consumo de energia e o arraste de finos são reduzidos significativamente;
- O tempo de residência, a intensidade da mistura, as propriedades de transferência de massa e calor podem ser controladas por variações na amplitude e na frequência de vibração;
- Materiais pastosos, que raramente fluidizam em um leito fluidizado convencional, podem ser processados em um vibrofluidizado com maior eficiência;
- Há a necessidade de isolamento de vibração e ruído, por causa da possibilidade de propagação de vibração através das construções.

A adição de vibração ao leito também implica em um novo parâmetro a ser controlado: a energia vibracional imposta. A vibração é caracterizada basicamente pela amplitude (A) e frequência (f), assim existem algumas equações na literatura para a caracterização desta energia no leito vibrofluidizado, no entanto o utilizado convencionalmente é o adimensional de vibração (Γ) dado pela equação (CHLENOV e MIKHAILOV, 1965):

$$\Gamma = \frac{A (2\pi f)^2}{g} \quad (8)$$

Dessa forma, o adimensional de vibração é fisicamente interpretado como sendo a razão entre a aceleração média vibracional no sistema e a aceleração gravitacional (g), o modo como o adimensional atua na dinâmica do leito influencia nos regimes de fluidização e algumas classificações são mostradas a seguir.

Strumillo e Pakowski (1980) baseados na velocidade de mínima fluidização propuseram que, para qualquer adimensional de vibração, a classificação deveria ser a seguinte:

- Leito vibrofluidizado: quando a velocidade do ar na aeração do leito com vibração é menor que a velocidade de mínima fluidização;
- Leito fluidizado vibrado: quando a velocidade do ar na aeração do leito com vibração é maior que a velocidade de mínima fluidização;

Por sua vez, Pakowski et al. (1984) classificaram os regimes com base nas faixas de condições operacionais:

- Leito vibrado: quando o adimensional de vibração é maior que 1 ($\Gamma > 1$), porém sem o escoamento de ar;

- Leito vibrofluidizado: quando o adimensional de vibração é menor que 1 ($\Gamma < 1$) e o ar escoar com velocidade menor que a velocidade de mínima fluidização;
- Leito fluidizado vibrado: para qualquer adimensional de vibração e quando o ar escoar com velocidade maior que a velocidade de mínima fluidização

Já Bratu e Jinescu (1971) baseados em observações visuais classificam como:

- Leito vibrado ($\Gamma < 1$): quando a vibração somente ajuda na estabilidade e homogeneidade do leito, mas o comportamento geral é do leito fluidizado simples;
- Leito vibrofluidizado ($\Gamma \approx 1$): quando tanto a vibração quanto o escoamento do ar contribuem para a dinâmica do leito;
- Leito fluidizado vibrado ($\Gamma > 1$): quando a dinâmica do leito sofre influência da vibração e o ar é somente usado como meio para os fenômenos de transferência de calor e massa.

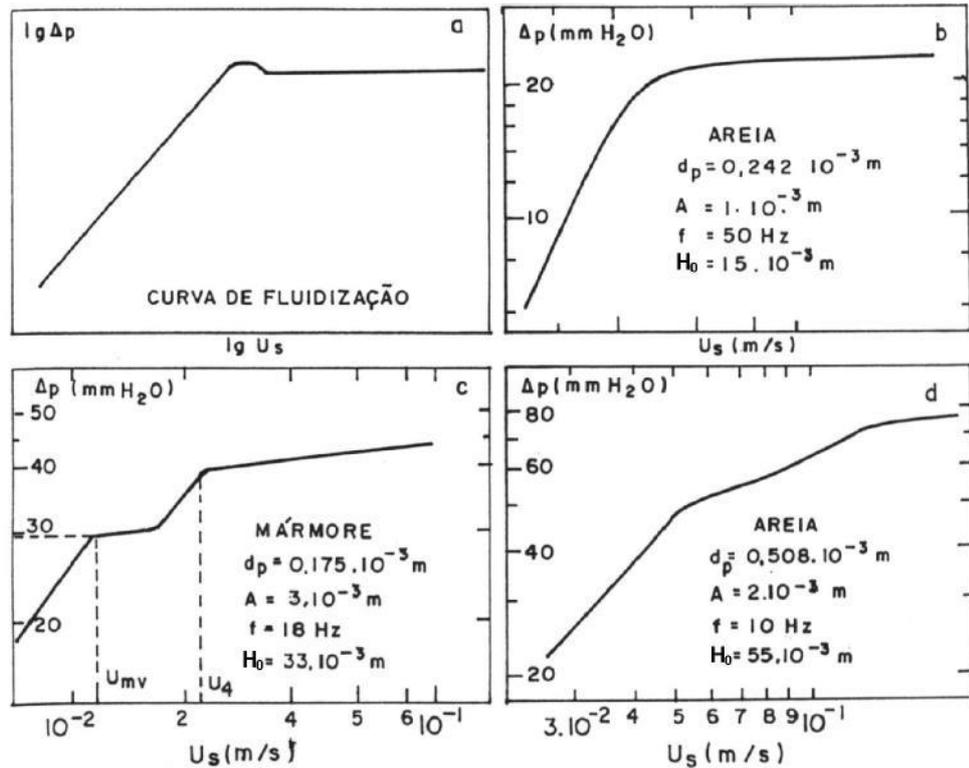
E por fim, Daleffe (2005) simplificou a classificação propondo para qualquer adimensional de vibração:

- Leito vibrado: leito de material particulado sujeito à vibração vertical sem escoamento de ar;
- Leito vibrofluidizado: leito de material particulado sujeito à vibração vertical com escoamento de ar;

Como pode-se notar, a intensidade da energia vibracional modifica o comportamento fluidodinâmico do leito, inclusive modificando a sua curva característica. Strumillo e Pakowski (1980) apontam que pode-se ter 4 tipos de curvas fluidodinâmicas, como mostra a Figura 9.

Na Figura 9.a temos a curva característica do leito fluidizado convencional, quando impostas energias de vibração muito baixas ($< g$) o leito vibrofluidizado tem a curva fluidodinâmica de leito fluidizado. Já quando a energia vibracional imposta ao leito é alta ($> g$) o pico de queda de pressão é amortecido, uma vez que a vibração facilita a permeabilidade do ar no leito, a transição entre o leito fixo e vibrofluidizado ocorre em um intervalo, não em um ponto, Figura 9.b. Para condições de operações intermediárias, a curva característica pode apresentar o aspecto das Figuras 9.c e 9.d, com dois pontos de inflexão, o primeiro refere-se ao início da vibração das partículas, relacionado à amplitude e frequência de vibração, enquanto que o segundo está associado ao estado fluidizado, o efeito da vibração é menor no sistema pois o ar consegue sustentar o leito.

Figura 9 - Curvas fluidodinâmicas: queda de pressão em função da velocidade do ar.



Fonte: STRUMILLO e PAKOWSKI (1980)

A literatura fundamental do leito vibrofluidizado encontra-se descrita em Chlenov e Mikhailov (1965), Bratu e Jinescu (1971), Pakowski et al. (1984), Erdéz et al. (1986) e Erdéz e Ormós (1986), a partir desses trabalhos Γ foi utilizado como parâmetro único e universal para caracterizar a vibração imposta ao leito. No entanto, Daleffe (2005) descreve divergências nos resultados do comportamento fluidodinâmico do leito quando ele é caracterizado somente pelo adimensional de vibração. Dessa forma, Daleffe (2005) verificou que para um mesmo Γ , quando operando com altas amplitudes e baixas frequências, o leito se expande, já operando com baixas amplitudes e altas frequências o leito se compacta. Neste trabalho será adotada a classificação de Daleffe.

Posteriormente, Meili (2009) analisou experimentalmente o comportamento da queda de pressão do leito fluidizado e vibrofluidizado durante a secagem de pastas (água, lodo de esgoto, leite desnatado e carbonato de cálcio), operando em regime contínuo. Para o leito fluidizado, constatou que quando as vazões de alimentação das pastas eram aumentadas, a queda de pressão do leito começa a diminuir, devido à formação de canais preferenciais, indicando o colapso do leito. Ao fazer a mesma análise para o leito vibrofluidizado, à medida que a vazão de

alimentação foi aumentada, a redução na queda de pressão não foi constatada, embora tenha ocorrido a formação de aglomerados, não houve colapso do leito porque a vibração manteve o movimento mesmo em condições desfavoráveis de fluidização. Além disso, ao avaliar a influência da vibração na evaporação da água em regime permanente, foi observado que esta ocorre mais rapidamente quando o adimensional de vibração é composto por baixas frequências e altas amplitudes, do que por altas frequências e baixas amplitudes, mostrando que o comportamento fluidodinâmico distinto descrito por Daleffe (2005) também se reflete no processo de evaporação da água. Já para as pastas (lodo de esgoto, leite desnatado e carbonato de cálcio), descreveu que a vibração do leito reduz o tempo de secagem do material em comparação com o fluidizado e que, no entanto, a combinação de frequência e amplitude afeta de maneiras diferentes pastas com características reológicas diferentes. Por exemplo; o autor verificou que, para o lodo de esgoto e o leite desnatado, a vibração com maior amplitude aumentou a produção de pó e o leito apresentou maior capacidade evaporativa enquanto que a baixas amplitudes o comportamento do vibrofluidizado foi muito similar ao do fluidizado. Em contrapartida, nas mesmas condições, para o carbonato de cálcio não foi observada disparidade significativa entre os ensaios.

Costa (2017) para entender melhor a interferência dos parâmetros vibracionais no processo de secagem variou duas amplitudes ($A=0,003$ e $0,015m$) combinadas com frequências entre 100 e 1100 RPM, observando que nas duas amplitudes, separadamente, o aumento da frequência de vibração suportou maiores vazões mássicas de alimentação de leite desnatado no equipamento. Para valores similares do adimensional de vibração, a configuração com maior amplitude resultou em maiores variações na queda de pressão do leito e maior produção de pó.

Esses estudos do Centro de Secagem da UFSCar ressaltam a interferência da amplitude e da frequência de vibração na fluidodinâmica do leito e na secagem, corroborando com as diretrizes principais do que foi apresentado, esta dissertação faz um estudo da secagem da borra de café, um material com características reológicas bastantes distintas dos matérias já estudados até agora neste leito, adotando as principais configurações utilizadas por Daleffe (2005), Meili (2009) e Costa(2017).

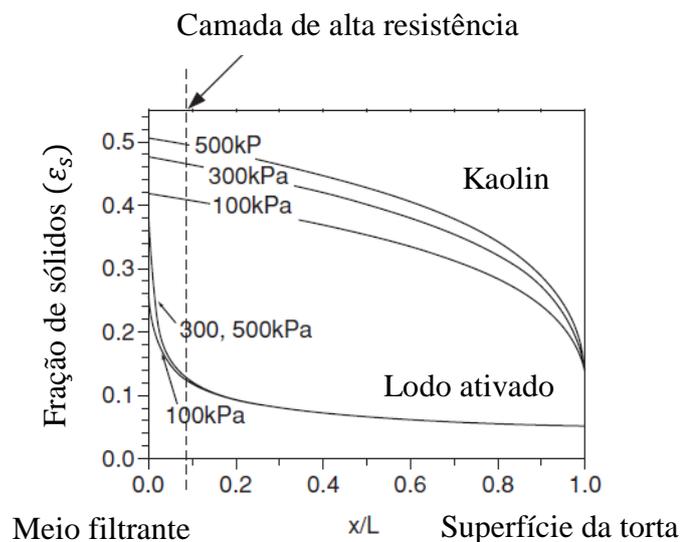
3.4 Redução de umidade por via mecânica

É comum que o termo secagem seja utilizado para designar a remoção da umidade contida na superfície e na região interna do material, por via térmica. Por outro lado, em alguns casos a água pode ser removida mecanicamente por prensa, centrífugas, parafusos, filtros, entre

outros, para estes o termo mais adotado é remoção/redução de umidade ou desague. A retirada de água por compressão ou secagem por compressão, é uma separação sólido-líquido muito utilizada nas indústrias antes da secagem térmica, pois a energia requerida pelo processo mecânico é pequena quando comparada com qualquer método térmico (GENK et al., 2008).

Por via mecânica não se consegue retirar a umidade mais interna do sólido nem da mistura sólido-líquido (torta), especificamente na operação de prensagem que foi adotada neste trabalho, esse fenômeno acontece porque o sólido começa a se comportar como meio filtrante. Como mostra a Figura 10, para dois materiais diferentes, a fração de vazios (ε) ao longo da torta não fica uniformemente distribuída, perto da parede onde ocorre a separação há alta fração de sólidos, ε_s , que é acumulada pelo escoamento no decorrer da separação. O acúmulo de sólidos na interface gera resistência à saída do fluido, de modo que o aumento sucessivo da pressão de compressão a partir de determinado ponto passa a não ser significativo no desague do material (GENK et al., 2008). Devido à água aprisionada antes da camada de alta resistência e a umidade mais interna da partícula existe a necessidade do processo térmico para alcançar níveis mais baixos de umidade.

Figura 10 - Fração de sólidos em função da posição ao longo da espessura da torta.



Fonte: GENK et al., 2008.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados o material utilizado, a metodologia para as caracterizações do material seco e úmido, as descrições das unidades experimentais (prensa hidráulica e secador de leito vibrofluidizado), os procedimentos experimentais e as metodologias de cálculo adotadas.

4.1 Descrição do material

Para a realização dos experimentos fluidodinâmicos e de secagem foi utilizada a borra de café gerada pela máquina de café expresso do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. O resíduo foi coletado três vezes por semana e em seguida seco em estufa por 24h a 105°C. Para cada experimento o material foi reumidificado até atingir a umidade apropriada e armazenado na geladeira a 10±2°C por 12h.

4.2 Caracterização

As caracterizações físicas foram realizadas para borra de café seca e úmidas, afim de verificar e quantificar as mudanças em suas principais características em função da umidade presente.

4.2.1 Distribuição granulométrica

O tamanho das partículas foi determinado através das peneiras de mesh 18, 25, 35, 45, 60, 80, 120 e 270 da ASTM sob a amplitude de vibração de 1,5mm por 15min. O diâmetro médio ABNT, \bar{d}_s , foi obtido utilizando Sauter médio pela equação:

$$\bar{d}_s = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (9)$$

Onde x_i é o peso da fração retida na peneira e d_{p_i} é o diâmetro médio das partículas retidas, assumindo que a densidade e a forma das partículas não dependem do tamanho.

4.2.2 Massa específica

A massa específica aparente (ρ_a) foi determinada por picnometria líquida com água destilada como fluido percolante.

4.2.3 Umidade

A umidade (u) da borra seca e úmida foi terminada pela secagem das amostras na estufa a 105°C por 24h e calculada em base úmida pela expressão:

$$u = \frac{\text{peso da amostra umida} - \text{peso da amostra seca}}{\text{peso da amostra umida}} \times 100 \quad (10)$$

4.2.4 Massa específica do leito

A densidade bulk do leito aerada (ρ_{lb}) e compactada (ρ_{tb}) foi obtida pela técnica gravimétrica seguindo a norma da QAS/11.45, onde uma determinada quantidade de material é empacotada em um volume conhecido. As porosidades bulk do leito aerado (ε_{lb}) e compactado (ε_{tb}) foram obtidas por:

$$\varepsilon_{lb} = 1 - \frac{\rho_{lb}}{\rho_a} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{tb} = 1 - \frac{\rho_{tb}}{\rho_a} \quad (12)$$

4.2.5 Índice de Hausner (IR)

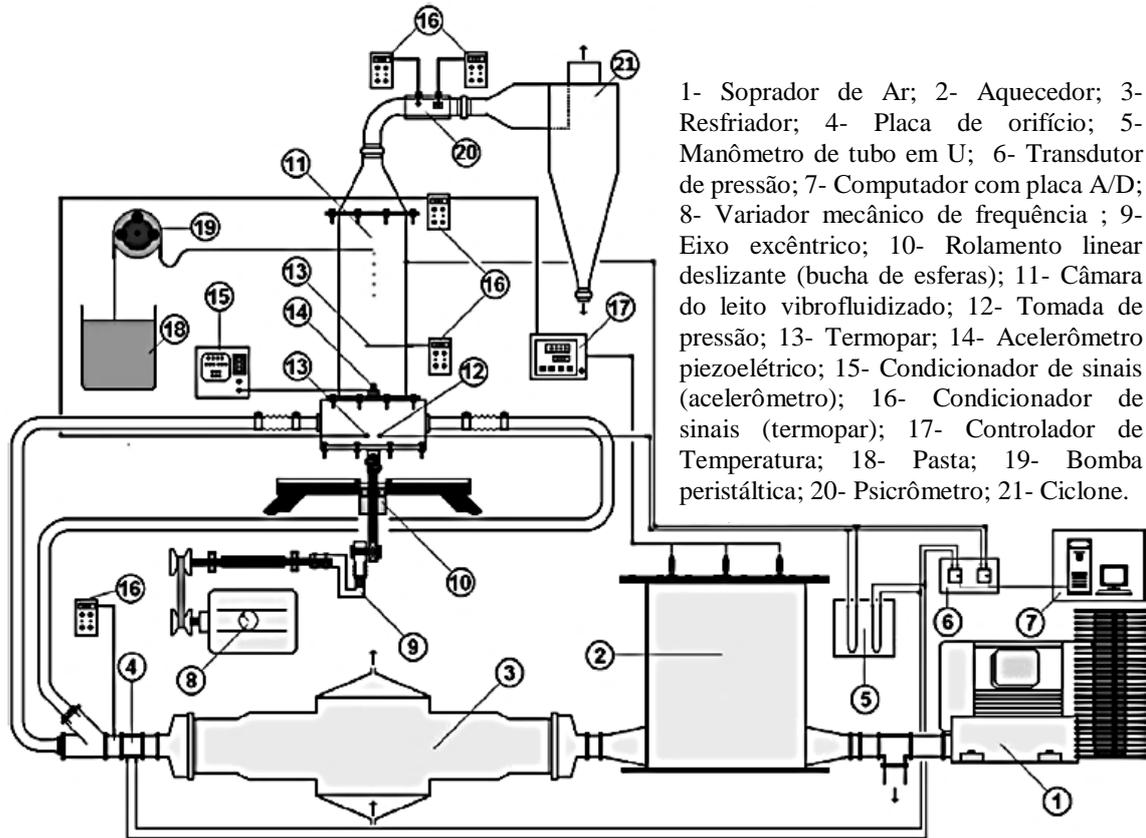
O índice de Hausner foi calculado pela razão entre a densidade bulk aerada e compactada:

$$IR = \frac{\rho_{lb}}{\rho_{tb}} \quad (13)$$

4.3 Unidade experimental

A unidade experimental do secador vibrofluidizado do Centro de Secagem DEQ/UFSCar é mostrada na Figura 11.

Figura 11 - Secador de leito vibrofluidizado do Centro de Secagem DEQ/UFSCar.



Fonte: MEILI, 2009.

A alimentação de ar nesta unidade experimental ocorre através de um soprador marca IBRAM, com 4 CV de potência, o ajuste da vazão é feito por uma válvula *by-pass*. A vazão do ar é calculada pela queda de pressão dada pela placa de orifício (4), calibrada usando um medidor Venturi como padrão (equação do venturi: $Q = 0,65569\sqrt{\Delta h}$). A temperatura do ar injetado no sistema é mantida constante pelos controladores de temperatura (17) ligados às resistências elétricas do aquecedor (2). O resfriador de água (3) serve para auxiliar no controle da temperatura. O ar é injetado no secador por duas entradas na base do leito (abaixo da placa distribuidora) em contracorrente. A placa distribuidora tem espessura de $2 \times 10^{-3}m$ com furos de $0,3 \times 10^{-3}m$ de diâmetro, que resulta em uma área de aproximadamente 50% livre para a passagem do ar, a fim de que ele seja distribuído homogeneamente.

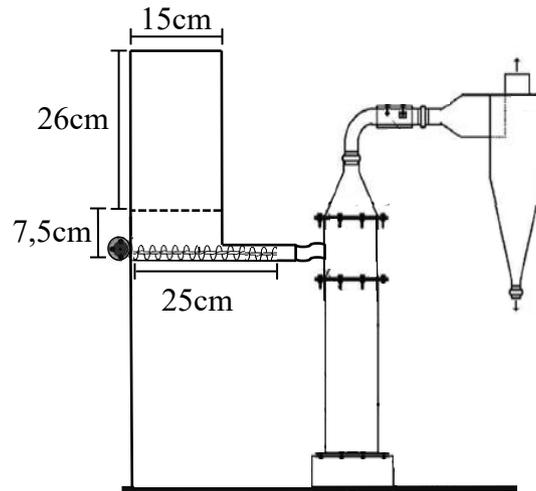
O leito do secador (11) é limitado por uma câmara de vidro de 0,114m de diâmetro, 0,500m de altura e 0,003m de espessura com dois termopares do tipo J (13) com bainha de 0,005m para monitorar a temperatura. A alimentação do secador é composta pelo reservatório

da pasta (18) e pela bomba peristáltica (19) que fornecem, em regime contínuo, a pasta para o leito (no entanto, esta forma de alimentação não é adequada para a borra de café, mais adiante as modificações feitas no leito são apresentadas).

As vibrações são impostas ao leito por uma haste ligada ao eixo excêntrico (9), que converte o movimento rotacional produzido pelo motor WEG de 0,5HP para o movimento senoidal vertical na câmara de vidro. O motor possui um variador de velocidade Ringcogne modelo RXM-750 (8) que permite modificar a frequência monitorada pelo tacômetro eletrônico digital Optho Tako TO404. A amplitude de vibração pode ser ajustada manualmente no próprio mecanismo excêntrico. A aceleração, a velocidade e o deslocamento com o qual o sistema reage à vibração são medidas através de um acelerômetro piezométrico Brüel&Kjær 4371 (14), o qual envia sinal para o amplificador de sinais Brüel&Kjær 2525 (15) ajustado ao acelerômetro, informando os valores na escala de amplitude em RSM ou de 0 a pico. O sistema vibracional é posicionado em uma base independente da mesa para evitar que as vibrações exercidas pelo motor influenciem o leito.

Para a que a borra de café fosse alimentada continuamente foram feitas algumas modificações ao leito, de modo que a sua estrutura original fosse conservada. Na Figura 12 são mostradas as adaptações. Junto à câmara de vidro foi adicionado um prolongamento em acrílico de 10cm de altura, ao qual foi acoplado o novo sistema de alimentação. A seção de ligação entre o prolongamento superior do leito e o alimentador é formada por dois dutos de PVC flexível, alinhados concentricamente, de diâmetros 32mm e 40mm, que amortecem a vibração do leito. O sistema de alimentação é formado por: um transportador helicoidal que tem diâmetro da hélice de 25mm, diâmetro do eixo de 10mm, passo da hélice de 15mm e comprimento 250mm e um silo de alimentação de 335mm de altura, 150mm de largura e comprimento, a 75mm da altura do silo há uma inclinação de 45° de um lado e 70° do outro que causa o afunilamento do silo ao chegar no transportador.

Figura 12 - Adaptação do leito e acoplamento do alimentador.



Fonte: Adaptado de MEILI, 2009.

4.4 Procedimentos experimentais

Esta seção será subdividida em três partes. Na primeira constam os procedimentos preliminares para a avaliação da cinética de secagem na termobalança, a caracterização fluidodinâmica do leito, e testes de fluidização em função da umidade da borra. A segunda trata da redução de umidade por via mecânica e a terceira dos experimentos de secagem contínua no leito vibrofluidizado.

4.4.1 Testes preliminares

4.4.1.1 Cinética de secagem

Os experimentos de cinética de secagem foram realizados em uma termobalança Denver Instrument IR-200 de infravermelho. Uma massa de aproximadamente 33g de borra a 63% de umidade em base úmida, era adicionada em um cadinho de alumínio de diâmetro 10mm e altura 80mm, de modo a formar um leito empacotado regular e uniforme. A temperatura do experimento era previamente ajustada e a cada minuto foi obtida a massa do cadinho. Ao final de cada experimento, as amostras foram secas na estufa por 24h a fim de se obter a massa seca.

Foram realizados experimentos em duplicata para as temperaturas de 60, 80, 100 e 120°C, com os dados de massa fornecidos pela balança foi calculada a umidade adimensional $XR = f(t)$ de acordo com a definição:

$$XR = \frac{X_t - X_f}{X_0 - X_f} \quad (14)$$

Foi avaliado o ajuste das equações clássicas de cinética de secagem da Tabela 3 e, para avaliar a qualidade do ajuste, foram utilizados os coeficientes de determinação R^2 e RSME (*root mean square error*), onde $XR_{pre,i}$ é a umidade prevista pela equação, $XR_{exp,i}$ é a umidade obtida experimentalmente, \overline{XR} é a umidade média e N é quantidade de pontos experimentais. Com a umidade adimensional foi também calculada a taxa de secagem para cada intervalo de tempo.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (XR_{pre,i} - \overline{XR})^2}{\sum_{i=1}^N (XR_{exp,i} - \overline{XR})^2} \quad (15)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (XR_{pre,i} - XR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

4.4.1.2 Testes de fluidização

Inicialmente os experimentos deste subtópico tiveram o objetivo de fazer uma triagem do comportamento fluidodinâmico da borra no leito fluidizado. Primeiro foi testada a borra úmida formando um leito de 10cm de altura, no qual o regime fluidizado não foi obtido. Para melhorar a movimentação do leito e quebrar os aglomerados foram utilizados três inertes. O primeiro escolhido foi esferas de vidro do tipo ballotini ($d_p=0,00319m$ e $\rho_p=2500kg/m^3$) por ser um material clássico, utilizado em outros trabalhos do grupo, o que permitiu comparação. O segundo material foi partículas de polipropileno com diâmetro próximo, porém mais leve ($d_p=0,00315m$ e $\rho_p=1050kg/m^3$), com custo mais baixo, e também amplamente utilizado. Por fim foi selecionada a própria borra seca, devido às suas características de escoabilidade. Foi fixada em 10cm a altura do leito e fez-se a caracterização fluidodinâmica seguindo a metodologia clássica de Bratu e Jinescu (1971) obtendo a U_{mf} para os três inertes. Em seguida foram feitos testes de inerte e borra úmida, utilizando a velocidade superficial do ar como $1,2U_{mf}$ do inerte em questão. Nestes testes foi fixada a proporção de 10cm de altura de leito de inerte e 5cm de borra úmida, desta forma pode-se efetuar a comparação qualitativa da dinâmica do leito.

Em uma segunda etapa, para identificar a influência da umidade na borra de café, foi feita a caracterização fluidodinâmica da borra nas umidades de 0%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%

e 60% (b.u.). Em cada batelada foi fixada a massa 0,500kg de borra na respectiva umidade e aplicada a metodologia de Bratu e Jinescu (1971).

4.4.1.3 Elutriação do leito seco em função da velocidade superficial do ar

Para avaliar a granulometria do elutriado em função da velocidade superficial do ar imposta ao leito, foi adicionado ao secador 0,500kg de borra seca, foi ligado o soprador e ajustada velocidade de operação, passados 15min todo elutriado foi recolhido e pesado e então passou-se para a velocidade seguinte e assim sucessivamente até que o leito fosse esvaziado. Foram utilizadas as velocidades 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7 e 9 U_{mf} que são 0,375; 0,5; 0,625; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75 e 2,25m/s, respectivamente. A U_{mf} foi obtida com base na caracterização fluidodinâmica da borra do item 4.4.1.2. O procedimento foi feito em triplicata, as frações de elutriado recolhidas dos três experimentos foram misturadas, formando uma amostra relativa a cada velocidade de ar e para essa amostra fez-se análise granulométrica em triplicata.

4.4.2 Redução do teor de umidade por prensagem

A borra reumidificada, a 70% (b.u), foi submetida a compressão em uma prensa hidráulica SIWA de até 15 toneladas, para isso foi utilizado um recipiente plástico cilíndrico vazado com 0,15m de diâmetro e 0,125m de altura, ele foi revestido com uma malha comercial comum (Perfex®) que funcionou como meio filtrante, para que a borra não vazasse do recipiente sob pressão.

4.4.2.1 Prensagem rápida

Para os experimentos de prensagem instantânea, 1,000kg de borra a 70% (b.u.) era colocado no recipiente vazado revestido, e este era acoplado à prensa hidráulica. O pistão da prensa era ajustado ao recipiente e imposta a pressão de operação. Assim que a pressão definida era atingida, o êmbolo era imediatamente despressurizado, parte da água era eliminada e o conteúdo sólido remanescente (a torta), junto com o recipiente, eram retirados da prensa e pesados, em seguida o mesmo voltava novamente para a prensa onde era aplicada pressão posterior e repetia-se o procedimento. Foi verificada a variação de massa antes e depois da prensagem e medida a distância percorrida pelo pistão em cada compressão com um paquímetro digital. O intervalo de pressão estabelecido foi de 0 até 1,94MPa (que equivale a força de 0 a

3,5tonf aplicada na área circular de 0,15m de diâmetro), aumentando a cada 0,28MPa progressivamente. O teor de umidade da borra após cada compressão foi determinado por:

$$X(\text{b. u.}) = \frac{m_{\text{água}}}{m_u} = \frac{m_u - m_s}{m_u} \quad (17)$$

Onde m_u é a massa da amostra úmida, m_s é a massa do sólido calculada a partir da umidade inicial conhecida desconsiderando a perda de material sólido durante a prensagem.

4.4.2.2 Análise da influência do tempo de prensagem

Os experimentos deste item foram conduzidos de acordo com o planejamento experimental 2² com tréplica no ponto central, Tabela 4. Os fatores estudados foram a pressão imposta ao sistema e o tempo de prensagem para verificar a influência destes no desague. O sistema de prensagem foi montado para cada um dos 7 experimentos com 1,000kg de borra a 70%(b.u.). Quando a pressão de trabalho era atingida, esta era mantida sob o tempo estabelecido, só então o êmbolo era despressurizado e a torta retirada da prensa para ser pesada para o cálculo da umidade pela equação 18. Foram estabelecidas as pressões entre 1,11 e 1,66MPa como limite inferior e superior do intervalo de pressão e 10 e 30 segundos como limites do intervalo de tempo.

Tabela 4 - Planejamento experimental para análise da influência de pressão e tempo de prensagem.

Experimento	Pressão (MPa)	Tempo (s)
1	1,11	10
2	1,66	10
3	1,11	30
4	1,66	30
5	1,33	20
6	1,33	20
7	1,33	20

4.4.3 Considerações sobre o acoplamento alimentador e leito

Para a acoplamento do alimentador ao leito foram feitas uma série de testes para que o escoamento da borra fosse obtido, estes são apresentados resumidamente no Quadro 2. A princípio foi testado o alimentador sem que estivesse conectado ao leito (esquema A), descarregando a borra para atmosfera. Nestes testes foram utilizadas borras com umidades entre 0 e 60% (b.u.), para borras com umidades menores que 50%(b.u.) foi obtido escoamento visivelmente uniforme, já para as borras com umidades superiores a 50%(b.u.) não foi observado escoamento contínuo. A borra que inicialmente estava em contato com o parafuso foi transportada para frente e se acumulou nos 2cm do tubo seguintes ao fim do parafuso, já a borra que estava no silo ficou agregada à parede e formou uma crosta ao redor do parafuso, de modo que o sistema ficou estático (exceto pela rotação do parafuso) e nenhum escoamento foi observado. Sendo assim, e com base já nos resultados da redução do teor de água por prensagem nos testes seguintes de alimentação foram utilizadas borras a 45%(b.u.) e o alimentador passou a ser ligado ao leito.

O problema do acoplamento consistiu na conexão entre o tubo de PVC rígido por onde a borra era transportada pelo parafuso helicoidal e a entrada do leito de secagem. Esta conexão deveria, portanto, dar continuidade ao transporte da borra que vinha do parafuso e amortecer a vibração do leito no alimentador, para isso foi utilizado um tubo de pvc flexível comercial.

No esquema B, foi utilizada a conexão de 3,2cm de diâmetro e 7,5cm de comprimento que era a distância entre o fim do tubo de PVC rígido e o início do leito, a essa distância foi verificada que a vibração com amplitude de 1,5mm já era amortecida pelo duto flexível e dava estabilidade segura para o eixo de rotação do transportador helicoidal. Ao proceder com o teste, primeiramente sem vibração do leito, foi verificado que embora houvesse o escoamento interno do silo para o parafuso o transporte não se dava para o leito havendo empacotamento da borra na conexão. Com o intuito de evitar o empacotamento, o mesmo sistema foi testado com a vibração do leito ligada, nos primeiros segundos de experimentos foi identificado um escoamento ínfimo para dentro do leito, mas com pouco tempo de experimento o acúmulo de borra na conexão foi formado, de modo que a vibração do leito não conseguiu vence-lo e o transporte da borra para dentro do leito mais uma vez não foi obtido.

Quadro 2 - Considerações sobre o acoplamento do alimentador no leito.

	Borra escoando do transportador para:	Vibração do leito	Observações;
A	atmosfera	-	Escoamento uniforme para borra a umidades inferiores a 50% (b.u.).
B	dentro do leito sem escoamento de ar	Sem vibração	Acúmulo de borra na conexão, sem transporte.
		Com vibração	Acúmulo de borra na conexão, sem transporte.
C	dentro do leito sem escoamento de ar	Sem vibração	Sem transporte.
		Com vibração	Sem transporte.
	dentro do leito com escoamento de ar	Sem vibração	Não foi obtido transporte da borra.
		Com vibração	Foi obtido transporte da borra.
D	dentro do leito sem escoamento de ar	Sem vibração	Foi obtido transporte da borra.
	dentro do leito com escoamento de ar	Sem vibração	Foi obtido transporte da borra.

Na tentativa de impedir o acúmulo e o empacotamento da borra entre o alimentador e leito foi aumentada a área da seção transversal da conexão, foi então feita uma nova conexão associando em série um tubo de PVC flexível de 2,5cm de comprimento e 2,5cm de diâmetro e outro tubo do mesmo material de 5cm de comprimento e 4cm de diâmetro (esquema C). Com a nova conexão, o aumento do diâmetro do tubo fez com que fosse obtido o transporte da borra para dentro do leito tanto sem vibração como com vibração do leito, no entanto sem a passagem de ar. O aumento do volume disponível permitiu que o acúmulo da borra não fosse suficiente para impedir o escoamento. Prosseguiu-se então os testes ligando a passagem de ar no leito, foi verificado que, sem vibração, o escoamento do ar no leito oferecia resistência à descarga da borra para o leito, a borra voltava a obstruir a conexão, o que inviabiliza a alimentação com o

secador operando no modo fluidizado. Ao ligar a vibração com o ar escoando no leito foi obtido transporte, este sistema foi então adotado para o estudo secagem da borra em leito vibrofluidizado. Durante esse teste notou-se que tanto a vibração como o escoamento do ar têm influência relevante sobre o transporte da borra na conexão.

Para a operação em leito fluidizado a distância entre o alimentador e o leito foi reduzida de 7,5 para 2cm, essa distância não é suficiente para suportar a movimentação do leito, o que inviabiliza a operação com vibração. Assim, tanto com a passagem de ar como sem a passagem de ar no leito e ambos sem vibração, foi alcançado o escoamento da borra. O esquema D foi adotado para os experimentos de secagem em leito fluidizado.

4.4.4 Secagem

Os experimentos de secagem foram realizados segundo planejamento experimental 2² com tréplica no ponto central como disposto na Tabela 5 para três configurações diferentes: 1) vibrofluidizado com $\Gamma=4$ formado por $A=0,015m$ e $f=8,14Hz$; 2) vibrofluidizado, $\Gamma=4$ para $A=0,003m$ e $f=18,20Hz$ e 3) Leito fluidizado ($\Gamma=0$), totalizando 21 experimentos. O adimensional de vibração foi escolhido a partir de Meili (2009) por ser o adimensional que melhor mostrou a influência da amplitude e da frequência na secagem por ele utilizadas. Para a temperatura foram escolhidos os limites de 50 e 70°C como inferior e superior respectivamente, por neste intervalo já se alcançar a umidades inferiores a 30% b.u. A velocidade do ar foi estabelecida entre $4U_{mf}$ e $6U_{mf}$ por ser o intervalo onde também se obtém separação leito/elutriado em frações significativas, definidas a partir do teste de segregação da borra seca. A borra úmida foi alimentada a umidade de 0,45 b.u. por ter sido a menor umidade obtida nos testes de prensagem. Com isso se acopla a secagem térmica como etapa posterior a secagem mecânica.

A princípio o leito foi colocado para estabilizar por duas horas na temperatura e na vazão de operação, ao final das 2h eram desligados as resistências de aquecimento e o soprador de ar, efetuada a alimentação do silo, ligado o transportador tipo parafuso a 30RPM e o sistema de vibração, quando as primeiras gramas de borra chegavam ao leito, então o programa de aquisição de dados era iniciado, ajustada a vazão de ar e o *setpoint* do controlador de temperatura. Os ensaios tiveram duração de 40min, a cada 5min foi medida a massa de elutriado produzida e coletada uma amostra para verificação da umidade, ao fim do experimento foi

também coletada uma amostra do sólido retido no leito para verificação da umidade. Tanto a massa elutriada quanto a retida do leito foram secas na estufa por 24h a 105°C e quantificadas.

Tabela 5 - Planejamento experimental para análise da influência da temperatura e da velocidade do ar na secagem.

Experimento	Temperatura (°C)	Velocidade do ar (U_{mf})
1	50	4
2	70	4
3	50	6
4	70	6
5	60	5
6	60	5
7	60	5

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados de caracterização inicial, os testes fluidodinâmicos e de redução de umidade por prensagem dos quais as melhores condições foram adotadas para os testes de secagem contínua no leito vibrofluidizado.

5.1 Caracterização

Os dados de caracterização são apresentados na Tabela 6. A amostra apresenta um diâmetro médio de Sauter (\bar{d}_s) de $0,362\pm 0,007$ mm com intervalo de confiança de 95% caracterizando assim um pó fino após a secagem na estufa, estes resultados corroboram e complementam a caracterização de Silva (1998).

Tabela 6 - Dados de caracterização da borra de café.

Umidade (b.u.)	0%	63%
Diâmetro de Sauter (mm)	$0,362\pm 0,007$	-
Densidade Bulk Aerada (g/cm³)	$0,395\pm 0,015$	$0,507\pm 0,034$
Densidade Bulk Compactada (g/cm³)	$0,472\pm 0,007$	$0,815\pm 0,032$
Densidade Aparente (g/cm³)	$1,103\pm 0,059$	$1,081\pm 0,033$
Índice de Hausner	$1,19\pm 0,03$	$1,61\pm 0,04$
Porosidade Aerada	0,64	0,53
Porosidade Compactada	0,57	0,25

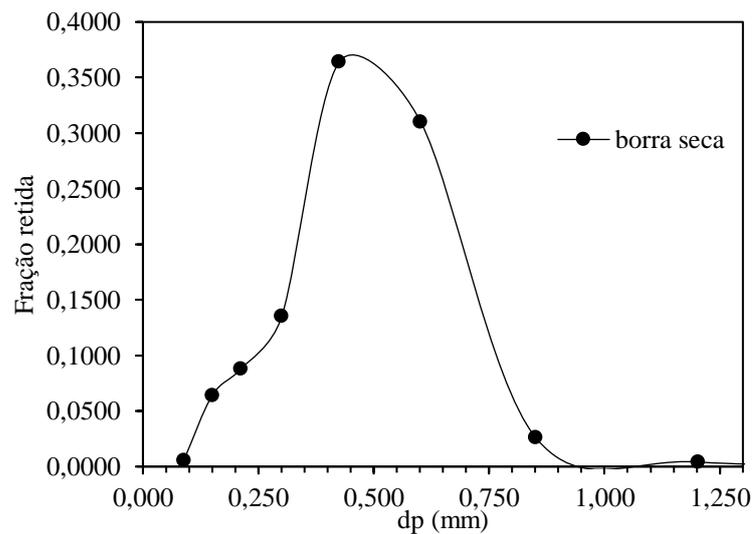
Nota-se, de acordo com a Tabela 6, que a presença de água faz com que a densidade bulk aerada e compactada do material aumente, isso acontece porque o leito formado pela borra úmida é menos aerado do que o da borra seca (fração de vazio), possibilitando maior quantidade de massa e conseqüentemente aumento da densidade. Por outro lado, a densidade aparente

diminui porque a densidade da água é ligeiramente menor que a da borra seca, o que também justifica a proximidade entre as duas medidas.

Com esses dados de caracterização foi possível a classificação da borra seca como do tipo B na classificação de Geldart, sólidos que apresentam boa fluidização e pequena expansão do leito, as bolhas se formam assim que a velocidade do ar excede a U_{mf} .

A Figura 13 apresenta a curva de distribuição granulométrica da borra seca correspondente ao $\bar{d}_s=0,362\text{mm}$, nota-se que 83,6% das partículas tem diâmetro médio entre 0,301 e 0,851mm. Os finos constituem aproximadamente 15% da amostra, partículas de diâmetro médios inferiores a 0,225mm. Segundo Sousa e Ferreira (2018) as partículas finas só passam a caracterizar um escoamento como ruim quando são superiores a 40% da composição do material, esse dado corrobora o IH da borra seca de $1,19\pm 0,03$ que caracteriza material com boa escoabilidade. Por outro lado, o IH da borra a 63% (b.u.) chega a $1,61\pm 0,04$ que indica um escoamento muito difícil (Sousa; Ferreira, 2018).

Figura 13 - Distribuição granulométrica da borra seca.

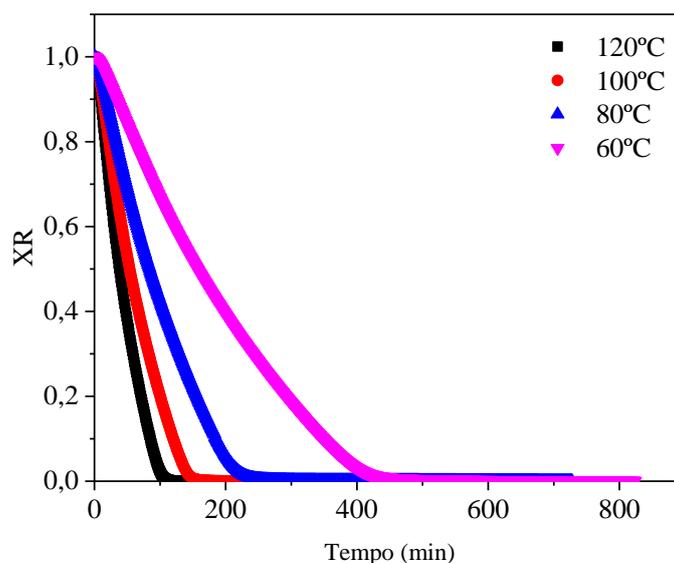


5.2 Testes preliminares

5.2.1 Cinética de secagem

Na Figura 14 é apresentada a cinética de secagem da borra de café a 60, 80, 90 e 120°C. Como esperado, a umidade diminui continuamente com o tempo de secagem e o aumento da temperatura faz com que a umidade diminua ainda mais rapidamente. O tempo necessário para a amostra seca a 60°C chegar a umidade final é cerca de quatro vezes maior do que a amostra seca a 120°C.

Figura 14 - Umidade adimensional em função do tempo.



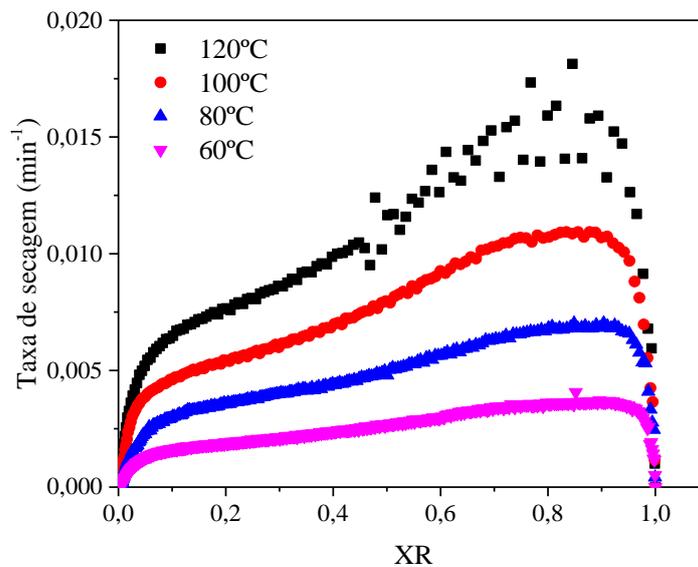
Como a secagem é um processo complexo e depende dos fenômenos convectivo e difusivo, modelos físicos que descrevam a umidade em função do tempo de secagem são muito complexos e sempre sujeitos a simplificações, assim adota-se modelos matemáticos empíricos e semiempíricos. A cinética de secagem deste trabalho foi ajustada aos principais modelos para a secagem de produtos agrícolas, Tabela 7. Os coeficientes de determinação R^2 e RSME (*root mean square error*) foram adotados como critério de ajuste do modelo aos dados experimentais. O modelo que melhor se ajustou foi o de Midilli et al. com R^2 mais próximo de 1 e RSME mais próximo de zero nas quatro temperaturas, o modelo de page modificado foi o segundo melhor por esses critérios.

Tabela 7 - Valores de R² e RSME do ajuste dos dados experimentais aos modelos de secagem.

Equação	Temperatura							
	120°C		100°C		80°C		60°C	
	R ²	RMSE						
Lewis	0,9646	0,0562	0,9619	0,0602	0,9713	0,0430	0,9664	0,0541
Page	0,9955	0,0102	0,9932	0,0254	0,9953	0,0174	0,9925	0,0256
Page modificado	0,9965	0,0178	0,9958	0,0110	0,9963	0,0155	0,9957	0,0194
Henderson e Pabis	0,9793	0,0430	0,9772	0,0466	0,9820	0,0340	0,9789	0,0428
Logarítmica	0,9874	0,0383	0,9895	0,0315	0,9846	0,0315	0,9874	0,0331
Dois termos	0,9885	0,0321	0,9772	0,0466	0,9820	0,0340	0,9789	0,0428
Midilli	0,9971	0,0161	0,9970	0,0169	0,9970	0,0140	0,9968	0,0166

Na Figura 15 tem-se a taxa de secagem em função da umidade adimensional, neste gráfico é possível identificar com clareza os quatro períodos de secagem.

Figura 15 - Taxa de secagem em função do teor de umidade.



5.2.2 Testes de fluidização com inertes

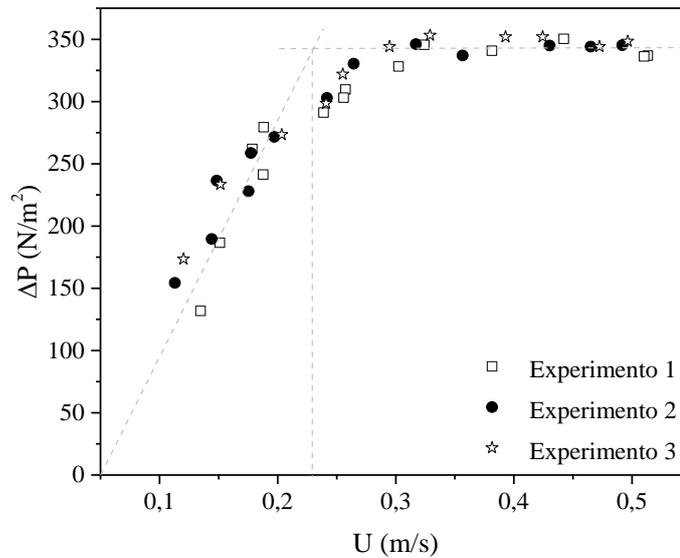
Neste subtópico foram testadas várias condições de obtenção do leito fluidizado, as principais são apresentadas na Figura 16. Inicialmente foi verificada a fluidodinâmica da borra úmida (63%, b.u.), a condição mais difícil de operação. A borra úmida não fluidizou e apresentou comportamento pistonado devido a sua natureza coesiva, como apresenta a Figura 16.a.

Figura 16 - (a) escoamento pistonado da borra úmida (b) fluidização da borra seca (c) teste borra e polipropileno (d) fluidização da borra úmida na presença da borra seca.



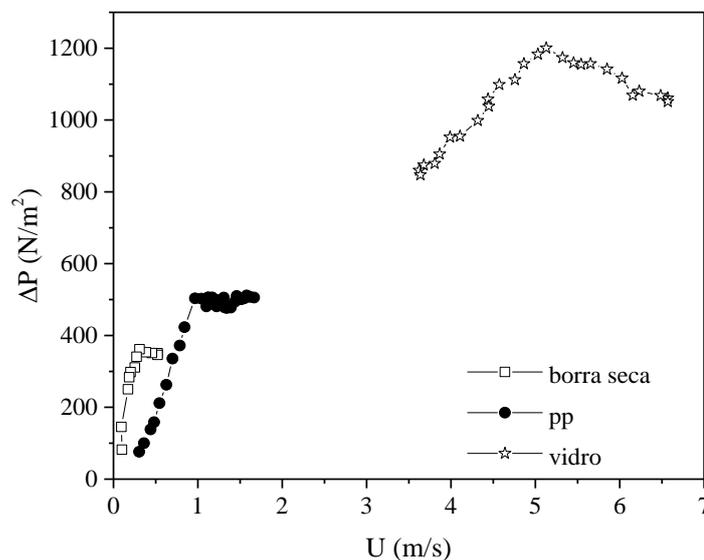
Seguiu-se para a caracterização fluidodinâmica da borra seca, Figura 17. A boa qualidade de fluidização da borra seca já era esperada por se tratar de um sólido do tipo Geldart B, ter uma fração de finos inferior a 40% e $IH=1,19\pm 0,03$ (Figura 16.b). A partir da Figura 17 pode-se verificar a reprodutibilidade dos dados do secador e a velocidade superficial do gás de mínima fluidização, $U_{mf}=0,23\text{m/s}$. Notou-se que o início da fluidização não se dá em um ponto específico de velocidade, mas no intervalo de 0,2 e 0,3m/s, este tipo de curva característica é encontrado quando se tem uma distribuição ampla do tamanho das partículas, que é o caso da borra de café (vide a Figura 13). A medida que a velocidade do ar aumenta as partículas menores já começam a fluidizar nos espaços vazios, enquanto as partículas grandes permanecem estacionárias, assim a fluidização acontece parcialmente, resultando na queda de pressão intermediária. Só quando o ar arrasta as maiores partículas a pressão torna-se constante e o leito inteiramente fluidizado, esse fenômeno pode ser visto também em Jiliang et al. (2013) para três tipos diferentes de distribuição de partículas.

Figura 17 - Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para a borra de café seca.



Na Figura 18 tem-se a caracterização fluidodinâmica dos três inertes testados. As U_{mf} são de 1,1m/s e 5m/s para as partículas de polipropileno e de vidro, respectivamente. Como esperado, a U_{mf} aumenta à medida que a densidade da partícula aumenta e, diferente da curva fluidodinâmica da borra seca, a transição do leito fixo para o fluidizado se dá em um ponto da velocidade de mínima fluidização, devido a uniformidade do tamanho das partículas.

Figura 18 - Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar: borra de café seca, partículas de polipropileno e de vidro.



Ao avaliar a fluidização na composição partículas de vidro e borra úmida, foi verificado que, a medida que a borra secava era segregada completamente do inerte, formando dois leitos distintos. Como a velocidade de mínima fluidização do vidro é muito superior à da borra seca (Figura 18), esta era rapidamente transportada. Com as partículas de polipropileno de diâmetro próximo e densidade inferior, mesmo a U_{mf} sendo significativamente menor o mesmo efeito foi observado, a borra segregou do inerte, migrando para a região superior do leito (Figura 16.c).

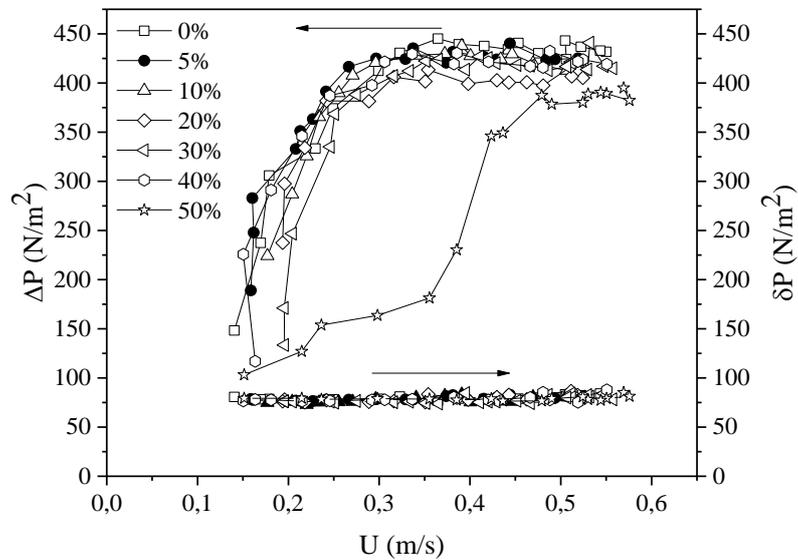
Na tentativa de conseguir um leito com fluidização mais homogênea e que operasse com menor velocidade do ar, foi utilizada a borra seca como inerte da úmida, onde foi obtida uma mistura homogênea, apesar da formação de agregados na região inferior do leito (Figura 16.d). Além disso, foi testada a borra seca como inerte da borra úmida alimentada continuamente, foi obtida uma boa qualidade de fluidização, o colapso do leito só aconteceu na proporção de $b_s/b_u=0,47$, onde houve a formação de caminhos preferenciais e o fim da fluidização.

5.2.3 Influência da umidade na fluidodinâmica do leito

Tendo em vista a boa fluidização da borra seca e o escoamento pistonado da borra úmida, seguiu-se com testes fluidodinâmicos parametrizados no teor de umidade da borra, apresentados na Figura 19, junto com o desvio padrão da queda de pressão (δP). Verificou-se um comportamento fluidodinâmico muito semelhante para os seis experimentos com umidade entre 0 e 40% (b.u.). Neste intervalo de umidade as flutuações da queda de pressão estão dentro do desvio padrão da medida. Notou-se ainda que, na região do leito fluidizado, a queda de pressão do leito variou apenas entre 400 e 450N/m² sem que se identificasse nenhuma correlação entre a queda de pressão e o aumento da umidade. Assim, com a semelhança encontrada e a boa fluidização observada entre 0 e 40% (b.u.), adotou-se a velocidade de mínima fluidização como $U_{mf}=0,25\text{m/s}$.

Ao ser testada a borra com 50% (b.u.), o estado de fluidização só foi obtido para velocidades do ar superiores a 0,47m/s e foi observado na região do leito fixo uma queda brusca de pressão devido à formação de um canal preferencial no centro do leito que facilitou a passagem do ar. A borra a 60% (b.u.) também foi testada e para esta foi observado o escoamento pistonado, assim verificou-se uma zona de transição de regimes entre 40 e 60% de umidade, de forma que neste intervalo o teor de água passa a interferir no comportamento do leito.

Figura 19 - Curva fluidodinâmica para a fluidização da borra de café parametrizada na umidade: queda de pressão e flutuações em função da velocidade do ar.

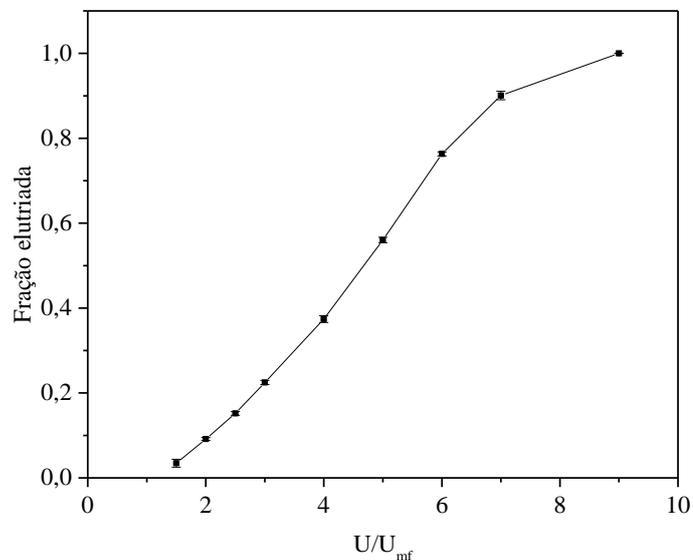


Neste sentido, Sousa e Ferreira (2018) analisaram a influência da umidade na escoabilidade da borra de café de diâmetro médio de 225, 400 e 500 μ m avaliando dois parâmetros clássicos: o índice de Hausner (HR) e o ângulo de repouso (AoR). Os autores verificaram que o aumento do teor de umidade até 50%, apesar da variação granulométrica, praticamente não afetou o HR e apresentou apenas um leve aumento no AoR, mostrando que neste intervalo o teor de umidade não influencia as características de escoabilidade do material, por isso o mesmo o comportamento fluidodinâmico foi observado para a borra entre 0 e 40% (b.u.) na Figura 19. No entanto, apenas para a granulometria mais fina (diâmetro médio de 225 μ m) foi avaliada a escoabilidade com umidade superior a 50%, neste caso, Sousa e Ferreira (2018) identificaram que a 59% (b.u.) houve a piora da escoabilidade, que corresponde a um aumento significativo no IH e no AoR. A piora foi atribuída a mudança de estado pendular para funicular a um nível de saturação de 42%, indicando que os aglomerados saturados e as pontes líquidas começam a afetar os parâmetros de escoabilidade. De maneira análoga à dificuldade de escoamento foi identificada neste estudo para dificuldade de fluidização borra com umidade de 50% e 60% (b.u.).

5.2.4 Elutriação do leito seco em função da velocidade superficial do ar

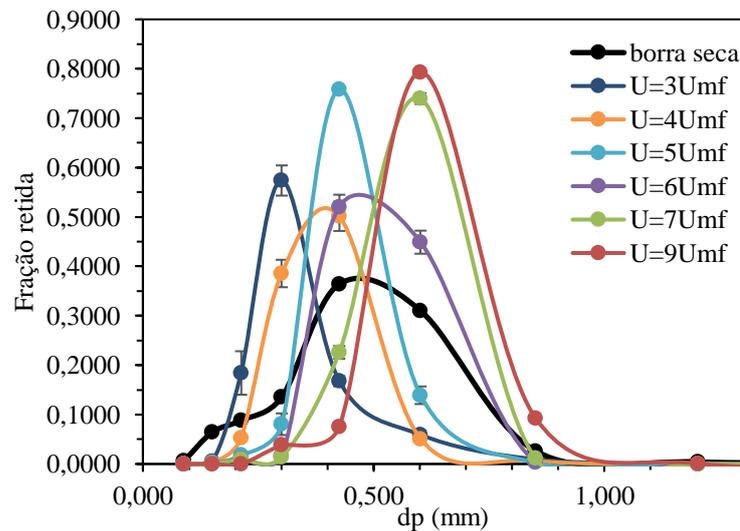
Os testes de elutriação foram realizados em batelada, submetendo o leito de 0,500kg de borra seca a várias velocidades superficiais de ar, da menor para a maior em sequência, e recolhido o elutriado com o intuito de caracterizar a separação granulométrica do leito. A Figura 20 mostra a fração mássica elutriada do leito (razão entre a massa elutriada e a massa total inicial contida no leito) em função da razão U/U_{mf} . A $2U_{mf}$ apenas 10% do leito contido na câmara de secagem sai pelo *under flow* do ciclone, o que corresponde às frações mais finas do pó, a $4U_{mf}$ essa fração corresponde a aproximadamente 37% do total, enquanto que a $9U_{mf}$ todo leito é expelido. O amplo intervalo de velocidades necessário para cobrir toda a faixa de elutriação ressalta a ampla variação granulométrica do pó, já salientada pela caracterização fluidodinâmica da borra seca no leito fluidizado. Esta característica é um fator complicador para uma secagem homogênea e uniforme do pó, pois a ampla variação de tamanho dificulta um controle do leito, há um tempo de residência diferente para cada tamanho de particulado. A partir da velocidade do ar escolhida para operação, parte do material está sujeito ao transporte pneumático ainda úmido assim que entra no leito, parte fluidiza, reduz a umidade para então ser arrastado pelo leito e outra parte, mesmo seco, não consegue ser expelida pelo seu grande tamanho.

Figura 20 - Fração de sólidos seco elutriada em função da razão U/U_{mf} .



No entanto, este comportamento permite pensar o processo de secagem atrelado à separação e classificação do pó por tamanhos, com objetivo de separar os finos dos grossos, e assim, além de reduzir a umidade, só encaminhar para o processo as partículas com a granulometria adequada.

Figura 21 - Distribuição granulométrica do elutriado parametrizado na velocidade imposta ao leito.



Com base nisto, foi feita a análise granulométrica das frações apresentadas na Figura 21. A linha preta refere-se à distribuição granulométrica da amostra de borra inicial da qual o leito foi alimentado, esta tem diâmetro médio variando entre as peneiras de 0,089 a 1,2mm, as frações retidas nas peneiras de diâmetros maiores que 0,85mm, no geral, são caracterizadas pela palha e não pelas partículas de borra de café propriamente ditas, como a palha estava presente até o menor diâmetro médio de 0,602mm optou-se por continuar os experimentos com elas, tendo em vista que essa sempre está presente no processo real, embora as suas características físicas a diferenciem da borra de café. As distribuições das frações foram sobrepostas no mesmo gráfico da distribuição da amostra de borra seca para facilitar a visualização da fração que foi expelida do leito para cada velocidade superficial de ar. Foram avaliadas as velocidades onde houve quantidade de massa suficiente para a análise granulométrica em triplicata pela metodologia adotada. As melhores separações granulométricas foram obtidas para as frações expelidas a maiores velocidades, onde o desvio padrão da análise foi muito próximo de zero. O mesmo não aconteceu para as frações de velocidades menores, que apresentou um desvio padrão mais acentuado nas repetições dos experimentos, verificando-se assim que a separação

dos finos nas peneiras não foi tão reprodutível quanto a dos grossos. Contudo, obteve-se uma boa separação do pó nas frações propostas.

Na Tabela 8 é mostrado o diâmetro de *Sauter* calculado a partir das distribuições para cada fração acompanhado do desvio padrão da medida, nota-se, assim como na Figura 21 associado as maiores velocidades estão os maiores diâmetros de partículas.

Tabela 8 - Diâmetro de Sauter das amostras do pó elutriado relacionado com a velocidade superficial do ar.

U_{mf}	U(m/s)	\bar{d}_s (mm)	desvio
3	0,75	0,302	0,008
4	1,00	0,355	0,005
5	1,25	0,420	0,005
6	1,50	0,482	0,004
7	1,75	0,537	0,002
9	2,25	0,578	0,002
Borra seca		0,362	0,007

5.3 Redução do teor de umidade por prensagem

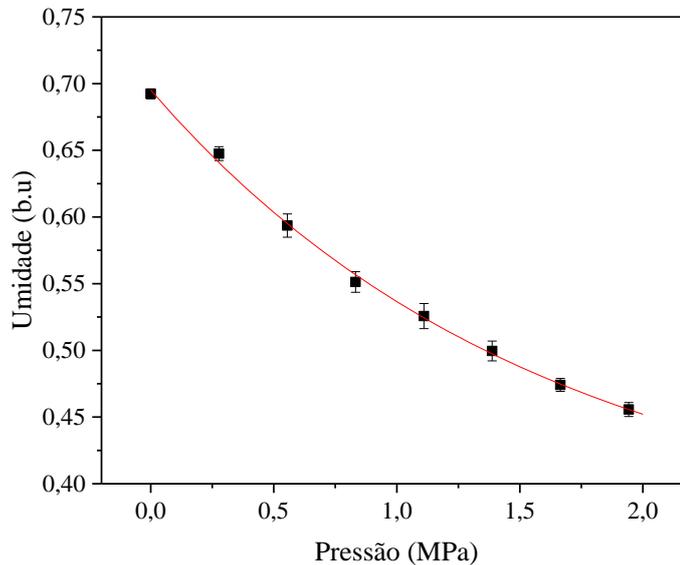
5.3.1 Prensagem rápida

A Figura 22 apresenta o teor de umidade em função da pressão exercida pela prensa, o teor de umidade é reduzido de 70 para aproximadamente 46%. À pressão de 1,39MPa cerca de 20 unidades percentuais são reduzidas, portanto a maior parte da água é retirada nas compressões iniciais e os acréscimos seguintes de pressão acarretam uma pequena variação no teor de umidade.

Kang et al. (2017) apresentaram uma correlação empírica para o teor de umidade da borra de café (caracterizada seca por 96,2% de partículas com diâmetro entre 100 e 500 μ m, semelhante à deste trabalho) em função do poder calorífico inferior, esta correlação foi obtida a partir de dados experimentais de borra úmida a 65 e 10% (b.u.). Adotando a correlação de Kang et al. (2017), calculou-se um ganho de aproximadamente 40% no poder calorífico quando

a umidade da borra é reduzida de 65 para 45%, como a redução nesta etapa foi de 70% para 46%, o ganho em poder calorífico da borra é superior a 40%.

Figura 22 - Umidade da borra em função da pressão aplicada: dados experimentais e ajuste do modelo.



Os dados experimentais de umidade em função da pressão foram ajustados a partir do modelo utilizado por Laurila et al. (2014) para a compressão da madeira:

$$X = a + be^{-cP} \quad (17)$$

onde X é o teor de umidade, P é a pressão exercida pelo pistão e os parâmetros $a=0,3561$, $b=0,3391$ e $c=0,6310$ foram obtidos a partir do ajuste dos dados experimentais com coeficiente de determinação de $R^2=0,99533$, Figura 22. Vale ressaltar o bom ajuste do modelo para materiais de características reológicas tão distintas quanto a borra de café e a madeira.

A máxima umidade retirada pela prensa representa, de acordo com a cinética de secagem (Figura 15), a água que seria evaporada no período taxa constante (onde predominam os mecanismos convectivos de transferência de calor e massa) e em aproximadamente metade do primeiro período decrescente (onde os mecanismos difusivos estão começando a atuar). A alta porosidade do material também facilita o transporte de água por capilaridade nestes períodos,

restando então para a secagem térmica a retirada da umidade onde os mecanismos difusivos passam a predominar.

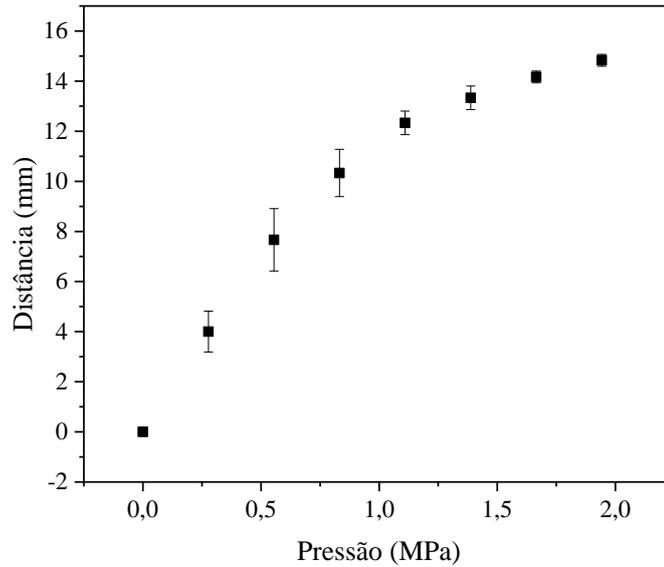
A partir de 1,94MPa, o aumento progressivo da pressão implica em uma redução muito pequena da umidade, porém com a pressão de 1,5MPa já se obtém a borra com umidade inferior a 50% (b.u) que, de acordo com os testes de fluidodinâmica em função da umidade (item 5.2.3) é adequada para fluidização e também para a queima direta na caldeira, que nesta umidade ocorre razoavelmente embora de forma ineficiente (SIVETZ, 1963).

Durante os experimentos foi possível verificar a concentração do material úmido no centro do recipiente de prensagem, devido à resistência formada pelo material mais seco próximo à parede, o que limita a operação de prensagem.

Embora a borra de café tenha alta quantidade de lipídios, entre 11 e 20% (m/m) em base seca, o que aponta a viabilidade para a produção de biodiesel, Efthymiopoulos et al. (2018) não identificaram a presença de óleo no desague da borra de café por prensagem. Os autores atribuíram isto à alta viscosidade dinâmica do óleo da borra de café (50,989 m Pa s), às grossas paredes celulares que resistem à ruptura e ao empacotamento do leite que fecha os capilares. O fato de que o desague por prensagem mecânica não implique na extração do óleo favorece o poder calorífico da borra seca para queima direta como combustível sólido.

Na Figura 23 são mostrados os dados da distância percorrida pelo pistão em função da pressão. Nota-se uma tendência à estabilização, o que reforça a limitação da prensagem para a redução no teor de umidade. De 0 a 1,94Mpa, o pistão percorreu $14,8 \pm 0,2$ mm. Com a distância movida pelo pistão e a força requerida para movê-lo, a energia necessária de 0,51kJ/kg foi calculada para reduzir a umidade de 70 para 45%. Esse consumo de energia representa um valor teórico, na realidade o valor do consumo de energia será maior quando se leva em conta a eficiência elétrica do motor. Por outro lado, o calor latente de vaporização da água é 2257kJ/kg à pressão atmosférica, assim a energia requerida pelo pistão representa 0,01% da energia necessária para vaporizar a água já no ponto de saturação, desta forma justifica-se a prensagem como uma operação energeticamente viável.

Figura 23 -Deslocamento do pistão em função da pressão aplicada.



5.3.2 Análise da influência do tempo de prensagem

Os resultados do planejamento experimental para a avaliação da influência da pressão e do tempo de prensagem sob a umidade são apresentados na Tabela 9. Os limites inferior e superior de pressão foram escolhidos no intervalo que correspondesse a umidades em torno de 50%(b.u.), a maior umidade onde se obteve fluidização e para que variações de pressão resultassem em variação perceptível de umidade.

Tabela 9 - Dados de umidade para testes de prensagem contínua.

Experimento	Pressão (MPa)	Tempo (s)	Umidade (b.u)
1	1,11	10	0,56
2	1,66	10	0,50
3	1,11	30	0,50
4	1,66	30	0,47
5	1,33	20	0,50
6	1,33	20	0,49
7	1,33	20	0,49

Com os resultados da Tabela 10 e o software statistica 7, foi gerada a Tabela 10, onde são apresentados os efeitos da pressão, do tempo de prensagem e da interação dos dois fatores. Pelo

teste do p-valor observa-se que o efeito da pressão e do tempo de prensagem tem influência negativa significativa sob o teor de umidade ($p\text{-valor} < 0,05$), quanto maior é a pressão ou tempo de prensagem, menor é a umidade retida na borra. No entanto a interação dos dois fatores pode ser negligenciada, visto que um não potencializa o efeito do outro, mas atuam de forma independente ($p\text{-valor} > 0,05$). Nota-se ainda que o tempo de prensagem tem influência um pouco maior do que a pressão exercida, o que justifica o uso de valores de pressão menores por um maior tempo de prensagem.

Tabela 10 - Análise estatística da influência da pressão e tempo sobre a umidade.

Fator	Efeito	Erro padrão	p-valor
Média	0,500553	0,004951	0,000002
Pressão	-0,042974	0,013098	0,046395
Tempo	-0,044325	0,013098	0,042962
Pressão x Tempo	0,012039	0,013098	0,425826

Neste contexto, Efthymiopoulos et al. (2018) analisaram a influência da pressão de compressão, do tempo de prensagem e da temperatura do sistema em amostras de 100g de borra de café a 57% (b.u.) de umidade entre 0,15 e 0,55MPa entre 5 e 30min, em escala de pressão menor do que a apresentada nesta dissertação em intervalos de tempos muito maiores. Apesar das condições distintas, eles também constataram a significativa influência da pressão aplicada e do tempo de prensagem sobre o teor de umidade. No entanto, ao avaliar apenas prensagens de longas durações foi verificado que maiores remoções de água foram obtidas independentemente da pressão aplicada. E que ao aumentar a temperatura na prensagem da ambiente para 100°C, o teor de umidade removida após 20min de experimento teve apenas um leve acréscimo de 38,8 para 41,9%. Com base na insensibilidade a novos aumentos de pressão, mesmo a temperaturas elevadas, e as altas taxas iniciais de remoção de umidade em todas as condições, Efthymiopoulos et al. (2018) sugerem uma fração significativa da umidade em excesso retirada se trata de água não-ligada.

5.4 Sistema de alimentação

Antes de serem apresentados e discutidos os resultados da secagem no leito vibrofluidizado, este tópico avalia como os principais parâmetros de secagem analisados neste

trabalho (velocidade e temperatura do ar e vibração do leito) interferiram no sistema de alimentação da borra de café no leito.

O sistema de alimentação do leito é composto por um transportador tipo parafuso helicoidal, mantido sempre a mesma rotação durante todos os experimentos. Ao fim de cada ensaio, toda borra elutriada e a borra retida no leito foram secas e quantificadas, e por balanço de massa a vazão de alimentação foi calculada. Na Tabela 11 são apresentadas as vazões de alimentação calculadas com a variação de temperatura e velocidade do ar de secagem para cada configuração, o planejamento experimental foi elaborado afim de se obter a influência de cada fator em cada configuração.

Tabela 11 - Vazão de alimentação calculada por balanço de massa para as 3 configurações experimentais.

Experimento	Vazão calculada (g/min)		
	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3
	$\Gamma=4; A=0,015m$	$\Gamma=4; A=0,003m$	$\Gamma=0$
50°C; 4U _{mf}	23,00	33,83	18,37
50°C; 6U _{mf}	17,33	13,77	6,98
60°C; 5U _{mf} 1	19,41	25,65	6,59
60°C; 5U _{mf} 2	21,95	26,27	5,58
60°C; 5U _{mf} 3	21,77	23,22	7,00
70°C; 4U _{mf}	24,43	42,11	19,72
70°C; 6U _{mf}	16,67	14,31	5,94

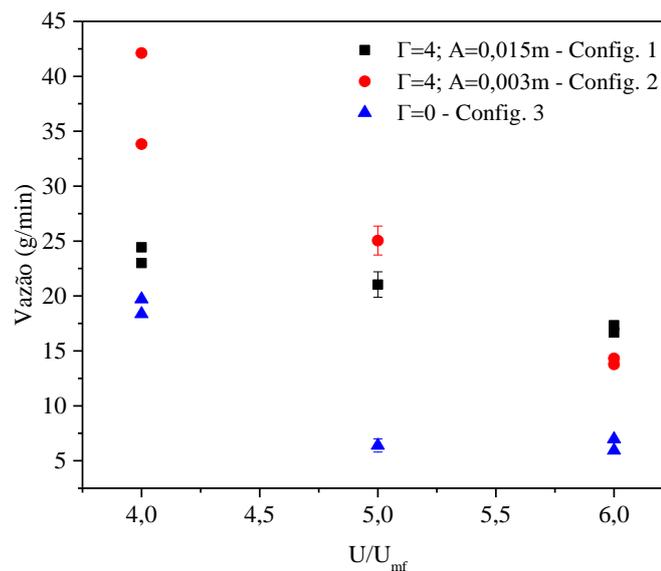
Observou-se que, para as três configurações, o aumento da velocidade superficial do ar causou a diminuição da vazão de alimentação. O leito em estudo tem duas saídas de ar para atmosfera, a saída pelo silo e a saída pelo ciclone. A maior parte do ar de secagem, que entra pela parte inferior do leito, segue para a saída pelo ciclone, mas outra parte tenta permear a borra contida no silo. Sendo a borra de café é um pó fino, coesivo a 45%(b.u.) e tendo sido mais compactada no transporte mecânico, o escape de ar pelo silo é evitado. Assim o ar que tenta permear a borra no alimentador contribui para aumentar o empacotamento, causando o aumento da resistência à descarga da borra no interior do leito, isto leva à diminuição da vazão de alimentação com o aumento da velocidade do ar. Este efeito foi mais acentuado a velocidade de 4U_{mf} que em todas as configurações apresentou maior aumento na taxa de alimentação, a

variação de 5 para $6U_{mf}$ foi menor para as configurações com vibração e imperceptível para o leito fluidizado. Enquanto que a temperatura do ar parece não influenciar a vazão de alimentação.

A vibração do leito em todos os casos favoreceu o aumento da vazão da borra transportada no alimentador com relação ao leito fluidizado, de modo que a vibração do leito ajudou a romper o empacotamento na conexão, aumentando a vazão de alimentação (como descrito no Quadro 2). No entanto, a adição de vibração atuou de forma diferente no mesmo adimensional.

Na Figura 24 são apresentadas as vazões de alimentação em função da U/U_{mf} . A 4 e $5U_{mf}$ a diminuição da amplitude para o mesmo adimensional de vibração implica em um aumento na vazão de alimentação, enquanto que a $6U_{mf}$ o aumento da amplitude desfavorece a alimentação. Nota-se que a maiores vazões ar, o efeito da amplitude e frequência vibracionais são menos perceptíveis.

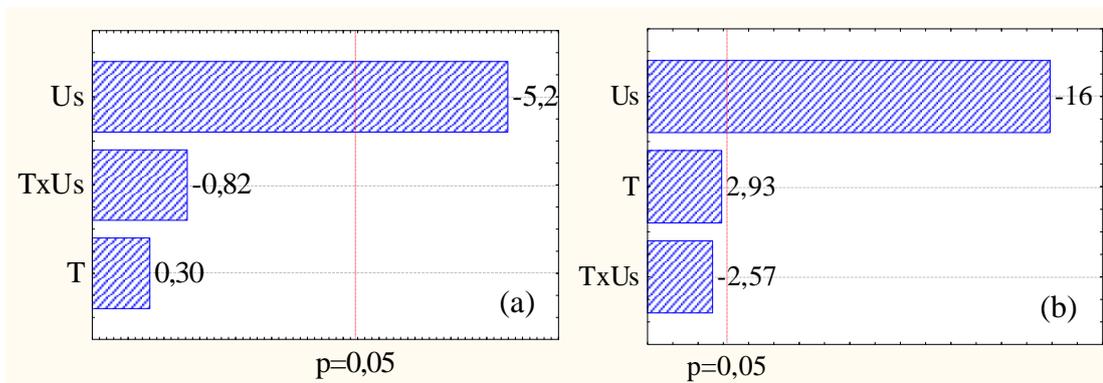
Figura 24 - Vazão de alimentação em função da U/U_{mf} .



Pelo fato da conexão entre o alimentador e o leito ser diferente no leito fluidizado e vibrofluidizado optou-se por se seguir as análises individualmente para o caso fluidizado e para os dois casos vibrofluidizados. Utilizando o software *statistica 7.0* para os dados do

planejamento experimental para o leito fluidizado, nenhum dos fatores alcançou efeito estatisticamente significativo ao nível de 95% de confiança ($p\text{-valor} > 0,05$). Já para as configurações 1 e 2 constatou-se que apenas a velocidade do ar é um fator estatisticamente significativo sobre a vazão de alimentação, em ambos os casos, como mostrado nos diagramas de Pareto na Figura 25. Assim foi verificado que a influência da velocidade superficial sobre a vazão de alimentação é maior para a configuração 2, onde o adimensional de vibração é composto pela menor amplitude, do que para a configuração 1. A discussão sobre os motivos que causam essa intensificação do efeito da velocidade do ar na configuração 2 será ainda apresentada no tópico 5.5.1, produção de elutriado.

Figura 25 - Diagrama de pareto para a influência de T e U_s na vazão de alimentação para: (a) configuração 1 e (b) configuração 2.



O alimentador sem estar acoplado ao leito como mostrado no esquema A do Quadro 2 a 38RPM tem uma vazão de alimentação média para atmosfera de 62,5g/min. Avaliando a maior taxa de alimentação que ocorreu que foi de 42,11g/min a $4U_{mf}$, 70°C e $A=0,003m$, tem-se que essa vazão significa aproximadamente 60% da capacidade de escoamento do parafuso, para o fluidizado foram obtidos porcentagens ainda mais baixas, todas apresentadas na Tabela 12. Essa diminuição da vazão de alimentação foi atribuída principalmente à aderência da borra a parede da conexão e à vazão de ar que causa o aumento do empacotamento.

Tabela 12 - Capacidade de escoamento para as 3 configurações experimentais.

Experimento	Capacidade de escoamento (g/min)		
	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3
	$\Gamma=4; A=0,015m$	$\Gamma=4; A=0,003m$	$\Gamma=0$
50°C; 4U _{mf}	0,32	0,47	0,26
50°C; 6U _{mf}	0,24	0,19	0,10
60°C; 5U _{mf} 1	0,27	0,36	0,09
60°C; 5U _{mf} 2	0,31	0,37	0,08
60°C; 5U _{mf} 3	0,30	0,32	0,10
70°C; 4U _{mf}	0,34	0,59	0,27
70°C; 6U _{mf}	0,23	0,20	0,08

5.5 Secagem

5.5.1 Produção de elutriado

A taxa de produção foi quantificada por coletas de elutriado a cada 5 min, os gráficos de produção de elutriado em função do tempo de todos os ensaios estão apresentados no Apêndice A. Para comparação, a produção média de pó ao longo dos 40min de experimento é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 – Taxa de produção de elutriado para as 3 configurações experimentais.

Experimento	Produção de elutriado (g/min)		
	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3
	$\Gamma=4; A=0,015m$	$\Gamma=4; A=0,003m$	$\Gamma=0$
50°C; 4U _{mf}	6,310	9,959	3,985
50°C; 6U _{mf}	10,871	8,539	3,519
60°C; 5U _{mf} 1	9,112	12,639	2,480
60°C; 5U _{mf} 2	10,723	13,085	2,096
60°C; 5U _{mf} 3	10,186	11,509	2,583
70°C; 4U _{mf}	6,928	14,318	4,460
70°C; 6U _{mf}	10,311	8,902	3,134

Na configuração 1 observou-se que ao aumentar a velocidade do ar de $4U_{mf}$ para $6U_{mf}$ a uma mesma temperatura, houve um aumento na produção média de pó, como esperado, uma vez que o aumento da velocidade superficial do ar permite o arraste de partículas maiores do leito, aumentando a produção. No entanto para a configuração 2, ao se analisar o aumento da velocidade do ar de $4U_{mf}$ para $6U_{mf}$ a mesma temperatura, observou-se o contrário, o aumento da velocidade do ar provocou uma diminuição da produção de elutriado. Isto ocorre porque o aumento da velocidade do ar causa maior limitação na vazão de alimentação na configuração 2, como discutido no item 5.4. O comportamento da configuração 3 foi semelhante ao da 2, havendo menor taxa de alimentação, menos massa entrou no leito, conseqüentemente menor foi a produção de elutriado. Assim como a taxa de alimentação do leito fluidizado foi menor do que nas configurações vibracionais, a taxa de produção de pó também foi expressivamente inferior.

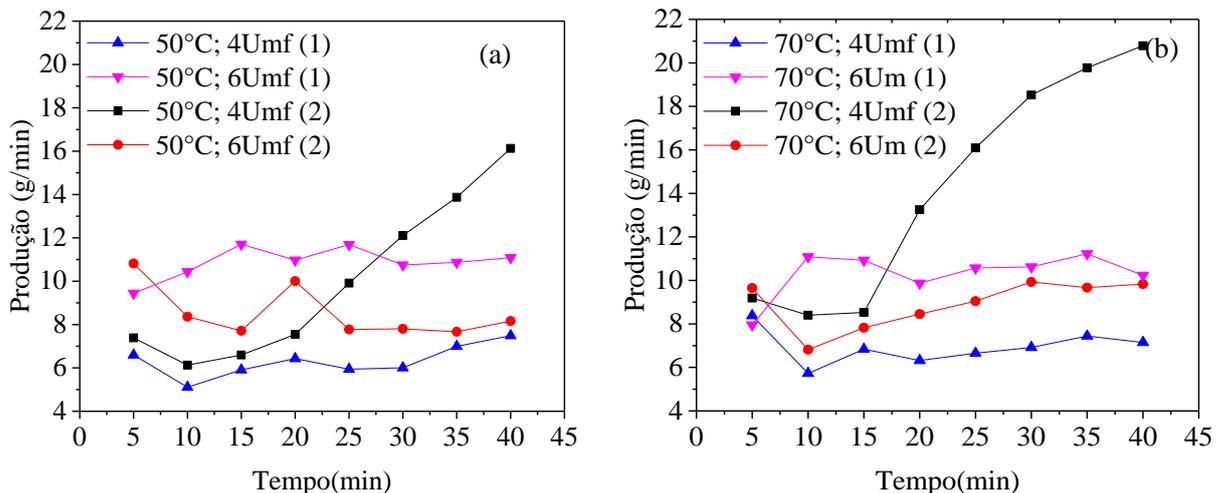
A velocidade de $4U_{mf}$, onde apenas as frações granulométricas mais finas são elutriadas, permitiu o acúmulo das frações grossas dentro do leito. Na configuração 2 este acúmulo passou a oferecer uma resistência grande o suficiente à passagem de ar, a ponto de favorecer o sistema de alimentação. Essa resistência pode ser constatada com os dados da Tabela 14, que apresenta a altura final da fração de borra que não foi elutriada, ou seja, a altura referente a borra que ficou retida no leito. Notou-se que a velocidade de $6U_{mf}$ apenas os sólidos mais grossos ficavam retidos no leito, o ar fluidizava a borra homogeneamente e não havia formação de bolhas no leito. Ao analisar a $5U_{mf}$ houve um aumento de 4 para 5cm na altura final do leito da configuração 1 para a 2 e poucas bolhas começaram a se formar no final do tempo experimental, enquanto que para a configuração 3 a altura do leito não chegou a 1cm devido à baixa taxa de alimentação do leito fluidizado mesma velocidade. Porém a velocidade de $4U_{mf}$ em todos os casos a altura final do leito nas duas temperaturas foram maiores do que nas outras velocidades. Na configuração 2 especialmente grandes bolhas de ar foram formadas indicando que o leito retido já era pesado o suficiente para dificultar a passagem do ar. Comparando apenas as configurações 1 e 2 a $4U_{mf}$ pode-se atribuir o aumento da produção de pó e da altura final do leito apenas às mudanças da amplitude e frequência vibracional.

Tabela 14 - Altura final do leito para as 3 configurações experimentais.

Experimento	Altura do leito (cm)		
	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3
	$\Gamma=4; A=0,015m$	$\Gamma=4; A=0,003m$	$\Gamma=0$
50°C; 4U _{mf}	9	15	8
50°C; 6U _{mf}	1	1	0,5
60°C; 5U _{mf} 1	4	5	1
60°C; 5U _{mf} 2	4	5	1
60°C; 5U _{mf} 3	4	4	1
70°C; 4U _{mf}	8	14	8
70°C; 6U _{mf}	1	1	0,5

Como o peso do leito a 4U_{mf} na configuração 2, fez com que a resistência oferecida pelo ar ao sistema de alimentação ficasse menor, conseqüentemente a medida que a altura do leito foi aumentando, maiores taxas de produção de pó foram atingidas ao longo do tempo. Este fato pode ser melhor observado na Figura 26, onde é apresentada a taxa de produção de pó em função do tempo, nas temperaturas de 50 e 70°C nas duas configurações. A 6U_{mf}, para ambas as configurações, e a 4U_{mf}, para a configuração 1, a taxa de produção de elutriado é bem uniforme e nestes casos o acúmulo das frações mais grossas no leito não provocou uma tendência de aumento da produção de elutriado no intervalo de tempo estudado, diferente do que se observou para 4U_{mf} na configuração 2.

Figura 26 - Produção de elutriado em função do tempo (a) temperatura de 50° e (b) temperatura de 70°.



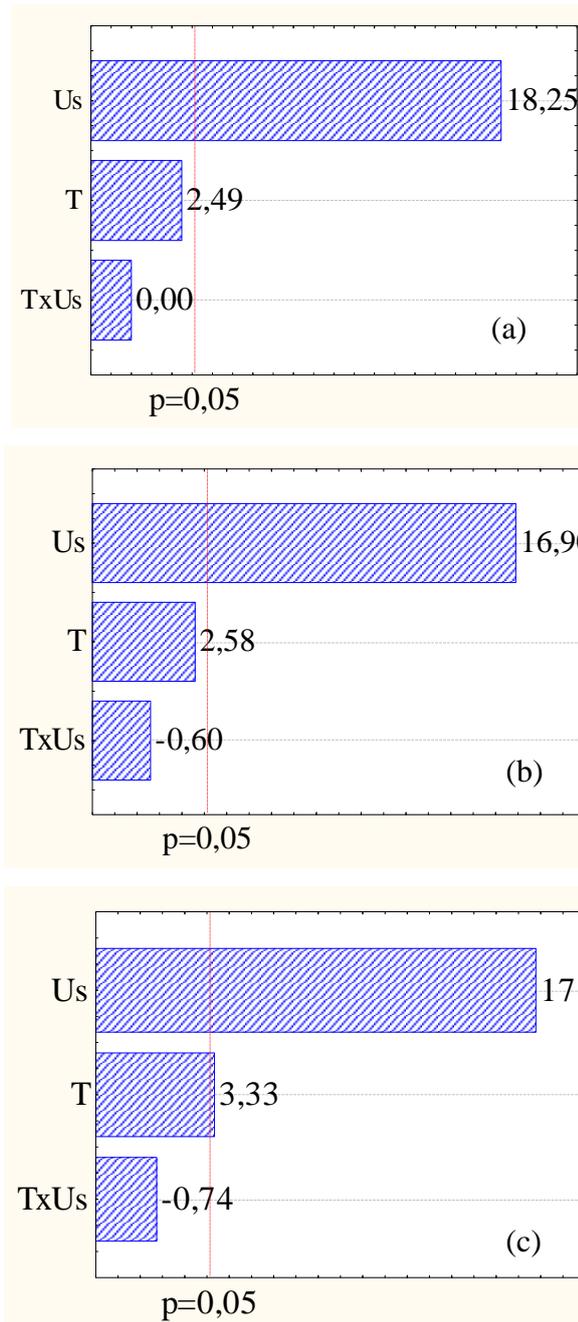
Como a vazão de alimentação variou de experimento para experimento, a fim de melhor avaliar a influência dos fatores sobre a produção de pó, tomou-se a fração de sólido elutriada (fração elutriada = $M_{\text{elutriado}}/M_{\text{alimentada}}$) apresentados na Tabela 15. Apesar da mudança de configuração vibracional, obteve-se resultados muito semelhantes nas configurações 1 e 2, mostrando que, nas condições adotadas, a amplitude e frequência vibracional não interferiram na fração expelida pelo leito. Quando comparada com a configuração 3 nota-se que a ausência de vibração do leito diminuiu a fração elutriada.

Tabela 15 – Fração elutriada para as 3 configurações experimentais.

Experimento	Fração elutriada		
	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3
	$\Gamma=4; A=0,015m$	$\Gamma=4; A=0,003m$	$\Gamma=0$
50°C; 4U _{mf}	0,37	0,37	0,24
50°C; 6U _{mf}	0,81	0,80	0,74
60°C; 5U _{mf} 1	0,64	0,67	0,57
60°C; 5U _{mf} 2	0,66	0,65	0,58
60°C; 5U _{mf} 3	0,65	0,65	0,55
70°C; 4U _{mf}	0,43	0,45	0,35
70°C; 6U _{mf}	0,87	0,86	0,81

O diagrama de Pareto da Figura 27, mostra que a velocidade do ar influencia significativamente a elutriação, em todas as configurações, no entanto a influência da temperatura é significativa apenas na configuração 3. Vale ressaltar também que os efeitos muito próximos mostrados no diagrama de Pareto, indicando que as configurações vibracionais 1 e 2 escolhidas não influenciaram a razão elutriada do leito para os intervalos de temperatura e vazão de ar analisados.

Figura 27 - Diagrama de Pareto para a influência de T e U_{mf} na fração de elutriado: (a) configuração 1, (b) configuração 2 e (c) configuração 3.



5.5.2 Conteúdo de umidade

A umidade foi quantificada em todas as amostras coletadas do elutriado a cada 5 min, todos os gráficos de teor de umidade em função do tempo estão apresentados no Apêndice A, onde observa-se baixa variação na umidade de saída. Para melhor comparação dos dados (analogamente ao item 5.5.1), são apresentadas na Tabela 16 a umidade média obtida dos 8

pontos de cada ensaio. Para configuração 1, a menor umidade de saída foi obtida a 70°C e a $4U_{mf}$, na maior temperatura e menor velocidade do ar. Na segunda configuração, a menor umidade foi obtida a 70° e $6U_{mf}$, essa variação na umidade está relacionada à agitação do leito e a taxa de alimentação, que foi distinta nas duas configurações. Na configuração 3, por ter uma taxa de alimentação menor em todos os ensaios, também se obteve umidades menores.

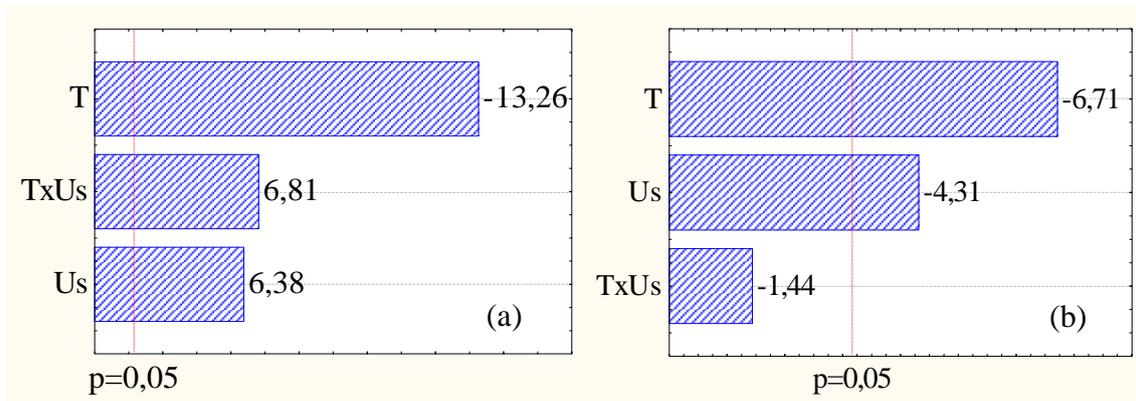
Tabela 16 - Conteúdo de umidade para as 3 configurações experimentais

Umidade média do elutriado (b.u.)			
	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3
Experimento	$\Gamma=4; A=0,015m$	$\Gamma=4; A=0,003m$	$\Gamma=0$
50°C; $4U_{mf}$	0,265±0,017	0,303±0,009	0,241±0,029
50°C; $6U_{mf}$	0,262±0,010	0,285±0,008	0,215±0,019
60°C; $5U_{mf}$ 1	0,220±0,020	0,274±0,015	0,160±0,030
60°C; $5U_{mf}$ 2	0,233±0,015	0,285±0,008	0,156±0,026
60°C; $5U_{mf}$ 3	0,223±0,020	0,276±0,009	0,163±0,023
70°C; $4U_{mf}$	0,148±0,031	0,270±0,015	0,155±0,049
70°C; $6U_{mf}$	0,225±0,005	0,234±0,007	0,171±0,006

Analisando estatisticamente os dados experimentais, a temperatura e a velocidade do ar influenciaram significativamente o processo, Figura 28, porém de maneiras diferentes. O fator que teve maior influência sobre ambas as configurações foi a temperatura. Quanto maior a temperatura utilizada, menor o teor de umidade do produto (comparando na mesma velocidade do ar e na mesma configuração). Tal dado mostra que após a etapa de prensagem, formando um leito fluidizado de boa qualidade, já é possível reduzir a umidade da borra para uma queima eficiente a baixas temperaturas (entre 50 e 70°C). Isto representa uma economia energética, uma vez que o gás de exaustão das caldeiras tem em geral temperatura de trabalho superior a estas. A velocidade do ar, por influenciar também a alimentação, provocou efeitos diferentes na umidade. Na primeira configuração, a redução de velocidade significa uma redução também no teor de umidade, já na segunda, a redução da velocidade provoca um aumento muito acentuado na vazão de alimentação e, conseqüentemente, uma menor redução do teor de umidade no elutriado, segundo a análise estatística. Enquanto que na primeira configuração a combinação

da temperatura e vazão de ar teve efeito significativo para o processo de secagem, na segunda configuração os fatores atuaram apenas de formas independentes. Na terceira configuração, assim como para a taxa de alimentação, nenhum fator foi estatisticamente significante a um nível de 95%.

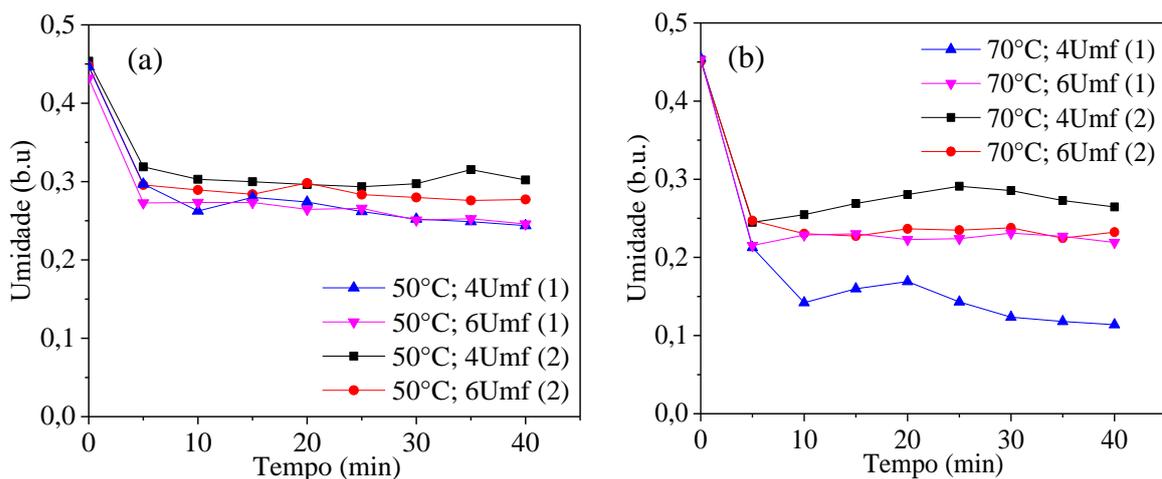
Figura 28 - Diagrama de Pareto para a influência de T e U_{mf} no conteúdo de umidade:
(a) configuração 1 e (b) configuração 2.



Como nos dois casos o maior efeito encontrado foi o da temperatura, a Figura 29 apresenta o teor de umidade em função do tempo a 50°C (a) e a 70°C (b) separadamente para melhor compreensão do efeito da velocidade do ar e do adimensional de vibração. A 50°C, Figura 29.a, a variação da umidade entre os ensaios com a velocidade do ar considerando a mesma configuração de vibração foi bem tênue. Isto acontece provavelmente porque a umidade contida na borra a 50°C está no estado pendular, conseqüentemente a variação da velocidade do ar não contribui para retirada da umidade. Nesta condição o vapor difunde-se através do sólido e o calor é transferido por condução na parede do material. Por outro lado, avaliando o efeito da vibração para uma dada velocidade, nota-se que os ensaios da configuração 1 estão em um patamar levemente inferior, de modo que, apesar da variação da alimentação, a redução do teor de umidade foi favorecida no adimensional de maior amplitude e menor frequência. Na Figura 29.b a 70°C os efeitos podem ser observados com mais clareza. A $4U_{mf}$ a variação da umidade com a modificação da vibração de (1) para (2) foi de 0,15 para 0,30(b.u.) em média. Este aumento está associado com a composição vibracional de menor amplitude, que desfavorece a secagem para este material e também fez com que a taxa de alimentação fosse aumentada de 24,43 para 42,11g/min, que causou a formação de grandes bolsões de ar por causa

do acúmulo das frações mais grossas no leito, prejudicando o contato sólido-gás. Já a $6U_{mf}$ não foi verificada a influência do adimensional de vibração, as umidades se mantiveram muito próximas durante todo o tempo e a taxa de alimentação variou apenas de 16,67 para 14,31g/min (da configuração 1 para a 2). Este caso está também vinculado ao fato de que a altas vazões de ar a influência da vibração no leito é menos perceptível.

Figura 29 - Umidade do elutriado em função do tempo (a) temperatura de 50° e (b) temperatura de 70° .



Como já explicado, a $4U_{mf}$ o aumento da vazão de alimentação causa uma elevação do teor de umidade. A $6U_{mf}$ a variação da umidade é pouco percebida quando apresentada em função do tempo pelos motivos também já explicados, porém, nota-se que a leve diminuição da vazão de alimentação com a mudança da amplitude de vibração vem acompanhada de um aumento de umidade. Isto significa que a $6U_{mf}$, onde mais de 80% da alimentação é elutriada e o acúmulo não é suficiente para interferir na alimentação, a maior amplitude de vibração proporciona maior capacidade evaporativa.

De modo geral, pode-se ver que em ambas as temperaturas, as menores umidades foram obtidas na configuração de vibração 1, que tem maior amplitude e menor frequência, resultados que corroboram com a secagem do lodo de esgoto e o leito desnatado descritos por Meili (2009). Vale ressaltar ainda que todas as umidades da borra de café estão no limite de 0,30 e 0,15 (b.u.) que é, segundo Sivetz (1963), as umidades onde a queima na caldeira ocorre de forma

instantânea/eficiente e não correm o risco de combustão espontânea quando estocada, respectivamente.

5.5.3 Diâmetro da partícula

O diâmetro das partículas também foi avaliado, tendo em vista que este é um fator relevante para escoabilidade e para a queima da borra. Como mostrado no item 5.2.4 houve segregação do leito, as partículas mais finas saíram pelo *underflow* do ciclone enquanto que as mais grossas acumularam no interior da câmara de secagem.

Na Tabela 17 são apresentadas o diâmetro médio de Sauter do elutriado. Para todas as combinações entre temperatura e velocidade do ar de secagem observou-se que o elutriado apresentou diâmetro de Sauter entre 0,271 e 0,370mm a 50°C; $4U_{mf}$ e $\Gamma=0$ e a 70°C; $6U_{mf}$, $\Gamma=4$; $A=0,015m$, respectivamente, condições extremamente opostas. Com a análise estatística do planejamento, apenas a velocidade do ar tem influência significativa sobre o diâmetro das partículas nos três casos. Nota-se também que a maiores temperaturas obteve-se particulado com maior diâmetro de Sauter em condições similares, no entanto este aumento causado pela temperatura é estatisticamente insignificante frente à influência da velocidade do ar. Avaliando as configurações de vibração tem-se: na configuração 1, os maiores diâmetros de partículas do elutriado, de modo que a maior amplitude do leito impulsionou a saída dos particulado maiores; na configuração 2, os diâmetros foram levemente inferiores aos da configuração 1, porém muito semelhantes à configuração 3, leito fluidizado. Este comportamento similar do leito vibrofluidizado com menores amplitudes de vibração e o leito fluidizado foi identificado por Deleffe (2005) para a caracterização fluidodinâmica, por Meili (2009) para a taxa de produção do pó e teor de umidade e nesta dissertação para a granulometria do elutriado.

Sabe-se a partir do trabalho de Sousa e Ferreira (2018) que os finos tem um escoamento muito pobre e que dificultam o transporte da borra devido a sua alta área superficial. Os finos passam a prejudicar o escoamento quando material tem diâmetro de Sauter inferior a 0,350mm ou quando constituem mais de 40% da fração mássica. Por outro lado, do ponto de vista da queima, quando as partículas são grandes, embora tenham melhor escoabilidade, a taxa de combustão passa a ser controlada pela difusão do oxigênio no meio, em contraste com as partículas muito menores, onde a taxa de queima é principalmente determinada pela cinética da reação intrínseca à combustão do sistema (DENNIS et al., 2006). De modo que a qualidade, o tempo e homogeneidade da queima é favorecida pelas partículas finas. Assim a avaliação de

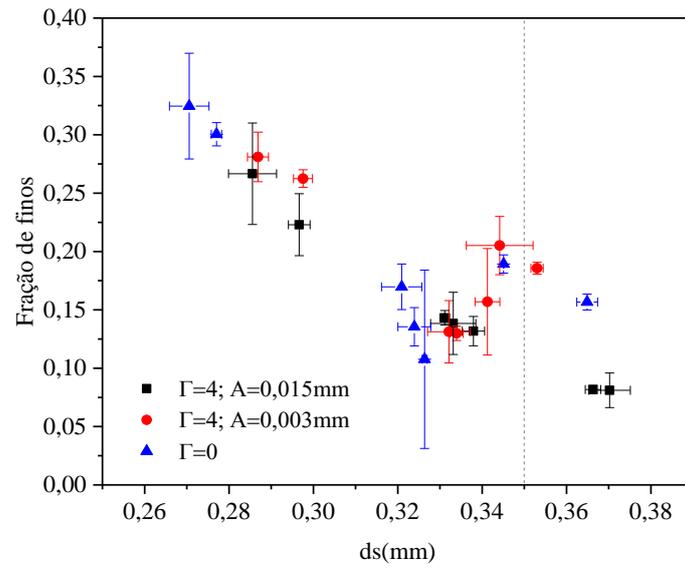
um secador de borra de café pode também proporcionar um corte no diâmetro da partícula que favoreça a queima e a escoabilidade simultaneamente.

Tabela 17 – Diâmetro de Sauter do elutriado.

Diâmetro de Sauter do Elutriado (mm)						
	Configuração 1		Configuração 2		Configuração 3	
Experimento	$\Gamma=4; A=0,015m$		$\Gamma=4; A=0,003m$		$\Gamma=0$	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
50°C; 4U _{mf}	0,286	0,006	0,287	0,003	0,271	0,005
50°C; 6U _{mf}	0,366	0,002	0,344	0,008	0,345	0,000
60°C; 5U _{mf} 1	0,331	0,001	0,341	0,003	0,326	0,001
60°C; 5U _{mf} 2	0,338	0,003	0,334	0,002	0,321	0,005
60°C; 5U _{mf} 3	0,333	0,005	0,332	0,005	0,324	0,004
70°C; 4U _{mf}	0,297	0,003	0,297	0,002	0,277	0,001
70°C; 6U _{mf}	0,370	0,005	0,353	0,001	0,365	0,002

Tendo em vista este apelo de escoabilidade e queima, a Figura 30 apresenta a fração de finos em função do diâmetro de Sauter. Em nenhum dos casos obteve-se fração de finos superior a 40%, pois neste sistema só seriam obtidas frações de finos neste patamar com velocidades de operação inferiores 4U_{mf}. Quanto as distribuições com diâmetro de Sauter superiores a 0,350mm, foram obtidas a 6U_{mf} a 70°C nas três configurações e a 50°C e 6U_{mf} apenas na configuração 1, neste caso a amplitude de vibração compensou a diminuição da temperatura. Dessa forma, pode-se notar que a velocidade de operação é um fator primordial na escolha do diâmetro de corte do elutriado.

Figura 30 - Fração de finos em função do diâmetro de Sauter.



CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Com os dados obtidos neste trabalho pode-se classificar a borra de café como sólido tipo tipo B de Geldart quando seca e que as demais caracterizações estão de acordo com os dados disponíveis na literatura. Foi verificado como a variação de umidade modifica o tipo de comportamento da borra no leito fluidizado. Constatou-se que a borra de café fluidiza com qualidade quando tem umidade de 0 a 50% em b.u., no entanto após esse teor a fluidização fica impossibilitada e ocorre escoamento pistonado. Através da curva fluidodinâmica da borra com umidades entre 0 a 40% (b.u.) obteve-se a U_{mf} igual a 0,25m/s, que foi utilizada em todos os experimentos de secagem. Para a avaliação do desague por prensagem verificou-se que a redução do teor de água da borra de café por compressão foi de 0,70 a 0,45 (b.u.), que a energia mecânica teórica é cerca de 0,01% da energia térmica de vaporização da água e que tanto a pressão quanto o tempo de prensagem são fatores significantes. Para o sistema de alimentação foi verificado que, para um mesmo adimensional de vibração, menores amplitudes provocam um aumento da influência da velocidade do ar de secagem sobre a vazão de alimentação da borra. Ao analisar a elutrição do leito foi observado que, independente da amplitude de vibração, o leito vibrofluidizado expeliu maior fração mássica do que o fluidizado. Já para a umidade média final do elutriado, as menores umidades foram obtidas no leito fluidizado porque este operou com vazões de alimentação mais baixas. Para as configurações com vibração a menor umidade obtida entre os sistemas analisados foi a $4U_{mf}$ e 70°C na configuração 1, de maior amplitude e menor frequência vibracional. Foi analisado o teor de umidade em função da vazão onde se constatou que com a vibração de maior amplitude consegue-se obter elutriado com menor umidade mesmo com uma taxa maior de alimentação. Por fim foi identificado que o diâmetro de Sauter do elutriado é maior com o leito vibrando na amplitude de 0,015m. Só foram obtidas simultaneamente condições favoráveis para escoamento e queima nos ensaios de secagem a $6U_{mf}$ a 70°C nas três configurações e a 50°C e $6U_{mf}$ apenas na configuração 1, tendo assim a amplitude de vibração compensado a diminuição da temperatura.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Análise da secagem da borra em leito fluidizado e vibrofluidizado por tamanho de particulado.
- Obtenção das isotermas de equilíbrio.
- Projeto de um secador elutriador com duas saídas de elutriado, uma para os finos na parte superior e uma para os grossos na parte inferior, evitando o acumulo no leito. Estudar a dinâmica do processo.
- Estudar a partir dos teores de umidade de saída obtidos neste trabalho o processo de combustão da borra em leito fluidizado com aplicação para a combustão em caldeiras ou para a fabricação de pellets de geometrias variadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, M. R.; DOUGAN, J. Waste Products. In: R. Clarke, R. J.; Macrae (Org.); **Coffee: Technology**. p.321, 1987. Londres: Elsevier Applied Science. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-94-009-3417-7>>.

ALVES, D. J. Morfologia do cafeeiro. In: CARVALHO, C. H. S. (Ed.). **Cultivares de café**. Brasília: EMPRAPA, 2007. Cap 2.

BALLESTEROS, L. F.; RAMIREZ, J.; ORREGO, C. E.; MUSSATTO, S. I. Optimization of autohydrolysis conditions to extract antioxidant phenolic compounds from spent coffee grounds. **Journal of Food Engineering journal**, v. 199, p. 1–8, 2017a.

BALLESTEROS, L. F.; RAMIREZ, M. J.; ORREGO, C. E.; TEIXEIRA, J. A.; MUSSATTO, S. I. Encapsulation of antioxidant phenolic compounds extracted from spent coffee grounds by freeze-drying and spray-drying using different coating materials. **Food Chemistry**, v. 237, p. 623–631, 2017b. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.142>>.

BRATU, E.; JINESCU, G. I. Effect of vertical vibrations on the pressure drop in a fluidised layer. **British Chemical Engineering**, v. 16, n. 8, p. 691–695, 1971.

CHO, D. W.; CHO, S. H.; SONG, H.; KWON, E. E. Carbon dioxide assisted sustainability enhancement of pyrolysis of waste biomass: A case study with spent coffee ground. **Bioresource Technology**, v. 189, p. 1–6, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.002>>.

CONAB: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira: café. **Monitoramento agrícola- Safra 2017**, v. 4, n. 1, p. 1–98, 2017. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>.

COSTA, A. B. S. **Análise do desempenho do leito vibrofluidizado na secagem de pasta**. 118f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

CRUZ, R.; BAPTISTA, P.; CUNHA, S.; PEREIRA, J. A.; CASAL, S. Carotenoids of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown on soil enriched with spent coffee grounds. **Molecules**, v. 17, n. 2, p. 1535–1547, 2012.

CRUZ, R.; MORAIS, S.; MENDES, E.; et al. Improvement of vegetables elemental quality by espresso coffee residues. **Food Chemistry**, v. 148, p. 294–299, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.059>>.

DALEFFE, R. V. **Contribuições para a análise do comportamento fluidodinâmico de um leito vibrofluidizado**. 2005. 334f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

DAVILA-GUZMAN, N. E.; CERINO-CÓRDOVA, F. J.; LOREDO-CANCINO, M.; et al. Studies of Adsorption of Heavy Metals onto Spent Coffee Ground : Equilibrium , Regeneration , and Dynamic Performance in a Fixed-Bed Column. **International Journal of Chemical Engineering**, v. 2016, 2016.

DENNIS, J. S.; HAYHURST, A. N.; SCOTT, S. A. The combustion of large particles of char in bubbling fluidized beds: the dependence of Sherwood number and rate of burning on particle diameter. **Combustion and flame**, v. 147, p. 185-194, 2006.

EFTHYMIPOULOS, I.; HELLIER, P.; LADOMMATOS, N.; KAY, A.; MILLS-LAMPTEY, B. Integrated strategies for water removal and lipid extraction from coffee industry residues. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 29, n. October 2017, p. 26–35, 2018. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.06.016>>.

ERDÉSZ, K.; MUJUMDAR, A. S.; RINGER, D. U. **Hydrodynamic Similarity of conventional and vibrated fluidized beds**. In: *Drying' 86, Proceeding of 5th International Drying Symposium (IDS' 86)*, Boston, USA. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.169-172, 1986.

ERDÉSZ, K.; ORMÓS, Z. **Drying of paste-like materials in vibro-fluidized bed of inert packing**. In: *Drying' 86, Proceeding of 5th International Drying Symposium (IDS' 86)*, Boston, USA. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.177-182, 1986.

FRANCA; A. S.; OLIVEIRA, L. S. Coffee and Its By-Products as Sources of Bioactive Compounds. In: J. L. MASSEY (Org.); **Coffee:Production,Consumption and Health Benefits**. p.191, 2016. Nova York: Nova Science Publishers.

FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S.; FERREIRA, M. E. Kinetics and equilibrium studies of methylene blue adsorption by spent coffee grounds. **Desalination**, v. 249, n. 1, p. 267–272, 2009. Elsevier B.V.

FOUST, A.S.; CLUMP, C.W.; WENZEL, L.A. **Princípios de Operações Unitárias**. Rio de Janeiro: LTC, 1982. Cap. 18.

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

GENCK, J. W.; DICKEY, D. S.; BACZEK, F. A.; BEDELL, D. C.; BROWN, K.; CHEN, W.; ELLIS, D. E.; HARRIOTT, P., WENPING, L.; MCGILLICUDDY, J. K.; MCNULTY, T. P.; OLDSHUE, J. Y.; SCHOENBRUNN, F.; SMITH, J. C.; TAYLOR, D. C.; WELLS, D. R. Liquid-Solid Operations and Equipment. In: GREEN, D. W.; PERRY, R. H. (Ed.). **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 8 Ed. Nova York: McGraw-Hill Education, 2008. Cap. 18

GUERREIRO, O. F.; MENDES, A. N. G.; CARVALHO, G. R.; SILVAROLLA, M. B.; BOTELHO, C. E.; FAZUOLI, L. C. Origem e classificação botânica do cafeeiro. In: Carlos Henrique Siqueira de Carvalho (Org.); **Cultivares de café**. p.247, 2007. Brasília: EMPRAPA.

GUPTA, C. K. and SATHIAYAMOORTHY, D. **Fluid bed technology in material processing**, CRC Press, New York, 1999. Cap 1.

HENDERSON, S. M. Progress in Developing the Thin Layer Drying Equation. , p. 1–3, 1974.

ICO: INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. Total production by all exporting countries. Disponível em: <<http://www.ico.org/prices/po-production.pdf>>. Acesso em: 20/3/2018.

JEGUIRIM, M.; LIMOUSY, L.; DUTOURNIE, P. Pyrolysis kinetics and physicochemical properties of agropellets produced from spent ground coffee blended with conventional biomass. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 92, n. 10, p. 1876–1882, 2014. Institution of Chemical Engineers. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2014.04.018>>.

JILIANG, M.; XIAOPING, C.; DAOYIN, L. Minimum fluidization velocity of particles with wide size distribution at high temperatures. **Powder Technology**, v. 235, p. 271–278, 2013. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.10.016>>. .

JUNG, K. W.; CHOI, B. H.; HWANG, M. J.; JEONG, T. U.; AHN, K. H. Fabrication of

granular activated carbons derived from spent coffee grounds by entrapment in calcium alginate beads for adsorption of acid orange 7 and methylene blue. **Bioresource Technology**, v. 219, p. 185–195, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.098>>.

KANG, S. B.; OH, H. Y.; KIM, J. J.; CHOI, K. S. Characteristics of spent coffee ground as a fuel and combustion test in a small boiler (6.5 kW). **Renewable Energy**, v. 113, p. 1208–1214, 2017. Elsevier Ltd.

KONDAMUDI, N.; MOHAPATRA, S. K.; MISRA. Spent coffee grounds as a versatile source of green energy. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 56, p. 11757-11760, 2008.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2 Ed. New York: Academic Press, 1991. Cap. 1.

LAURILA, J.; HAVIMO, M.; LAUHANEN, R. Compression drying of energy wood. **Fuel Processing Technology**, v. 124, p. 286–289, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.03.016>>.

LAW, C. L. L.; MUJUMDAR, A. S. Fluidized bed dryers. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of Industrial Drying**. 3 Ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2006. Cap. 8.

LEWIS, B. W. K. The rate of drying of solid materials. **The journal of industrial and engineering chemistry**.v. 13, p. 427-432, 1921.

LÓPEZ-BARRERA, D. M.; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, K.; LOARCA-PIÑA, M. G. F.; CAMPOS-VEGA, R. Spent coffee grounds, an innovative source of colonic fermentable compounds, inhibit inflammatory mediators in vitro. **Food Chemistry**, v. 212, p. 282–290, 2016.

MARTINEZ-SAEZ, N.; GARCÍA, A. T.; PÉREZ, I. D.; et al. Use of spent coffee grounds as food ingredient in bakery products. **Food Chemistry**, v. 216, p. 114–122, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.173>>.

MEILI, L. **Contribuições ao estudo da fluidodinâmica e da secagem de pastas em leitos fluidizados e vibrofluidizado**. 2009. 218f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. TECHNICAL NOTE SINGLE-LAYER DRYING. , v. 20, n. 7, p. 1503–1513, 2002.

MUSSATTO, S. I.; MACHADO, E. M. S.; MARTINS, S.; TEIXEIRA, J. A. Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues. **Food and Bioprocess Technology**, v. 4, n. 5, p. 661–672, 2011.

OVERHULTS, D. G.; WHITE, G. M.; HAMILTON, H. E.; ROSS, I. J. Drying Soybeans With Heated Air. , p. 112–113, 1973.

PARK, J.; KIM, B.; LEE, J. W. In-situ transesterification of wet spent coffee grounds for sustainable biodiesel production. **Bioresource Technology**, v. 221, p. 55–60, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.001>>.

PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S.; STRUMILLO, C. Theory and application of vibrated beds and vibrated fluid beds for drying process. In: MUJUMDAR, A. S. *Advances in Drying*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, v. 3. p. 245-306, 1984. Cap. 7.

PHIMSEN, S.; KIATKITTIPONG, W.; YAMADA, H.; et al. Oil extracted from spent coffee grounds for bio-hydrotreated diesel production. **Energy Conversion and Management**, v. 126, p. 1028–1036, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.085>>.

PUJOL, D.; LIU, C.; GOMINHO, J.; et al. The chemical composition of exhausted coffee waste. **Industrial Crops and Products**, v. 50, p. 423–429, 2013. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.07.056>>.

ROCHA, M. V. P.; DE MATOS, L. J. B. L.; LIMA, L. P. DE; et al. Ultrasound-assisted production of biodiesel and ethanol from spent coffee grounds. **Bioresource Technology**, v. 167, p. 343–348, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.06.032>>.

SANCHEZ, C. G.; LORA, E. S. Biomass fluidized bed gasification research in the State University of Campinas. **Energy for Sustainable Development**, v. 1, n. 4, p. 31–34, 1994. International Energy Initiative, Inc. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60069-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60069-1)>.

SANTOS, J. C. P. **Secagem da borra de café em secador ciclônico**. 2009. 60f. Dissertação (Mestrado em ciências dos alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SEO, J.; JUNG, J. K.; SEO, S. Evaluation of nutritional and economic feed values of spent coffee grounds and *Artemisia princeps* residues as a ruminant feed using *in vitro* ruminal fermentation. **PeerJ**, v. 3, p. e1343, 2015. Disponível em: <<https://peerj.com/articles/1343>>.

SILVA, M. A. **Estudo da secagem em ciclone**. 1991. 146f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SILVA, M. A.; NEBRA, S. A.; MACHADO SILVA, M. J.; SANCHEZ, C. G. The use of biomass residues in the Brazilian soluble coffee industry. **Biomass and Bioenergy**, v. 14, n. 5–6, p. 457–467, 1998.

SIVETZ, M. **Coffee Processing Technology**. Westport, Connecticut: The Avi Publishing Company, INC, 1963. v.2, cap. 20.

SOUSA, L. M.; FERREIRA, M. C. Spent coffee ground as a renewable source of energy : analysis of bulk powder flowability. **Particuology**, 2018. Chinese Society of Particuology. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.06.002>>.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: Principles, Applications and Design**. Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.

STRUMILLO, C. PAKOWSKI, Z. Drying of Granular Products in Vibrofluidized Bed. **Drying '80**, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque, v.1, p. 211-226. 1980.

TULASIDAS, T. N.; RAGHAVAN, G. S. V.; NORRIS, E. R. Microwave and convective drying of grapes. **Transactions of the ASAE**, v. 36(6), p. 1861–1865, 1993.

VARDON, D. R.; MOSER, B. R.; ZHENG, W.; et al. Complete utilization of spent coffee grounds to produce biodiesel, bio-oil, and biochar. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 1, n. 10, p. 1286–1294, 2013.

VIOTTO, L. A. **Projeto e avaliação econômica de sistemas de secagem de borra de café**. 1991. 274f. Dissertação (Mestrado em engenharia de alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

WESTERMAN, P. W.; WHITE, G. M.; ROSS, I. J. Relative Humidity Effect on the High-Temperature Drying of Shelled Corn. , 1973.

YAĞCIOĞLU, A.; DEĞIRMENCIOĞLU, A.; ÇAĞATAY, F. Drying Characteristics of Laurel Leaves Under Different Drying Conditions. 7th Int. **Congress on Agricultural Mechanization and Energy**, , n. March, p. 565–569, 1999.

YANG, L.; NAZARI, L.; YUAN, Z.; et al. Hydrothermal liquefaction of spent coffee grounds in water medium for bio-oil production. **Biomass and Bioenergy**, v. 86, p. 191–198, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.02.005>>.

ZUORRO, A.; LAVECCHIA, R. Spent coffee grounds as a valuable source of phenolic compounds and bioenergy. **Journal of Cleaner Production**, v. 34, p. 49–56, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.12.003>>.

APÊNDICE A

Figura A1 - Taxa de produção de elutriado em função do tempo para a configuração 1 ($\Gamma=4$, $A=0,015m$ e $f=8,14Hz$).

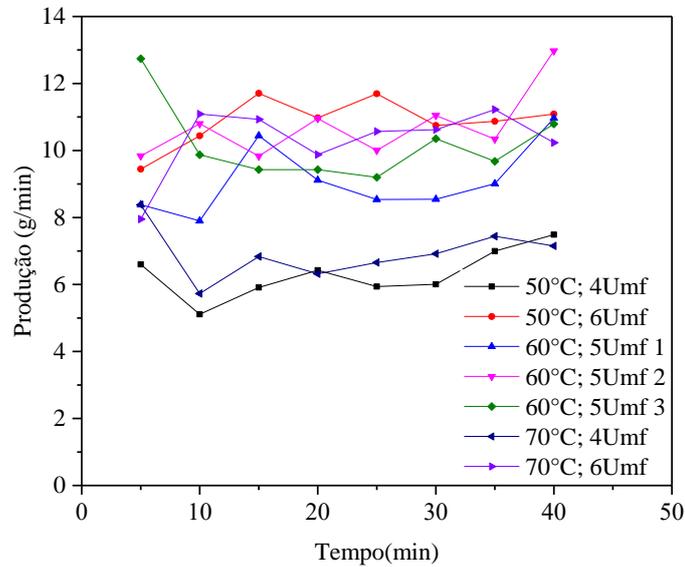


Figura A2 - Teor de umidade em função do tempo para a configuração 1 ($\Gamma=4$, $A=0,015m$ e $f=8,14Hz$).

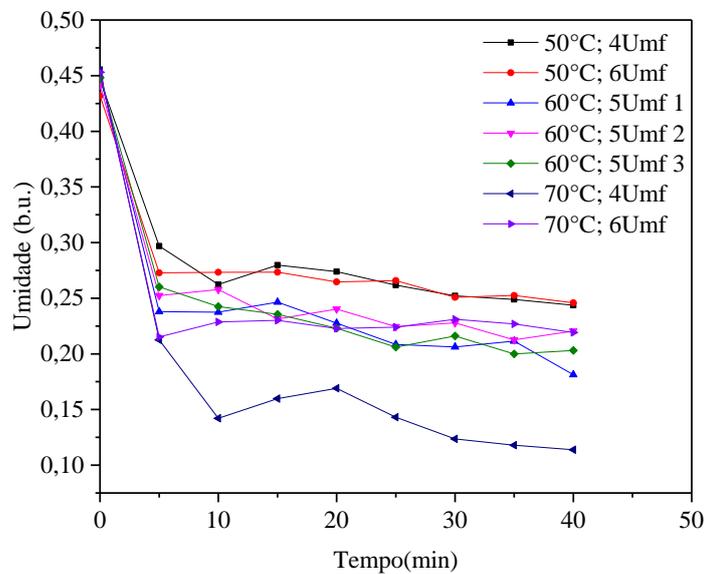


Figura A3 - Taxa de produção de elutriado em função do tempo para a configuração 2 ($\Gamma=4$, $A=0,003m$ e $f=18,20Hz$)

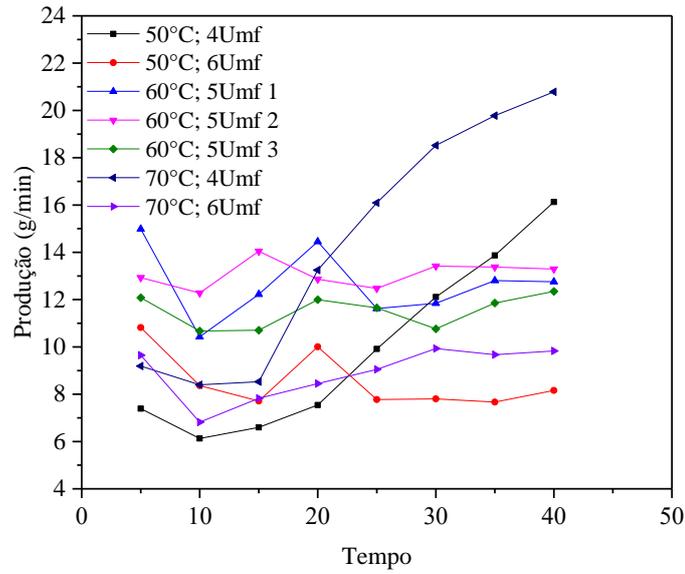


Figura A4 - Teor de umidade em função do tempo para a configuração 2 ($\Gamma=4$, $A=0,003m$ e $f=18,20Hz$).

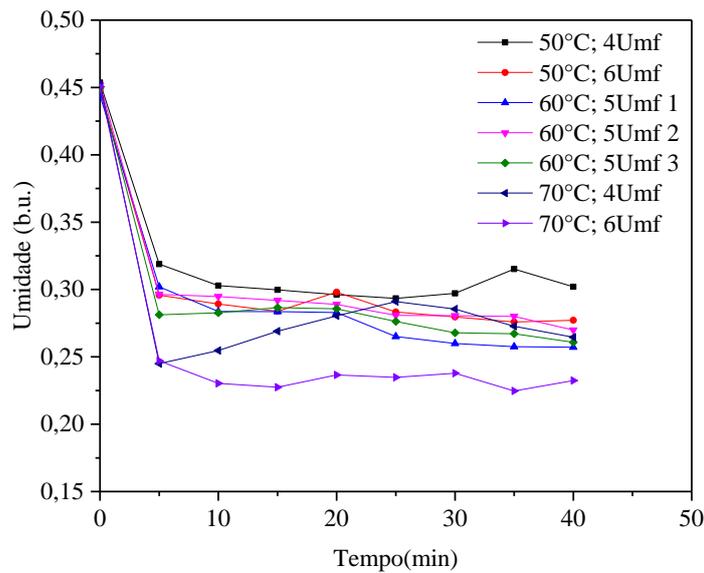


Figura A5 - Taxa de produção de elutriado em função do tempo para a configuração 3 ($\Gamma=0$).

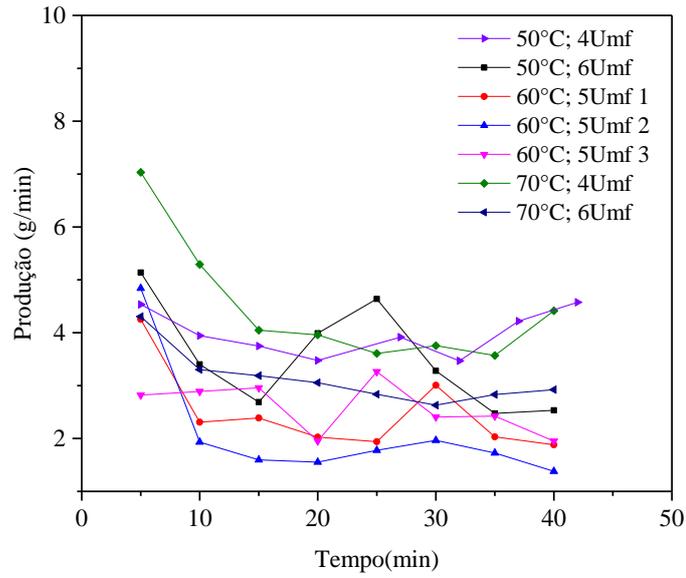


Figura A6 – Teor de umidade em função do tempo para a configuração 3 ($\Gamma=0$).

