

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

EUDES ADAN GARBIN

**ESTUDO EXPLORATÓRIO DA SECAGEM TÉRMICA DE RESÍDUO DE
CERVEJARIA BAGAÇO DE MALTE**

CURITIBA

2022

EUDES ADAN GARBIN

**ESTUDO EXPLORATÓRIO DA SECAGEM TÉRMICA DE RESÍDUO DE
CERVEJARIA BAGAÇO DE MALTE**

Exploratory study of thermal drying of brewer's spent grains malt bagasse

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil,
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Dr. Flávio Bentes Freire

Coorientador: Dr. Fábio Bentes Freire

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado para fins não comerciais, desde que atribuam ao autor o devido crédito. Os usuários não têm que licenciar os trabalhos derivados sob os mesmos termos estabelecidos pelo autor do trabalho original.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba**



EUDES ADAN GARBIN

ESTUDO EXPLORATÓRIO DA SECAGEM TÉRMICA DE RESÍDUO DE CERVEJARIA BAGAÇO DE MALTE.

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Meio Ambiente.

Data de aprovação: 18 de Dezembro de 2019

Prof Flavio Bentes Freire, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Maria Do Carmo Ferreira, Doutorado - Universidade Federal de São Carlos (Ufscar)

Prof Thomaz Aurelio Pagioro, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 16/02/2022.

Dedico este trabalho à minha família e à
minha mãe **Ivone de Moraes Garbin** (*in
memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não atenderão a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas de que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Flavio Bentes Freire, ao Coorientador Fábio Bentes Freire e ao Professor José Teixeira Freire pela sabedoria com que me guiaram nesta trajetória.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), expresso minha gratidão, aos professores e aos coordenadores, pela oportunidade, compreensão e auxílio.

Ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) e ao Núcleo de Pesquisa Tecnológica (NPT) do Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACOC) pelo auxílio na condução de ensaios e análises.

Ao Centro de Pastas e Sementes do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos (UFScar), que me possibilitou realizar muitos ensaios de secagem e ao Guilherme Henrique Alves, colega da referida universidade, que me ajudou muito nos ensaios e me acolheu em sua própria residência.

Gostaria de deixar registrado, também, o meu infinito amor e reconhecimento à minha família, meu Pai Ivair Garbin, meu irmão Willian e minha irmã Aline e, em especial, a minha noiva Soeli Fernandes, pois acredito que, sem o apoio deles, seria ainda mais difícil vencer essa etapa da vida.

Enfim, a todos os que, por algum motivo, contribuíram para a realização desta pesquisa.

“Durante minha trajetória aprendi que haverá sempre um amanhã. Aprendi também que mesmo que se fechem todos os meus caminhos, ainda assim, vão existir os atalhos.” **Ivone de Moraes Garbin.**

RESUMO

GARBIN, Eudes Adan. **Estudo exploratório da secagem térmica de resíduo de cervejaria bagaço de malte**. 101 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

O presente trabalho teve como objetivo realizar um estudo exploratório da secagem térmica e desague do resíduo sólido de cervejaria artesanal – bagaço de malte – com a intenção de aumentar sua vida útil, removendo umidade. O bagaço de malte foi caracterizado com microscopia eletrônica de varredura quanto à morfologia e, elementarmente, com espectroscopia de energia dispersiva. Estudou-se diferentes técnicas de secagem térmica – estufa sem recirculação de ar; túnel de vento; drageadeira com soprador de ar acoplado – e desaguamento com prensa hidráulica manual. A composição elementar do bagaço de malte apresentou maiores concentrações para os elementos silício, carbono, oxigênio, respectivamente, e a morfologia interna com aspectos arredondados. Foi possível identificar que a ocorrência de silício está associada a casca do bagaço de malte. Todos os dados e resultados produzidos foram testados estatisticamente e apresentaram comportamento não paramétrico. Os resultados do estudo de secagem para as diferentes técnicas aplicadas apresentaram-se melhores para a convecção em relação a estufa sem recirculação de ar, quando comparados os tempos para atingir a umidade de equilíbrio em todas as faixas dos ensaios. Ainda comparativamente, os processos de secagem por convecção em túnel de vento apresentaram maior estabilidade, maiores valores de taxa de secagem média e menor tempo de secagem – 255 minutos a 78,7°C. Para os ensaios em drageadeira, foram caracterizadas três fases distintas de ajuste de temperatura do bagaço de malte em relação a temperatura da parede interna da drageadeira. A primeira fase foi de estabilização inicial entre essas temperaturas; a segunda foi caracterizada pela diferença de temperatura entre elas (temperatura da parede aumenta enquanto a temperatura do bagaço de malte se mantém, indicando taxa de secagem constante e transferência de umidade – calor e massa – do bagaço de malte para o ar de secagem); e a terceira fase de estabilização final (quando a temperatura do bagaço de malte atinge e ultrapassa a temperatura da parede interna, indicando que a umidade de equilíbrio foi atingida). O menor tempo de secagem para a drageadeira foi de 180 minutos para as condições de operação c3 e c4. No desague em prensa houve remoção de 40% da umidade em base úmida para pressão aplicada de 1,0 t. Concluiu-se que é promissor o uso do desaguamento mecânico para remoção de umidade do bagaço de malte e a secagem térmica por convecção se mostrou mais eficaz em relação a secagem por condução, para todas as faixas de temperatura estudadas e, ainda, que a secagem em drageadeira nas condições c3 e c4 apresentou o menor tempo de secagem dentre todos os ensaios – 180 minutos.

Palavras-chave: resíduo sólido; indústria cervejeira; secagem térmica; secagem convectiva; secagem com drageadeira; desague de resíduo sólido; remoção de umidade; cinética de secagem.

ABSTRACT

GARBIN, Eudes Adan. **Exploratory study of thermal drying of brewer's spent grains malt bagasse**. 101 f. Dissertação – Graduate Program in Civil Engineering (PPGEC) – The Federal University of Technology – Paraná. Curitiba, 2021

The present work had as objective to carry out an exploratory study of the thermal drying and emptying of the solid residue of craft brewery - malt bagasse - with the intention of increasing its useful life cycle by removing moisture. Malt bagasse morphology was characterized with scanning electron microscopy (SEM) and elementally with dispersive energy spectroscopy (EDS). Different thermal drying techniques were carried out studied – heating chamber without air recirculation; wind tunnel, dredger with attached air blower - and dewatering with manual hydraulic press. The elemental composition of the malt bagasse showed higher concentrations for the elements silicon, carbon, oxygen, respectively, and the internal morphology with rounded aspects. It was possible to identify that the occurrence of silicon is associated with the husk of the malt bagasse. All data and results produced were tested statistically and showed non-parametric behavior. The results of the drying study for the different applied techniques were better for convection in relation to the heat chamber without air recirculation, when comparing the times to reach equilibrium moisture in all ranges of the tests. Still comparatively, the convection drying processes in the wind tunnel showed greater stability, higher values of average drying rate and shorter drying time – 255 minutes at 78.7°C. For the dredge tests, three distinct phases of temperature adjustment of the brewer's spent grains were characterized in relation to the temperature of the internal wall of the dredge. The first phase is of initial stabilization between these temperatures, the second is characterized by the temperature difference between them (wall temperature increases while the temperature of the brewer's spent grains remains, indicating constant drying rate and moisture transfer – heat and mass) and the third final stabilization phase (when the temperature of the malt bagasse reaches and exceeds the temperature of the inner wall, indicating that the equilibrium moisture has been reached). The shortest drying time for the dredger was 180 minutes for operating conditions c3 and c4. In the press drain, 40% of the moisture was removed on a wet basis for an applied pressure of 1.0 t. It is concluded that the use of mechanical dewatering to remove moisture from the malt bagasse is promising and the thermal drying by convection proved to be more effective in relation to the drying by conduction for all the studied temperature ranges and, further, that the drying in dredge under conditions c3 and c4 it had the shortest drying time among all tests – 180 minutes.

Keywords: beer industry; brewer's spent grains (BSG); thermal drying; convective drying; solid waste treatment; moisture removal; drying kinetics curves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção de cerveja no Brasil e no mundo em milhões de hectolitros durante o período de 2002 a 2018	20
Figura 2 – Em barras: Quantidade de cervejarias registradas no MAPA; em linha: Produção de cerveja em bilhões de litros. Período: 2002 a 2018	22
Figura 3 – Em barras: Quantidade de cervejarias registradas no MAPA. Em linha: Densidade cervejeira em mil habitantes/unidade	24
Figura 4 – Distribuição das microcervejarias no Paraná.....	25
Figura 5 – Fluxograma geral de produção de cerveja	27
Figura 6 – Tipos de cevada e maltes	28
Figura 7 – Obtenção e preparação do malte de cevada.....	29
Figura 8 – Tina de mosturação	30
Figura 9 – Fundo da tina de filtração.....	31
Figura 10 – Tanques de fermentação	32
Figura 11 – Em barras: Geração de bagaço de malte em milhões de toneladas. Em linha: Percentual de participação da geração mundial. Período de 2002 a 2018.....	34
Figura 12 – Aplicações potenciais do bagaço de malte.....	36
Figura 13 – Curvas típicas de isotermas de equilíbrio.....	39
Figura 14 – Preparação de amostras para MEV: a) malte de cevada; b) liquidificador de facas; c) malte triturado; d) amostras em <i>stubs</i> para análise no MEV/EDS.....	51
Figura 15 – Equipamento MEV com EDS acoplado.....	52
Figura 16 – Esquema de uma termobalança para análise termogravimétrica e análise térmica diferencial	53
Figura 17 – Estufa Biopar.....	55
Figura 18 – Balança Gehaka.....	56
Figura 19 – Arranjo do ensaio em estufa sem recirculação DEQ/UFSCar.....	57
Figura 20 – Túnel de vento	59
Figura 21 – Arranjo na região de secagem no túnel de vento	59
Figura 22 – Esquema de funcionamento da drageadeira	60
Figura 23 – Partes componentes da drageadeira.....	60
Figura 24 – Amostras de bagaço de malte durante ensaio em drageadeira	61

Figura 25 – Arranjo do soprador de ar em relação ao eixo da drageadeira	62
Figura 26 – Recipiente em polipropileno utilizado para acondicionamento do bagaço de malte durante a prensagem e desaguamento	63
Figura 27 – Peça adaptada para distribuição de pressão na superfície de contato ..	64
Figura 28 – Detalhe do arranjo da prensa	64
Figura 29 – Filtro utilizado no ensaio de desaguamento em presa hidráulica	65
Figura 30 – Coleta(a) e armazenamento(b) e do bagaço de malte(c) utilizado nos ensaios de secagem	66
Figura 31 – Morfologia do malte de cevada realizada por MEV com indicação dos pontos de análise por EDS: a) Malte Melanoidina – casca; MAG 300x; b) Melanoidina – interior; MAG 2500x	68
Figura 32 – Composição elementar com EDS nas regiões: (a) casca, (b) esfera e (c) região “membranosa” do malte tipo Melanoidina	69
Figura 33 – Morfologia do malte de cevada realizada por MEV com indicação dos pontos de análise por EDS: a) Malte <i>Pale Ale</i> – casca; MAG 1500x; b) Malte <i>Pale Ale</i> – interior; MAG 2500x	70
Figura 34 – Análise da composição elementar com EDS nas regiões: (a) casca, (b) maior esfera e (c) menor esfera do malte tipo Pale Ale	71
Figura 35 – Morfologia do malte de cevada realizada por MEV com indicação dos pontos de análise por EDS: a) Malte <i>Pilsen</i> – casca; MAG 1500x; b) Malte <i>Pilsen</i> – interior; MAG 2500x	72
Figura 36 – Análise da composição elementar com EDS nas regiões: (a 1) e (a 2) casca, (b 1)	73
Figura 37 – Morfologia do malte de cevada realizada por MEV com indicação dos pontos de análise por EDS: a) Malte de trigo – casca; MAG 1000x; b) Malte de trigo – interior; MAG 2500x	74
Figura 38 – Análise da composição elementar com EDS nas regiões: (a) casca, (b 1, 2 e 3) da região interna do malte de trigo	75
Figura 39 – Análise termogravimétrica em termos de variação % de massa em função da temperatura; $m = f(t\text{ }^{\circ}\text{C})$	77
Figura 40 – Derivada primeira da Análise Termogravimétrica (DTG)	77
Figura 41 – Análise Térmica Diferencial (ATD)	78
Figura 42 – Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios de secagem em estufa sem recirculação	79

Figura 43 – Taxa de secagem para estufa sem recirculação de ar em função da umidade em base seca	80
Figura 44 – Curvas típicas de taxa de secagem em função da umidade em base seca	80
Figura 45 – Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios de secagem em túnel de vento	81
Figura 46 – Curva de cinética de secagem para túnel de vento: taxa de secagem em função da umidade em base seca.....	82
Figura 47 – Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios em drageadeira.....	83
Figura 48 – Curva de cinética de secagem para drageadeira: taxa de secagem em função da umidade em base seca em diferentes temperaturas e inclinações	84
Figura 49 – Gráfico de correlação linear para c1 e c2 – drageadeira	85
Figura 50 – Gráfico de correlação linear para c3 e c4 – drageadeira	85
Figura 51 – Perfil de temperatura para c1	86
Figura 52 – Perfil de temperatura para c2	87
Figura 53 – Perfil de temperatura para c3	87
Figura 54 – Perfil de temperatura para c4	88
Figura 55 – Umidade (b.u.) em função da pressão aplicada ao bagaço de malte sem feltro	89
Figura 56 – Umidade (b.u.) em função da pressão aplicada ao bagaço de malte com feltro	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise de correlação entre a quantidade de fábricas e a produção de cerveja no Brasil.....	23
Tabela 2 – Indústria e densidade cervejeira do Brasil	24
Tabela 3 – Composição química bagaço de malte	35
Tabela 4 – Minerais presentes no bagaço de malte	35
Tabela 5 – Condições operacionais e variáveis dos ensaios de secagem	54
Tabela 6 – Condições operacionais para os ensaios em drageadeira (c1 a c4).....	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dados estatísticos para a taxa de secagem	91
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATD	Análise Térmica Diferencial
ATG	Análise Termogravimétrica
BM	Bagaço de Malte
BN	Borracha Natural
BPn	Borracha Triturada de Pneus Usados
BSG	<i>Barley Spent Grains</i>
CERVBRASIL	Associação Brasileira da Indústria da Cerveja
CMCM	Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais
DACOC	Departamento Acadêmico de Construção Civil
DEQ	Departamento de Engenharia Química
DTG	Análise Termogravimétrica
DTR	Tempo Médio de Residência
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
FT-IR/ATR	<i>Fourier Transform Infrared Attenuated Total Reflectance Molecular Spectroscopy</i>
GN	Gás Natural
HCl	Ácido Clorídrico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPA	<i>Indian Pale Ale</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NPT	Núcleo de Pesquisa Tecnológica
PCS	Poder Calorífico Superior
PIB	Produto Interno Bruto
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PPGEC	Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil
PR	Paraná
PROCERVA	Associação das Microcervejarias do Paraná
RC	Resíduo de Cervejaria
RPM	Rotação por Minuto
RPn	Resíduos de Pneus
RSM	Resíduos Sólidos Municipais
SEBRA	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas

TVM	Taxa Volumétrica do Material
UASB	<i>Up-flow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UFScar	Universidade Federal de São Carlos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos.....	19
1.2	Delimitação da pesquisa.....	19
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	20
2.1	Panorama da indústria cervejeira	20
2.2	A produção de cerveja	26
2.2.1	Cevada e malte	27
2.2.2	Mosturação.....	30
2.2.3	Filtração e fervura do mosto	30
2.2.4	Fermentação	31
2.2.5	Maturação	32
2.2.6	Envase	32
2.3	Bagaço de malte	33
2.3.1	Composição e características.....	33
2.4	Fundamentos de secagem.....	36
2.4.1	Conceitos e terminologias	37
2.5	Estudos de secagem (cereais, alimentos e resíduos)	41
2.6	Estudos de secagem de bagaço de malte	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	Coleta do resíduo de cervejaria.....	49
3.2	Caracterização do bagaço de malte	50
3.2.1	Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) com EDS acoplado.....	50
3.3	Análises térmicas	52
3.3.1	Análise termogravimétrica e análise térmica diferencial	52
3.4	Os ensaios de secagem	53
3.4.1	Secagem em estufa sem recirculação	54
3.5	Secagem em túnel de vento.....	58
3.6	Secagem em drageadeira	60
3.7	Desaguamento em prensa hidráulica manual	62
3.8	Estudo de encolhimento “<i>Shrinkage</i>”	65

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1	Origem, coleta e armazenagem do bagaço de malte	66
4.2	Caracterização do bagaço de malte	67
4.2.1	Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) com EDS acoplado.....	67
4.3	Análises térmicas	76
4.3.1	Análise termogravimétrica (ATG).....	76
4.3.2	Análise Térmica Diferencial (ATD).....	78
4.4	Ensaio de secagem em estufa sem recirculação	79
4.5	Secagem em túnel de vento.....	81
4.6	Secagem em drageadeira	83
4.7	Desague em prensa hidráulica manual.....	88
4.8	Ensaio de Shrinkage	90
4.9	Estatística	90
5	CONCLUSÕES	92
	REFERÊNCIAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

Em 2018 foram produzidos cerca de 200 bilhões de litros de cerveja, considerando a produção dos quarenta maiores grupos cervejeiros do mundo. Nesse mesmo período, o Brasil produziu 14 bilhões de litros de cerveja, colocando o país em terceiro lugar no *ranking*, com 7% da produção global, atrás somente da China – 46 bilhões de litros e Estados Unidos – 22 bilhões de litros (BARTH-HAAS, 2018; CERVBRAZIL, 2019).

Em 1996, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), na primeira edição sobre produção mais limpa em cervejarias, indicou em um estudo de caso, que a geração de resíduos de bagaço de malte, também citado na literatura como Resíduo de Cervejaria (RC) ou em língua inglesa *brewers-brewery, Barley Spent Grain* (BSG), correspondem a 85% dos resíduos sólidos gerados em uma indústria, podendo variar entre 14% e 20% em relação ao volume de cerveja produzida ($14 \text{ kg} \cdot \text{hl}^{-1}$ a $20 \text{ kg} \cdot \text{hl}^{-1}$) (CANEDO, 2015; MUSSATO; DRAGONE; ROBERTO, 2006; SANTOS; RIBEIRO, 2005).

O bagaço de malte é, frequentemente, descrito na literatura como um subproduto – *by product* – da produção de cerveja e suas características de composição com fibras e proteínas permitem sua utilização para outros fins (MUSATO; DRAGONE; ROBERTO, 2006), como substituição parcial de ração para alimentação de bovinos, ovinos (PORTILHO, 2010), caprinos, aves (PARPINELLI, 2016) e, até mesmo, existe a possibilidade de uso na alimentação humana (LYNCH; STEFFEN; ARENDT, 2016). O bagaço de malte apresenta alto teor de umidade, tornando-se um problema para o seu manuseio, armazenamento e utilização.

Secar é importante porque pode melhorar as características de materiais com alto teor de umidade, como resíduos industriais de cervejarias, petroquímicas, processamento e produção de alimentos, fertilizantes, além de resíduos de estações de tratamento de esgotos e tratamento de água e, ainda, uma infinidade de materiais diversos. Isso porque o emprego da secagem pode diminuir o volume de resíduo, facilitando aspectos logísticos de transporte a armazenamento, proporcionando oportunidades de aproveitamento (POELS *et al.*, 1987).

Entender os fenômenos associados ao processo de secagem, como as trocas de calor e massa que ocorrem, simultaneamente, no interior de secador, requer aplicação matemática e entendimento aprofundado. No entanto, também é possível

investigar, experimentalmente, condições operacionais de um processo de secagem, e, dessa forma, o tratamento térmico de resíduos pode ser utilizado como etapa intermediária, visando interrupção de processos bioquímicos e degradação de matéria orgânica, redução de volume e o aumento da vida útil (PERAZZINI, 2011). Nesse contexto, é interessante investigar e conhecer os efeitos da temperatura e do tempo, nas características e propriedades do Bagaço de Malte (BM), tendo em vista a menor alteração em sua composição.

A região sul do Brasil é a quarta produtora nacional de cervejas e possui lugar de destaque na quantidade de microcervejarias artesanais. Esse cenário produtivo, aliado aos desafios de sustentabilidade, especialmente no que tange aos resíduos sólidos e, ainda, a crescente busca por fontes alternativas de biomassa, motivou este trabalho na exploração e aplicação de técnicas de secagem (em estufas sem recirculação, leito móvel do tipo drageadeira, túnel de vento e prensa), que possuem características de versatilidade e bom desempenho com materiais orgânicos.

Outrossim, visando avaliar seu uso como fonte alternativa para cogeração de energia em substituição à biomassa convencional, tomando como referência um estudo preliminar feito por Cordeiro (2011), que avaliou o potencial energético realizando análises de poder calorífico superior (PCS) em diferentes níveis de umidade, obtendo o valor de 5.025 kcal kg⁻¹ para umidade de 15% em base úmida, indicando a viabilidade econômica para a utilização do bagaço de malte como fonte alternativa de biomassa para cogeração de energia elétrica, em equipamento tipo caldeira (CORDEIRO, 2011; PERAZZINI, 2011).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal desta pesquisa é investigar o comportamento da secagem térmica e desaguamento por prensa do bagaço de malte de uma cervejaria artesanal, realizando um estudo exploratório, empregando diferentes técnicas, a fim de aumentar o seu potencial de guarda e armazenamento.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estabelecer a composição química elementar e sua forma em termos de MEV/EDS;
- determinar o potencial de queima do bagaço de malte por meio de análise termogravimétrica;
- identificar o comportamento da secagem térmica por condução com ensaios em estufa sem recirculação de ar;
- identificar o comportamento da secagem térmica por convecção com ensaios em túnel de vento;
- identificar o comportamento da secagem térmica com ensaios em drageadeira;
- avaliar a influência das inclinações de 0° e 45° na secagem em drageadeira;
- realizar ensaios de desagramento por prensagem; e
- avaliar a influência da temperatura nos processos de secagem.

1.2 Delimitação da pesquisa

As amostras de resíduos de bagaço de malte foram fornecidas por uma cervejaria artesanal da cidade de Curitiba, cujo processo de produção é por bateladas, sendo que o estilo de cerveja mais produzido é do tipo *Indian Pale Ale* (IPA), que deu origem ao bagaço de malte utilizado neste estudo.

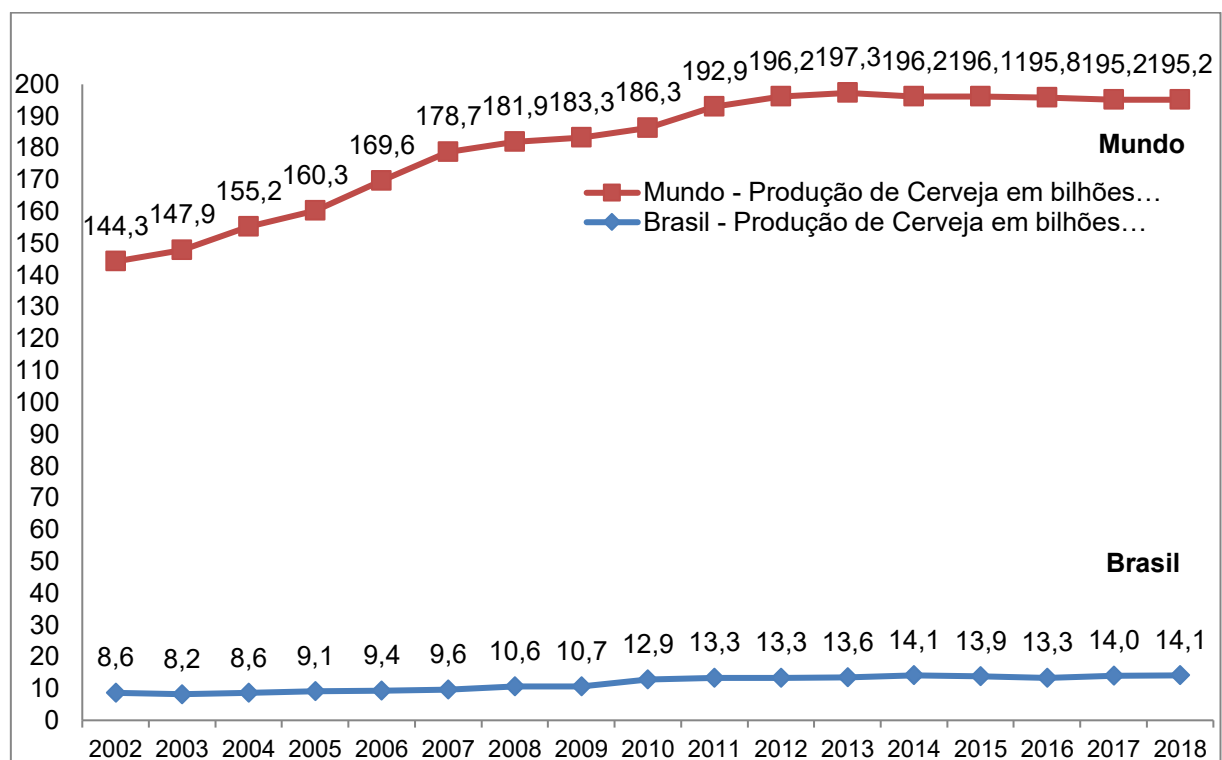
Este trabalho foi realizado nas dependências físicas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e suas estruturas e laboratórios dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia Civil, incluindo o Laboratório de Saneamento, bem como em parceria com Departamento de Engenharia Química (DEQ), da Universidade Federal de São Carlos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Panorama da indústria cervejeira

O Brasil ocupa um lugar de destaque no cenário mundial de produção de cervejas, produzindo cerca de 14,1 bilhões de litros em 2018 (Figura 1).

Figura 1 – Produção de cerveja no Brasil e no mundo em milhões de hectolitros durante o período de 2002 a 2018



Fonte: Adaptado de Barth-Haas (2018).

Os dados de produção mundial de cerveja, a partir de 2002, que compõem a Figura 1 foram compilados com base nos relatórios anuais do maior produtor e fornecedor mundial de lúpulo, o grupo alemão *Bart-Haas Group*. Por meio da análise das informações constata-se um período de produção crescente nos últimos anos, com recente estabilização após a copa do mundo de futebol, que foi sediada no Brasil.

Entre os anos de 2002 e 2018, a produção de cerveja no Brasil saltou de 86 para 141,3 milhões de hectolitros (hl), ou seja, cerca 14,1 bilhões de litros por ano, um aumento significativo de 55% no intervalo de 15 anos, fazendo com que o país se estabelecesse entre os principais produtores mundiais, ocupando a 3ª colocação,

ficando somente atrás da China e Estados Unidos, respectivamente, e desbancando países como a Alemanha, Rússia, México e Japão. No mesmo período, a produção mundial cresceu 35% (BARTH-HAAS, 2018).

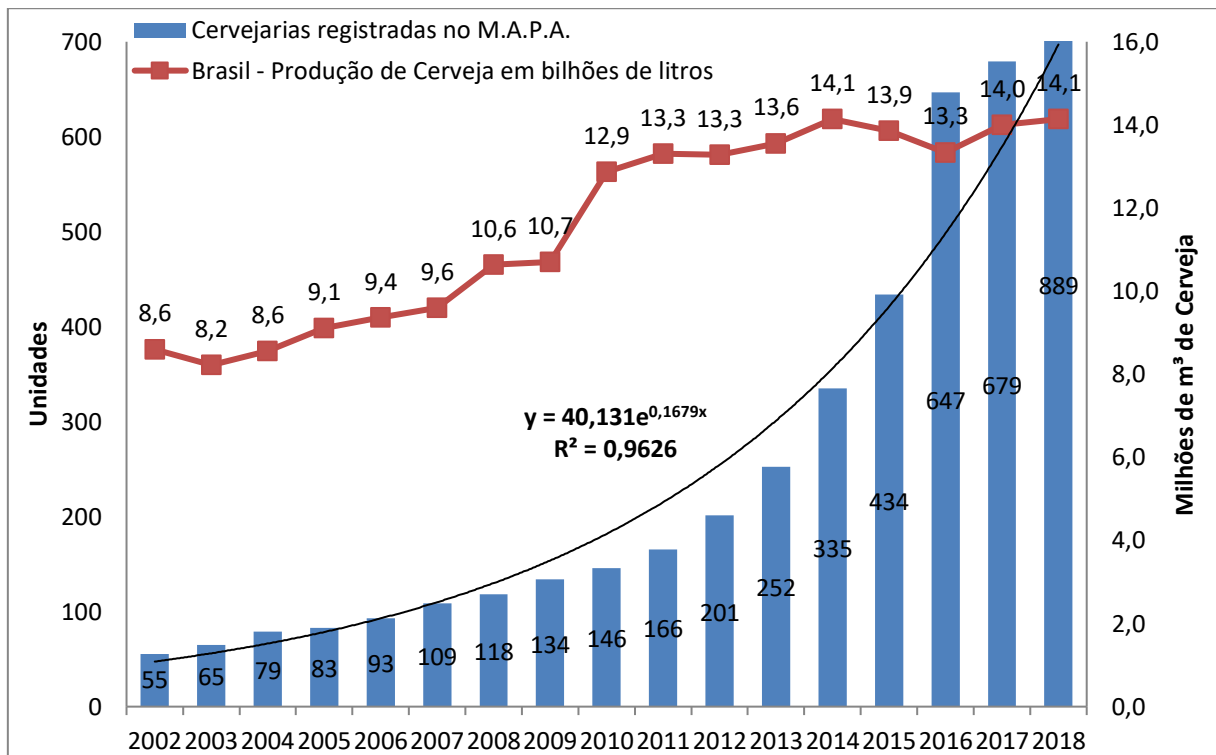
No Brasil, o artigo 37 do Decreto nº 6.871 de junho de 2009 (BRASIL, 2009) que regulamenta a Lei Federal nº 8.918 de julho de 1994 (BRASIL, 1994), informa a diferença entre cerveja e chope, que se dá pela ausência do processo de pasteurização do chope antes do envase.

O setor cervejeiro detém 1,6% de participação do Produto Interno Bruto (PIB) e gera cerca de 2,7 milhões de empregos diretos e indiretos, com faturamento anual perto de 107 bilhões de reais. Dados da Associação Brasileira da Indústria da Cerveja (CERVBRASIL), entidade que reúne 53 unidades fabris de médio e grande porte demonstram que três grandes grupos cervejeiros, a saber: Grupo Petrópolis, AMBEV e Heineken, juntos detém 96% de participação do mercado nacional.

No ano de 2018 haviam registrados, no Brasil, 889 estabelecimentos produtores de cervejas e chopes, conforme pode ser visto na Figura 2. Esse número representa um crescimento de 609% em relação ao ano de 2010, segundo o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento do Brasil (MAPA, 2018).

O crescimento se deve ao expressivo aumento do mercado de pequenos produtores, como microcervejarias, bares e restaurantes que produzem sua própria cerveja, chamados de *brewpubs*. Esses produtores são especializados e produzem cervejas ou chopes artesanais. Na Figura 2 tem-se a quantidade de cervejarias registradas no MAPA. Nota-se que o aumento do número de cervejarias não implica, necessariamente, no aumento da produção em escala nacional.

Figura 2 – Em barras: Quantidade de cervejarias registradas no MAPA; em linha: Produção de cerveja em bilhões de litros. Período: 2002 a 2018



Fonte: Adaptado de MAPA (2018) e Brasil (2018).

Ao dividir os dados da Figura 2 em dois períodos distintos, de 2002 a 2009 e 2010 a 2018 e aplicando uma análise de correlação linear em cada período, conforme pode ser visto na Tabela 1, é possível inferir que o aumento na quantidade de cervejarias registradas, não corresponde ao aumento na produção de cerveja no Brasil, indicando, assim, uma mudança no padrão de consumo para as cervejas e chopes artesanais.

Na Tabela 1 são apresentados os dados de produção de cerveja no Brasil, durante o período de 2002 até 2018 e, também, o número total de fábricas de cervejas registradas no MAPA para o mesmo intervalo de tempo.

Tabela 1 – Análise de correlação entre a quantidade de fábricas e a produção de cerveja no Brasil

Ano	Nº Fábricas	Milhões de m ³ de Cerveja	Ano	Nº Fábricas	Milhões de m ³ de Cerveja
	Col. 1	Col. 2		Col. 3	Col. 4
2002	55	8,6	2010	146	12,9
2003	65	8,2	2011	166	13,3
2004	79	8,6	2012	201	13,3
2005	83	9,1	2013	252	13,6
2006	93	9,4	2014	335	14,1
2007	109	9,6	2015	434	13,9
2008	118	10,6	2016	647	13,3
2009	134	10,7	2017	679	14,0
-	-	-	2018	889	14,1
Col. 1	1	-	Col. 3	1	-
Col. 2	0,944	1	Col. 4	0,517	1

Fonte: Adaptado de MAPA (2018) e Cervbrasil (2019).

A esquerda da Tabela 1 mostra o período correspondente aos anos de 2002 a 2009, para o qual o coeficiente de correlação entre as colunas 1 e 2, é $R=0,944$, indicando a dependência linear do volume de produção de cerveja em relação à quantidade de cervejarias instaladas. A direita da Tabela 1 tem-se o período compreendido entre 2010 e 2018, com coeficiente R de 0,517 entre as colunas 3 e 4, podendo ser interpretado como o “advento” das microcervejarias com crescimento exponencial e, ainda, como indicativo da baixa representatividade ou ausência de dados relativos à produção de cerveja artesanal.

As fábricas e microcervejarias, normalmente, estão instaladas perto dos centros urbanos consumidores para facilitar vários aspectos do negócio, como acesso à mão de obra e a distribuição do produto aos pontos de venda, que são mais de 1,2 milhões em todo o Brasil. Porém, a produção não apresenta distribuição uniforme ao longo do território brasileiro, concentrando-se, geograficamente, nas regiões sudeste e sul, com pouco mais de 82% aproximadamente, 41% cada, como é mostrado na Tabela 2 e Figura 3 a seguir.

Na Tabela 2 é mostrada a quantidade de indústrias instaladas em cada Estado brasileiro, a estimativa de população conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e a relação entre esses dois indicadores, que é chamado de densidade cervejeira (IBGE, 2017).

Tabela 2 – Indústria e densidade cervejeira do Brasil

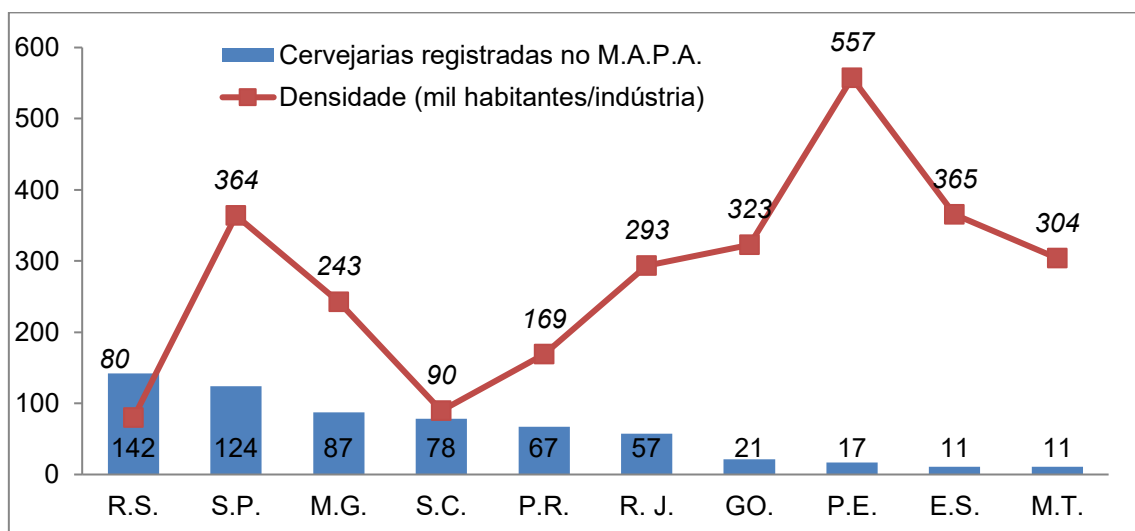
U.F.	Número de Indústrias	Estimativa População IBGE 2017	Densidade = [Pop/(nº indústrias x 1000)]
Rio Grande do Sul	142	11.322.895	79,739
São Paulo	124	45.094.866	363,668
Minas Gerais	87	21.119.536	242,753
Santa Catarina	78	7.001.161	89,758
Paraná	67	11.320.892	168,969
Rio de Janeiro	57	16.718.956	293,315
Goiás	21	6.778.772	322,799
Pernambuco	17	9.473.266	557,251
Espírito Santo	11	4.016.356	365,123
Mato Grosso	11	3.344.544	304,049
Outros Estados	64	71.469.685	1.116,714
TOTAL	679	207.660.929	305,833

Fonte: Adaptado de IBGE (2017) e MAPA (2018).

Nota-se que a região norte possui o menor índice de densidade, com apenas 3% das cervejarias. Assim, a maior quantidade de indústrias está localizada nos seguintes Estados: Rio Grande do Sul (142); São Paulo (124); Minas Gerais (87); Santa Catarina (78); Paraná (67); e Rio de Janeiro (57).

A densidade cervejeira, um indicador que pode auxiliar na definição de estratégias de gestão para mercado, está demonstrada na Figura 3.

Figura 3 – Em barras: Quantidade de cervejarias registradas no MAPA. Em linha: Densidade cervejeira em mil habitantes/unidade



Fonte: Adaptado de e IBGE (2017) e MAPA (2018).

Nota-se que a densidade cervejeira é menor nos Estados do sul – Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, e sudeste – com exceção de São Paulo, e à medida que se avança sentido centro-oeste, nordeste e norte no mapa do Brasil, a densidade tende a ser maior, isso porque a quantidade de cervejarias é muito maior nas regiões sul e sudeste brasileiro.

Em Curitiba e região, o setor microcervejeiro vem fomentando o aparecimento de associações de cervejarias artesanais por todo o Brasil. Um levantamento realizado entre setembro e dezembro de 2017 pelo Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas (SEBRAE) do Paraná-PR em parceria com a Associação das Microcervejarias do Paraná (Procerva) e a Faculdade Guairacá da cidade de Guarapuava (SEBRAE, 2018), mapeou o setor de microcervejarias artesanais no Paraná (Figura 4).

Figura 4 – Distribuição das microcervejarias no Paraná



Fonte: Adaptado de Sebrae (2018).

Nesse estudo, 65 empresas foram pesquisadas, perfazendo quase o total das 67 cervejarias presentes no Estado com registro no MAPA. A capacidade de produção instalada em 2017 era de 2,3 milhões de litros por mês, que corresponde a apenas 0,21% da produção brasileira. Cabe aqui ressaltar que ainda existem

estabelecimentos que não possuem registro no MAPA, portanto, a quantidade de microcervejarias, bem como a produção instalada no Estado, pode ser ainda maior.

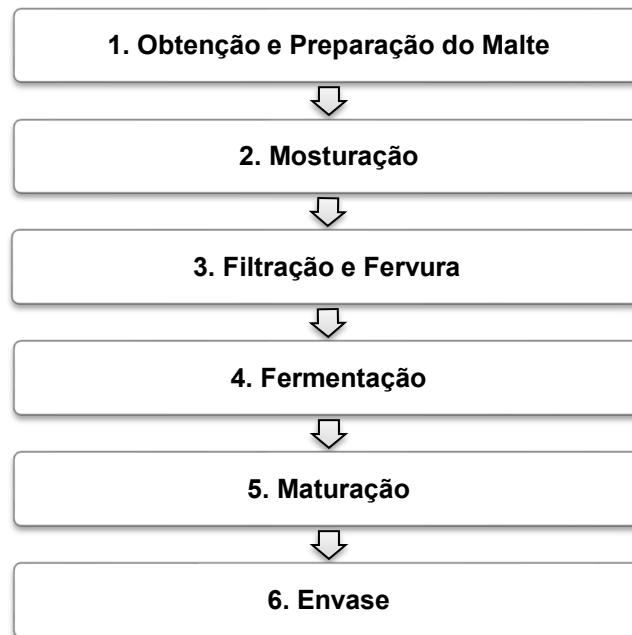
Trinta e três dessas microcervejarias estão na região de Curitiba, ou seja, quase a metade do total (67). Elas estão localizadas em oito bairros da cidade: Santa Felicidade; Cabral; Cristo Rei; Santa Quitéria; Água Verde; Hauer; Boqueirão; e Umbará. Também há registro de microcervejarias nos municípios de Pinhais, Colombo, São José dos Pinhais, Campo Largo e Araucária (SEBRAE, 2018).

Os estilos de cerveja mais produzidos são: IPA (73,8%); *Pilsen* (64,6%); Weizen (58,5%); APA (44,6%); e Witibier (32,3%). O estudo também indicou que 58% das cervejarias produzem, exclusivamente, para suas próprias marcas e 34% terceirizam a produção para outras marcas, também conhecidas como marcas oriundas de microcervejarias ditas “ciganas”, uma vez que essas não possuem estrutura física e não possuem registro no MAPA (SEBRAE, 2018).

2.2 A produção de cerveja

Os ingredientes principais da produção de cerveja são a água, o malte e o lúpulo. Em alguns mercados, como no Brasil, também são utilizados adjuntos cervejeiros, que são fontes de carboidratos obtidos de cereais não maltados, normalmente arroz, milho ou trigo. Com o crescente mercado de cervejas artesanais, é cada vez mais comum utilizar novos ingredientes para a obtenção de novos sabores, como mel de abelhas, sucos concentrados de frutas diversas, cacau e chocolates ou até outros ingredientes locais, como o pinhão no Estado do Paraná. Porém, o processo base de produção da cerveja com os ingredientes base (água, malte de cevada e lúpulo) não é alterado.

A redação do Decreto nº 6.871 de 4 de junho de 2009 (BRASIL, 2009) define cerveja como a bebida obtida pela fermentação alcoólica do mosto cervejeiro, oriundo do malte de cevada e água potável, por ação da levedura, com adição de lúpulo. O processo de produção da cerveja (Figura 5) pode ser descrito como: obtenção e preparação do malte; obtenção do mosto cervejeiro; filtração; fervura; fermentação; e envase. Contudo, cada produtor de cerveja pode realizar alterações obtendo um fluxograma diferenciado.

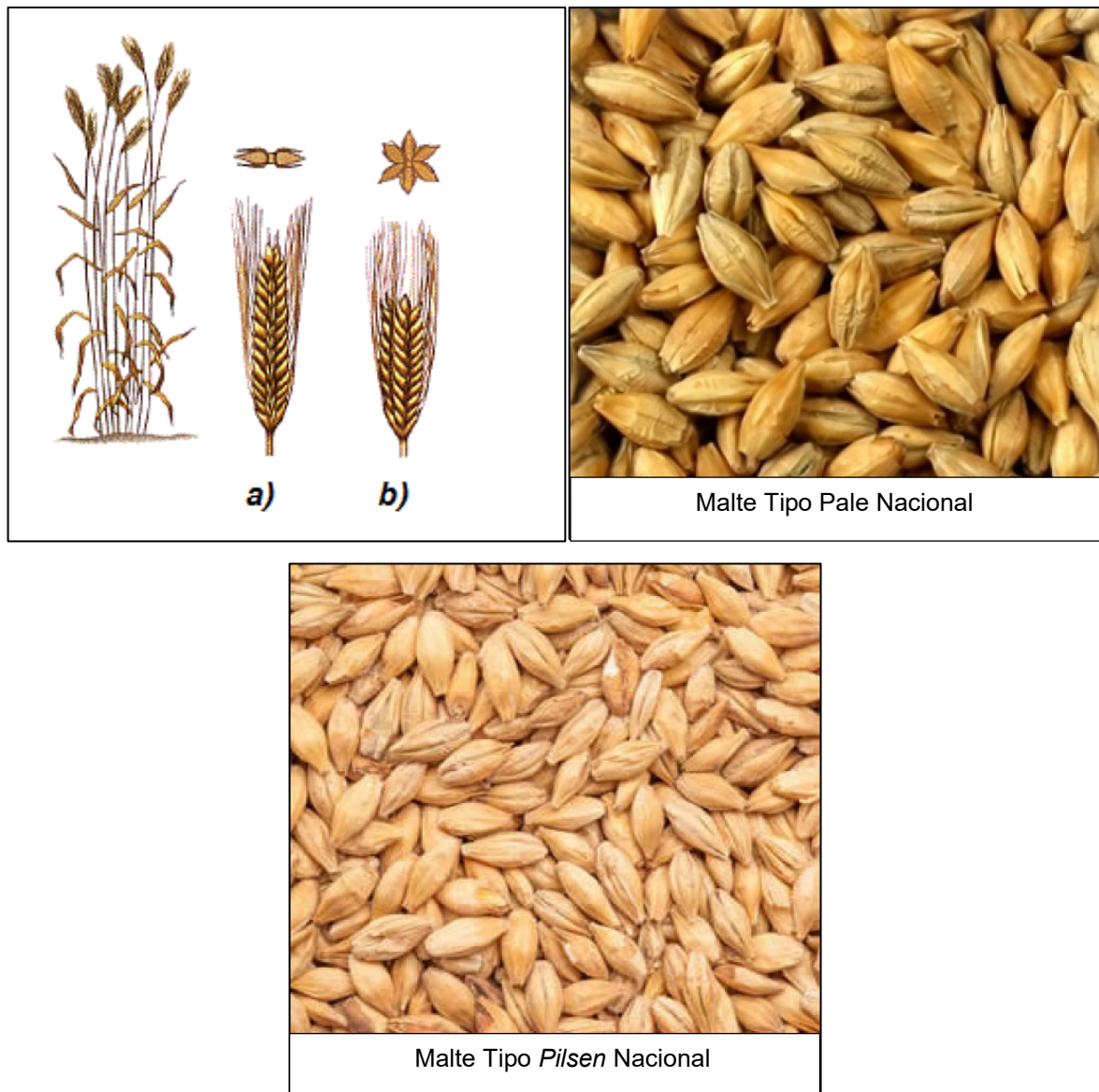
Figura 5 – Fluxograma geral de produção de cerveja

Fonte: Adaptado de Santos e Ribeiro (2005).

2.2.1 Cevada e malte

A cevada (*Hordeum vulgare*) é um cereal, cuja geração no Brasil se dá, principalmente, para a produção de malte para indústria cervejeira, mas em outros países, o grão também é utilizado na alimentação animal, indústria de panificação e de produtos dietéticos. A espiga da planta apresenta formação com duas ou seis fileiras de grãos (Figura 6) e é o quarto cereal mais cultivado no mundo (PARPINELLI, 2016; PORTILHO, 2010).

Figura 6 – Tipos de cevada e maltes



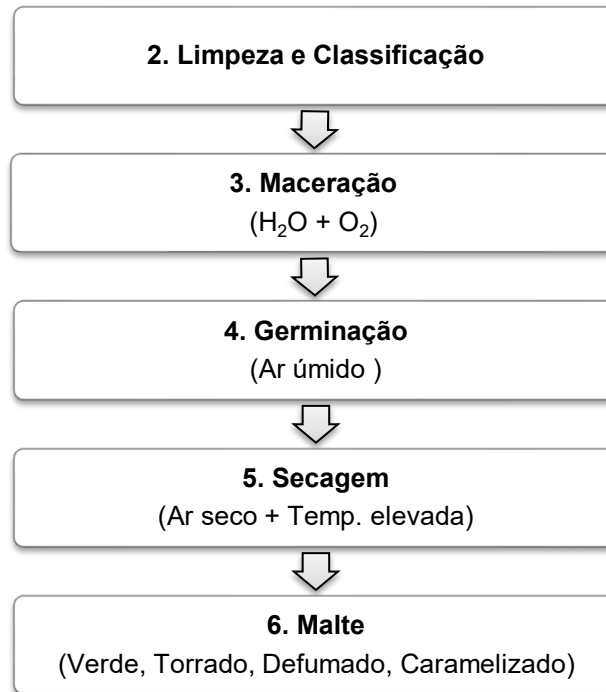
Fonte: Malte & Arte (2018) e Nutriagro (2018).

O termo técnico malte é a referência da matéria-prima resultante da germinação em condições controladas de temperatura, umidade, aeração e tempo, de qualquer cereal. Contudo, o malte de cevada é o mais utilizado na produção de cerveja em todo o mundo. Quando um grão de cevada germina, ocorrem transformações que propiciam a liberação de enzimas que vão converter o amido em açúcares, dextrinas e outros compostos (LIMA, 2010).

As principais etapas de obtenção do malte são a limpeza e classificação, maceração ou embebição, germinação e secagem, conforme mostrado na Figura 7,

em que estão descritas as principais etapas do processo de obtenção de maltes de cevada.

Figura 7 – Obtenção e preparação do malte de cevada



Fonte: Adaptado de Lima (2010) e Santos e Ribeiro (2005).

A limpeza consiste na remoção de materiais como caule, excesso de cascas e terra. Após isso, pode ser aplicado o processo de peneiramento e seleção de grãos de cevada em função do seu tamanho e, então, segue-se à etapa de maceração (SANTOS; RIBEIRO, 2005).

Na maceração, o grão de cevada seco com umidade entre 12% e 14% é umedecido a 45% em condições controladas até o grão romper o estado de dormência para entrar na fase de germinação, com o aparecimento de pequenas raízes, aumento do quociente de respiração e proporcionando o aparecimento de enzimas como as amilases e proteases, dentre outras (SANTOS; RIBEIRO, 2005).

Após isso, o grão é submetido ao processo de secagem entre 45 e 55°C para interromper a germinação e, em uma segunda etapa, em temperaturas entre 80 e 120°C para que a umidade do grão permaneça entre 4% a 5%. Também podem ser aplicadas outras técnicas para obtenção de sabores e aromas diferenciados, como por exemplo, a torrefação do malte (como no grão de café), a caramelização com

açúcar mascavo ou a defumação. Normalmente, os pequenos produtores e microcervejarias adquirem o malte pronto e macerado para ser utilizado na preparação das cervejas (LIMA, 2010; SANTOS; RIBEIRO, 2005).

2.2.2 Mosturação

Obter o mosto cervejeiro pode ser comparado a cozinhar e significa extrair os amidos e enzimas presentes no malte para o meio líquido, com aquecimento da mistura água-malte entre 37°C a 78°C em um equipamento específico, a tina de mosturação (Figura 8), com escalas intermediárias de temperatura e intervalos específicos de descanso, dependendo do tipo de cerveja a ser produzida. Nessa etapa, também são controlados parâmetros como pH e acidez, tendo em vista a atuação das enzimas (LIMA, 2010; SANTOS; RIBEIRO, 2005).

Figura 8 – Tina de mosturação



Fonte: Liess (2018).

2.2.3 Filtração e fervura do mosto

A filtração ocorre na tina de filtração, que é um tanque com fundo falso (Figura 9), similar à tina (panela grande em aço inox) de mosturação, em que é instalada uma peneira ou disco filtrante, por onde o mosto será jorrado por bombeamento, separando a fase sólida (resíduo de bagaço de malte) da fase líquida. É comum, em microcervejarias de pequeno porte, que a filtração ocorra na mesma tina de

mosturação. Essa etapa é responsável por 85% da geração de resíduos sólidos da produção de cerveja. Após a filtração, o líquido é destinado para a tina de fervura para esterilização, adição de lúpulos de amargor e aromatização e inativação das enzimas. Aqui também pode ser realizada a coagulação proteica, que após a decantação dá origem ao *trub* grosso, que é o resíduo da precipitação. Essa etapa dura entre 60 e 90 minutos em microcervejarias e há perda de até 10% do volume líquido por evaporação (LIMA, 2010; SANTOS; RIBEIRO, 2005).

Figura 9 – Fundo da tina de filtração



Fonte: Muller (2018).

2.2.4 Fermentação

A fermentação é feita em tanques fermentadores com fundo cônico (Figura 10) e é considerada a principal etapa da produção de cerveja, com o objetivo de converter os açúcares obtidos nos processos anteriores (maltose, maltriose, frutose, sacarose, glicose, dentre outros) em etanol e gás carbônico pela adição de leveduras cervejeiras. O controle de temperatura e pressão (CO_2) é primordial para o domínio do processo. É a atividade metabólica das leveduras que proporcionará o aparecimento de substâncias que conferem aroma e sabor ao produto final (LIMA, 2010; SANTOS; RIBEIRO, 2005).

Figura 10 – Tanques de fermentação



Fonte: Inox Rodrigues (2018).

2.2.5 Maturação

Em relação à etapa anterior, não há grandes alterações no processo de maturação (também chamado de fermentação secundária). Essa etapa pode durar de semanas a meses, dependendo do tipo de cerveja que está sendo produzida. O principal objetivo dessa etapa é a redução de diacetil pela ação das leveduras, pois esse composto e seus similares (2,3 pentadiona) podem auferir gosto desagradável em altas concentrações ($0,15 \text{ mg L}^{-1}$). Outra função dessa etapa é ajudar na clarificação da cerveja, isso porque, devido ao elevado tempo e baixa temperatura, ocorre a precipitação de leveduras e proteínas (LIMA, 2010; SANTOS; RIBEIRO, 2005).

2.2.6 Envase

O envase (garrafas e latas) ou embarrilamento (barris) é tido como a fase geradora de maior despesa, porque requer mão de obra, limpeza e saneamento constante dos recipientes. Em indústrias de grande porte existem equipamentos automáticos que realizam o envase e, sequencialmente, o processo de pasteurização. Já com produtores artesanais e microcervejarias, normalmente esse processo é manual e muitos não fazem a pasteurização ou comercializam seus produtos somente em barris de 25, 30 ou 50 litros (VENTURINI FILHO, 2010; SANTOS; RIBEIRO, 2005).

2.3 Bagaço de malte

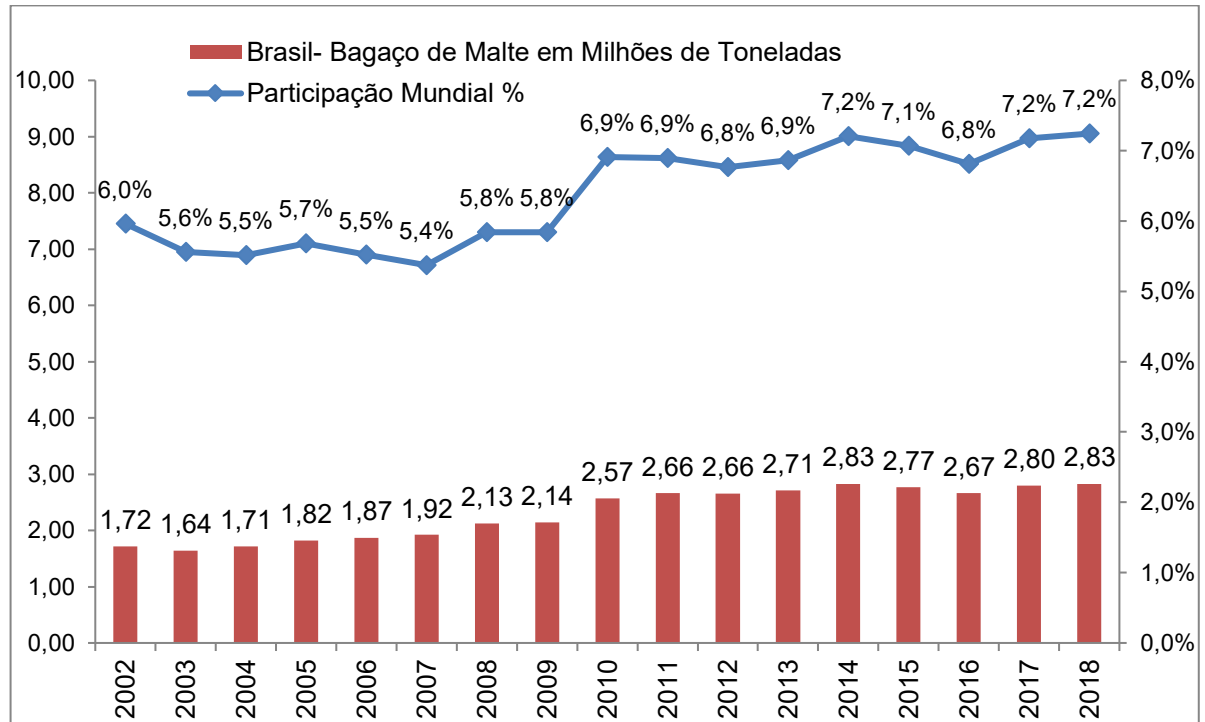
2.3.1 Composição e características

A maior quantidade de resíduo produzido em uma cervejaria é o bagaço de malte, que é gerado na filtração do mosto e, por vezes, é acrescido do *trub* grosso, oriundo da coagulação, logo após a etapa da fervura. No entanto, existem muitos outros resíduos gerados em decorrência do processo, como terra diatomácea, efluentes líquidos de limpeza CIP, precipitados (*trub* fino – precipitado do processo de fermentação e maturação), embalagens danificadas, resíduos recicláveis (papel, plástico, papelão), madeiras e *pallets*, resíduos com graxa e/ou lubrificantes e, ainda, muitos outros (MUSSATO; DRAGONE; ROBERTO, 2006; SANTOS; RIBEIRO, 2005).

O bagaço de malte tem sua maior destinação para fazendeiros e produtores de ração animal, devido às características de sua composição com fibras e proteínas, quantidade disponível e geração contínua ao longo do ano. Em média, a cada 100 litros de cerveja produzidos, são gerados 20 kg de resíduo de bagaço de malte, com umidade em torno de 80%. De acordo com essa informação e com a produção de cerveja do Brasil e do mundo, na Figura 11 são apresentadas as quantidades estimadas de bagaço de malte produzidas dos últimos anos, em milhões de toneladas, com a participação percentual do Brasil no cenário mundial (LIMA, 2010; MUSSATO; DRAGONE; ROBERTO, 2006; PNUMA, 1996).

Em 2018, o Brasil produziu cerca de 7,2% de todo o resíduo de bagaço de malte do mundo, sendo que a geração é diretamente proporcional à produção de cerveja. O montante produzido nesse período foi de 2,83 milhões de toneladas, sendo o volume desse montante de, aproximadamente, $2,04 \times 10^6 \text{ m}^3$ – 2,04 milhões de metros cúbicos – e densidade de $1,385 \text{ t/m}^3$, calculada por picnometria (BARTH-HAAS, 2018).

Figura 11 – Em barras: Geração de bagaço de malte em milhões de toneladas. Em linha: Percentual de participação da geração mundial. Período de 2002 a 2018



Fonte: Autoria própria com base nos dados de produção de cerveja do grupo Barth-Haas (2018) e geração estimada de bagaço de malte em 20 kg 100 litros de cerveja (SANTOS; RIBEIRO, 2005).

O bagaço de malte é composto por proteínas (15%) e fibras lignocelulósicas (70%), alguns polissacarídeos (xilana, arabina e glicana) e pode apresentar traços de lúpulo e adjuntos cervejeiros (milho, arroz, trigo, dentre outros), dependendo das características do processo de produção. Também podem ser encontrados extrativos como: cinzas, gorduras, gomas, ceras (BARTH-HAAS, 2018).

Na Tabela 3 é apresentada a composição de bagaço de malte em extrato seco e a na Tabela 4 tem-se os valores de minerais presentes no bagaço de malte (LIMA, 2010; MUSSATO; DRAGONE; ROBERTO, 2006).

Muitos dos minerais presentes no bagaço de malte estão na forma de silicatos, por isso o silício é o mineral com maior concentração, seguido do cálcio, fósforo e enxofre, respectivamente.

Tabela 3 – Composição química bagaço de malte

COMPONENTE	(% p/p)
Celulose (Glicana)	16,8
Hemicelulose	28,4
Xilana	19,9
Arabiana	8,5
Lignina Total	27,8
Lignina Klason	23,0
Lignina solúvel em meio ácido	4,8
Grupos acetil	1,3
Proteínas	15,2
Extrativos	5,8
Cinzas	4,6

Fonte: Lima (2010) e Mussato, Dragone e Roberto (2006).

Tabela 4 – Minerais presentes no bagaço de malte

MINERAL	(mg/kg)
Silício	10.740,0
Cálcio	5.186,0
Fósforo	3.515,0
Enxofre	1.980,0
Magnésio	1.958,0
Sódio	309,3
Potássio	258,1
Ferro	193,4
Zinco	178,0
Manganês	51,4
Alumínio	36,0
Cobre	18,0
Bário	13,6
Estrôncio	12,7
Cromo	5,9

Fonte: Lima (2010) e Mussato, Dragone e Roberto (2006).

Devido às suas características e composição, o bagaço de malte pode ter inúmeras aplicações potenciais, como ilustrado na Figura 12, tais como ingrediente para alimentação humana e animal, processos biotecnológicos, base de cultivo de microrganismos e bactérias, produção de enzimas, suporte para imobilização de

leveduras, obtenção de subprodutos por fermentação de estado sólido e produção de energia, seja por queima direta ou geração de biogás.

Figura 12 – Aplicações potenciais do bagaço de malte



Fonte: Adaptado de Lima (2010) e Mussato, Dragone e Roeberto (2006).

2.4 Fundamentos de secagem

A retirada de umidade de um material, por via térmica, é um processo de transferência de calor e massa que ocorre simultaneamente, chamado de processo unitário de secagem. Quando um sólido orgânico é submetido a um processo de secagem, há um comportamento padrão do movimento da umidade na forma de água do interior do sólido em direção a sua parede externa, quando esse está submetido a uma corrente de ar aquecido (FOUST, 2012).

Em outras palavras, ao submeter um sólido orgânico, úmido, com característica fibrosa e amorfa como a do bagaço de malte, a uma corrente de ar previamente aquecida e com baixa umidade, haverá a transferência de calor e massa nessa mistura heterogênea, fazendo com que a umidade do sólido orgânico seja transferida para a corrente de ar. Esse sólido tende a ajustar sua temperatura e, na medida em que isso acontece, o calor penetra no interior do sólido, e a umidade que está em seu interior se movimenta em direção à sua superfície, de onde será retirada pela corrente

de ar (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2013). Dito de outro modo, a secagem é uma operação unitária, cuja finalidade é a remoção de um componente líquido, normalmente água na forma de umidade, a partir de um componente sólido.

Os fluxos de quantidade de movimento, energia e massa ocorrem no sentido das regiões de maior concentração para regiões de menor concentração, conforme as leis de Newton (1687) e Fourier (1822) e Fick (1855). O fluxo de quantidade de movimento de um elemento em uma mistura binária é descrito na Equação 1.

$$J_A = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

J_A = Fluxo do elemento A;

D_{AB} = Difusividade de A (A pode ser o ar de seca) por meio de B (bagaço de malte).

Para os casos de transferência de calor, a lei de Fick assume a forma da lei de Fourier (1822), conforme a Equação 2.

$$q = -k \nabla T \quad \text{Equação (2)}$$

Onde k é a condutividade térmica do material.

2.4.1 Conceitos e terminologias

Para Foust (2012), a umidade do ar (X_o) é definida como sendo a massa de vapor de água (componente A) contida na unidade de massa de ar seco (componente B), e a umidade relativa do ar (X_r) é a relação entre a pressão parcial de vapor de água no ar e a pressão de saturação da água na temperatura do ar.

– **Umidade de um sólido**

A umidade de um sólido é definida como a quantidade de massa de água, seja na forma ligada ou não ligada, contida nele e que pode ser expressa em base úmida ou base seca.

A umidade na base seca (U_s) é a razão entre a quantidade total da massa de água (M_a) e a massa de sólido (M_s) isenta de água.

$$U_s = M_a / M_s \quad \text{Equação (3)}$$

A umidade em base úmida (U_a) é a razão entre a quantidade de massa de água e a massa total do sólido úmido.

$$U_a = M_a / (M_a + M_s) \quad \text{Equação (4)}$$

Também é possível calcular o teor de sólidos, utilizando a relação entre a massa de sólidos seco (M_s) e a massa total do sólido úmido.

$$TS = M_s / (M_a + M_s) \quad \text{Equação (5)}$$

Uma substância pode ser higroscópica ou não higroscópica quando contém, respectivamente, umidade ligada ou não ligada (FOUST, 2012). Nesse sentido, é necessário estudar o comportamento da umidade, considerando o fluxo de água na forma de gás ou vapor, durante o processo de secagem e sua associação com o tipo de estrutura do material, que pode ser orgânica, inorgânica.

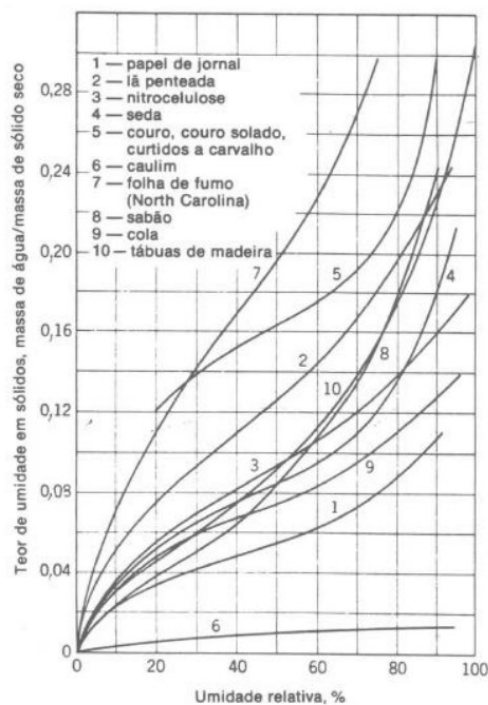
Um sólido orgânico apresenta certo grau de porosidade e capilaridade que estão associadas com a água ligada em seu interior, em função da tensão superficial. Isso pode tornar mais complexo o processo de secagem, pois o acesso do meio de seca – ar aquecido com baixa umidade – pode ser dificultado, como é o caso da secagem de madeira, alimentos e cereais e, também, é o caso do resíduo de bagaço de malte (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2013; FOUST, 2012).

– Umidade de equilíbrio nas fases

A condição de umidade de equilíbrio pode ser entendida como aquela em que, para determinadas condições de temperatura, pressão e umidade do ar ambiente, o sistema atinge o equilíbrio termodinâmico entre as atividades de água nas fases sólida e gasosa (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2013; FOUST, 2012).

Na secagem de materiais orgânicos, determinar a condição de equilíbrio de umidade é importante porque, se o sólido for seco até uma umidade abaixo da umidade de equilíbrio, o sólido absorverá novamente a umidade do ar ambiente, configurando um desperdício de energia. Da mesma forma, se não atingir a umidade de equilíbrio, pode configurar a perda de qualidade ou característica final desejada. No caso do bagaço de malte, poderá acarretar baixo poder calorífico superior, menor tempo de armazenagem e desperdício de energia sob o ponto de vista logístico, devido à movimentação de uma massa de água que poderia ter sido removida. Para determinar a umidade de equilíbrio, é necessário desenvolver experimentos apropriados e com os dados construir as curvas de isotermas de equilíbrio como as apresentadas na Figura 13.

Figura 13 – Curvas típicas de isotermas de equilíbrio



Fonte: Foust (2012).

Existem diversas técnicas de secagem, podendo ser amplamente classificadas como naturais ou artificiais (PERAZZINI; FREIRE; FREIRE, 2014), ou ainda, quanto a forma de fornecimento de calor: condução; radiação; e convecção.

Para Park *et al.* (2007), a secagem por condução de calor é aquela na qual é fornecida uma certa quantidade de energia, com uso de placas ou bandejas de metal, pelas quais o calor é transferido ao material úmido por contato direto (DROIN-JOSSERAND; TAVERDET; VERGNAUD, 1989), fazendo com que haja troca de calor e massa. Nessa técnica, a temperatura que o material úmido atinge é maior, se comparada às técnicas de radiação e convecção.

A secagem por radiação é aquela em que o material úmido é submetido à radiação infravermelha, na faixa de luz visível, em que normalmente as fontes de radiação são lâmpadas confeccionadas em quartzo que atingem alta temperatura, fazendo com que as moléculas se movimentem liberando energia na forma de calor e, por consequência, a transferência de massa de umidade do interior do material em direção a sua superfície, bem como para a corrente de ar de seca (FOUST, 2012; PARK *et al.*, 2007; RATTI; MUJUMDAR, 2006).

A secagem por convecção ocorre quando o ar previamente aquecido e insaturado de umidade escoar em contato com o material úmido, fazendo com que esse seja aquecido e proporcionando a transferência de calor do ar para a superfície do material úmido. Devido à diferença de pressão de vapor de água entre o ar de seca e o material, ocorre difusão da massa de água do interior do material em direção a sua superfície e, posteriormente, para o ar insaturado de umidade (FOUST, 2012; BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2013; VILLA-CORRALES *et al.*, 2010).

Tambor rotativo, leito fixo ou móvel de secagem, leito de jorro, câmara de secagem, estufas com recirculação, túnel de vento e ciclones de vento são exemplos de equipamentos de secagem por convecção (ALMEIDA *et al.*, 2016; FOUST, 2012; BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2013).

Tendo por base o que foi visto na bibliografia até aqui, pode ser admitido que o bagaço de malte é um sólido orgânico (MUSSATO; DRAGONE; ROBERTO, 2006), com capilaridade e porosidade variadas, hidrocópico – pode conter água ligada – e anisotrópico, cujo comportamento de parâmetros físicos são diferentes e não lineares (FOUST, 2012).

A difusão interna ocorre por diferenças de concentração de umidade e diferença de pressão de vapor entre o interior do sólido e a superfície aquecida pela

corrente de ar seco, até que a condição de equilíbrio seja alcançada, sendo que o fluxo de energia e massa é regido pelas leis de Fick (1855), com direção da região de maior concentração para a de menor concentração.

2.5 Estudos de secagem (cereais, alimentos e resíduos)

O processo de secagem pode ajudar a melhorar as características de materiais com alto teor de umidade, como resíduos industriais de cervejarias, petroquímicas, processamento e produção de alimentos, fertilizantes, além de resíduos de estações de tratamento de esgotos e tratamento de água e, ainda, uma infinidade de materiais diversos. Isso porque o emprego da secagem pode diminuir o volume de resíduo, facilitando aspectos logísticos de transporte a armazenamento, proporcionando oportunidades de aproveitamento (POELS *et al.*, 1987).

A secagem de sementes é tema recorrente para a engenharia agrônoma/agronomia. Bakker-Arkema, Maier e Schisler (1987) estudaram a secagem de grãos de trigo, milho e arroz. Primeiramente, os grãos foram submetidos, separadamente, a um período de 3h de secagem em temperaturas de 27, 38, 49, 60 e 71°C. Os autores observaram que, quanto maior o raio equivalente, ou seja, quanto maior a massa do grão, menor era a taxa de secagem. Ainda, quanto maior a temperatura, maior a taxa de secagem. As umidades finais, para a temperatura de 71°C foram de aproximadamente 9% para o milho com período 3h de secagem, 4% para o trigo com 1h de secagem e 2% para o arroz com 2,5h de secagem. O menor tempo de secagem observado foi o do trigo (BAKKER-ARKEMA; MAIER; SCHISLER, 1987).

Em uma segunda fase, os pesquisadores submeteram os grãos de trigo, arroz e milho em secador tipo *deep-bed drying*, (secagem em leito profundo), com escoamento em regime concorrente (fluxos de ar e grãos na mesma direção – *concurrent-flow*), com dois estágios de secagem com temperatura do ar variando entre 110 e 170°C e um estágio de resfriamento em temperatura ambiente de 15°C. Novamente, o trigo apresentou melhor taxa de remoção de umidade, seguido de arroz e milho, evidenciando que as características morfológicas dos grãos exercem influência no desempenho do secador, bem como tempo de exposição e temperatura do ar de secagem.

Poels *et al.* (1987) investigaram aspectos operacionais e ambientais, na forma de emissões de agentes químicos e características sensoriais da secagem de dejetos pré-drenados de aves poedeiras, com teor de matéria seca de 40%, em média. Os autores utilizaram um tambor rotativo descontínuo (batelada), com comprimento de 4 metros e 2,4 metros de diâmetro, velocidade ajustável entre 1-5 rpm, com aquecimento via câmara cilíndrica de combustão alimentada por gasolina. O secador possuía capacidade térmica de até 300 kW, e motor ventilador de 1.5 kW para ventilação e exaustão do sistema. Para a retirada do ar saturado com umidade foi utilizado um ciclone acoplado ao sistema (POELS *et al.*, 1987).

Foram realizados seis ciclos experimentais, em que a temperatura na câmara de combustão foi mantida em 130°C e a temperatura medida no interior do tambor não ultrapassou 75°C. A rotação ficou entre 1-5 rpm e o sistema foi alimentado com aproximadamente 650 kg.h⁻¹ durante 6,5h, em média. O equipamento operou com eficiência térmica média de 89%, sendo que o resíduo apresentou teor final médio de 89,7% de sólidos. Ainda, foi constatada a existência de emissões de compostos amoníacos e orgânicos voláteis, que atendiam aos parâmetros preconizados na legislação da época.

Soponronnarit, Pongtornkulpanich e Prachayawarakorn (1997) investigaram a secagem de milho em um secador experimental de leito fluidizado tubular, com intuito de conservação para estocagem, tendo em vista que esse tipo de secador oferece boa taxa de transferência de calor e massa, ocupa pouco espaço físico, tem boa capacidade de produção e baixo tempo de secagem. A umidade inicial do milho medida a 103°C por 72h foi ajustada para 43%. No experimento, o ar de secagem variou entre 120 e 200°C, com velocidade entre 2 e 4 ms⁻¹. A altura da camada de milho no leito variou entre 4 e 12 cm. Ficou demonstrado nesse estudo que existe uma relação diretamente proporcional entre pressão de operação (P.a.) e a altura da camada de milho no leito e, ainda, que a velocidade mínima do ar para a fluidização aumenta em função da umidade (SOPONRONNARIT; PONGTORNKULPANICH; PRACHAYAWARAKORN, 1997).

Pelegrina, Elustondo e Urbicain (1999, 2002) destacaram as variáveis de temperatura e umidade do ar de secagem como relevantes sob o ponto de vista econômico e de desempenho em secador rotativo, e ainda argumentaram que, em um processo clássico de secagem por injeção de ar aquecido, pode haver certo grau de

ineficiência, isso quando não há recirculação do ar, admitindo que esse ainda não esteja totalmente saturado.

Os autores propuseram a mistura do ar efluente com ar fresco, mantendo a temperatura constante de 55°C. Baseando-se em uma análise macroscópica, desenvolveram um modelo matemático, levando em consideração a transferência de energia e massa da corrente de ar com a capacidade de transferência de massa do material (cebola picada com 7% de sólidos em base seca) e o comportamento do equipamento de secagem. Para simulação da taxa de secagem e da eficiência térmica em função da taxa de ar recirculado (r), os valores de (r) utilizados permaneceram entre $0,00 \leq r \leq 0,84$.

Ao final do experimento, ficou demonstrado que a mistura e recirculação de ar acabou por aumentar o tempo de secagem em função da relação direta entre o aumento da umidade absoluta do ar com o aumento da recirculação. Para obter um material (cebola picada) com 5% de umidade sem recirculação de ar, $r=0,00$, foram necessárias 5,5h, enquanto para a recirculação de ar com taxa $r=0,84$, foram necessárias 8h de secagem.

Na Itália, Caputo, Scacchia, e Pelagagge (2003) pesquisaram sobre o aproveitamento de subprodutos da produção de azeite de oliva e demonstraram que a casca de oliva (*olive husk*) possui características energéticas de interesse como fonte de energia, sob o conceito “*waste to energy*”, para utilização em queima direta em caldeiras ou em processo de gaseificação. Entretanto, é necessário realizar a secagem do resíduo, para se obter valores de poder calorífico entre 14 e 18 MJ/kg (CAPUTO; SCACCHIA; PELAGAGGE, 2003).

Li *et al.* (2002), motivados pela aplicação de forno rotativo para o tratamento termoquímico de resíduos sólidos municipais (RSM), conduziram experimentos em escala de laboratório com um forno rotativo frio, a fim de investigar a distribuição do tempo médio de residência (DTR) e taxa volumétrica do material (TVM), comparando os resultados com dados de grãos de areia padronizados (LI *et al.*, 2002).

O equipamento experimental, com medidas internas de 0,3 m de diâmetro e 1,8 m de comprimento, era dotado de dispositivos internos removíveis instalados nas direções dos eixos axial e longitudinal, sistema de controle de inclinação e rotação e diâmetro de saída ajustável. Nos ensaios realizados, os parâmetros geométricos investigados foram: quantidade e altura dos dispositivos internos (axial e longitudinal); o diâmetro de saída; a rotação; e a inclinação do equipamento. Foram testados dois

materiais diferentes: areia padrão e RSM. Foram adicionados três grupos de marcadores em diferentes cores junto ao RSM, para controle do tempo de residência. Foram calculados o ângulo de repouso dinâmico das partículas de RSM e a rugosidade da parede do forno.

A pesquisa indicou que o ângulo de repouso dinâmico do RSM era maior que o da areia padrão e, ainda, para o RSM as taxas de DTR e TVM eram diretamente proporcionais ao ângulo de repouso dinâmico; a DTR do RSM, ao contrário da areia padrão, mostrou-se discrepante da distribuição normal de *Student*. O acréscimo de rotação ou inclinação causava diminuição do DTR e aumento da TVM.

Iguaz *et al.* (2003) desenvolveram um modelo matemático para prever valores de umidade final do material, com base em dados de entrada de temperatura e umidade do ar de secagem. Os autores realizaram estudo de secagem em tambor rotativo semi-industrial, com resíduos vegetais diversos de uma feira local na Espanha. Os autores compararam os valores preditos com os valores obtidos no experimento e constataram acurácia de 90% na resposta do modelo matemático para a umidade final do produto, sendo que a temperatura do ar de secagem foi considerada a variável de entrada mais importante, seguida da vazão de ar de secagem (IGUAZ *et al.*, 2003).

Doymaz, Gorel e Akgun (2004) investigaram as características de secagem de subproduto sólido (torta de azeitona) da produção de azeite de oliva com umidade de 45%. Após coletar e classificar as amostras em função da granulometria, os autores submeteram o material ao processo de secagem em uma cabine de secagem, onde o material foi mantido no interior de uma cesta, acoplada a uma balança externa, totalmente perfurada para que o ar pudesse passar pelo produto. A velocidade do ar foi mantida constante ($1,2 \text{ m.s}^{-1}$) e a temperatura foi variada entre 80 e 110°C até que a umidade do subproduto apresentasse valor de 5% (DOYMAZ; GOREL; AKGUN, 2004).

Os autores encontraram valores de poder calorífico superior de 22 MJ.kg^{-1} . Ainda, compararam os resultados de umidade em função da temperatura obtidos com valores preditos pela equação proposta por Henderson e Pabis (1961), o qual se mostrou adequado.

Wahlen *et al.* (2017) utilizaram secador de tambor rotativo para secagem e estabilização de biomassa de algas, visando a produção de combustível sustentável. Para tanto, os autores precisaram adicionar biomassa terrestre (pó de madeira), a fim

de aumentar a coesão do material. Ao final, a aplicação do tambor rotativo mostrou-se viável economicamente.

Prates *et al.* (2018) pesquisaram os efeitos da secagem por micro-ondas (900 W por 5 min), corrente de ar aquecido (120°C por 60 min) e autoclave (120°C por 60 min) em grãos de cevada *in natura*, com o intuito de identificar e associar transformações estruturais em moléculas de proteínas e suas implicações para a nutrição e alimentação animal. Os pesquisadores identificaram e associaram as alterações causadas pelos diferentes métodos de secagem na estrutura molecular de proteínas, utilizando espectroscopia molecular – *Fourrier Transform Infrared Atenued Total Reflectance Molecular Spectroscopy* (FT-IR/ATR) (PRATES *et al.*, 2018).

A secagem em corrente de ar aquecido apresentou o melhor desempenho (93,7%) na manutenção de matéria seca, porém, ao final do estudo, a secagem em autoclave mostrou-se a mais apropriada, sob o ponto de vista da melhoria da digestão ruminal.

2.6 Estudos de secagem de bagaço de malte

A secagem de resíduos é tema recente na literatura, isso porque somente nos últimos anos, a preocupação com a sustentabilidade ambiental vem se disseminando com mais força, fazendo com que as organizações busquem alinhar suas atividades a esse tema, para a aplicação de políticas de gestão de resíduos como, redução na fonte de geração, reaproveitamento e destinação ambientalmente adequada.

Diversos trabalhos científicos, a respeito da utilização do bagaço de malte, já foram desenvolvidos ao longo do tempo em muitos países. Sob o ponto de vista energético, a abordagem *waste-to-energy* tem se destacado (CAPUTO; SCACCHIA; PELAGAGGE, 2003).

A utilização do bagaço de malte para combustão e geração de energia foi investigada por Petricek e Fort (1998), que chegaram à conclusão de que o uso de biotecnologia para a fermentação e geração de energia era aplicável ao bagaço de malte.

Sato *et al.* (2001) produziram carvão à base de bagaço de malte e avaliaram sua composição, que apresentou fósforo, cálcio, magnésio, silício, dentre outros minerais. Os autores concluíram que o carvão de bagaço de malte era inferior à maravalha (serragem de madeira), em relação às características de temperatura de

ignição e tempo de queima, porém, com a adição prévia de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ao bagaço de malte, houve melhoria das propriedades de queima do carvão, devido ao aumento da área de superfície (SATO *et al.*, 2001).

Zanker e Kepplinger (2002) estudaram a combustão do bagaço de malte em um sistema integrado de uma cervejaria, no qual o bagaço de malte foi conformado sob pressão antes da utilização na queima, sendo que o efluente líquido foi tratado e reintroduzido no processo da caldeira para geração de vapor.

Okamoto *et al.* (2002) desenvolveram um processo de fabricação de carvão a base de bagaço de malte, que continha 67% de umidade inicial, com extração da água por prensagem e posterior carbonização em ambiente com baixo índice de oxigênio. Os autores obtiveram poder calorífico superior de 27 MJ.kg^{-1} , podendo ser comparado ao bagaço de cana-de-açúcar ou cavaco de madeira.

Mussato, Dragone e Roberto (2006) descreveram que, na produção de energia, o bagaço de malte pode servir como biomassa alternativa para combustão direta, no entanto, é necessário que sua umidade esteja abaixo de 55%, fazendo-se necessária uma etapa de tratamento para pré-secagem, em que podem ser gerados gases óxidos de enxofre e nitrogênio, prejudiciais ao meio ambiente.

Cordeiro (2011) avaliou o potencial energético do bagaço de malte para utilização na cogeração de energia elétrica em caldeira, em substituição ao gás natural (GN). A autora procedeu à caracterização do bagaço de malte (BM) com análises de teor de umidade, teor de cinzas, carbono fixo, proteínas totais, carboidratos, fibra pura, energia e poder calorífico superior. A autora constatou uma relação inversa entre umidade e poder calorífico superior (PCS) e demonstrou a possibilidade de substituição parcial do GN por BM com umidade inferior a 30%.

Nigam (2017) fez uma revisão acerca da reciclagem de *Barley Spent Grains* (BSG) – Resíduo de Bagaço de Malte de Cevada – bagaço de malte. O autor destaca que a técnica mais empregada, no mundo para o tratamento desse resíduo, é a compostagem, tendo em vista o baixo custo, a aceitabilidade ambiental e a possibilidade de uso após a compostagem para fins agrícolas, para tanto, a deficiência de nitrogênio do bagaço de malte deverá ser compensada com outro material.

Mukasafari *et al.* (2018) investigaram o efeito do incremento de bagaço de malte na alimentação de suínos desmamados (idade = 49 dias) em fase de crescimento durante 42 dias. Os autores utilizaram proporções de 0% a 100% e concluíram que o acréscimo em até 50% de bagaço de malte na mistura para

alimentação, proporcionou o aumento do ganho de peso e, para valores maiores que 50%, houve diminuição e até perda de peso para alimentação com 100% de bagaço de malte.

Panjičko *et al.* (2017) estudaram a aplicação da tecnologia de digestão anaeróbia em dois estágios (fase sólida e líquida), misturando o bagaço de malte com lodo de uma estação de tratamento de efluentes líquidos tipo *Up-flow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), sendo ambos resíduos provenientes da mesma indústria de cerveja. Os autores procederam, previamente ao tratamento termoquímico da mistura, com adição de ácido clorídrico (HCl) até atingir pH de 2,00 e temperatura mantida em 95°C. Após isso, o pH foi ajustado para 6,5 com hidróxido de sódio (NaOH) e as fases sólido-líquido foram separadas. A parte sólida foi direcionada para digestão anaeróbia em um reator de estado sólido, mantido umedecido com recirculação de parte da fase líquida. A fase líquida foi direcionada a um reator biológico granular.

O experimento mostrou que, ao final do processo de 198 dias, a degradação de sólidos foi de 76% e a geração de metano (224 L kg^{-1}) ocorreu, majoritariamente, no reator granular com a fase líquida, que também foi capaz de degradar 45 mg L^{-1} de p-cresol.

Zedler *et al.* (2018) utilizaram bagaço de malte devido a sua composição lignocelulósica - 47,7% malte de trigo e 52,3% malte de cevada – e borracha triturada de pneus usados (BPn), como compósitos alternativos para fabricação de borracha natural (BN). O bagaço de malte foi previamente seco em temperatura de 80°C e, posteriormente, triturado em moinho de parafuso duplo. As frações para composição do experimento foram definidas pelos autores em função das relações 100 BN/BM_x/BPn_x, respectivamente 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 e 0/100. Foram avaliadas propriedades de cura, de resistência e características de composição morfológica. Os autores demonstraram que a utilização do BM na fração 100/0 em relação ao RPn resulta em diminuição do torque em 2,6 dNm, comparado com a composição com 75/25. Da mesma forma, o tempo ótimo de cura apresentou retardo de quase 70%. As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelaram que a superfície da composição BN/BM 100/100 é rugosa e com característica de baixa dispersão do BM na matriz de BN, associada com a presença de vazios e lacunas ao redor das partículas de BM. Ao final da pesquisa ficou evidenciado, pelos autores, que os resíduos de pneus (RPn) tem maior afinidade para composição como *filler* de borrachas naturais.

Kan *et al.* (2018) estudaram a produção de biogás, a partir da digestão anaeróbia de estado sólido do bagaço de malte. Devido à constituição do resíduo, os autores lançaram mão de pré-tratamento alcalino (hidróxido de sódio) e aquecimento com micro-ondas, a fim de alterar a cristalinidade da lignina, celulose e hemicelulose. As técnicas de pré-tratamento aplicadas resultaram na diminuição em 46% da composição de lignina e aumento da área de superfície de quase 1.700%, proporcionando maior geração de metano, em 52% comparado ao bagaço de malte sem pré-tratamento.

Fontana, Peterson e Cechinel (2018) utilizaram o bagaço de malte seco (70°C – 24h) como absorvente alternativo para íons metálicos (ferro e manganês) presentes em águas superficiais e subterrâneas. Os autores demonstraram que o resíduo seco pode ser empregado com eficiência para a remoção dos compostos e pode ser uma alternativa viável para o tratamento de águas contaminadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos, estabeleceram-se algumas etapas de estudo, que é sintetizado em um fluxograma geral da pesquisa, sendo:

- Etapa 1 – obtenção de amostras do bagaço de malte *in natura* e coleta do bagaço de malte;
- Etapa 2 – caracterização com MEV/EDS;
- Etapa 3 – planejamento de ensaios;
- Etapa 4 – ensaios preliminares;
- Etapa 5 – análise termogravimétrica;
- Etapa 6 – ensaios de secagem em estufa, convecção forçada em túnel de vento e drageadeira; e
- Etapa 7 – análise e discussão dos resultados apresentados.

3.1 Coleta do resíduo de cervejaria

O resíduo de cervejaria utilizado na pesquisa foi o bagaço de malte, obtido em uma cervejaria artesanal localizada no bairro Boqueirão, na cidade de Curitiba, Estado do Paraná.

A coleta ocorreu no dia 10 de agosto de 2018, diretamente na tina, após o processo de filtragem da cerveja tipo Índia *Pale Ale* (IPA), com os maltes do tipo *Pilsen* Nacional, Melanoidina, *Pale Ale* e Trigo Claro. Foram coletados 20 kg de resíduo, que foram acondicionados em recipientes plásticos inertes, com capacidade de aproximadamente 1 kg cada, de primeiro uso, que foram higienizados previamente com água corrente e detergente neutro. As embalagens foram fechadas após o enchimento com o resíduo e congeladas a temperatura de -4°C em freezer, em aproximadamente 30 min após a coleta.

3.2 Caracterização do bagaço de malte

3.2.1 Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) com EDS acoplado

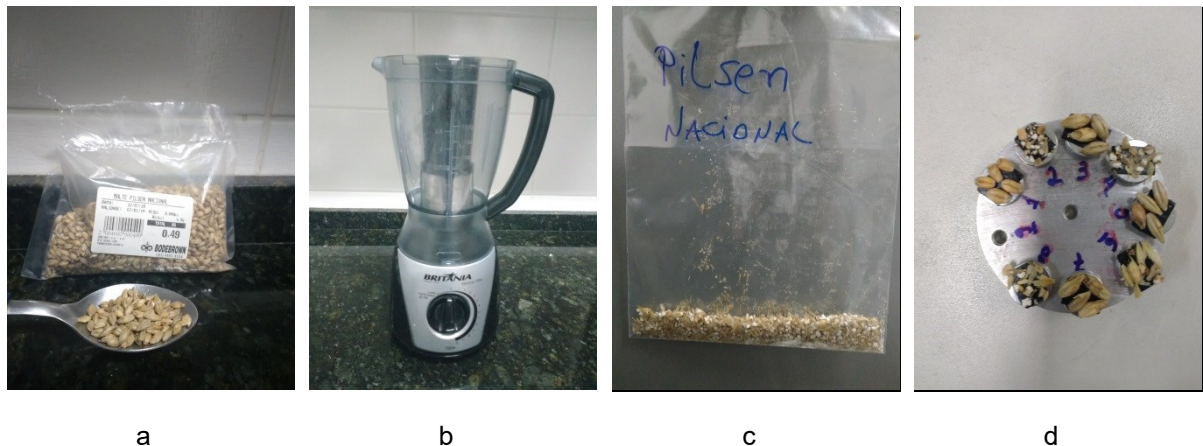
Foram realizadas análises de microscopia eletrônica de varredura com EDS acoplado, no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM), da UTFPR Curitiba, sede centro.

Foram realizados ensaios com amostras de malte de cevada *in natura* na forma de grãos e, também, na forma de partículas trituradas, antes de serem utilizados na fabricação da cerveja.

Os grãos de malte de cevada foram triturados em um liquidificador de facas, com potência de 700 W, na função pulso, por três vezes, a fim de realizar a análise no interior do grão de malte de cevada.

A Figura 14a apresenta a imagem do malte de cevada do tipo *Pilsen* Nacional, utilizado na fabricação de cerveja estilo IPA, cujo bagaço de malte foi utilizado neste estudo. A Figura 14b apresenta a imagem do equipamento utilizado para a trituração do malte de cevada. Trata-se de um liquidificador de facas, com motor elétrico com potência de 700 W de uso doméstico. Esse equipamento foi previamente limpo e enxaguado com água corrente e deixado para secagem natural. Já a Figura 14c apresenta o bagaço de malte triturado, e a Figura 14d apresenta o arranjo das amostras em *stubs*, imediatamente antes de serem analisados no equipamento de microscopia.

Figura 14 – Preparação de amostras para MEV: a) malte de cevada; b) liquidificador de facas; c) malte triturado; d) amostras em *stubs* para análise no MEV/EDS



a

b

c

d

Fonte: Autoria própria (2019).

Previamente, cada fração de amostra foi preparada em *stubs* de alumínio (meio de suporte para análise), sendo que o bagaço de malte fixado com fita de carbono e recoberto com ouro no equipamento Quanta Quorum Q150R ES.

O microscópio eletrônico de varredura utilizado (Figura 15), é da marca ZEISS EVO, modelo MA 15, com filamento de tungstênio e câmara para amostras de até 250 mm de diâmetro e massa de 50 0g com movimento total do estágio (XYZ e inclinação). Para a formação de imagem foram utilizados detectores de elétrons secundários (em alto vácuo, em pressão variável e retro espalhados). E, ainda, possui EDS acoplado, com detectores da Oxford Instruments para a microanálise química.

Figura 15 – Equipamento MEV com EDS acoplado



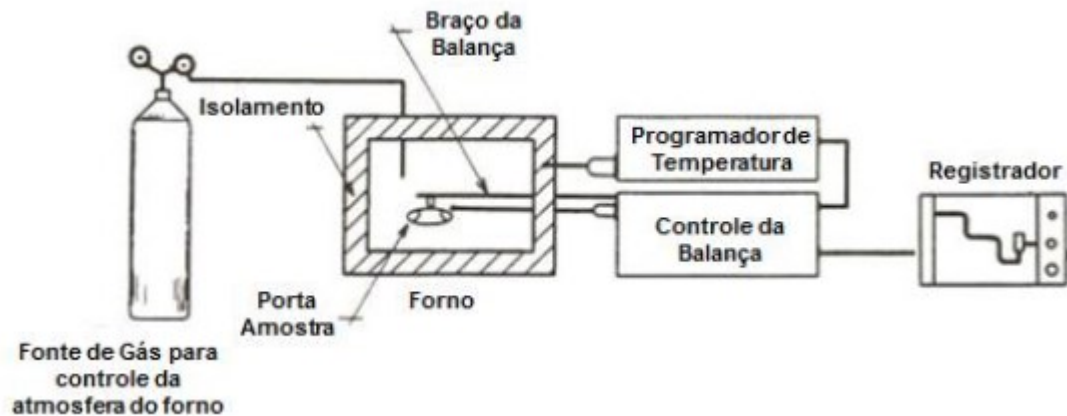
Fonte: A autoria própria (2019).

3.3 Análises térmicas

3.3.1 Análise termogravimétrica e análise térmica diferencial

A análise termogravimétrica mede a variação de massa de um material em função da temperatura a que está submetida. O equipamento utilizado neste ensaio foi uma termobalança da marca BP Engenharia, modelo RB-3000-20, cuja sensibilidade é de 0,01 g e a velocidade de aquecimento é de 12,4°C por minuto, até a temperatura máxima de 1.000,0 + - 0,1°C. Um esquema dessa análise pode ser visto na Figura 16 a seguir.

Figura 16 – Esquema de uma termobalança para análise termogravimétrica e análise térmica diferencial



Fonte: Denari (2013).

As amostras de bagaço de malte utilizadas, neste ensaio, passaram por secagem em estufa sem recirculação a 102°C por 5h. As análises foram conduzidas pelo técnico de laboratório do NPT/DACOC da UTFPR.

3.4 Os ensaios de secagem

Optou-se, neste trabalho, por realizar ensaios de secagem em estufa sem recirculação, de modo a identificar o comportamento da secagem com aquecimento predominantemente por condução térmica. A realização de ensaios em túnel de vento visou identificar o comportamento de secagem com aquecimento, principalmente, por convecção e, por fim, nos ensaios de secagem em equipamento rotativo tipo drageadeira com soprador de ar aquecido, em que o aquecimento ocorre pelos dois mecanismos, convecção e condução, simulando um tambor rotativo.

Os principais parâmetros operacionais de controle nesses experimentos são a temperatura (°C) e a inclinação, este último, especificamente para a drageadeira.

Foram definidas as temperaturas médias de 60°C, 71°C, 81°C e 102°C para os ensaios em estufa sem recirculação. Como a temperatura apresentava uma oscilação durante cada experimento, foram apresentados aqui os valores médios. Para os ensaios em túnel de vento, as temperaturas foram de 60°C, 70°C e 78°C, sendo 78°C, a temperatura máxima do equipamento e a velocidade do ar de seca fixada em 1,2±0,1 por limitações do equipamento.

Para a drageadeira, as temperaturas do ar de entrada foram definidas em 65°C e 99°C, sendo essas temperaturas a mínima e máxima possível do aquecedor e, ainda, variou-se a inclinação do equipamento entre a máxima de 45° e a mínima de 0° em relação ao plano horizontal.

A Tabela 5 apresenta as variáveis do ensaio de secagem na coluna à esquerda, que contém a temperatura, a inclinação e a velocidade do ar de secagem, os parâmetros de controle, e a Tabela 6 apresenta as condições operacionais para os ensaios em drageadeira (c1 a c4).

Tabela 5 – Condições operacionais e variáveis dos ensaios de secagem

	ESTUFA	TÚNEL VENTO	DRAGEADEIRA
TEMPERATURA (°C)	60; 71; 81; 102	60; 70; 78	65; 99
INCLINAÇÃO (°)	-	-	0; 45
VELOCIDADE DO AR DE SECA (m/s)	-	1,2 +- 0,1	-

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 6 – Condições operacionais para os ensaios em drageadeira (c1 a c4)

	TEMPERATURA E	INCLINAÇÃO	ROTAÇÃO
	°C	°	RPM
c1	65	0	
c2	65	45	
c3	99	0	33
c4	99	45	

Fonte: Autoria própria (2019).

3.4.1 Secagem em estufa sem recirculação

a) DACOC/UTFPR

Em todos os experimentos realizados em estufa foi utilizada a mesma placa de pétri, com dimensões de 100,0 mm de diâmetro e 1,0 mm de altura, para o acondicionamento do bagaço de malte.

O bagaço de malte foi previamente descongelado em temperatura ambiente por 24h, homogeneizado no próprio recipiente plástico e acondicionado na placa de

pétri, de maneira a preenchê-la completamente, porém, sem compactar a amostra, sendo o excesso removido com o auxílio de uma régua metálica. O conjunto placa de pétri + bagaço de malte foi posicionado no centro volumétrico da estufa pré-aquecida, nas temperaturas anteriormente determinadas.

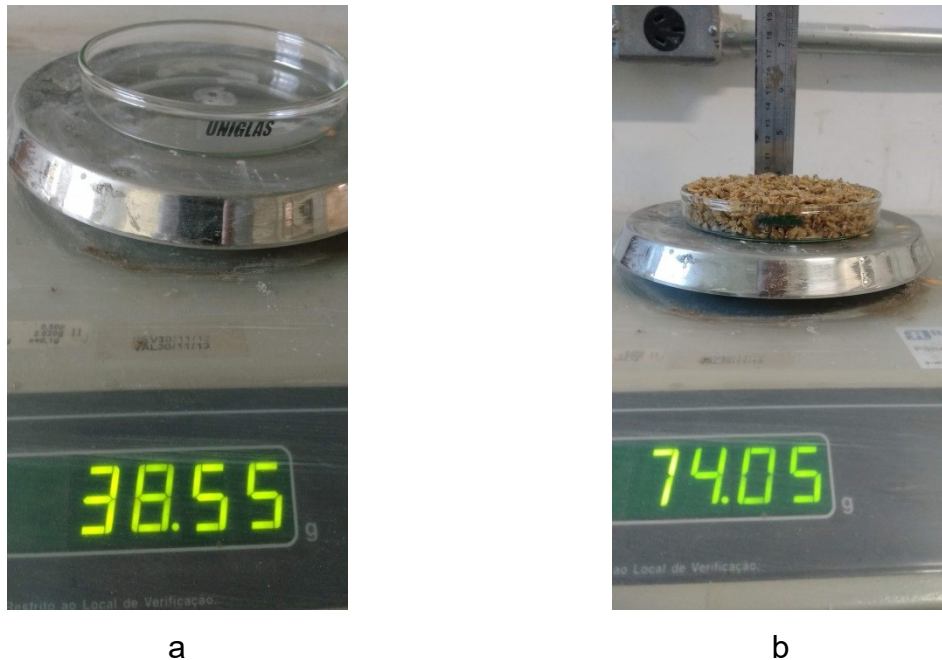
Nos ensaios de secagem a 80°C e 100°C utilizou-se a estufa modelo S150SD com temperatura ajustável até 200°C, precisão e variação de +/- 0,5°C com sensor tipo J, do fabricante Biopar Ltda, do Núcleo de Pesquisa Tecnológica (NPT) do Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACOC), como pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 – Estufa Biopar



Fonte: Autoria própria (2019).

Os valores de massa foram coletados ao longo do tempo, com intervalo de 5 min para cada medição. Utilizou-se uma balança semianalítica digital modelo BG 2000 do fabricante Gehaka, com erro de $\pm 0,1$ g e precisão de $\pm 0,01$ g (Figura 18a e 18b).

Figura 18 – Balança Gehaka

a

b

Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 18a mostra a obtenção da massa da placa de pétri utilizada em todos os ensaios com estufa e no túnel de vento. A Figura 18b mostra o arranjo da balança durante a medição da massa de bagaço de malte, sendo a massa da placa de pétri conhecida e, ao fundo, uma régua milimétrica posicionada na vertical, a fim de verificar a variação da altura da camada de bagaço de malte em função do tempo.

Decorrido o tempo de 5 min, o conjunto era retirado da estufa com o auxílio de uma espátula metálica e uma luva de kevlar. A massa era, então, anotada e seguida de um registro fotográfico. Após isso, o conjunto era novamente posicionado dentro da estufa. Cada procedimento durou em média 1 min, tempo necessário para medição da massa na balança e devolução à estufa. Procurou-se manter o conjunto da placa de pétri + bagaço de malte na mesma posição no centro volumétrico da estufa, em todos os ensaios.

Em cada medida de massa dos ensaios a 80°C e 100°C em estufa sem recirculação de ar foi registrada uma fotografia digital, como visto na imagem 18b, para mensurar a variação da altura da camada de bagaço de malte na placa de pétri ao longo do tempo, para então estimar/predizer o comportamento de encolhimento. Para isso, foi posicionada uma régua milimétrica em ângulo de 90° ao fundo da balança, na direção central da placa de pétri, sendo cada fotografia digital realizada na mesma posição.

A obtenção de massa constante admitida para este trabalho é a condição em que a variação de massa do bagaço de malte esteja na região centesimal de precisão da balança.

b) DEQ/UFSCar

Na sede da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), localizada na cidade de São Carlos, interior de São Paulo, junto ao Departamento de Engenharia Química (DEQ), nos laboratórios do Centro de Secagem de Pastas, Suspensões e Sementes, seguiu-se a preparação da amostra de bagaço de malte, segundo o mesmo procedimento descrito neste item. Foi acoplada uma balança de gancho à estufa, com uma estrutura de pequenas e finas correntes de aço dotadas de uma espécie de “gaiola”, que acomodou a placa de pétri com o bagaço de malte, de modo que a medição de massa foi parcialmente automatizada, não sendo necessário retirar a amostra da estufa para medição em balança. Por esse motivo, não houve registro fotográfico e, também, não foi possível medir a altura da camada de bagaço de malte na placa de pétri em função do tempo.

A Figura 19 apresenta o arranjo da estufa *Thermolyne Furnace 6000* e a balança de precisão *OHAUS Adventures 310 + - 0,002 g* utilizadas para os ensaios de secagem nas dependências do DEQ/UFSCar.

Figura 19 – Arranjo do ensaio em estufa sem recirculação DEQ/UFSCar



Fonte: Autoria própria (2019).

Com esse arranjo foram realizados dois ensaios, variando a temperatura (60°C e 70°C) e a massa de bagaço de malte (34,70 g e 24,17 g). Previamente em cada ensaio, o sistema foi tarado com a placa de pétri vazia.

3.5 Secagem em túnel de vento

O túnel de vento utilizado no ensaio por convecção forçada foi construído por Cassandre, Moreira e Sartori (2001) e é mostrado na Figura 20.

O túnel de vento está localizado no DEQ/UFSCar, no Centro de Secagem. A linha experimental é dotada de: (01) motor soprador radial de ar com capacidade de 0,75 HP; (02) sistema de resistências em série para aquecer o ar de seca; (03) trocador de calor para resfriamento do ar quando for necessário operar com temperatura inferior a 60°C; (04) controlador de voltagem e sensor de temperatura DIGI-SENSE 2186-00 A do fabricante *Cole Parmer*, dotado de termopar instalado no compartimento de secagem e esse controlador atua no sistema de resistências; (05) túnel de vento dotado de sistema de placas defletoras e pás helicoidais para homogeneizar o fluxo de ar na região do compartimento de secagem; (06) região de secagem, que consiste em uma abertura com tampa móvel para posicionamento da amostra; (07) balança de gancho acoplada ao túnel de vento; e (08) leito de sílica para retirada de umidade do ar de seca para recirculação.

Com a mesma placa de pétri utilizada nos ensaios em estufa e, igualmente preenchida com o bagaço de malte, sem compactá-lo, a mesma foi posicionada em suspensão no túnel de vento pré-aquecido. Para inserir a placa de pétri na região de secagem foi utilizado o mesmo sistema de correntes e a mesma balança analítica descrita neste item (ver a Figura 21). A medição de massa ocorreu em intervalos de 5 min. Foram avaliadas as temperaturas de 60°C, 70°C e 78°C nos ensaios de secagem realizados.

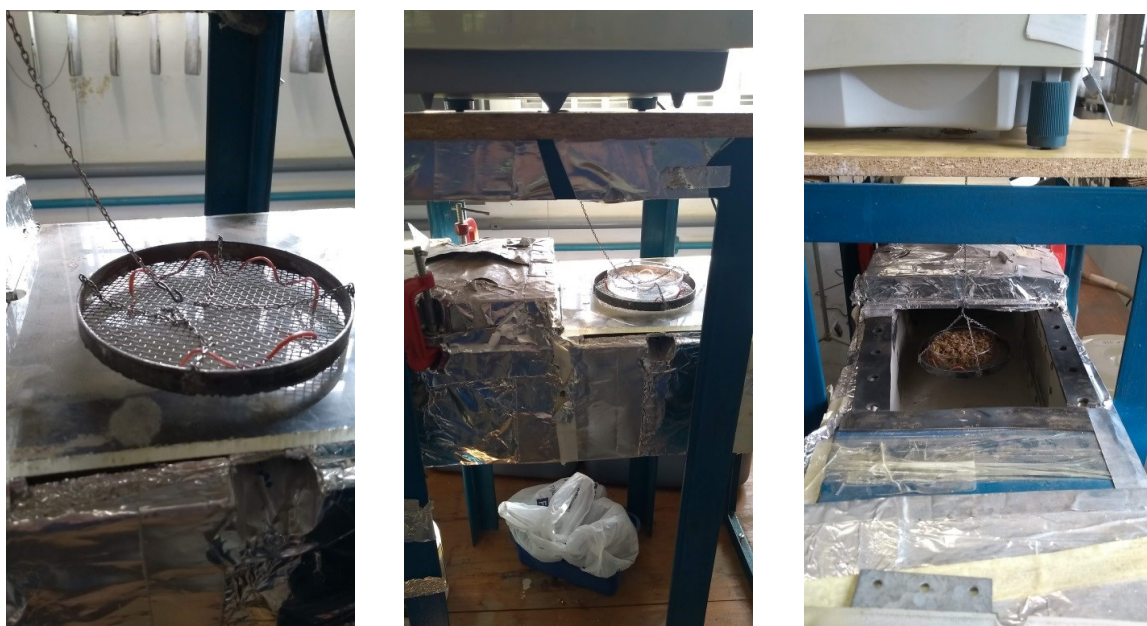
Figura 20 – Túnel de vento



Fonte: Cassandre, Moreira e Sartori (2001).

As Figuras 21a e 21b mostram em detalhe a “gaiola” que serviu de base para a placa de pétri. Já a Figura 21c mostra o posicionamento centralizado do arranjo da gaiola com bagaço de malte, inserido na região de secagem do túnel de vento.

Figura 21 – Arranjo na região de secagem no túnel de vento



A

B

C

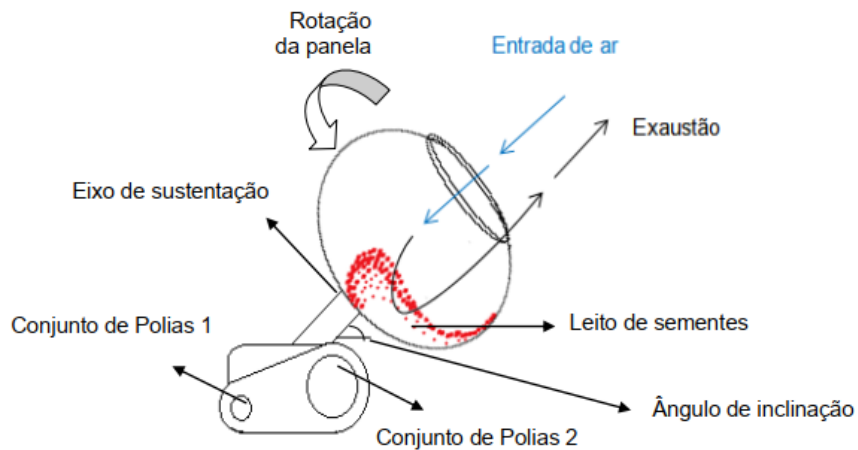
Fonte: Autoria própria (2019).

3.6 Secagem em drageadeira

A drageadeira ou panela rotatória é um equipamento rotativo que pode ser utilizado para recobrimento de drágeas na indústria farmacêutica e que vem sendo adaptado para estudos de recobrimento de sementes (ROSSO, 2013).

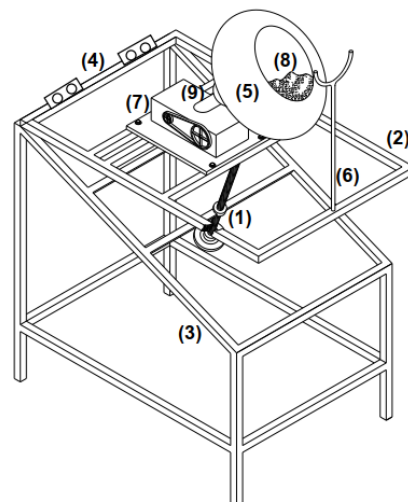
Neste trabalho, a drageadeira de cobre do fabricante Primar®, com formato elíptico e diâmetro aproximado de 285 mm e profundidade aproximada de 195 mm, foi adaptada para secagem de bagaço de malte. A drageadeira utilizada é apresentada na Figura 22 e 23.

Figura 22 – Esquema de funcionamento da drageadeira



Fonte: Rosso (2013).

Figura 23 – Partes componentes da drageadeira



LEGENDA

1. Parafuso com rosca "sem fim", para regulagem da inclinação da mesa móvel
2. Mesa móvel, parte superior do suporte
3. Parte fixa da estrutura metálica, base
4. Dobradiças metálicas, fixadas entre a base da estrutura e o suporte da panela rotatória
5. Panela giratória
6. Suporte para sustentação da tubulação de ar aquecido
7. Polias para o ajuste da velocidade de rotação e motor elétrico
8. Leito de partículas
9. Eixo de inclinação da panela rotatória

Fonte: Rosso (2013).

O ar de entrada é aquecido com soprador acoplado a um aquecedor térmico com potência de 1.200 W do fabricante Fabbe-Primar, modelo 128.

A temperatura do ar foi monitorada com termopar com sensor *Digi-Sense Type-J*, instalado na saída do soprador térmico. A temperatura do bagaço de malte no interior da drageadeira e a temperatura do fundo foram medidas com termômetro infravermelho marca ICEL, modelo TD-985, intervalo de operação entre -50°C até 1600°C , com erro de $\pm 1,5\%$ para a faixa de temperatura entre 20°C e 200°C . A rotação da drageadeira é fixa, de aproximadamente 38 rpm.

Em cada ensaio realizado na drageadeira utilizou-se um quilo de bagaço de malte, previamente descongelado, homogeneizado e com temperatura ambiente na faixa de 20°C .

Foram realizados cinco ensaios de secagem, variando a temperatura entre 65 e 99°C e a inclinação com o plano horizontal entre a mínima de 0° (zero) e a máxima de 45° , respectivamente.

Em intervalos de tempo de 5 a 30 minutos durante os ensaios, foram numeradas e retiradas algumas amostras de bagaço de malte, como pode ser visto na Figura 24, que tiveram suas massas medidas em balança analítica e, após o término de cada ensaio, essas amostras foram colocadas em uma estufa com temperatura de $102 \pm 3^{\circ}\text{C}$ por período de 24h para determinação da umidade.

Figura 24 – Amostras de bagaço de malte durante ensaio em drageadeira



Fonte: Autoria própria (2019).

Cada ensaio durou entre 180 até 300 min. O controle de rotação do bagaço de malte no interior da drageadeira foi observado com o auxílio de um marcador visual, do tipo esfera de alumínio. A cada aparecimento da esfera considerou-se como uma rotação.

O ângulo de entrada de ar do soprador térmico adotado foi de aproximadamente 45° em relação ao eixo da drageadeira, com leve deslocamento excêntrico conforme a Figura 25, de modo a possibilitar a retirada de amostras e medidas de temperatura durante a secagem.

Figura 25 – Arranjo do soprador de ar em relação ao eixo da drageadeira



Fonte: Autoria própria (2019).

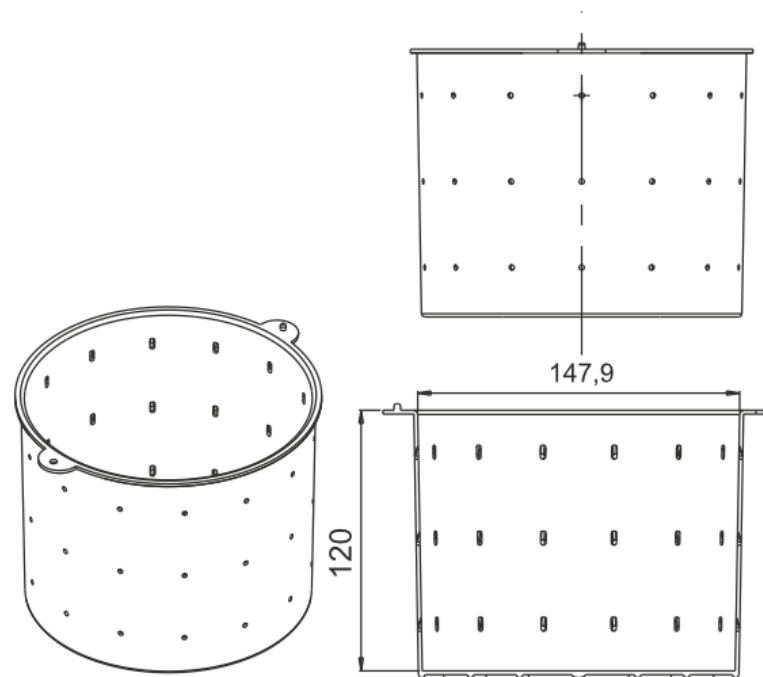
3.7 Desaguamento em prensa hidráulica manual

A prensa hidráulica utilizada no desaguamento foi do tipo manual da marca SIWA, com sistema hidráulico com óleo sob pressão, que proporciona o deslocamento do pistão na direção vertical com sentido para baixo.

Para acondicionar o bagaço de malte para prensagem e desaguamento, adaptou-se um recipiente, mostrado na Figura 26, com formato cilíndrico,

confeccionado em polipropileno, com 120 mm de altura útil, diâmetro de 147,9 mm, com furação nas laterais e fundo aberto em malhas de aproximadamente 2 mm. Essa forma é semelhante às utilizadas para confecção de queijo artesanal, tipo frescal ou ricota.

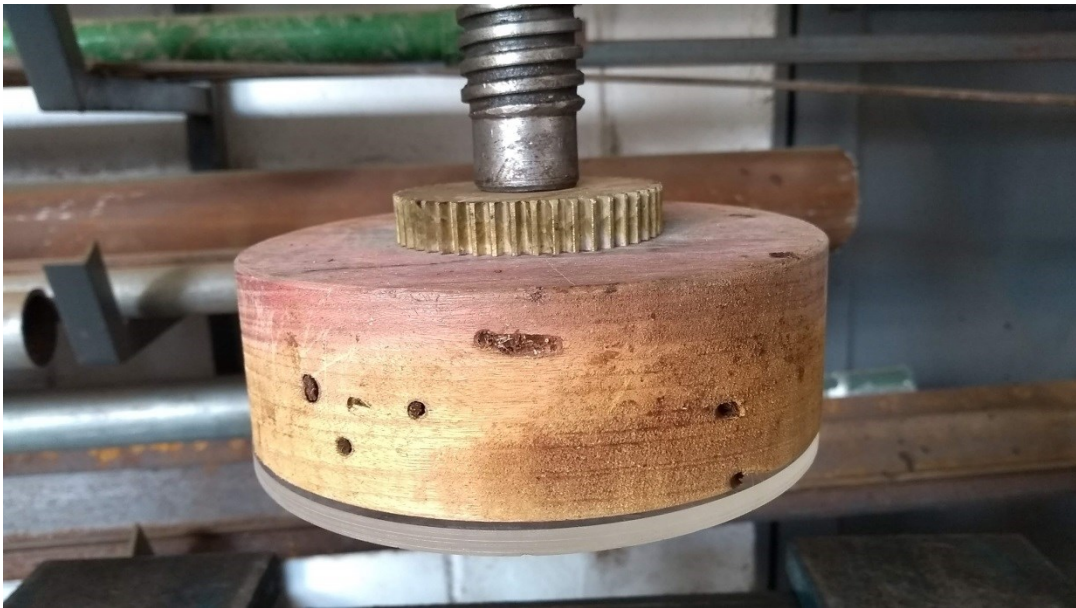
Figura 26 – Recipiente em polipropileno utilizado para acondicionamento do bagaço de malte durante a prensagem e desaguamento



Fonte: Autoria própria (2019).

Na ponta do pistão do cilindro hidráulico, adaptou-se uma peça confeccionada em madeira e acrílico, como mostra a Figura 27, com formado cilíndrico de medidas ligeiramente menores que o recipiente de polipropileno, a fim de distribuir a pressão aplicada por toda a superfície de contato.

Figura 27 – Peça adaptada para distribuição de pressão na superfície de contato



Fonte: Autoria própria (2019).

Em cada ensaio, a massa de bagaço de malte utilizada foi de 0,5 kg, sendo variados os níveis de pressão aplicados, de 0,5, 1,0 e 1,5 t. A cada pressão aplicada, o líquido gerado pelo bagaço de malte foi coletado em uma forma de alumínio em posição centralizada no eixo de ação do pistão, logo abaixo do recipiente de polipropileno, após descanso de 60 s, como ilustrado na Figura 28. A massa de líquido foi medida a cada intervalo de pressão, bem como o deslocamento do pistão.

Figura 28 – Detalhe do arranjo da prensa



Fonte: Autoria própria (2019).

Durante a realização dos ensaios de desaguamento, a posição das partes foi mantida, a fim de minimizar erros no experimento. No último ensaio realizado, o recipiente de polipropileno se rompeu.

Esse ensaio de desaguamento foi repetido fazendo uso de um filtro de tecido, como mostra a Figura 29, com o intuito de inibir a colmatagem dos furos para drenagem e averiguar a influência do tecido no desaguamento.

Figura 29 – Feltro utilizado no ensaio de desaguamento em presa hidráulica



Fonte: Autoria própria (2019).

3.8 Estudo de encolhimento “*Shrinkage*”

A coleta de dados para estudo do encolhimento do bagaço de malte, durante os ensaios conduzidos em estufa sem recirculação, foi realizada observando a altura da camada do bagaço de malte na placa de pétri por meio dos registros fotográficos, e para avaliação das imagens, foi utilizado o *software IMAGE J*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Origem, coleta e armazenagem do bagaço de malte

As amostras de bagaço de malte foram coletadas em uma microcervejaria de Curitiba, bairro Boqueirão, que atualmente produz cerca de 8.000 litros de cerveja artesanal por mês. Dentre os estilos que compõe a produção, o estilo IPA é o mais produzido, sendo utilizados os maltes do tipo *Pilsen*, *Pale Ale*, Melanoidina e Trigo Claro.

As amostras foram coletadas diretamente na tina de mosturação, logo após a filtração do mosto. O bagaço de malte, ainda quente, foi acondicionado em um saco plástico até que sua temperatura permitisse a transferência para embalagens de poliestireno com capacidade de 1,0 kg cada. No total foram coletados 20 quilos de bagaço de malte, que foram imediatamente congelados e temperatura de -4°C .

Figura 30 – Coleta(a) e armazenagem(b) e do bagaço de malte(c) utilizado nos ensaios de secagem



a



b



C

Fonte: A autoria própria (2019).

4.2 Caracterização do bagaço de malte

A caracterização do bagaço de malte foi realizada com a análise de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) acoplado ao equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

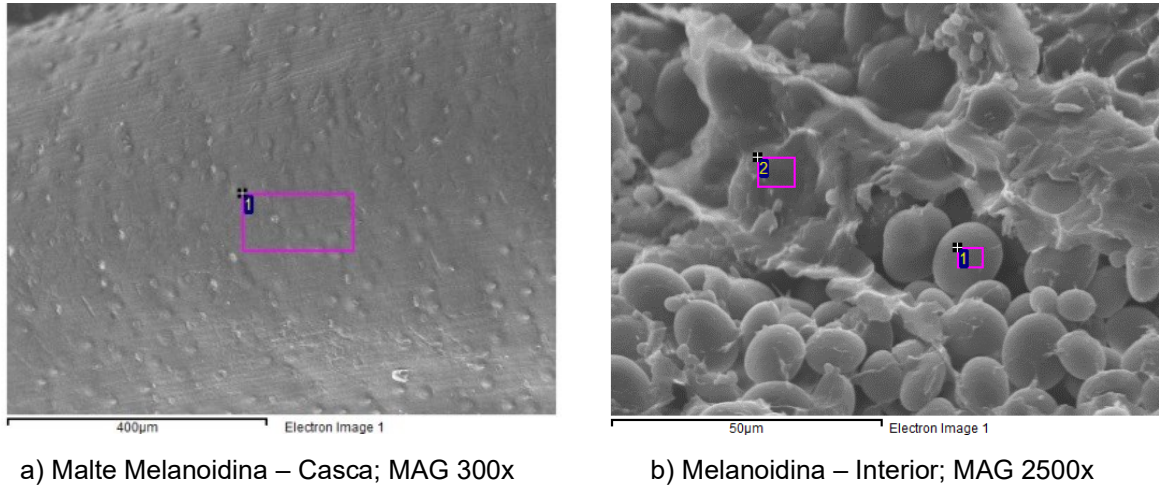
4.2.1 Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) com EDS acoplado

A fim de identificar a morfologia e a composição química das partes de maior interesse – casca e interior – dos grãos de bagaço de malte, foi realizada a microscopia eletrônica de varredura e análise de EDS, nos maltes que compõem a receita da cerveja que originou o bagaço de malte. Nas imagens eletrônicas geradas pela microscopia, os contrastes apresentados em tons de cinza são interpretados em função da densidade do núcleo atômico do elemento, assim, tons mais escuros estão associados a núcleos atômicos maiores e tons mais claros, a núcleos atômicos menores.

A morfologia da casca do malte do tipo Melanoidina apresenta superfície rugosa com pequenos pigmentos distribuídos de maneira uniforme. O interior apresenta morfologia com formas esféricas imperfeitas aglomeradas e variadas em tamanho e uma região “membranosa”. Foram realizadas três análises de composição

elementar por EDS (região retangular delimitada na cor rosa) nas regiões da casca, esfera e na região “membranosa” (Figura 31).

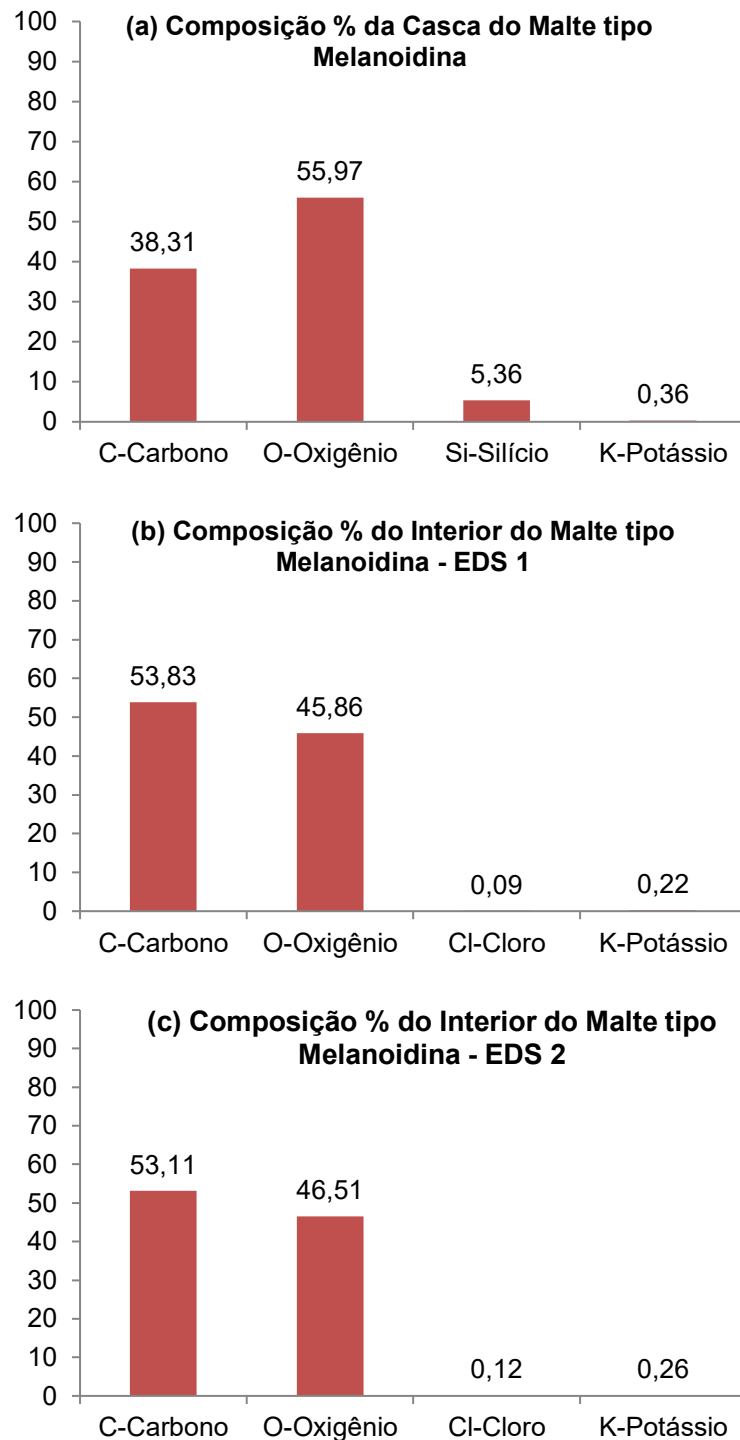
Figura 31 – Morfologia do malte de cevada realizada por MEV com indicação dos pontos de análise por EDS: a) Malte Melanoidina – casca; MAG 300x; b) Melanoidina – interior; MAG 2500x



Fonte: Autoria própria (2019).

A análise na região da casca determinou a presença de oxigênio (55,97%), carbono (38,31%), silício (5,36%) e potássio (0,36%). Nas regiões internas, a análise do EDS 01 na região da esfera determinou concentrações de carbono (53,83%), oxigênio (45,86%), cloro (0,09%) e potássio (0,22%); e a análise do EDS 02 na região membranosa determinou concentrações de carbono (53,11%), oxigênio (46,51%), cloro (0,12%) e potássio (0,22%). Comparativamente, a região interna apresentou diferenças em relação à casca do malte Melanoidina, devido à presença do elemento cloro, tanto na esfera quanto na região membranosa, e a inversão da proporcionalidade na concentração dos elementos carbono e oxigênio (Figura 32a, 32b e 32c).

Figura 32 – Composição elementar com EDS nas regiões: (a) casca, (b) esfera e (c) região “membranosa” do malte tipo Melanoidina

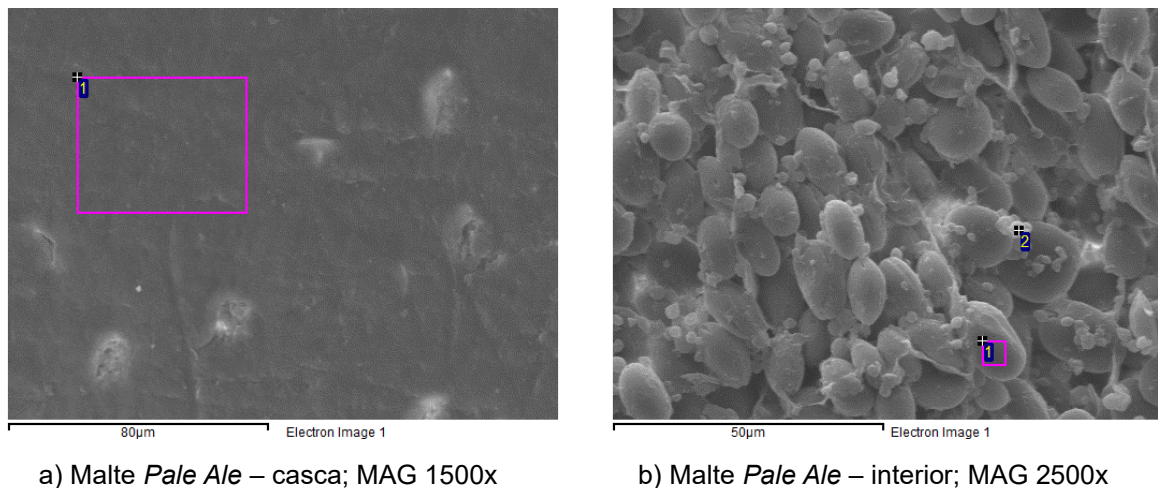


Fonte: Autoria própria (2019).

A morfologia da casca do malte do tipo *Pale Ale* apresenta superfície lisa e irregularidades em tons claros que lembram formas circulares. O interior apresenta morfologia com formas esféricas imperfeitas aglomeradas e variadas em tamanho e

formas. Foram realizadas três análises de composição elementar por EDS nas regiões da (a) casca, (b) esfera de maior tamanho e em um ponto de uma esfera de menor tamanho (Figura 33).

Figura 33 – Morfologia do malte de cevada realizada por MEV com indicação dos pontos de análise por EDS: a) Malte *Pale Ale* – casca; MAG 1500x; b) Malte *Pale Ale* – interior; MAG 2500x



a) Malte *Pale Ale* – casca; MAG 1500x

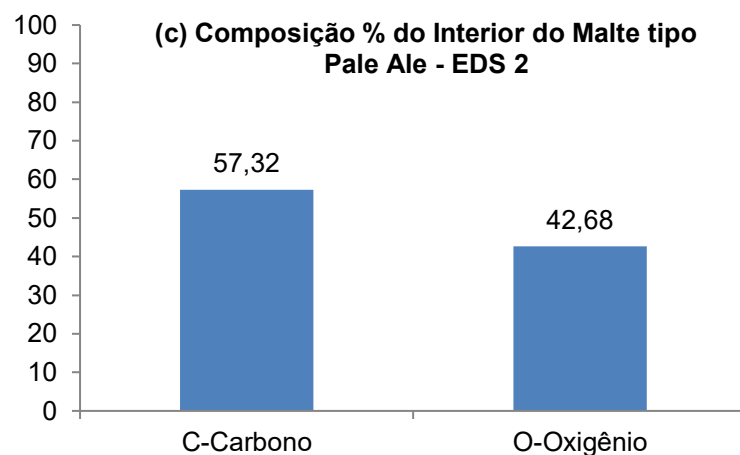
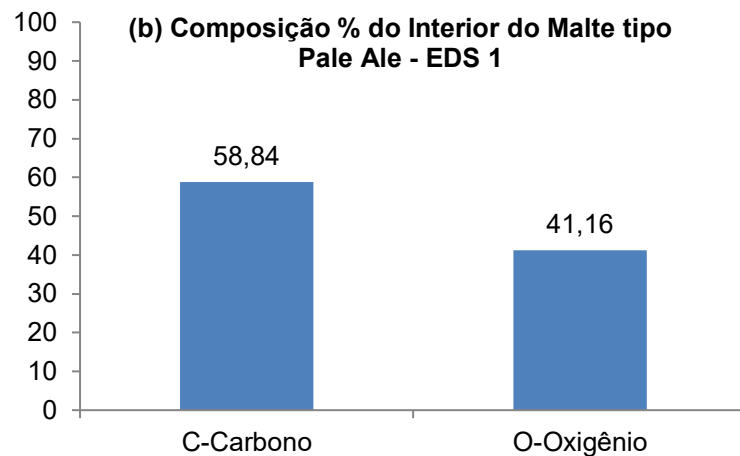
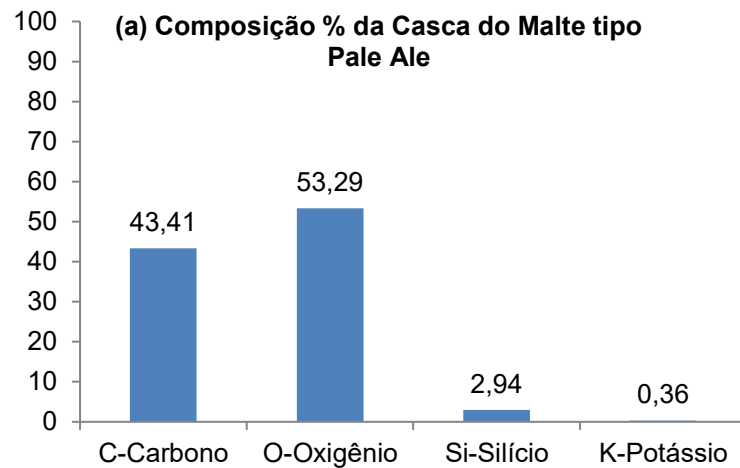
b) Malte *Pale Ale* – interior; MAG 2500x

Fonte: Autoria própria (2019).

A análise na região da casca determinou a presença de oxigênio (53,29%), carbono (43,41%), silício (2,94%) e potássio (0,36%). Nas regiões internas, a análise do EDS 01 na região da esfera determinou as concentrações de carbono (58,84%), oxigênio (41,16%); e a análise do EDS 02 na região membranosa determinou as concentrações de carbono (57,32%), oxigênio (42,68%) (ver Figura 34a, 34b e 34c).

A casca do malte *Pale Ale* tem menor concentração de silício quando comparado ao malte Melanoidina, e não contém cloro e potássio em seu interior e a inversão da proporcionalidade na concentração dos elementos carbono e oxigênio é semelhante para o malte Melanoidina, quando é comparada a casca e o interior.

Figura 34 – Análise da composição elementar com EDS nas regiões: (a) casca, (b) maior esfera e (c) menor esfera do malte tipo Pale Ale

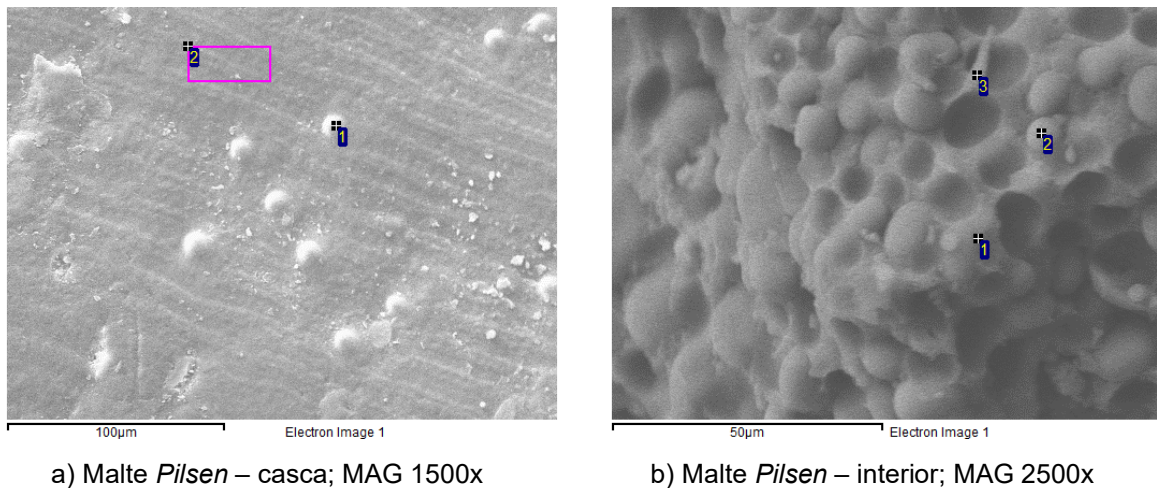


Fonte: Autoria própria (2019).

A morfologia da casca do malte do tipo *Pilsen* apresenta superfície parcialmente lisa com linhas bem definidas em diferentes tons de cinza e irregularidades em tons claros que lembram formas circulares. O interior apresenta

morfologia com formas esféricas bem definidas com tamanhos variados e aglomeradas (quase como encaixadas) em um base-suporte. Foram realizadas cinco análises de composição elementar por EDS nas regiões da (a 1, 2) casca, (b 1, 3) na região base-suporte e (b 2) na esfera, (Figura 35).

Figura 35 – Morfologia do malte de cevada realizada por MEV com indicação dos pontos de análise por EDS: a) Malte *Pilsen* – casca; MAG 1500x; b) Malte *Pilsen* – interior; MAG 2500x



a) Malte *Pilsen* – casca; MAG 1500x

b) Malte *Pilsen* – interior; MAG 2500x

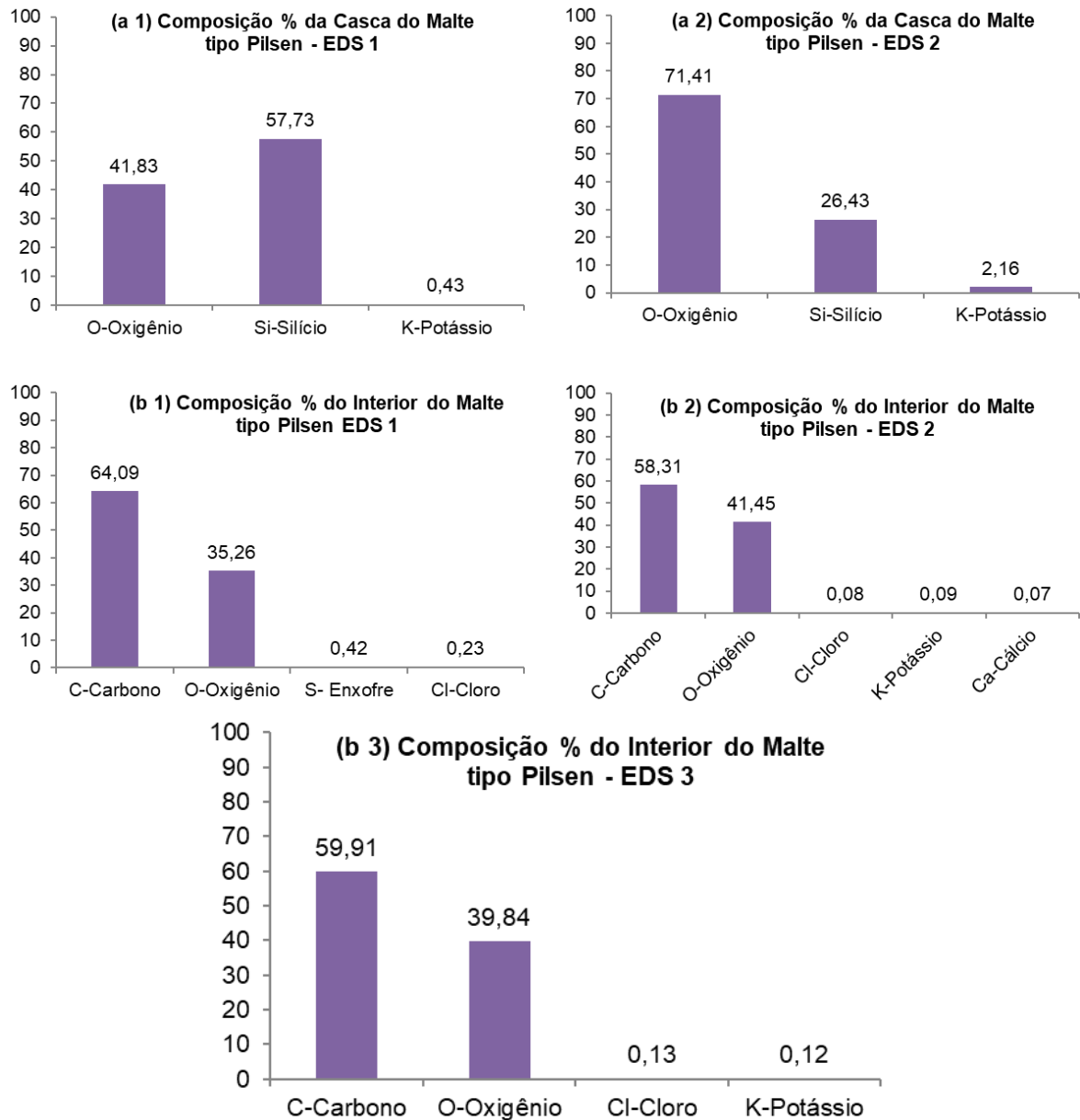
Fonte: Autoria própria (2019).

A análise de EDS nos pontos 1 e 2 na região da casca determinou, respectivamente, a presença de oxigênio (41,83%, 71,41%), silício (57,73%, 26,43%) e potássio (0,43%, 2,16%). Nota-se a inversão na concentração dos elementos oxigênio e silício entre esses pontos.

Nas regiões internas, a análise de EDS nos pontos 1 e 3 na região de base-suporte determinou, respectivamente, as concentrações de carbono (64,90%, 59,91%), oxigênio (35,26%, 39,84%), cloro (0,23%, 0,13%) e, ainda, no EDS 1, a presença de enxofre (0,42%) e no EDS 3 a presença de potássio (0,12%).

A análise na região da esfera, do EDS 02, determinou as concentrações de carbono (58,31%), oxigênio (41,45%), cloro (0,08%), potássio (0,09%) e cálcio (0,07%). A casca do malte *Pilsen* não apresentou carbono em sua composição, porém, a concentração de silício foi, consideravelmente, superior a todos os outros maltes, entre 5 e 10 vezes maior (ver Figura 36).

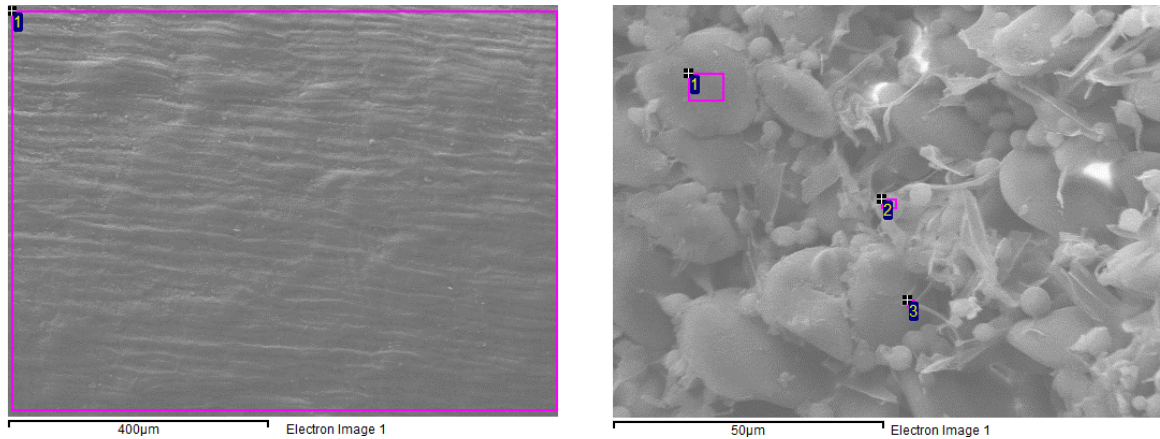
Figura 36 – Análise da composição elementar com EDS nas regiões: (a 1) e (a 2) casca, (b 1) e (b 2) interior, (b 3) interior do Malte tipo Pilsen - EDS 3



Fonte: Autoria própria (2019).

A morfologia da casca do malte de trigo apresentou-se diferente dos outros maltes, pois a sua superfície é rugosa com pequenos flancos contínuos e sem pigmentos ou formas circulares. O interior apresenta morfologia com formas esféricas imperfeitas aglomeradas e variadas em tamanho. No entanto, é possível notar a maior quantidade de esferas pequenas em relação aos outros maltes estudados. Foram realizadas quatro análises de composição elementar por EDS (região retangular delimitada na cor rosa) nas regiões da casca, esfera (Figura 37).

Figura 37 – Morfologia do malte de cevada realizada por MEV com indicação dos pontos de análise por EDS: a) Malte de trigo – casca; MAG 1000x; b) Malte de trigo – interior; MAG 2500x



a) Malte de trigo – casca; MAG 1000x

b) Malte de trigo – interior; MAG 2500x

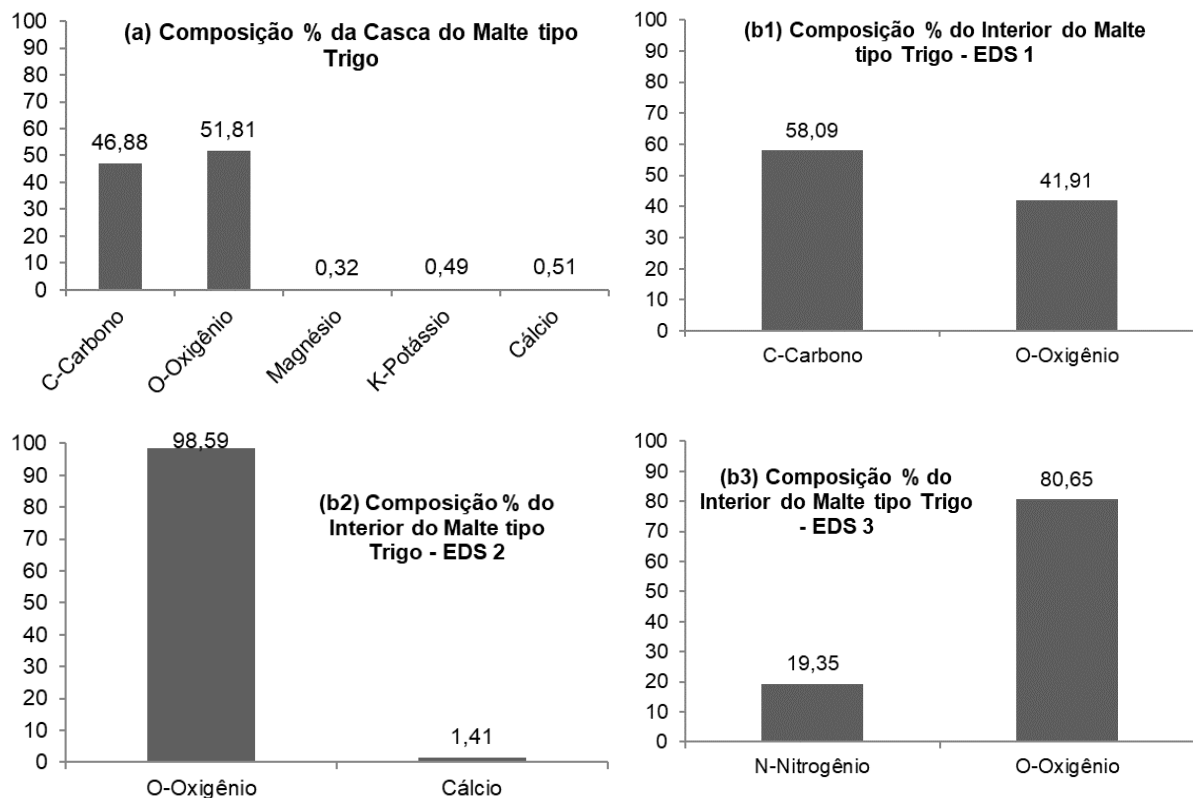
Fonte: Autoria própria (2019).

A análise de EDS nos pontos 1 na região da casca do malte de trigo foi a única que apresentou magnésio em sua composição, e ainda: oxigênio (51,81%); carbono (46,88%); potássio (0,49%); cálcio (0,51%); e magnésio (0,49%).

Nas regiões internas, a análise de EDS no ponto 1 junto a superfície de uma esfera determinou apenas dois elementos: carbono (58,09%); e oxigênio (41,91%).

As análises de EDS nos pontos 2 e 3, regiões mais claras na imagem, apresentaram, respectivamente, concentrações de oxigênio (98,59%, 80,65%), cálcio (1,41%) e nitrogênio (19,35%) (ver Figura 38).

Figura 38 – Análise da composição elementar com EDS nas regiões: (a) casca, (b 1, 2 e 3) da região interna do malte de trigo



Fonte: Autoria própria (2019).

De maneira geral, os principais elementos encontrados nas cascas dos maltes foram o oxigênio, o carbono e o silício, e em menor quantidade, o potássio para os maltes *Melanoidina*, *Pale Ale* e *Pilsen*. Para o malte de trigo também foram observadas concentrações de cálcio e magnésio.

Os autores Lima (2010), Mussato, Dragone e Roberto (2006) e Sato *et al.* (2001) também encontraram o silício, cálcio e magnésio na caracterização de bagaço de malte. No entanto, a ocorrência não está associada a casca do malte, como é demonstrado neste trabalho exploratório. A presença em abundância do elemento oxigênio é justificada pela presença da sílica e silicatos, além da própria umidade.

Cabe dizer que o carbono e o silício têm propriedades químicas semelhantes, porém, o silício não ocorre em estado puro, sendo a maioria de sua ocorrência natural sob a forma de sílica (SiO_2) ou de Silicatos ($Si_xO_y + "Z"$), sendo que o termo "Z" pode ser um ou mais elementos metálicos, ou ainda, remotamente, o hidrogênio ou nitrogênio (JUTZI; SCHUBERT; 2003).

Chama atenção a indicação, mesmo que em baixíssima concentração, de um elemento pesado como o polônio (Po) no interior do malte tipo *Pilsen*. Da mesma forma, a presença de enxofre (S) e a presença de cloro (Cl) no malte de Melanoidina. A origem desses elementos ainda não foi relatada na literatura em cervejas artesanais.

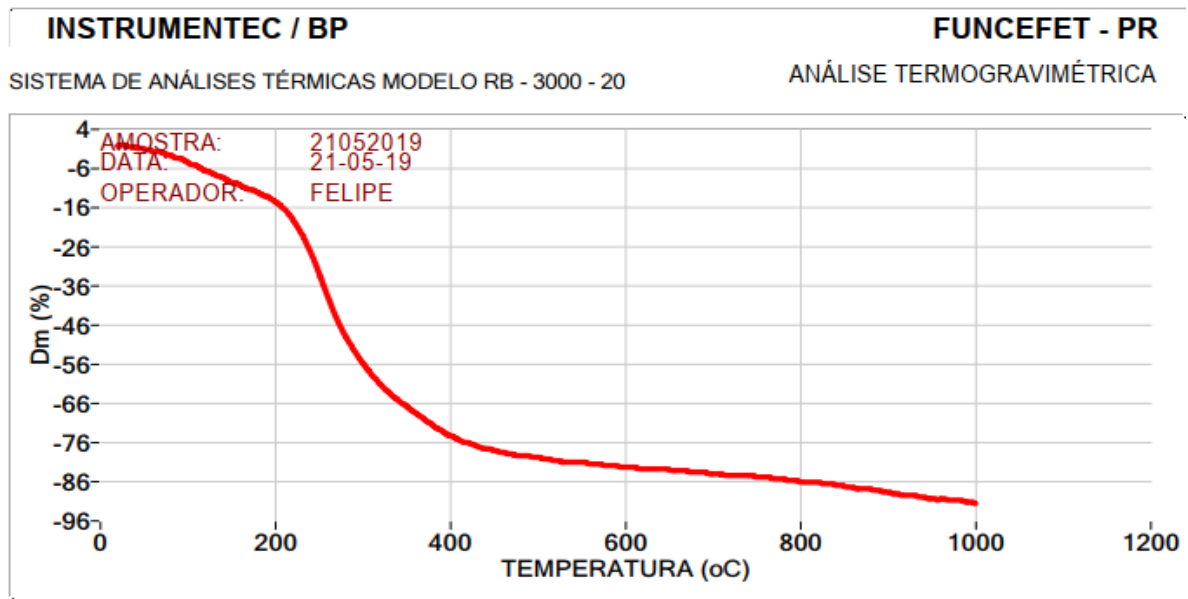
O polônio e o enxofre podem ter origem natural, ou seja, serem constituintes comuns ao malte tipo *Pilsen* nacional, ou pode ter ocorrido contaminação cruzada em etapas anteriores ao processo de fabricação da cerveja. Essa segunda hipótese pode ser aplicada, por exemplo, na malteação (germinação da cevada), ou ainda, pode ter ocorrido na fase da agricultura, com aplicação de fungicidas ou outros coadjuvantes de controle de pragas, que podem conter em sua composição os elementos, o enxofre e o cloro (BRAIBANTE; ZAPPE, 2012).

4.3 Análises térmicas

4.3.1 Análise termogravimétrica (ATG)

As curvas da análise termogravimétrica (ATG) e sua derivada (Figura 39 e 40) apresentam dois eventos de decomposição de massa em função da temperatura e uma fase final de estabilização. O primeiro no evento entre 29°C e 120°C pode ser indicativo de evaporação de umidade, com perda de 6,51% da massa do bagaço de malte; e o segundo evento entre 120°C e 456°C pode ser entendido como a decomposição da matéria orgânica em CO_x, principalmente hemicelulose e celulose, com perda de 71,77% da massa. Um terceiro período, mais resistente, diz respeito a decomposição de ligninas e carbono fixo. Os autores Ferreira (2012) e Seye, Cortez e Gomez (2000) encontraram valores similares para o bagaço de cana-de-açúcar e para a casca de cana-de-açúcar, respectivamente. A perda de massa total na termogravimetria foi de 91,52%, o que significa que o teor de cinzas e carbono fixo para queima em temperatura de até 1000°C é de 8,48%. Comparado com a borra de vinho, caracterizada por Dias (2018), o bagaço de malte apresenta melhor desempenho para queima.

Figura 39 – Análise termogravimétrica em termos de variação % de massa em função da temperatura; $m = f(t \text{ } ^\circ\text{C})$



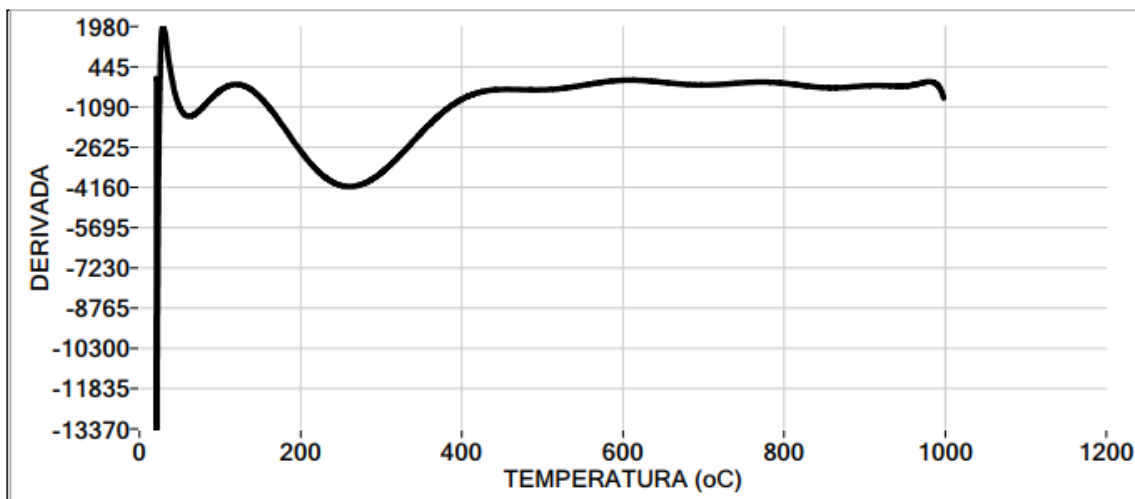
AMOSTRA: 21052019
 DATA: 21-05-19
 OPERADOR: FELIPE

VELOCIDADE DE AQUECIMENTO: 12.4 oC/Min.
 FORNO Nr: 3 ISOLADO
 OBS: IPA 10-08

TEMP. oC	LIMITES CONSIDERADOS	PERDA DE MASSA
61 oC	29 - 120 oC	6.51 %
260 oC	120 - 456 oC	71.77 %
PERDA DE MASSA TOTAL 91.52 %		

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 40 – Derivada primeira da Análise Termogravimétrica (DTG)

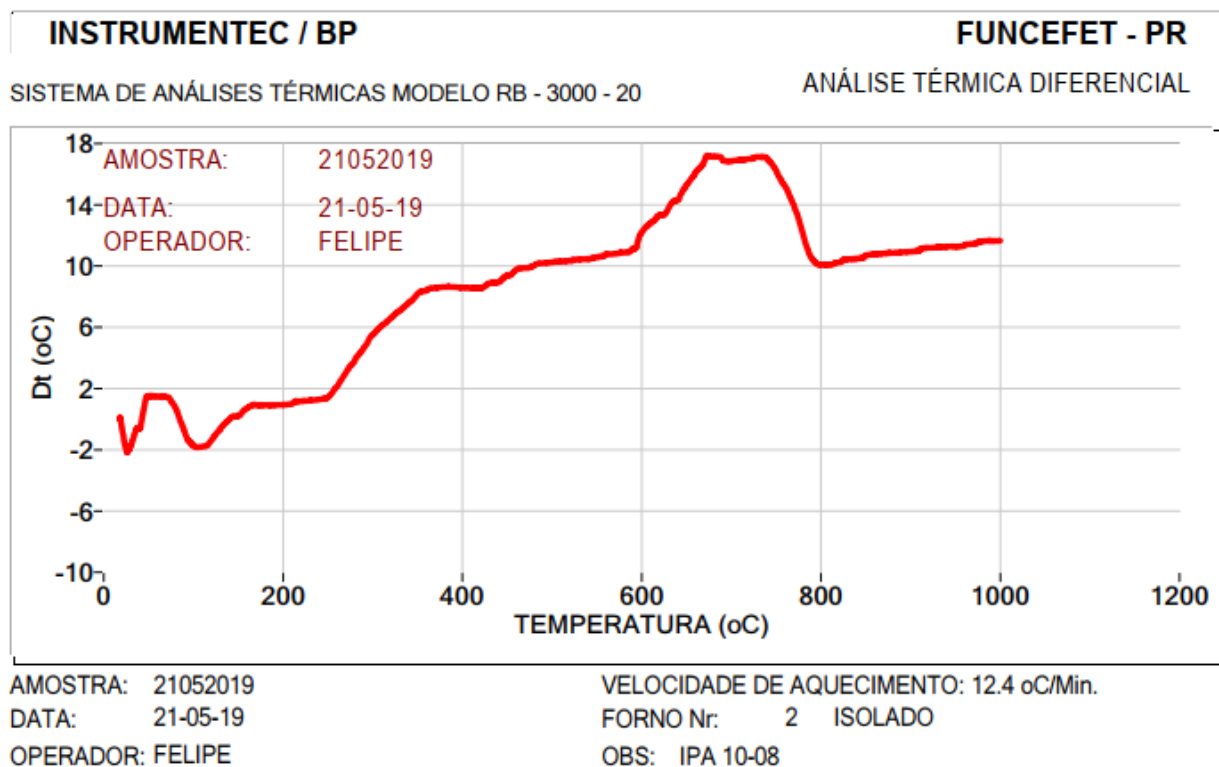


Fonte: Autoria própria (2019).

4.3.2 Análise Térmica Diferencial (ATD)

A ATD não registrou mudanças significativas de variação de temperatura para o bagaço de malte e não houve picos endotérmicos ou exotérmicos. No entanto, percebe-se, na faixa de temperatura de 100°C, uma variação correspondente a evaporação de água, e a partir dessa temperatura, o comportamento da curva é sempre em sentido de variação positiva da temperatura, até aproximadamente 750°C com estabilização a partir de 800°C, em concordância com a análise termogravimétrica anterior.

Figura 41 – Análise Térmica Diferencial (ATD)

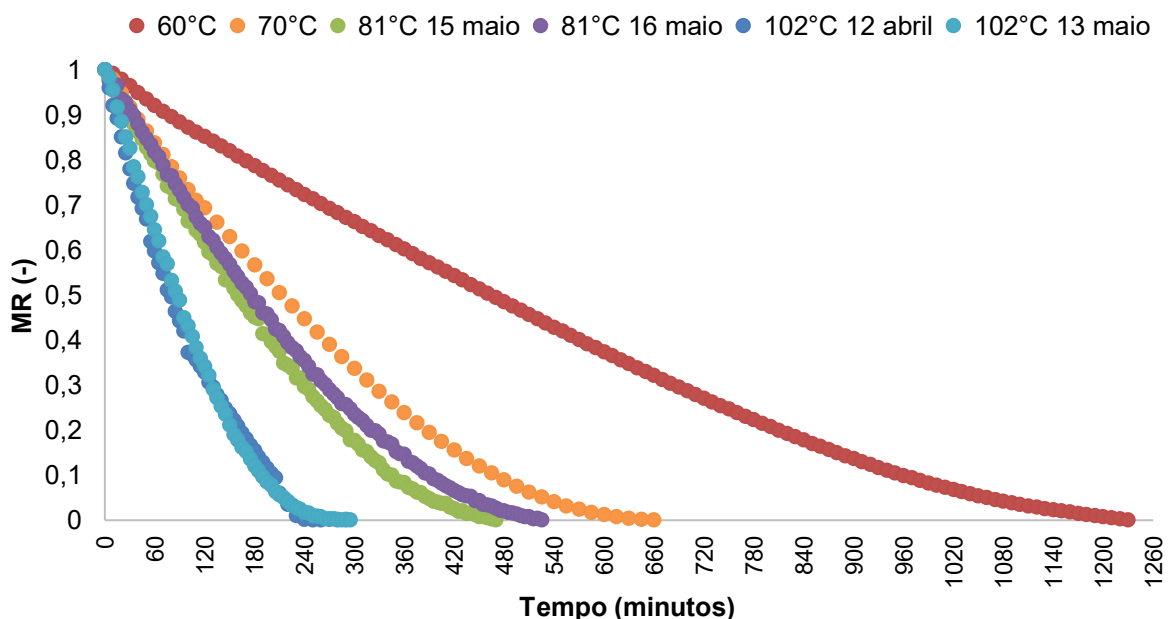


Fonte: Autoria própria (2019).

4.4 Ensaios de secagem em estufa sem recirculação

Os resultados dos ensaios em estufa sem recirculação de ar demonstram que o aumento da temperatura implica em menor tempo de secagem, ou seja, a umidade de equilíbrio é atingida em menor tempo. Para 60°C, 70°C, 81°C e 102°C, os tempos de secagem foram, respectivamente, 1230, 660, 498 (em média) e 295 min (ver Figura 42). Comportamentos similares foram encontrados por Dias (2018), ao investigar a secagem de borra de vinho tinto em estufa sem recirculação, e por Bourscheidt *et al.* (2011), no entanto, para esse autor, a massa de bagaço de malte utilizada no estudo foi de aproximadamente 6,03 g, atingindo a umidade de equilíbrio em aproximadamente 650 min (10,8h) para a temperatura de 60°C, enquanto no presente trabalho utilizou-se 34,7 g (5,7 vezes maior) e a umidade de equilíbrio foi atingida aos 1230 minutos (20,5h), possibilitando o entendimento que a massa inicial de resíduo exerce influência no tempo de secagem.

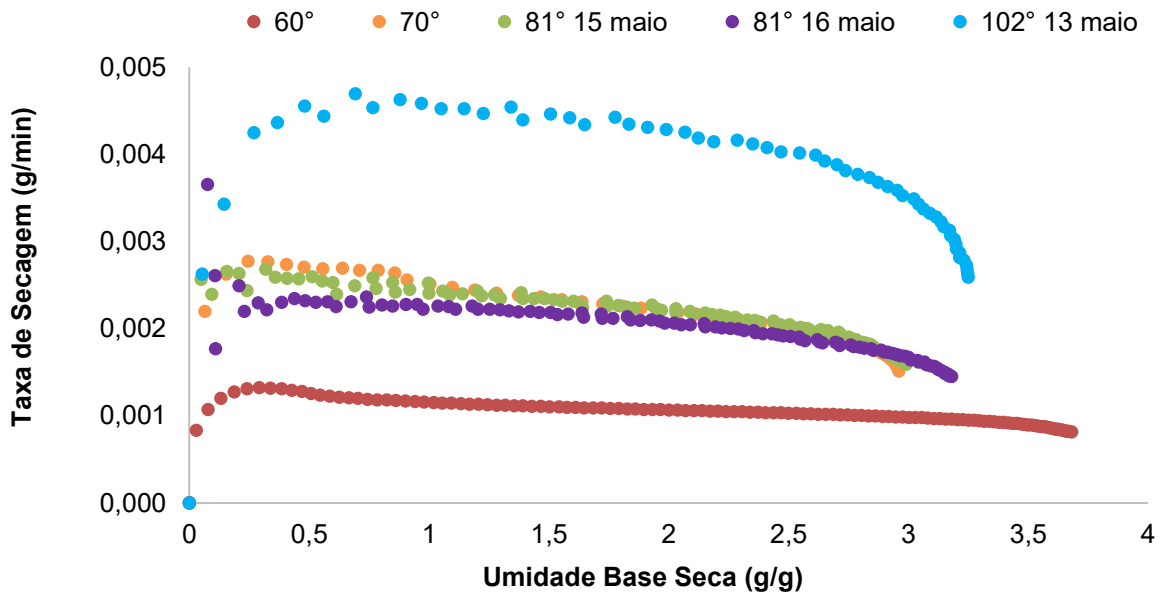
Figura 42 – Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios de secagem em estufa sem recirculação



Fonte: Autoria própria (2019).

É evidente que as cinéticas de secagem para as diferentes temperaturas dos ensaios de secagem em estufa sem recirculação apresentam-se maiores, de acordo com o aumento da temperatura (ver Figura 43).

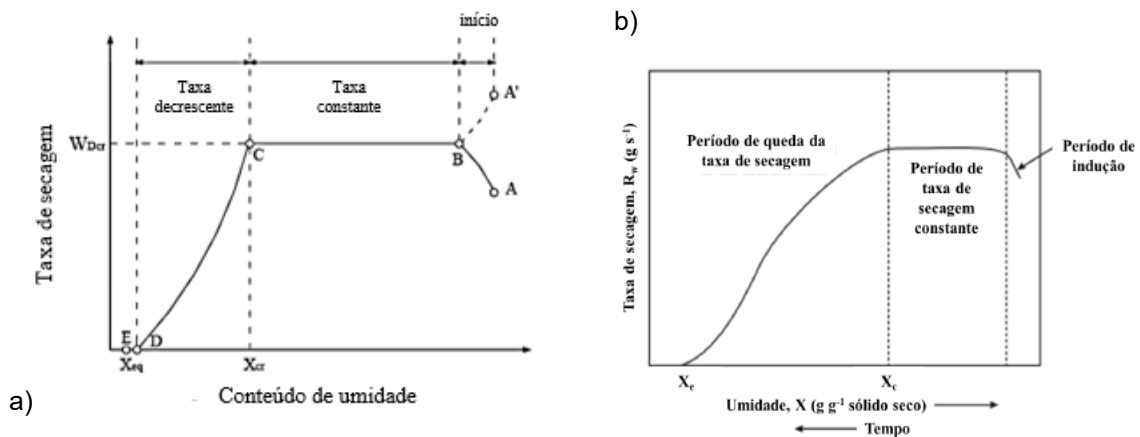
Figura 43 – Taxa de secagem para estufa sem recirculação de ar em função da umidade em base seca



Fonte: Autoria própria (2019).

O período de ativação ou de taxa inicial de secagem na região entre 3,75-3,0 g/g da Figura 43 é discreto em comparação ao representado pelo segmento da curva A-B da Figura 44. Percebe-se a ausência de um período de taxa constante, segmento B-C, quando comparado a Foust (2012), Park *et al.* (2007) e Strumillo e Kudra (1986), quanto ao período de taxa decrescente, há maior similaridade com a curva apresentada por Doran (2013).

Figura 44 – Curvas típicas de taxa de secagem em função da umidade em base seca



Fonte: Adaptado de: a) Strumillo e Kudra (1986); Park *et al.* (2007); Foust (2012); e b) Doran (2013).

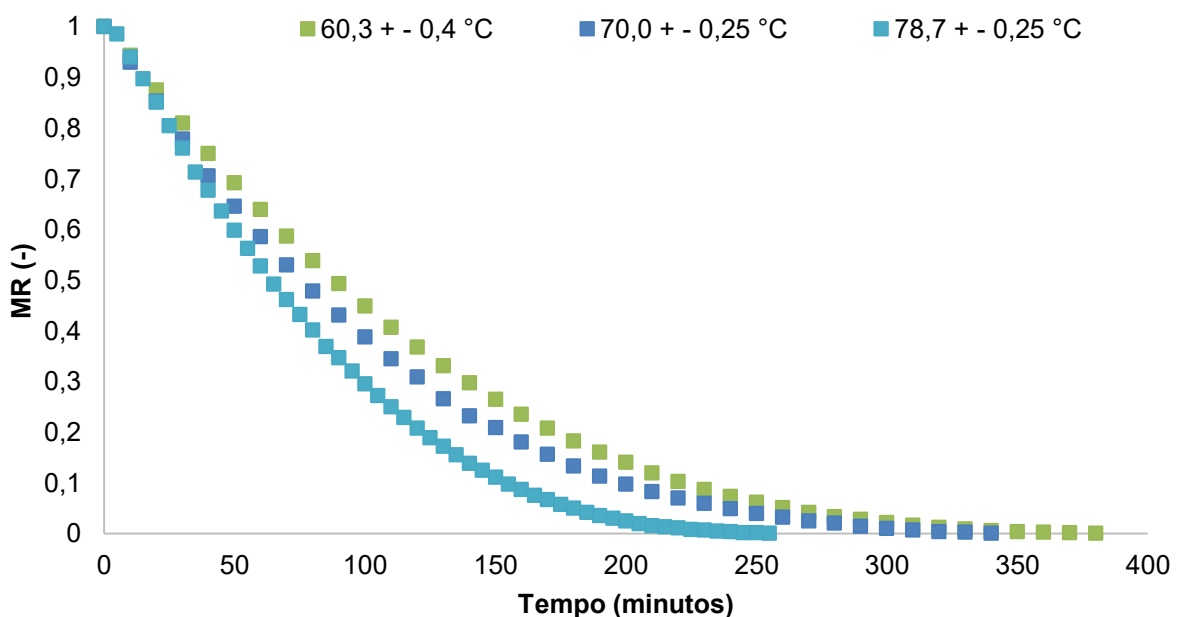
Esse comportamento significa que o bagaço de malte tem sua temperatura aumentada, buscando a condição de equilíbrio com o meio de secagem (interior da estufa), porém, suas características capilar, porosa e não higroscópica associadas à difusividade interna atuam de maneira a tornar mais lenta a secagem de bagaço.

4.5 Secagem em túnel de vento

Os resultados dos ensaios em túnel de vento com velocidade do ar constante de $1,2 \text{ ms}^{-1}$ demonstram comportamento similar aos ensaios em estufa sem recirculação de ar.

No entanto, os tempos necessários para atingir as umidades de equilíbrio nas respectivas temperaturas são, consideravelmente menores, em relação à secagem por condução (estufa sem recirculação de ar). Para 60°C , 70°C e $78,7^\circ\text{C}$ os tempos de secagem foram, respectivamente, 380 min (324% menor), 340 min (194% menor) e 255 min (51% menor) (ver Figura 45). Este último valor é ainda menor que o encontrado para 102°C em estufa.

Figura 45 – Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios de secagem em túnel de vento

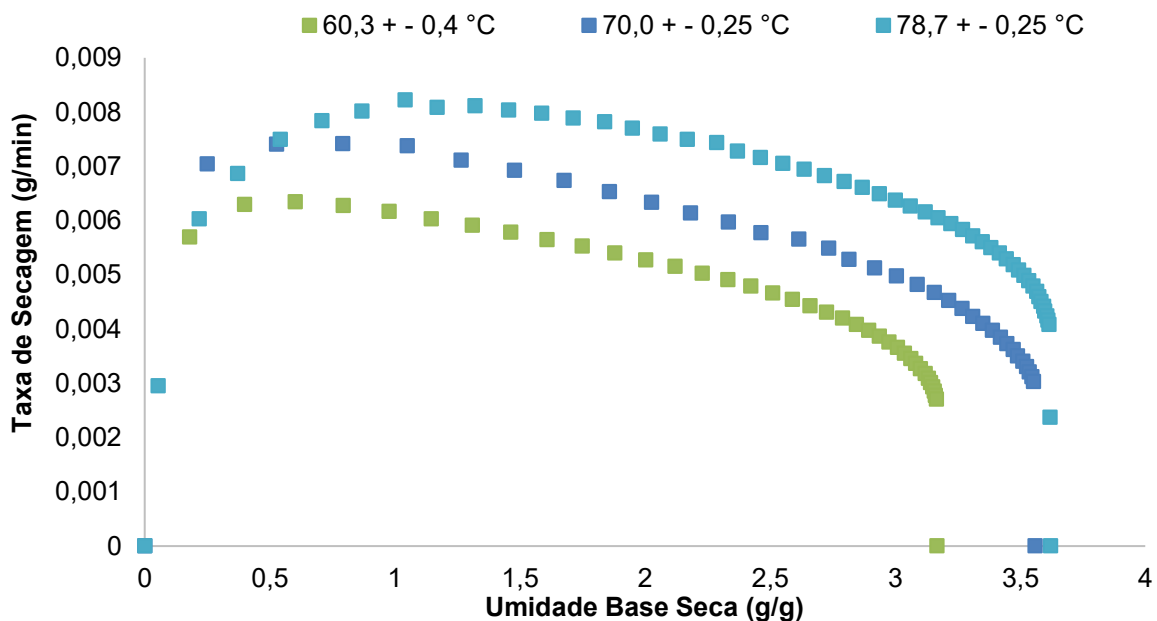


Fonte: Autoria própria (2019).

Essa significativa redução no tempo de secagem pode ser explicada pela maior quantidade de calor proporcionada pela velocidade do ar, livre de umidade, ao bagaço de malte, potencializando a troca simultânea de calor e massa por convecção e os processos difusivos internos, que predominam nos instantes finais da operação de secagem.

A cinética de secagem da Figura 46 apresenta sua forma mais bem definida quando comparada com a Figura 43 e mantém a coerência, indicando maiores valores de taxa de secagem para as maiores temperaturas.

Figura 46 – Curva de cinética de secagem para túnel de vento: taxa de secagem em função da umidade em base seca



Fonte: Autoria própria (2019).

Sua forma côncava é composta por uma sequência de taxas crescentes (à direita na abcissa), sem um período constante, seguida de taxa decrescente até que o bagaço alcance a umidade de equilíbrio para valores próximos de zero (à esquerda na abcissa). A comparação das curvas com os autores Foust (2012), Park *et al.* (2007), Strumillo e Kudra (1986) e Duran (2013) torna evidente a ausência do período de taxa constante e o período de ativação não é “acentuado”.

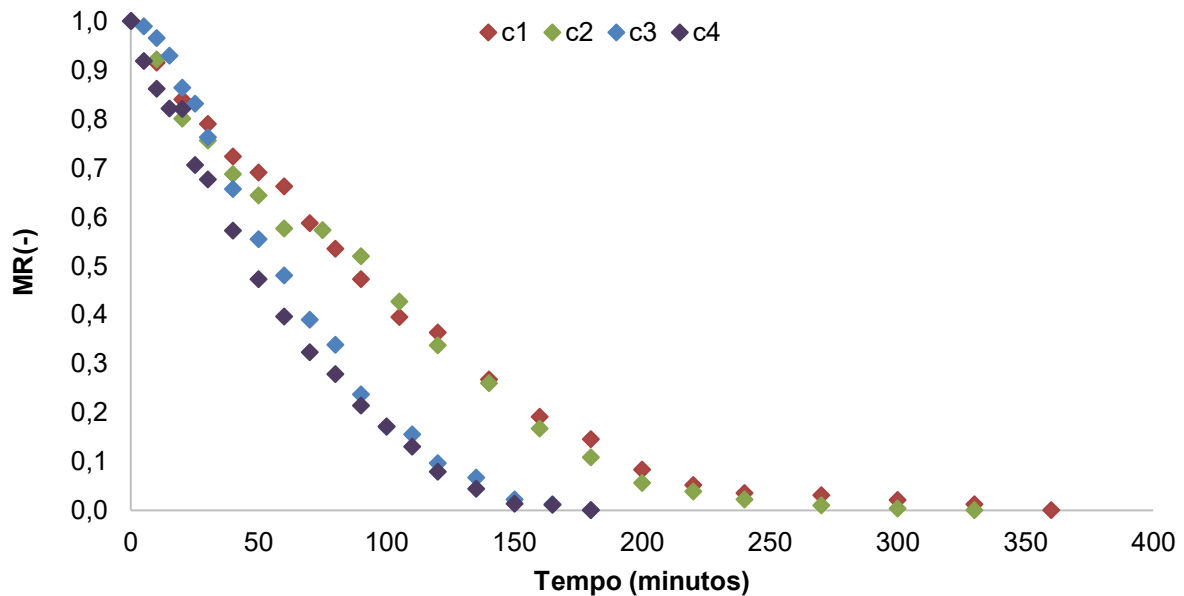
Ainda, de acordo com Strumillo e Kudra (1986), um material cujo perfil da taxa de secagem sem um período de taxa constante definido, pode ser classificado como não higroscópico.

4.6 Secagem em drageadeira

Na Figura 47 são apresentados os perfis de secagem para as condições c1 a c4, com variação da temperatura do ar de entrada e inclinação da drageadeira. Percebe-se que o comportamento da curva é coerente com os demais resultados encontrados com as técnicas anteriores, com predominância da temperatura na cinética de secagem.

O perfil de secagem da drageadeira pode ser considerado misto, *a priori*, pois há o componente de secagem por condução, no que diz respeito ao contato do bagaço do malte com a superfície da panela. No entanto, o mecanismo predominante para a retirada da umidade é o convectivo, pois a fonte de calor é o ar aquecido, que também é o meio de transporte da massa de umidade.

Figura 47 – Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios em drageadeira

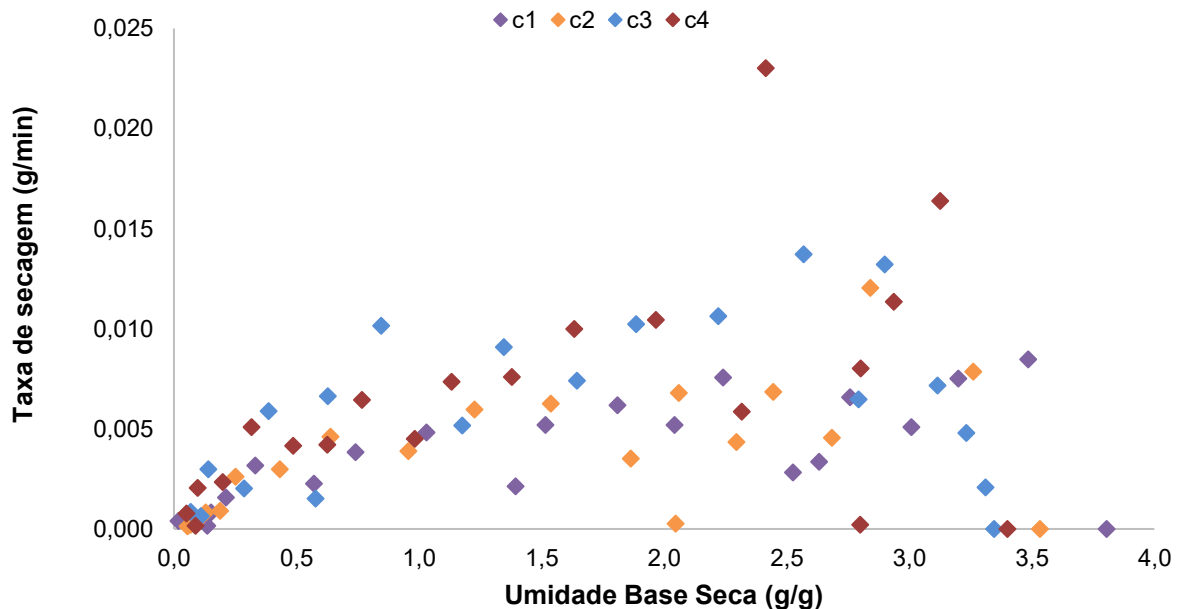


Fonte: Autoria própria (2019).

Para c1 e c2 não é observada diferença no comportamento da curva, assim, não há influência da inclinação da drageadeira no processo de secagem, visto que os tempos para se atingir a umidade de equilíbrio foram 360 e 330 min, respectivamente. O mesmo ocorre para as condições c3 e c4, cujo intervalo de tempo para atingir a umidade de equilíbrio foi de 180 min. O comportamento da taxa de secagem em função da umidade em base seca é, especialmente, diferente das outras técnicas

aplicadas neste trabalho, apresentando variações contínuas até os valores de umidade próximo de zero (ver Figura 48).

Figura 48 – Curva de cinética de secagem para drageadeira: taxa de secagem em função da umidade em base seca em diferentes temperaturas e inclinações

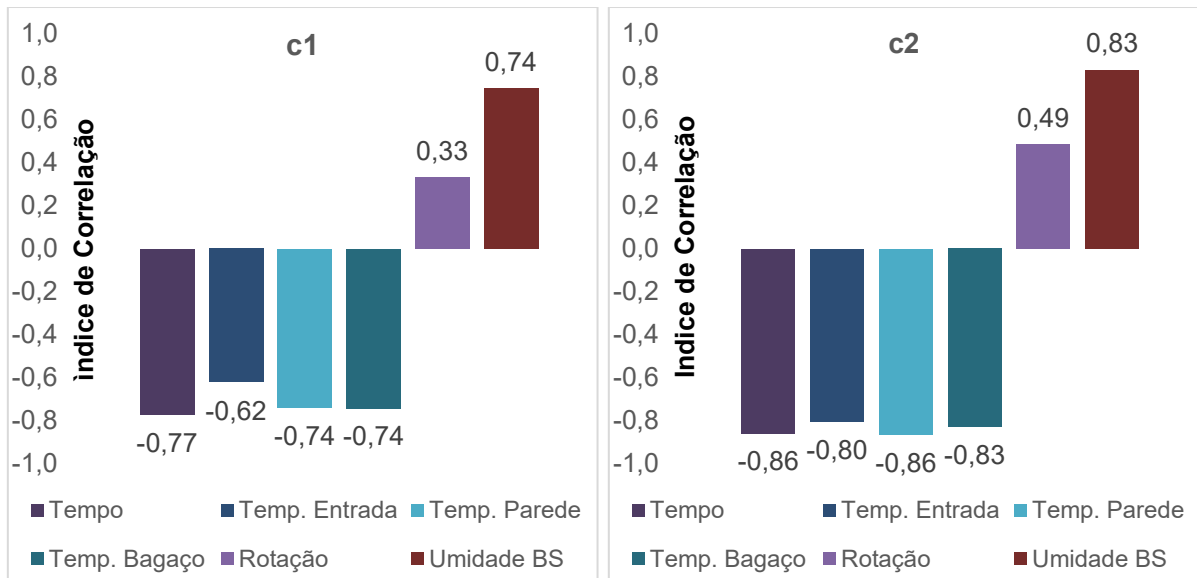


Fonte: Autoria própria (2019).

As maiores taxas de secagem se encontram no período inicial de secagem – intervalo de umidade entre 3,0 e 3,5. Uma análise de correlação foi aplicada entre a taxa de secagem e as diferentes variáveis, conforme as Figuras 49 e 50.

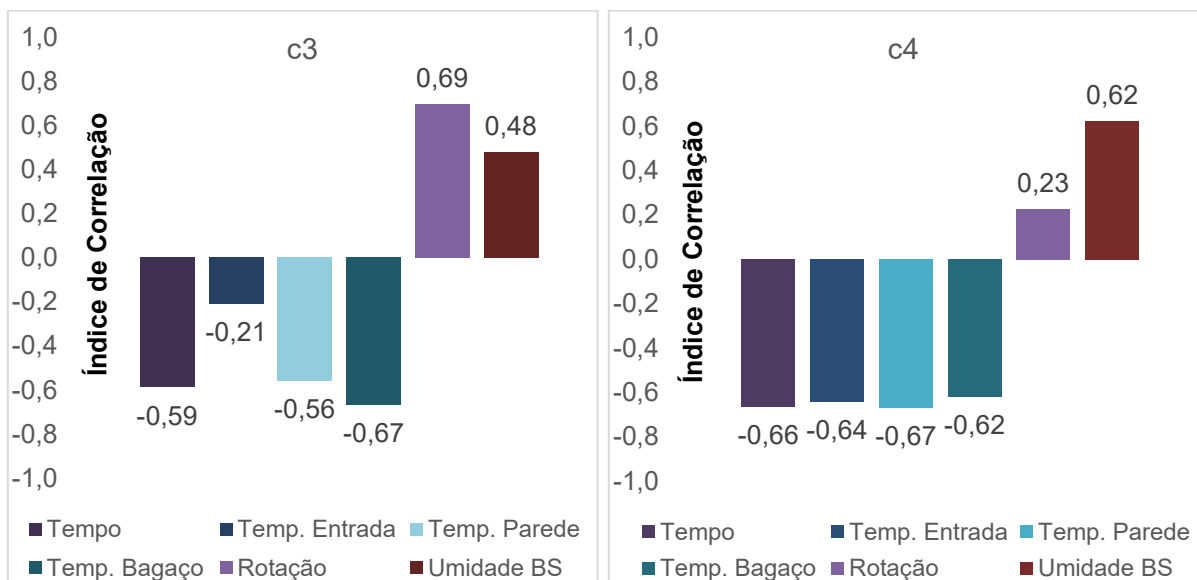
Para as condições c1 e c2 não são observadas alterações significativas nas correlações da taxa de secagem (Figura 49). Porém, para a condição c3 duas tendências foram detectadas: o aumento da correlação da taxa de secagem com a rotação do bagaço de malte (0,69); e a diminuição da correlação com a temperatura do ar de entrada (-0,21), e tais alterações não implicam na cinética de secagem. Para a condição c4 as correlações são similares a c1 e c2.

Figura 49 – Gráfico de correlação linear para c1 e c2 – drageadeira



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 50 – Gráfico de correlação linear para c3 e c4 – drageadeira

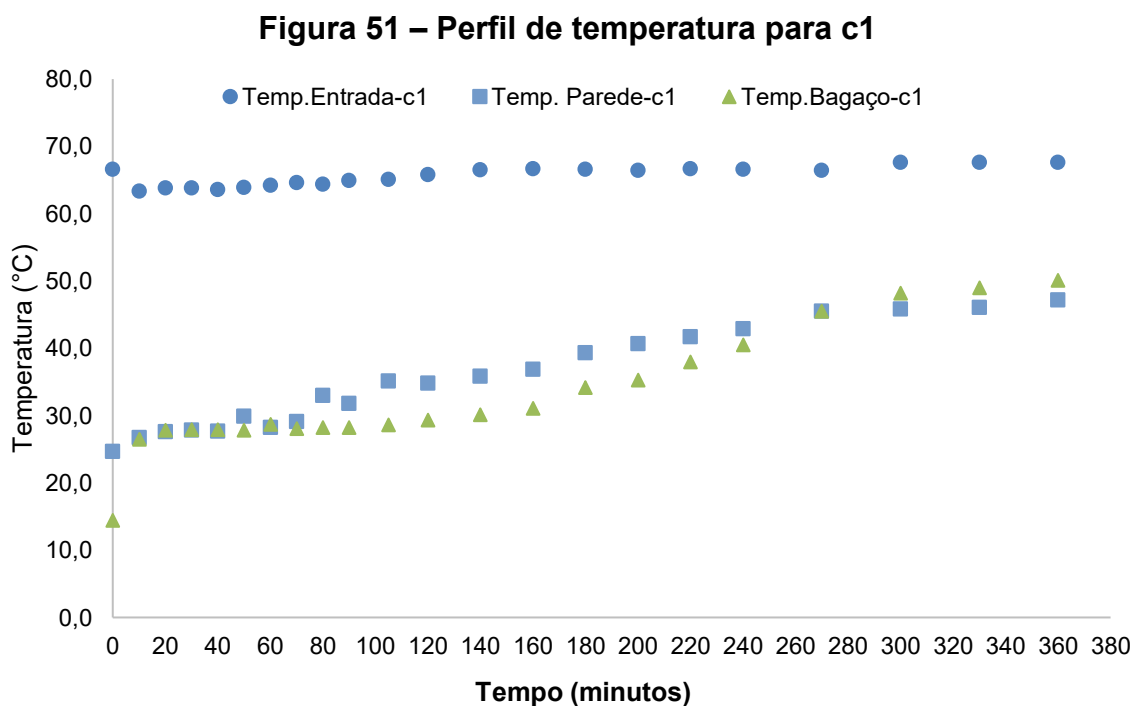


Fonte: Autoria própria (2019).

– Análise dos perfis de temperatura

A análise dos perfis de temperaturas indica um padrão bem estabelecido durante todos os ensaios realizados na drageadeira. A temperatura do ar de entrada permanece constante ao longo do tempo, enquanto as temperaturas da parede da drageadeira e do bagaço de malte variam de forma crescente em função do tempo.

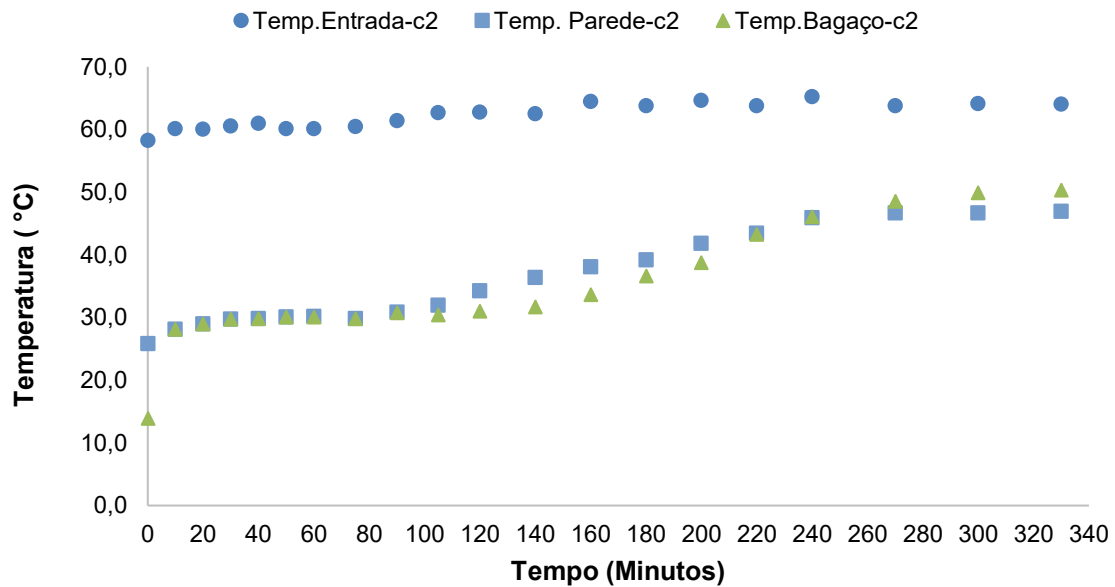
Para as condições c1 e c2, inicialmente, a temperatura do bagaço de malte se estabiliza e acompanha a temperatura da parede da drageadeira na primeira hora, em seguida, há um aumento na temperatura da parede, porém, a temperatura do bagaço não acompanha com a mesma intensidade, sendo possível perceber certo descolamento entre essas temperaturas. Por fim, após aproximadamente 4h de ensaio, a temperatura do bagaço de malte ultrapassa a temperatura da parede, isso demonstra que o processo de secagem passa a ter maior influência da difusão interna (Figura 51). A temperatura final do bagaço de malte foi de 50,1°C.



Fonte: Autoria própria (2019).

Para a condição c2 o comportamento se repete, no entanto, é possível observar (Figura 52) que o “descolamento” entre as temperaturas do bagaço de malte da parede é menos evidente e ocorre após 105 min de ensaio. Esse tempo é um pouco maior do que o encontrado na condição c1, o que pode ser resultado da influência da inclinação da drageadeira. A temperatura final do bagaço de malte foi de 50,3°C.

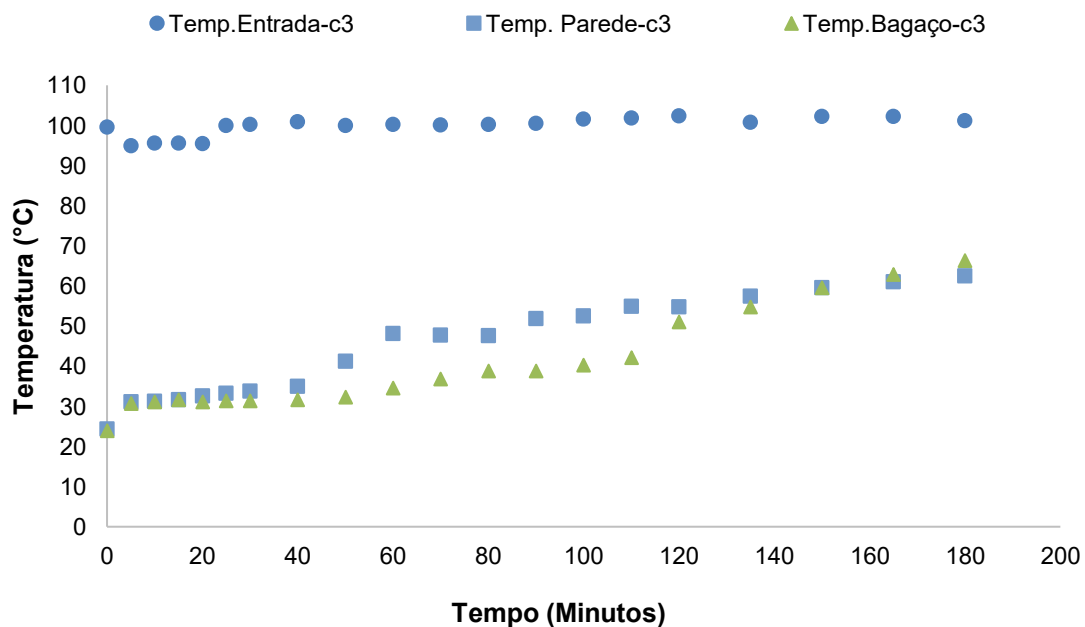
Figura 52 – Perfil de temperatura para c2



Fonte: Autoria própria (2019).

O comportamento da condição c4 é similar a c3, no entanto, o deslocamento entre as temperaturas da parede e do bagaço de malte é antecipado e acontece a partir dos 0 minutos, evidenciando a influência do aumento da temperatura do ar de entrada sobre os demais perfis de temperatura (Figura 53). A temperatura final do bagaço de malte foi de 66,3°C

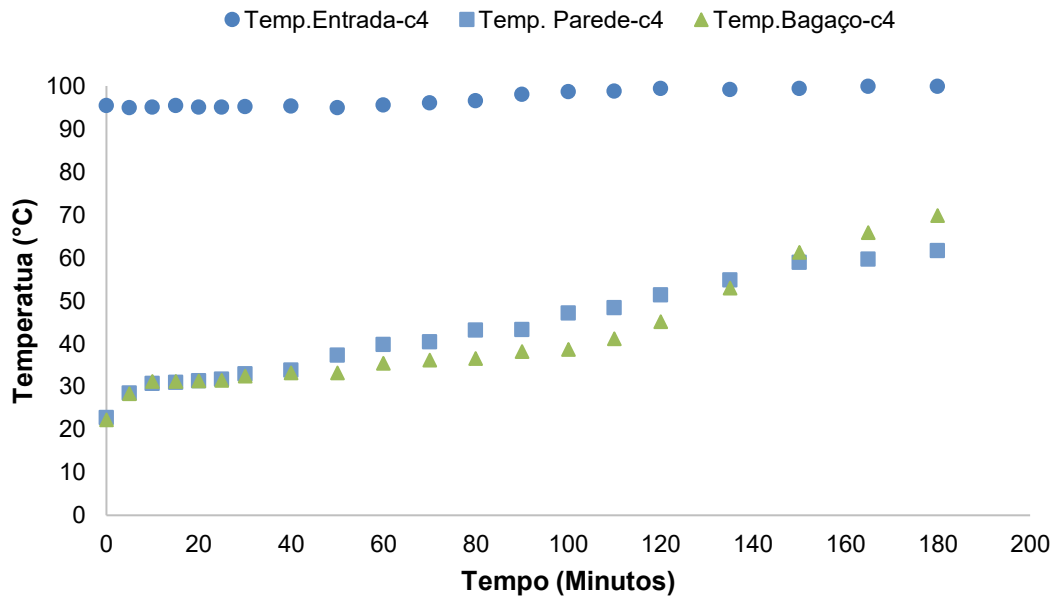
Figura 53 – Perfil de temperatura para c3



Fonte: Autoria própria (2019).

A condição c4 é semelhante a c2, em que o “descolamento” entre as temperaturas do bagaço de malte e da parede é menos evidente e ocorre após 40 min de ensaio. Esse tempo é um pouco menor do que o encontrado na condição c3. A temperatura final do bagaço de malte foi de 69,9°C.

Figura 54 – Perfil de temperatura para c4

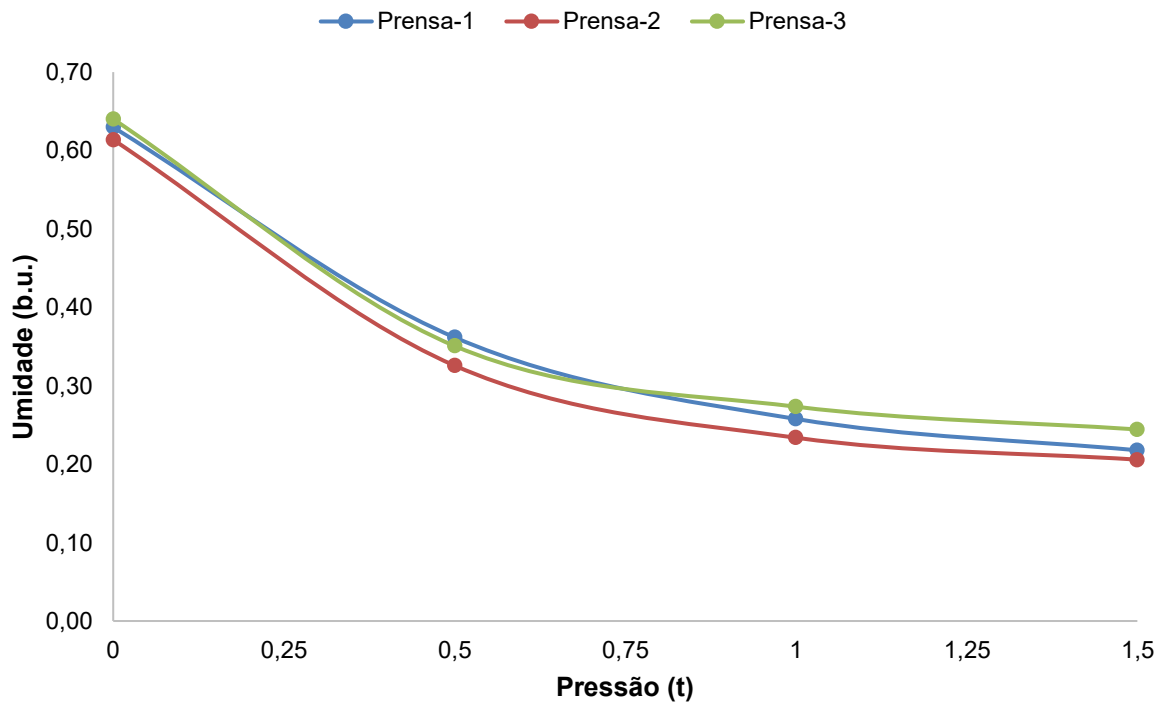


Fonte: Autoria própria (2019).

4.7 Desague em prensa hidráulica manual

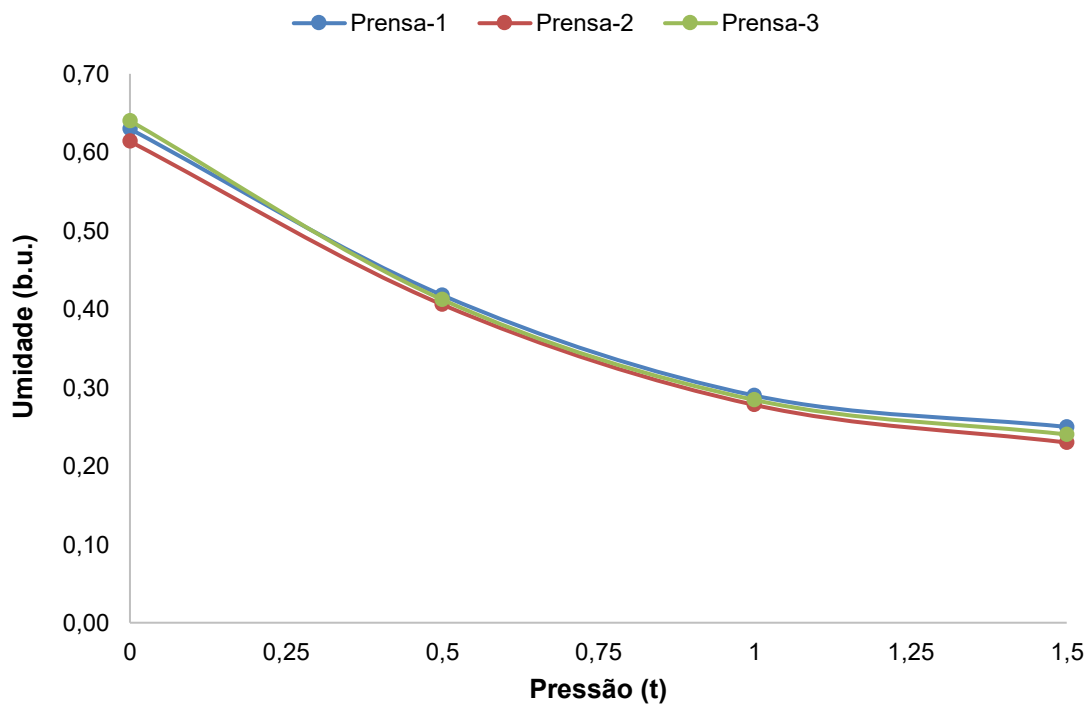
Os resultados do desague mecânico realizados em triplicata estão apresentados nas Figuras 55 e 56. Os valores de umidade foram reduzidos, em média, de $63 \pm 1,3\%$ para 24% em base úmida para ambos os testes.

Figura 55 – Umidade (b.u.) em função da pressão aplicada ao bagaço de malte sem feltro



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 56 – Umidade (b.u.) em função da pressão aplicada ao bagaço de malte com feltro



Fonte: Autoria própria (2019).

Os ensaios demonstraram que não há influência da utilização do feltro de tecido-não-tecido para acondicionamento do bagaço de malte no recipiente na remoção de umidade. A maior parte da umidade é removida com 1,0 tonelada de pressão aplicada. Valores de remoção de umidade e comportamento similar a esses foram encontrados por Rocha (2019), em estudo para desaguamento mecânico em borra de café.

4.8 Ensaio de Shrinkage

Foi possível observar que, no período inicial do processo de secagem, ocorre expansão dos grãos e que no decorrer do ensaio os grãos gradativamente se encolhem. No entanto, a avaliação quantitativa do encolhimento do bagaço de malte foi dificultada pelo fato de que os grãos de material ficaram aderidos uns aos outros e também as placas de pétri, aparentemente em função da presença de açúcares residuais do processo de mosturação, em que o amido do malte é convertido em açúcares para posterior fermentação. Dessa forma, não houve como avaliar as imagens no *software* Image J para quantificar a variação da altura da camada de bagaço de malte na placa de pétri.

4.9 Estatística

Foram elaborados gráficos e histogramas de distribuição de frequência, indicando que todos os parâmetros estudados nos processos de secagem térmica têm comportamento não paramétrico. Dessa maneira, optou-se por investigar a taxa de secagem por meio da estatística descritiva, cujos dados compilados são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Dados estatísticos para a taxa de secagem

	UMIDADE RETIRADA	TAXA DE SECAGEM		
	g. água / g. sólidos seco	MÉDIA g. água/min	DESVIO PADRÃO AMOSTRAL	ERRO PADRÃO AMOSTRAL
Estufa 60°C	3,65	0,0010	0,00015	0,00001
Estufa 70°C	2,96	0,0021	0,00048	0,00007
Estufa 80°C	3,18	0,0020	0,00037	0,00004
Estufa 80°C	2,99	0,0021	0,00037	0,00004
Estufa 100°C	2,41	0,0039	0,00102	0,00014
Estufa 100°C R	3,25	0,0038	0,00065	0,00008
Túnel Vento 60°C	3,17	0,0044	0,00136	0,00022
Túnel Vento 70°C	3,56	0,0050	0,00167	0,00029
Túnel Vento 78,7°C	3,62	0,0059	0,00187	0,00026
Drageadeira c1	3,79	0,0035	0,00269	0,00057
Drageadeira c2	3,48	0,0037	0,00323	0,00072
Drageadeira c3	3,28	0,0060	0,00420	0,00094
Drageadeira c4	3,35	0,0065	0,00578	0,00129

Fonte: Autoria própria (2019).

O desvio padrão fornece uma indicação de precisão do valor da média calculada, em relação ao valor verdadeiro de uma população, enquanto o erro padrão se refere a quão perto a média amostral está da média real (exatidão). Os valores calculados indicam boa precisão e exatidão, devido aos baixos valores encontrados. Percebe-se uma tendência discreta de aumento do desvio padrão e da taxa de secagem com o aumento da temperatura para ambos os ensaios.

A taxa de secagem por condução aumentou em 108% comparando os ensaios em estufa a 60°C e 80°C, seguida da secagem em drageadeira com 84% de aumento da condição c1 para c4. A secagem em túnel de vento apresentou o menor aumento, com taxa de 35% para os ensaios a 60°C e 78,8°C.

5 CONCLUSÕES

Caracterização: a utilização da técnica de microscopia eletrônica por varredura com espectroscopia de energia dispersiva se demonstrou eficaz para caracterizar o bagaço de malte e possibilitou diferenciar a composição da casca (prevalência de silício) e do interior (prevalência de carbono), dos diferentes tipos de malte. Também foi possível identificar os elementos químicos polônio e cloro no malte tipo *Pilsen*.

A análise termogravimétrica mostrou que a massa do bagaço foi reduzida a 91,5% até a temperatura de 1000°C. Dessa forma, o bagaço de malte pode ser utilizado para queima e cogeração de energia, porém, são necessários estudos complementares.

Para ambas as técnicas de secagem térmica, a temperatura exerce significativa influência nas cinéticas e taxas de secagem, sendo mais evidente para a secagem por condução térmica e, à medida que a temperatura aumenta, o tempo de secagem é diminuído.

A secagem convectiva em túnel de vento demonstrou valores significativamente menores (324%) para o tempo de secagem, em relação a técnica por condução térmica, isso porque a difusão interna foi aumentada com fornecimento de calor presente no ar de secagem, facilitando a transferência da umidade para a superfície do bagaço de malte e, por conseguinte, ao ar, até que a umidade de equilíbrio foi atingida, como foi demonstrado nas curvas de cinética de secagem. Foi possível determinar que o bagaço de malte é um sólido não higroscópico em função do comportamento da curva da taxa de secagem, que se apresentou com dois períodos distintos de taxa crescente e decrescente, em função da umidade em base seca.

Na secagem em drageadeira, os comportamentos das curvas de cinética de secagem foram influenciados, majoritariamente, pela temperatura e de maneira semelhante às outras técnicas, o tempo é decrescente com o aumento da temperatura. A variação das inclinações entre 0 e 45 graus não influenciou a cinética de secagem, no entanto, para a temperatura de 99°C e 0° de inclinação, a correlação entre a taxa de secagem com a rotação do bagaço de malte sofreu aumento, passando de 0,23 para 0,69.

O comportamento da temperatura do bagaço de malte e da parede da drageadeira são similares para todas as condições estudadas, apresentando um

período inicial de estabilização, seguido de um distanciamento até o momento em que a temperatura do bagaço de malte, e esse tempo é condizente com o período final da curva adimensional de umidade em base seca.

A análise estatística descritiva demonstrou a coerência, precisão e exatidão dos experimentos realizados, em termos de erro e desvio padrão, que demonstraram valores consideravelmente reduzidos.

O desaguamento mecânico realizado foi capaz de remover 40% de umidade em base úmida do bagaço de malte com a prensagem instantânea com 1,5 t. Esse resultado é expressivo e demonstra o potencial para implementação dessa técnica para a solução em pequena, média e grande escalas.

Assim, este estudo exploratório de secagem térmica mostra técnicas de secagem térmicas variadas, que podem ser empregadas em pequena e média escala, como solução para diminuir volume e aumentar o tempo de guarda desse subproduto, tendo em vista o cenário de descentralização da geração do bagaço de malte de cevada por microcervejarias artesanais no Brasil. O desaguamento mecânico se mostra com a primeira alternativa viável por remover até 40% da umidade de maneira instantânea.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, H. A.; MACEDO, E. L. A.; FONSECA, B. E.; CORRÊA, J. L. G.; NASCIMENTO, B. S. Secagem de resíduos da indústria cervejeira em ciclone. **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. v. 1, 2016. Disponível em: <https://proceedings.science/cobeq/cobeq-2016/papers/secagem-de-residuos-da-industria-cervejeira-em-ciclone>. Acesso em: 25 mar. 2018.
- BAKKER-ARKEMA, F. W.; MAIER, D. E.; SCHISLER, I. P. Drying rates and dryer capacities of different seed grains. **Drying Technology**, v. 5, n. 4, p. 527-540, 1987. DOI: 10.1080/07373938708916561. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373938708916561>. Acesso em: 30 abr. 2019.
- BARTH-HAAS. **Report 2016-2018**. 2018. Disponível em: <http://www.barthhaasgroup.com/images/mediacenter/downloads/pdfs/412/barthberic ht20162017en.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2018.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- BOURSCHEIDT, C. T.; OLIVEIRA, B. H.; GONÇALVES, G. C.; SILVA, G. M. C. Estudo da secagem do bagaço de malte resíduo úmido obtido do processo industrial de cervejaria. *In: II International Symposium on Agricultural and Agroindustrial Waste Management*, Foz do Iguaçu, march 13-15, 2011. Disponível em: <http://www.sbera.org.br/2sigera/obras/t167.pdf>. Acesso em: 2 mar. 2018.
- BRAIBANTE, M. E. F.; ZAPPE, J. A. A química dos agrotóxicos. **Química Nova na Escola (QNEsc)**, v. 34, n. 1, p. 10-15, fev. 2012. Disponível em: http://qnesc.sbg.org.br/online/qnesc34_1/03-QS-02-11.pdf. Acesso em: 18 mar. 2018.
- BRASIL. **Brasil é o terceiro no ranking de produção mundial de cerveja**. 2018. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2017/08/brasil-e-o-terceiro-no-ranking-de-producao-mundial-de-cerveja>. Acesso em: 2 out. 2017.
- BRASIL. **Decreto nº 6.871, de 4 de junho de 2009**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/decreto/d6871.htm. Acesso em: 9 dez. 2019.
- BRASIL. **Lei nº 8.918, de 14 de julho de 1994**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L8918.htm. Acesso em: 9 dez. 2019.
- CANEDO, M. S. **Enriquecimento proteico do bagaço de malte por *Rhizopus oligosporus* CCT 4134 e adição em dietas de juvenis de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*)**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/7400>. Acesso em: 20 fev. 2019.

CAPUTO, A. C.; SCACCHIA, F.; PELAGAGGE, P. M. Disposal of by-products in olive oil industry: waste-to-energy solutions. **Applied Thermal Engineering**, v. 23, n. 2, p. 197–214, 2003. Disponível em: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:36083849. Acesso em: 15 maio 2019.

CASSANDRE, J. E. F.; MOREIRA, M. F. P.; SARTORI, D. J. M. Desenvolvimento de um secador de convecção forçada com reciclo de ar. *In: III COBEQ-IC – Anais*, Belo Horizonte, v. 3, 2001.

CERVBRASIL. **Associação Brasileira da Indústria da Cerveja**. Disponível em: http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/dados-do-setor/. Acesso em: 10 maio 2019.

CORDEIRO, L. G. **Caracterização e viabilidade econômica do Bagaço de malte oriundo de cervejarias para fins energéticos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/4012/1/arquivototal.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2019.

DENARI, G. B. **Contribuições ao ensino de análise térmica**. 2013. Dissertação (Mestrado em Química Analítica e Inorgânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75135/tde-04042013-151955/pt-br.php>. Acesso em: 12 mar. 2019.

DIAS, G. E. L. **Análise da secagem convectiva de resíduo proveniente da fabricação de vinho**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3314/1/CT_PPGE_C_M_Dias%2C%20Gilmara%20Emanuela%20Leobet_2018.pdf. Acesso em: 12 mar. 2019.

DORAN, P. M. **Bioprocess Engineering Principles**. 2. ed. São Paulo: Elsevier, 2013.

DOYMAZ, I.; GOREL, O.; AKGUN, N. A. Drying characteristics of the solid by-product of olive oil extraction. **Biosystems Engineering**, v. 88, n. 2, p. 213-219, jun. 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S153751100400042X>. Acesso em: 12 fev. 2019.

DROIN-JOSSERAND, A.; TAVERDET, J. L.; VERGNAUD, J. M. Modelling the process of moisture absorption in three dimensions by wood samples of various shapes: cubic, parallelepiped. **Wood Sci. Technol.**, v. 23, p. 259-271, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00367739>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00367739>. Acesso em: 23 mar. 2019.

FERREIRA, R. A. R. **Contribuição ao estudo cinético e balanço energético da pirólise autotérmica da palha de cana-de-açúcar através de análises termogravimétricas e calorimetria**. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15194>. Acesso em: 25 fev. 2019.

FONTANA, I. B.; PETERSON, M.; CECHINEL, M. A. P. Application of brewing waste as biosorbent for the removal of metallic ions present in groundwater and surface waters from coal regions. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 1, p. 660-670, fev. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343718300058?via%3Dihub>. Acesso em: 22 fev. 2019.

FOUST, A. S. **Princípios das operações unitárias**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying Theory I. Temperature Effects on Drying Coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 6, p. 169-174, 1961. Disponível em: [https://www.scirp.org/\(S\(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2226496](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2226496). Acesso em: 25 mar. 2019.

IBGE. **Estimativa da produção – 2017**. Disponível em: https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2017/estimativa_dou.shtm. Acesso em: 21 mar. 2018.

IGUAZ, A. *et al.* Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. **Journal of Food Engineering**, v. 59, p. 151-160, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/229360440_Mathematical_modeling_and_simulation_for_the_drying_process_of_vegetable_wholesale_by-products_in_a_rotary_dryer. Acesso em: 8 mar. 2018.

INOX RODRIGUES. **Tanques de fermentação**. 2018. Disponível em: www.inoxrodrigues.com.br. Acesso em: 25 mar. 2019.

JUTZI, P.; SCHUBERT, U. **Silicon chemistry**: from the atom to extended systems. Wiley-VCH: New York, 2003. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=R5hghbtdcQC&oi=fnd&pg=PR5&ots=wZDJYPVfsS&sig=CZsevalHGcVo_cPa8hdLIBuyec&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 18 nov. 2019.

KAN, X.; ZHANG, J.; TONG, Y. W.; WANG, C. H. Overall evaluation of microwave-assisted alkali pretreatment for enhancement of biomethane production from brewers' spent grain. **Energy Conversion and Management**, v. 158, p. 315-326, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.088>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890417312475?via%3Dihub>. Acesso em: 24 abr. 2019.

LI, S. Q.; CHI, Y.; LI, R. D.; YAN, J. H.; CEN, K. F. Axial transport and residence time of MSW in rotary kilns: part I. Experimental. **Powder Technology**, v. 126, n. 3, p. 228-240, ago. 2002. Disponível em:

<https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-6483e67e-a931-300e-9a29-e57a94a0b50f>. Acesso em: 25 mar. 2019.

LISS. **Sala de brasagem**. 2018. Disponível em: <http://www.liess.ind.br/site2016/2016/08/05/sala-de-brasagem/>. Acesso em: 26 mar. 2018.

LIMA, U. A. **Matérias-primas dos alimentos**. São Paulo: Editora Blucher, 2010.

LYNCH, K. M.; STEFFEN, E. J.; ARENDT, E. K. Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 122, n. 4, p. 553-568, 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jib.363>. Acesso em: 13 fev. 2019.

MALTE & ARTE. 2018. Disponível em: <http://www.malteearte.com.br/loja/index.php>. Acesso em: 26 mar. 2018.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **A cerveja no Brasil**. 2018. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/pastapublicacoes-DIPOV/a-cerveja-no-brasil-28-08.pdf>. Acesso em: 2 mar. 2018.

MUKASAFARI, M. A; AMBULA, M. K; KAREGE, C; KING'ORI, A.M. Effects of substituting sow and weaner meal with brewers' spent grains on the performance of growing pigs in Rwanda. **Tropical Animal Health Production**, v. 50, p. 393-398, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-017-1446-x>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11250-017-1446-x>. Acesso em: 28 mar. 2019.

MULLER, Ernesto. **Tela Inox Produção Cerveja**. 2018. Disponível em: <https://www.ernestomuller.com.br/single-post/Tela-Inox-Cerveja>. Acesso em: 30 mar. 2019.

MUSSATTO, S. I.; DRAGONE, G.; ROBERTO, I. C. Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. A review. **Journal of Cereal Science**, v. 43, n. 1, p. 1-14, 2006. Disponível em: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/brewers-spent-grain-generation-characteristics-and-potential-appl>. Acesso em: 12 fev. 2019.

NIGAM, P.S. An overview: recycling of solid barley waste generated as a by-product in distillery and brewery. **Waste Management**, v. 62, p. 255-261, abr. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X17300958?via%3Di> hub. Acesso em: 22 mar. 2019.

NUTRIAGRO. Malte de cevada. 2018. Disponível em: <https://nutriagro.weebly.com/malte-de-cevada.html>. Acesso em: 26 mar. 2018.

OKAMOTO, H.; SATO, K.; YAGI, N.; INOUE, M.; YAMASAKI, S.; ISHIDA, S.; SHIBATA, J. Development of production process of charcoal bricks from spent grain. **Kagaku Kogaku Ronbunshu**, v. 28, n. 2, p. 137-142, 2002. Disponível em:

<https://www.cheric.org/research/tech/periodicals/view.php?seq=1019160>. Acesso em: 25 mar. 2019.

PANJIČKO, M. *et al.* Biogas production from brewery spent grain as a mono-substrate in a two-stage process composed of solid-state anaerobic digestion and granular biomass reactors. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 519-529, nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.197>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617316529?via%3Dihub>. Acesso em: 18 fev. 2019.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. Conceitos de processo de equipamentos de secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campinas, 2007. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/conceitos-e-processo-de-secagem/4887964/>. Acesso em: 2 mar. 2019.

PARPINELLI, W. **Utilização de resíduo seco de cervejaria na alimentação de frangos de corte**. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2016. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2381/1/DV_PPGZO_M_Parpinelli%20C%20Wiliam_2016.pdf. Acesso em: 26 mar. 2019.

PELEGRINA, A. H.; ELUSTONDO, M. P.; URBICAIN, M. J. Rotary semi-continuous drier for vegetables: effect of air recycling. **Journal of Food Engineering**, v. 41, n. 3-4, p. 215-219, 1999. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026087749900093X>. Acesso em: 14 jan. 2019.

PELEGRINA, A. H.; ELUSTONDO, M. P.; URBICAIN, M. J. Setting the operating conditions of a vegetables rotary drier by the response surface method. **Journal of Food Engineering**, v. 54, n. 1, p. 59-62, ago. 2002. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/248514571_Setting_the_operating_conditions_of_a_vegetables_rotary_drier_by_the_response_surface_method. Acesso em: 30 jan. 2019.

PERAZZINI, H. **Secagem de resíduos cítricos em secador rotativo**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/6486?show=full>. Acesso em: 16 fev. 2019.

PERAZZINI, H.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Prediction of residence time distribution of solid wastes in a rotary dryer. **Drying Technology**, v. 32, n. 4, p. 428-436, 2014. DOI: 10.1080/07373937.2013.835317. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2013.835317>. Acesso em: 18 jan. 2019.

PETRICEK, L.; FORT, V. **Process for manufacture of biogas by anaerobic digestion of raw material of organic origin**. Patent Number 96-3441 283228, Accession Number AN 1998:635917, Czech Republic 1998.

PNUMA. **Guia PCS**. 1996. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pnuma-lanca-guia-deproducao-e-consumo-sustentaveis/>. Acesso em: 13 dez. 2019.

POELS, J.; LANGENHOVE, H. V.; BIEST, W. V. D; NEUKERMANS, G. Evaluation of a Rotary Drum Drier Processing Pre-dried Chicken Manure. **Biological Wastes**, v. 19, p. 3-23, 1987. DOI: 10.1016/0269-7483(87)90033-4. Disponível em: <http://a.xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=6736380823d908afeb6d0482bc88e52b>. Acesso em: 14 fev. 2019.

PORTILHO, F. P. **Utilização do resíduo de cervejaria na formulação de misturas minerais proteinadas para ovinos a pasto**. Tese (Doutorado em Ciências Animais) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2010. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNB_b3d6e934d5b8565f26b8a3bc19db08b1. Acesso em: 18 fev. 2019.

PRATES, L. L.; LEI, Y.; REFAT, B.; ZHANG, W.; YU, P. Effects of heat processing methods on protein subfractions and protein degradation kinetics in dairy cattle in relation to protein molecular structure of barley grain using advanced molecular spectroscopy. **Journal of Cereal Science**, v. 80, p. 212-220, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.01.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0733521017309542?via%3Dihub>. Acesso em: 22 abr. 2019.

RATTI, C.; MUJUMDAR, A.S. Infrared Drying. *In*: MUJUNDAR, A. R. **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed. New York: CRC Press, 2006. p. 423-437.

ROCHA, T. A. F. **Contribuições ao estudo da secagem da borra de café em leite vibrofluidizado**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/11177/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Thalyne-v5.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 13 mar. 2019.

ROSSO, G. A. **Recobrimento de sementes silvestres em panela rotatória**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4116?show=full>. Acesso em: 18 mar. 2019.

SANTOS, M. S.; RIBEIRO, F. M. **Cervejas e refrigerantes**. São Paulo: CETESB, 2005. 58 p. (1 CD): il.; 30 cm. (Série P + L). Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 18 fev. 2019.

SATO, K.; YAGI, N.; OKAMOTO, H.; INOUE, M.; AJIRI, T.; SHIBATA, J. Physical property and burning property of spent grain charcoal. **Shigen to Sozai**, v. 117, p. 587-590, 2001. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Physical-Property-and-Burning-Property-of-Spent-Sato-Yagi/37409ae4e1a551fe806121bba401034c610f1c4f>. Acesso em: 11 jan. 2016.

SEBRAE. **Mapa das microcervejarias**. 2018. Disponível em: <http://www.sebraepr.com.br/PortalSebrae/Arquivos-Gratuitos/Mapa-das-Microcervejarias>. Acesso em: 21 mar. 2018.

SEYE, O.; CORTEZ, L. A. B.; GOMEZ, E. O. Estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos. *In: Encontro de Energia no Meio Rural*, 2000, Campinas. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000002200000200022&lng=en&nrm=abn. Acesso em: 17 fev. 2019.

SOPONRONNARIT, S.; PONGTORNKULPANICH, A.; PRACHAYAWARAKORN, S. Drying characteristics of corn in fluidized bed dryer. **Drying Technology**, v. 15, n. 5, p. 1603-1615, 1997. DOI: 10.1080/07373939708917311. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373939708917311>. Acesso em: 17 jan. 2019.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying**: principles, applications and design. Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.

VENTURINI FILHO, W. G. **Bebidas alcoólicas**: ciência e tecnologia. v. 1. São Paulo: Blucher, 2010.

VILLA-CORRALES, L.; FLORES-PRIETO, J. J.; XAMÁN-VILLASEÑOR, J. P.; GARCÍA HERNÁNDEZ, E. Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer during drying of Ataulfo mango. **Journal of Food Engineering**, v. 98, p. 198-206, 2010. Disponível em: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201301802563>. Acesso em: 23 mar. 2019.

WAHLEN, B. D.; RONI, M. S.; CAFFERTY, K. G.; WENDT, L. M.; WESTOVER, T. L.; STEVENS, D. M.; NEWBY, D. T. Managing variability in algal biomass production through drying and stabilization of feedstock blends. **Algal Research**, v. 24, p. 9-18, 2017. Disponível em: https://journals.scholarsportal.info/details/22119264/v24ipart_a/9_mviabpdasofb.xml&sub=all. Acesso em: 25 mar. 2019.

ZANKER, G.; KEPPLINGER, W. L. The utilization of spent grains in the brewery integrated system. **Brauwelt**, v. 142, p. 1742-1747, 2002.

ZEDLER, L.; COLOM, X.; SAEB, M. R.; FORMELA, K. Preparation and characterization of natural rubber composites highly filled with brewers' spent grain/ground tire rubber hybrid reinforcement. **Composites Part B**, v. 145, p. 182-188, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.03.024>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836818302518?via%3Dihub>. Acesso em: 19 jan. 2019.