

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

GUILHERME HENRIQUE ALVES PINTO

**AVALIAÇÃO DA SECAGEM CONVECTIVA DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA
CERVEJEIRA**

SÃO CARLOS

2020

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

GUILHERME HENRIQUE ALVES PINTO

**AVALIAÇÃO DA SECAGEM CONVECTIVA DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA
CERVEJEIRA**

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

Orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

SÃO CARLOS

2020

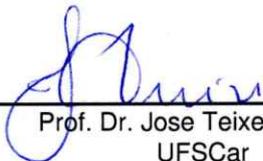


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Guilherme Henrique Alves Pinto, realizada em 05/03/2020:



Prof. Dr. Jose Teixeira Freire
UFSCar

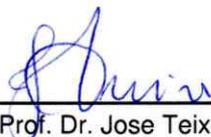


Profa. Dra. Maria do Carmo Ferreira
UFSCar



P/ Prof. Dr. Flávio Bentes Freire
UTFPR

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Flávio Bentes Freire e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ao) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.



Prof. Dr. Jose Teixeira Freire

“Lembre-se de olhar para cima, para as estrelas, e não para baixo, para os seus pés.”

Stephen Hawking

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ser luz nos momentos de adversidade e por cobrir minha vida de bençãos, dando saúde e colocando pessoas tão iluminadas em minha vida.

Agradeço a meus pais, Juscimária e Reginaldo, por todo o carinho e suporte ao longo de toda a minha vida, por terem moldado meu caráter e apoiado as decisões feitas que me fizeram trilhar este caminho. Espero seguir sempre honrando o exemplo que vocês são.

Às minhas irmãs, Thayná e Evelyn, pelo companheirismo ao longo de toda a minha vida, por todo o afeto e amparo nos momentos de dificuldade. À minha avó paterna, Vera Lúcia, pelo carinho e por ser um exemplo de que com muita luta e humildade tudo é possível. À toda a minha família, tios, primos, padrinhos, por serem meu porto seguro e por todas as orações.

Ao meu orientador, Professor Fábio Freire, por todos os conselhos, carinho, incentivo, pela paciência e pela preocupação com a formação e com a realização de um trabalho de excelência, além dos anos de amizade que só cresce desde o período graduação.

Ao Professor José Teixeira Freire por todo o acompanhamento ao longo do mestrado, aconselhando e contribuindo com sua experiência profissional e de vida.

À Prof. Maria do Carmo e ao Prof. Flávio Freire por aceitarem prontamente o pedido para participarem da banca e contribuírem com seus conhecimentos.

Aos técnicos Edílson, Samuel e Amadeu por todo o suporte técnico ao longo desta etapa.

Aos moradores do Chalé, Gui, Lucas, Michel e Pederneiras, e também aos ex-moradores por serem minha segunda família, por toda a amizade e companheirismo de vocês.

À família do Centro de Secagem, Amarílis, João Pedro, Júnia, Laira, Luana, Lucas, Luiz, Nicholas, Raissa, Ronaldo, Thalyne e Vanessa, e aos demais colegas de mestrado, Ana, Brenda, Karla, Leonardo, Marina, Rafael, Raíssa, Tássia e Vittor por tornarem os dias em São Carlos mais alegres.

À minha grande amiga Carol pela parceria ao longo destes anos e por toda a paciência e apoio durante a realização da etapa envolvendo a levedura residual.

Aos colaboradores da Cervejaria Mosteiro e a meu amigo Fábio Plotegher pelo fornecimento de material para a conclusão desta dissertação.

Ao CNPq e à CAPES pelo incentivo financeiro para a conclusão desta dissertação.

RESUMO

O Brasil é o terceiro maior produtor de cerveja do mundo, com uma produção estimada em 14,1 bilhões de litros do produto para o ano de 2018, gerando diversos coprodutos ao longo do processo, sendo o bagaço de malte e a levedura residual os principais quanto ao volume gerado. O reaproveitamento destes materiais mostra-se mais interessante do ponto de vista econômico e de logística em relação ao destino usual, no entanto faz-se necessário compreender sua secagem para viabilizar sua nova destinação. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade operacional de reduzir a umidade de ambos materiais através da secagem convectiva, utilizando-se secadores distintos para cada coproduto. Para secagem do bagaço de malte, utilizou-se um secador composto por uma drageadeira com capacidade de 10 litros de material associada a um soprador responsável pelo fornecimento de ar quente. Avaliou-se como a cinética de secagem, perfil de temperaturas no interior da drageadeira, especificamente a temperatura na superfície interna, T_w , e a temperatura do bagaço, T_s , e intensidade da circulação dos sólidos eram afetados pelas condições operacionais do secador, especificamente a temperatura do ar na saída do soprador, T_a^E , a massa de bagaço adicionada ao sistema, $m_{s,0}$, e a rotação da drageadeira, Ω_{drag} . Para tanto, foram utilizados dois valores distintos para cada um destes parâmetros, $T_a^E=67,7$ e $101,2$ °C, $m_{s,0}=1,0$ e $1,5$ kg, e $\Omega_{drag}=25,1$ e $33,9$ rpm. Os ensaios de secagem foram realizados até que a umidade de equilíbrio dinâmico fosse alcançada. Foram necessários 180 minutos de secagem para que o equilíbrio dinâmico fosse alcançado com $T_a^E=101,2$ °C e $m_{s,0}=1,0$ kg enquanto para $T_a^E=67,7$ °C e $m_{s,0}=1,5$ kg foram necessários 420 minutos de secagem, observando-se assim uma influência significativa de T_a^E e $m_{s,0}$ sobre a cinética. Ao variar Ω_{drag} mantendo-se T_a^E e $m_{s,0}$, o equilíbrio dinâmico foi alcançado com o mesmo tempo de secagem, não sendo observada uma influência significativa de Ω_{drag} sobre o processo. A circulação de partículas, Ω_s , apresentou um perfil parabólico, apresentando um valor mínimo de aproximadamente 16 rpm no início e no término da secagem e um máximo de aproximadamente 27 rpm nos períodos intermediários. Como a rotação do secador se mantém constante ao longo da operação, concluiu-se que a alteração nas propriedades do leito, principalmente a umidade do bagaço, proporcionou o perfil observado para Ω_s . Foram realizados ensaios através do método centrífugo para relacionar a força de adesão entre a superfície do secador e o bagaço de malte com a sua umidade, sendo observada uma forte dependência com forças de maior intensidade para o material em suas condições originais e forças praticamente nulas com o material completamente seco, comportamento comumente

observado em materiais em que os efeitos de capilaridade predominam no contato com superfícies. O perfil de temperaturas apresentou um comportamento que pôde ser dividido em três períodos distintos, um período correspondente ao início da secagem em que a superfície do secador e o bagaço se encontravam em equilíbrio térmico com T_w aproximadamente igual a T_s , um período intermediário em que T_w era superior a T_s e um terceiro período correspondente ao término da secagem em que T_w era inferior a T_s . Pôde-se afirmar que a adesão entre o bagaço e a superfície também provocou este comportamento para as temperaturas, especialmente no primeiro período, em que o maior contato entre as fases pela capilaridade proporcionou o equilíbrio térmico entre elas. Concluiu-se assim que a adesão do bagaço à superfície do secador afetou a sua operação, especialmente na circulação de sólidos e no perfil de temperaturas em seu interior. Na secagem da levedura foi utilizado um secador tipo leito vibrofluidizado, fixando as condições vibracionais, $A=0,015$ m e $f=500$ rpm, e a alimentação de pasta em 14 mL/min, variando-se a temperatura do ar de secagem em 80 ou 100 °C, a massa de esferas de vidro em 0,5 ou 1,5 kg e a velocidade superficial do ar em $1,5u_{mf}$ ou $1,2 u_{mf}$ para avaliar o efeito destes parâmetros sobre a formação de produto, acúmulo de material, fluidodinâmica do leito e qualidade do produto. Cada ensaio de secagem teve uma duração de 30 minutos, seguidos de 30 minutos sem a alimentação de pasta para o desprendimento de material seco. Notou-se uma alteração na curva fluidodinâmica do leito para diferentes massas de inerte, sendo observada uma redução na velocidade de mínima fluidização e na queda de pressão no leito seco para uma menor altura de leito estático. Para 1,5 kg de inerte, 80 °C e $1,2 u_{mf}$ não foi observada a formação de produto, ao contrário dos demais ensaios com condições operacionais diferentes, evidenciando a influência destas sobre a taxa de produção, sendo a maior taxa observada ao se utilizar 1,5 kg de inerte e alimentação a $1,2 u_{mf}$ e 100 °C, 0,263 g/min de pó seco. No entanto, as taxas de produção alcançadas foram consideravelmente pequenas em comparação com a alimentação de pasta no secador. Ao término da secagem, pôde-se observar um baixo desprendimento de material da superfície dos inertes, máximo de 0,532 g/min. Assim, a maior parte do material alimentado no secador permaneceu retido sobre os inertes e parede da câmara de secagem, sendo um forte indicativo de que o desprendimento de material limitou a operação. A secagem foi suficiente para reduzir significativamente a umidade do material, de 90,63% em base úmida a um máximo de 8,12%. Para cada ensaio, a umidade do produto no intervalo de 10 a 20 minutos de secagem foi superior ao obtido nos 10 minutos iniciais e finais. Não se pôde obter uma relação clara entre a viabilidade celular do produto obtido e as condições operacionais.

ABSTRACT

Brazil is the third largest beer producer in the world, with an estimated production of 14.1 billion liters of the product for the year 2018, generating several co-products throughout the process, being brewer's spent grain and spent yeast the main ones. The reuse of these materials is more interesting from the economic and logistical point of view in relation to the usual destination, however it is necessary to understand their drying to make their new destination viable. The present work aimed to evaluate the operational feasibility of reducing the humidity of both materials through convective drying, applying different dryers for each co-product. To malt bagasse drying was used a system consisting of a rotary pan with a capacity of 10 liters associated with a blower responsible for the hot air supply. It was evaluated how the drying kinetics, temperature profile, specifically the temperature on the inner surface, T_w , and the spent grain temperature, T_s , and the solids circulation intensity were affected by the dryer operational conditions, specifically the air temperature at the blower outlet, T_a^E , the spent grain mass added to the system, m_s , and the pan rotation, Ω_{drag} . For this purpose, two different values were used for each parameter, $T_a^E=67.7$ and 101.2 °C, $m_{s,0}=1.0$ and 1.5 kg, and $\Omega_{drag}=25.1$ and 33.9 rpm. The drying tests were carried out until the dynamic equilibrium moisture content was reached. It was necessary 180 minutes of drying to achieve dynamic equilibrium with $T_a^E = 101.2$ °C and $m_{s,0}=1.0$ kg, while for $T_a^E=67.7$ °C and $m_{s,0}=1.5$ kg were necessary 420 minutes of drying, being noticed a significant influence of T_a^E and $m_{s,0}$ on the kinetics. By modifying Ω_{drag} maintaining T_{aE} and m_s , dynamic equilibrium was achieved at the same drying time, with no significant influence of Ω_{drag} on the process. The solids circulation, Ω_s , presented a parabolic profile with a minimum value of approximately 16 rpm at the beginning and end of drying and a maximum value of approximately 27 rpm in the intermediate periods. As the dryer rotation remains constant throughout the operation, it was concluded that the bed properties modifications, mainly spent grain moisture, induced the profile observed for Ω_s . Tests were carried out using the centrifugal method to relate the adhesion force between the dryer surface and the spent grain with its moisture content, being observed forces of greater intensity for the material in its original conditions and practically null forces with a completely dry material, behavior commonly observed in materials in which the capillarity effects predominate in surfaces contact. The temperature profile showed a behavior that could be divided into three distinct periods, a period corresponding to the beginning of drying, in which the dryer surface and spent grain were in thermal equilibrium, with T_w approximately equal to T_s , an intermediate

period, in which T_w was greater than T_s , and a third period corresponding to the end of drying, in which T_w was lower than T_s . It was possible to conclude that the adhesion between the spent grain and the surface also caused this temperature behavior, especially in the first period, when the stronger contact between the phases by capillarity provided the thermal equilibrium. It was concluded that the spent grain adhesion to the dryer surface affected its operation, especially in the particles circulation and the temperature profile. In the spent yeast drying, a vibrofluidized bed dryer was used, fixing the vibrational conditions, $A=0.015$ m and $f=500$ rpm, and the paste feeding at 14 mL/min, varying the drying air temperature at 80 or 100 °C, the mass of glass spheres at 0.5 or 1.5 kg and the superficial velocity of the fluid at $1.5u_{mf}$ and $1.2u_{mf}$ to evaluate the effect of these parameters on product formation, material accumulation, fluid dynamics of the bed and product quality. Each drying test was conducted for 30 minutes, followed by 30 minutes with no paste feeding for the dry material detachment. There was a change in the fluid dynamics curve for different inert masses, with a reduction in the minimum fluidization velocity and in the pressure drop with a lower static bed height. For 1.5 kg of inert, 80 °C and $1.2 u_{mf}$, no product formation was observed, unlike the other tests with different operational conditions, evidencing their influence on the production rate, the highest rate, 0.263 g/min of dry powder, was observed using an inert mass of 1.5 kg and air feeding at $1.2 u_{mf}$ and 100 °C. However, the production rates achieved were considerably small compared to the paste feed. At the end of drying, it was possible to observe a low detachment of material from the inert surface, maximum 0.532 g/min. Thus, most of the material fed into the dryer remained attached to the inert and chamber wall, indicating that the material detachment limited the operation. Drying was sufficient to reduce the moisture content, from 90.63% on a wet basis to a maximum of 8.12%. For each test, the product moisture content for 10 to 20 minutes of drying was higher than that obtained in the initial and final 10 minutes. It was not possible to obtain a clear relationship between the product's cell viability and the operational conditions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Processo de produção da cerveja.	17
Figura 3.1: Ilustração esquemática de um secador do tipo tambor rotativo.	29
Figura 3.2: Representação dos modelos: (a) CST e (b) Cholette-Clourier modificado.	31
Figura 3.3: Esquema de uma drageadeira padrão.	32
Figura 3.4: Curva experimental de secagem.	34
Figura 3.5: Curva experimental para taxa de secagem.	35
Figura 3.6: Curva característica para materiais sem período de secagem a taxa constante.	35
Figura 3.7: Forças moleculares de Van de Waals.	37
Figura 3.8: Formação do filme líquido pelo efeito de capilaridade.	38
Figura 3.9: Bagaço de malte cervejeiro.	39
Figura 3.10: Estrutura básica do secador.	41
Figura 3.11: Aglomerados de bagaço de malte.	42
Figura 3.12: Estrutura modificada do secador.	43
Figura 3.13: Esquema do secador modificado.	44
Figura 3.14: Posicionamento do soprador em relação à drageadeira.	45
Figura 3.15: Estufa com circulação e renovação de ar.	49
Figura 3.16: Sistema de apoio para placas de cobre.	50
Figura 3.17: Desprendimento de bagaço de malte aderido sobre a placa de cobre.	51
Figura 3.18: Adimensional de umidade em função do tempo para C1.	52
Figura 3.19: Adimensional de umidade em função do tempo para (a) C2, (b) C3 e (c) C4.	53
Figura 3.20: Adimensional de umidade em função do tempo para condições C1 a C4.	55
Figura 3.21: Adimensional de umidade em função do tempo para C1 e C5.	56
Figura 3.22: Taxa de secagem do bagaço de malte em estufa com circulação de ar.	58
Figura 3.23: Variação de T_a^E , T_s e T_w para $T_a^E=101,2\pm 2,8$ °C e $m_{s,0}=1,0$ kg.	59
Figura 3.24: Variação de T_a^E , T_s e T_w para (a) C2 em que $T_a^E=67,7\pm 1,8$ °C e $m_{s,0}=1,0$ kg, (b) C3 em que $T_a^E=101,2\pm 2,8$ °C e $m_{s,0}=1,5$ kg e (c) C4 em que $T_a^E=67,7\pm 1,8$ °C e $m_{s,0}=1,5$ kg.	60
Figura 3.25: T_w e T_s em função do tempo de secagem para C1, C2 e C4.	61
Figura 3.26: A movimentação do bagaço em função do tempo de secagem para C1.	62
Figura 3.27: Ω_s em função do tempo de secagem para (a) C2, (b) C3 e (c) C4.	63
Figura 3.28: Força de adesão em função da umidade do bagaço de malte.	64

Figura 3.29: Adimensional de temperatura em função da umidade.....	66
Figura 3.30: Movimentação do leito em função da umidade.	68
Figura 4.1: Curvas características para leitos móveis.....	74
Figura 4.2: Etapas da secagem de pastas em leitos móveis.....	78
Figura 4.3: Levedura residual cervejeira utilizada no presente trabalho.	81
Figura 4.4: Esferas de vidro utilizadas como inerte na secagem de levedura residual.....	82
Figura 4.5: Esquema do secador do tipo leito vibrofluidizado.....	83
Figura 4.6: Secador do tipo leito vibrofluidizado instalado no Centro de Secagem.	85
Figura 4.7: Queda de pressão em função da velocidade do ar para 1,5 kg de esferas de vidro, A=0,015 m e f=500 rpm.	89
Figura 4.8: Queda de pressão em função da velocidade do ar para 0,5 kg de esferas de vidro, A=0,015 m e f=500 rpm.	90
Figura 4.9: Acúmulo de material sobre as partículas de inerte.	92
Figura 4.10: Queda de pressão em função do tempo.....	93
Figura 4.11: Visão superior do leito após a saturação e formação de zonas mortas.	94
Figura 4.12: Ensaios sobre viabilidade celular para: (a) levedura residual, (b) ensaio 1, 10 a 20 minutos de secagem, (c) ensaio 2, 10 a 20 minutos e (d) ensaio 3, 10 a 20 minutos.	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composição e poder calorífico do bagaço de malte.	20
Tabela 2.2: Análise do teor de cinzas e materiais voláteis para o bagaço de malte.	22
Tabela 2.3: Poder calorífico de diversas biomassas.	23
Tabela 2.4: Composição da levedura residual.	27
Tabela 3.1: Condições operacionais avaliadas.	48
Tabela 4.1: Taxa de produção e de acúmulo de pó.	95
Tabela 4.2: Umidade e viabilidade para levedura residual e produto seco.	97

NOMENCLATURA

A	Amplitude de vibração	m
D	Diâmetro da câmara de secagem	m
f	Frequência de vibração	rpm
F	Força	N
g	Aceleração gravitacional	$m.s^{-2}$
H	Altura do leito estático	m
m	Massa	kg
MR	Adimensional de umidade	-
n	Número	-
r	Distância entre placa e eixo de rotação	m
T	Temperatura	°C
tx	Taxa de secagem	$kg.kg^{-1}.s^{-1}$
u	Velocidade superficial do ar	$m.s^{-1}$
w	Velocidade angular	rad/s
X	Umidade	$kg.kg^{-1}$
κ	Coefficiente de transporte	-
Γ	Adimensional de vibração	-
Δp	Queda de pressão	Pa
Θ	Adimensional de temperatura	-
Ω	Intensidade de movimentação	rpm

Subscrito e sobrescrito

0	Inicial
a	Ar
ad	Adesão
amo	Amostra
b.s	Base seca
b.u	Base úmida
cent	Centrífuga
drag	Drageadeira
E	Entrada/Alimentação

eq	Equilíbrio dinâmico
i	Número do tanque
lev	Levedura residual
mf	Mínima fluidização
mm	Mínima mistura
s	Sólidos
w	Parede

Abreviações

CST	Continuous stirred tanks
PCS	Poder calorífico superior
PIB	Produto Interno Bruto

SUMÁRIO

RESUMO	iii
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
NOMENCLATURA	x
SUMÁRIO	xii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	15
CAPÍTULO 2 – RESÍDUOS DA INDÚSTRIA CERVEJEIRA	20
2.1. O BAGAÇO DE MALTE	20
2.2. A LEVEDURA RESIDUAL	25
CAPÍTULO 3 - SECAGEM DO BAGAÇO DE MALTE EM DRAGEADEIRA	29
3.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
3.1.1 SECADORES ROTATIVOS.....	29
3.1.2 A DRAGEADEIRA.....	32
3.1.3 CINÉTICA E TAXA DE SECAGEM.....	33
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.2.1 OBTENÇÃO E ARMAZENAMENTO DE BAGAÇO DE MALTE	39
3.2.2.1 Estrutura básica do secador	40
3.2.2.2 Modificações na estrutura do secador	41
3.2.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	44
3.2.4 CONDIÇÕES OPERACIONAIS	47
3.2.5 OBTENÇÃO DA TAXA DE SECAGEM	48
3.2.6 AVALIAÇÃO DAS FORÇAS DE ADESÃO ENTRE BAGAÇO E SUPERFÍCIE ..	49
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
3.3.1 CINÉTICA DE SECAGEM	52

3.3.2 PERFIS DE TEMPERATURA NO SECADOR	58
3.3.3 MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS	62
3.3.4 FORÇAS DE ADESÃO E A UMIDADE	64
3.3.5 TEMPERATURAS, MOVIMENTAÇÃO E RELAÇÃO COM A UMIDADE	65
3.4. CONCLUSÕES	69
CAPÍTULO 4 - SECAGEM DE LEVEDURA RESIDUAL EM LEITO VIBROFLUIDIZADO	72
4.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	72
4.1.1 LEITO VIBROFLUIDIZADO	72
4.1.1.1 Visão geral.....	72
4.1.1.2 Fluidodinâmica do leito vibrofluidizado	73
4.1.2 SECAGEM DE PASTAS EM LEITOS MÓVEIS	76
4.2. MATERIAIS E MÉTODOS	80
4.2.1. OBTENÇÃO E ARMAZENAMENTO DE LEVEDURA RESIDUAL	80
4.2.2. OBTENÇÃO DAS PARTÍCULAS INERTES.....	81
4.2.3. UNIDADE EXPERIMENTAL.....	82
4.2.4. OBTENÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS	85
4.2.5. ENSAIOS DE SECAGEM	86
4.2.6. AVALIAÇÃO DA UMIDADE E ATIVIDADE DO PRODUTO	87
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	88
4.3.1. CURVAS CARACTERÍSTICAS	88
4.3.2. FLUIDODINÂMICA NA SECAGEM DA PASTA	91
4.3.3. TAXAS DE PRODUÇÃO E ACÚMULO DE PÓ	95
4.3.4. UMIDADE E VIABILIDADE CELULAR DO PRODUTO	96
4.4. CONCLUSÕES	99
CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 103

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A cada dia é mais perceptível a necessidade de se aliar a geração de riquezas a melhores condições socioambientais. Tanto a classe política quanto a sociedade civil, na forma de políticas públicas, campanhas de conscientização e ações cotidianas, têm se adaptado a esta crescente demanda por soluções que visem a preservação do ambiente. Incentivos à reciclagem, notificações sobre crimes ambientais, criação de produtos não-nocivos ao meio ambiente, firmação de contratos que visem a diminuição de impactos ambientais têm se tornado cada vez mais frequentes.

Neste cenário, as indústrias também estão atentas aos resíduos formados ao longo do seu processo. A Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305 atribuiu a responsabilidade sobre a destinação dos resíduos a seus geradores, estimulando o reaproveitamento destes subprodutos na própria unidade ou sua comercialização para se tornar matéria prima em outros processos (MENEZES e YAMASHIDA, 2017). O destino inadequado de resíduos sólidos de qualquer origem ameaça a saúde pública, provoca impactos à qualidade de vida da sociedade civil, provoca a degradação ambiental, agrava a desigualdade social, além de ser considerado uma forma de desperdício (SCHALCH et al, 2002). Deste modo, é necessário que as indústrias tracem estratégias que promovam uma menor geração de resíduos sólidos e a sua reutilização ou reciclagem, reduzindo os impactos socioambientais provocados por estes resíduos.

A indústria cervejeira é uma das principais atividades industriais brasileiras, com uma produção estimada de 14,1 bilhões de litros de cerveja no ano de 2018, de acordo com dados da Associação Brasileira da Indústria Cervejeira (CervBrasil, 2020). Ainda de acordo com dados da CervBrasil, o setor foi responsável por aproximadamente 1,6% de todo o PIB brasileiro no mesmo ano. O setor apresenta uma rápida expansão, influenciada pela desburocratização no registro de novos produtos e na abertura de novas unidades produtoras. De acordo com o Anuário da Cerveja no Brasil, divulgado no ano de 2018 pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 210 cervejarias iniciaram suas operações, tendo o ano de 2018 se encerrado com 889 cervejarias em operação no território nacional.

A cerveja é uma bebida formada a partir da fermentação de açúcares provenientes de cereais maltados, convertendo-os a etanol e gás carbônico. A produção da cerveja pode ser dividida em quatro etapas principais: a) maltagem dos grãos, que consiste na germinação artificial para o rompimento dos grãos; b) extração e hidrólise dos açúcares presentes no malte,

separação dos componentes não solúveis e adição do lúpulo para a produção do mosto; c) adição do levedo, multiplicação celular e posterior fermentação dos componentes do mosto; d) filtração e etapas finais do processo (LEWIS e YOUNG, 2002).

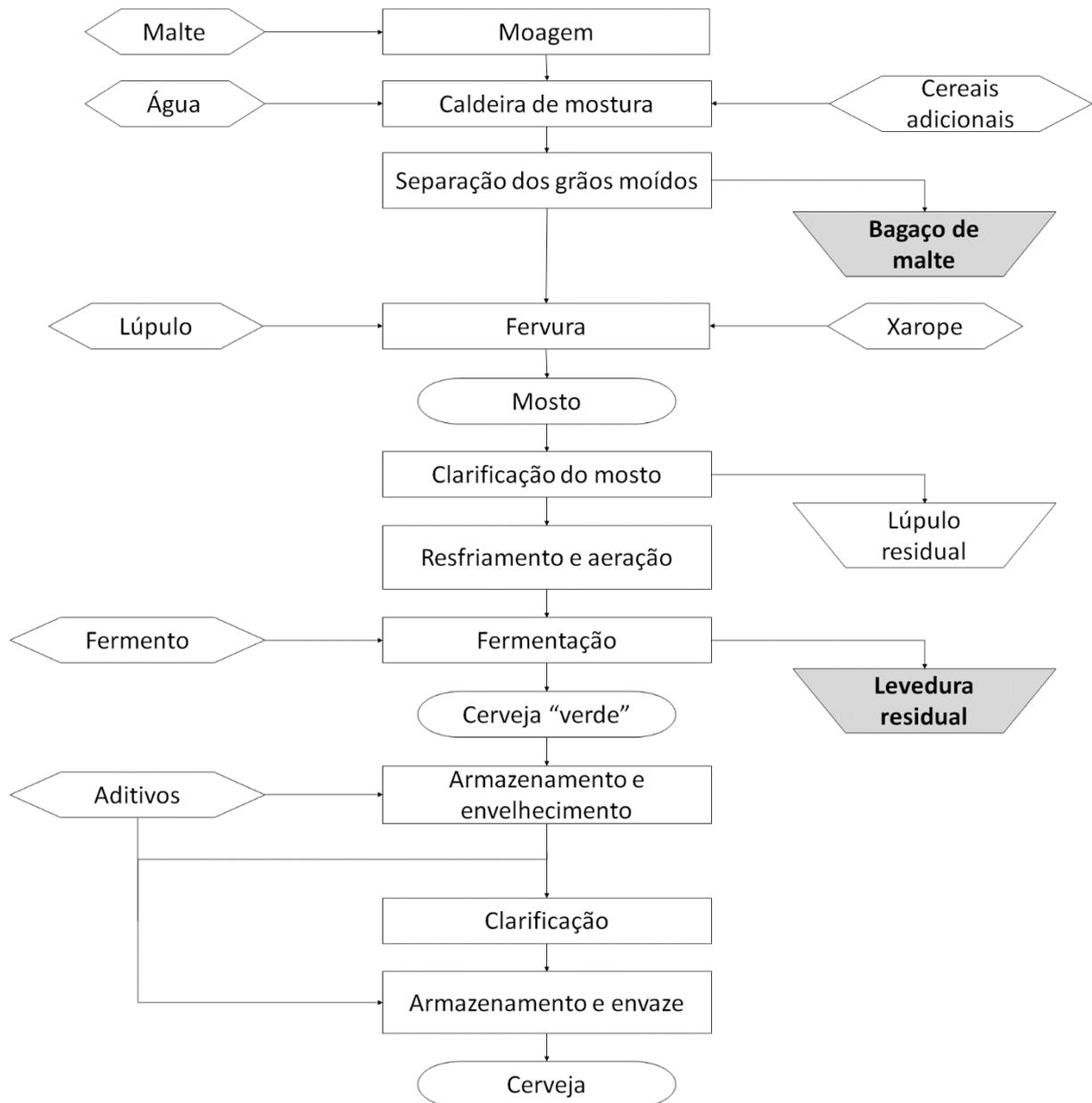
Assim como todo processo industrial, ao longo da produção da cerveja ocorre a formação de resíduos, sendo os principais o bagaço de malte, a levedura residual, o *trub* quente, que são formados em grandes quantidades, apesar dos diversos avanços tecnológicos e modificações realizadas na cadeia produtiva (MATHIAS et al, 2014).

Dentre os três citados, o bagaço de malte é o resíduo mais abundante da indústria cervejeira em termos de massa, correspondendo a aproximadamente 85% do resíduo sólido formado ao longo do processo (ALIYU e BALA, 2011). Para a produção de cada hectolitro de cerveja, ocorre a formação de 14 a 20 kg de bagaço de malte (FILLAUDEAU et al, 2006). A levedura residual, ou lodo de levedura, é o segundo resíduo mais abundante no processo em termos de massa. Para cada hectolitro de cerveja, são descartados de 1,5 a 3,0 kg de levedura residual (FILLAUDEAU et al, 2006). As etapas da produção da cerveja, principais materiais utilizados e seus principais resíduos, incluindo os dois resíduos estudados no presente trabalho, são ilustradas na Figura 1.1.

O descarte indevido destes resíduos provoca uma série de impactos socioambientais, como o aumento da turbidez e alterações no pH da água, contaminação por vírus, bactérias e substâncias tóxicas, intoxicação e mortalidade de animais e a contaminação do solo e de águas subterrâneas (MELO, 2010). Usualmente o bagaço de malte e a levedura residual seca são comercializadas com produtores rurais. O valor de venda do bagaço de malte é de 30 a 41 R\$/ton enquanto o valor da levedura residual seca é de 12500 R\$/ton (BORGES e NETO, 2009; MELO, 2010).

A levedura residual seca possui um valor agregado consideravelmente maior comparado ao bagaço. A secagem do bagaço de malte é uma opção altamente viável uma vez que esta biomassa seca pode ser reutilizada na própria cervejaria para a geração de energia elétrica (ESCADA, 2018) ou no fornecimento de energia nas etapas da produção de cerveja que necessitam de aquecimento (CORDEIRO, 2011). A viabilidade da utilização da biomassa como fonte de energia está relacionada principalmente ao seu poder calorífico. Para o bagaço de malte, o poder calorífico é função direta da sua umidade (ESCADA, 2018; CORDEIRO, 2011), assim como para outras biomassas (SOUZA et al, 2012; SILVA e MORAIS, 2008).

Figura 1.1: Processo de produção da cerveja.



Fonte: Adaptado de Lewis e Young (2002).

A secagem é a operação que envolve a transferência simultânea de calor e de massa entre o material úmido e o ar, que geralmente se encontra aquecido. Em outras palavras, ocorre a transferência de água presente no sólido ou pasta para a fase gasosa não saturada. Esta operação é importante por auxiliar a preservação dos materiais e promover a redução de seu volume, facilitando o transporte e armazenamento (PERAZZINI, 2014).

Alguns secadores foram utilizados no estudo da secagem do bagaço de malte, como a estufa com circulação de ar (SOUSA et al, 2016; BATISTA, 2016), estufa solar (ROCHA et al,

2019), túnel de vento (BOFFO et al, 2014) e leito fixo (TANG et al, 2004). No entanto, os secadores mencionados possuem uma limitação operacional e são adequados à secagem de uma pequena quantidade de material enquanto o volume de biomassa a ser seca é consideravelmente grande. Neste cenário, o secador rotativo é uma alternativa atraente para a secagem do bagaço de malte pois permite a secagem de uma grande quantidade de biomassa ao mesmo tempo que apresenta facilidade para o aumento de escala (BACELOS et al, 2009). O secador rotativo já é utilizado na secagem de diversas biomassas como os resíduos de silvicultura (ZABANITOU, 2000), farelo de soja (LUZ, 2006) e biomassa lenhosa (MEZA et al, 2008). No entanto, a utilização dos secadores rotativos presentes no Centro de Secagem de Pastas e Sementes do Departamento de Engenharia Química da UFSCar mostrou-se inviável devido à pequena disponibilidade de material fornecido pelas cervejarias locais.

O tambor rotativo foi descrito em diversos trabalhos da literatura como tanques de mistura perfeita posicionados em série (SHARPLES et al, 1964; DUCHESNE et al, 1996; YLINIEMI et al, 2003; PERAZZINI, 2011). Uma possibilidade para se analisar a secagem do bagaço de malte em secadores rotativos com a utilização de uma quantidade reduzida de material seria a utilização de outros equipamentos que simulem o funcionamento de um tanque de mistura perfeita durante a secagem.

Quanto à secagem da levedura residual, esta normalmente visa a inativação celular para a obtenção de um produto menos nocivo à saúde animal e a modificação de algumas propriedades como a capacidade de adsorver metais e sua digestibilidade (TRUJILLO et al, 2017; MACHADO et al, 2009).

Outros secadores podem reduzir a umidade da lama de leveduras e ainda assim manter a sua capacidade de fermentação, como no trabalho de LUNA-SOLANO et al (2003) que realizaram a secagem da levedura residual em leito fluidizado e observaram que apesar da redução na produção de etanol pelas leveduras e da cinética de crescimento, estas mantiveram a sua atividade celular. Assim, a levedura residual seca permite outras destinações dependendo das condições de secagem utilizadas, podendo ser comercializada a valores distintos dos normalmente praticados.

Neste contexto, o presente trabalho procurou estudar a secagem dos dois principais resíduos da indústria cervejeira, o bagaço de malte e a levedura residuária. O trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade da secagem do bagaço de malte em secadores rotativos utilizando-se um sistema composto por uma drageadeira associada a um soprador, simulando uma porção

de um secador do tipo tambor rotativo, observando-se a influência das condições operacionais sobre a cinética de secagem do material e sobre a operação do secador, especificamente quanto à variação das temperaturas no sistema e da circulação do leito. O sistema drageadeira-soprador foi selecionado para contornar uma possível limitação na aquisição e no armazenamento de bagaço, utilizando uma menor carga de material em comparação com o secador do tipo tambor rotativo disponível no Centro de Secagem de Pastas e Sementes do DEQ/UFSCar.

O trabalho também teve como objetivo estudar a secagem da levedura residual em leito vibrofluidizado, observando a influência da presença da pasta e das condições operacionais sobre a fluidodinâmica do leito, taxas de produção e de acúmulo de pó no secador e também sobre a qualidade do produto, especialmente a viabilidade celular do material produzido e sua umidade em comparação com a levedura residual alimentada no secador.

CAPÍTULO 2 – RESÍDUOS DA INDÚSTRIA CERVEJEIRA

2.1. O BAGAÇO DE MALTE

O bagaço de malte é o principal resíduo da indústria cervejeira, sendo ele removido do processo de produção da cerveja através de uma filtração após a remoção dos componentes solúveis dos cereais maltados (MATHIAS et al, 2014). Este resíduo é uma biomassa lignocelulósica rica em carboidratos, fibras e proteínas que apresenta pequenas variações na sua composição, de acordo com os aditivos utilizados para a fabricação de cada cerveja (BATISTA, 2016).

CORDEIRO (2011) analisou a composição físico-química do bagaço proveniente de uma cervejaria do estado da Paraíba, Brasil. O material foi submetido a análises para a determinação de sua umidade, proteínas totais, lipídios, fibra bruta, carboidratos e energia disponível no material. A análise do teor de lipídios foi feita através da metodologia descrita por BLIGH e DYER (1959), enquanto as demais análises foram realizadas por métodos definidos pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (2005). A composição do bagaço de malte é apresentada pela Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Composição e poder calorífico do bagaço de malte.

Análises	Resultados
Umidade	75,45 g.100g ⁻¹
Minerais totais	1,29 g.100g ⁻¹
Carboidratos	15,46 g.100g ⁻¹
Proteínas totais	5,37 g.100g ⁻¹
Gorduras totais	2,43 g.100g ⁻¹
Fibra bruta	3,98 g.100g ⁻¹
Energia	105,19 kcal.100g ⁻¹

Fonte: CORDEIRO (2011).

Segunda a autora, a composição do bagaço de malte apresentou pequenas diferenças quando comparada às encontradas em outros trabalhos. Os conteúdos de proteínas totais, gorduras totais, minerais totais e fibra bruta foram inferiores aos obtidos nos trabalhos de MURDOCK et al (1981), POLAN et al (1985) e COSTA et al (1994), no entanto encontrou valores de minerais totais próximos aos obtidos por ASCHERI et al (2007). Tais diferenças

foram justificadas pelas distinções entre os processos cervejeiros, como na variedade e tempo de colheita da cevada, cereais adicionados ao malte para a obtenção do mosto, condições operacionais durante a extração dos componentes solúveis, entre outros.

A umidade do bagaço apresentou a maior diferença entre os trabalhos encontrados na literatura. CORDEIRO (2011) obteve uma umidade de 75,45 g.100g⁻¹ em base úmida, ASCHERI et al (2007) obtiveram uma umidade de 86 g.100g⁻¹ e MATHIAS et al (2014) obtiveram uma umidade de 82,6 g.100g⁻¹. A faixa de umidade em que o bagaço de malte se encontra não é bem definida, dependendo das condições de filtração e armazenamento do bagaço, além de sua composição. No entanto, pode-se observar uma umidade consideravelmente alta para um resíduo sólido, superior a 75% em base úmida.

O bagaço de malte apresenta uma boa digestibilidade de nutrientes em diversos animais, o que faz com que este resíduo seja bastante procurado por produtores rurais (VIEIRA et al, 2013; ESCADA, 2018). Mesmo sendo uma destinação apropriada para as cervejarias, que comercializam o resíduo e geram receita sobre um produto que seria descartado, a presença de uma grande quantidade de água no material gera complicações para os criadores de animais.

ALLEN (1997) sugeriu que os fungos e as leveduras rovam a rápida degradação do material. BEZERRA JUNIOR (2008) analisou dois surtos de uma doença neurológica que levou à morbidade de aproximadamente 30% dos animais após estes serem alimentados com bagaço de malte, que se encontrava contaminado pelo fungo *Aspergillus clavatus*. Este fungo, quando presente em cereais com altos teores de umidade, predomina sobre os demais contaminantes caso o material seja armazenado a temperaturas superiores a 13°C (LOPEZ-DIAS e FLANNIGAN, 1997). O tempo de conservação do bagaço de malte é bastante reduzido, sendo aconselhado o armazenamento por um período máximo de 10 dias caso esteja exposto ao ar (JOHNSON e HUBER, 1987).

Além da contaminação pelo fungo *Aspergillus clavatus*, a presença de levedura residuária, *Saccharomyces cerevisiae*, misturada ao bagaço de malte também pode acarretar problemas. TRUJILLO et al (2017) observaram a intoxicação e consequente morbidade em animais alimentados com bagaço de malte contaminado por levedura residuária.

A dificuldade de se armazenar bagaço de malte para a utilização na alimentação animal, aliada ao baixo valor de venda deste material, favorece a busca por novos usos para este resíduo. Esta destinação é ainda mais interessante se gerar maiores receitas ou redução de gastos com o

processo. Tendo em vista o presente cenário, diversos autores têm estudado o reaproveitamento do bagaço de malte como combustível a ser utilizado dentro da própria cervejaria.

CORDEIRO (2011) também analisou o teor de cinzas, carbono fixo e de materiais voláteis presentes no bagaço de malte, sendo os dados mostrados na Tabela 2.2. Foram utilizadas técnicas descritas pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (2005).

Tabela 2.2: Análise do teor de cinzas e materiais voláteis para o bagaço de malte.

Análise	Resultado
Materiais voláteis (%)	95,95
Cinzas (%)	0,74
Carbono fixo (%)	3,31

Fonte: CORDEIRO (2011).

A composição de carbono fixo do material está diretamente relacionada com a eficiência de sua combustão, menores teores de carbono fixo implicam uma queima mais acelerada e menores tempos de residência, conseqüentemente sistemas utilizados na combustão apresentam dimensões mais reduzidas para uma menor presença de carbono fixo (BRITO e BARRICHELLO, 1982). O teor de cinzas também influencia significativamente a combustão de biomassas, uma vez que existe um maior acúmulo de material no sistema para combustíveis com maior presença de cinzas, fazendo-se necessária uma manutenção mais frequente, além de reduzir significativamente o poder calorífico (BOAS et al, 2010). De acordo com CORDEIRO (2011), a presença de materiais voláteis influencia a operação por favorecerem a ignição nos instantes iniciais da combustão de sólidos. Deste modo, uma maior presença de materiais voláteis em comparação aos demais constituintes, como acontece com o bagaço, é uma característica desejável para combustíveis sólidos.

CORDEIRO (2011) e ESCADA (2018) também observaram a existência de uma relação direta entre o poder calorífico superior do bagaço de malte e sua umidade, tendo o material apresentado um maior PCS para menores umidades. A relação entre o PCS e a umidade também é observada em outras biomassas, como o resíduo de colheita de *Pinus taeda* (SOUZA et al, 2012) e no bagaço de cana-de-açúcar (SILVA e MORAIS, 2008). O bagaço de malte cervejeiro apresentou um maior PCS se comparado a diversos materiais, conforme evidenciado pela Tabela 2.3.

Em seu trabalho, CORDEIRO (2011) também estudou a utilização do bagaço de malte em diferentes umidades como combustível em uma caldeira que seria utilizada dentro da cervejaria como fonte de energia nas etapas de brassagem, envase e na higienização do produto. Foi observado que com o reaproveitamento energético do resíduo na própria unidade produtora, houve uma redução significativa na demanda por gás natural.

Tabela 2.3: Poder calorífico de diversas biomassas.

Biomassa	Poder calorífico superior (kcal.kg⁻¹)	Referência
Bagaço de malte (15% b.u)	5026	CORDEIRO (2011)
Bagaço de malte (20% b.u)	4696	CORDEIRO (2011)
Bagaço de malte (30% b.u)	4037	CORDEIRO (2011)
Resíduo de <i>Cedrelinga catenaeformis</i>	4932	VALE et al (2007)
Madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	4790	JARA (1989)
Caroço de azeitona	4538	DERMIBAS (2006)
Madeira de pinho	4500	PERA (1990)
Casca de coco de babaçu	4500	VALE et al (2007)
Casca de amêndoas	4490	DERMIBAS (2006)
Bambu	4458	BRITO et al (1987)
Casca de Canelinha	4010	PERA (1990)
Bagaço de cana (10% b.u)	3985	SILVA (2008)
Casca de café (13,5% b.u)	3933	VALE et al (2007)

ESCADA (2018) conduziu uma análise sobre a cogeração do bagaço de maneira análoga à utilizada em usinas sucroalcooleiras, com a queima da biomassa para a geração de elétrica. De acordo com o autor, a utilização do bagaço como combustível e a conversão da energia térmica gerada na combustão em energia elétrica e posterior comercialização geraria um retorno financeiro sete a dez vezes superior em relação ao lucro obtido com a comercialização do bagaço de malte *in natura*.

Embora ambos os trabalhos trouxeram uma abordagem diferente da usual para o destino do bagaço de malte, nenhum destes abordou a sua secagem ou os custos envolvidos em tal

operação. Como o poder calorífico é altamente dependente da umidade do material, sendo este maior para menores umidades, a etapa de secagem é crucial para viabilizar a biomassa como combustível.

A secagem do resíduo sólido cervejeiro tem sido abordada em diversos trabalhos. BATISTA (2016) secou bagaço de malte em estufa com circulação de ar variando a temperatura do ar de secagem e massa de material. Foi analisado o efeito destas duas variáveis sobre o tempo necessário para a secagem e sobre a constante de secagem em modelos empíricos comumente utilizados na secagem de biomassas. Observou-se uma forte influência da temperatura e da massa sobre a constante de secagem, para o tempo de secagem observou-se uma redução deste de 390 para 240 minutos com o aumento da temperatura de 50 para 70 °C e com a diminuição da massa de material 300 para 100 g. De acordo com autor, o modelo de Page proporcionou o melhor ajuste para as curvas de umidade em função do tempo.

SOUSA et al (2016) analisaram a influência da temperatura sobre a cinética de secagem em estufa com circulação, tendo os autores observado uma redução do tempo de secagem com a elevação da temperatura. A partir da biomassa seca foi obtida uma farinha com elevado teor de fibras que pode ser utilizada na alimentação, com a presença de antioxidantes e fenóis. Segundo os autores, o modelo de Wang e Singh foi o que melhor ajustou os dados de umidade em função do tempo.

ROCHA et al (2019) analisaram a secagem do bagaço de malte cervejeiro em uma estufa solar com cobertura do tipo telhado, observando a influência da massa de biomassa adicionada ao secador e das condições ambientais, radiação solar e intensidade do vento, sobre a temperatura no interior do secador e sobre a taxa de secagem do material. Foi observado que o aumento da radiação solar e a diminuição da velocidade do vento favorecem a elevação da temperatura no interior do secador e, por consequência, faz com que o processo seja mais eficiente. A redução da massa de material adicionado ao equipamento favorece a secagem, proporcionando maiores taxas de secagem. De acordo com os autores, a utilização de uma maior quantidade de bateladas, com uma menor quantidade de biomassa no interior do secador, foi considerada mais eficiente se comparada à uma única batelada com maior carga. O modelo de Page foi o que melhor representou a cinética de secagem.

BOFFO et al (2014) avaliaram a influência da velocidade do ar sobre a secagem de uma mistura contendo 80% de bagaço de malte e 20% de levedura residual. Para tanto foi utilizado um túnel de vento fixando a temperatura e variando a velocidade do ar de 1,0 m/s a 2,0 m/s. Os

autores observaram uma redução no tempo de secagem e na umidade do material seco com o aumento da velocidade do ar. Segundo os autores, o modelo de Midilli apresentou o melhor ajuste para a curva da cinética de secagem, juntamente com o modelo de Page.

No entanto, nenhum dos secadores utilizados nos trabalhos acima descritos possui aplicação em processos industriais por promover a secagem de pequenas quantidades de material, havendo a necessidade de se estudar o emprego de secadores que operem em larga escala.

2.2. A LEVEDURA RESIDUAL

A levedura residual de cervejarias, ou lodo de levedura, é o segundo subproduto mais abundante no processo de produção da cerveja em termos de volume, sendo descartados de 1,5 a 3,0 kg deste material para cada hectolitro de cerveja (FILLAUDEAU et al, 2006). Este subproduto é obtido após a etapa de fermentação, sendo constituído principalmente por leveduras ativas em excesso após a conversão de açúcares em etanol e gás carbônico, além de outros compostos que garantem ao produto o seu sabor e aroma característicos.

A levedura utilizada na etapa de fermentação encontra-se diretamente relacionada às características desejadas para o produto quanto à sua concentração de etanol e qualidades organolépticas. As leveduras utilizadas na produção da cerveja são pertencentes ao gênero *Saccharomyces*, sendo *Saccharomyces cerevisiae*, *Saccharomyces sensu stricto*, *Saccharomyces paradoxus*, *Saccharomyces mikatae* e a *Saccharomyces bayanus* as mais utilizadas (KURTZMAN e ROBNETT, 2003). A fermentação da cerveja foi classificada em dois tipos distintos, a baixa fermentação em que ocorre o acúmulo de células na parte inferior do tanque, e a alta fermentação em que as células se encontram suspensas ao longo de todo o processo. O tipo de fermentação encontra-se diretamente relacionado à espécie de levedura utilizada e às condições operacionais, especialmente à temperatura (BAMFORTH, 2003).

A fermentação ocorre em duas etapas distintas, na etapa inicial, aeróbica, ocorre a multiplicação do fermento para a concentração de células desejada e na etapa final, anaeróbica, ocorre a conversão dos açúcares presentes no mosto em etanol e gás carbônico (LIMA et al, 2001). Após a conversão dos açúcares ocorre a remoção das células presentes no tanque, estas células encontram-se ativas e podem ser reutilizadas na fermentação de outras cervejas, no entanto esta reutilização é limitada por afetar a qualidade do produto (FILLAUDEAU et al,

2006). Usualmente, as leveduras são reutilizadas de quatro a seis vezes, uma vez que completado o ciclo de crescimento celular ocorre naturalmente a autólise do fermento, sendo este degradado pela ação enzimática até que ocorra a morte das células (FERREIRA et al, 2010). Deste modo, é necessário o reaproveitamento da levedura residual até que esta não seja mais utilizável na produção da cerveja, sendo posteriormente destinada a outras atividades ou descartada.

O descarte indevido de levedura residual provoca uma série de impactos socioambientais como problemas de saúde, aumento da turbidez e do pH da água, aumento na demanda por oxigênio na água, mortalidade de peixes, intoxicação de animais pela presença de etanol, contaminação de lençóis subterrâneos e contaminação por vírus e bactérias (MELO, 2010).

Usualmente, a levedura residual é destinada à nutrição de peixes (LI e GATLIN, 2003), sendo observado um aumento significativo na absorção de nutrientes ao se substituir parte da alimentação destes animais por levedura residual seca. Na alimentação de robalo pôde-se substituir cerca de 30% do alimento fornecido aos animais podendo chegar a 50% sem qualquer impacto negativo em sua performance (OLIVA-TELES e GONÇALVES, 2001). A substituição de parte da nutrição dos peixes não é interessante somente economicamente, as leveduras secas fornecem a diversas espécies de peixes compostos que estimulam o seu sistema imunológico, tornando-os mais resistentes a parasitas além de aumentar significativamente a sua taxa de crescimento, melhorando a qualidade do produto obtido (WHITE et al, 2002; ORTUÑO et al, 2002; LARA-FLORES et al, 2002). Além da nutrição de peixes, a levedura residual seca também é uma excelente fonte de nutrientes para suínos e ruminantes (HUIGE, 2006; POVEDA PARRA et al, 2013).

A levedura residual seca também possui aplicação em outros processos biológicos, sendo utilizada na suplementação em meios de cultivo (FERREIRA et al, 2010). A levedura residual vem sendo avaliada como possível substituta para meios de cultivo de bactérias benéficas, como os membros dos gêneros *Lactobacillus* e *Pediococcus*. Champagne et al (2003) avaliaram a substituição do meio de cultivo para os dois gêneros de bactérias por misturas de levedura residual cervejeira e fermento de confeitaria em diferentes proporções, sendo observado uma melhoria no crescimento da bactéria *Lactobacillus acidophilus* EQ57 ao se alimentar o cultivo com a presença de 100% de levedura residual.

Jiang et al (2009) avaliaram a utilização da levedura residual autolisada ou hidrolisada como fonte de nitrogênio no meio de cultivo de *Actinobacillus succinogenes* NJ113 visando a

redução dos custos envolvidos em sua fermentação, observando uma melhoria significativa no crescimento celular e na taxa de produção de ácido succínico.

Outra aplicação para este resíduo cervejeiro é a sua decomposição para a obtenção de outros produtos que possuam maior valor comercial. Lamoolphak et al (2006) se basearam na decomposição hidrotérmica do fermento de confeitaria para propor uma metodologia semelhante para a decomposição da levedura residual cervejeira. O produto obtido a partir da hidrólise foi testado como nutriente para o crescimento de outras leveduras, uma vez que este produto é rico em aminoácidos e proteínas.

Vale destacar que a destinação da levedura residual está diretamente relacionada à atividade celular do produto, uma vez que células inativas não são utilizadas em processos biológicos por não proporcionar o crescimento celular desejado, caso o produto desejado seja a própria levedura presente no resíduo cervejeiro. Células ativas não são utilizadas na nutrição por provocar alteração no sistema digestivo dos animais. Associado a isto, os processos de secagem, que usualmente são empregados para a inativação das células, alteram significativamente algumas de suas propriedades, como a atividade imunológica das células (LIEPINS et al, 2015) e a capacidade de absorção de diversos componentes, como metais pesados, através de sua membrana celular (MACHADO et al, 2009).

A composição da levedura residual é mostrada na Tabela 2.4. Nota-se que a levedura residual é altamente rica em carboidratos, evidenciando-se a conversão de apenas uma parte dos açúcares presentes no mosto.

Tabela 2.4: Composição da levedura residual.

Análises	Resultados
Umidade*	86,00 g.100g ⁻¹ (total)
Proteína ⁺	48,51 g.100g ⁻¹ (sólidos)
RNA ⁺	7,52 g.100g ⁻¹ (sólidos)
Lipídios ⁺	3,44 g.100g ⁻¹ (sólidos)
Cinzas ⁺	8,33 g.100g ⁻¹
Carboidratos totais ⁺	32,86 g.100g ⁻¹
Fibra solúvel ⁺	9,59 g.100g ⁻¹
Fibra insolúvel ⁺	2,60 g.100g ⁻¹

*MATHIAS et al (2014); ⁺CABALLERO-CÓRDOBA et al (1997)

Conforme destacado anteriormente, a secagem da levedura residual altera significativamente as suas propriedades, como a seletividade da membrana celular, permitindo aplicações bastante específicas que não seriam possíveis com este coproduto em suas condições originais. Deste modo, a secagem deste material é considerada uma etapa crucial para a sua destinação, reduzindo o conteúdo de água e, conseqüentemente, facilitando o transporte e o armazenamento do material, além de prevenir a sua contaminação e, conseqüentemente, perda da qualidade (LUNA-SOLANO et al, 2003).

A secagem de leveduras, como o fermento de confeitaria é realizada com o material na forma de “pellets”, como no trabalho de Spreutels et al (2014) que secaram fermento de confeitaria em leito de jorro com base cônica, utilizando fermento na forma de pellets com formato cilíndrico. No entanto, o elevado conteúdo de umidade da levedura residual cervejeira, conforme mostrado na Tabela 2.4, garante à levedura residual uma consistência pastosa e não permite a sua compressão e formação de “pellets”. Deste modo, procura-se realizar a secagem em outros secadores, que permitam a secagem de materiais pastosos.

Usualmente, a secagem da levedura residual é realizada em secadores rotativos com o contato indireto com o ar de secagem, porém diversos outros equipamentos foram utilizados na sua secagem, como leito fluidizado e *spray dryer* (LUNA-SOLANO et al, 2003) e secador atmosférico (MELO, 2010). O foco destes secadores é a inativação das leveduras para serem utilizadas na alimentação de animais, sendo pouco utilizados na obtenção de produto parcialmente ativo.

CAPÍTULO 3 - SECAGEM DO BAGAÇO DE MALTE EM DRAGEADEIRA

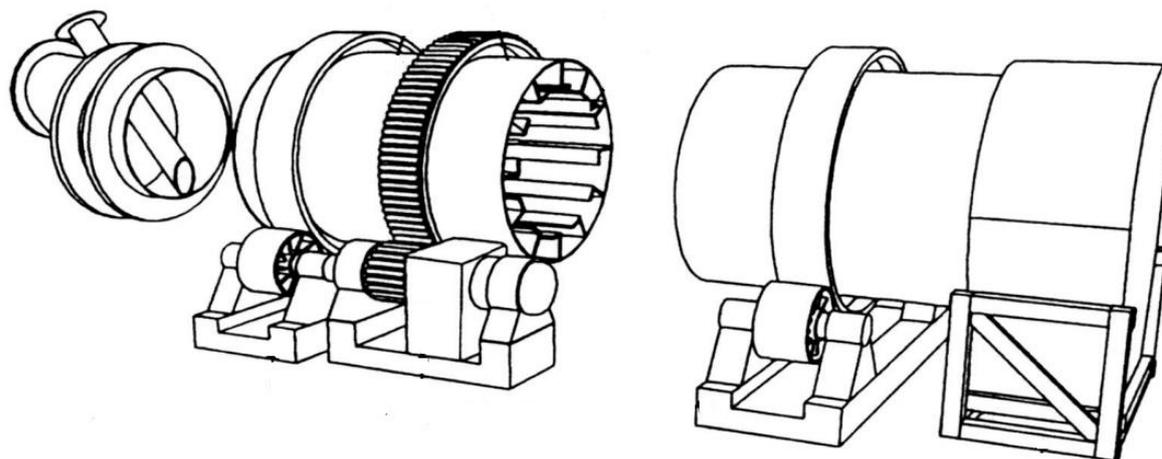
3.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1.1 SECADORES ROTATIVOS

A Figura 3.1 apresenta o secador rotativo, podendo-se identificar os principais elementos que o compõem, como o cilindro e os suspensores.

Estes equipamentos são utilizados nas mais diversas aplicações, como no resfriamento e aquecimento de materiais, na calcinação, mistura, granulação e na secagem, foco do presente trabalho, integrando assim o grupo de equipamentos mais frequentes em instalações industriais (DING et al, 2001; SONG et al, 2003). Os secadores rotativos, que são os tambores rotativos projetados especialmente para a secagem, são os secadores convectivos mais comuns na indústria, como na produção de açúcar, fertilizantes, cimento, fármacos, farelo de soja, café, entre outros (KELLY, 1995; KROKIDA et al, 2002; REINATO e BORÉM, 2006; LUZ, 2006).

Figura 3.1: Ilustração esquemática de um secador do tipo tambor rotativo.



Fonte: Adaptado de Silva et al (2012).

A vasta aplicação do secador de tambor rotativo se deve principalmente ao fato de promover uma mistura homogênea do material úmido graças à constante movimentação das partículas (LISBOA et al, 2007), fornecer um produto de qualidade uniforme (SONG et al, 2003), possuir uma facilidade de aumento de escala (BACELOS et al, 2009) e ser aplicável tanto a materiais orgânicos quanto a materiais inorgânicos (MERZ, 1921; ADAPA, 2004).

O secador do tipo tambor rotativo é constituído basicamente por um cilindro que opera levemente inclinado com um movimento de rotação a baixas velocidades. Ao longo do cilindro se encontram suspensores que movimentam as partículas até uma determinada altura, onde estas são lançadas até a região inferior do secador rotativo, passando por uma corrente de ar previamente aquecida. O movimento das partículas no interior do cilindro é dependente das características dos suspensores, como sua distribuição e geometria (KELLY, 1992; DRIVER et al, 2003).

A energia necessária para a secagem é transportada do ar previamente aquecido para o interior do sólido enquanto a umidade é transportada do interior deste para a corrente de ar. O fornecimento de energia ao sistema corresponde à maior parte dos custos operacionais do processo, sendo de grande importância compreender o funcionamento do secador e os mecanismos envolvidos na secagem do material úmido, evitando assim gastos desnecessários, superaquecimento do produto ou uma remoção excessiva de água (KROKIDA et al, 2002).

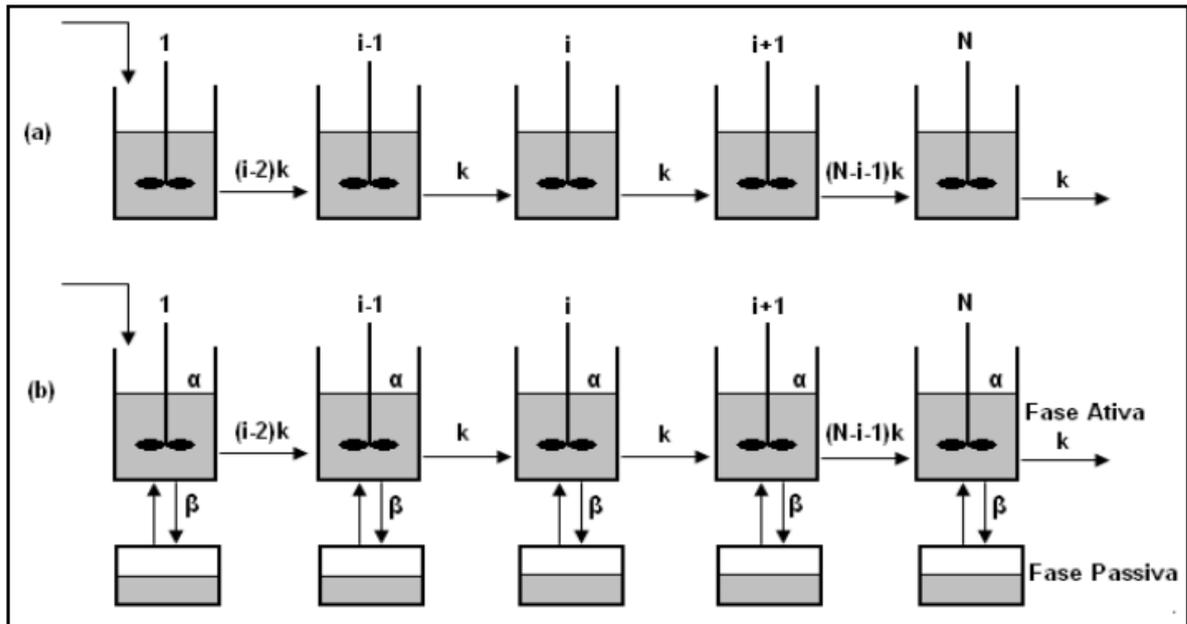
Diversos autores compararam o funcionamento do tambor rotativo a uma série de tanques de mistura perfeita posicionados em série. Esta abordagem passou a ser difundida pela necessidade de simular as curvas de distribuição de tempo de residência (PERAZZINI, 2011).

DUCHESNE et al (1996) simularam a operação do tambor rotativo considerando n reatores de mistura perfeita posicionados em série ao longo de toda a extensão do secador, para cada um destes reatores foi realizado um balanço de massa macroscópico para os sólidos. Foram utilizados dois modelos matemáticos para as simulações, CST e *Cholette-Cloutier* modificado. Para o modelo CST foi feita a estimativa do número de tanques n e do coeficiente de transporte κ , minimizando a soma dos quadrados dos erros em relação aos dados experimentais. O coeficiente de transporte descrevia a facilidade de movimentação das partículas do tanque $i-1$ ao tanque i . O modelo *Cholette-Cloutier* modificado foi considerado mais realista em relação ao CST, uma vez que dividia o volume do reator em duas regiões, a ativa, que correspondia aos sólidos em cascadeamento e a passiva, que correspondia aos sólidos que se encontravam em elevação pelos suspensores. O modelo CST considerou o reator com uma única região uniforme. Além dos parâmetros κ e n , o modelo apresentou os parâmetros α e β , que correspondiam ao volume de sólidos que se encontravam na zona ativa e ao transporte de massa entre as regiões ativa e passiva, respectivamente. Foi estimado um número de 36 reatores de mistura perfeita para o modelo proposto pelos autores. A Figura 3.2 ilustra os modelos adotados pelos autores para as simulações dos reatores em série.

A abordagem da discretização do secador rotativo não foi utilizada somente para a análise da distribuição do tempo de residência. De acordo com YLINIEMI et al (2003), a temperatura e a umidade do sólido eram dependentes do tempo de secagem e da posição no secador, de modo que a modelagem dos secadores recaía sobre um sistema de parâmetros distribuídos. Ao se considerar a temperatura e a umidade apenas como função do tempo, o sistema de parâmetros distribuídos recaiu sobre um sistema de parâmetros concentrados, cuja implementação foi consideravelmente mais simples, analisando o secador como uma série de reatores de mistura perfeita.

DIDRIKSEN (2002) realizou a modelagem da secagem em escala industrial de polpa de beterraba em regime transiente. O transporte do gás foi avaliado de acordo com a diferença de pressão em cada um dos reatores de mistura perfeita e considerando as transferências de calor entre gás e sólido por convecção e por radiação e também o transporte no interior do próprio sólido. A comparação dos dados experimentais com os dados simulados mostrou que as considerações realizadas pelo autor foram satisfatórias.

Figura 3.2: Representação dos modelos: (a) CST e (b) Cholette-Clourier modificado.



Fonte: Retirado de PERAZZINI (2011).

No Centro de Secagem de Pastas e Sementes do DEQ/UFSCar também foram desenvolvidos trabalhos com esta mesma abordagem. BACELOS et al (2009) realizaram a modelagem da secagem de resíduos de embalagens cartonadas em escala semi-piloto para observar a viabilidade da operação e a influência das condições operacionais sobre o

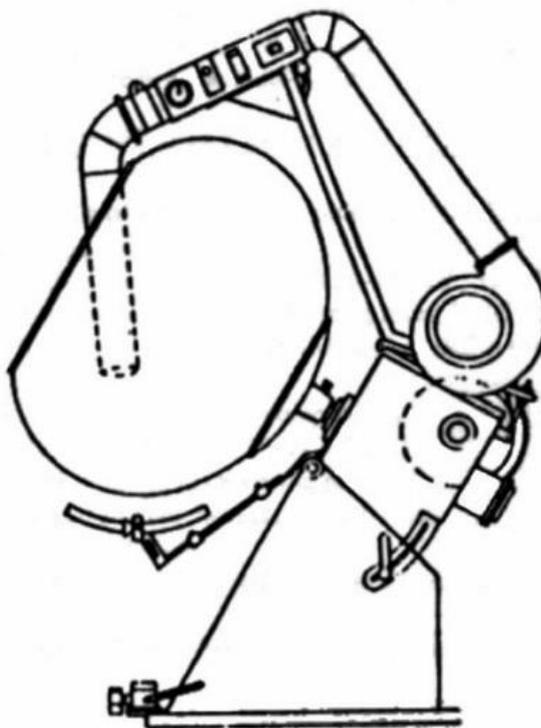
desempenho energético do secador. O modelo de parâmetros concentrados simulou os perfis de temperatura e de umidade ao longo do secador com um intervalo de confiança de 95%.

3.1.2 A DRAGEADEIRA

O recobrimento de partículas é realizado em equipamentos denominados painéis rotatórias ou drageadeiras, que são equipamentos que operam em batelada com o constante movimento de rotação em torno de um eixo que é inclinado em relação ao seu apoio. Estes equipamentos possuem uma abertura única em sua face frontal por onde são alimentados os sólidos a serem recobertos, ar de aquecimento e o agente de recobrimento. Ao longo dos anos as drageadeiras passaram por diversas modificações quanto às suas dimensões, presença de chicanas, sistema de alimentação do agente de recobrimento e circulação de ar (OLIVEIRA e FREIRE, 2003; NITZ, 2006).

A drageadeira padrão é composta por um recipiente de metal de formato semiesférico fixado sobre um eixo inclinado em relação ao seu suporte. O eixo é responsável pela movimentação da drageadeira é ligado a um motor através de um sistema de transmissão, responsável por converter o movimento do motor no movimento de rotação do recipiente (OLIVEIRA e FREIRE, 2003). A Figura 3.3 apresenta a ilustração de uma drageadeira padrão.

Figura 3.3: Esquema de uma drageadeira padrão.



Fonte: NITZ, 2006.

Existem diversos estudos envolvendo a panela rotatória e sua eficiência no recobrimento de partículas. TOBISCA e KLEINEBUDDE (2003) observaram que a carga de material e a rotação da drageadeira influenciam a eficiência do recobrimento das partículas e a uniformidade deste recobrimento. CORDEIRO (2006) analisou o recobrimento de sementes de milho com gel ágar-ágar, e observou a formação de aglomerados de sementes que prejudicam o processo de recobrimento, sendo necessário o uso de equipamentos auxiliares no interior da drageadeira. PINTO et al (2012) também avaliaram o processo de recobrimento de sementes de milho, porém utilizaram uma reação química entre cloreto de cálcio e alginato de sódio, sendo observada a formação de um recobrimento uniforme e ausência de aglomeração.

No entanto, poucos trabalhos foram realizados quanto à secagem de materiais utilizando panelas rotatórias. GARCIA e FERREIRA (2012) analisaram a secagem de folhas de erva cidreira (*Cymbopogon citratus*) e sementes de girassol (*Helianthus annuus*) em um sistema composto por uma drageadeira associada a um soprador responsável pela alimentação de ar. Neste sistema a saída de ar do soprador era direcionada à abertura da drageadeira e sua exaustão feita pela mesma entrada. Foram mantidas a inclinação e a velocidade de rotação, variando-se a vazão de ar de secagem, sua temperatura e a carga de material adicionada ao equipamento. De acordo com os autores, a secagem ocorreu de maneira homogênea devido aos pequenos valores do desvio padrão relativo para a umidade, e o sistema foi considerado apropriado para a secagem destes materiais. Para as condições avaliadas pelos autores, a variação na massa de material, temperatura e vazão de ar não influenciaram significativamente a cinética de secagem das sementes de girassol, enquanto a temperatura e vazão de ar tiveram influência significativa sobre a cinética de secagem da erva cidreira.

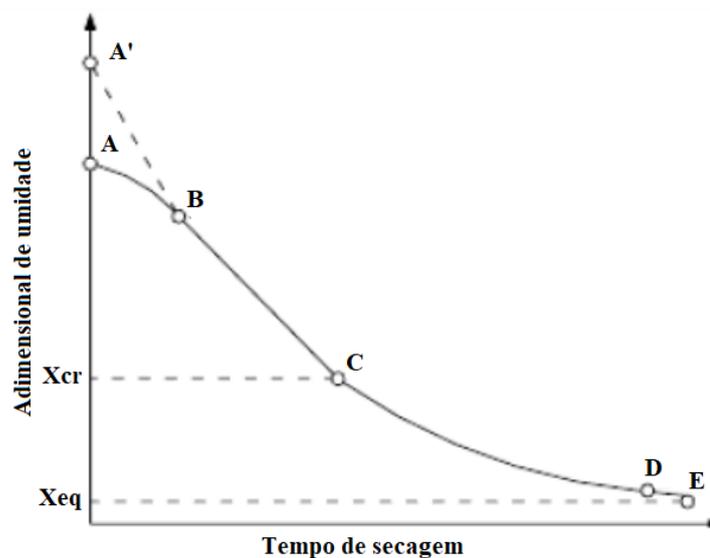
Conforme apresentado anteriormente, a drageadeira foi selecionada para, juntamente com um soprador associado, operar como um secador rotativo em regime transiente com escala reduzida na secagem do bagaço de malte, utilizando uma menor quantidade de material e facilitando assim a sua aquisição e armazenamento.

3.1.3 CINÉTICA E TAXA DE SECAGEM

Tanto a curva para a cinética de secagem, variação do adimensional de umidade com o tempo, quanto a curva da variação da taxa de secagem em função da umidade fornecem informações úteis sobre a secagem dos sólidos, permitindo identificar os principais mecanismos controladores da transferência de calor e de massa.

FOUST et al (1982) dividiram a curva de secagem em diferentes períodos, representados na Figura 3.4. No período inicial ocorre o equilíbrio térmico entre as fases gasosa e líquida, logo o comportamento da curva está fortemente ligado às diferenças de temperatura entre o sólido e gás. Caso o sólido apresente uma temperatura superior à temperatura do gás, este cede energia à fase gasosa e o comportamento da curva é descrito por (A'-B), enquanto caso o sólido possua uma temperatura inferior, este absorve energia tendo um comportamento próximo ao descrito por (A-B).

Figura 3.4: Curva experimental de secagem.

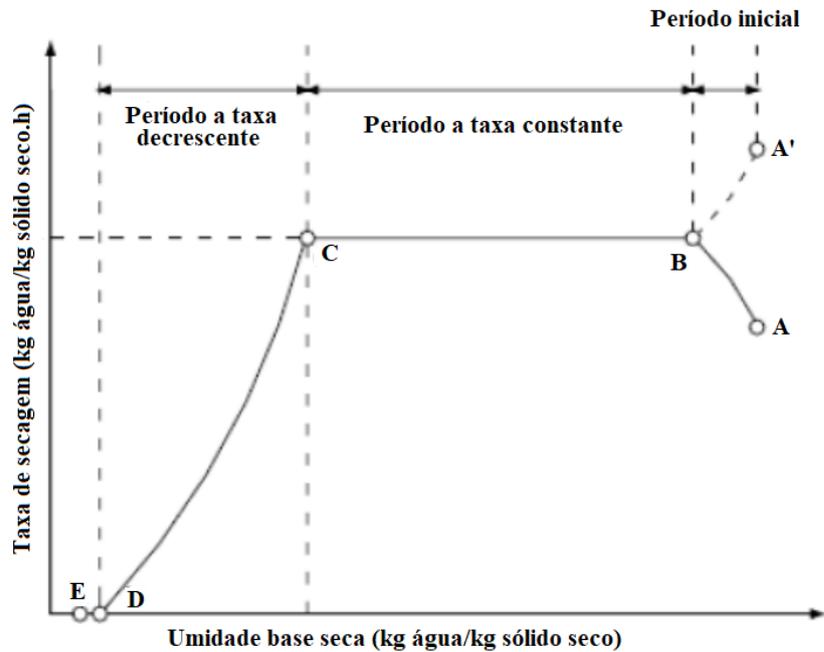


Fonte: Adaptado de STRUMILLO e KUDRA (1986).

Após o equilíbrio térmico entre as fases a secagem passa por um período a taxa constante, (B-C), em que a transferência de água no interior do sólido para a superfície ocorre tão rapidamente quanto a transferência de água presente na superfície saturada para a fase gasosa, sendo a convecção o mecanismo predominante nesta etapa da secagem. Após o período de taxa constante ocorrem dois períodos de secagem a taxa decrescente, (C-D) e (D-E) em que a migração da água do interior do sólido para a superfície controla a transferência de calor e de massa. A partir de E o sólido atinge a umidade de equilíbrio dinâmico.

A curva da taxa de secagem também auxilia na identificação dos períodos da secagem descritos anteriormente conforme ilustrado pela Figura 3.5.

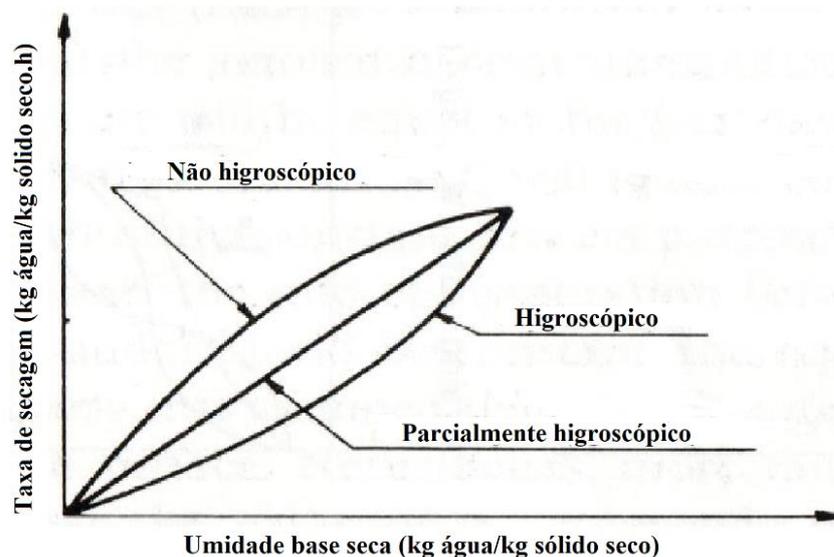
Figura 3.5: Curva experimental para taxa de secagem.



Fonte: Adaptado de STRUMILLO e KUDRA (1986).

A Figura 3.6 ilustra o comportamento da taxa de secagem em função da umidade em materiais cuja secagem não é controlada pela convecção, ou seja, secagem que não apresenta um período de secagem a taxa constante, desconsiderando-se o período inicial de secagem em que ocorre a estabilização do sistema. Observa-se que a natureza do material influencia significativamente o perfil da secagem.

Figura 3.6: Curva característica para materiais sem período de secagem a taxa constante.



Fonte: Adaptado de STRUMILLO e KUDRA (1986)

3.1.4 FORÇA DE ADESÃO

A interação entre as partículas de um material, entre si ou com a superfície em que se encontram em contato, é extremamente relevante para compreender os fenômenos envolvidos em diversos processos e buscar formas de torna-los mais eficiente. A adesão entre materiais e superfícies encontra-se inserida neste contexto.

A definição de adesão é bastante vaga e existem divergências entre os autores especializados no assunto. Oláh e Vancso (2005) definiram a adesão como um resultado das forças atômicas e moleculares na união de duas fases sólidas distintas que se encontram em contato enquanto Podczec e Newton (1995) a definiram como uma consequência da interação entre partículas microscópicas e uma superfície sólida. Apesar do conceito vago, a adesão pode ser compreendida como a interação entre duas fases sólidas distintas que apresentam uma superfície de contato em comum provocada por forças de atração a nível molecular (FELICETTI, 2004).

Existe um grande interesse sobre as forças de adesão entre partículas e superfícies, especialmente em aplicações, como produção de materiais cerâmicos e filtração de gases, uma vez que a adesão é responsável pela formação de aglomerados indesejados em situações específicas (FELICETTI, 2004). A adesão é um fenômeno complexo e envolve conceitos de áreas distintas do conhecimento como a Física, Química e a Engenharia de Materiais (PETEAN, 2014).

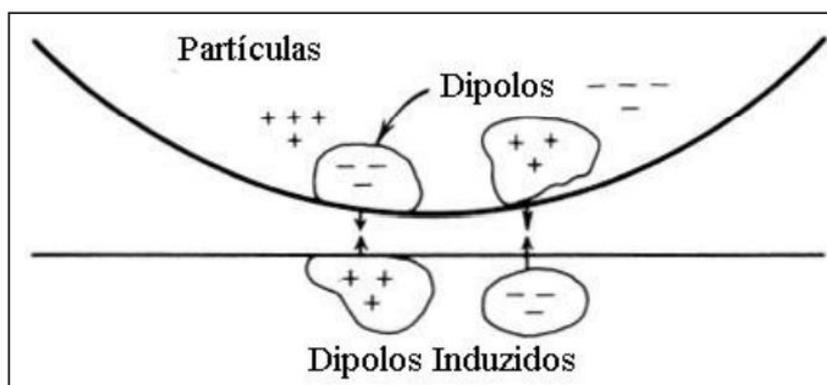
O contato entre as fases ocorre pela ação de forças mecânicas ou por forças superficiais, que são influenciadas por uma série de fatores, como a intensidade das forças responsáveis pelo contato, a compressão de partículas em uma superfície, número de partículas, propriedades dos materiais envolvidos, direção das forças de desprendimento, entre outros (BANDA, 2002).

A força de adesão pode ser compreendida como o somatório de forças de atração, sendo estas as forças de Van der Waals, a força eletrostática e a força de capilaridade (STEWART, 1986), no entanto a combinação destas forças depende de diversos fatores como a formato e tamanho das partículas, tempo de contato, rugosidade da superfície, pressão de contato e umidade, tanto do ar quanto dos materiais (AHRENS et al, 2005).

As forças de Van der Waals surgem a partir da constante movimentação de elétrons nas moléculas apolares, que faz com que estes se concentrem em regiões específicas da molécula,

estas regiões transitórias levam o nome de dipolos. Por sua vez estes dipolos induzem à formação de dipolos complementares com carga oposta no material adjacente, sendo estes chamados de dipolos induzidos, e a presença de regiões com cargas opostas dá origem a uma atração entre estas, conforme representado na Figura 3.7. A intensidade destas forças de atração está diretamente relacionada à distância entre os dipolos e os dipolos induzidos, sendo estas mais intensas para dipolos fisicamente mais próximos (KRUPP, 1967). A distância entre as fases tem influência significativa sobre a força de adesão, uma vez que o componente das forças de Van der Waals é mais intenso quando estas fases se encontram mais próximas (GADY et al, 1998). Para materiais secos sem a presença de ligações químicas entre as fases e sem a presença de um campo elétrico agindo sobre o sistema, é de se esperar uma predominância das forças de Van der Waals na força de adesão (PETEAN, 2014).

Figura 3.7: Forças moleculares de Van de Waals.



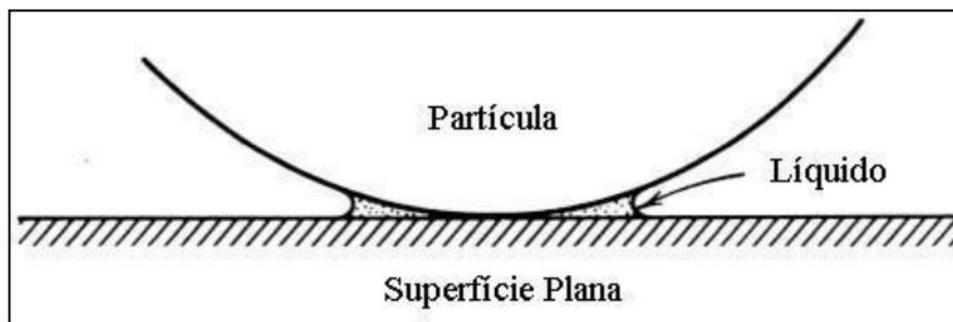
Fonte: Adaptado de HINDS (1998).

As forças eletrostáticas aparecem através de dois mecanismos distintos, pela aplicação de um campo elétrico ao sistema ou através da colisão entre as fases. A passagem de um campo elétrico provoca a sua indução e conseqüentemente a atração entre regiões com cargas opostas enquanto a colisão entre as partículas faz com que ocorra o surgimento de cargas elétricas (DERJAGUIN et al, 1975). A intensidade desta força não é significativa a ponto de predominar sobre as demais forças envolvidas na adesão, porém facilitam o contato entre as fases permitindo a atuação das forças de Van der Waals e da capilaridade (RUMPF, 1977).

As forças de capilaridade correspondem ao terceiro componente da força de adesão e ocorrem devido à tensão superficial provocada pela presença de líquido entre as fases sólidas, conforme ilustrado através da Figura 3.8 (PETEAN, 2014). A tensão superficial, e conseqüentemente as forças de capilaridade, encontram-se diretamente relacionadas à

quantidade de líquido presente entre as fases, e sua intensidade diminui com a redução no conteúdo de umidade envolvida no processo de adesão, até um ponto em que as forças de capilaridade se tornam desprezíveis (ZIMON, 1982).

Figura 3.8: Formação do filme líquido pelo efeito de capilaridade.



Fonte: Adaptado de HINDS (1998).

Existem diversas fontes para a umidade envolvida no processo de adesão, como a umidade do ar que condensa sobre a superfície das fases envolvidas. A umidade relativa do ar pode influenciar significativamente a adesão entre os corpos, sendo o fenômeno de capilaridade desprezível em materiais secos expostos a uma atmosfera com umidade relativa inferior a 50%, e dominante sobre a adesão quando expostos a uma atmosfera com umidade relativa entre 65 e 75% (ZIMON, 1982). A umidade envolvida nas forças de capilaridade também pode se encontrar no interior dos sólidos. Em materiais porosos com características higroscópicas, a umidade presente em seu interior é responsável pela formação das pontes líquidas à medida que migra para a superfície de contato (SCHUBERT, 1981).

Nota-se que a presença de água afeta principalmente a região ao redor do contato entre as fases (FEILER, 2007). Em outras palavras, a água presente no material tende a se posicionar ao redor do contato entre as fases formando duas regiões distintas, uma região em que ocorre o contato direto entre os dois sólidos e uma região em que este contato é indireto, através da água presente entre os sólidos. Logo o aumento na área de contato se deve principalmente à região de contato indireto, em que as pontes líquidas são mais intensas.

As propriedades superficiais das partículas também têm influência significativa sobre a adesão em superfícies. Feiler et al (2007) avaliaram o efeito da capilaridade sobre as forças de fricção e de adesão para diversos materiais, entre eles a sílica em suas condições originais, que possui características hidrofílicas, e a sílica modificada, com características hidrofóbicas. Eles observaram uma redução significativa na adesão com superfícies hidrofóbicas e concluíram que

a modificação nas propriedades superficiais impactou a afinidade entre as superfícies e a umidade e, conseqüentemente, as forças de adesão.

Além das características dos materiais que influenciam as forças de adesão, em nível molecular, outras forças que atuam externamente também podem influenciar a adesão entre sólidos. Nguyen et al (2010) utilizaram o método centrífugo para a determinação da força de adesão entre partícula e substrato utilizados na fabricação de comprimidos. O método consistia na compressão do material sobre uma superfície plana e posterior aplicação de uma força centrífuga em sentido oposto, para que este material fosse então separado, a força centrífuga aplicada foi considerada igual em módulo à força de adesão. Foi observado pelos autores uma relação entre a pressão de compressão aplicada sobre o material durante o processo de adesão e a intensidade da força de adesão resultante. Segundo eles o tempo de exposição à pressão de compressão e a rugosidade da superfície dos materiais tiveram impacto significativo sobre as forças de adesão.

3.2. MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 OBTENÇÃO E ARMAZENAMENTO DE BAGAÇO DE MALTE

O bagaço de malte foi adquirido de uma cervejaria situada no município de São Carlos/SP. Para minimizar os efeitos das diferenças na composição do material sobre a secagem foi utilizado somente bagaço retirado após a brassagem de uma cerveja do tipo IPA, Indian Pale Ale. A Figura 3.9 representa o material utilizado no presente trabalho.

Figura 3.9: Bagaço de malte cervejeiro.



Fonte: Acervo pessoal.

O material foi coletado poucos minutos após a sua filtração para evitar a perda de água para o ambiente e armazenado em recipientes neutros de plástico com tampa. Os recipientes utilizados também preveniam a ação de agentes contaminantes presentes no ambiente.

Todo o material coletado era então levado a um refrigerador industrial e mantido sob temperaturas próximas a 3 °C para desacelerar a sua degradação e contaminação por microrganismos, como o fungo *Aspergillus clavatus*.

3.2.2 UNIDADE EXPERIMENTAL

3.2.2.1 Estrutura básica do secador

O secador era constituído por duas partes principais, a drageadeira e um soprador. A drageadeira promovia a constante movimentação e a consequente homogeneização do material em seu interior. Foi utilizada uma drageadeira de cobre com volume útil de 10 litros. O recipiente era fixado sobre um eixo que se encontrava posicionado sobre o sistema de transmissão do secador. Este sistema de transmissão transformava o movimento de rotação do motor modelo 56-RC-6334, com potência de 1/3 CV e frequência de 174 rpm, no movimento de rotação do eixo e, conseqüentemente, do recipiente. A rotação do recipiente de cobre era controlada através do sistema de polias de transmissão, de modo que, ao se alterar o diâmetro da polia associada ao motor ou o diâmetro da polia associada ao recipiente, alterava-se a intensidade de sua rotação. O motor e o recipiente se encontravam posicionados sobre um suporte metálico de angulação variável, de modo que a alteração do ângulo do suporte alterava a inclinação da drageadeira em relação ao chão.

O soprador era responsável pela alimentação do ar previamente aquecido que percorre o recipiente da drageadeira, responsável pela remoção de água do material. Foi utilizado um soprador convencional modelo 128 da Fabbe-Primar com potência nominal de 1200 W. Este secador captava o ar do ambiente e o circulava por um cilindro metálico, no interior do qual se encontravam as resistências responsáveis pelo aquecimento do ar, sendo estas controladas por uma chave de seleção, determinando quais destas resistências estariam ligadas ao longo da operação. O soprador foi posicionado sobre uma haste de ferro apoiada sobre o chão, esta haste é móvel podendo-se alterar a sua posição em relação ao suporte da drageadeira, bem como o ângulo entre o bocal do soprador e a haste.

No bocal do soprador foi posicionado um termopar do tipo “J” associado a um termômetro digital Digi-Sense preso à haste, responsável por mensurar a temperatura do ar de

secagem. A Figura 3.10 representa a estrutura básica do secador instalado no Centro de Secagem de Pastas e Sementes.

3.2.2.2 Modificações na estrutura do secador

Ensaio prévios de secagem do bagaço de malte em drageadeira em suas condições originais evidenciaram diversas dificuldades operacionais. Para a realização destes ensaios prévios foi adicionado 1,5 kg de biomassa ao recipiente e ajustou-se o soprador para operar com o sistema de resistências em potência média. Estes ensaios prévios tiveram como objetivo avaliar o comportamento dos sólidos ao longo do tempo.

Figura 3.10: Estrutura básica do secador.



Fonte: Acervo pessoal.

Inicialmente, observou-se o acúmulo de uma grande parcela da biomassa na superfície interna do secador, formando uma camada espessa de material que não se desprendia da parede do recipiente. Deste modo não era observado o cascadeamento característico de secadores rotativos. Notou-se também que a biomassa não aderida sobre a superfície interna da drageadeira apresentava uma constante movimentação. No entanto, observou-se a presença de zonas mortas que diminuíam a eficiência da mistura e favoreciam a formação de aglomerados de bagaço de malte de formato esférico, com dimensões consideravelmente maiores que as partículas do bagaço de malte. A Figura 3.11 mostra os aglomerados de bagaço de malte (b) em comparação com o bagaço de malte seco sem a ocorrência de acúmulo (a).

Figura 3.11: Aglomerados de bagaço de malte.



Fonte: Acervo pessoal.

Tanto a aglomeração de material quanto a adesão do bagaço à superfície da drageadeira tornaram o leito heterogêneo e aumentaram a resistência ao transporte de calor e de massa. Teve-se então uma maior demanda por energia para a obtenção de produtos com uma qualidade aceitável, inviabilizando o processo de secagem.

Foi observado também que nas etapas finais da secagem, à medida que se aproximava do equilíbrio dinâmico, diminuía a movimentação dos sólidos no interior da drageadeira. Deste modo, o ar de secagem entrava em contato somente com a superfície exposta do leito de partículas, dificultando a secagem do material no interior do leito.

A adesão de material às paredes da drageadeira e o acúmulo de bagaço foram fortes indícios de que as forças de adesão influenciaram a circulação dos sólidos. Em secadores rotativos é necessário preservar a movimentação característica dos materiais, uma vez que ela é responsável pela homogeneização do leito.

A diferença na circulação das partículas ao fim da secagem em comparação ao início também foi um forte indício da influência das forças de adesão. Conforme apresentado anteriormente, em materiais com elevada umidade, a água presente no interior do material forma um filme líquido na região de contato entre partícula e superfície e com a remoção de umidade este efeito de capilaridade seria atenuado. Evidenciou-se assim a necessidade de se

avaliar a eficiência do contato entre o bagaço e a superfície da drageadeira, através da relação entre as forças de adesão e a umidade da biomassa.

Com as dificuldades de circulação do bagaço de malte ao longo de toda a secagem, foi necessário modificar o secador para promover a movimentação do material, a sua homogeneização e evitar o acúmulo no interior do recipiente. Para evitar o acúmulo de material na parede interna do secador foi adicionado um raspador de borracha posicionado no fundo da drageadeira, oposto à sua abertura. Este raspador de borracha possuía um comprimento de 8 cm e 1,5 cm de espessura e foi posicionado de forma que, ao entrar em contato com o sólido aderido à parede interna, provocava o seu desprendimento por meio de uma ação mecânica. Ao se desprender da parede interna, o sólido caía pela ação gravitacional, chegando à região inferior do leito, estabelecendo assim um movimento cíclico.

Também foram adicionadas à parede interna da drageadeira seis placas de borracha com 15 cm de comprimento, largura de 1,5 cm e espessura de 0,5 cm. Estas placas foram posicionadas igualmente espaçadas de modo a acompanhar o movimento da drageadeira e percorressem a parte inferior do leito. A Figura 12 mostra o secador após a sua modificação.

Figura 3.12: Estrutura modificada do secador.



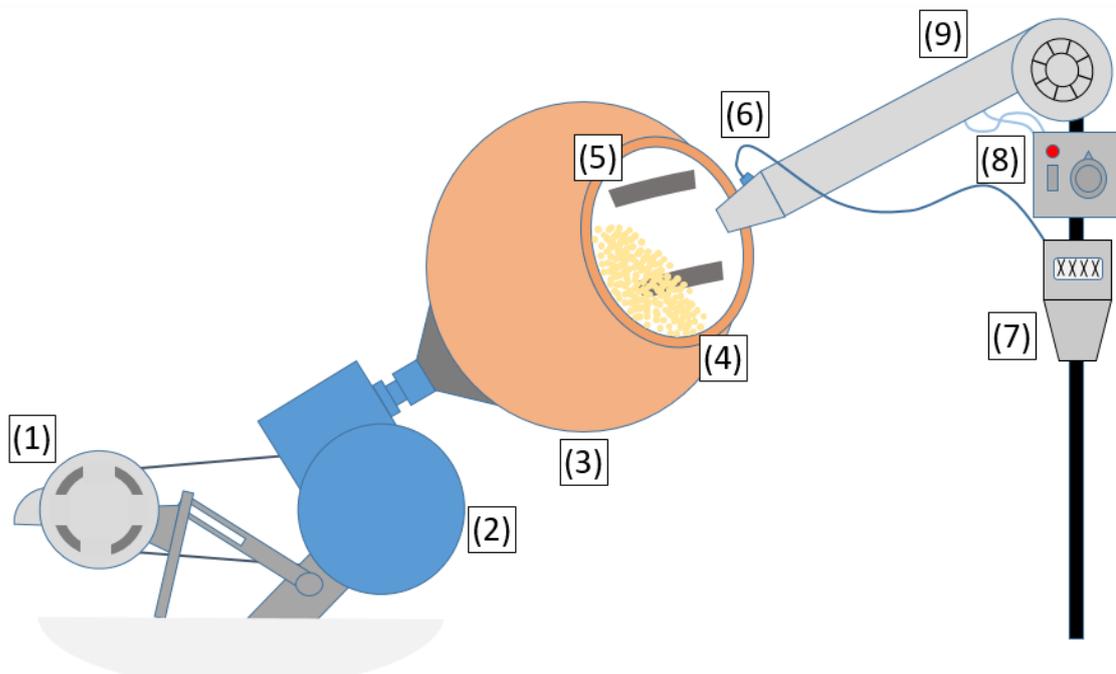
Fonte: Acervo pessoal.

As placas de borracha funcionavam como “impelidores”, promovendo a homogeneização da biomassa devido à sua ação mecânica, especialmente com menores umidades, quando o

contato da parede interna com a biomassa é insuficiente para que ocorra sua movimentação. O constante choque dos impelidores com os sólidos também auxilia no rompimento dos aglomerados de material.

A adição do raspador e dos impelidores proporcionou uma melhoria significativa na movimentação dos sólidos, com uma mistura constante ao longo de toda a secagem e cascadeamento característico de secadores rotativos. A Figura 3.13 representa o secador após as modificações, através desta é possível observar os principais elementos do secador, o motor (1), o sistema de transmissão (2), recipiente de cobre (3), leito de partículas (4), impelidores (5), termopar (6), termômetro digital (7), chave de seleção das resistências (8) e soprador (9).

Figura 3.13: Esquema do secador modificado.



Fonte: Acervo pessoal.

3.2.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para a realização dos experimentos de secagem, o suporte metálico da drageadeira foi nivelado em relação ao chão e o suporte do soprador foi posicionado de modo que sua haste ficasse equidistante das extremidades do suporte metálico. O ângulo do soprador também foi ajustado em 60° em relação à haste, mantendo o ângulo oposto da drageadeira em relação ao suporte. Alterou-se então a altura do soprador para que o bocal fosse direcionado para o centro da abertura da drageadeira, conforme ilustrado na Figura 3.14.

Figura 3.14: Posicionamento do soprador em relação à drageadeira.



Fonte: Acervo pessoal.

Inicialmente, o soprador era ligado e, imediatamente em seguida, o sistema de aquecimento era acionado ajustando-se as resistências presentes ao longo do cilindro. O termômetro era ligado para monitorar a temperatura do ar fornecido pelo soprador, T_a^E , até a sua estabilização. O bagaço de malte era retirado do resfriamento, pesado e posteriormente adicionado ao recipiente do secador. Com a alimentação da biomassa e a estabilização do sistema de aquecimento, este era redirecionado para o centro da abertura da panela rotatória, iniciando a circulação do ar de secagem. Imediatamente após o posicionamento do soprador, acionava-se o motor e dava-se início à secagem.

O tempo de secagem, t , era monitorado com o auxílio de um cronômetro digital. No decorrer da secagem, em intervalos de tempo previamente definidos, foi feita a coleta de amostras de bagaço para a determinação da umidade do sólido em base seca, X_s . Os ensaios de secagem foram conduzidos em um tempo variável, adotando como critério de parada a condição de equilíbrio dinâmico do material. Para que não ocorresse uma perda significativa de material em função da amostragem, cada amostra possuía massa inferior a 5 g. A massa de cada uma destas amostras, $m_{s,úmido}$, era mensurada e as amostras eram levadas a uma estufa com circulação

e renovação de ar a 105 °C por um período de 24 horas para a remoção completa da umidade. A massa da amostra seca, $m_{s,seco}$ era mensurada e X_s era então calculada pela equação:

$$X_s = \frac{m_{s,úmido} - m_{s,seco}}{m_{s,seco}} \quad (3.1)$$

A umidade em base seca foi utilizada para o cálculo do adimensional de umidade, MR, através da Equação 3.2, onde $X_{s,eq}$ corresponde à umidade de equilíbrio dinâmica, $X_{s,0}$ corresponde à umidade inicial do sólido e $X_s(t)$ corresponde à umidade no tempo de secagem t.

$$MR(t) = \frac{X_s(t) - X_{s,eq}}{X_{s,0} - X_{s,eq}} \quad (3.2)$$

Simultaneamente à coleta de amostras de biomassa, foi feita a medição das temperaturas no secador, para observar a sua variação ao decorrer da secagem. T_a^E , conforme descrito anteriormente, era mensurada através do termopar posicionado no bocal do soprador. Como o sistema de aquecimento do soprador não apresenta um controle que permite fixar a temperatura do ar de secagem, esta depende fortemente da temperatura ambiente. Ao monitorar o perfil de T_a^E ao longo dos ensaios, pôde-se identificar possíveis oscilações e sua influência sobre a cinética de secagem do material ou sobre as temperaturas no interior da drageadeira.

A temperatura da superfície interna da drageadeira, T_w , e a temperatura dos sólidos em movimento, T_s , foram aferidas com o auxílio de um termômetro infravermelho UT300A. O termômetro infravermelho possuía um desvio de ± 2 °C e para evitar possíveis erros experimentais, foi fixada a sua posição em relação à superfície (CANABARRO, 2019). Deste modo, a distância foi padronizada para que o termômetro fique posicionado na abertura da panela rotatória, variando-se somente a inclinação do termômetro para aponta-lo para a superfície ou para os sólidos em movimento.

A intensidade da movimentação das partículas, Ω_s , também foi monitorada simultaneamente à amostragem descrita anteriormente. Para tanto, foi adicionada uma esfera de alumínio com 1 cm de diâmetro ao leito de sólidos, que funciona como um traçador ao acompanhar a movimentação das partículas. Este traçador foi selecionado por apresentar uma coloração distinta da biomassa, sendo fácil a sua identificação, e por possuir dimensões grandes o suficiente para sua visualização e pequenas o suficiente para não alterar significativamente a fluidodinâmica do leito. O marcador apresentou um comportamento cíclico similar às partículas de bagaço, uma vez que este acompanhava o movimento do leito. Para mensurar a intensidade da movimentação, utilizou-se um cronômetro digital para contabilizar o tempo decorrido ao

longo da medida, sendo contabilizada cada vez que o traçador se encontrava presente sobre o leito de partículas. A intensidade da movimentação do leito é calculada através da equação:

$$\Omega_s = \frac{\text{número de ciclos}}{\text{tempo de amostragem}} \quad (3.3)$$

A frequência de rotação da drageadeira, Ω_{drag} , também foi calculada para cada condição analisada. Para tanto, foi adicionado um marcador na abertura do equipamento, sendo uma rotação o movimento completo do recipiente, até que o marcador retorne ao mesmo ponto inicial. A frequência de rotação é calculada pela razão entre o número de rotações e o tempo de amostragem. A velocidade do ar de secagem na saída do soprador também foi mensurada, utilizando-se uma sonda Tri-Sense posicionada em frente ao bocal.

Para realizar uma comparação entre as temperaturas na superfície do secador, T_w , e nas partículas de sólido, T_s , para avaliar a comportamento destas ao longo da secagem se levar em conta a temperatura na saída do soprador, foi definido um adimensional de temperatura θ , calculado através da equação:

$$\theta(t) = \frac{T_s(t)}{T_w(t)} \quad (3.4)$$

3.2.4 CONDIÇÕES OPERACIONAIS

Para avaliar a influência de uma variável específica, por exemplo a influência de T_a^E sobre a cinética de secagem, perfis de temperatura e movimentação de partículas, fixou-se os demais parâmetros e variou-se somente a variável de interesse.

As variáveis analisadas foram a temperatura do ar de secagem, T_a^E , a intensidade de rotação da drageadeira, Ω_{drag} , e a massa inicial de sólidos, $m_{s,0}$. Para cada uma das variáveis foram utilizados dois valores distintos, para Ω_{drag} foram utilizados 25,1 e 33,9 rpm, para T_a^E foram utilizados $67,7 \pm 1,8$ e $101,2 \pm 2,8$ °C e para $m_{s,0}$ foram utilizados 1,0 e 1,5 kg. As condições operacionais avaliadas estão descritas na Tabela 3.1, alguns destes ensaios foram realizados em triplicata, sendo estes indicados na tabela. Os valores utilizados para a intensidade de rotação foram selecionados para abranger a rotação máxima e a rotação mínima possível com o sistema motor-transmissão do equipamento. Quanto à temperatura, os valores utilizados foram selecionados pela limitação do ajuste do sistema de aquecimento, que permitia somente a seleção das resistências utilizadas durante o processo de aquecimento, tendo sido selecionadas a menor resistência e a resistência intermediária. As massas de bagaço de malte foram selecionadas para permitir a livre movimentação de bagaço de malte, sem que houvesse um

excesso de material no interior da drageadeira, mas com massa suficiente para evitar uma redução significativa do leito com a amostragem ao longo da secagem.

Tabela 3.1: Condições operacionais avaliadas.

Condições operacionais	T_a^E	$m_{s,0}$	Ω_{drag}	Triplicata
C1	101,2±2,8 °C	1,0 kg	33,9 rpm	Sim
C2	67,7±1,8 °C	1,0 kg	33,9 rpm	Sim
C3	101,2±2,8 °C	1,5 kg	33,9 rpm	Sim
C4	67,7±1,8 °C	1,5 kg	33,9 rpm	Sim
C5	101,2±2,8 °C	1,0 kg	25,1 rpm	Não
C6	67,7±1,8 °C	1,0 kg	25,1 rpm	Não

3.2.5 OBTENÇÃO DA TAXA DE SECAGEM

A avaliação da taxa de secagem foi feita utilizando-se uma estufa com circulação e renovação de ar da TECNAL, modelo TE-394/1. A estufa utilizada permite o ajuste da temperatura e da velocidade do ar através dos controles presentes em seu painel frontal e possui aberturas nas laterais que permitem a renovação de ar se desejado. Em seu interior havia uma câmara revestida de metal com aberturas circulares nas paredes esquerda e direita que permitem a entrada de ar e sua saída pela face oposta.

Na face traseira da câmara de secagem foi posicionado o sensor de temperatura. A vazão de ar foi mensurada com o auxílio de um anemômetro digital modelo LCA 6000, posicionado em três pontos distintos do conjunto intermediário de aberturas, rente à entrada de ar. A partir das três medidas da velocidade do ar, foi calculada a média e seu desvio padrão.

A amostra a ser seca foi confinada no interior de uma placa metálica circular com 2 cm de altura e um diâmetro de 7 cm, a face superior e inferior são perfuradas. A placa foi posicionada no centro da câmara de secagem com o auxílio de uma corrente metálica. Com a placa suspensa no interior da câmara de secagem ambas faces se encontravam em contato com o ar de secagem. A extremidade oposta da corrente metálica se encontra na parte inferior de uma balança de precisão apoiada sobre a estufa, passando através de um orifício localizado na parede superior da câmara de secagem. A estufa e o suporte da balança são mostrados na Figura 3.15.

Figura 3.15: Estufa com circulação e renovação de ar.



Fonte: Acervo pessoal.

A balança foi conectada a um computador com o software Hyperterminal, responsável por processar os dados de massa e tempo de secagem. Como a massa da amostra foi monitorada em tempo real, foi calculada a sua umidade ao longo do tempo conhecendo a sua umidade inicial em base úmida, $X_{s0,b,u}$, e a massa inicial da amostra, m_{amo0} , através da equação:

$$X_s(t) = \frac{m_{amo}(t) - m_{amo0}X_{s0,b,u}}{m_{amo0}X_{s0,b,u}} \quad (3.5)$$

Conhecendo X_s em função de t e dividindo o tempo total de secagem em uma série de intervalos menores, foi calculada a taxa de secagem para o i -ésimo intervalo através da equação:

$$tx_i = - \left(\frac{X_{si} - X_{s(i-1)}}{t_{si} - t_{s(i-1)}} \right) \quad i \geq 1;$$

$$tx_i = 0 \quad i = 0; \quad (3.6)$$

3.2.6 AVALIAÇÃO DAS FORÇAS DE ADESÃO ENTRE BAGAÇO E SUPERFÍCIE

Para a determinação da curva para a força de adesão em função da umidade do bagaço de malte foram utilizadas onze amostras distintas de biomassa, com umidades diferentes entre si. Uma das amostras foi utilizada em suas condições originais, enquanto as outras dez amostras foram submetidas a secagem em estufa com circulação e renovação de ar a 105 °C em períodos distintos de tempo, variando de 1 a 24 horas, tempo utilizado para a remoção completa da umidade presente na amostra.

Foi utilizada uma centrífuga com uma rotação máxima de 10000 rpm e velocidade variável através de um controlador de velocidade. Para adaptar o equipamento foi construído um suporte para placas de cobre que podia ser fixado sobre o eixo da centrífuga e removido com facilidade. Para tanto, foi utilizado um cilindro de ferro com diâmetro interno de 3,05 cm e espessura de 0,80 cm que funcionava como uma luva para o eixo de rotação, este cilindro foi perfurado em sua lateral para a passagem de um parafuso responsável pela fixação ao eixo. Ao cilindro foram soldadas duas placas quadradas de ferro com 6,3 cm nas laterais, as quais foram posicionadas opostas para manter o equilíbrio do sistema durante a rotação. As placas de ferro servem como apoio para duas placas de cobre. Todas as placas e o suporte de ferro foram perfurados em suas extremidades para a fixação com parafusos. O sistema suporte-placas utilizado nos ensaios para a determinação da força de adesão é mostrado através da Figura 3.16.

Figura 3.16: Sistema de apoio para placas de cobre.



Fonte: Acervo pessoal.

Para a realização dos ensaios utilizou-se a seguinte metodologia: i) bagaço de malte era adicionado sobre uma das placas de cobre até recobri-la completamente pela amostra, exceto as regiões próximas aos furos para a passagem de parafuso, evitando assim o desprendimento do bagaço durante o manuseio; ii) a placa recoberta com biomassa era então pesada para que a mesma massa fosse utilizada nas repetições; iii) a segunda placa de cobre era então posicionada sobre a placa recoberta com biomassa e sobre ambas era colocado um peso com massa de aproximadamente 0,8 kg responsável pela compressão e fixação do bagaço sobre a placa inferior; iv) após o período de compressão, fixado em 5 minutos, o peso e a placa superior eram removidos e a placa inferior era posicionada na vertical para a remoção do material não aderido

sobre a superfície pela ação gravitacional; v) a placa de cobre com biomassa aderida era novamente pesada e fixada ao suporte de ferro, que era então preso ao eixo da centrífuga; vi) com o sistema fixado sobre o eixo da centrífuga, iniciava-se o movimento de rotação partindo-se da velocidade angular mínima, aumentando gradativamente até que o bagaço se desprendesse e a superfície ficasse exposta, como mostrado na Figura 3.17; vii) desligava-se a centrífuga e anotava-se o valor da rotação utilizada para o desprendimento do bagaço; viii) removia-se o suporte do eixo da centrífuga e, posteriormente, a chapa de cobre que era pesada novamente para se determinar assim, a massa de bagaço de malte desprendida. A repetição dos ensaios foi feita fixando a velocidade em que ocorreu o desprendimento de material. Deste modo, os desvios apresentados para as forças de adesão corresponderam principalmente a desvios nos valores para a massa de material desprendida.

Figura 3.17: Desprendimento de bagaço de malte aderido sobre a placa de cobre.



Fonte: Acervo pessoal.

A força de adesão foi considerada igual em módulo à força centrífuga, e calculada através da Equação 3.7, onde w é a velocidade angular em radianos/s, m é a massa de bagaço de massa desprendida e r corresponde à distância entre o centro do eixo de rotação e a borda da placa de cobre.

$$F_{ad} = F_{cent} = mw^2r \quad (3.7)$$

A partir dos dados para a força de adesão para cada uma das onze amostras de bagaço de malte foi possível obter os valores da força de adesão em função da umidade.

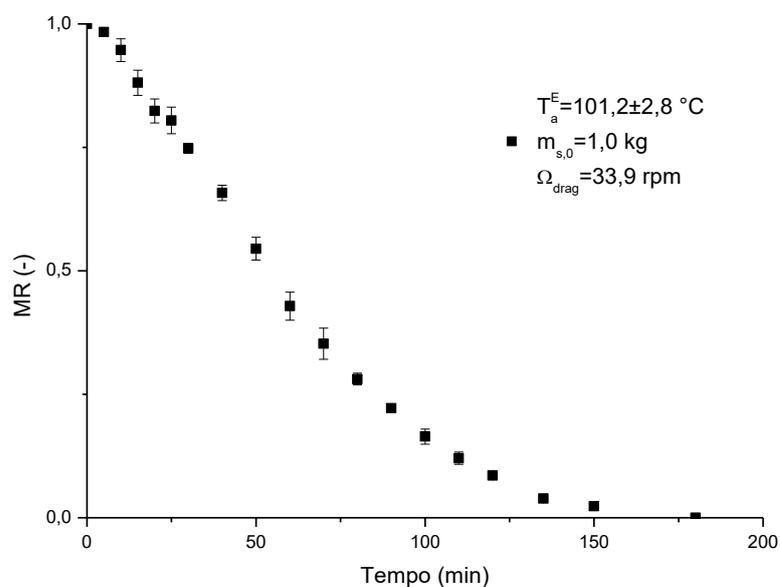
O método centrífugo também foi utilizado por outros pesquisadores para a determinação da força de adesão entre diversos materiais e superfícies. Felicetti (2004) avaliou a adesão de polvilho doce, calcário dolomítico e concentrado fosfático sobre aço inoxidável utilizando o método centrífugo, que consiste basicamente na aplicação de força centrífuga no sentido contrário à força utilizada na compressão. Os materiais foram colocados sobre discos de aço inoxidável e submetidos a uma força de compressão, para tanto os discos foram submetidos a uma rotação de 10000 rpm em uma centrífuga. Após a compressão, houve a inversão no sentido de rotação para o desprendimento do material, sendo a força de adesão igual em intensidade à força centrífuga aplicada no momento do desprendimento. Petean (2014) também utilizou o método centrífugo na determinação das forças de adesão em superfícies rugosas.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 CINÉTICA DE SECAGEM

A Figura 3.18 apresenta a cinética de secagem para a condição C1, sendo calculada a média do adimensional de umidade em cada tempo para as três repetições, e o desvio padrão para cada uma destas medidas.

Figura 3.18: Adimensional de umidade em função do tempo para C1.

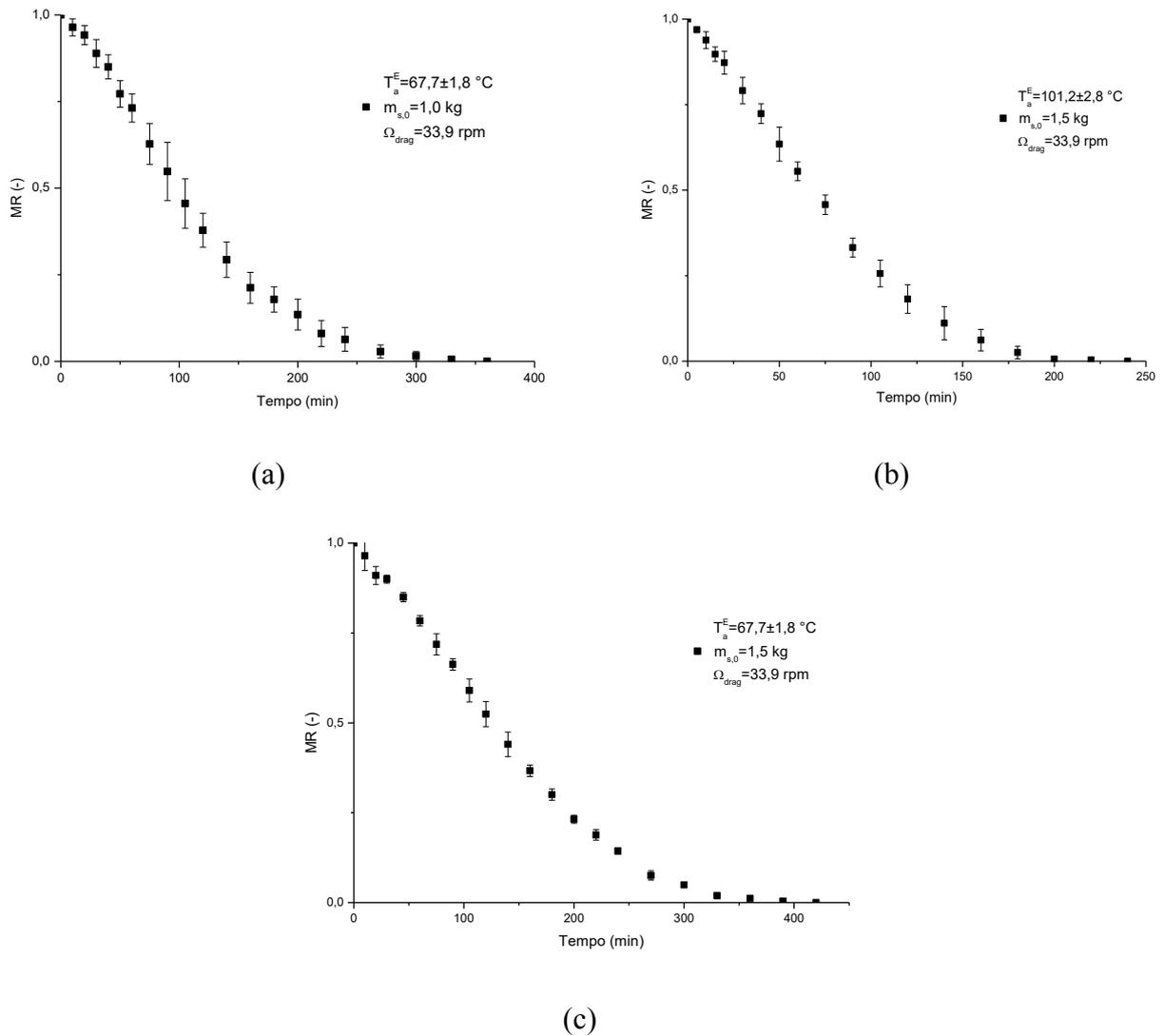


Fonte: Acervo pessoal.

BOFFO et al (2014), BATISTA (2016), ROCHA et al (2019) obtiveram em seus trabalhos um comportamento semelhante para a secagem do bagaço de malte, embora utilizassem

secadores convectivos diferentes do utilizado no presente trabalho. A análise da cinética de secagem do material em contato com gás a temperatura e umidade fixas é de grande importância para a análise dos mecanismos envolvidos na transferência de calor e de massa. Um comportamento semelhante foi encontrado para outras condições avaliadas em que ocorreu a variação da massa inicial de sólidos e da temperatura do ar de secagem, como as condições operacionais C2, C3 e C4, conforme mostrado na Figura 3.19.

Figura 3.19: Adimensional de umidade em função do tempo para (a) C2, (b) C3 e (c) C4.



Fonte: Acervo pessoal.

Observa-se que apesar das curvas de MR em função de t mostradas nas Figuras 3.18 e 3.19 apresentarem comportamentos semelhantes, ocorreu uma grande diferença entre eles quanto ao tempo de secagem para que o sólido alcance a condição de equilíbrio dinâmico. Ao se comparar a condição C1 com C2, em que houve uma variação somente em T_a^E , pôde-se

observar um aumento no tempo total de secagem, de 180 minutos para C1 para 360 minutos para C2. O mesmo pôde ser observado ao se comparar C3 e C4, com um aumento no tempo de secagem de 240 minutos para C3 para 420 minutos para C4.

Segundo CELESTINO (2010) a temperatura do ar utilizado na secagem convectiva, bem como a umidade relativa deste ar, são os principais fatores que influenciam a remoção da umidade pelo ar. Maiores temperaturas do ar implicam em maiores gradientes de pressão de vapor, que favorece a passagem da água presente na fase sólida para a fase gasosa. Deste modo, a diferença entre os tempos de secagem para as condições avaliadas era esperada, uma vez que o transporte de massa facilitado pela elevação da temperatura implicou em um menor tempo para se atingir a condição de equilíbrio.

Notou-se também uma variação no tempo total de secagem ao se modificar somente $m_{s,0}$, como observado ao se comparar as condições C1 e C3 e ao se comparar as condições C2 e C4. Houve um aumento no tempo de secagem de 180 minutos para C1 para 240 minutos para condição C3 e um aumento do tempo de secagem de 360 minutos para C2 para um tempo de 420 minutos para C4. Ao se adicionar uma carga maior de biomassa no secador mantendo-se o fornecimento de energia, a elevação das temperaturas no interior do secador ocorreu mais lentamente. Conforme discutido anteriormente, a temperatura exerce um papel crucial na transferência de calor e de massa por estar diretamente relacionado ao gradiente de pressão de vapor. Logo, a desaceleração no aquecimento do secador e da biomassa implicaram em uma diminuição da velocidade da secagem e, conseqüentemente, o aumento do tempo total para se alcançar a condição de equilíbrio dinâmico.

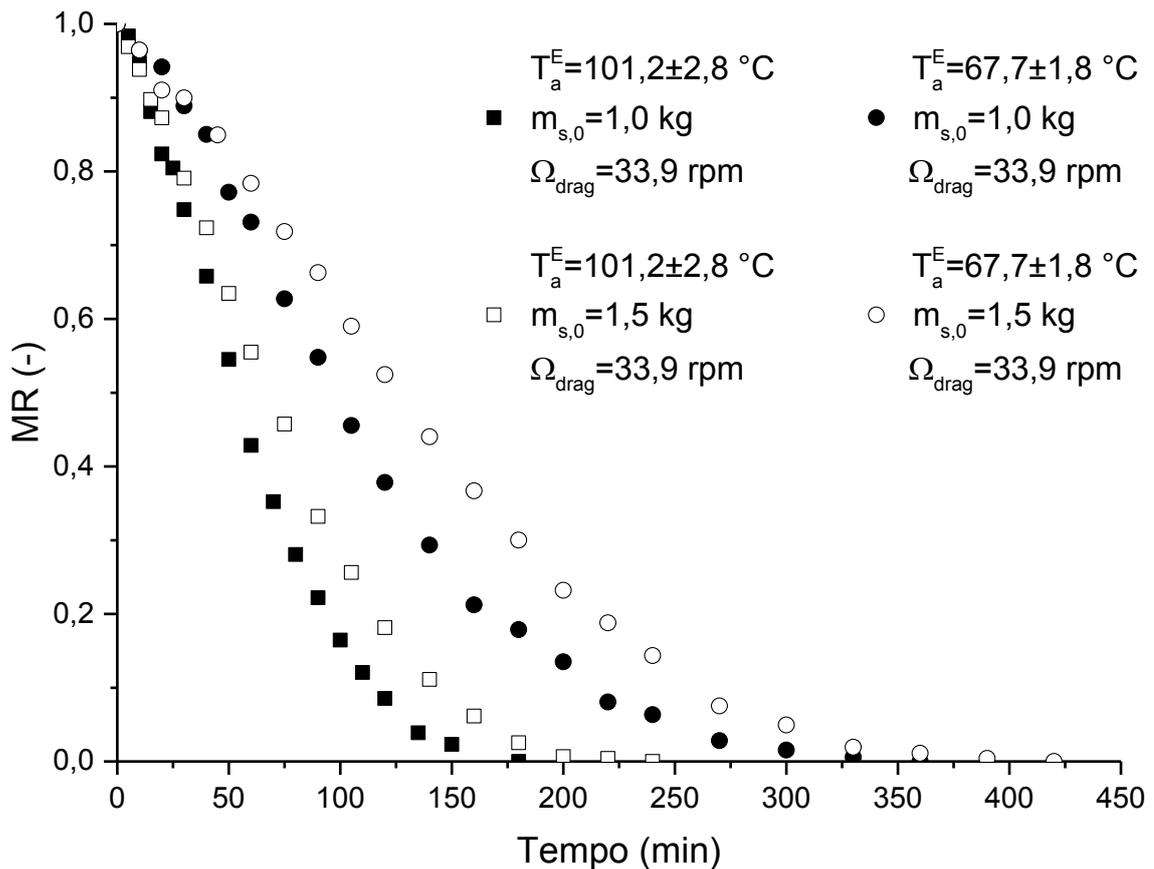
Notou-se também a reprodutibilidade dos ensaios, tendo os dados para o adimensional de umidade apresentado desvios padrão relativamente baixos. Os pequenos desvios para a umidade do material ocorreram graças à constante movimentação do leito pelo movimento de rotação da drageadeira, evidenciando-se que a amostragem de uma pequena quantidade de material é suficiente para caracterizar a umidade dos sólidos como um todo. Os maiores desvios foram apresentados para a condição C2 entre $t=80$ min e $t=240$ min, no entanto, ainda assim o comportamento da curva de MR em função de t foi bem definido.

Estes resultados concordaram com os obtidos por BATISTA (2016) que ao realizar a secagem do bagaço de malte em uma estufa com circulação e renovação de ar observou que a diminuição da massa de material a ser seco e a elevação da temperatura do ar reduziram o tempo de secagem. Segundo o autor a secagem ocorreu de maneira mais eficiente para as partículas

que se encontravam em contato com o ar circulante. O aumento do leito no interior da panela rotatória implicaria em uma menor fração relativa dos sólidos em contato direto com o ar de secagem o que diminuiu a eficiência da transferência de calor, embora o leito fosse constantemente homogeneizado.

A Figura 3.20 reúne as cinéticas de secagem para as condições C1 a C4, através desta pode-se comparar visualmente o efeito de cada uma das variáveis, T_a^E e $m_{s,0}$.

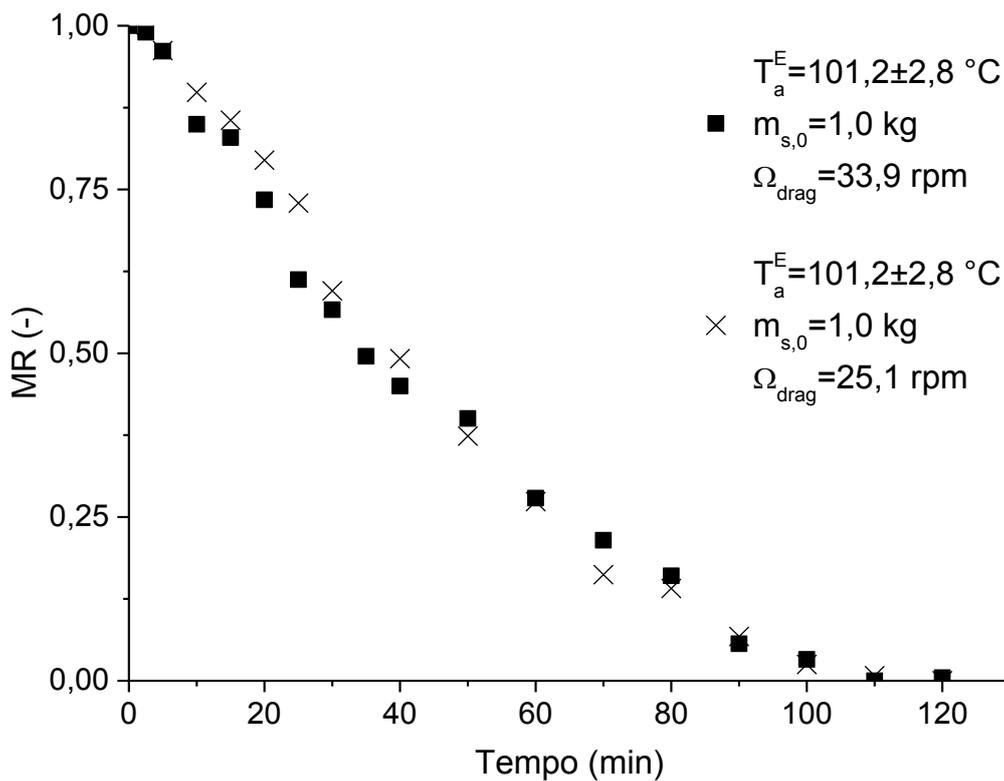
Figura 3.20: Adimensional de umidade em função do tempo para condições C1 a C4.



Fonte: Acervo pessoal.

Como os experimentos foram considerados reproduzíveis, a realização de um único ensaio, como feito nos ensaios C5 e C6 onde ocorreu a variação da frequência de rotação da drageadeira, pode ser viável para se analisar os fenômenos envolvidos na secagem. A Figura 3.21 apresenta a comparação de um ensaio realizado utilizando-se a condição C1 com um ensaio utilizando-se a condição C5, em que ocorreu a variação da frequência de rotação da drageadeira mantendo-se as demais variáveis.

Figura 3.21: Adimensional de umidade em função do tempo para C1 e C5.



Fonte: Acervo pessoal.

Observou-se que a variação na velocidade de rotação na drageadeira para as condições avaliadas não teve um impacto significativo sobre a cinética de secagem. Considerando-se possíveis erros experimentais, pode-se afirmar que ambas as curvas se encontram sobrepostas. No entanto, a pequena alteração na cinética nas condições avaliadas no presente trabalho não implica que a velocidade de rotação não apresenta uma influência significativa sobre a secagem do bagaço em outros secadores, ou quando se utiliza o mesmo sistema com rotações distintas das utilizadas, sendo necessário um melhor entendimento quanto à influência deste parâmetro.

De acordo com SHARPLES et al (1964), a velocidade de rotação é de suma importância em secadores rotativos, uma vez que uma velocidade muito alta de rotação imobiliza os sólidos que se encontram em contato com a superfície do secador, reduzindo o contato entre o ar de secagem e as partículas. Uma velocidade reduzida de rotação afeta a mistura e o cascadeamento do sólido pela maior concentração de sólidos na região inferior do secador, pela ação gravitacional e, principalmente, pela ineficiente elevação de partículas pelo contato com a parede.

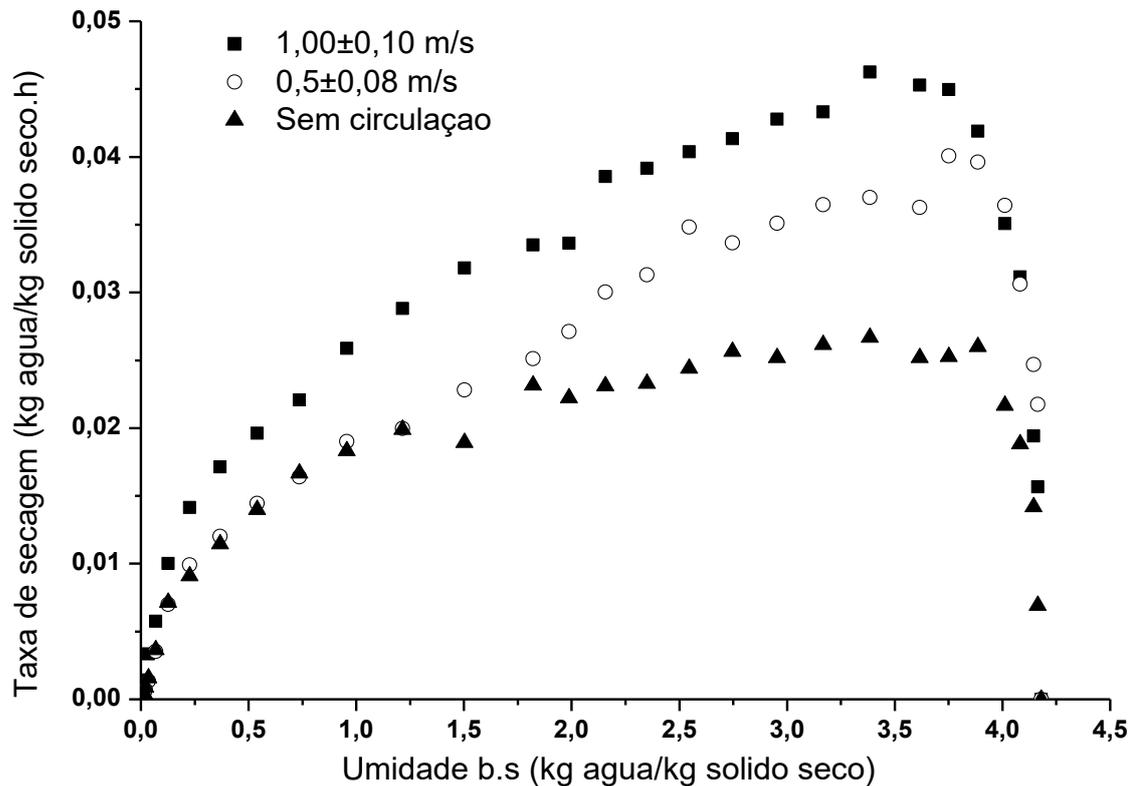
Através da Figura 3.18 observa-se que, para C1, ocorreu um período de estabilização do sistema nos primeiros 25 minutos de secagem, seguido de um período de taxa decrescente até atingir a umidade de equilíbrio dinâmico com 180 minutos de secagem. Deste modo, a secagem do bagaço de malte em drageadeira não foi controlada predominantemente pela convecção. O mesmo pode ser observado para as demais cinéticas, como para C2, em que a estabilização ocorreu após 50 minutos de secagem e a partir daí observa-se uma taxa de secagem decrescente, até que o equilíbrio dinâmico foi alcançado.

A Figura 3.22 representa a taxa de secagem do bagaço de malte obtida de acordo com a metodologia descrita anteriormente. Pode-se observar que, para as três velocidades do ar analisadas, houve um rápido aumento na taxa de secagem até que esta atingiu o seu valor máximo em uma umidade de aproximadamente 3,8 kg/kg em base seca. Após o valor máximo, ocorre uma redução na taxa de secagem com perfil aproximadamente linear até aproximadamente 1,0 kg/kg em base seca, onde ocorre uma nova inflexão e redução da taxa de secagem até zero. Como não foi observado um período de secagem a taxa constante, característicos de materiais cuja secagem é controlada pela convecção, isso indica que este mecanismo não controla a secagem do bagaço de malte. De acordo com STRUMILLO e KUDRA (1986), o período de secagem a taxa constante não é observado na secagem de materiais com características higroscópicas que é controlada por mecanismos internos, sendo o perfil decrescente da taxa de secagem crucial na identificação destes mecanismos.

O comportamento da curva da taxa de secagem no período decrescente é dependente, dentre diversos parâmetros, da natureza do material. A secagem do bagaço de malte cervejeiro apresentou comportamento similar ao observado em sólidos com elevada área específica de evaporação e com estrutura interna porosa (STRUMILLO e KUDRA, 1986), sendo este comportamento observado na secagem de outros materiais, como a madeira e o algodão (MUJUMDAR, 2006).

Ao se observar os perfis obtidos para a secagem do bagaço de malte em estufa com circulação e renovação de ar, concluiu-se que o bagaço de malte é um material com características não higroscópicas, que tem a transferência de calor e de massa controlada pelos mecanismos internos. Para materiais higroscópicos, observa-se que a redução na taxa de secagem é mais intensa nos seus instantes iniciais, com umidades mais elevadas, enquanto para materiais não higroscópicos a diminuição na taxa de secagem se intensifica ao fim da secagem.

Figura 3.22: Taxa de secagem do bagaço de malte em estufa com circulação de ar.

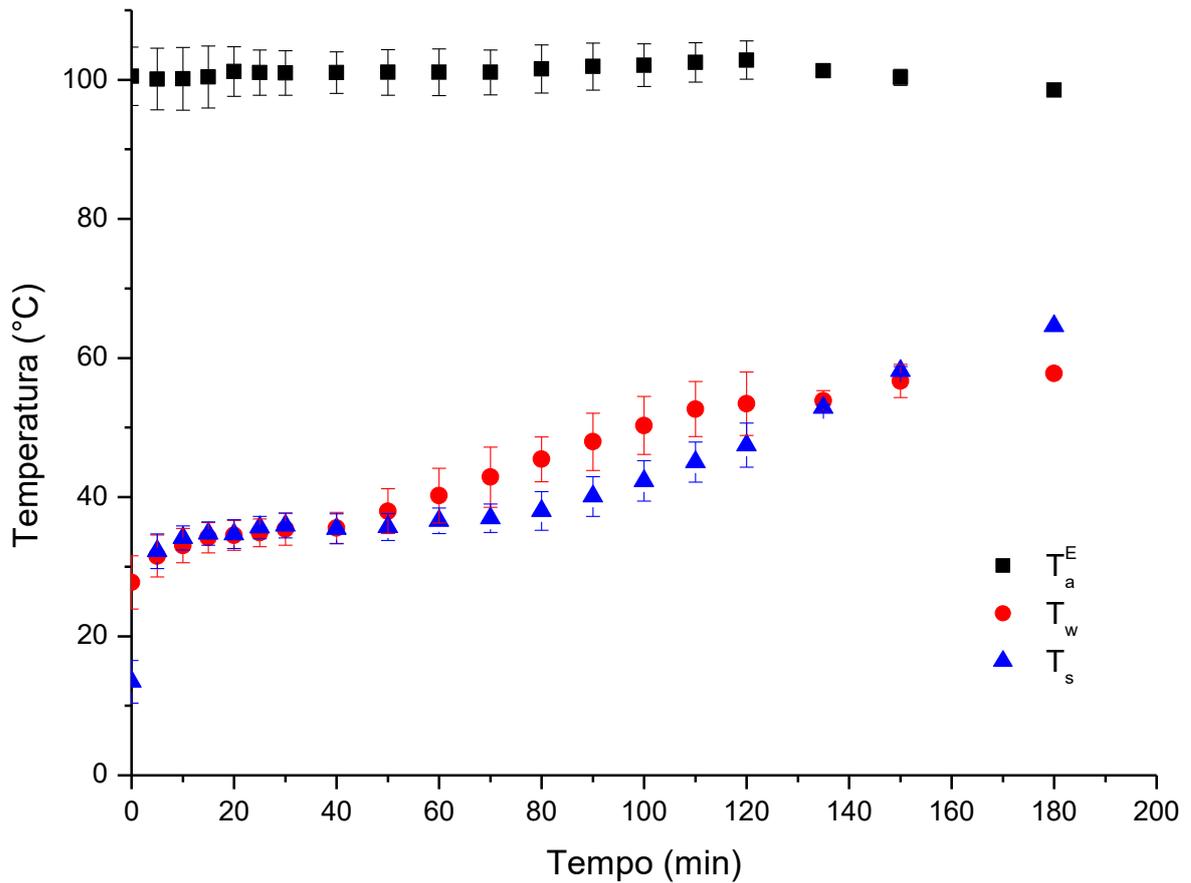


Fonte: Acervo pessoal.

3.3.2 PERFIS DE TEMPERATURA NO SECADOR

A Figura 3.23 apresenta os valores de T_a^E , T_s e T_w ao longo do tempo de secagem para a condição C1. Observa-se que a média da temperatura na saída do soprador permaneceu praticamente constante ao longo de toda a secagem, de modo que as variações nas medidas para esta temperatura acabaram impactando somente o seu desvio padrão. Um sistema mais robusto para o controle da temperatura do ar de secagem seria considerado mais adequado para a aplicação proposta, interrompendo o fornecimento de energia para o ar caso a temperatura se elevasse e iniciando o aquecimento quando esta é reduzida. No entanto, ao se fixar as resistências que forneceram energia para o aquecimento do ar foi obtida uma alimentação de ar com temperatura praticamente constante ao longo de toda a secagem.

Figura 3.23: Variação de T_a^E , T_s e T_w para $T_a^E=101,2\pm 2,8$ °C e $m_{s,0}=1,0$ kg.

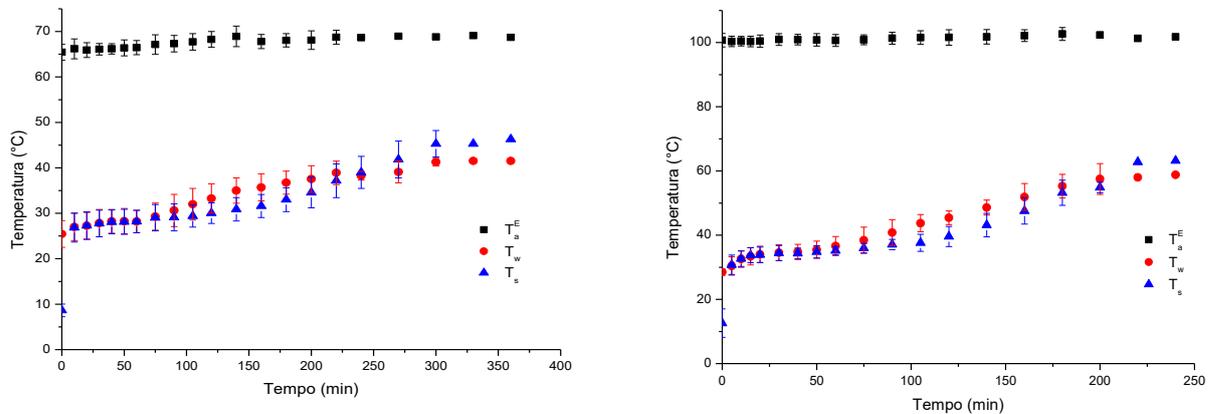


Fonte: Acervo pessoal.

Observa-se que ocorreu uma constante elevação nas temperaturas da parede e do sólido em movimento. Logo no início da secagem, nos cinco minutos iniciais, a temperatura do sólido, inicialmente resfriado, entrou em equilíbrio com a temperatura da superfície interna da drageadeira, inicialmente à temperatura ambiente. Após este período, as temperaturas permaneceram em equilíbrio até aproximadamente 40 minutos de secagem, a partir daí a temperatura da parede interna foi superior à temperatura do sólido. Ocorreu um aumento na diferença entre T_w e T_s a partir dos 40 minutos de secagem, uma vez que a elevação de T_w é mais intensa que a elevação de T_s . A partir de aproximadamente 90 minutos do início da secagem, observou-se uma redução no incremento de T_w e uma rápida elevação para T_s e, conseqüentemente, a diminuição da diferença entre as temperaturas. Este padrão foi observado até o término da secagem, tendo T_s apresentado valores superiores a partir de 135 minutos do início da secagem.

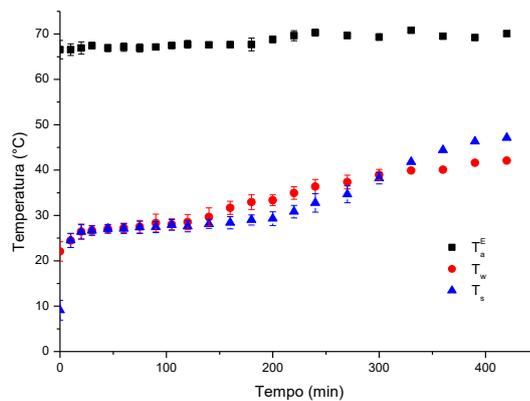
O mesmo comportamento para a variação de T_a^E , T_s e T_w ao longo da secagem foi observado para as demais condições avaliadas, como exemplificado pela Figura 3.24 que apresenta os perfis de temperatura para C2, C3 e C4

Figura 3.24: Variação de T_a^E , T_s e T_w para (a) C2 em que $T_a^E=67,7\pm 1,8$ °C e $m_{s,0}=1,0$ kg, (b) C3 em que $T_a^E=101,2\pm 2,8$ °C e $m_{s,0}=1,5$ kg e (c) C4 em que $T_a^E=67,7\pm 1,8$ °C e $m_{s,0}=1,5$ kg.



(a)

(b)



(c)

Fonte: Acervo pessoal.

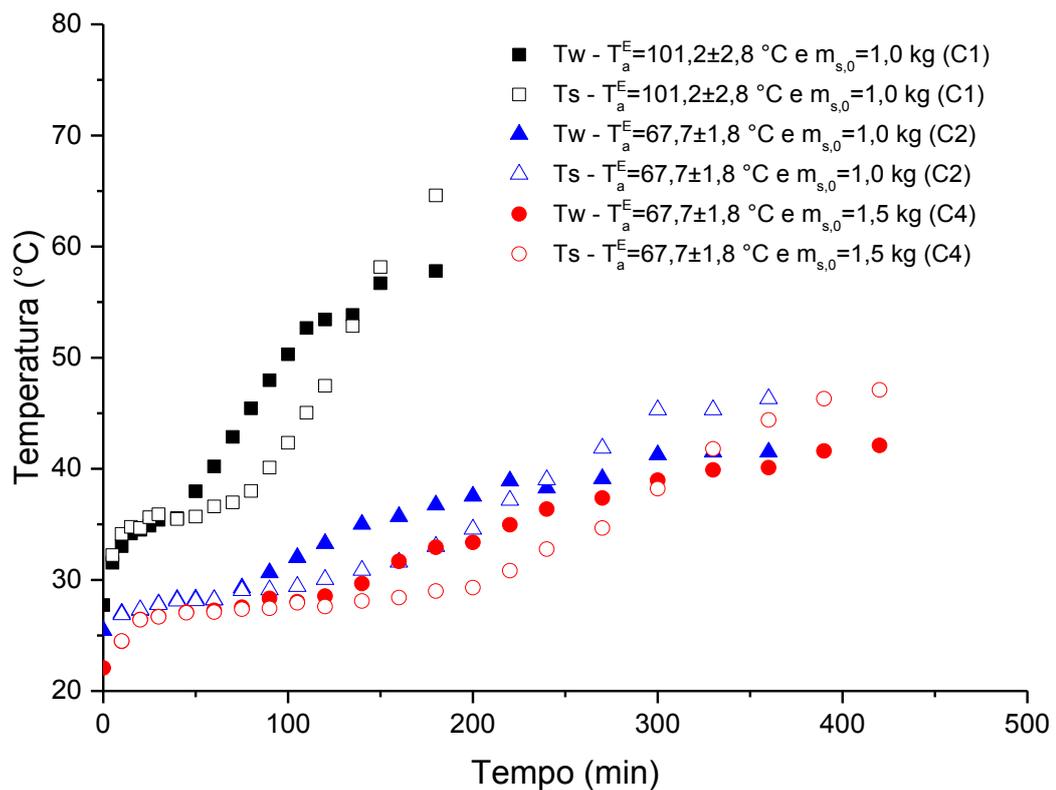
Para as três condições operacionais avaliadas pôde-se observar de maneira clara os quatro períodos presentes no perfil de temperaturas para C1, os instantes iniciais até que a superfície da drageadeira e bagaço entrem em equilíbrio térmico, o início da secagem em que T_s e T_w são praticamente iguais, o período intermediário em que a temperatura da superfície é superior à temperatura do sólido e o término da secagem em que T_s é maior que T_w .

Notou-se também que para C2, C3 e C4 os valores de T_a^E permaneceram praticamente constantes ao longo de toda a secagem, apresentando pequenas oscilações em torno de uma

temperatura média. Apesar de alguns dos experimentos durarem mais de seis horas, passando por condições ambientais distintas, tais alterações climáticas não impactaram significativamente a qualidade do ar de secagem, garantindo condições experimentais apropriadas.

A Figura 3.25 apresenta simultaneamente T_w e T_s ao longo de t para C1, C2 e C4, desconsiderando a condição C3 para facilitar a visualização dos efeitos individuais de cada parâmetro, de T_a^E ao se comparar C1 com C2 e de $m_{s,0}$ ao se comparar C2 com C4.

Figura 3.25: T_w e T_s em função do tempo de secagem para C1, C2 e C4.



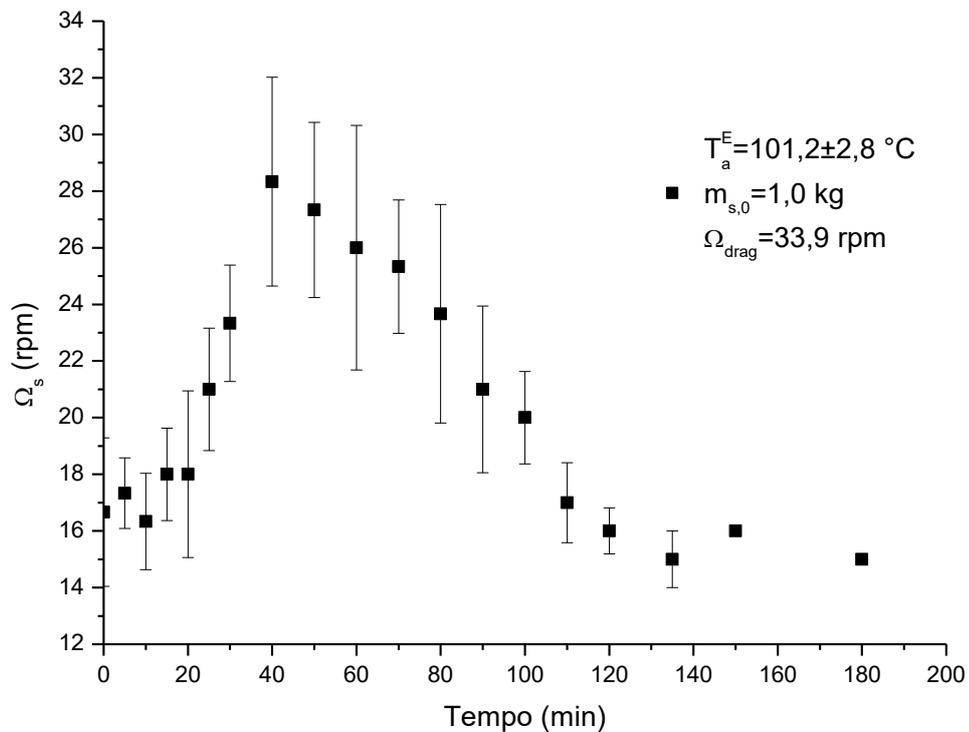
Fonte: Acervo pessoal.

Observou-se que ao se alimentar o secador com ar a maiores temperaturas, as temperaturas alcançadas no interior do recipiente eram mais elevadas tornando a transferência de calor e de massa mais eficiente, indo de encontro a discussão do item anterior. Ao se adicionar uma maior massa inicial de bagaço a ser seco mantendo-se a temperatura do ar de secagem, T_w e T_s alcançaram valores próximos, porém foi necessário um maior tempo de secagem para que tais temperaturas fossem alcançadas. Logo, a adição de uma maior carga de biomassa torna o aquecimento do sistema mais lento evidenciando assim a influência de $m_{s,0}$ sobre a cinética de secagem.

3.3.3 MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS

A frequência de movimentação das partículas no decorrer da secagem para a condição C1 encontra-se representada na Figura 3.26. Ao contrário das temperaturas T_a^E , T_s e T_w e do adimensional de umidade que apresentaram pequenos desvios, a intensidade da movimentação das partículas apresentou desvios relativamente grandes.

Figura 3.26: A movimentação do bagaço em função do tempo de secagem para C1.

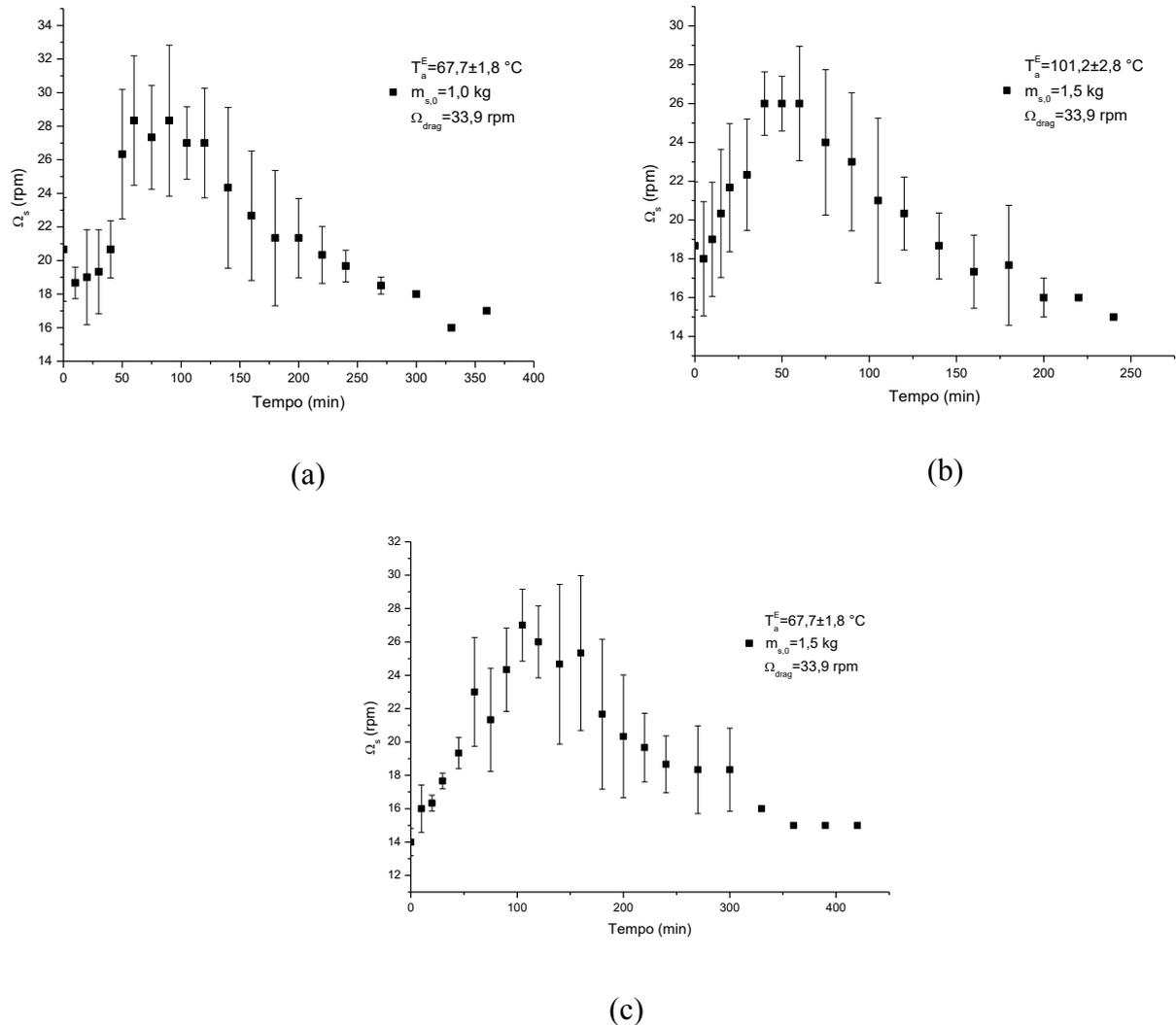


Fonte: Acervo pessoal.

Os desvios para Ω_s foram consideravelmente maiores em comparação com os desvios apresentados para as temperaturas do secador e para a umidade do material, muito em função da dificuldade de se estimar o parâmetro desejado. Como fora utilizado um método visual era necessário que o observador identificasse o marcador adicionado ao leito e que este se movimentasse de forma homogênea, no entanto este veio a apresentar variações de movimento ao longo da amostragem, como permanecer em contato com a parede dificultando a sua movimentação, percorrer a superfície do leito sem atingir a sua região inferior ou movimentar-se em meio ao leito sem que este movimento fosse visível.

No entanto, o perfil apresentado para Ω_s ao longo do tempo também foi observado para as condições C2, C3 e C4, de modo que, apesar dos desvios apresentados, pôde-se observar um padrão de comportamento. A Figura 3.27 apresenta Ω_s em função de t para C2, C3 e C4.

Figura 3.27: Ω_s em função do tempo de secagem para (a) C2, (b) C3 e (c) C4.



Fonte: Acervo pessoal.

Foram observados dois períodos distintos para a intensidade da agitação das partículas ao longo da secagem do bagaço de malte, um período em que o movimento do leito é intensificado até que seu máximo seja alcançado e posteriormente um período em que ocorre a redução de Ω_s com o tempo.

A alteração na forma com que o leito se movimentava no interior do secador foi facilmente percebida. Inicialmente o leito úmido se acumulou na região inferior da drageadeira formando um grande aglomerado cuja movimentação era dificultada. À medida que a água presente na biomassa era removida e a massa total do leito se reduzia, o aglomerado de bagaço rompeu-se iniciando a elevação das partículas pelo arraste dos impelidores e pela adesão destas à parede do secador. Com a elevação de uma maior parcela do leito, o raspador tornou-se

responsável pelo cascadeamento do sólido, observando-se o desprendimento das partículas imediatamente após seu contato com o raspador. A partir da máxima movimentação das partículas ocorreu uma redução na agitação do leito, uma menor parcela deste se elevava e o raspador passou a desempenhar um papel de menor importância. Ao final da secagem as partículas eram elevadas somente pela ação dos impelidores, não sendo observado o contato da biomassa com o raspador ou a adesão de material à superfície interna da drageadeira.

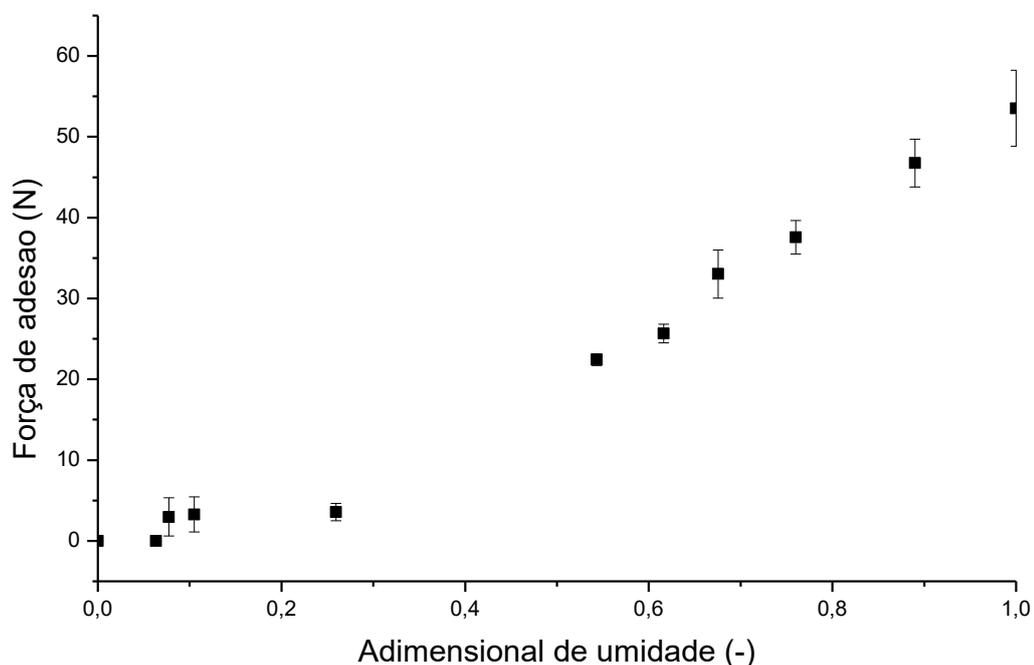
A drageadeira passou por duas modificações em relação a sua estrutura original, a adição do raspador e dos seis impelidores, sendo tais modificações os principais agentes na circulação do leito na etapa inicial e na etapa final, respectivamente.

Por fim, observou-se uma relação entre o tempo de secagem e a movimentação das partículas, porém a relação com outros parâmetros, como a umidade do bagaço e consequentemente as forças de adesão, deve ser também investigada.

3.3.4 FORÇAS DE ADESÃO E A UMIDADE

A variação da força de adesão entre o bagaço de malte e a superfície de cobre em função da umidade da biomassa é mostrada na Figura 3.28. Pode-se observar um aumento na intensidade das forças de adesão conforme se aumenta a umidade do material.

Figura 3.28. Força de adesão em função da umidade do bagaço de malte.



Fonte: Acervo pessoal.

A variação da força de adesão com a umidade do bagaço de malte apresentou um comportamento semelhante a outros materiais. Leite (2002) avaliou a variação da força de adesão para quartzo, silício e mica com a variação das condições ambientais as quais estes materiais eram submetidos, especificamente a umidade relativa do ar, encontrando um comportamento semelhante. No entanto, vale destacar que para o silício, mica e quartzo as forças capilares foram resultantes da condensação da umidade presente no ar, ao contrário do bagaço de malte cuja umidade se encontra no interior das partículas.

A Figura 3.28 fornece informações importantes sobre a interação entre a biomassa e o cobre, material que recobre a superfície do secador utilizado no presente trabalho. Com a remoção completa do conteúdo de água do interior da biomassa, notou-se que as forças de adesão se tornaram praticamente nulas, uma vez que não se pôde realizar a fixação da biomassa ao cobre através da metodologia utilizada. Conforme discutido anteriormente, a força de adesão é a resultante da combinação de três forças distintas, sendo as forças de Van der Waals e eletrostáticas predominantes em materiais secos quando comparadas às forças de capilaridade. A reduzida força de adesão para a biomassa seca foi um forte indício de que as forças de capilaridade predominaram sobre as demais na adesão do bagaço de malte, uma vez que a sua umidade é consideravelmente alta e pela maior intensidade das pontes líquidas em relação às demais forças moleculares (SHERRINGTON e OLIVER, 1981). Com a redução do conteúdo de água na região entre as partículas e a superfície, seja através da remoção do conteúdo de água no interior do sólido (SHERRINGTON e OLIVER, 1981; SCHUBERT, 1981) ou através da diminuição da umidade no ambiente em que o sistema se encontra submetido (LEITE, 2002), as pontes líquidas e, conseqüentemente, as forças de adesão tornam-se menos intensas, como observado para o bagaço de malte.

3.3.5 TEMPERATURAS, MOVIMENTAÇÃO E RELAÇÃO COM A UMIDADE

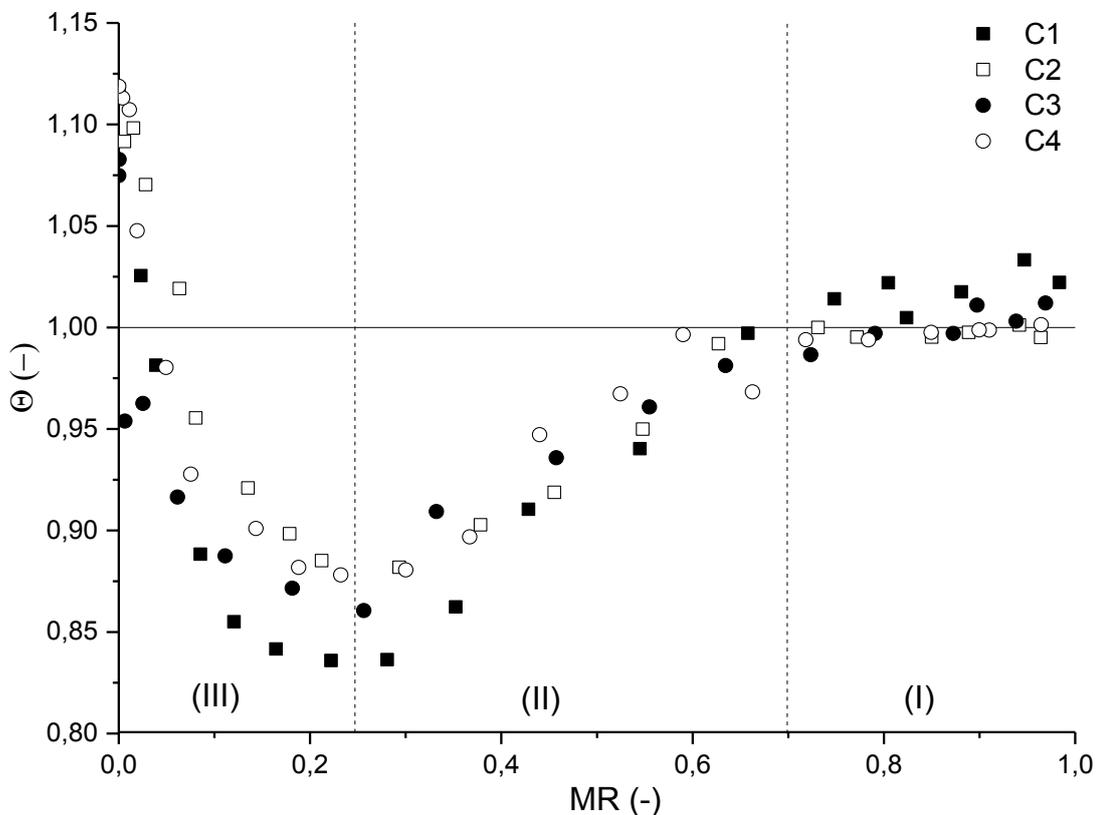
Conforme observado na Figura 3.25, as variações de T_s e T_w apresentaram um padrão bem definido ao longo da secagem, com diferenças nítidas nas temperaturas alcançadas e no tempo decorrido atingir tais temperaturas. Procurou-se então avaliar tanto o perfil de temperaturas quanto a variação na movimentação de sólidos em condições padronizadas.

No item 3.3.1 foi discutida a variação da umidade adimensional ao longo de t , tendo MR apresentado desvios consideravelmente baixos. Logo, uma maneira de se padronizar as análises para T_s e T_w , e também para Ω_s , é considerar suas variações em função do conteúdo de umidade

presente no bagaço, o tempo de secagem varia de 0 a 180 minutos para C1 e de 0 a 420 minutos para C4 enquanto MR varia de 1 a 0 para todas as condições operacionais.

A Figura 3.29 mostra θ em função de MR para as condições operacionais C1 a C4. O adimensional de temperatura permitiu identificar três regiões distintas na secagem, uma região que corresponde ao período inicial da secagem em que T_s e T_w apresentaram valores semelhantes, de modo que $\theta \approx 1$; uma segunda região, que corresponde ao período intermediário da secagem, em que ocorreu um aumento mais acentuado para T_w em comparação a T_s , de modo que $\theta < 1$ até que pôde-se alcançar seu valor mínimo; uma terceira região, que corresponde ao período final da secagem, em que o aumento de T_s foi mais acentuado em relação a T_w , elevando-se assim o valor de θ até que o parâmetro alcançasse o seu valor máximo.

Figura 3.29: Adimensional de temperatura em função da umidade.



Fonte: Acervo pessoal.

Evidenciou-se que, para as condições avaliadas, o perfil de θ apresentou um comportamento bem definido, não sendo observados pontos fora da curva. Os três períodos descritos acima são facilmente identificados, sendo I o período inicial da secagem, seguido pelo período intermediário II e a etapa final da secagem III. O adimensional de temperatura alcançou

um valor mínimo de cerca de 0,85 a uma umidade de aproximadamente 0,25 e um valor máximo, alcançado no término da secagem, de aproximadamente 1,10. De certo modo, para a metodologia utilizada, pode-se estimar a umidade do bagaço presente no interior da drageadeira através das medidas de T_w e T_s .

O comportamento observado para a variação do adimensional de temperatura com a umidade foi determinado por fenômenos distintos ao longo da secagem. No período inicial de secagem pode-se observar um equilíbrio entre as temperaturas da superfície e do sólido que não ocorreu no período intermediário e final da secagem, indicando uma intensa transferência de calor entre as fases sólidas. Conforme discutido anteriormente, a presença de água no interior do material promoveu, devido à capilaridade, a formação de uma área preenchida por líquido ao redor da região de contato entre os sólidos (FEILER, 2007). Deste modo, a transferência de calor entre as fases sólidas no início da secagem não ocorreu somente na região em que há o contato direto, mas também nesta região próxima, promovendo uma transferência de calor indireta através da água que preenche as fases. Com a redução da umidade no material ocorre uma diminuição na área ocupada pelo líquido sobre a superfície (LEITE, 2002), logo, a transferência de calor nesta região perdeu sua eficiência com o decorrer da secagem.

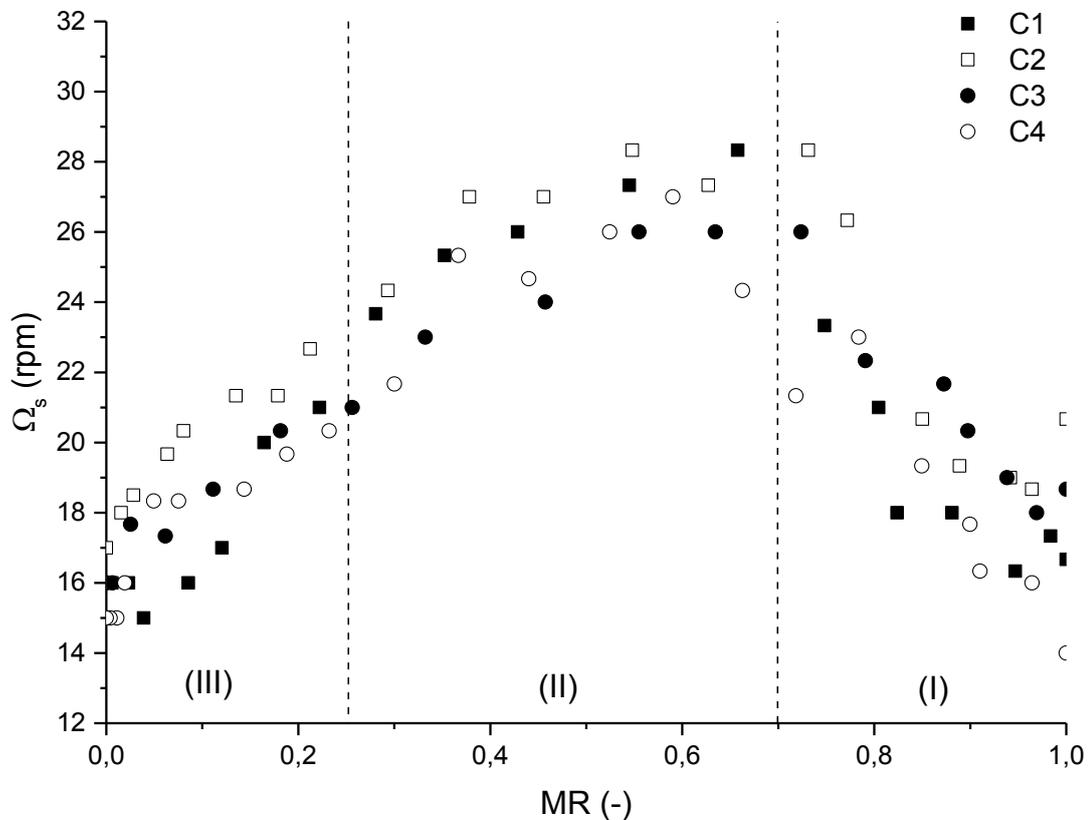
O comportamento observado para os períodos intermediário e final da secagem ocorreu por outros fatores, especialmente a demanda energética para a transferência de água presente no bagaço para o ar circulante através do processo de vaporização. Com a diminuição no conteúdo de água, a transferência de calor entre a biomassa e a superfície tornou-se menos eficiente, o que fez com que as temperaturas na superfície e no bagaço apresentassem valores diferentes entre si nos períodos II e III.

A energia fornecida ao sistema foi preservada ao longo de toda a secagem, uma vez que a velocidade do ar alimentada pelo soprador permaneceu constante ao longo de toda a secagem, enquanto a temperatura apresentou uma variação pouco significativa, conforme evidenciado anteriormente, sendo esta energia utilizada para o aquecimento da superfície da drageadeira, aquecimento da biomassa e evaporação da água. No período II ocorreu a redução do valor do adimensional de umidade, uma vez que o aquecimento do bagaço foi menos intenso se comparado ao aquecimento da superfície do secador. Nesta etapa, houve uma grande demanda de energia na forma de calor latente para que ocorresse a passagem da água presente no sólido para a fase gasosa, assim uma pequena parte da energia fornecida pelo soprador foi utilizada para elevar a temperatura do sólido. Para o período III, à medida que a taxa de secagem

diminuiu, conforme evidenciado através dos dados coletados anteriormente, e conseqüentemente a demanda por energia para a remoção de água, uma maior quantidade de energia era disponibilizada para o bagaço na forma de calor sensível, intensificando a elevação de T_s . Deste modo, observou-se o aumento de θ e a diminuição de Ω_s no período III.

A Figura 3.30 mostra os valores médios para intensidade da movimentação das partículas em função da umidade do bagaço, nesta estão representados os três períodos de secagem descritos acima, I, II e III. Assim como para o adimensional de umidade, observou-se que a variação da média das medidas da movimentação de sólido apresentou um bom comportamento, sem a presença de desvios significativos em relação à curva. Notou-se que, o período inicial da secagem, I, coincidiu com o período em que a agitação das partículas foi crescente enquanto os períodos II e III coincidiram com a redução do movimento do leito.

Figura 3.30: Movimentação do leito em função da umidade.



Fonte: Acervo pessoal.

Assim como a transferência de calor entre a superfície e a biomassa, a sua movimentação também possui relação com as forças de adesão. No início da secagem, a adesão do bagaço de malte sobre a superfície de cobre foi mais intensa, conforme evidenciado através da Figura 3.30.

No entanto, o peso do leito em função da presença de uma grande quantidade de água no interior das partículas dificultou o arraste, uma vez que a força gravitacional atua em sentido oposto à adesão nas regiões superiores do secador. Ao longo da secagem ocorreram tanto a redução o peso do leito, através da remoção de água pelo processo de secagem, quanto da força de adesão, através da diminuição do efeito de capilaridade. No entanto, a redução da umidade possuiu um efeito mais intenso se comparado à redução da força de adesão no início da secagem, o que intensificou o arraste da biomassa no período inicial da secagem até que se alcançasse a máxima mistura.

A partir da máxima movimentação do bagaço, quando este era aderido à superfície da drageadeira e arrastado até a região superior do secador onde era despreendido pela ação mecânica do raspador, ocorreu uma redução na mistura, uma vez que a adesão com a parede da drageadeira alcançou um valor mínimo, sendo a mistura realizada principalmente pela ação mecânica dos “impelidores”.

3.4. CONCLUSÕES

As forças de adesão e de coesão, visivelmente, influenciaram significativamente o movimento das partículas no interior do secador, tendo apresentado uma forte interação entre si e com a superfície do equipamento no início da secagem e uma fraca interação ao término da secagem. Foi observado, através de dados experimentais, que as forças de adesão apresentam uma clara dependência da composição do material, tendo sua intensidade reduzida com a remoção de água durante a secagem, tendo o seu valor máximo de 50 N reduzido até uma força de adesão praticamente nula quando o material se encontra seco. Para materiais higroscópicos com elevada umidade, as forças de capilaridade predominam sobre as demais forças no processo de adesão e a remoção de água reduz o efeito da capilaridade. Devido à intensa adesão sobre a superfície do secador, para viabilizar a operação, fez-se necessária a modificação da estrutura do secador para que houvesse o despreendimento do material aderido à superfície no início da secagem e para promover a circulação e cascadeamento das partículas ao término desta.

A circulação das partículas no interior do secador permitiu a obtenção de um produto com características uniformes, evidenciada pelo pequeno desvio nos valores do adimensional de umidade. A cinética de secagem apresentou um comportamento característico de materiais não higroscópicos, sendo a transferência de calor e massa regida pelos mecanismos internos,

conforme evidenciado pela curva experimental da taxa de secagem em função da umidade da biomassa, que apresentou somente um período inicial de estabilização e o período decrescente.

Inicialmente, quando as forças capilares possuíam maior intensidade e o leito apresentava uma maior massa, ocorreu a formação de um aglomerado com baixa movimentação, que se intensificava com a redução da massa do leito até alcançar a máxima movimentação do sólido, neste período pôde-se observar uma elevação na intensidade de movimentação de aproximadamente 16 rpm para cerca de 26 rpm. A partir deste ponto, a remoção de água do leito reduzia as forças de adesão e, conseqüentemente, a movimentação das partículas até que a circulação atingisse seu mínimo e fosse realizada somente pela ação mecânica dos misturadores, observou-se a redução da intensidade circulação das partículas até que alcançasse novamente valores de aproximadamente 16 rpm.

A adesão do material também influenciou significativamente o perfil de temperaturas no secador. No período inicial, com o maior efeito das forças de capilaridade, o contato entre a biomassa e a superfície da panela rotatória apresentou uma alta eficiência devido à formação de uma área preenchida por líquido ao redor da região de contato, fazendo com que estes se encontrassem em equilíbrio térmico. Com a remoção de água, o contato do sólido com a parede da drageadeira perdia a eficiência, fazendo com que a temperatura do sólido e da superfície do secador fossem diferentes. Logo após a máxima circulação de sólidos observou-se que a taxa de secagem apresentava valores elevados, implicando em uma grande demanda energética para a transferência de água do sólido para a corrente gasosa, logo a elevação da temperatura do bagaço foi menos intensa em comparação ao aquecimento da superfície interna do secador. Com a diminuição da taxa de secagem e, conseqüentemente, da energia requerida para a remoção de água, a biomassa era aquecida mais rapidamente, fazendo com que esta apresentasse maiores temperaturas em relação à superfície do secador ao fim da secagem.

Nas condições avaliadas, a temperatura do ar de secagem apresentou influência significativa sobre a secagem do bagaço de malte em drageadeira. Com o fornecimento de ar mais quente o secador alcançou maiores temperaturas, tendo a sua superfície apresentado uma temperatura máxima de 43 °C para a maior temperatura do ar de secagem e 60 °C para a menor temperatura do ar, o mesmo se aplica para as temperaturas do sólido, 46 e 65 °C respectivamente. Com o secador operando a maiores temperaturas a transferência de calor e de massa foi favorecida.

A massa de bagaço adicionada ao secador também apresentou uma influência significativa sobre o processo. Com uma carga maior de material, mantendo-se o fornecimento de energia, o aquecimento do secador ocorria mais lentamente, implicando em uma menor eficiência da secagem. A alimentação de 1,5 kg de bagaço no secador mantendo-se a temperatura do ar na saída do soprador em 67,7 °C provocou um aumento no tempo necessário para que o bagaço alcançasse a sua umidade de equilíbrio dinâmico, de 360 para 420 minutos. A modificação na frequência de rotação da drageadeira, ao contrário dos demais parâmetros avaliados, não apresentou um impacto significativo.

Como a secagem do bagaço de malte em drageadeira associada a um soprador mostrou-se viável operacionalmente com as modificações utilizadas, espera-se que a sua secagem em secadores convectivos do tipo tambor rotativo também seja viável, sendo posteriormente necessária a avaliação detalhada desta operação.

CAPÍTULO 4 - SECAGEM DE LEVEDURA RESIDUAL EM LEITO VIBROFLUIDIZADO

4.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1.1 LEITO VIBROFLUIDIZADO

4.1.1.1 Visão geral

A fluidização é uma técnica utilizada em diversos processos industriais como na adsorção, secagem de materiais sólidos, combustão e incineração, reações catalíticas, entre outros. A fluidização ocorre pela passagem de um fluido, seja ele gás ou líquido, por um leito de partículas sólidas a uma velocidade suficiente para que ocorra a suspensão das partículas, mas que não seja intensa a ponto de promover o arraste das partículas. A suspensão das partículas faz com que o leito apresente um comportamento semelhante a um líquido t mais homogêneo em comparação aos sistemas com leito fixo (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

O leito fluidizado é utilizado em uma série de processos industriais, devido à intensa transferência de calor e de massa, adequação para grandes escalas, boa mistura do leito pela constante movimentação das partículas, economia de espaço físico por ser um equipamento vertical e pelos reduzidos custos de manutenção (STRUMILLO e KUDRA, 1986; KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Apesar dos diversos pontos positivos, a utilização do leito fluidizado como secador apresenta algumas limitações que foram contornadas com a modificação do leito fluidizado convencional, adicionando-se energia vibracional ao sistema, promovendo uma melhoria no contato entre o fluido e o leito de partículas. Com essa modificação do sistema, tornou-se viável a realização da secagem de pastas neste equipamento, além de possibilitar a fluidização de partículas com dimensões reduzidas e minimizar a formação de bolhas e caminhos preferenciais para a passagem de ar (GUPTA e MUJUMDAR, 1980).

A energia vibracional pode ser adicionada ao sistema de formas distintas, de acordo com as necessidades do processo, através dos vibradores, que são dispositivos que se encontram ligados à câmara do leito. O vibrador mais utilizado para esta aplicação é o vibrador excêntrico, que é responsável pela movimentação vertical de toda a câmara de secagem através de um movimento senoidal com amplitude e frequência previamente definidos, porém também pode ser utilizada a magnetização do material inerte, a pulsação do gás no interior da câmara ou até

mesmo pela formação de diferentes polos magnéticos no interior da câmara pela passagem de uma corrente elétrica (FINZER e KIECKBUSCH, 1992; ÉRDESZ et al, 1986).

Embora o leito vibrofluidizado possua diversas aplicações e aspectos positivos do ponto de vista operacional, ainda são encontradas algumas limitações, como a dificuldade de leitura das variáveis do processo devido ao constante movimento do sistema, o desgaste excessivo das partes móveis, o excesso de choques entre os inertes, que pode modificar a estrutura destes e, conseqüentemente, provocar a instabilidade do leito (GUPTA e MUJUMDAR, 1980). A energia vibracional adicionada ao sistema também é um fator limitante para a operação do leito vibrofluidizado, conforme evidenciado no trabalho de MUSHTAEV et al (1972) que observaram a alteração no movimento das partículas no interior do leito para adimensionais de vibração superiores a 4.

O adimensional de vibração é um número que foi inicialmente proposto por CHLENOV e MIKAHAILOV (1965) para quantificar a energia vibracional adicionada ao leito, envolvendo a frequência, f , e a amplitude, A , com que o leito se movimenta verticalmente. O adimensional de vibração, Γ , relaciona a força inercial e a força gravitacional, sendo calculado pela equação:

$$\Gamma = \frac{A(2\pi f)^2}{g} \quad (4.1)$$

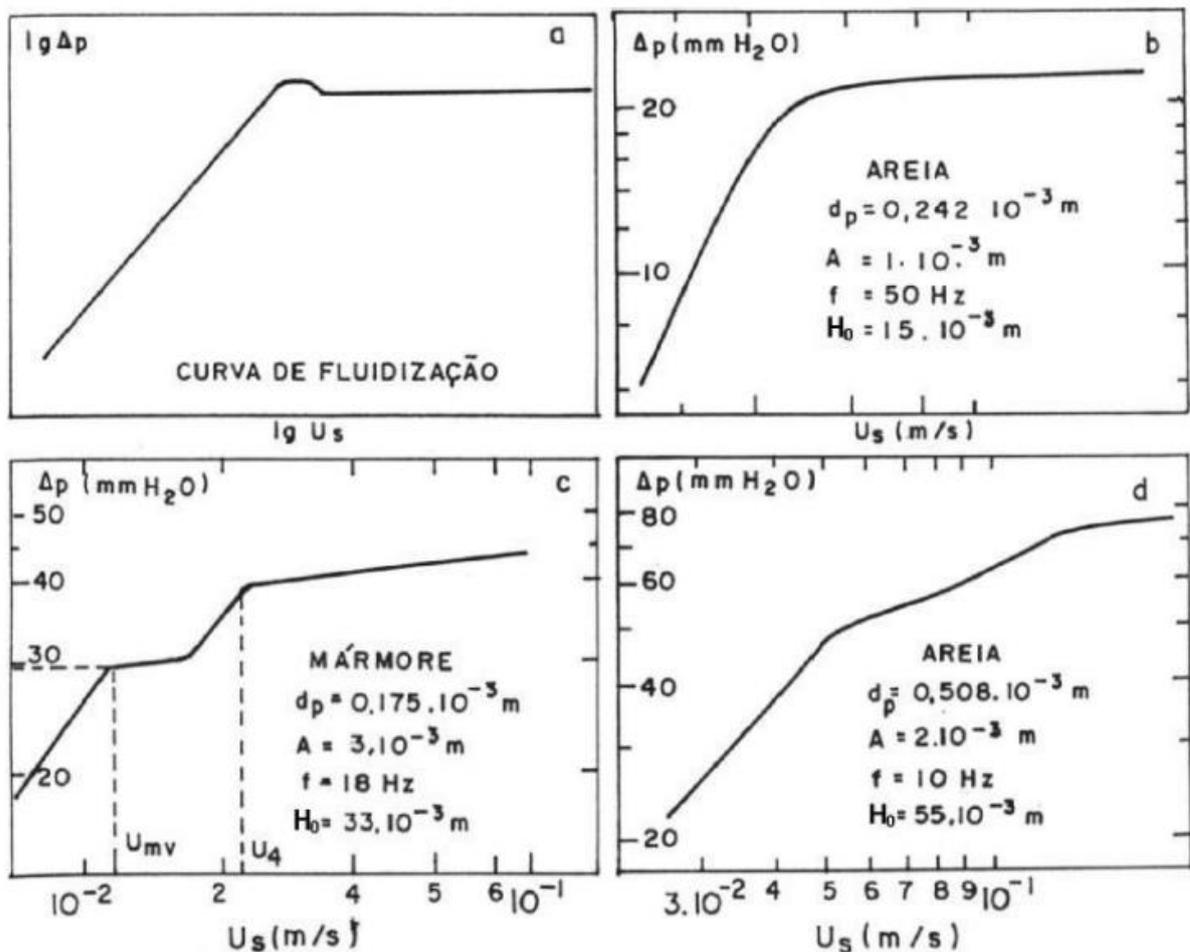
O adimensional de vibração é um parâmetro relevante na caracterização do leito vibrofluidizado, sendo utilizado para descrever a agitação do leito, como nos trabalhos de ERDÉSZ e ORMOS (1983) e ERDÉSZ et al (1986). No entanto foi evidenciado que para um mesmo valor de Γ existem diversas combinações para a amplitude e frequência, e cada uma destas combinações afeta a operação de maneiras distintas. DALEFFE et al (2008) avaliaram a curva característica do leito vibrofluidizado de esferas de vidro com duas configurações diferentes, com diâmetros uniformes e misturas de partículas com diâmetros distintos no leito. Fixando o valor do adimensional de vibração e variando A e f , os autores observaram diferenças na operação do leito quanto à segregação das partículas, sendo a segregação observada para menores amplitudes.

4.1.1.2 Fluidodinâmica do leito vibrofluidizado

A curva característica de leitos móveis corresponde à curva da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do fluido e é utilizada para avaliar a interação entre o fluido circulante e o material particulado (COSTA, 2017). As curvas características para leitos móveis com a aplicação de energia vibracional são avaliadas de maneira análoga às dos leitos

fluidizados convencionais. A avaliação da curva característica do leito vibrofluidizado foi proposta pela primeira vez no trabalho de BRATU e JINESCU (1969), sendo detalhada somente anos depois, através do trabalho de STRUMILLO e PAKOWSKI (1980), que identificaram quatro possíveis comportamentos para a curva característica dos leitos vibrofluidizado representados na Figura 4.1.

Figura 4.1: Curvas características para leitos móveis.



Fonte: STRUMILLO e PAKOWSKI (1980).

A curva fluidodinâmica de um leito fluidizado convencional, sem a aplicação de energia vibracional, é representada pela curva "a", com um pico característico na transição entre as condições de leito fixo e de leito fluidizado, onde se observa com grande facilidade a velocidade de mínima fluidização. O leito vibrofluidizado apresenta este comportamento quando a ação vibracional imposta é inferior à gravitacional ou, em outras palavras, quando $\Gamma < 1$. O pico observado em "a" é atenuado quando se impõe uma vibração muito superior à ação

gravitacional, o que faz com que o leito vibrofluidizado apresente uma curva característica similar à apresentada em “b”.

As curvas “c” e “d” representam comportamento observado para agitações intermediárias. Para estas curvas, ao contrário das curvas “a” e “b”, evidencia-se a presença de dois pontos de inflexão distintos. O primeiro ponto de inflexão da curva “c” corresponde à condição em que a vibração do leito é responsável pelo início da movimentação das partículas, uma vez que a velocidade superficial do ar não é suficiente para que este promova a movimentação das partículas. Para esta primeira inflexão, tem-se a chamada velocidade de mínima mistura, u_{mm} . No segundo ponto de inflexão a velocidade superficial do fluido é suficiente para sustentar o leito particulado, a velocidade neste ponto é denominada velocidade de mínima fluidização, u_{mf} . A curva “d” apresenta um comportamento semelhante, embora a transição entre as regiões distintas não ocorra de maneira bem definida como nas curvas “a” ou “c”. Para as curvas “a” e “c” ocorre uma melhor identificação das velocidades de transição dos leitos, a velocidade de mínima fluidização para ambas as curvas e a velocidade mínima mistura para a curva “a”. Na curva “d”, assim como para a curva “b”, a transição acontece em uma faixa de velocidades, isto se deve a uma menor intensidade de agitação em comparação aos leitos que apresentam uma curva característica semelhante à “c”.

A classificação do comportamento do leito diverge entre os principais autores. De acordo com STRUMILLO e PAKOWSKI (1980), para qualquer adimensional de vibração aplicado sobre o leito, este deve apresentar duas classificações, vibrofluidizado quando a velocidade superficial do fluido é inferior à velocidade de mínima fluidização e fluidizado vibrado para velocidades inferiores à condição de mínima fluidização. BRATU e JINESCU (1971) propuseram uma classificação que leva em conta o adimensional de vibração e não a curva característica, classificando o leito vibrado quando $\Gamma < 1$, leito vibrofluidizado quando $\Gamma \approx 1$ e leito fluidizado vibrado para $\Gamma > 1$. No entanto, para o presente trabalho será adotada a classificação proposta por DALEFFE (2005) que adotou duas classificações distintas, leito vibrado quando é utilizada energia vibracional sem a passagem de uma corrente fluida, e leito vibrofluidizado quando a energia vibracional é aliada ao escoamento de fluidos através do material particulado, para qualquer valor de Γ .

Além do adimensional de vibração, outros parâmetros influenciam a fluidodinâmica do leito vibrofluidizado, como a altura do leito de partículas e o tipo de material utilizado no leito. BRATU e JINESCU (1971) observaram uma menor queda de pressão, Δp , na região de

fluidização ao aumentar o diâmetro da partícula no leito vibrofluidizado operando com mármore, poliestireno e sílica-gel. No trabalho de ERDÉSZ et al (1986), evidenciou-se que a intensidade da vibração afeta diretamente a velocidade de mínima fluidização do leito, sendo observada uma menor u_{mf} para maiores valores de Γ . Os autores também observaram a alteração na porosidade do leito ao modificar Γ em um leito de areia, poliestireno, açúcar e sal. CAMARGO (1998) avaliou a fluidodinâmica de um leito de esferas de vidro variando a altura do leito, o diâmetro das partículas e a amplitude da vibração sendo observado um aumento em u_{mf} para maiores partículas e uma maior Δp para leitos com maiores alturas. JINESCU et al (2000) estudaram o comportamento de um leito de persulfato de potássio variando A e f , sem se fixar o valor de Γ , e H/D , a razão entre a altura e o diâmetro do leito, também foi uma variável analisada, constatando um aumento em Δp e u_{mf} para maiores H/D . De acordo com OLIVEIRA JUNIOR (2003) o aumento em Δp para maiores valores de H/D também foi observado em leito de alumina e sílica gel, independente de Γ , que variou Γ de 0 a 1,5.

Conforme discutido anteriormente na seção “2.2. A Levedura Residual”, as propriedades físicas da levedura residual não permitiriam a secagem deste coproduto da indústria cervejeira na forma de pellets, prática bastante comum na secagem de outros tipos de fermento, fazendo-se necessária a realização da sua secagem ainda na forma de pasta. Ficou evidente que a adição da energia vibracional facilitou a secagem de materiais pastosos em secadores do tipo leito vibrofluidizado, em comparação aos secadores do tipo leito fluidizado. A secagem da levedura residual já foi avaliada em leito fluidizado, porém ainda não foi realizada em seu concorrente com vibração. Antes de avaliar este processo e a sua viabilidade operacional, se faz necessário compreender a secagem de materiais pastosos em leitos móveis, especialmente quanto aos mecanismos envolvidos no processo e as suas possíveis limitações.

4.1.2 SECAGEM DE PASTAS EM LEITOS MÓVEIS

De acordo com WELTMAN (1960), as pastas são definidas como um material líquido no qual partículas coloidais ou microscópicas se encontram distribuídas em uma grande porção de água. Existe uma série de secadores recomendados para promover a remoção da água presente nas pastas, como spray-dryer (YOUSSEFI, 2009) e leitos móveis com partículas inertes. Na secagem de pastas em leitos móveis os inertes funcionam como suporte para a pasta, além de serem uma fonte adicional de energia, auxiliando a transferência de calor e de massa (MUJUMDAR, 2006; FREIRE et al, 2012). A adição de energia vibracional facilitou a secagem de pastas em leitos móveis, no entanto foram adicionadas variáveis a este processo, além da

temperatura e vazão de ar e da vazão de pasta, deixando o sistema ainda mais complexo (MUJUMDAR, 2006).

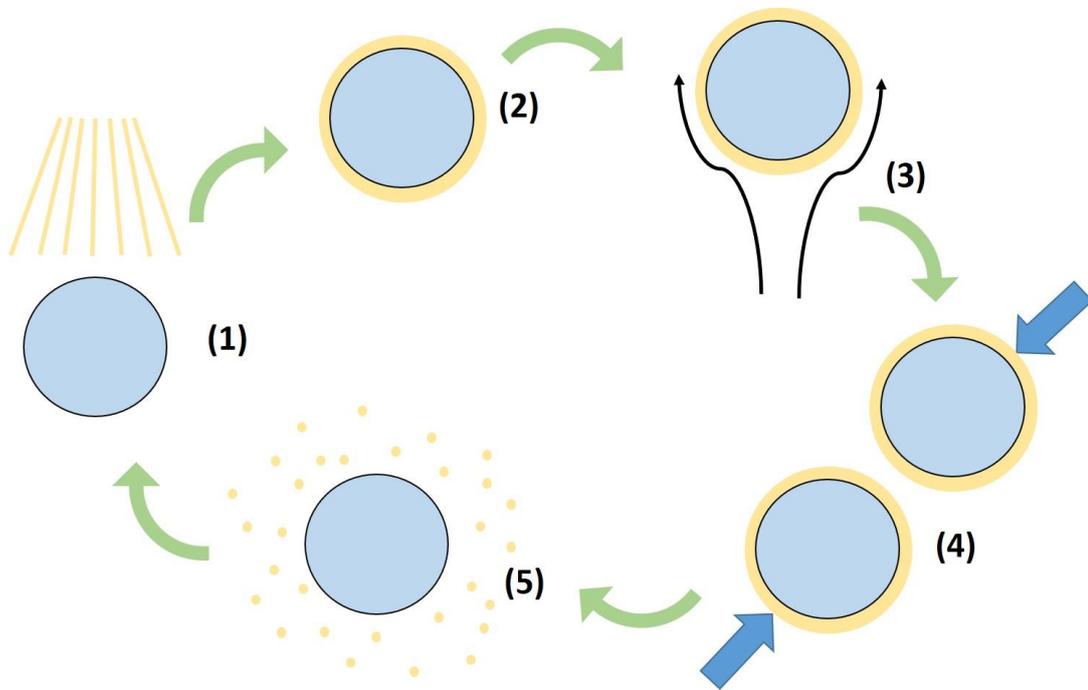
A secagem de pastas em leitos móveis ocorre de maneira cíclica a partir do momento em que a pasta é alimentada ao sistema, conforme ilustrado na Figura 4.2. Inicialmente, o leito é constituído somente pelas partículas inertes até que se inicia a alimentação da pasta, como as partículas encontram-se em constante movimento ocorre o contato entre estas e a pasta (1). Devido à forte interação entre o líquido e o material particulado, a pasta adere-se à superfície do inerte, recobrando-o completamente com um filme líquido (2). O ar de secagem circula ao redor das partículas revestidas com o filme líquido, transferindo calor e massa entre as fases (3). A movimentação das partículas faz com que estas se choquem constantemente umas com as outras ou com a parede da câmara de secagem (4), caso a umidade seja suficientemente pequena, a atrição entre as partículas provoca o rompimento do filme, liberando o pó que é arrastado pela corrente de ar (5). O material arrastado pelo ar é então coletado através de um ciclone ou outro equipamento adequado. Após o rompimento do filme, a partícula de inerte encontra-se novamente com a sua superfície livre e disponível para que a pasta seja novamente aderida, fechando-se assim o ciclo (FREIRE et al, 2012).

Para que a secagem ocorra satisfatoriamente é importante que não haja limitações no processo. Duas das cinco etapas descritas acima controlam o processo de secagem de pastas em leitos móveis, a remoção de água presente no filme e o desprendimento do pó seco. Caso a evaporação de água seja insuficiente ocorre o acúmulo de material no interior do leito, provocando alterações na fluidodinâmica do leito e impossibilitando a operação do mesmo. O desprendimento do filme também deve ocorrer em taxas adequadas, a não liberação de pó faz com que a espessura do filme aumente ao longo da secagem, sem que a formação do produto desejado. Para tanto, as colisões entre as partículas e entre as partículas e as paredes do secador devem ser suficientes para realizar o desprendimento de material (FREIRE et al, 2011). Existem diversos fatores que influenciam o desprendimento de material seco, entre eles a razão entre a massa de inertes e a alimentação de pasta, a vibração do leito, a altura do leito estático e a velocidade do ar de secagem (DALEFFE, 2002).

Além da interação entre as partículas e o ar de secagem, a interação entre a pasta e a superfície do inerte exerce um papel crucial na operação do secador, esta interação é fortemente dependente da força de adesão entre a superfície das partículas e a pasta. As forças de adesão influenciam as etapas de formação do revestimento do inerte (2) e de desprendimento do

material seco (5). De acordo com FREIRE et al (2011), as forças de adesão são bastante complexas, uma vez que a ligação pasta-inerte ocorre em nível molecular, abrangendo interações químicas, mecânicas e moleculares, além de ser altamente dependente das propriedades físicas do inerte e da composição da pasta.

Figura 4.2: Etapas da secagem de pastas em leitos móveis.



Fonte: Acervo pessoal.

Segundo COSTA (2017), são encontrados poucos trabalhos na literatura com foco na secagem de pastas em leito vibrofluidizado, sendo este equipamento comumente utilizado na secagem de materiais granulares, mas ainda assim existem trabalhos que avaliam a influência da presença da pasta sobre a operação do leito vibrofluidizado. CHEVILENKO et al (1979) avaliaram a evaporação de água em leito vibrofluidizado com foco na fluidodinâmica do secador, observando o aumento da velocidade de mínima fluidização em leitos com uma maior alimentação de água. A amplitude da vibração aplicada ao leito também foi avaliada pelos autores, observando uma elevação em u_{mf} para maiores amplitudes. NOVY e KIECKBUSCH (1988) avaliaram a influência da concentração de sólidos na pasta, diâmetro do inerte e temperatura do ar sobre a secagem de leite em pó reconstituído em um leito de esferas de vidro, observando uma forte influência do diâmetro do inerte sobre a transferência de calor e de massa no leito.

Outros autores avaliaram o emprego da energia de vibração como uma forma de promover a secagem de materiais pastosos que não se adequam aos leitos convencionais. MALHOTRA et al (1984) avaliaram a fluidização de um leito vibrofluidizado retangular alimentado com glicerol, sendo observada uma relação entre a saturação do leito e a fluidização das partículas. Segundo os autores, a fluidização de um leito com grau de saturação inferior a 0,0216 foi possível mesmo sem a aplicação de energia vibracional, no entanto, a fluidização de leitos com grau de saturação superiores só foi possível mediante a aplicação de intensa agitação. Segundo MORIS (2002) foi difícil realizar a secagem de ácido adípico em leito fluidizado convencional. O autor aplicou vibração ao leito, e observou uma redução na formação de bolhas em relação ao leito convencional e um aumento significativo na circulação de partículas e, conseqüentemente, uma melhor qualidade para o produto seco.

O Centro de Secagem de Pastas e Sementes do DEQ/UFSCar também possui experiência na secagem de pastas em leito vibrofluidizado. MEILI (2009) realizou a secagem de três pastas diferentes, lodo de esgoto, leite desnatado e carbonato de cálcio a três diferentes concentrações, em leito vibrofluidizado com partículas de vidro. Segundo o autor, a utilização da vibração associada à circulação de ar no leito favoreceu a fluidização e a secagem de materiais com difícil fluidização. O adimensional de vibração não pôde ser adotado por si só para caracterizar a vibração, tendo o autor observado diferenças na taxa de produção de pó e sua umidade, fluidodinâmica do leito e umidade do ar na exaustão para variações na combinação de amplitude e frequência mantendo-se Γ constante. A velocidade e a temperatura do ar de secagem tiveram influência direta sobre o tempo necessário para que se alcançasse o regime permanente, sendo este menor para velocidade e temperaturas maiores. A utilização de vibração também promoveu a redução no tempo necessário para alcançar o regime permanente, que foi menor para maiores amplitudes e menores frequências de vibração. O autor observou uma tendência de aumento na taxa de produção de pó ao alimentar o leito com uma maior quantidade de pasta, sendo observado um comportamento decrescente para a taxa de produção de pó no decorrer da secagem.

COSTA (2017) realizou a secagem de leite desnatado em leito com esferas de vidro com três diâmetros distintos, variando também A , 0,003 ou 0,015 m, e f , 100 a 1100 rpm. Segundo a autora, a variação no diâmetro do inerte não influencia a queda de pressão alcançada pelo leito, sendo observada somente uma variação na velocidade de mínima fluidização. Constatou que o aumento na temperatura e na velocidade do ar de secagem, desde que o diâmetro do inerte

seja mantido, permite uma maior alimentação de pasta. Segundo a autora, o potencial evaporativo do leito é influenciado pelo diâmetro das esferas de vidro, apresentando-se um maior potencial para menores diâmetros, porém uma taxa de evaporação alta não garante uma taxa de produção de pó alta, conforme observou ao avaliar a secagem utilizando inerte com diâmetro igual a 0,00119 m, condição que não permitiu a retenção de pó no ciclone. A amplitude de vibração apresentou influência significativa sobre a taxa de produção de pó, sendo superior para o maior A adotado por proporcionar um maior deslocamento das partículas no interior da câmara de secagem.

Fica evidente que diversos autores têm avaliado inúmeras aplicações para o leito vibrofluidizado, estudando a influência da presença de pasta e de suas características sobre a fluidodinâmica do leito e também sobre o próprio processo de secagem, além de outros trabalhos que avaliam a influência das características da própria pasta sobre o processo. No entanto, não foram encontrados na literatura trabalhos sobre a secagem de levedura residual em leito vibrofluidizado, e os impactos da presença da levedura residual sobre a operação do leito e, principalmente sobre a qualidade do produto obtido na secagem, são desconhecidos. O mesmo vale para a taxa de produção e de acúmulo de pó no interior do leito. Tais informações são extremamente importantes, uma vez que a qualidade do produto limita a sua destinação, enquanto as taxas de produção e de acúmulo de pó, além do comportamento fluidodinâmico do leito, são responsáveis por viabilizar o processo operacionalmente e economicamente.

Deste modo, o presente trabalho tem o objetivo de analisar a secagem da levedura residual em leito vibrofluidizado, variando-se a temperatura do ar de secagem, a massa de inertes e a velocidade superficial do ar, observando a influência destes parâmetros sobre a taxa de produção de pó seco e de acúmulo de material no leito, além da umidade e atividade celular do material produzido. A queda de pressão ao longo da secagem também é avaliada para observar a influência da presença da pasta sobre a operação do leito.

4.2. MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1. OBTENÇÃO E ARMAZENAMENTO DE LEVEDURA RESIDUAL

A levedura residual cervejeira foi obtida de um pequeno produtor localizado no município de São Carlos/SP. O resíduo foi retirado do processo da produção de uma cerveja do tipo Weiss logo após a etapa de fermentação. A Figura 4.3 apresenta a levedura residual utilizada no presente trabalho. Pôde-se observar a formação de três regiões distintas, um sedimentado

altamente rico em células, uma fase clarificada e a espuma formada pela produção de gás carbônico durante a fermentação, fazendo-se necessária a constante agitação do material para manter sua uniformidade.

Figura 4.3: Levedura residual cervejeira utilizada no presente trabalho.



Fonte: Acervo pessoal.

O resíduo foi caracterizado quanto a sua umidade pelo método gravimétrico e posteriormente mantido sob refrigeração constante a temperaturas inferiores a 3 °C. Durante a refrigeração, as leveduras tiveram a sua atividade celular reduzida sem que ocorresse sua inativação permanente, preservando as características do produto próximas às originais.

4.2.2. OBTENÇÃO DAS PARTÍCULAS INERTES

Conforme discutido anteriormente, as características da partícula afetam a operação do leito, a composição do inerte e de sua superfície influenciam diretamente a interação sólido-filme devido às interações a nível molecular, além da geometria da partícula afetar a velocidade de mínima fluidização do leito, a capacidade de evaporação do leito e a taxa de produção alcançada (FREIRE et al, 2011; COSTA, 2017). Faz-se necessário então padronizar tanto a

geometria quanto a composição das partículas inertes, minimizando os efeitos da distribuição do tamanho destas sobre a operação do secador.

Esferas de vidro de um mesmo lote disponível no Centro de Secagem de Pastas e Sementes foram selecionadas como inerte a ser utilizado nos ensaios de secagem de levedura residual. Para padronizar as dimensões das esferas, o lote foi submetido a um processo de peneiramento, o material retido em peneira com abertura de 7 mesh foi usado nos ensaios. Logo, as partículas utilizadas como suporte para a secagem possuíam um diâmetro médio de 3,19 mm. As esferas de vidro selecionadas são mostradas na Figura 4.4.

Figura 4.4: Esferas de vidro utilizadas como inerte na secagem de levedura residual.

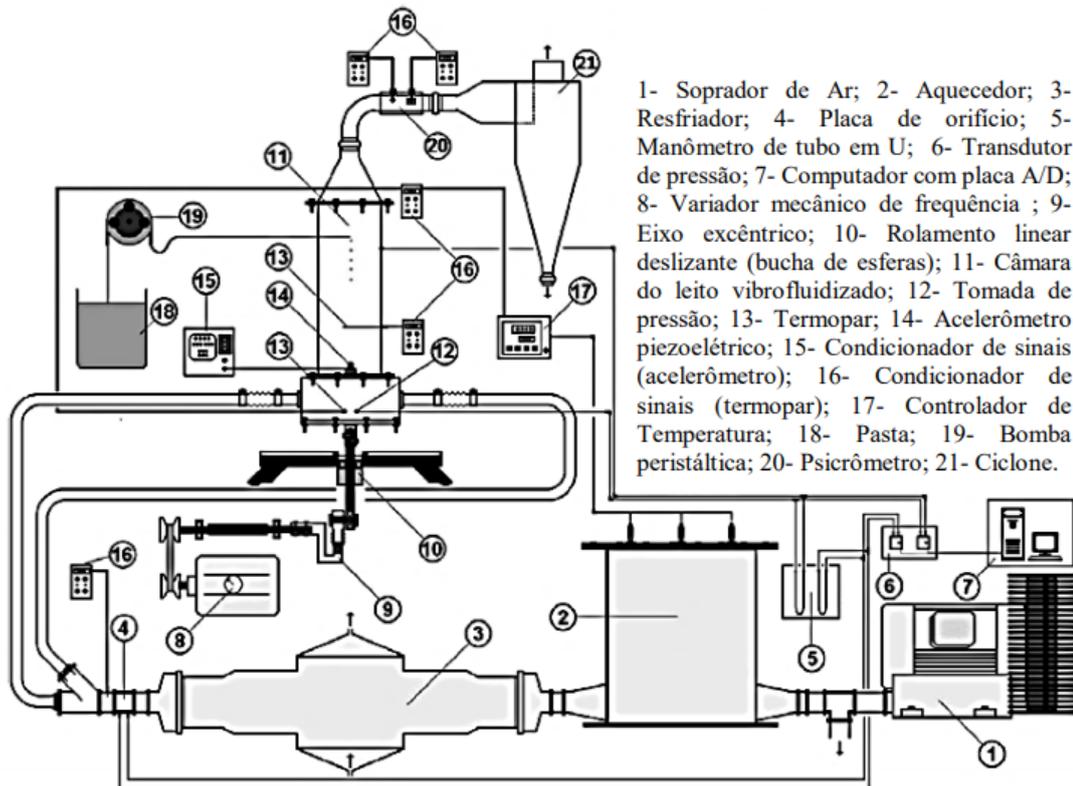


Fonte: Acervo pessoal.

4.2.3. UNIDADE EXPERIMENTAL

O secador do tipo leito vibrofluidizado utilizado no presente trabalho encontra-se instalado no Centro de Secagem de Pastas e Sementes do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos. Trata-se de um secador com câmara cilíndrica associada a um vibrador excêntrico, conforme ilustrado através da Figura 3.5, que mostra uma ilustração esquemática do sistema.

Figura 4.5: Esquema do secador do tipo leito vibrofluidizado.



Fonte: ROCHA (2019).

Para o sistema utilizado, teve-se o fornecimento de ar de secagem por um soprador (1) marca IBRAM, que possui uma potência nominal de 4 CV. Após a saída do soprador, o ar circulava através de uma válvula do tipo by-pass, que permite ajustar a vazão de ar que alimenta efetivamente a câmara de secagem. Posteriormente, o ar de secagem era alimentado a uma câmara de aquecimento (2) com a presença de uma série de resistências que estão associadas a um controlador Flyever FE50RP (17). Este sistema, conjunto de resistências e controlador, era responsável pelo fornecimento de energia ao ar de secagem e controle de sua temperatura. Caso se desejasse alcançar menores temperaturas, poderia ser utilizado um trocador de calor (3), porém ele não foi utilizado no presente trabalho. Uma placa de orifício (4) foi posicionada antes da alimentação na câmara de secagem para medir a velocidade do ar. Também eram medidas as pressões na entrada e saída do secador através de um transdutor de pressão (6), sendo utilizado um manômetro de água (5) para realizar a calibração das medidas. O ar era injetado na câmara de secagem (11). Para uma alimentação mais homogênea na base do leito a corrente de ar na saída da placa de orifício era dividida em duas correntes distintas que convergiam a uma placa de distribuição posicionada logo abaixo da câmara.

A câmara de secagem era composta por um cilindro de vidro com uma altura de 0,50 m e um diâmetro de 0,114 m posicionado sobre uma haste vertical que liga a câmara ao sistema de movimentação do leito. A haste era um dos elementos do eixo (9) responsável por transformar o movimento de rotação do motor WEG com 0,5 cv em um movimento vertical. A frequência de vibração era controlada por um variador de frequência (8) modelo Ringcogne RXM-750 e aferida utilizando-se um tacômetro digital Optho Tako TO404. Para amenizar os impactos da vibração imposta ao sistema foi posicionado um rolamento deslizante (10). Para acompanhar a queda de pressão no leito a sua base foi conectada a um transdutor de pressão (12). Foi posicionado um termopar (13) no leito para auxiliar o controle de sua temperatura, feita através do controlador (17) que periodicamente desligava e religava as resistências. Na saída da câmara de secagem foi posicionado um ciclone (21) para a coleta do pó seco. Após a saída do ciclone era posicionado um psicrômetro (20), que mede temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido do ar na exaustão ao longo de toda a secagem.

As medidas de pressão na entrada e na saída da placa de orifício, pressão na base do leito e ambiente, além das temperaturas do leito e do psicrômetro eram enviadas ao sistema de aquisição de dados (7), composto por uma placa de aquisição A/D PCI-6024E da National Instruments conectada a um computador com o software LabView 7 Express. O software coletava 1024 pontos em um intervalo de 30 segundos, fornecendo a média das medidas e desvio padrão associado a estas.

A levedura residual foi armazenada em um reservatório (18) posicionado ao lado do secador, sendo submetida a uma constante agitação para evitar a sedimentação das células. A alimentação da pasta foi feita com a utilização de uma bomba peristáltica (19) MasterFlex, modelo 7520-00, sendo a entrada da bomba posicionada no fundo do reservatório de pasta e a sua saída no centro da câmara de secagem, de modo que a pasta seja alimentada sobre o leito de inertes. A Figura 4.6 ilustra o secador do tipo leito vibrofluidizado instalado utilizado no presente trabalho.

Figura 4.6: Secador do tipo leito vibrofluidizado instalado no Centro de Secagem.



Fonte: Acervo pessoal.

4.2.4. OBTENÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

As curvas fluidodinâmicas foram obtidas seguindo-se a metodologia utilizada por COSTA (2017): as esferas de vidro foram pesadas e posteriormente adicionadas à câmara de secagem; iniciou-se tanto a alimentação de ar quanto a vibração do leito, fixada em $A=0,015\text{m}$ e $f=500\text{rpm}$, para que ocorresse a sua estabilização; a válvula *by-pass* era fechada, elevando a velocidade superficial do ar até que ocorresse a expansão completa do leito, com isso iniciava-se o monitoramento da queda de pressão através do software LabView; após a leitura da queda de pressão, a vazão de ar fornecida ao sistema era reduzida, a queda de pressão e desvio padrão eram registrados e o processo se repetia, reduzindo-se gradativamente a vazão até que a mínima passagem de ar na câmara de secagem.

Para que fosse avaliada somente a fluidodinâmica do leito de inertes, fez-se necessário contabilizar a influência da câmara de secagem e dos demais elementos fixos do secador sobre

a queda de pressão. Para tanto, foi realizado o mesmo ensaio com a câmara vazia, sem a presença das esferas de vidro, para que a curva da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para os elementos fixos fosse obtida. A variação de Δp em função de u para o secador vazio era então descontada do perfil para o secador cheio, contendo os elementos fixos e as partículas inertes, obtendo-se assim a queda de pressão somente para o leito de inertes.

4.2.5. ENSAIOS DE SECAGEM

Para os ensaios de secagem, inicialmente a massa de partículas inertes, 0,5 ou 1,5 kg de acordo com as condições desejadas, era alimentada a câmara, posteriormente iniciou-se a alimentação de ar. Para que a velocidade do ar alcançasse os valores desejados, iniciava-se o software LabView para monitorar a queda de pressão na placa de orifício, esta encontra-se diretamente relacionada à velocidade superficial do ar através de uma curva de calibração. A velocidade superficial foi definida em relação à u_{mf} , sendo utilizadas velocidades iguais $1,2u_{mf}$ e $1,5u_{mf}$ de acordo com as condições avaliadas. Ao se alcançar a velocidade superficial desejada, era verificado se o leito alcançara a condição de fluidização e então acionava-se o sistema de aquecimento. Após a completa estabilização da unidade experimental, alcançada com a manutenção da temperatura indicada no controlador a valores próximos do desejado, iniciava-se a agitação do leito e, em seguida, a alimentação da levedura residual, a contagem do tempo de secagem era iniciada simultaneamente com o início da alimentação da pasta.

A vazão da pasta foi fixada em 14 mL/min, sendo ajustada através do controle presente na parte frontal da bomba peristáltica. A vazão da pasta era previamente obtida com o auxílio de uma proveta de 100 mL e um cronômetro digital, para tanto a levedura residual era alimentada à proveta durante um intervalo de 5 minutos, sendo a vazão calculada pela razão entre o volume de pasta e o tempo necessário para sua alimentação.

Cada ensaio de secagem durou 30 minutos. A cada 10 minutos de secagem removia-se o recipiente conectado à parte inferior do ciclone para a coleta de pó e o material seco que era coletado pelo ciclone durante o período correspondente era então pesado.

A massa de pó coletada foi utilizada para o cálculo da taxa de produção, sendo obtida pela razão entre a massa total de pó coletado ao longo de secagem e o intervalo de tempo utilizado. A taxa de acúmulo de material no leito foi obtida através da diferença entre a taxa de alimentação de sólidos, produto entre a vazão volumétrica da pasta e sua densidade, e a taxa de produção.

Uma alíquota do pó coletado no ciclone para cada intervalo de secagem era então adicionada a um microtubo contendo uma solução 50 g/L de glicose previamente preparada. Com a adição do material produzido a um meio contendo glicose, alimento para as leveduras, as células que se encontram ativas após a secagem eram mantidas vivas até a realização dos ensaios para determinar a atividade celular da amostra. Os microtubos eram então armazenadas sob constante refrigeração para a inibição do crescimento celular, evitando que as amostras avaliadas apresentassem características distintas das amostras coletadas ao longo da secagem. O restante do material coletado no fundo do ciclone era então submetido à análise termogravimétrica para a determinação de sua umidade.

Após o período de secagem interrompeu-se somente a alimentação de pasta, mantendo a passagem de ar quente e a vibração do leito por um período de 30 minutos. A manutenção da agitação e da passagem de ar visava a manutenção da colisão entre as partículas e a avaliação de sua capacidade de desprender o material seco da superfície do inerte que se acumulou durante os 30 minutos de secagem. Após esse intervalo de 30 minutos, interrompia-se a passagem de ar e a agitação do leito, o material retido no ciclone no período subsequente à secagem era pesado e sua massa era utilizada no cálculo da taxa de desprendimento de sólidos acumulados no leito, razão entre a massa obtida e o tempo necessário para seu desprendimento.

A variação da queda de pressão no leito e das temperaturas de bulbo seco, bulbo úmido e alimentação ao longo da secagem também foram monitoradas utilizando o software LabView.

4.2.6. AVALIAÇÃO DA UMIDADE E ATIVIDADE DO PRODUTO

As alíquotas retiradas do pó coletado pelo ciclone durante a secagem foram submetidas a duas análises distintas, uma para a determinação da umidade do pó e outra para a determinação da atividade celular das leveduras secas.

A umidade do produto era avaliada de maneira análoga à utilizada para a caracterização das amostras de bagaço de malte. A amostra era pesada e levada a uma estufa mantida a 105 °C por um período de 24 para a remoção completa da água. A amostra seca era então pesada e a umidade em base seca calculada através da equação:

$$X_{s,bs} = \frac{m_{s,úmido} - m_{s,seco}}{m_{s,seco}} \quad (4.1)$$

Para a determinação da viabilidade celular foi utilizada uma metodologia semelhante à utilizada por SILVA (2013): adicionou-se às alíquotas, levedura seca em solução aquosa de

glicose, uma solução de azul de metileno (0,02% de azul de metileno e 2% de citrato de sódio) que funcionou como um identificador para as células “mortas”; uma parte das leveduras com a solução de azul de metileno foi adicionada à câmara de Neubauer e analisada com o auxílio de um microscópio Leica-DM 300 com ampliação de 400 vezes, a câmara era dividida em diversas células menores, delimitando o espaço a ser analisado; as leveduras totais no interior de uma célula foram contabilizadas e também as leveduras demarcadas pelo corante; calculou-se a viabilidade do produto pela razão entre o número de células ativas e o número total de células, de acordo com a Equação 4.2. A identificação das células inativas é visualmente simples, uma vez que a membrana celular destas células não apresenta a mesma permeabilidade para o azul de metileno das células ativas, as células inativas absorvem o corante adquirindo uma coloração azulada enquanto as células ativas apresentam sua coloração original.

$$Viabilidade(\%) = \frac{n_{ativas}}{n_{totais}} \quad (4.2)$$

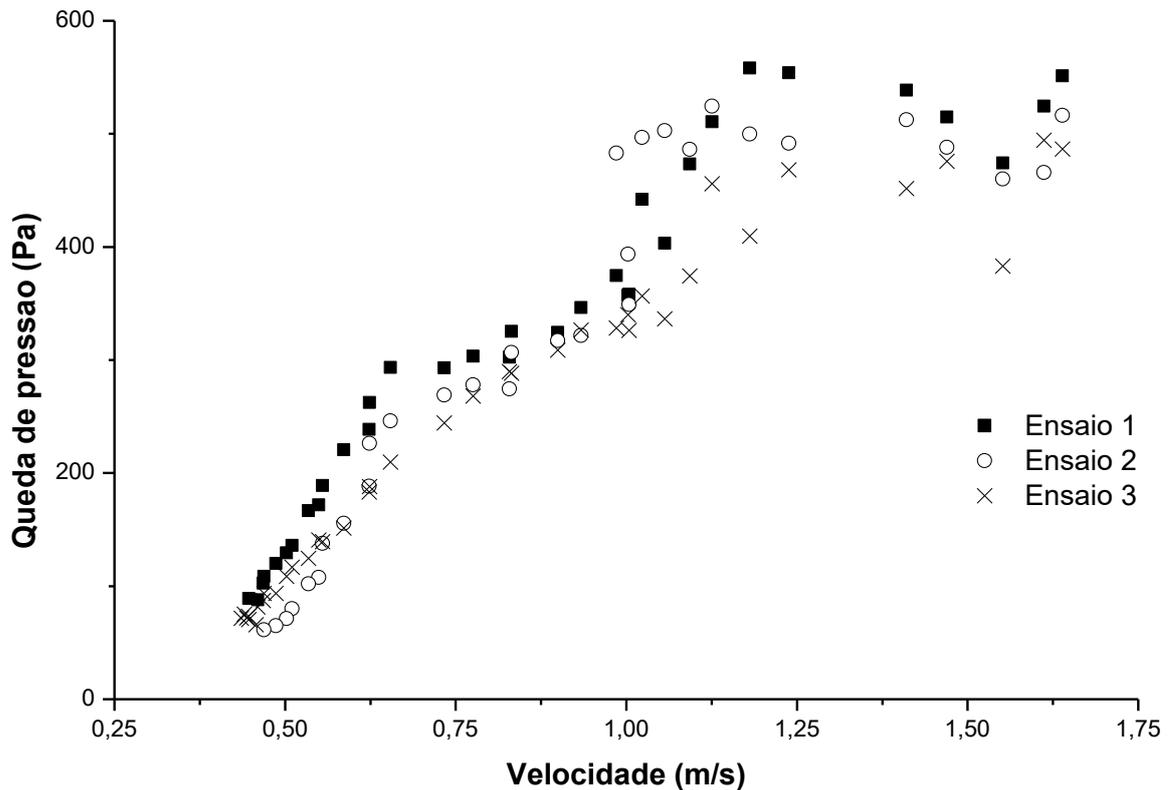
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1. CURVAS CARACTERÍSTICAS

Inicialmente, foi utilizado 1,5 kg de inertes no secador para os ensaios fluidodinâmicos, sendo estes realizados em triplicata. A Figura 4.7 apresenta os valores da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar obtida para o leito de 1,5 kg de esferas de vidro.

Observou-se a presença de duas inflexões para a curva característica do leito de esferas de vidro ao se aplicar uma vibração com $A=0,015$ e $f=500$ rpm. A primeira inflexão ocorreu a uma velocidade de cerca de 0,70 m/s, mais evidente para os ensaios 1 e 2, enquanto a segunda inflexão encontra-se aproximadamente a uma velocidade de 1,23 m/s. Comportamento semelhante foi observado no trabalho de COSTA (2017) que utilizou uma vibração com mesma amplitude e frequência sobre um leito com mesma massa de esferas de vidro, sendo observada nas curvas características duas inflexões, porém os valores para a queda de pressão no leito foram significativamente maiores em seu trabalho, apresentando também valores distintos para as velocidades superficiais nas inflexões.

Figura 4.7: Queda de pressão em função da velocidade do ar para 1,5 kg de esferas de vidro, $A=0,015$ m e $f=500$ rpm.

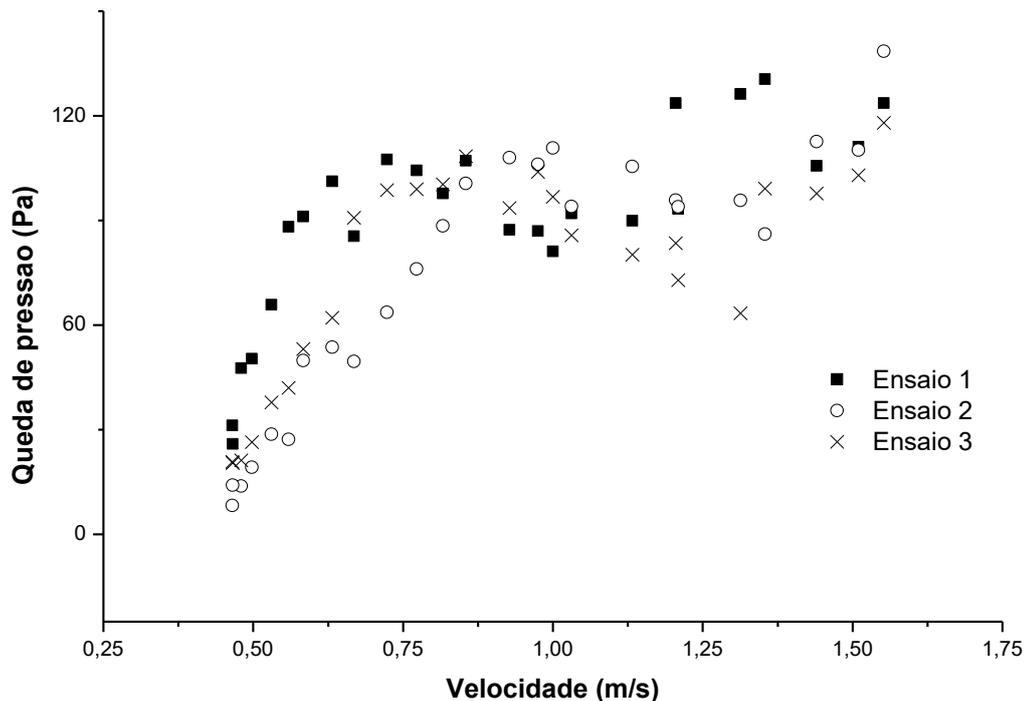


Fonte: Acervo pessoal.

O primeiro ponto de inflexão corresponde à velocidade de mínima mistura, relacionada ao momento em que o material particulado inicia seu movimento. O segundo ponto de inflexão corresponde à condição de fluidização, em que a velocidade do ar é suficiente para manter suspensas as partículas do leito (FINZER e KIECKBUSCH, 1992; ROCHA, 2019).

A massa de inertes utilizada nos ensaios de secagem foi então reduzida, uma vez que se deseja avaliar a influência da carga de inertes sobre a secagem da levedura residual. Foi adicionado então ao equipamento uma carga de 0,5 kg de esferas de vidro, havendo a necessidade de se refazer os ensaios fluidodinâmicos para a nova configuração do leito. A Figura 4.8 apresenta a queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para os três ensaios com 0,5 kg de esferas de vidro, sendo mantidas as condições da vibração em $A=0,015$ m e $f=500$ rpm.

Figura 4.8: Queda de pressão em função da velocidade do ar para 0,5 kg de esferas de vidro, $A=0,015$ m e $f=500$ rpm.



Fonte: Acervo pessoal.

Percebe-se através da Figura 4.8 uma clara modificação no comportamento de Δp em função de u em relação ao comportamento para o leito de 1,5 kg de esferas de vidro, representado pela Figura 3.7. A ocorrência de duas inflexões na curva característica observada para o leito de 1,5 kg não foi observada para o leito de menor massa, notando-se somente uma inflexão correspondente à mínima fluidização. A velocidade de mínima fluidização para o leito ocorreu em diferentes valores para cada um dos ensaios realizados, aproximadamente 0,72 m/s para o ensaio 1, 0,85 m/s para o ensaio 2 e 0,76 m/s para o ensaio 3, sendo os três valores significativamente inferiores à u_{mf} para 1,5 kg de inertes. Para realizar uma aproximação, foi considerada a velocidade de 0,85 m/s, maior dos valores alcançados durante as repetições. Esta diferença na velocidade de mínima fluidização esteve de acordo com os resultados do trabalho de JINESCU et al (2000), que observaram o aumento na velocidade de mínima fluidização para maiores valores de H/D , ao reduzir a massa de inerte mantendo o diâmetro do leito acontece uma diminuição na altura do leito estático, e conseqüentemente H/D , ocorrendo a redução na velocidade de mínima fluidização.

A queda de pressão no leito apresentou valores superiores para 1,5 kg de inertes em comparação ao leito com a presença de 0,5 kg de esferas de vidro, devido à maior resistência ao escoamento provocando pela maior altura de leito estático. Estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos por outros pesquisadores, como JINESCU et al (2000), OLIVEIRA JÚNIOR (2003) e ERDÉSZ e ORMOS (1983), que observaram uma relação entre a altura do leito estático, H , sobre Δp , tendo apresentado valores superiores para maiores H .

Observaram-se maiores desvios nas medidas de Δp para os ensaios com leito de 0,5 kg, especialmente a partir da velocidade de mínima fluidização. Isto se deve principalmente à intensidade da movimentação das partículas, dificultando-se a aquisição dos dados com boa precisão. Destacou-se também a dificuldade em se determinar visualmente o intervalo de velocidades do ar em que ocorre a velocidade de mínima mistura para 0,5 kg de inerte.

4.3.2. FLUIDODINÂMICA NA SECAGEM DA PASTA

Inicialmente, a umidade da levedura residual foi determinada através do método gravimétrico, sendo obtida uma umidade de 90,63% em base úmida, muito próxima da umidade do material utilizado por MATHIAS et al (2014).

Realizou-se então um ensaio preliminar da secagem do lodo de levedura utilizando uma carga de 1,5 kg de esferas de vidro, a temperatura do ar de secagem foi fixada em 80 °C e a velocidade superficial do ar ajustada em 1,2 u_{mf} . A partir deste ensaio evidenciou-se que as condições operacionais utilizadas não foram adequadas à secagem deste material em específico, não sendo coletado material seco na base do ciclone durante toda a secagem e também ao longo do período seguinte para a remoção de material acumulado. Pôde-se concluir que todo o sólido seco se acumulou nas paredes da câmara de secagem ou na superfície das esferas de vidro, como ilustrado pela Figura 4.9.

A não formação de produto foi um indicativo de limitações na condução da secagem, relacionada especialmente à limitações na remoção de água do filme ou no desprendimento de material seco da superfície do inerte. A remoção de umidade no filme que recobre a superfície dos inertes está diretamente relacionada à velocidade superficial do ar e sua temperatura, que afetam o fornecimento de energia ao sistema. A intensidade e quantidade de colisões encontram-se relacionadas à altura do leito estático, velocidade do ar e amplitude e frequência de vibração, uma vez que influenciam a circulação das partículas e são dependentes também da razão entre a alimentação de pasta e a massa de inertes (DALEFFE, 2002). Para contornar a ausência de produção de pó na análise prévia, foram testadas novas condições operacionais que

possibilitassem uma secagem mais intensa, mais choques entre as partículas ou uma combinação de ambos, para que houvesse o desprendimento do filme que recobre o inerte.

Figura 4.9: Acúmulo de material sobre as partículas inertes.

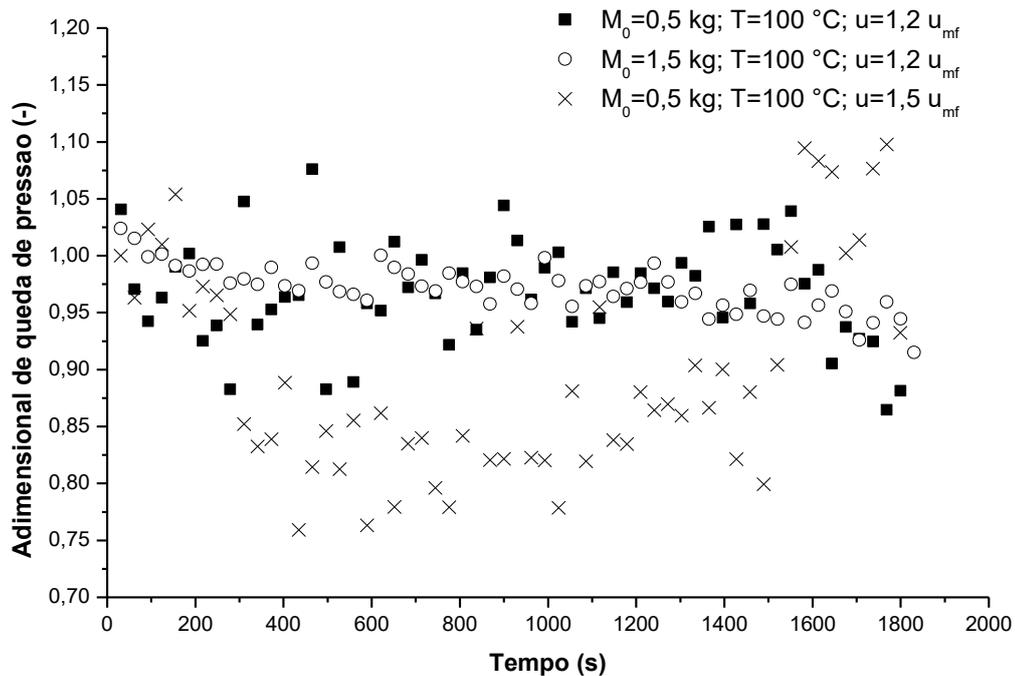


Fonte: Acervo pessoal.

Modificou-se então a razão entre a massa de pasta e massa de inerte, a temperatura do ar de secagem, e a velocidade do ar de secagem. Foram realizados três ensaios distintos, sendo todos ensaios seguintes realizados a uma temperatura de 100°C na alimentação de ar, manteve-se também a amplitude e a frequência vibracional em 0,015 m e 500 rpm e a vazão da levedura residual em 14 mL/min. As condições operacionais para os três ensaios foram: ensaio 1) foi utilizado um leito com 0,5 kg de inerte mantendo-se a velocidade do ar em $1,2u_{mf}$; ensaio 2) foi utilizado 0,5 kg de esferas de vidro elevando-se a velocidade do ar a $1,5u_{mf}$; ensaio 3) foi utilizado 1,5 kg de esferas de vidro e mantida a velocidade do ar em $1,2u_{mf}$, alterando-se somente a temperatura em relação ao ensaio preliminar.

A queda de pressão no leito foi monitorada durante a secagem através dos dados fornecidos pelo software LabView. Para monitorar a variação da queda de pressão ao longo da secagem foi utilizado o adimensional de queda de pressão definido como $\Delta p/\Delta p_0$, em que Δp_0 representa Δp no instante $t=0$. Os valores do adimensional de queda de pressão em função do tempo de secagem para as três condições operacionais avaliadas são apresentadas na Figura 4.10.

Figura 4.10: Queda de pressão em função do tempo.



Fonte: Acervo pessoal.

Foi novamente observada uma maior dispersão nos dados obtidos para a queda de pressão para maiores agitações no leito, associada às diferenças entre as massas de inerte utilizadas na secagem. Foi observado um comportamento melhor definido para o ensaio 3 em comparação com os ensaios 1 e 2, uma vez que a maior massa do leito e conseqüente menor agitação facilita a aquisição dos dados para a pressão. O mesmo foi notado ao se comparar o ensaio 1 com o ensaio 2, sendo observado um padrão melhor definido para o ensaio com $1,2 u_{mf}$ em comparação com o ensaio com velocidade superficial igual a $1,5 u_{mf}$ para a mesma massa de esferas de vidro, a maior velocidade do ar intensifica a mistura do inerte porém dificulta a aquisição dos dados.

Não foi possível avaliar o comportamento fluidodinâmico do leito através da análise da curva do adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo para o ensaio com $0,5 \text{ kg}$ de inertes e velocidade superficial de $1,5 u_{mf}$, no entanto algumas observações podem ser feitas quanto aos demais ensaios.

No decorrer da secagem da levedura para o ensaio com $1,5 \text{ kg}$ de inertes e velocidade superficial de $1,2 u_{mf}$ pôde-se observar uma redução no valor para o adimensional de queda de pressão, porém a diminuição de $\Delta p/\Delta p_0$ não foi considerada significativa, de aproximadamente 5% em relação ao instante $t=0$.

Foi observado que para o ensaio com 0,5 kg de inertes e velocidade superficial de $1,2 u_{mf}$ ocorre uma oscilação para os valores do adimensional da queda de pressão com valores próximos, entre 1,0 e 0,95. A partir de 1500 segundos de secagem houve uma queda acentuada para os valores de $\Delta p/\Delta p_0$. MEILI (2009) avaliou a influência da presença de pasta sobre o perfil da queda de pressão no leito vibrofluidizado ao longo da secagem, observando que a saturação do leito e o seu posterior colapso impactaram diretamente a queda de pressão do leito. Segundo o autor, o colapso do leito, formação de zonas mortas e canais preferenciais para a passagem do ar, reduz a eficiência do secador. Logo, a diminuição acentuada da queda de pressão do leito para o ensaio com 0,5 kg de inertes e velocidade superficial de $1,2 u_{mf}$ foi atribuída ao seu colapso, sendo este evidenciado pela formação de zonas mortas no interior da câmara de secagem no período final do ensaio conforme representado pela Figura 4.11.

Figura 4.11: Visão superior do leito após a saturação e formação de zonas mortas.



Fonte: Acervo pessoal.

O colapso do leito traz uma série de complicações para a sua operação, o acúmulo de material na forma de filme faz com que as partículas se tornem mais pesadas até um ponto em que o material que antes fluidizava com relativa facilidade, para estas condições operacionais específicas, passa a se movimentar com uma menor intensidade (MEILI, 2009). Além disso a formação de canais preferenciais e zonas mortas prejudica a transferência de calor e massa no secador, tornando o processo inviável operacionalmente.

4.3.3. TAXAS DE PRODUÇÃO E ACÚMULO DE PÓ

A densidade da levedura residual, ρ_{lev} , foi calculada com o auxílio de uma proveta, sendo a densidade a razão entre a massa do material e o volume observado na proveta. A densidade ρ_{lev} foi calculada em 1,032 g/mL.

As taxas de produção de levedura seca, de acúmulo de pó no leito e de desprendimento de material acumulado no período seguinte à secagem para os ensaios 1, 2 e 3 são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Taxa de produção e de acúmulo de pó.

Ensaio	Taxa de produção de pó (g/min)	Taxa de acúmulo de pó (g/min)	Taxa de desprendimento (g/min)
1	0,045	1,308	0,012
2	0,034	1,319	0,019
3	0,263	1,090	0,532

Observou-se através das informações da Tabela 4.1 que a taxa de produção de pó é consideravelmente pequena, inferior a 1 g/min para as condições avaliadas. Ao se comparar a taxa de produção de pó com a taxa de acúmulo de material no leito, ficou evidente que a maior parte do material alimentado ao secador acumulou-se sobre a superfície dos inertes ou sobre parede da câmara de secagem. Um grande acúmulo de material no leito prejudicou a operação por provocar a saturação do leito, podendo levar ao seu colapso conforme evidenciado anteriormente. Evidenciou-se assim a limitação da secagem para as condições avaliadas, seja pela remoção de água do filme ou pelo desprendimento de pó seco, sendo necessária a avaliação de qual destas etapas limita o processo.

A taxa de desprendimento de material seco foi utilizada neste sentido, dando fortes indícios de que o desprendimento de material da superfície do inerte seria a etapa limitante do processo de secagem da levedura residual. Pode-se observar através da Tabela 4.1 que o desprendimento de material para o ensaio com 1,5 kg de inertes e velocidade superficial de 1,2 u_{mf} foi consideravelmente superior em relação aos demais ensaios, porém ainda assim o processo de abrasão não foi suficiente, tendo a taxa de desprendimento apresentado valor um pouco menor que 50% da taxa de acúmulo de pó.

Assim, as dificuldades de se realizar a secagem encontravam-se relacionadas ao desprendimento do material da superfície do inerte, e não ao processo de remoção de água do filme, sendo a secagem da levedura residual nas condições avaliadas controlada pela interação entre a superfície das partículas e o seu recobrimento. Conforme discutido anteriormente, este tipo de interação é altamente complexo, uma vez que ocorrem a nível molecular, sendo dependente principalmente das propriedades dos inertes e da composição da pasta (FREIRE et al, 2011).

A composição da levedura residual seria um dos principais fatores que influenciam na eficiência da secagem, apresentando cerca de 32,86% em massa dos sólidos totais de acordo com os dados apresentados por CABALLERO-CÓRDOBA et al (1997). MEDEIROS (2001) observou que a quantidade de açúcar presente na polpa de manga influenciou a fluidodinâmica do leite e influenciou a taxa de produção de pó em leite de jorro, apresentando menores produções para maiores concentrações de açúcar. OCHOA-MARTINEZ et al (1993) realizaram a secagem de suco de laranja em leite móvel, não sendo observada a formação de produto seco, ocorrendo adesão entre as partículas inertes e, conseqüentemente, o colapso do leite. Portanto, a presença de uma grande quantidade de açúcar na levedura residual promoveu uma forte interação com a superfície das esferas de vidro, levando ao acúmulo de material no leite.

A energia de superfície do inerte também influenciou a secagem, uma vez que as interações sólido-suspensão são dependentes não somente das propriedades do filme, mas também da superfície dos sólidos. Segundo BRAGA (2012), o vidro é um material que possui uma elevada energia superficial em comparação a outros materiais. Assim, as esferas de vidro utilizadas no presente trabalho apresentaram forte interação com a pasta, sendo necessária a substituição das esferas de vidro por um inerte mais adequado. O emprego de um inerte com menor energia superficial implicaria em uma menor interação sólido-suspensão e, conseqüentemente, uma maior facilidade no desprendimento do filme que recobre as partículas.

Verificou-se que as taxas de produção e de desprendimento de pó para cada ensaio diferem entre si. O ensaio 3 apresentou uma produção de pó consideravelmente superior em relação aos demais ensaios, podendo ser justificado pela intensidade das colisões no secador e pela menor razão entre massa de pasta alimentada e massa de inertes.

4.3.4. UMIDADE E VIABILIDADE CELULAR DO PRODUTO

Os dados obtidos para a umidade e a viabilidade celular do pó coletado para cada um dos três ensaios para os três intervalos de tempo de secagem, 0 a 10, 10 a 20 e de 20 a 30 minutos

do início da secagem respectivamente, encontram-se na Tabela 4.2. A viabilidade e a umidade em base úmida da levedura residual em suas condições originais, material que foi alimentado ao sistema, também são mostradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Umidade e viabilidade para levedura residual e produto seco.

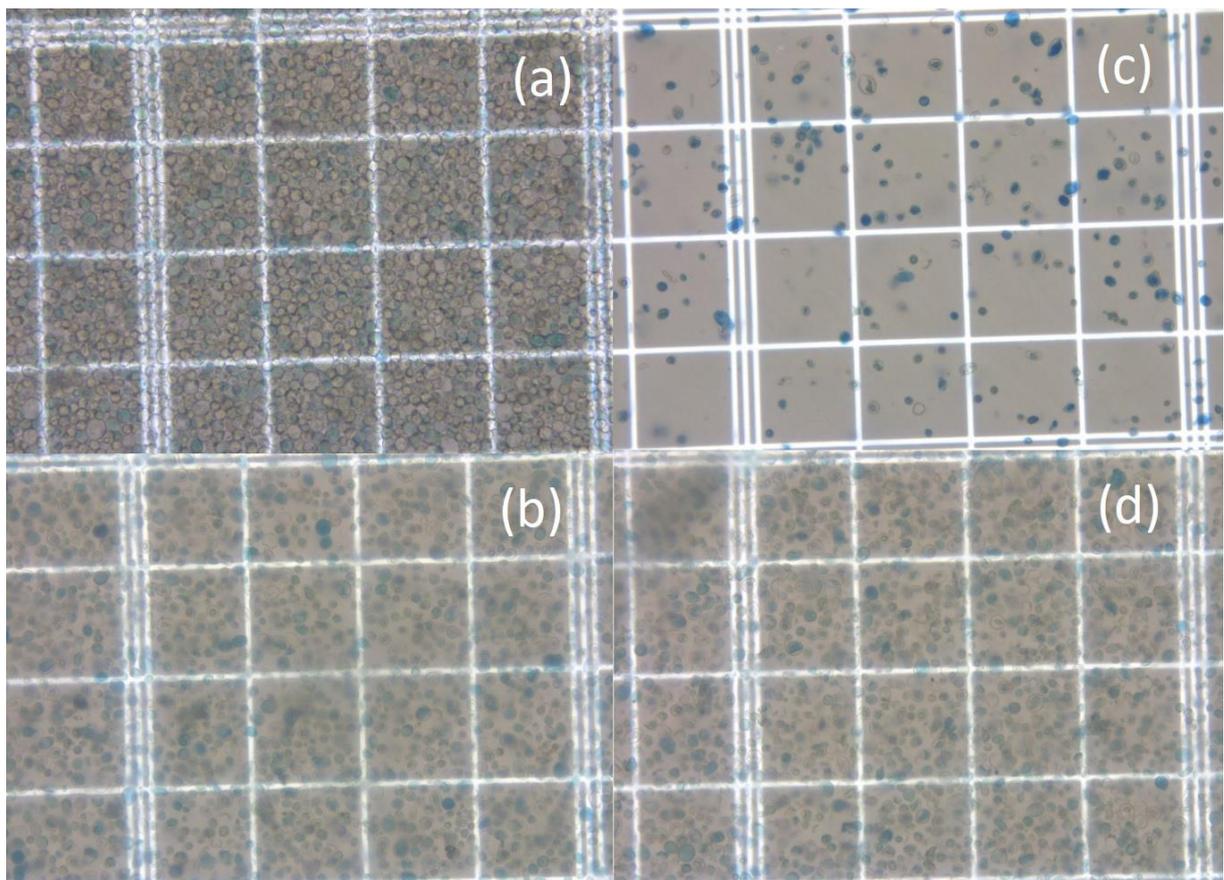
Ensaio	Intervalo de tempo (min)	Umidade base úmida (%)	Viabilidade (%)
Levedura residual	-	90,63	80
1	0-10	7,43	70
	10-20	8,12	70
	20-30	7,06	30
	0-10	0,69	5
2	10-20	2,38	5
	20-30	1,67	50
	0-10	2,47	10
3	10-20	4,36	60
	20-30	4,09	50

Os dados apresentados na Tabela 4.2 permitiram algumas considerações acerca da qualidade do produto obtido pela secagem de levedura residual em leito vibrofluidizado. Primeiramente, pôde-se notar que, para algumas das condições operacionais adotadas, o processo de secagem foi suficiente para inviabilizar uma quantidade significativa de células, sendo possível obter produtos com uma viabilidade de 5% em algumas destas condições. Em outras condições, porém, pôde-se observar uma grande parcela das células alimentadas no secador permaneceram ativas, mesmo após uma redução significativa de sua umidade. Considerando-se que 20% das células totais da pasta alimentada já se encontravam inativas, obter viabilidades de 50 a 70% após submeter as células ao contato com ar a 100 °C foi um bom indicativo de que o secador poderia ser utilizado para a obtenção um produto destinado à aplicações biológicas. O secador do tipo leito vibro fluidizado poderia, portanto, fornecer diferentes produtos, um material seco majoritariamente inativo ou um material majoritariamente ativo, de acordo com as condições operacionais utilizadas. No entanto a obtenção da levedura residual cervejeira seca nestas condições não viabiliza por si só o

processo, uma vez que as taxas de produção foram consideravelmente pequenas em relação à alimentação de matéria prima, conforme discutido anteriormente.

A Figura 4.12 apresenta algumas das análises visuais feita com o auxílio do microscópio com ampliação de 400 vezes. Pode-se observar que as leveduras inativas são facilmente percebidas, apresentando uma coloração azul que se destaca em relação às células ativas, que permanecem com a sua coloração original.

Figura 4.12: Ensaios sobre viabilidade celular para: (a) levedura residual, (b) ensaio 1, 10 a 20 minutos de secagem, (c) ensaio 2, 10 a 20 minutos e (d) ensaio 3, 10 a 20 minutos.



Fonte: Acervo pessoal.

Através da Tabela 4.2 pôde-se observar uma umidade superior para o período intermediário da secagem, de 10 a 20 minutos após o início da secagem, em relação aos instantes finais e iniciais, de 0 a 10 e de 20 a 30, para os três ensaios realizados. Uma possível justificativa para este comportamento encontra-se na disponibilidade energética do sistema. No início da secagem, todo o sistema encontrava-se em equilíbrio térmico, tanto as partículas inertes quanto as paredes do secador estavam aquecidas, havendo uma grande quantidade de energia disponível para aquecer a pasta alimentada ao secador. Com o decorrer da secagem, o

sistema pasta-inertes-paredes recebia mais energia, alcançando maiores temperaturas no término da secagem quem favoreceriam a transferência de calor e de massa. No entanto, há a necessidade de se monitorar outras variáveis, como a temperatura do leite, e observar os possíveis fenômenos envolvidos. COSTA (2017) observou um comportamento semelhante para o produto da secagem de leite desnatado em leite vibrofluidizado. Quanto à relação entre a umidade do produto e sua viabilidade não se pôde evidenciar um padrão bem definido.

4.4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho, concluiu-se que a fluidodinâmica do leite vibrofluidizado é altamente dependente da altura do leito estático, H . A adição de uma maior carga de esferas de vidro, não só provoca um aumento na velocidade de mínima fluidização e na queda de pressão no leito como também altera o comportamento da curva característica. O leito com uma menor massa de inertes apresentou uma maior dispersão nas medidas da queda de pressão devido à intensa movimentação das partículas.

Quanto à secagem da levedura residual em leite vibrofluidizado, a realização de um ensaio preliminar evidenciou a existência de limitações no processo, sendo necessária a modificação das condições operacionais para elevar a capacidade evaporativa do leito e a intensidade das colisões das partículas visando formação de produto seco. Com a modificação das condições operacionais evidenciou-se a grande influência dessas sobre o comportamento fluidodinâmico do secador, descrito através da curva da queda de pressão em função do tempo de secagem, influenciando a dispersão das medidas obtidas e principalmente a movimentação das partículas no leito. Em condições específicas pôde-se observar o colapso do leito pela formação de zonas mortas e canais preferenciais devido ao acúmulo de material no leito, reduzindo significativamente a queda de pressão.

O acúmulo de material no leito foi evidenciado pela comparação entre as taxas de produção de material seco e de acúmulo no leito. A maior parte do material que foi alimentado no secador permaneceu retida nas paredes da câmara de secagem ou sobre a superfície do material inerte, evidenciando a necessidade de se avaliar ainda mais o processo, especialmente quanto à secagem do filme que recobre as partículas e quanto ao desprendimento de material seco. No entanto, a reduzida taxa de desprendimento de material após a secagem foi um forte indicativo de que o desprendimento de material é a etapa limitante do processo, possivelmente devido à elevada concentração de açúcar na pasta e alta energia superficial do vidro.

A secagem da levedura residual nas condições avaliadas foi suficiente para reduzir significativamente a umidade do material, de 90,63% a menos de 8,50% em base úmida. Mesmo com a drástica redução no teor de umidade e com a exposição a elevadas temperaturas foi possível obter um produto com atividade celular variável a depender das condições operacionais utilizadas.

A utilização do secador do tipo leito vibrofluidizado na secagem de levedura residual promissora, especialmente quanto à qualidade do produto obtido durante a secagem, entretanto a obtenção de reduzidas de taxas de produção evidenciam a necessidade de se avançar ainda mais no entendimento dos fenômenos envolvidos neste processo.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A secagem mostra-se uma excelente opção para processamento intermediário dos dois principais resíduos da indústria cervejeira, o bagaço de malte e a levedura residual. Existe uma crescente demanda por processos mais “limpos”, que apresentem nenhum coproduto ou cujos coprodutos não sejam descartados, mas que sejam utilizados em outras cadeias produtivas, e a remoção da umidade presente nestes subprodutos permite a elevação de seu valor agregado.

Os secadores convectivos, em que o ar de secagem se encontra diretamente em contato com o material a ser seco, mostram-se viáveis do ponto de vista operacional, porém modificações no equipamento podem ser necessárias para que este torne-se apropriado para a secagem do bagaço de malte e da levedura residual, conforme evidenciado no presente trabalho.

Ambos os materiais apresentam características que conferem uma grande adesão às superfícies às quais se encontram em contato. Segundo os dados apresentados pelo presente trabalho, a secagem do bagaço de malte em secadores rotativos, como a drageadeira associada a um soprador, é dependente de elementos que promovam a movimentação das partículas, sendo este o maior desafio para esta operação. As forças de adesão provocadas pelo efeito de capilaridade influenciam tanto a circulação de partículas quanto o perfil de temperaturas no secador.

Os desafios enfrentados pela secagem da levedura residual em leito vibrofluidizado são semelhantes, relacionados à forte interação entre as partículas inertes e a pasta, proporcionando uma baixa produção de material seco. A forte interação com a superfície para o bagaço de malte se deve à sua elevada umidade, enquanto para a levedura residual está relacionada à sua elevada concentração de açúcares. No entanto, os resultados preliminares quanto à qualidade do produto obtido são bastante promissores, indicando que se pode obter produtos com alta ou baixa atividade celular a depender das condições operacionais utilizadas.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a secagem do bagaço de malte utilizando um secador do tipo tambor rotativo, especialmente quanto à influência das condições operacionais sobre a qualidade do produto obtido;
- Analisar o desempenho da combustão da biomassa seca, mensurando quantidade de energia gerada no processo;
- Avaliar o consumo energético ao longo da secagem do bagaço de malte em tambor rotativo e, comparando com a energia gerada com a combustão, determinar a viabilidade econômica da reutilização do bagaço de malte;
- Alterar o material inerte utilizado na secagem da levedura residual e comparar os valores obtidos para as taxas de produção, retenção e acúmulo de pó obtidas com a utilização de esferas de vidro;
- Investigar uma possível relação entre as condições operacionais do leito vibrofluidizado sobre a qualidade obtida para a levedura residual seca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAPA, P. K.; SCHOENAU, G. J.; ARINZE, E. A. “Fractionation of alfafa into leaves and stems using a three-pass rotary drum dryer”, *Biosystems Engineering*, v. 91, n. 4, p. 455-463, 2004.
- AHRENS, F.; PATTERSON, T.; MUELLER, S; HOJJATIE, B. “Investigation of paper dryer picking, web transfer and quality issues using a new web adhesion and drying simulator”, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 22, n. 2, p. 217-225, 2005.
- ALIYU, S.; BALA, M. “Brewer’s spent grain: A review of its potentials and applications.” *African Journal of Biotechnology*, v. 103, n. 3, p. 324-331, 2011.
- ALLEN, M. S. “Relationship between fermentation acid production in the rumen and the requirement for physically effective fiber”, *Journal of Dairy Science*, v.80, p.1447-1462, 1997.
- ALMEIDA, A. R. F. Análise da secagem de pastas em leite de jorro, PPGEQ/UFSCar – São Carlos – SP, 2009 (tese).
- ASCHERI, D. P. R.; BURGER, M. C. DE M.; MALHEIROS, L. V.; OLIVEIRA, V. N. “Curvas de secagem e caracterização de hidrolisados de bagaço de cevada”, *Anais do XLVII Congresso Brasileiro de Química*, Natal – RN, 2007.
- BACELOS, M. S.; JESUS, C. D. F.; FREIRE, J. T. “Modelling and drying of carton packaging waste in a rotary.” *Drying Technology*, v. 27, n. 9, p. 927-937, 2009.
- BAMFORTH, C. “Yeast and fermentation. Beer: Tap into the art and science of brewing”, Oxford University Press, p-144-159, 2003.
- BANDA, S. G. Desenvolvimento de uma metodologia experimental, para determinar a força de adesão entre partículas e uma superfície plana, utilizando a técnica centrífuga. UFSCar. São Carlos – SP, 2002. (dissertação)
- BATISTA, E. A. Estudo do processo de secagem do resíduo de malte gerado na produção de cerveja. UEPB. Campina Grande – PB, 2016. (trabalho de conclusão de curso)
- BEZERRA JUNIOR, P. S. “Doença neurológica em ruminantes associada ao consumo de bagaço de malte contaminado por *Aspergillus clavatus*”, Programa de Pós-Graduação em Ciências Veterinárias, UFRGS. 2008. (tese)

- BLIGH, E. G.; DYER, W. J. “A rapid method of total lipid extraction and purification”, *Canadian Journal of Biochemistry Physiology*, n.37, p.911-917, 1959.
- BOAS, M. A. V.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; MARTINS, M. A. “Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal”, *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v.38, n.87, p.481-490, 2010.
- BOFFO, E. V.; SILVA, G. M. C.; KLAGENBOECH, R.; TONEL, J.J. “Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem da mistura de bagaço de malte e levedura.” *Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, Florianópolis – SC, 2014.
- BORGES, M. S; NETO, S. P. S. “Parceria entre o setor cervejeiro e o pecuarista leiteiro: um estudo de caso.” *Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 29., 2009.
- BRAGA, M. B. Efeitos da Molhabilidade e Adesão em Sistemas Sólido-Suspensão e Filme-Suspensão no Desempenho do Recobrimento em Leito de Jorro, FEQ/UNICAMP – Campinas – SP, 2012 (dissertação).
- BRASIL, Ministério da Saúde, Agência Nacional de Vigilância Sanitária. “Métodos físico-químicos para análise de alimentos”, p.1018, 2005.
- BRATU, E.; JINESCU, G. I. Ver, *Chim.* n.9, v.20, p.547-557. 1969. In: FINZER, J. R. D.; KIECKBUSCH, T. G. Secagem em Sistemas com Vibração. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. *Tópicos Especiais em Secagem*, São Carlos-SP, UFSCar, 1992, v. 1, p.87-127.
- BRATU, E.; JINESCU, G. I.; Effect of vertical vibration on the pressure drop in a fluidized layer. *British Chemical Engineering*, n.8, v.16, p. 691-695, 1971.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. “Carvão vegetal de madeira de desbaste de Pinus”, *Circular Técnica IPEF*, Piracicaba, v.146, p.1-12, 1982.
- BRITO, J. O.; TOMAZELLO FILHO, M.; SALGADO, A. L. B. Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu, IPEF, n.36, p.13-17, 1987.
- CABALLERO-CÓRDOBA, G.M.; PACHECO, M.T.B.; SCARBIERI, V.C. (1997), “Composição Química de Biomassa de Levedura Intergral (*Saccharomyces* sp.) e

Determinação do Valor Nutritivo da Proteína em Células Íntegras ou Rompidas Mecanicamente”, *Cienc. Tecnol. Aliment.*, v.17, n.2, p.102-106.

CAMARGO, C. F. S. “Determinação do coeficiente global de transferência de calor de um cilindro submerso em um leito vibro-fluidizado”, UFSCar, 1998 (dissertação).

CANABARRO, N. I. Secagem convectiva de folhas visando a obtenção de compostos bioativos via extração supercrítica. UFSCar. 2019.

CELESTINO, S. M. C. “Princípios de Secagem de Alimentos.” – Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, pg. 51, 2010.

CERVBRASIL, “Dados do setor”, Disponível em: <cervbrasil.org.br/novo_site/dados-do-setor/>, Acesso em: 20/01/2020.

CHAMPAGNE, C. P.; GAUDREAU, H.; CONWAY, J. “Effect of the production or use of mixtures of brewer’s yeast extracts on their ability to promote growth of *lactobacilli* and *pediococci*”, *Electronic Journal of Biotechnology*, v. 6, n. 3, p. 185-197, 2003.

CHEVILENKO, V. A.; MUSHTAYVEN, V. I.; KOROTOKOV, V. M.; IZHORIM, G. L.; LYALIN, V. A.; PLANOVSKI, A. N. 1979. In: PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S. “Theory and application of vibrated beds and vibretade fluid beds for drying process”, *Advances in Drying*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, v.3, p.245-306, 1984.

CHLENOV, V. A.; MIKHAILOV, N. V. 1965. In: PAKOWSKI, Z. MUJUMDAR, A. S.; STRUMILLO, C. “Theory and application of vibrated beds and vibrated fluid bed for drying process”, *Advances in Drying*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.211-226, 1984.

CORDEIRO, L. G. Caracterização e viabilidade econômica do bagaço de malte oriundo de cervejarias para fins energéticos. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, UFPB. 2011 (dissertação).

CORDEIRO, F. G. Desenvolvimento de *Pennisetum glaucum L.* com cobertura polimérica: revestimento, secagem, caracterização, fortificação e recomposição. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006 (trabalho de conclusão de curso).

- COSTA, A. B. S. Análise do Desempenho do Leito Vibrofluidizado na Secagem de Pasta, PPGEQ/UFSCar – São Carlos – SP, 2017 (tese).
- COSTA, J. M. B.; MATTOS, W. R. S.; BIODI, P.; CARVALHO, D. D. “Composição química bromatológica do resíduo de cervejaria”, Boletim da Indústria Animal, Nova Odessa, v.51, n.1, p.21-26, 1994.
- DALEFFE, R. V. Análise da Presença de Glicerol no Comportamento Fluidodinâmico de Leitos Fluidizado e Vibrofluidizado, PPGEQ/UFSCar – São Carlos – UFSCar, 2002 (dissertação).
- DALEFFE, R. V. Contribuições para a Análise do Comportamento Fluidodinâmico de um Leito Vibrofluidizado, PPGEQ/UFSCar – São Carlos – UFSCar, 2005 (tese).
- DALEFFE, R. V.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. “Analysis of particle size distributions on fluidynamic behavior segregation patterns of fluidized, vibrated and vibrofluidized bed”, Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, v.2, p.3-11, 2008.
- DERJAGUIN, B. V.; MULLER, V. M.; TOPOROV, Y. P. “Effect of contact deformations on the adhesion of particles”, Journal of Colloid Interface Science, v. 53, p. 314-324, 1975.
- DERMIBAS, A. Energy Convers. Manage. v.8, 2106p. 2008.
- DIDRIKSEN, H. “Model based predictive control of a rotary dryer”, Chemical Engineering Journal, v. 86, n. 1-2, p. 53-60, 2002.
- DING, Y. L.; SEVILLE, J. P. K.; FORSTER, R. N.; PARKER, D. J. “Solids motion in rolling mode rotating drums operated at low to medium rotational speeds”, Chemical Engineering Science, v. 56, n. 7, p. 1769-1780, 2001.
- DRIVER, J. R. D.; HARDIN, M. T.; HOWES, T.; PALMER, G. “Effect of lifter design on drying performance in Rotary dryers”, Drying Technology, v. 21, n. 2, p.369-381, 2003.
- DUCHESNE, C.; THIBAUT, J.; BAZIN, C. “Modeling of the solids transportation within an industrial Rotary dryer: a simple model”. Industrial Engineering Chemistry Research, v.35, n.7, p.2334-2341, 1996.
- 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, Boston, USA: Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p. 169-172, 1986.
- ERDÉSZ, K.; ORMOS, Z. “Expansion and Pressure Drop in Vibrofluidized Layers”, *Hungria Journal of Industrial Chemistry*, n.1, v.11, p.169-177, 1983.
- ESCADA, A. B. Análise da viabilidade do uso de bagaço de malte de cervejarias para cogeração de energia. UFSCar, 2018 (trabalho de conclusão de curso).
- FEILER, A. A.; STIERNSTEDT, J.; THEANDER, K.; JENKINS, P.; RUTLAND, M. W. “Effect of capillary condensation on friction force and adhesion”, *Langmuir*, v. 23, p. 517-522, 2007.
- FELICETTI, M. A. Determinação da força de adesão entre partículas e uma superfície aplicando a técnica centrífuga, UFSCar, São Carlos – SP, 2004. (dissertação)
- FERREIRA, I. M. P. L. V. O.; PINHO, O.; VIEIRA, E.; TAVARELA, J. G. “Brewer’s *Saccharomyces* Yeast Biomass: Characteristics and Potential Applications”, *Trends Food Sci. Technol.*, v. 21, p. 77-84, 2010.
- FILLAUDEAU, L.; BLANPAIN-AVET, P.; DAUFIN, G. “Water, wastewater and waste management in brewing industries.” *J. C. Prod.*, v. 14, p. 463-471, 2006.
- FINZER, J.R.D.; KIECKBUSCH, T.G. Secagem em Sistemas com Vibração, In: FREIRE, J.T.; SARTORI, D.J.M. *Tópicos Especiais de Secagem*, São Carlos – SP, p.87-127, 1992.
- FOUST, A. S.; CLUMP, C. W.; WENZEL, L. A. *Princípios das Operações Unitárias*, Rio de Janeiro: LTC, 1982, Cap. 18.
- FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B. Drying of Solutions, Slurries and Pastes. In: EPSTEIN, N. and GRACE, J. R. *Spouted and spouted-fluid beds: fundamentals and applications*, New York, 206-221, 2011.
- FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B.; NASCIMENTO, B.S. *A Review of Paste Drying with Inert Particles as Support Medium*, 2012.
- GADY, B.; REIFENBERGER, R.; RIMAI, D. S. “Contact electrification studies using atomic force microscopic techniques”, *Applied Physics*, v. 84, p. 319, 1998.
- GARCIA, V. S.; FERREIRA, M. C. “Secagem de folhas e sementes em panela rotativa.” *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, Búzios – RJ, 2012.

- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. "Aerodynamic and thermal characteristics of vibrated fluid beds: a review", *Drying '80*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.141-150, 1980.
- HINDS, W. C. "Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles", Wiley-Interscience, v. 2, p. 141-144, 1998.
- HUIGE, N. J. "Brewery by-products and effluents", In: PRIEST, F. G. e STEWART, G. G. *Handbook of brewing*, CRC Press, p. 656-713, 2006.
- JARA, E. R. P. *O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil*. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT, 1989.
- JIANG, M.; CHEN, K.; LIU, Z.; WEI, P.; YING, H.; CHANG, H. "Succinic acid production by *Actinobacillus succinogenes*: using spent brewer's yeast hydrolysate as a nitrogen source", *Biotechnology and Applied Biochemistry*, v. 160, p. 244-254, 2009.
- JINESCU, G.; TABRENCU, C.; IONESCU, E.; PETRESCU, M.; JINESCU, C., "Hydrodynamic Aspects at Vibrated Fluidized Drying of Polydisperse Powdery Materials", *Drying '2000, Proceedings of 12th International Drying Symposium*, Noodrwijkerhout, Holanda, 2000.
- JOHNSON, C. O.; HUBER, J. T. "Aerobic storage and utilization of ammoniated distillers wet grains for lactating dairy cow", *Journal of Dairy Science*, v.70, n.7, p.1417-1425, 1987.
- KELLY, J. J. "Flight design in rotary dryers", *Drying Technology*, v. 10, n. 4, p. 979-993, 1992.
- KELLY, J. J. Rotary drying, In: MUJUNDAR, A. S. *Handbook of Industrial Drying*. New York, Marcell Dekker Inc., p.161-183, 1992.
- KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B.; KREMALIS, C. "Process design of rotary dryers of olive cake", *Drying Technology*, v. 20, n. 4-5, p. 771-788, 2002.
- KRUPP, H. "Particle adhesion theory and experiment", *Advances in Colloid and Interface Forces*, v.1, n.2, p.111-239, 1967.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. *Fluidization Engineering*, 2 Ed, New York: Academic Press, 1991, Cap. 1.

- KURTZMAN, C. P.; ROBNETT, C. J. "Phylogenetic relationships among yeasts of the 'Saccharomyces complex' determined from multigene sequence analyses", *FEMS Yeast Research*, v. 3, p. 417-432, 2003.
- LAMOOLPHAK, W.; GOTO, M.; SASAKI, M.; SUPHANTHARIKA, M.; MUANGNAPOHA, C.; PROMMUAG, C. "Hydrothermal decomposition of yeast cells for production of proteins and amino acids", *Journal of Hazardous Materials B*, v. 137, p. 1643-1648, 2006.
- LARA-FLORES, M.; OLVERA-NOVOA, M. A.; GUZMÁN-MENDEZ, B. E.; LOPEZ-MADRID, W. "Use of the bacteria *Streptococcus faecium* and *Lactobacillus acidophilus*, and the yeast *Saccharomyces cerevisiae* as growth promoters in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)", *Aquaculture*, v. 216, p. 193-201, 2002.
- LEITE, F. L.; Caracterização de forças de adesão em materiais utilizando a microscopia de força atômica, USP, São Carlos – SP, 2002. (dissertação)
- LEWIS, M. J.; YOUNG, T. W. *Brewing*, 2ª edição, Kluwer Academic / Plenum Publishers, - New York, New York, 2002.
- LI, P.; GATLIN, D. M. "Evaluation of Brewer's Yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) as Feed Supplement for Hybrid Striped Bass (*Morone chrysops* x *M. saxatilis*)". *Aquaculture*, v.219, p.681-692, 2003.
- LIEPINS, J.; KOVACOVA, E.; SHVIRKSTS, K.; GRUBE, M.; RAPOPORT, A.; KOGAN, G. "Drying enhances immunoactivity of spent brewer's yeast cell wall β -D-glucans". *Journal of Biotechnology*, v. 206, p. 12-16, 2015.
- LIMA, U. de A.; BASSO, L. C.; AMORIM H. V. "Produção de Etanol". In: Almeida Lima, U., Aquarone, E., Borzani, W., Schmidell, W. *Biotechnologia Industrial (Processos Fermentativos e Enzimáticos)* v. 3, p. 01-43. São Paulo: Edgar Blücher, 2001.
- LISBOA, M. H.; VITORINO, D. S.; DELAIBA, W. B.; FINZER, J. R. D.; BARROZO, M. A. S. "A study of particle motion in rotary dryer." *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 24, n. 3, p. 365-374, 2007.
- LOPEZ-DIAS, T.; FLANNIGAN, B. "Production of patulin and cytochalasin by *Aspergillus clavatus* during malting of barley and wheat." *International Journal of Food Microbiology*, v.35, n.2, p. 129-136, 1997.

- LUNA-SOLANO, G.; SALGADO-CERVANTES, M. A.; RAMIRES-LEPE, M.; GARCIA-ALVARADO, M. A.; RODRIGUES-JIMENES, G. C. “Effect of Drying Type and Drying Conditions Over Fermentative Ability of Brewer’s Yeast”, *Journal of Food Process Engineering*, Trumbull, Connecticut, v. 26, 135-147, 2003.
- LUZ, G. R. Modelagem matemática e análise do secador rotativo de farelo de soja. UEM. 2006.
- MACHADO, M. D.; JANSSENS, S.; SOARES, H. M.; SOARES, E. V. “Removal of heavy metals using a brewer’s yeast strain of *Saccharomyces cerevisiae*: advantages of using dead biomass”, *Journal of Applied Microbiology*, v. 106, p. 1792-1804, 2009.
- MALHOTRA, K.; LAW-KWET-CHEONG, L.; MUJUMDAR, A. S. “Pressure drop characteristics for vibrated beds of dry and sticky particles”, *Powder Technology*, The Netherlands, v.39, p.101-105, 1984.
- MATHIAS, T. R. S.; DE MELLO, P. P. M.; SERVULO, E. F. C. “Caracterização de resíduos cervejeiros.” *Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, Florianópolis - SC, 2014.
- MEDEIROS, M.F.D. Influência da Composição Química dos Materiais no Desempenho do Processo de Secagem de Polpas de Frutas em Leito de Jorro, FEQ/UNICAMP – Campinas – SP, 2001 (tese).
- MEILI, L. Contribuições ao Estudo da Fluidodinâmica e da Secagem de Pastas em Leitos Fluidizado e Vibrofluidizado, PPGEQ/UFSCar – São Carlos – SP, 2009 (tese).
- MEILI, L.; FREIRE, F. B.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. “Fluid dynamics of vibrofluidized beds during the transiente period of water evaporation and drying solutions”, *Chemical Engineering and Technology*. Germany, n.10, v.35, p.1803-1809, 2012
- MELO, K.P. Secagem de Biomassa de Levedura (*Saccharomyse Cerevisiae*) em Secador Atmosférico Condutivo com Agitação Mecânica: Caracterização e Avalização do Produto Seco como Bioadsorvente e Complemento Nutricional, FEQ/UNICAMP – Campinas – SP, 2010 (tese).
- MENEZES, L. C. M. A. O.; YAMASHITA, M. Produção de tijolos ecológicos com cinzas de caldeira e bagaço de malte, UTFPR – Ponta Grossa – PR, 2017 (trabalho de conclusão de curso).

- MERZ, R. G. "Direct heat rotary drying apparatus", *The Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 13, n. 5, p. 449-452, 1921.
- MEZA, J.; GIL, A.; CORTÉS, C.; GONZÁLES, A. "Drying costs of woody biomass in a semi-industrial experimental rotary dryer." *European Conference and Exhibition on Biomass for Energy, Biomass Resources*. 2008.
- MORIS, V.A.S. *Fluidodinâmica e secagem do ácido adípico em leito vibrofluidizado*, UNICAMP – Campinas – SP, 2002 (tese).
- MUJUMDAR, A. S. *Handbook of Industrial Drying*, 3. Ed. Taylor & Francis Group, 2006.
- MURDOCK, F. R.; HODGSON, A. S.; RILEY JR, R. E. "Nutritive value of brewers grains for lactating dairy cows", *Journal of Dairy Science*, Champaign, v.64, p.1-14, 2006.
- MUSHTAYEV, V. I.; KOROTKOV, B. M.; CHEVILENKO, V. A.; EFIMOV, M. G.; PLANOVSKI, A. N. *Teoret. Osnovy khim.* 1972. In: STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. *Drying of Granular Products in Vibrofluidized Bed*. *Drying '80*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.211-226, 1980.
- NGUYEN, T. T.; RAMBANAPASI, C.; BOER, A. H.; FRIJLINK, H. W.; VEM, P. M. "A centrifuge method to measure particle cohesion forces to substrate surfaces: the use of a forces distribution concept for data interpretation", *International Journal of Pharmaceutics*, v. 393, p. 88-95, 2010.
- NITZ, M. *Fluidodinâmica, secagem e recobrimento em leito pulso-fluidizado*, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006 (tese).
- NOVY, M. G.; KIECKBUSH, T. G. *Secagem de Alimentos Líquidos em Leito Vibrofluidizado Contendo Inertes*, *Anais do XV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (XV ENEMP)*, Uberlândia – MG,UFU, v.2, p.430-440, 1988.
- OCHOA-MARTINEZ, L.A.; BRENNAN, J.G.; NIRANJAN, K. "Spouted Bed for Liquid Foods", *Food control*, v4, p.41-45, 1993.
- OLÁH, A; VANCISO, G. J. "Characterization of adhesion at solid surfaces: Development of an adhesion-testing device", *European Polymer Journal*, p.2803-2823, 2005.

- OLIVA-TELES, A.; GONÇALVES, P. “Partial replacement of fish-meal by brewer’s yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) in diets for sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles”, *Aquaculture*, v. 202, p. 269-278.
- OLIVEIRA, W.P.; FREIRE, J.T. Aspectos tecnológicos dos processos de recobrimento de partículas. In: Freire, J.T e Sartori, D.J.M. Tópicos Especiais de Secagem. São Carlos: Editora UFSCar, 2003. v. 1, p. 211-251.
- OLIVEIRA JUNIOR, A. B. de. Estudo da Transferência de Calor e Massa no Processo de Secagem em Leito Vibrofluidizado, PPGEQ/UFSCar – São Carlos – SP, 2003 (tese).
- ORTUÑO, J.; CUESTA, A.; RODRÍGUEZ, A.; ESTEBAN, M. A.; MESEGUER, J. “Oral administration of yeast, *Saccharomyces cerevisiae*, enhances the cellular innate immune response of gilthead seabream (*Sparus aurata* L.)” *Veterinary Immunology and Immunopathology*, v. 85, p. 41-50, 2002.
- PERA, H. Geradores de vapor: um compêndio sobre a conversão de energia com vistas a preservação da ecologia / Hildo Pera – Illinois, 1981.
- PERAZZINI, H. Secagem de resíduos cítricos em secador rotativo. UFSCar, 2011 (dissertação).
- PERAZZINI, H. Secagem de sólidos porosos granulares. UFSCar, 2014 (tese).
- PETEAN, P. G. C. Determinação da força de adesão entre partícula e superfícies rugosas através da técnica centrífuga, UFSCar, São Carlos – SP, 2014. (tese)
- PINTO, A. P. O. P.; PRADO, M. M; SARTORI, D. J. M. “Comparative analysis of seed coating techniques to improve germination and seedling establishment of millet”. In: International Drying Symposium, 18., 2012, Xiamen – China.
- PODCZECK, F.; NEWTON, J. M. “Development of an ultracentrifuge technique to determine the adhesion and friction properties between particles and surfaces”, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, v. 84, n. 9, p. 1067-1071, 1995.
- POLAN, C. E.; HERRINGTON, W. A.; WARK, W. A. “Milk production response to diets supplemented with dried grains, wet brewers grains, or soybean meal”, *Journal of Dairy Science*, v.68, n.8, p.2016-2026, 1985.

- POVEDA PARRA, A.R.; MOREIRA, I.; FURLAN, A.C.; CARVALHO, P.L.O.; PEÑUELA SIERRA, L.M.; FILHO, C.C. (2013), “Levedura Mista (Cerveja + Cana-de-açúcar) Spray-dry na Alimentação de Leitões na Fase Inicial”, Arch. Zootec., 62 (238), p.199-209.
- REINATO, C. H. R.; BORÉM, F. M. “Variação da temperatura e do teor de água do café em secador rotativo usando lenha e GLP como combustíveis” Eng. Agríc., Jaboticabal, v.26, n.2, p.561-569, 2006.
- ROCHA, A. A.; VIEIRA NETO, J. L.; SANTOS, K. G.; “Secagem de resíduos de malte em uma estufa solar com cobertura tipo telhado.” Anais do Simpósio Comemorativo 40 Anos da Área de Sistemas Particulados DEQ/UFSCar, p. 607-617, 2019.
- ROCHA, T. A. F. Contribuições ao Estudo da Secagem da Borra de Café em Leito Vibrofluidizado, PPGEQ/UFSCar – São Carlos – SP, 2019 (dissertação).
- RUMPF, H. “Particle adhesion”, In: Sastra, K. V. S. (Ed.) agglomeration 77, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, p. 97-129, 1977.
- SCHALCH, V.; LEITE, W. C. A.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; CASTRO, M. C. A. A. “Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos”, USP, 2002.
- SCHUBERT, H. “Principles of agglomeration.” International Chemical Engineering, v. 21 (3), p. 363-377, 1981.
- SHARPLES, K.; GLIKIN, P. G.; WARNE, R. “Computer simulation of rotary dryers”, Transactions Institute of Chemical Engineers, v. 42, p. 275-284, 1964.
- SHERRINGTON, P. J.; OLIVER, R. Granulation, Heyden & Sons, London, 1981.
- SILVA, C. Produção de Etanol a Partir da Fração Hemicelulósica do Bagaço de Cana Usando Glicose Isomerase Coimobilizada com Saccharomyces Cerevisiae, UFSCar, 2013.
- SILVA, M. B; MORAIS, A. S. “Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação.” Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 28., 2008.
- SILVA, M. G.; LIRA, T. S.; ARRUDA, E. B.; MURATA, V. V.; BARROZO, M. A. S. “Modelling of fertilizer drying in a rotary dryer: parametric sensitivity analysis”. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 29, p. 359-369, 2012.

- SONG, Y.; THIBAUT, J.; KUDRA, T. "Dynamic characteristics of solids transportation in rotary dryers", *Drying Technology*, v. 21, n. 5, p. 755-773, 2003.
- SOUSA, F. T.; SILVA, M. A. P.; OLIVEIRA, D. E. A.; PLÁCIDO, G. R.; CAGNIN, C. MOURA, L. C.; SOUZA, D. G.; CALIARI, M.; LIMA, M. S. "Modelagem matemática da secagem e propriedades físicas e funcionais do bagaço de malte." *Global Science and Technology*. 2016.
- SOUZA, M. S.; SILVA, D. A.; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R. C. "Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda*." *Revista Floresta*, v. 42, n. 2, p. 325 - 334, 2012.
- SPREUTELS, L.; HAUT, B.; CHAOUKI, J; BERTRAND, F.; LEGROS, R. "Conical spouted bed drying of baker's yeast: experimentation and multi-modeling", *Food Research International*, v. 62, p. 137-150, 2014.
- STEWART, P. J. "Particle interaction in pharmaceutical systems", *Pharm. International*, v.7, p. 146-149, 1986.
- 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, New York, v. 1, p. 211-226, 1980.
- TANG, Z.; CENKOWSKI, S.; MUIR, W. E. "Modelling the superheated-steam drying of a fixed bed of brewer's spent grain", *Biosystems Engineering*, 87 (1), p.62-77, 2004.
- TOBISKA, S.; KLEINEBUDDE, P. "Coating uniformity and coating efficiency in a Bohle Lab-Coater using oval tablets." *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, v. 56, p. 3-9, 2003.
- TRUJILLO, J. G.; TEIXEIRA, M. A. S.; LIMA, A. H. A.; MONTÃO, D. P.; RIET-CORREA, G.; CERQUEIRA, V. D.; JÚNIOR, P. S. B. "Intoxicação por etanol em bovinos alimentados com bagaço de malte acrescido de levedura de cerveja." *Pesq. Vet. Bras.*, Rio de Janeiro, v. 38, n. 3, p. 382-386, Mar. 2018.
- VALE, A. T.; DENTIL, V. L. G.; GONÇALVES, J. C.; DA COSTA, A. F. Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café (*Coffea arabica*, L)

e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*), Duke. Cerne, vol. 13, número 004, Universidade Federal de Lavras, Brasil, pp. 416-420, 2007.

VIEIRA, M. S.; SANTOS, V. M.; VIEIRA, A. A. “Composição química e digestibilidade dos nutrientes do bagaço de cevada determinados em suínos em terminação.” IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação, 2009, São José dos Campos - SP. Anais do IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação, 2013.

WELTMAN, R.M., Reology, v. 3, Academic Press, Nova Iorque, 1960.

WHITE, L. A.; NEWMAN, M. C.; CROMWELL, G. L.; LINDERMAN, M. D. “Brewers dried yeasts as a source of mannan oligosaccharides for weanling pigs”, Journal of Animal Science, v. 80, p. 2619-2628, 2002.

YLINIEMI, L.; KOSHINEN, J.; LEIVISKA, K. “Data-driven fuzzy modeling of a rotary dryer”. International Journal of Systems Science, v. 34, n.14-15, p. 819-836, 2003.

YOUSSEFI, S.; EMAM-DJOMEH, Z.; MOSAVI, S. M. “Comparison of Artificial Neural Network (ANN) and Response Surface Methodology (RSM) in the prediction of quality parameters of spray-dried pomegranate juice”, Drying Technology. London, v. 27, p.70-76, 2003.

ZABANITOU, A. A. “Simulation of forestry biomass drying in a rotary dryer.” Drying Technology, v. 18, n. 7, p. 1415-1431, 2000.

ZIMON, A. D. “Adhesion of dust and powders”, Consultants Bureau, New York, p. 109-125, 1982.