



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
QUÍMICA INDUSTRIAL

**ESTUDO DO PROCESSO DE SECAGEM DO RESÍDUO DE
MALTE GERADO NA PRODUÇÃO DE CERVEJA**

EVANDRO ALVES BATISTA

CAMPINA GRANDE – PB
2016

EVANDRO ALVES BATISTA

**ESTUDO DO PROCESSO DE SECAGEM DO RESÍDUO DE
MALTE GERADO NA PRODUÇÃO DE CERVEJA**

*Trabalho de Conclusão de Curso
(TCC) apresentado como exigência
para obtenção do Título de Bacharel
em Química Industrial pela
Universidade Estadual da Paraíba –
UEPB.*

Orientadora: Profa. Dra. Márcia Ramos Luiz

Co - orientador: Prof. Dr. Marcelo Maia de Almeida

CAMPINA GRANDE – PB
2016

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

B333e Batista, Evandro Alves.

Estudo do processo de secagem do resíduo de malte gerado na produção de cerveja [manuscrito] / Evandro Alves Batista. - 2016. 48 p. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.

"Orientação: Prof. Dr. Márcia Ramos Luiz, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental".

"Co-Orientação: Prof. Dr. Marcelo Maia de Almeida, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental".

1. Bagaço de malte. 2. Secagem convectiva. 3. Modelos matemáticos. I. Título.

21. ed. CDD 664

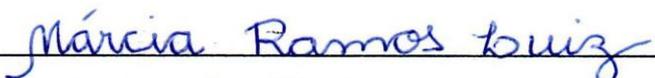
EVANDRO ALVES BATISTA

**Estudo do Processo de Secagem do Resíduo de
Malte Gerado na Produção de Cerveja**

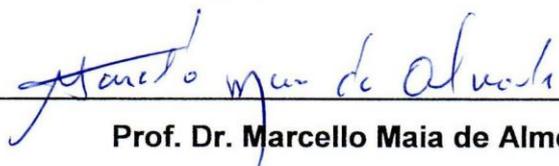
*Trabalho de Conclusão de Curso
(TCC) apresentado como exigência
para obtenção do Título de Bacharel
em Química Industrial pela
Universidade Estadual da Paraíba –
UEPB.*

APRESENTADO EM: 19 / Dezembro / 2016

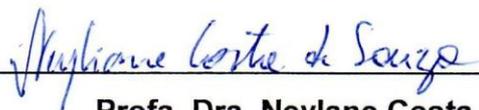
BANCA EXAMINADORA



**Profa. Dra. Márcia Ramos Luiz
(Orientadora – DESA / UEPB)**



**Prof. Dr. Marcelo Maia de Almeida
(Co-orientador – DESA / UEPB)**



**Profa. Dra. Neylane Costa de Souza
(Examinadora – DESA / UEPB)**

Campina Grande – PB

2016

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, a Deus por me guiar e dar forças para seguir sempre firme e forte durante todos os momentos difíceis de minha vida.

Aos meus pais Erivam Batista da Silva e Cecília Mariza Alves Batista, que sempre me apoiaram em minhas decisões e não medindo esforços para me ajudarem no que for preciso.

A minha avó materna Mariza Cecília Alves de Paiva que nunca deixou de me ajudar durante o período em que residi fora para a conclusão do ensino superior.

Aos meus irmãos Edgley Alves Batista e Cintya Alves Batista que me privaram da solidão, residindo comigo em Campina Grande e ambos me acompanhando nos momentos de estudos ao longo de muitas madrugadas em claro.

A minha namorada Erika Kelly Gomes de Oliveira, amiga e companheira de todas as horas que sempre se dispôs a me ajudar sempre que precisei.

A minha orientadora Dra. Márcia Ramos Luiz e ao co-orientador Dr. Marcello Maia de Almeida, por me ajudarem na construção deste trabalho, no qual sem as orientações de ambos não seria possível sua realização.

Por fim, a todos que contribuíram, direta ou indiretamente para a realização este trabalho.

RESUMO

O bagaço de malte é um resíduo oriundo da indústria cervejeira representando a maior parte do total dos subprodutos gerados e é quantitativamente o principal rejeito do processo cervejeiro. Mediante a grande quantidade de material descartado, há a necessidade de um destino adequado para esse material. Uma forma de atuação, no que diz respeito ao aproveitamento de resíduos é a de buscar utilizações economicamente viáveis. Assim sendo, este trabalho realiza um estudo da secagem do resíduo gerado pelo processo de fabricação da cerveja com o objetivo de estudar a cinética de secagem em diferentes temperaturas com variações de massa de secagem, avaliadas a partir das curvas de secagem, utilizando-se de modelos matemáticos para descrever o comportamento da cinética de secagem. A secagem convectiva foi realizada em estufa com circulação de ar a partir de um planejamento fatorial completo 2^2 com três repetições no ponto central. As variáveis independentes foram temperatura do ar de secagem (50, 60 e 70 °C), e massa do produto (100, 300 e 500g). A variável dependente analisada neste trabalho foi a constante de secagem obtida a partir de modelos de secagem empíricos. Os modelos matemáticos utilizados foram o de Henderson & Pabis, Midilli, Newton e Page e os resultados obtidos mostraram forte influência da temperatura no tempo de secagem, comprovado pelo comportamento das curvas de secagem para três temperaturas estudadas e os resultados partir da análise estatística e das curvas de cinéticas de secagem apontaram para o modelo matemático de Page, obtendo o melhor ajuste para descrever a função de umidade relativa com o tempo de secagem do bagaço de malte, com coeficiente de determinação acima de 0,9996, em todas as condições testadas.

PALAVRAS-CHAVES: bagaço de malte; secagem convectiva; modelos matemáticos.

ABSTRACT

Malt residue is a residue from the brewing industry, accounting for most of the total by-products generated and is quantitatively the main waste product of the brewing process. Due to the large amount of discarded material, there is a need for a suitable destination for this material. One way of acting, as regards the use of waste is to seek economically viable uses. Therefore, this work performs a study of the drying of the residue generated by the brewing process in order to study the kinetics of drying at different temperatures with drying mass variations, evaluated from the drying curves, using Mathematical models to describe the behavior of drying kinetics. The convective drying was carried out in a greenhouse with air circulation from a complete factorial design 2^2 with three repetitions at the central point. The independent variables were drying air temperature (50, 60 and 70 ° C), and product mass (100, 300 and 500g). The dependent variable analyzed in this work was the drying constant obtained from empirical drying models. The mathematical models used were those of Henderson & Pabis, Midilli, Newton and Page and the results showed a strong influence of the temperature in the drying time, proven by the behavior of the drying curves for three temperatures studied and the results from the statistical analysis and the Curves of drying kinetics pointed to the mathematical model of Page, obtaining the best fit to describe the function of relative humidity with the drying time of malt bagasse, with coefficient of determination above 0,9996, in all conditions tested.

KEYWORDS: malt residue; convective drying; mathematical models.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1: Morfologia de uma gramínea genérica.	13
Figura 2: Curvas de Secagem.	19
Figura 3: Moagem do malte de cevada.	26
Figura 4: Processamento enzimático do amido na mosturação.	27
Figura 5: Etapas de procedimento experimental.	29
Figura 6: Estufa de circulação de ar.	30
Figura 7: Pesagem de amostras secas dos ensaios.	30
Figura 8: Estufa de circulação de ar forçada a 105°C.	31
Figura 9: Cinética de secagem do resíduo úmido de cerveja.	33
Figura 10: Curva da taxa de secagem para o ensaio 02.	34
Figura 11: Curva da taxa de secagem para o ensaio 03.	35
Figura 12: Cinética de secagem representada pelos modelos matemáticos para o ensaio 01.	37
Figura 13: Cinética de secagem representada pelos modelos matemáticos para o ensaio 02.	38
Figura 14: Cinética de secagem representada pelos modelos matemáticos para o ensaio 03.	39
Figura 15: Cinética de secagem representada pelos modelos matemáticos para o ensaio 04.	40
Figura 16: Cinética de secagem representada pelos modelos matemáticos para o ensaio 05.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Modelos matemáticos utilizados para descrever o fenômeno de secagem de materiais agroindustriais.	22
Tabela 2: Condições operacionais para os experimentos.	28
Tabela 3: Matriz do planejamento experimental 2^2 com três repetições no ponto central.	32
Tabela 4: Resultados dos parâmetros dos modelos empíricos e análise estatística.	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. OBJETIVO	11
1.1.1. Objetivo geral	11
1.1.2. Objetivos específicos	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. CEVADA.....	12
2.2. GERAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS	14
2.3. SECAGEM	16
2.3.1. <i>Cinética de secagem</i>	18
2.3.2. <i>Curvas de secagem</i>	20
2.3.3. <i>Modelos matemáticos</i>	20
2.4. ESTADO DA ARTE	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1. LOCAL DE ESTUDO	26
3.2. MATÉRIA PRIMA.....	26
3.3. PREPARAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA PARA PROCESSAMENTO	26
3.4. CONDIÇÕES OPERACIONAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL	28
3.4.1. <i>Secagem Convectiva em Estufa com Circulação de Ar</i>	29
3.4.2. <i>Umidade</i>	30
3.5. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1. CINÉTICA DE SECAGEM	33
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERENCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

O beneficiamento e industrialização de alimentos na agroindústria gera grande quantidade de resíduo, conseqüentemente o descarte desse resíduo no meio ambiente contribui para a contaminação do ecossistema. Com isso a crescente preocupação com o meio ambiente incentiva a viabilização de projetos que levam à sustentabilidade do sistema de produção industrial. A indústria de alimentos produz uma série de resíduos com alta capacidade de reutilização, com isto, minimiza o impacto ambiental desses tipos de indústria na região em que estão situadas e ainda se agrega valor aos produtos do mercado (ALEXANDRE *et al.*, 2013).

Neste contexto, pode-se destacar a indústria cervejeira, cuja produção inclui etapas de processamento e fermentação de matéria prima vegetal, como cevada, lúpulo e outros grãos utilizados como adjuntos, gerando diferentes subprodutos. Devido às características de composição dos resíduos cervejeiros, estes apresentam significativo potencial para aplicação em tecnologias de bioprocessos (MATHIAS; MELLO e SERVULO, 2014).

O bagaço de malte é o principal resíduo da indústria cervejeira. Rico em fibras e proteínas e é considerado um material lignocelulósico contendo aproximadamente 17% de celulose, 28% de hemicelulose e 28% de lignina. De acordo com a variedade e época de colheita da cevada, condições de moagem do malte e tipo de adjuntos (milho, arroz, trigo e sorgo) adicionados ao processo de fermentação, a composição química do bagaço de malte pode variar e, além da composição química, as fibras do bagaço de malte podem ser caracterizadas quanto à suas propriedades funcionais, com o objetivo de direcionar estes materiais para as mais diferentes aplicações na indústria (MELLO; VERGÍLIO e MALI, 2013).

Segundo Ascheri (2007) *apud* Bourscheidt *et al.* (2011), o bagaço de malte é um alimento rico em fibras com significativos níveis proteicos. A qualidade deste alimento, medida pelos seus níveis nutricionais e, principalmente, pela capacidade de disponibilizar estes nutrientes em níveis superiores a 60%, torna o resíduo extremamente atraente aos pecuaristas de leite e de corte e promove a redução de impactos ambientais, advindos da indústria cervejeira, sem que ocorram quedas nos índices produtivos. Quando seco e triturado, este resíduo poderá ser comercializado a nível nacional uma vez que o processo de secagem beneficia o transporte,

diminuindo o volume e peso do material, assim como aumenta os nutrientes por unidade de massa seca.

Este resíduo apresenta elevado teor de umidade, o que torna o material propício para o crescimento de microrganismos indesejáveis. A secagem tem por objetivo reduzir a umidade para a conservação do material, o armazenamento por um longo período de tempo e a redução dos custos de transporte (BOFFO *et al.* 2014).

A secagem de produtos alimentícios requer alguns cuidados devido à possibilidade de alteração da qualidade do produto durante o processo de secagem. Um dos importantes parâmetros do material que será seco é o teor de umidade do produto, definido como a proporção direta entre a massa de água presente no material e a massa de matéria. O teor de umidade é a quantidade de água que pode ser removida do material sem alterações da estrutura molecular do sólido. A secagem do bagaço de malte apresenta-se como uma alternativa na redução dos rejeitos agroindustriais gerados na produção de bebidas alcoólicas e um ingrediente alternativo que pode ser utilizado na elaboração de novos produtos além da ração animal (BOURSCHEIDT *et al.*, 2011).

Portanto, esse trabalho objetivou-se determinar as curvas e o tempo de secagem do resíduo gerado pelo processo de fabricação da cerveja e ajustar os modelos matemáticos de secagem em camada fina aos dados experimentais obtidos em diferentes temperaturas de secagem, definindo o melhor modelo matemático. A secagem convectiva foi realizada em estufa com circulação de ar a partir de um planejamento fatorial completo 2^2 com três repetições no ponto central. As variáveis independentes foram temperatura do ar de secagem (50, 60 e 70°C), e massa do produto (100, 300 e 500g). A variável dependente analisada neste trabalho foi a constante de secagem obtida a partir de modelos de secagem empíricos.

1.1.OBJETIVO

1.1.1. Objetivo geral

Estudar o processo de secagem do resíduo de malte gerado no processo de fabricação da cerveja.

1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar o processo de secagem convectiva.
- Determinar as curvas cinéticas de secagem.
- Estudar modelos matemáticos para representar o processo de secagem convectiva.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CEVADA

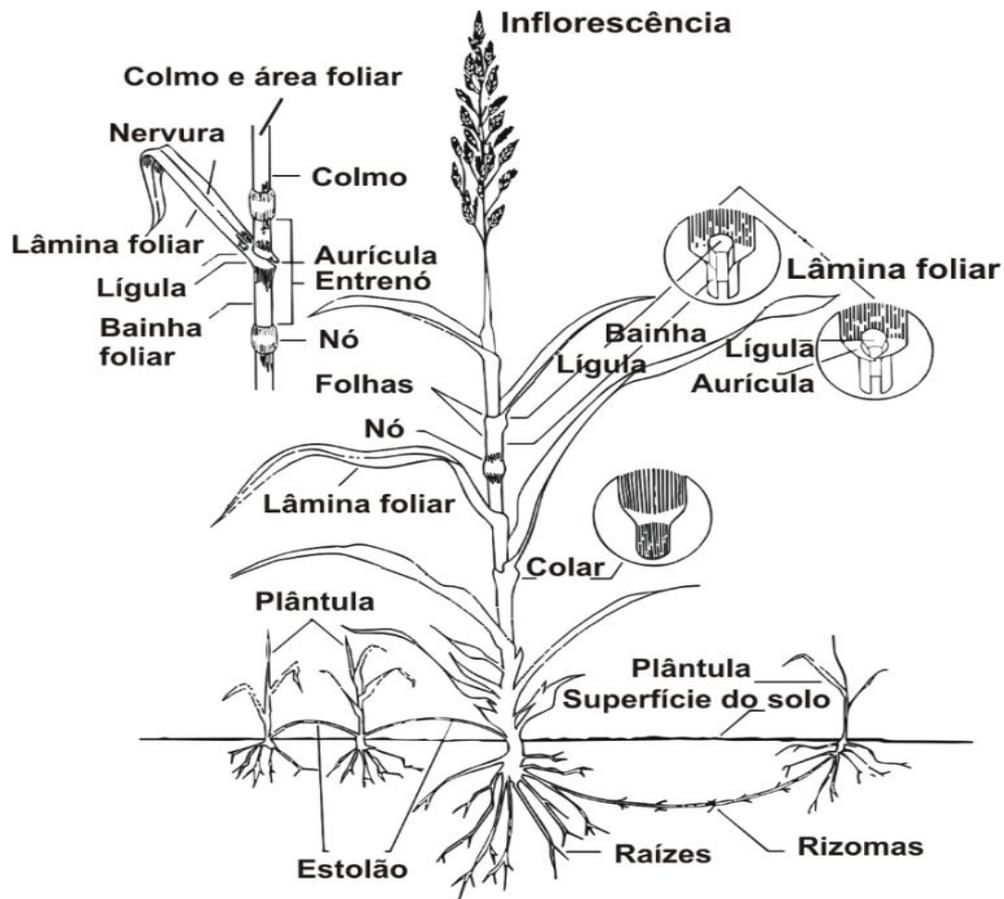
A cevada (*Hordeum vulgares*) pertence à família das gramíneas e sua utilização remonta desde o Egito antigo, mas foram os gregos e romanos que a utilizaram na produção de pão. O grão de cevada tem formato alongado, com a parte central mais espessa e extremidades cônicas. A casca protege o grão do ataque de predadores, servindo para o processo de malteação e fermentação, representando, em média, 13% do peso do grão (AGEITEC, 2008).

A cevada é dividida em duas subespécies: *Hordeum vulgare* L. ssp. *vulgare* e *Hordeum vulgare* L. ssp. *spontaneum* (C. Koch.) Thell. A *vulgare* é a cevada cultivada, já a *spontaneum* é o progenitor selvagem da cevada (AUSTRALIAN GOVERNMENT, 2008).

Segundo Von bothmer (1992), a cevada pertence ao gênero *Triticeae* da família das gramíneas, *Poncaeae*, também conhecido como *Gramineae*. A *Triticeae* é um dos grupos de plantas de clima temperado como diversos cereais e forrageiras de importância econômica, bem como cerca de 350 espécies selvagens. O gênero *Hordeum* é incomum entre os *Triticeae*, já que contém ambas as espécies anuais, como *H. vulgare* e *H. marinum* e espécies perenes, tais como *H bulbosum*.

O seu período de germinação é de 1 a 3 dias. Suas flores são dispostas em espigas, na extremidade do colmo e os frutos são amarelados e ovoides, conforme apresentado na Figura 1. Fornecem uma farinha alimentícia que é utilizada na fabricação de cerveja e os grãos torrados e moídos são usados na fabricação de bebida semelhante ao café natural sem cafeína (SCARLATELLI, 1994).

Figura 1: Morfologia de uma gramínea genérica.



Fonte: (FONTANELI, SANTOS e FONTANELI, 2012).

Segundo dados do relatório de acompanhamento da safra Brasileira de grãos, fornecido pela Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2015), a safra 2014/2015 de cevada chegou a 305,35 mil toneladas do grão, colhidos apenas na região sul do país, mais precisamente no Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina. No Paraná, os 53,2 mil hectares cultivados com cevada resultaram numa produção de 188,7 mil toneladas. No Rio Grande do Sul a colheita foi de 113,4 mil toneladas. Em Santa Catarina, o plantio de 985 hectares registrou uma produtividade de 3.300 kg/ha utilizados na indústria cervejeira, a que adquiriu o total da safra colhida.

2.2. GERAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

Os Resíduos agroindustriais, segundo a ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004), podem ser encontrados nos estados sólido, semissólido e líquido que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, assim também, como os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água ou exijam para soluções técnica e economicamente inviável em face à melhor tecnologia disponível.

Segundo Cunha *et al.* (2012), o resíduo industrial é um dos maiores responsáveis pelas agressões fatais ao ambiente e os geradores de resíduos são obrigados a cuidar do gerenciamento, transporte, tratamento e destinação final de seus resíduos.

Os resíduos agroindustriais são produzidos em grandes quantidades, em todo o mundo, a partir do beneficiamento e industrialização de alimentos. O descarte desses resíduos no meio ambiente resulta em uma série de transtornos para o ecossistema, devido à sua rica composição. Neste contexto, pode se destacar a indústria cervejeira, cuja produção inclui etapas de processamento e fermentação de matéria prima vegetal, como cevada, lúpulo e outros grãos utilizados como adjuntos, gerando diferentes subprodutos. Devido às características de composição dos resíduos cervejeiros, estes apresentam significativo potencial para aplicação em tecnologias de bioprocessos (MATHIAS; MELLO e SERVULO, 2014).

Uma forma de atuação, no que diz respeito ao aproveitamento de resíduos é a de buscar utilizações viáveis e econômicas para os inevitáveis resíduos agroindustriais gerados. Sempre que possível, o resíduo final deverá constituir em matéria prima para um novo processo, constituindo uma segunda transformação. Como exemplo, a indústria de cana de açúcar, cujo bagaço serve desde alimentação animal até a cogeração de energia elétrica para venda, satisfazendo as demandas regionais (CEREDA, 2000).

Diversos avanços tecnológicos têm proporcionado à indústria cervejeira grandes economias pela menor geração de subprodutos ao longo do processo.

Contudo, certos resíduos intrínsecos à produção da bebida dificilmente têm redução de sua quantidade gerada, como o bagaço de malte, o *trub* e a levedura residual cervejeira. Estes resíduos são responsáveis pela perda de aproximadamente 20 de cada 100L de água cervejeira utilizada no processo, principalmente pelo elevado teor de umidade que os compõe, entre 80 e 90%, promovendo grande arraste de mosto e perda de extrato, bem como de cerveja, a depender da fase em que o resíduo é retirado, o que acarreta a geração de significativas quantidades de efluentes (MATHIAS; MELLO e SERVULO, 2014).

No processo cervejeiro, os resíduos sólidos são gerados principalmente nas etapas de filtragem, envase e tratamento de água e efluentes líquidos. Os principais gerados, segundo a United Nations Environment Programme, (UNEP, 1996) são:

- Grãos usados: principal tipo de resíduo, em relação a quantidade gerada. São aqueles resíduos oriundos do aproveitamento do conteúdo dos grãos de malte, constituídos de restos de cascas e polpa de grãos, misturados, em suspensão ou dissolvidos no mosto. Embora de origem semelhante, dependendo da etapa onde são retirados do mosto possuem características físicas e composição distinta e, portanto, são separados em três tipos:
- Bagaço de malte: resíduo gerado na filtração do mosto após a caldeira de mostura, antes da fervura.
- *Trub* grosso: resíduo tirado do *whirlpool*, na primeira filtração após o cozimento, composto de gordura vegetal e proteínas coaguladas.
- *Trub* fino: resíduo obtido na segunda filtração, composto de gordura vegetal que sai misturado a terra diatomácea e parcelas de levedo.

Todos possuem excelentes características nutricionais, assim como o bagaço de malte e por esta razão são usados na fabricação de ração animal. Em alguns casos, estes são misturados ao bagaço de malte e em algumas plantas e também se utiliza no preparo de novas bateladas de mosto.

- Excesso de levedura: durante o processo de fermentação, as leveduras se reproduzem, obtendo-se ao final do processo mais levedo do que se utilizará na produção na próxima batelada. Parte desta levedura é utilizada no preparo de uma nova batelada e parte é vendida a indústria alimentícia.

- Resíduos do envase: durante a etapa de envase existem dois tipos de resíduos gerados:
- Pasta celulósica: composta dos rótulos removidos na lavagem das garrafas retornáveis a mesma e é vendida a empresas de reciclagem de papel;
- Garrafas quebradas, latas e tampas metálicas amassadas, plástico e papelão: originários de embalagens. São agregados e vendidos para empresas de reciclagem.

O bagaço de malte é o resíduo resultante do processo inicial da fabricação de cervejas, que provém do processo de obtenção do mosto, pela fervura do malte moído e dos adjuntos, que após a filtração é constituído basicamente pelas cascas da cevada malteada, sendo encontrado disponível o ano todo, em grandes quantidades e a um baixo custo. O bagaço de malte é quantitativamente o principal subproduto do processo cervejeiro, sendo gerado cerca de 14-20 kg a cada 100 litros de cerveja produzida (CORDEIRO *et al.* 2012).

O bagaço de malte é predominantemente fibroso, com 70% massa seca e proteína com 15 a 25% massa seca, apresentando também em sua composição lipídeos, minerais, vitaminas, aminoácidos e compostos fenólicos. Diversas aplicações podem ser citadas, como: alimentação e nutrição animal e humana; produção de energia por queima direta ou por produção de biogás, via fermentação anaeróbia; produção de carvão vegetal; material adsorvente em tratamentos químicos; cultivo de microrganismos e obtenção de bioprodutos por fermentação; suporte para imobilização celular; dentre outros (MATHIAS; MELLO e SERVULO, 2014).

2.3. SECAGEM

O processo de secagem é uma das operações unitárias mais antigas que se tem conhecimento, visando a conservação de alimentos contra deterioração, preservando suas propriedades, das condições durante a estocagem, diminuindo custos com transporte e armazenamento. É uma das mais usuais na indústria química e de alimentos. Geralmente a secagem é a última no processamento do produto antes de sua classificação e embalagem. Os parâmetros primordiais para a

rentabilidade e qualidade do produto seco submetido a esta operação referem-se a quantidade de energia gasta e o tempo utilizado neste processo. A secagem é definida como a aplicação de calor com condições controladas para remover, por evaporação, a maior parte da água normalmente presente em um material ou alimento, ocorrendo simultaneamente transferência de calor e de massa (LUIZ, 2012).

O calor necessário para conseguir a evaporação da água nos alimentos pode ser transmitido por condução, convecção e radiação, que geralmente se combinam, embora predomine uma delas (ZEN, 2010). Quando se fala em secagem de alimentos, pode-se citar duas formas: natural e artificial. A secagem natural é aquela em que é realizada por meio da radiação solar, sendo muito utilizada na secagem de milho, feijão, café e cacau; porém, a grande desvantagem é ser extremamente dependente das condições climáticas. A secagem artificial é aquela em que se utiliza de artifícios para aumentar o teor e a velocidade de secagem dos alimentos sem que haja interferência climática, com o uso de equipamentos denominados secadores (DOMENICO e CONRAD, 2015).

Ainda segundo os mesmos autores, existem inúmeros métodos de secagem artificial, que podem ser utilizados para o fornecimento de calor ao material a ser seco, dentre eles os mais comuns são:

- Secagem por convecção: basicamente, o ar quente passa pelo material a ser seco, fazendo com que a umidade evapore e seja expelida para fora do secador.
- Secagem por radiação: tem os mesmos princípios da secagem por convecção, porém esta é realizada através do emprego de materiais como radiadores de baixa temperatura e lâmpadas de quartzo de alta temperatura como forma de fornecimento de radiação infravermelha ou radiação solar.
- Secagem por liofilização: é utilizada quando o material a ser seco não pode ser exposto ao calor, mesmo em temperaturas baixas. Esta é a que menos agride o material e tem uma maior qualidade final, porém o custo é bastante alto, sendo esta baseada na sublimação da água congelada do material colocado em uma câmara de secagem onde a pressão é abaixo do ponto tríplice da água. A energia requerida é geralmente suprida por radiação ou condução de bandejas aquecidas a taxas nas quais a temperatura do material

não ultrapasse o valor de 0°C. A umidade se condensa em placas refrigeradas localizadas em uma câmara do secador longe do material ou em um condensador separado.

2.3.1. Cinética de secagem

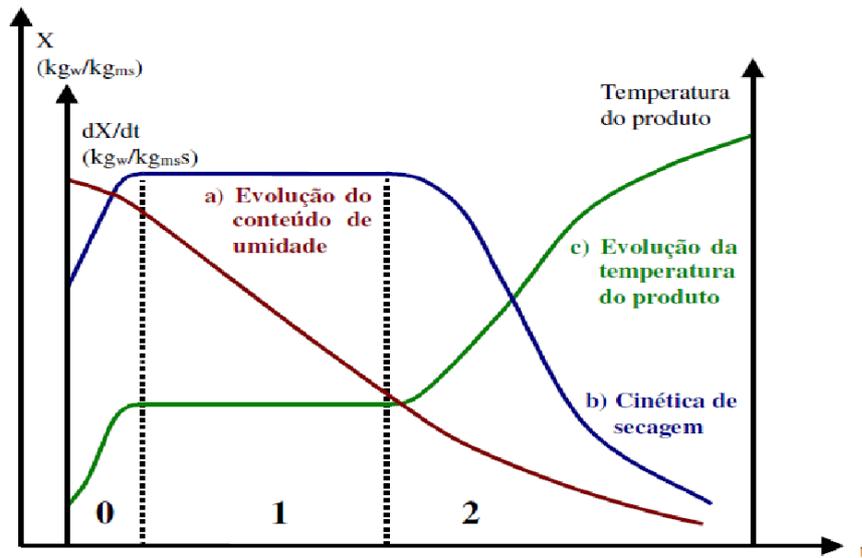
De acordo com Nobrega (2012), a secagem pode ser avaliada a partir de curvas, na forma de taxa de secagem que representam a forma mais simples de descrever a conduta da secagem de um material, em diferentes condições de operação e umidade inicial do produto.

O processo de secagem é representado por três curvas que representam a variação da umidade ao longo do tempo, a variação da velocidade de perda de água (taxa de secagem) com o tempo e com o teor de umidade do material. A taxa de secagem representa a velocidade da perda de umidade do interior do produto até a superfície e está relacionada diretamente ao estado físico das moléculas de água (na forma líquida ou vapor) e ao mecanismo de transferência de massa (DIAS, 2013).

Em seu trabalho, Braga (2007), menciona que é difícil prever a forma da curva da taxa de secagem e, esta dependerá da estrutura do produto e da taxa de secagem, onde o formato da curva de velocidade de secagem depende do produto que se quer secar, sendo dependente das propriedades internas do produto, das condições externas estudadas de maneira a não provocar danos ao material durante a secagem.

Dias (2013) em seu trabalho apresenta a evolução das transferências simultâneas de calor e de massa ao longo da operação de secagem sendo esta dividida em três períodos, conforme representado na Figura 2.

Figura 2: Curvas de Secagem.



FONTE: DIAS (2013).

A curva a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem. A curva b) representa a velocidade de secagem do produto, taxa de variação do conteúdo de umidade do produto por tempo, dX/dt , isto é, é a curva obtida diferenciando a curva a). A curva c) representa a variação da temperatura do produto durante a secagem e pode ser obtida medindo-se a temperatura do produto durante a secagem.

Esses podem ser divididos em três períodos. O primeiro período, o período de indução (0), representa o início da secagem ou o período de ajuste, onde ocorre uma elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor de água. Essas elevações têm prosseguimento até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa (água). O segundo período (1) caracteriza-se pela taxa constante de secagem. A água evaporada é a água livre, em que a migração da água do interior até a superfície do produto é suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água na superfície. A transferência de massa e de calor é equivalente e portanto a velocidade de secagem é constante e enquanto houver massa de água na superfície do produto suficiente para acompanhar a evaporação, a taxa de secagem será constante.

No terceiro período (2), a taxa de secagem é decrescente. A quantidade de água presente na superfície do produto é menor, reduzindo-se, portanto, a

transferência de massa. A transferência de calor não é compensada pela transferência de massa; o fator limitante nessa fase é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto. A temperatura do produto aumenta, atingindo a temperatura do ar de secagem, que é quando o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem, o processo então é encerrado.

2.3.2. Curvas de secagem

As curvas de secagem contêm informações de fundamental importância para o desenvolvimento de processos e para o dimensionamento de equipamentos. Com elas pode-se estimar o tempo de secagem de certa quantidade de produtos e, com o tempo necessário para a produção, estimar os gastos energéticos que refletirão no custo de processamento e influenciará no preço final do produto (ALEXANDRE *et.al.*, 2013).

Dantas (2010) relata que os dados experimentais alcançados são representados através de curvas relacionando o teor da umidade com o tempo e dois métodos podem ser utilizados para determinar as curvas de secagem: o monitoramento da perda da umidade do material mediante pesagem direta da amostra ou a monitorização da umidade do ar de secagem, na entrada e saída do secador usando instrumentos como psicrômetros e higrômetros de infravermelho.

Por meio da secagem é possível ser determinada a cinética de secagem, sendo representada pelas curvas de secagem e de taxa de secagem. O comportamento da curva de secagem de um sólido úmido mediante um fluxo de ar a uma determinada temperatura é sempre o mesmo e a taxa de secagem é obtida derivando-se os dados de umidade em função do tempo de secagem (MENESES *et al.*, 2013).

2.3.3. Modelos matemáticos

Os modelos matemáticos são usados para estudar as variáveis envolvidas na cinética de secagem do produto e aperfeiçoar os parâmetros de funcionamento permitindo assim analisar resultados preliminares. A Modelagem matemática e simulação de curvas de secagem sobre diferentes condições são importantes para

obter um melhor controle da operação da umidade e melhoria global da qualidade do produto final (TEIXEIRA, ZUNIGA e RIBEIRO, 2015).

Segundo Domenico e Conrad (2015), para realizar a simulação de um processo de secagem de um determinado produto é necessário utilizar modelos matemáticos que melhor descrevam a situação. Além de realizar a medição da secagem é possível analisar através dos modelos outras variáveis como temperatura, velocidade do ar e umidade relativa do ar. Existem diferentes modelos matemáticos que são usados para determinar os processos de secagem, dentre eles estão os modelos semi-empíricos, analíticos e empíricos.

Os modelos semi-empíricos fazem ligação entre a teoria e a aplicação, porém não consideram toda a complexidade do fenômeno. Estes modelos são conhecidos como leis exponenciais de secagem e baseiam-se, de modo geral, na analogia com a lei de resfriamento de Newton. Quando se aplica esta lei, admite-se que as condições sejam isotérmicas e que a resistência à transferência de umidade se restrinja apenas à superfície do produto. A sua utilização é frequente na modelagem de secagem de produtos agroalimentares e dentre os exemplos de modelos matemáticos tem-se: o modelo de Dois Termos; o de Henderson e Pabis; o de Lewis; o de Page e o de Page Modificado (DOMENICO e CONRAD, 2015).

De acordo com Boeri (2012), os modelos puramente empíricos são obtidos por ajustes estatísticos de resultados obtidos experimentalmente em diferentes condições externas de temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem e negligenciam a resistência interna à transferência de massa e de calor, o que permite considerar a umidade e a temperatura constantes para todo o material, mas não podem dar uma visão clara e exata dos processos que ocorrem durante a secagem. Um exemplo de utilização de modelagem empírica é representado pelo modelo de Wang e Singh (1978).

Os modelos analíticos consideram o transporte de massa e calor dentro do produto e consistem em sistemas de equações diferenciais resultantes da aplicação de princípios de conservação de massa, energia e espécie química e de modelos de transporte no interior do material a secar. Os modelos analíticos que descrevem a taxa decrescente de secagem de um sólido consideram, geralmente, como mecanismo principal, a difusão baseada na segunda Lei de Fick, que expressa que

o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água (ROMERO-PEÑA e KIECKBUSCH, 2003).

A melhor forma de apresentar os dados coletados da secagem é através das curvas de secagem, que podem ser apresentadas de duas formas: a taxa de evaporação versus o teor de umidade média, através da curva de cinética de secagem e o teor de umidade versus tempo. Estas são determinadas pela desidratação do material em condições pré-estabelecidas e pelo teor de umidade, sendo calculadas através da razão de umidade adimensional (Equação 2) em função do tempo de secagem. O adimensional é usado para impedir imprecisões dos resultados causados pelas diferenças no teor de umidade inicial da amostra (BACURAU, 2013).

$$U^* = \frac{U(t) - U_{eq}}{U_i - U_{eq}} \quad (1)$$

Onde:

$U(t)$: Teor de umidade a cada tempo de secagem.

U_{eq} : Teor de umidade de equilíbrio.

U_i : Teor de umidade inicial.

A Tabela 1 apresenta modelos matemáticos utilizados para descrever o processo de secagem.

Tabela 1: Modelos matemáticos utilizados para descrever o fenômeno de secagem de materiais agroindustriais.

Modelo	Equação
Page	$RU = \exp(-kt^n)$
Newton	$RU = \exp(-kt)$
Midilli	$RU = a * \exp -kt^n + bt$
Henderson e Pabis	$RU = a * \exp(-kt)$

FONTE: MARTINS *et. Al.* (2015).

Onde:

t: tempo de secagem, h;

k: constantes de secagem, h^{-1} ;

a, b, n: coeficientes dos modelos.

2.4. ESTADO DA ARTE

Mathias, Mello e Servulo (2014) estudaram a caracterização de três resíduos cervejeiros avaliados: bagaço de malte, *trub* quente e levedura residual cervejeira, que apresentaram elevado teor de umidade e significativa fração protéica em sua matéria seca, adicionada de considerável teor de minerais. O *trub* quente apresentou elevado teor de açúcares redutores em sua fração solúvel, enquanto que a levedura residual apresentou proteínas solúveis em maior teor que os demais resíduos. Pode-se admitir que devido à sua rica composição, esses resíduos apresentam-se como potencial para utilização em diversas áreas da tecnologia, como alimentação humana e animal, e biotecnologia industrial.

Mello, Vergílio e Mali (2013) estudaram a caracterização química e funcional do resíduo fibroso da indústria cervejeira. Seus resultados revelaram que o bagaço de malte empregado apresentou elevado teor de fibras do tipo insolúvel (61,83%), sendo 12,29% de celulose; 26,13 de lignina e 23,41% de hemicelulose, enquanto que a capacidade de absorção de água (CAA) foi entre 3,60 a 3,76 (g de água/g amostra seca.); capacidade de absorção de óleo (CAO) de 2,19 a 2,73 (g de óleo/g amostra seca); capacidade de emulsificação (CE) entre 59,55 e 60,11 (mL de óleo emulsificado/g de amostra seca) e atividade emulsificante (AE) no intervalo de 45,54 a 46,78(%). Estes resultados foram similares ao relatados. Os resultados da composição química do bagaço de malte mostram teores de celulose, lignina e hemicelulose similares aos reportados na literatura com pequena variação. As propriedades funcionais avaliadas apresentaram valores similares a outros resíduos agroindustriais, propriedades estas relacionadas aos elevados teores de fibras e proteínas em sua composição.

Almeida, Azevedo e Dias (2015) estudaram sobre a avaliação da perda de umidade de bagaço de malte objetivando a utilização em panificação. O bagaço de malte foi colocado em placas de *petri* e colocadas em estufa de secagem a 105°C para verificar sua umidade. Para o acompanhamento do processo foram realizadas medições de umidade em tempo zero, na balança determinadora de umidade por infravermelho e após cada hora retiradas alíquotas e feitas as medições de umidade. Após seis horas na estufa à 105°C, obteve-se uma curva de umidade por tempo do decréscimo de água livre presente em cada amostra do bagaço de malte. Seus

resultados revelaram que a secagem em uma temperatura elevada (105°C), não alterou a aparência do bagaço e que estes podem ser utilizados em panificação. Porém, é de grande importância que sejam feitos maiores estudos para verificar a qualidade nutricional das amostras do bagaço de malte, a fim de verificar sua real viabilidade.

Os modelos matemáticos utilizados para descrever a secagem vêm sendo aplicados por vários autores nos mais diversos materiais, sejam em frutas, hortaliça e rejeitos agroindustriais. Alexandre *et. all.* (2013) avaliaram a cinética de secagem do resíduo (casca) de abacaxi (*Ananas comosus* L.) enriquecido utilizando a levedura *Saccharomyces cerevisiae* em camada fina de secagem com planejamento experimental fatorial. A temperatura utilizada (40, 50 e 60 °C) e a velocidade do ar de secagem (0,8 a 1,3 m s⁻¹) foram as variáveis do processo. A cinética de secagem ocorreu no período de taxa decrescente. Os modelos Page, Henderson & Pabis e Lewis, ajustaram os dados experimentais satisfatoriamente, sendo Page discretamente superior aos demais. Verificou-se influência da variável temperatura apenas para a variável resposta umidade, não sendo observada influência estatisticamente significativa da velocidade do ar de secagem.

Tsuda *et al.* (2013) estudaram o fenômeno de secagem convectiva de fatias de berinjela, onde foi investigada a influência que as variáveis de processo, temperatura (40, 55 e 70°C) e velocidade do ar (1,0; 1,5; e 2,0 m/s). Os modelos matemáticos utilizados foram os de Lewis, Page, Henderson & Pabis, Logarítmico e de Dois termos. Com os resultados obtidos, foi observado que dos modelos empíricos e semi-empíricos de secagem selecionados o modelo de Page foi o que melhor ajustou aos dados experimentais, com coeficiente de determinação de aproximadamente 99,95%.

Boffo *et al.* (2014) analisaram os ajustes dos dados experimentais com os modelos de Henderson e Pabis, Newton e Lewis, Midilli e Page na cinética de secagem da mistura bagaço de malte e levedura (*saccharomyces cerevisiae*). Foi utilizada a proporção de 80% de bagaço de malte e 20% de levedura. A secagem foi realizada em um secador de túnel de vento na temperatura fixa de 70°C e com as velocidades de fluxo de ar de 1,0, 1,2, 1,4, 1,5 e 2,0ms⁻¹. Os resultados obtidos verificaram que na cinética de secagem da mistura bagaço de malte/levedura está intrinsecamente relacionada à velocidade do fluxo de ar, visto que se aumentar a

velocidade do ar, diminui-se o tempo de secagem, o que reduz, conseqüentemente, a umidade final do produto e referente aos ajustes dos modelos matemáticos testados, o modelo de Midilli se apresentou como os melhores resultados, com coeficiente de determinação acima de 99,98%, em todas as condições testadas. Entretanto, o modelo matemático de Page também se apresentou como um bom representativo dos dados experimentais, com coeficiente de determinação de aproximadamente 99,95%.

Souza *et al.* (2014) publicaram uma pesquisa sobre secagem do bagaço de malte para aplicação em formulação de pré-mistura para pão cervejeiro, com o uso dos modelos empíricos de Lewis, Brooker e Page para elaborar o estudo da secagem do bagaço de malte utilizando um secador de bandejas, com auxílio de análises estatísticas a fim de estudar a influência das variáveis temperatura e velocidade do ar de secagem nos parâmetros dos modelos. Os resultados do experimento revelaram que, apesar do modelo de Page ter apresentado bom ajuste, a análise estatística mostrou que os efeitos estudados não influenciaram significativamente nenhum dos parâmetros dos modelos. Já as variáveis temperatura e velocidade do ar influenciaram significativamente os parâmetros k das curvas de secagem obtidas pelo modelo de Lewis e Brooker com 95% de confiança.

Lopes *et al.* (2015) estudaram a caracterização do resíduo de cervejaria através de ajustes dos modelos matemáticos de cinética de secagem em balança de infravermelho. Foram avaliados os modelos matemáticos Brooker, Henderson e Pabis, Lewis, Logarítmico, Overhults e Page. Os ensaios de secagem foram realizados nas temperaturas de 50°C, 60°C, 70°C, 80°C e 90°C. O comportamento das curvas de secagem para as temperaturas estudadas mostrou forte influência no tempo de secagem. Pela avaliação dos modelos cinéticos de secagem o modelo de Page apresentou o melhor ajuste para descrever a função de umidade relativa com o tempo de secagem do bagaço de malte.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. LOCAL DE ESTUDO

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Físico-Química do Núcleo de Pesquisa e Extensão em Alimentos do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba, na cidade de Campina Grande.

3.2. MATÉRIA PRIMA

A matéria prima utilizada foi o resíduo de malte de cevada utilizada na produção de cerveja tipo *Pilsen*. Para a realização dos experimentos foi coletado o resíduo filtrado adquirido após o processamento enzimático do amido na etapa da mosturação numa produção artesanal de cerveja produzida na Universidade Estadual da Paraíba no mesmo Laboratório.

3.3. PREPARAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA PARA PROCESSAMENTO

O malte de cevada foi triturado em um moinho de grãos como mostra na Figura 3 a) e b).

Figura 3: Moagem do malte de cevada.



Em a) grãos de cevada malteada; em b) Trituração do malte de cevada em moinho de grãos, com granulometria uniforme, garantindo que o amido quebre e a casca permaneça quase intacta.

Feito isso, o malte triturado foi colocado em um recipiente para o processamento enzimático do amido na mosturação, com temperatura controlada a 65°C por aproximadamente 90 minutos mediante teste de iodo como meio de confirmação do final do processo enzimático, a fim de obter o resíduo úmido cervejeiro, como apresentado na Figura 4 a) e b).

Figura 4: Processamento enzimático do amido na mosturação.



Em a) momento inicial da mosturação; em b) momento final da mosturação. Após o processamento enzimático do amido no mosto, elevou-se a temperatura para 76°C com a finalidade de inativar as enzimas e, posteriormente, realizar a filtragem do mosto.

3.4. CONDIÇÕES OPERACIONAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O planejamento experimental realizado para o estudo da cinética de secagem em diferentes massas e condições de temperatura está descrito na Tabela 02.

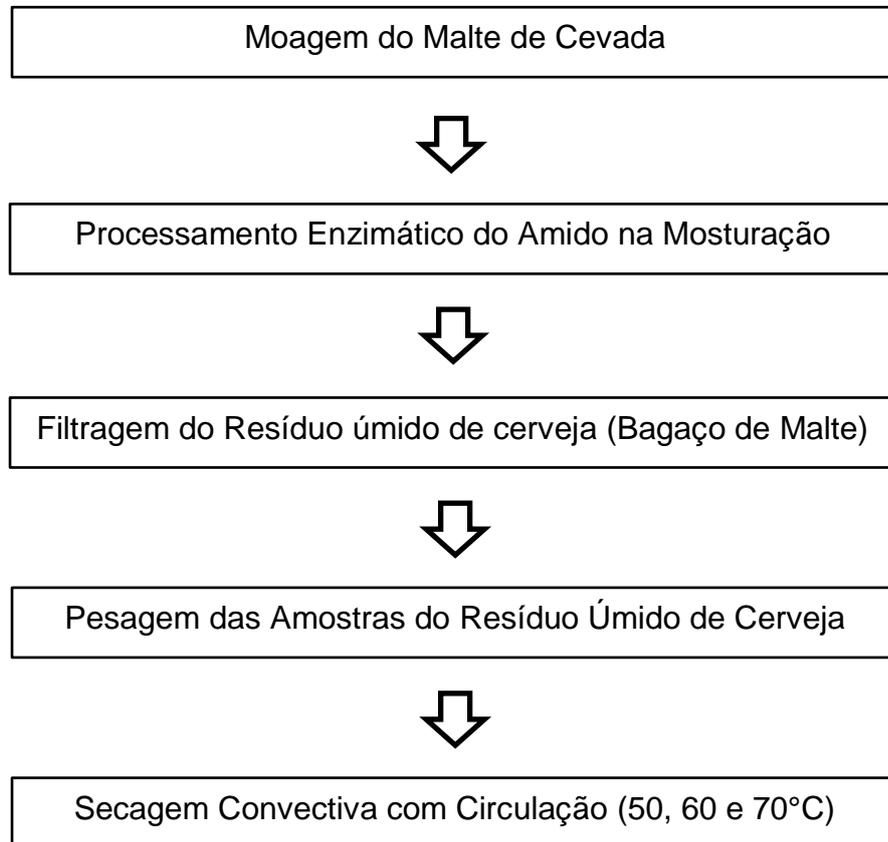
Tabela 2: Condições operacionais para os experimentos.

ENSAIO	TEMPERATURA (°C)	MASSA (g)
01	50	100
02	50	300
03	70	100
04	70	300
05	60	200
06	60	200
07	60	200

Os experimentos de secagem foram realizados nas temperaturas de 50, 60 e 70°C, com variação de peso nas amostras, como mostrado na Tabela 2. A cinética de secagem foi estudada mediante as curvas do adimensional de umidade em função do tempo de processo, bem como pelas curvas de secagem em função do conteúdo de umidade das amostras. Os resultados experimentais das cinéticas de secagem foram usados para alimentar os modelos matemáticos, buscando-se o melhor ajuste para representar os dados experimentais.

As etapas de processamento do procedimento experimental utilizado estão expostas no diagrama da Figura 5:

Figura 5: Etapas de procedimento experimental.



3.4.1. Secagem Convectiva em Estufa com Circulação de Ar

A secagem convectiva foi realizada em estufa com circulação de ar. Inicialmente, pesou-se a amostra do bagaço de malte, em seguida foi levada para estufa com circulação de ar, ilustrado na Figura 06, na temperatura de operação especificada, repetindo o mesmo procedimento para as três temperaturas definidas pelo planejamento experimental e, durante intervalos de 15 em 15 minutos registrou-se o peso com o uso de uma balança semi-analítica com precisão de $\pm 0,01$ g até atingir uma hora. A partir de uma hora, as pesagens procederam-se em um intervalo de 30 minutos. Este procedimento foi realizado até obter peso constante da amostra.

Figura 6: Estufa de circulação de ar.



3.4.2. Umidade

Após o fim da secagem na estufa com circulação de ar, atingindo-se peso constante, recolheu-se uma amostra de 2 gramas, de cada ensaio, em uma balança analítica, para um cadinho, devidamente calibrados e devidamente identificados, como apresentado a Figura 7.

Figura 7: Pesagem de amostras secas dos ensaios.



Em seguida, todas as amostras foram levadas para a estufa a 105°C durante 24h, apresentada na Figura 8.

Figura 8: Estufa de circulação de ar forçada a 105°C.



Após as 24 horas, pesou-se as amostras com a finalidade de determinar a umidade, de acordo com as técnicas descritas pelo Instituto Adolfo Lutz (2008), é expressa em base úmida (b.u) pela equação 2:

$$U \text{ b.u} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100\% \quad (2)$$

Onde:

m_i : Massa inicial das amostras(g);

m_f : Massa final das amostras desidratadas em estufa (g).

3.5. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A secagem convectiva em estufa com circulação de ar do resíduo úmido de cerveja foi realizada a partir de um planejamento fatorial completo 2^2 com três repetições no ponto central, apresentadas na Tabela 3. As variáveis independentes foram temperatura do ar de secagem (T) e massa do produto (M). A variável dependente analisada neste trabalho foi a constante de secagem obtida a partir de modelos de secagem empíricos.

Tabela 3: Matriz do planejamento experimental 2^2 com três repetições no ponto central.

ENSAIOS	T	M	T(°C)	M (g)
01	-1	-1	50	100
02	-1	+1	50	300
03	+1	-1	70	100
04	+1	+1	70	300
05	0	0	60	200
06	0	0	60	200
07	0	0	60	200

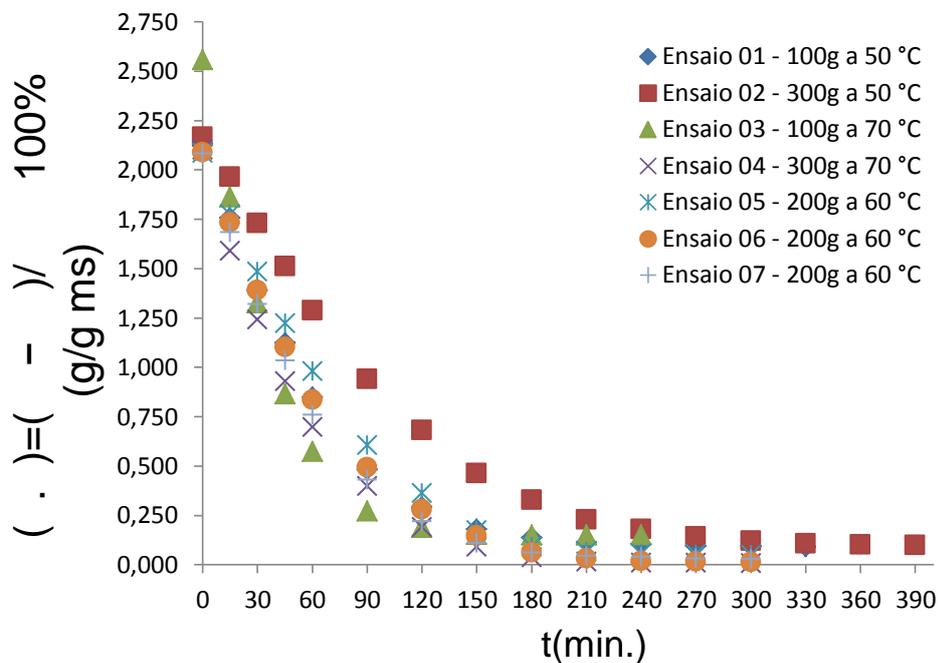
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CINÉTICA DE SECAGEM

A secagem convectiva foi realizada em estufa com circulação de ar. A partir dos dados adimensionais de umidade definida na equação 2 e da taxa de secagem em função do tempo do processo.

Na Figura 9 estão apresentadas as curvas da cinética de secagem do resíduo úmido cervejeiro, nas condições estabelecidas.

Figura 9: Cinética de secagem do resíduo úmido de cerveja.



O estudo da cinética de secagem mostrou que o acréscimo da temperatura favoreceu a transferência de massa, diminuindo a umidade de equilíbrio dinâmico e o tempo de secagem (BACURAL, 2013).

Verifica-se que para o ensaio 02, onde as condições operacionais são as de menor valor de temperatura do ar de secagem e maior massa do material a ser seco, a secagem ocorreu mais lentamente, como predito pela literatura.

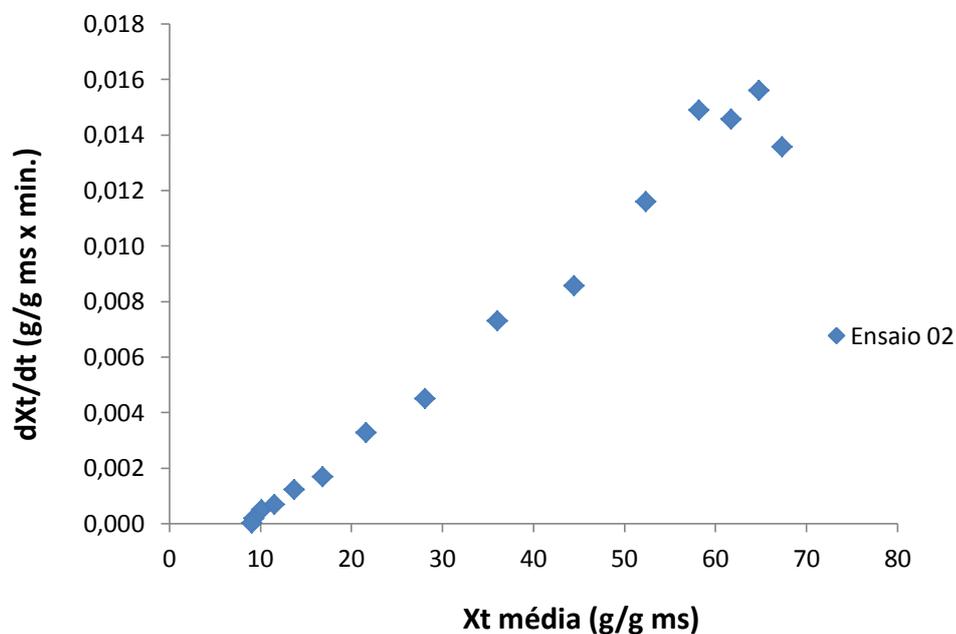
Por outro lado, o ensaio 03 em condições opostas, observa-se que a secagem do resíduo úmido cervejeiro ocorreu mais rapidamente. Boffo *et al.* (2014), em seu estudo sobre a cinética de secagem da mistura bagaço de malte e levedura

observaram que há uma grande influência da temperatura do ar quanto ao tempo de secagem. A medida que a temperatura é elevada há uma queda no tempo de secagem da mistura, atingindo resultados semelhantes ao obtido neste experimento.

Os ensaios 05, 06 e 07 representam os experimentos realizados nas condições do ponto central, desta maneira é possível observar uma boa reprodutibilidade dos dados experimentais obtidos, onde as curvas praticamente se sobrepõem umas às outras.

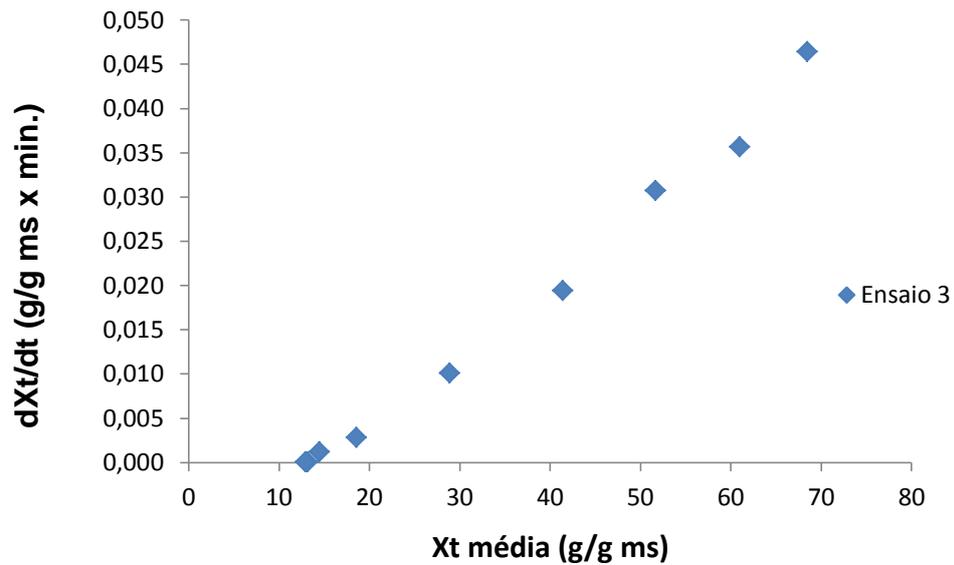
As Figuras 10 e 11 representam as curvas da variação da taxa de secagem em função da umidade média, em base seca, para os ensaios 02 e 03, respectivamente, o que configurou os outros ensaios.

Figura 10: Curva da taxa de secagem para o ensaio 02.



Para o ensaio 02 verifica-se que, inicialmente, a amostra passa por um rápido período de aquecimento com evaporação da água da superfície obtendo-se altas taxas de secagem. Em seguida, observa-se, nitidamente, que a secagem ocorreu apenas em período de taxa decrescente.

Figura 11: Curva da taxa de secagem para o ensaio 03.



A partir das curvas da taxa de secagem foi possível determinar os valores da umidade de equilíbrio. Observa-se que nas condições operacionais do ensaio 02, de $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $M = 300\text{g}$ o tempo de secagem para atingir o equilíbrio dinâmico é maior apresentado 10, e condições operacionais do ensaio 03, $T = 70^{\circ}\text{C}$ e $M = 100\text{g}$, o tempo de secagem para atingir o equilíbrio dinâmico é menor como apresentado na Figura 11.

Os modelos matemáticos de Handerson e Pabis, Midilli, Newton e de Page foram utilizados para representar os dados experimentais. Para a escolha do modelo, utilizou-se do Critério de Informação de Akaike (Akaike's Information Criterion – AIC, 1973), que pode ser explicado como um critério que dá uma pontuação para o modelo, baseado em sua adequação aos dados e na ordem do modelo, de acordo com a equação (3).

$$AIC = n * \ln SQ_n + 2K \quad (3)$$

Onde:

- O primeiro termo é uma bonificação por uma melhor adequação aos dados, em que SQ_n é a função verossimilhança do modelo, e o segundo termo é uma penalização, que é maior à medida que se aumenta a ordem, k .
- n é o número de observações.
- K é o número de parâmetros do modelo.

A Tabela 4 apresenta os valores de R^2 , SE (Erro Padrão), AIC (método de Akaike) e os valores encontrados para os parâmetros dos modelos utilizados.

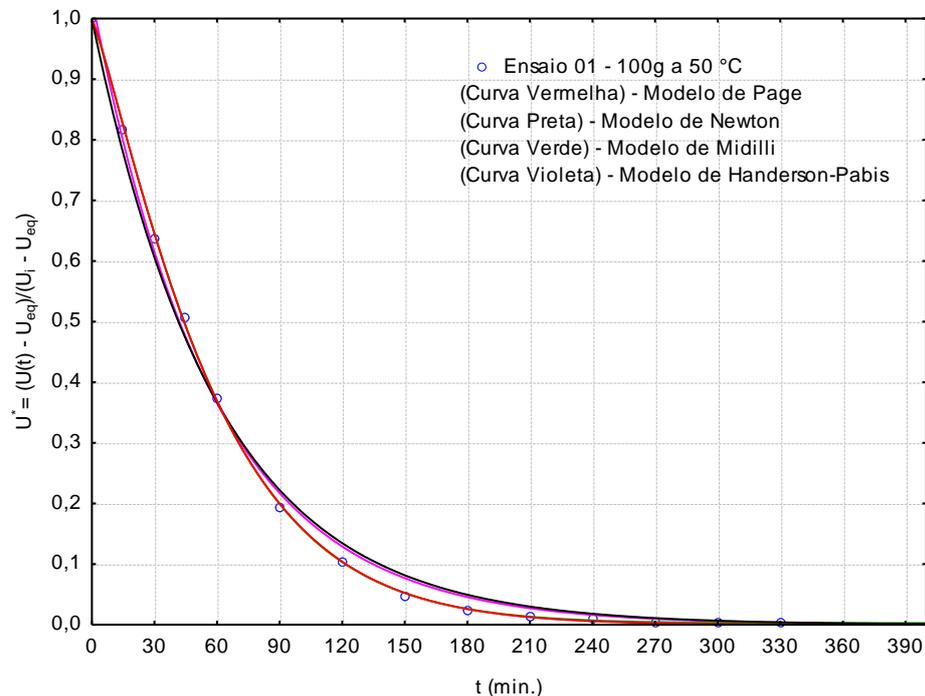
Tabela 4: Resultados dos parâmetros dos modelos empíricos e análise estatística.

MODELO	ENSAIO	PARAMETROS				R^2	SE (%)	AIC
		A	k	N	b			
		A ₁	K ₁	-	-	-	-	-
Handerson - Pabis	01	1,034156	0,017329	-	-	0,9980	2,2506	-104,3894
	02	1,058272	0,011076	-	-	0,9966	3,0137	-110,2008
	03	1,023594	0,026759	-	-	0,9979	2,2785	-81,4040
	04	1,009329	0,018935	-	-	0,9993	1,3045	-110,9943
	05	1,047967	0,014904	-	-	0,9955	3,5442	-85,0078
	06	1,035070	0,016150	-	-	0,9981	2,2758	-96,5258
	07	1,031405	0,017843	-	-	0,9981	2,2575	-96,7356
		A ₂	K ₂	N ₂	b ₂	-	-	-
Midilli	01	0,995804	0,007470	1,194249	0,000007	0,9998	0,6067	-137,0931
	02	0,997676	0,003382	1,241038	-0,000007	0,9999	0,4124	-169,8493
	03	0,996868	0,012206	1,204901	0,000026	0,9998	0,6788	-104,0444
	04	0,995091	0,014539	1,058913	-0,000031	0,9997	0,7625	-120,9567
	05	0,990307	0,004640	1,252960	-0,000035	0,9994	1,0560	-112,4907
	06	0,997886	0,007586	1,168720	-0,000014	0,9999	0,4327	-135,6893
	07	0,995793	0,008339	1,174929	-0,000011	0,9998	0,5895	-127,6478
		-	K ₃	-	-	-	-	-
Newton	01	-	0,016701	-	-	0,9974	2,5596	-102,7867
	02	-	0,010412	-	-	0,9948	3,7472	-105,2300
	03	-	0,026136	-	-	0,9946	2,4420	-81,8788
	04	-	0,018740	-	-	0,9992	1,3472	-112,1572
	05	-	0,014170	-	-	0,9942	4,0146	-83,7681
	06	-	0,015546	-	-	0,9974	2,6377	-94,6884
	07	-	0,017251	-	-	0,9975	2,5389	-95,6811
		-	K ₄	N ₄	-	-	-	-
Page	01	-	0,007835	1,183355	-	0,9998	0,6288	-140,0943
	02	-	0,003381	1,242438	-	0,9999	0,4393	-171,8231
	03	-	0,012841	1,190835	-	0,9997	0,7686	-105,3107
	04	-	0,014234	1,067937	-	0,9996	0,9099	-120,3617
	05	-	0,004749	1,253417	-	0,9996	1,2296	-112,5333
	06	-	0,007513	1,172835	-	0,9999	1,2296	-112,5333
	07	-	0,008454	1,173719	-	0,9998	2,6377	-129,8530

R^2 – coeficiente de determinação; SE – erro padrão. AIC – método de Akaike; a, k, n e b – parâmetros do modelo.

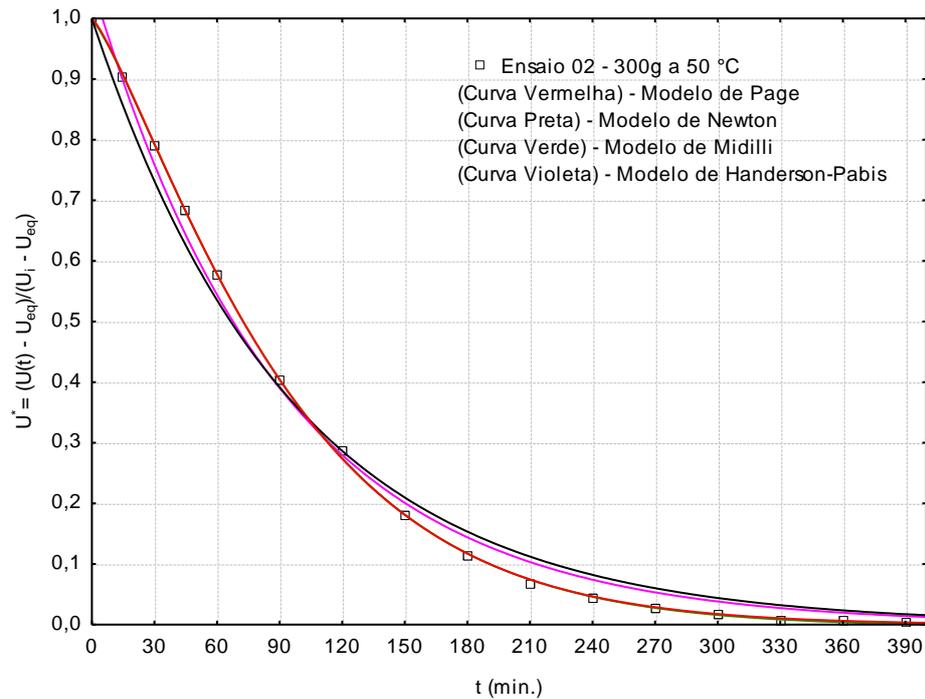
Conforme a Tabela 4, todos os modelos analisados apresentaram valores de coeficiente de determinação (R^2) acima de 99%, o que significa, segundo Boffo *et al.* (2014), um bom ajuste para a representação do fenômeno de secagem. Para o ensaio 01, os modelos Page e de Midilli foram os que mais se aproximaram dos valores experimentais, como observado na Figura 12, apresentando, ambos, coeficiente de determinação de 0,9998, porém o modelo de Page obteve valores mais representativos de acordo com os resultados do teste AIC, obtendo o menor valor comparando com os resultados do modelo de Midilli. O modelo de Page obteve um valor de AIC de -140,0943 e o modelo de Midilli -137,0931 no teste AIC, verificados na Tabela 4.

Figura 12: Cinética de secagem representada pelos modelos matemáticos para o ensaio 01.



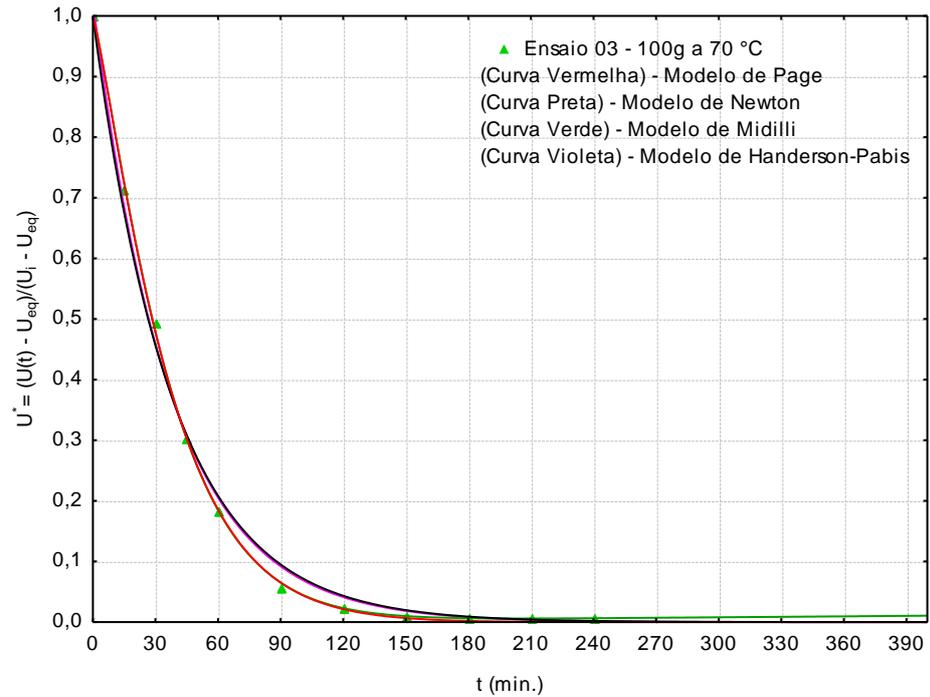
Para o ensaio 02, os modelos que melhor se ajustaram aos dados experimentais foram o modelo de Page, com coeficiente de determinação de 0,9999, bem como o modelo de Midilli, com o mesmo valor de coeficiente de determinação. Quanto aos valores obtidos no teste AIC, o modelo que melhor representou os dados experimentais do ensaio 02 foi o de Page, com um valor de -171,8231, o menor entre os dois modelos, como demonstrado na Tabela 4. A Figura 13 exibe as curvas de secagem para os modelos analisados no ensaio 02.

Figura 13: Cinética de secagem representada pelos modelos matemáticos para o ensaio 02.



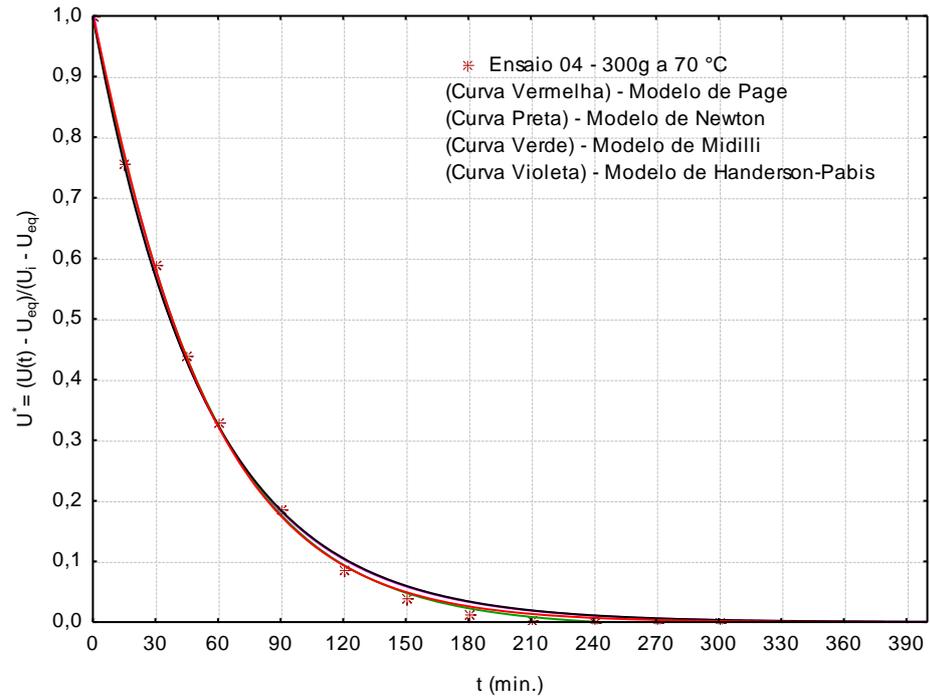
Para o ensaio 03, os modelos Page e de Midilli foram os que mais se aproximaram dos valores experimentais, sendo o modelo de Midilli com a melhor representação dos dados, com coeficiente de determinação de 0,9998, para 0,9997 obtido pelo modelo de Page, porém quanto aos valores do teste AIC, o modelo de Page foi o mais representativo com um valor de -105,3107 contra -104,0444 para o valor do teste AIC do modelo de Midilli, observados na tabela 4 e na Figura 14.

Figura 14: Cinética de secagem representada pelos modelos matemáticos para o ensaio 03.



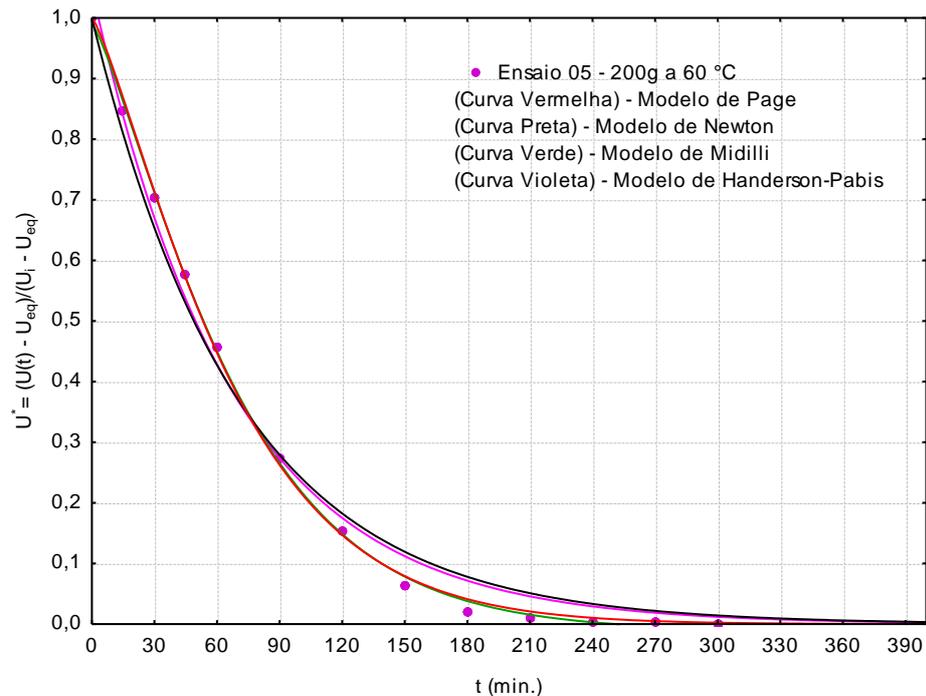
De acordo com a tabela 04 e com a Figura 15 para o ensaio 04, os modelos que melhor representaram os dados experimentais foram os modelos de Midilli e Page, porém o modelo que melhor representou os dados experimentais foi o modelo de Midilli com coeficientes de determinação de 0,9997, para um valor de 0,9996 do coeficiente de determinação do modelo de Page. Esse fato se repetiu também nos valores obtidos no teste Akaike, obtendo o modelo de Midilli um valor de AIC de 120,9567 e Page -120,3617.

Figura 15: Cinética de secagem representada pelos modelos matemáticos para o ensaio 04.



Para o ensaio 05, mais uma vez os modelos de Midilli e Page foram os que melhor representaram os dados experimentais, com coeficientes de determinação de 0,9994 e 0,9996, respectivamente, obtendo o modelo de Page valores mais significativos que o de Midilli. No teste Akaike o modelo de Midilli obteve um valor de AIC de -112,4907 e o modelo de Page -112,5333. Com tudo, observa-se que o modelo de Page melhor se aproximou dos resultados experimentais, verificados de acordo com a tabela 04 e a Figura 16.

Figura 16: Cinética de secagem representada pelos modelos matemáticos para o ensaio 05.



Apesar dos modelos de Handerson - Pabis, Midilli e Newton apresentarem valores do coeficiente de determinação (R^2) próximos do valor um, verifica-se que o modelo de Page foi o que teve melhor ajuste para as condições operacionais utilizadas no planejamento experimental estudado, pois os valores do Erro Padrão (SE) são menores, assim também, como os valores obtidos no teste Akaike (AIC) foram os mais negativos, o que demonstra ser o melhor ajuste dentre os modelos.

Boffo *et al.* (2014), observaram resultados semelhantes ao estudar a cinética de secagem da mistura de bagaço de malte e levedura (*Saccharomyces Cerevisiae*). Seus resultados revelaram que nos ajustes dos modelos matemáticos testados, o modelo de Page se apresentou com os melhores resultados com coeficiente de determinação acima de 0,9998, em todas as condições testadas. Entretanto, o modelo matemático de Midilli também se apresentou como um bom representativo dos dados experimentais, com coeficiente de determinação de aproximadamente 0,9995.

Estudando a cinética de desidratação e caracterização do bagaço de malte Lopes *et. al.* (2015) conseguiram verificar resultados semelhantes. Concluíram que pela avaliação dos modelos cinéticos de secagem avaliados, Page apresentou o

melhor ajuste para descrever a função de umidade relativa com o tempo de secagem do bagaço de malte.

O modelo matemático de Page também foi capaz de melhor descrever outros dois trabalhos, apresentando o melhor ajuste aos dados experimentais, no comportamento da cinética de secagem do resíduo de abacaxi enriquecido, realizado por Alexandre *et al.* (2013) e na análise da secagem convectiva de fatias de berinjela estudada por Tsuda *et al.* (2013), respectivamente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o desenvolvimento deste estudo, foi possível realizar o processo de secagem convectiva do resíduo de malte. Foi possível a determinação das curvas de cinética de secagem, em que os resultados obtidos experimentalmente revelaram forte influência da temperatura no tempo de secagem, comprovado pelo comportamento das curvas de secagem para três temperaturas estudadas. Houve uma redução na umidade final do produto obtido em virtude do aumento da temperatura e a diminuição da massa, assim como diminuição do tempo de secagem.

O planejamento experimental 2^2 com três pontos centrais utilizado na secagem demonstrou resultados bastante significativos para o modelo matemático de Page, obtendo o melhor ajuste para descrever a função de umidade relativa com o tempo de secagem, com coeficiente de determinação acima de 0,9996, em todas as condições analisadas, assim como, os valores obtidos pelo teste estatístico de Akaike (AIC) foram os mais negativos obtidos dentre os modelos analisados. Bem como o modelo matemático de Midilli também se apresentou como um bom representativo dos dados experimentais, com coeficiente de determinação de aproximadamente 0,9994 e valores do teste Akaike (AIC) bastante próximos aos encontrados pelo modelo de Page.

Por fim, o produto final obtido apresentou aspectos visuais satisfatórios com boa aparência, uma umidade final de aproximadamente entre 4 a 7,5 (%), de maneira que é possível usar o material seco como farinha para confecção de subprodutos, bem como adsorvente de compostos orgânicos.

REFERENCIAS

- ABNT. **Classificação de Resíduos, NBR10.004**. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2004.
- ADOLFO, LUTZ. **Métodos Físico-Químicos para Análise de Alimentos**. Núcleo de Informação e Tecnologia - NIT /IAL, IV edição 1ª Edição Digital, São Paulo, 2008.
- AKAIKE, H. **Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle**. Proc. 2nd International Symposium on Information Theory (eds. B. N. Petrov and F.Csaki), 267–281, Akademiai Kiado, Budapest, 1973.
- ALEXANDRE, H. V.; SILVA, F. L. H. da.; GOMES, J. P.; SILVA, O. S. da.; CARVALHO, J. P. D.; LIMA, E. E. de. **Cinética de Secagem do Resíduo de Abacaxi Enriquecido**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.17, n.6, p.640–646, 2013.
- ALMEIDA, T. S de; AZEVEDO, M. L.; DIAS, C. **Avaliação da Perda de Umidade de Bagaço de Malte: para Utilização em Panificação**. Universidade Federal do Pampa - Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, Universidade Federal do Pampa - v. 7, n. 2 - 2015.
- AGEITEC. **Cevada**. 2008. Disponível em:
http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/arvore/CONT000girlwnqt02wx5ok05vadr12ap522l.html. Acessado em: 26 de novembro de 2015.
- AUSTRALIAN GOVERNMENT. **Department of Health and Ageing Office of the Gene Technology Regulator**. The Biology of *Hordeum vulgare* L, 2008.
- BACURAU, I. M. **Estudo da Cinética de Secagem do Mesocarpo da Melancia (*Citrullus Lanatus*)**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Química Industrial) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, 2013.

BOERI, C. N. **Secagem Convectiva de Produtos Alimentares: Otimização e Controle.** Trabalho de conclusão de curso (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

BOFFO, E.V.; SILVA, G.M.C. da; KLAGENBOECH, R.; TONEL, J.J. **Modelagem Matemática para Descrição da Cinética de Secagem da Mistura de Bagaço de Malte e Levedura (*Saccharomyces Cerevisiae*).** COBEQ - XX Congresso de Engenharia Química, Florianópolis/SC, 19 a 22 de outubro de 2014.

BOURSCHEIDT, C.T.; OLIVEIRA, B. H.; GONÇALVES, G. da C.; SILVA, G. M. C da. **Estudo da Secagem do Bagaço de Malte Resíduo Úmido Obtido do Processo Industrial de Cervejaria.** II International Symposium on Agricultural and Agroindustrial Waste Management. Foz do Iguaçu – Brasil. 13-15 de março, 2011.

BRAGA, A. M. P. **Estudo da Retenção de Constituintes Voláteis na Secagem de Abacaxi sob Atmosfera Modificada.** Trabalho de conclusão de curso (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007.

CEREDA, M. P. **Manejo, Uso e Tratamento da Industrialização da Mandioca.** São Paulo: Fundação Cargill, 2000.

CORDEIRO, L. G.; EL-AOUAR, Â. A.; GUSMÃO, R. P. **Caracterização do Bagaço de Malte Oriundo de Cervejarias.** Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, Mossoró – RN, v. 7, n. 3, p. 20-22, setembro de 2012.

CONAB. **Acompanhamento Da Safra Brasileira de Grãos. V.2 - SAFRA 2014/15. N.4 - Quarto Levantamento, Janeiro/2015.**

CUNHA, A. H. N.; GUIMARÃES, J. K. R.; COSTA, M. B.; VIEIRA, J. A. **Caracterização Orgânica de Resíduo Sólido Gerado em Fabricação de Cerveja com Diferentes Soluções.** IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais. II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Goiânia/GO – 19 a 22/11/2012.

DANTAS, S. C. de M. **Desidratação de polpas de frutas pelo método *foam-mat***. Trabalho de conclusão de curso (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, outubro de 2010.

DIAS, L. G. **Estudo do Processo de Secagem em Estufa e por Microondas de Compósitos Cerâmicos de Argila e Resíduos de Esteatito**. Trabalho de conclusão de curso (Mestrado em Engenharia da Energia) - Universidade Federal De São João Del Rei, São João Del Rei, 2013.

DOMENICO, C. N. B. Di.; CONRAD, T. M. **Simulação de Processos de Secagem Através dos Modelos Matemáticos Exponencial e de Page**. Vivências: Revista Eletrônica de Extensão da URI. Vol. 11, N.20: p.134-146, Maio de 2015.

FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S. **FORAGEIRAS PARA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA REGIÃO SUL-BRASILEIRA**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Trigo - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2ª edição, Embrapa Brasília, DF – 2012.

L O P E S , C . R . ; Q U E I R O Z , A . M . d e . ;
S I L V A , K . C . d a . ; M E N D E S , E . C . S . ;
S I L V É R I O , B . C . ; F E R R E I R A , M . M . P .
Estudo Cinético de Desidratação e Caracterização do Bagaço de Malte Resíduo da Indústria. Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), julho de 2015.

LUIZ, M. R. **Estudo Teórico e Experimental de Secagem de Tomate (*Lycopersicon esculentum*)**. Trabalho de conclusão de curso (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, UFPB, João Pessoa, 2012.

MARTINS, A. S.; LAGE, E. Z.; GONELI, A. L. D.; FILHO, C. P. H.; LOPES, J. G. **Cinética de Secagem de Folhas de Timbó (*Serjania marginata* Casar)**. Revista

Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.19, n.3, p.238–244, UAEEA/UFMG Campina Grande, PB, 2015.

MATHIAS, T. R. S.; M. MELLO, P. P.; SERVULO, E. F. C. **Caracterização de Resíduos Cervejeiros**. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - Engenharia e Tecnologia de Alimentos. Florianópolis, Santa Catarina, outubro de 2014.

MELLO, L. R. P. F.; VERGÍLIO, R. M.; MALI, S. **Caracterização Química e Funcional do Resíduo Fibroso da Indústria Cervejeira**. Anais do III Simpósio de Bioquímica e Biotecnologia - BBR – Biochemistry and Biotechnology Reports - ISSN 2316-5200 Numero Especial v. 2, n. 3, p. 191-194, 2013.

MENESES, M. L. de.; STRÖHER, A. P.; PEREIRA, N. C.; BARROS, S. T. D. de. **Análise da Cinética e Ajustes de Modelos Matemáticos aos Dados de Secagem do Bagaço do Maracujá-Amarelo**. Engevista, v. 15, n. 2, p. 176-186, 2013.

ROMERO-PEÑA, L. M.; KIECKBUSCH, T. G. **Influência de Condições de Secagem na Qualidade de Fatias de Tomate**. Brazilian Journal of Food Technology, v.6, n.1, p.69-76, jan./jun., 2003.

SOUZA, L. F. G. DE; HIDALGO, C. B.; FERRAZ, I. C.; LIMA, T. C. G.; ZONHO, V. C. **Estudo da Secagem do Bagaço de Malte para Aplicação em Formulação de Pré-Mistura para Pão Cervejeiro**. 4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente Bento Gonçalves – RS, Brasil, 23 a 25 de Abril de 2014.

SCARLATELLI, F. P. **O Uso de Resíduo de Cervejaria na Alimentação de Vacas Leiteiras**. Gado holandês. São Paulo. V. 60, nº 427. p 26 – 28, 1994.

TEIXEIRA, P. C. M.; ZUNIGA, A. D. G.; RIBEIRO, L. **Modelagem Matemática e Cinética da Secagem da Amêndoa do Baru (*Dipteryx alata* Vog)**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, V.11 nº.21; p. 1309. 2015.

TSUDA, J.; CARVALHO, A.C.B.; COSTA, A.B.S.; FREIRE, F. B. **Análise da Secagem Convectiva de Fatias de Berinjela**. X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro Universidade Severino Sombra Vassouras – RJ – Brasil, 2013.

UNEP. UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Environmental Management in the Brewing Industry**. UNEP Technical Report Series n° 33. UNEP. Paris, 1996.

VON BOTHMER, R. The **Wild Species of Hordeum: Relationships and Potential use for Improvement Of Cultivated Barley**. Chapter 1. In: PR Shewry, ed. Barley: Genetics, Biochemistry, Molecular Biology and Biotechnology. C. A. B. International, Wallingford, Oxon. 1992.

ZEN, F. G. **Estudo da Secagem Convectiva do bagaço de Mirtilo Visando Minimizar a Perda de Compostos Antociânicos**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, dezembro 2010.