

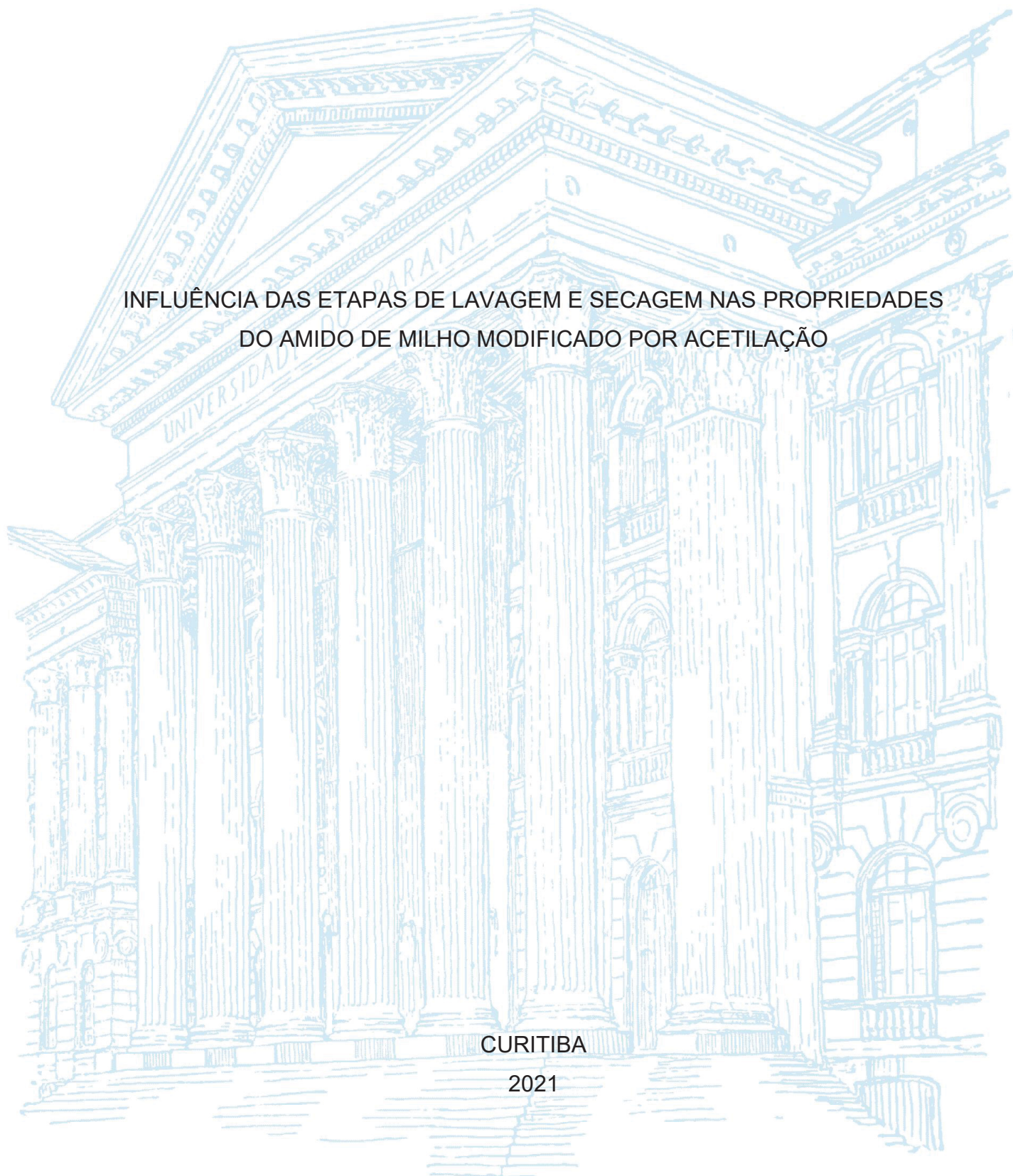
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MICHELLE THIEMI MASOTTI

INFLUÊNCIA DAS ETAPAS DE LAVAGEM E SECAGEM NAS PROPRIEDADES
DO AMIDO DE MILHO MODIFICADO POR ACETILAÇÃO

CURITIBA

2021



MICHELLE THIEMI MASOTTI

INFLUÊNCIA DAS ETAPAS DE LAVAGEM E SECAGEM NAS PROPRIEDADES
DO AMIDO DE MILHO MODIFICADO POR ACETILAÇÃO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Profa. Dra. Franciny Campos Schmidt

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

M398i Masotti, Michelle Thiemi
Influência das etapas de lavagem e secagem nas propriedades do
amido de milho modificado por acetilação [recurso eletrônico] /
Michelle Thiemi Masotti – Curitiba, 2021.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
alimentos.

Orientadora: Profa. Dra. Franciny Campos Schmidt

1. Amidos. 2. Tecnologia de secagem (*Ring dryer e flash dryer*).
I. Universidade Federal do Paraná. II. Schmidt, Franciny Campos.
III. Título.

CDD: 664.22

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
DE ALIMENTOS - 4000101601

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE ALIMENTOS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de MICHELLE THIEMI MASOTTI intitulada: INFLUÊNCIA DAS ETAPAS DE LAVAGEM E SECAGEM NAS PROPRIEDADES DO AMIDO DE MILHO MODIFICADO POR ACETILAÇÃO, sob orientação da Profa. Dra. FRANCINY CAMPOS SCHMIDT, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 10 de dezembro de 2021.

Assinatura Eletrônica

16/12/2021 22:54:1

FRANCINY CAMPOS SCHMIDT
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

05/01/2022 15:36:0

MARCOS ROGÉRIO MAFRA
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

13/12/2021 14:37:5

JOSÉ GUILHERME LEMBI FERREIRA ALVES

Avaliador Externo (32004010)

Francisco Heráclito dos Santos, 100 - Centro Politécnico - CURITIBA - Paraná -
Brasil

CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3232 - E-mail: posaiim@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação
federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015. Gerado e autenticado pelo SIGA-

UFPR, com a seguinte identificação única: 134682

**Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 134682**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por mais esta oportunidade.

A minha orientadora Prof.^a Franciny, por toda paciência e dedicação.

Ao gerente da fábrica e as pessoas do time de engenharia, produção, controle de qualidade e Idea Labs da Ingredion que me apoiaram, ensinaram e me incentivaram na realização deste trabalho.

A todos do LABEP, por todas as dicas e auxílios que me deram.

Aos meus amigos, por todo apoio e carinho em mais este caminho.

A minha família, que sempre acreditou em mim e é a minha base inspiradora.

Nas asas do tempo, a tristeza voa (Jean de La Fontaine)

RESUMO

O amido de milho é um ingrediente utilizado em diversos segmentos industriais, principalmente na indústria de alimentos. Nesta é empregado para o controle de diversas características como estabilidade, umidade, aparência, textura e consistência de diferentes produtos. Em função da ampla aplicação, o mercado de amido tem evoluído nos últimos anos. Para a extração do amido de milho são necessárias as seguintes etapas de processo: maceração, separação do germe, separação da casca, separação do glúten-amido e lavagem. Caso o amido seja comercializado na forma regular, após a etapa de lavagem, este é enviado diretamente à secagem e comercializado com umidade entre 10 e 14 %. No entanto, o amido regular possui algumas limitações em sua utilização e, nesse contexto, os amidos modificados são amplamente empregados nas indústrias. O amido pode ser modificado por ações físicas ou químicas, submetido a uma etapa de lavagem e posterior secagem. A etapa de lavagem dos amidos modificados é de extrema importância, pois as características da pasta formada são determinantes para a qualidade final do amido após a secagem. Por sua vez, a secagem é uma das operações de maior consumo energético na planta industrial de produção de amido e melhorias nessa etapa são de grande interesse para a indústria. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do tipo de lavagem (em hidroclones e filtro prensa) e da tecnologia de secagem (*flash dryer* convencional e *ring dryer*) nas propriedades do amido de milho modificado por acetilação. Além disso, foram analisadas as características dos efluentes gerados durante ambas as tecnologias de lavagem e comparados os gastos energéticos dos secadores avaliados. De forma geral, não foram observadas diferenças significativas entre as características físico-químicas e reológicas do amido acetilado submetido a ambas as tecnologias de lavagem e de secagem avaliadas. Além disso, todos os parâmetros avaliados atenderam às especificações do produto. Por outro lado, a lavagem em hidroclones utiliza uma maior quantidade de água para se atingir um teor de cinzas na torta inferior a 0,3 %, gerando um volume maior de efluente para a estação de tratamento. Além disso, não houve diferença estatística significativa entre a carga orgânica desse efluente e a do efluente gerado no filtro prensa. Assim, entende-se que para o amido acetilado a lavagem em filtro prensa foi mais eficiente. Com relação ao consumo energético dos secadores, o *ring dryer* apresentou um maior consumo de energia elétrica, porém o consumo de energia térmica foi menor e a eficiência energética maior quando comparado ao *flash dryer*. Como a energia térmica normalmente possui um custo mais elevado, o investimento na tecnologia do secador *ring dryer* pode ser compensado com o passar dos anos. Dessa forma, conclui-se que para definir a tecnologia de secagem deve-se levar em consideração o consumo de energia de cada secador, bem como a disponibilidade energética do local. Com relação às tecnologias de lavagem, é importante observar além das propriedades finais do amido, as características do efluente gerado.

Palavras-chave: *Ring dryer*, *flash dryer*, filtro prensa, hidroclones, eficiência energética.

ABSTRACT

Corn starch is an ingredient used in several industrial segments, especially in the food industry. It is used to control several characteristics such as stability, moisture, appearance, texture, and consistency of different products. The starch market has evolved in recent years due to its wide application. For the extraction of corn starch, the following process steps are necessary: maceration, germ separation, fiber separation, gluten-starch separation, and washing. If the starch is sold in the regular form, after the washing step it is sent directly for drying and marketed with a moisture content between 10 and 14 %. However, regular starch has some limitations in its use and in this context modified starches are employed in the industries. Starch can be modified by physical or chemical actions, submitted to a washing stage and then dried. The washing stage of modified starches is extremely important, because the characteristics of the paste formed are crucial to the final quality of the starch after drying. In turn, drying is one of the most energy consuming operations in the industrial starch production plant, and improvements in this stage are of great interest for the industry. In this context, this work aimed to evaluate the influence of the type of washing (hydroclone and filter press) and drying technology (conventional flash dryer and ring dryer) on the properties of acetylated modified corn starch. In addition, the characteristics of the effluents generated during both washing technologies were analyzed and the energy expenditures of the evaluated dryers were compared. In general, the washing and drying technologies did not influence the physicochemical and rheological characteristics of acetylated starch and all the parameters evaluated met the product specifications. The washing in hydroclones uses a larger amount of water to wash the starch, generating a larger volume of effluent to the treatment plant. Moreover, the organic load of this effluent did not differ statistically to the effluent generated in the filter press. Thus, it is understood that for acetylated starch the washing in filter press was more efficient. In relation to the energy costs of the dryers, the ring dryer presented a higher consumption of electrical energy, however the thermal energy consumption was lower than for the flash dryer. As thermal energy normally has a higher cost, the investment in the ring dryer technology can be compensated over the years. Thus, we conclude that to define the drying technology one should take into consideration the energy consumption of each dryer, as well as the energy availability of the site. In relation to washing technologies, it is important to observe not only the final properties of the starch, but also the characteristics of the effluent generated.

Keywords: Ring dryer, flash dryer, filter press, hydroclones, energetic efficiency.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESTRUTURA QUÍMICA DA AMIOLOSE (A) E AMILOPECTINA (B).	24
FIGURA 2 – FLUXOGRAMA DO PROCESSAMENTO DO MILHO POR VIA ÚMIDA	28
FIGURA 3 - CICLO DE UM FILTRO PRENSA.....	32
FIGURA 4 – MODELO DE SECADOR <i>FLASH DRYER</i>	34
FIGURA 5 - MODELO SECADOR <i>RING DRYER</i>	36
FIGURA 6 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSAMENTO DE AMIDO MODIFICADO POR ACETILAÇÃO	40
FIGURA 7 - DIAGRAMA PARA BALANÇO DE MASSA NO SISTEMA DE LAVAGEM DE AMIDO MODIFICADO.....	43
FIGURA 8- MEDIÇÃO DO pH	47
FIGURA 9 - ILUSTRAÇÃO DAS COORDENADAS DO COLORÍMETRO HUNTER EZ	50
FIGURA 10 - MEDIÇÃO DA COR NO EQUIPAMENTO COLORFLEX EZ	50
FIGURA 11 - LÂMINA DO MICROSCOPIO ILUSTRANDO A QUANTIDADE DE AMIDO WAXY (VERMELHOS) E NÃO WAXY (AZUIS).	57
FIGURA 12 - VOLUME DE ÁGUA E EFLUENTE GERADOS NA LAVAGEM DE AMIDO ACETILADO EM HIDROCLONES (C1) E FILTRO PRENSA (C2).....	61
FIGURA 13 - PROPRIEDADES DOS EFLUENTES OBTIDOS APÓS A ETAPA DE LAVAGEM EM HIDROCLONES (AMOSTRA C1) E FILTRO PRENSA (AMOSTRA C2).	62

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - MASSA ESPECÍFICA E MASSA SECA DO AMIDO EM SUSPENSÃO COM 17 °B	43
TABELA 2 - NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS B DE ACORDO COM A TECNOLOGIA DE LAVAGEM E SECAGEM	44
TABELA 3 – PROPRIEDADES DAS TORTAS DE AMIDO ACETILADO OBTIDAS APÓS AS ETAPAS DE LAVAGEM/DESAGUAMENTO EM HIDROCLONES (AMOSTRA A1) E FILTRO PRENSA (AMOSTRA A2).	53
TABELA 4 - PROPRIEDADES DOS AMIDOS ACETILADOS LAVADOS EM HIDROCLONES (AMOSTRA B2) E FILTRO PRENSA (AMOSTRA B3) E SECADOS EM RING DRYER.	54
TABELA 5 - PROPRIEDADES DOS EFLUENTES GERADOS NA ETAPA DE LAVAGEM DO AMIDO ACETILADO EM HIDROCLONES (AMOSTRA C1) E FILTRO PRENSA (AMOSTRA C2).	59
TABELA 6 - BALANÇO DE MASSA NO FILTRO PRENSA PARA OBTER O VOLUME TOTAL DE EFLUENTES PARA LAVAGEM DE 1000 kg DE AMIDO ACETILADO	61
TABELA 7 - BALANÇO DE MASSA NOS HIDROCLONES PARA OBTER O VOLUME TOTAL DE EFLUENTES PARA LAVAGEM DE 1000 kg DE AMIDO ACETILADO	61

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 OBJETIVO GERAL.....	18
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.2 DIAGRAMA CONCEITUAL DO TRABALHO.....	19
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	21
1.3.1 ANÁLISE DA ETAPA DE LAVAGEM DO AMIDO ACETILADO	21
1.3.2 ANÁLISE DA ETAPA DE SECAGEM DO AMIDO ACETILADO	22
2 REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1 AMIDO DE MILHO	23
2.2 AMIDO MODIFICADO	26
2.3 OBTENÇÃO/PROCESSAMENTO DE AMIDO DE MILHO.....	27
2.3.1 LIMPEZA E MACERAÇÃO.....	28
2.3.2 SEPARAÇÃO DO GERME.....	29
2.3.3 SEPARAÇÃO DA CASCA.....	29
2.3.4 SEPARAÇÃO DE GLÚTEN-AMIDO	30
2.3.5 LAVAGEM DE AMIDO	30
2.3.6. LAVAGEM DO AMIDO DE MILHO MODIFICADO	31
2.3.7 SECAGEM DE AMIDO.....	33
2.3.8 EFLUENTE NA INDÚSTRIA DE PROCESSAMENTO DE MILHO	38
3 MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1 PROCESSAMENTO DO AMIDO ACETILADO	39
3.2 COLETA DAS AMOSTRAS.....	40
3.3 AVALIAÇÃO DA ETAPA DE LAVAGEM DO AMIDO ACETILADO	41
3.3.1 INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE LAVAGEM NAS CARACTERÍSTICAS DO AMIDO ACETILADO	41
3.3.2 INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE LAVAGEM NA QUANTIDADE E CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE GERADO	42
3.3.3 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE EFLUENTE GERADO	42
3.3.3.1 BALANÇO DE MASSA NOS HIDROCLONES.....	42
3.3.3.2 BALANÇO DE MASSA NO FILTRO PRENSA.....	43
3.4 AVALIAÇÃO DA ETAPA DE SECAGEM DO AMIDO ACETILADO	43

3.4.1 INFLUÊNCIA DO TIPO DE SECADOR NAS PROPRIEDADES DO AMIDO MODIFICADO	43
3.4.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E TÉRMICA NOS SECADORES <i>FLASH</i> E <i>RING</i> 44	
3.5 METODOLOGIA DAS ANÁLISES	46
3.5.1 UMIDADE	47
3.5.2 ATIVIDADE DE ÁGUA	47
3.5.3 PH	47
3.5.4 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	47
3.5.5 DIÓXIDO DE ENXOFRE (SO ₂)	48
3.5.6 CINZAS	48
3.5.7 PERCENTUAL DE GRUPOS ACETILA E GRAU DE SUBSTITUIÇÃO	48
3.5.8 VISCOSIDADE	49
3.5.9 TAMANHO DAS PARTÍCULAS	49
3.5.10 COLORAÇÃO	49
3.5.11 PORCENTAGEM DE AMIDO NÃO WAXY	50
3.5.12 DENSIDADE COMPACTADA	51
3.5.13 TESTE DE INCHAMENTO E SOLUBILIDADE	51
3.5.14 SÓLIDOS TOTAIS E SÓLIDOS SOLÚVEIS	51
3.5.15 DQO TOTAL E DQO SOLÚVEL	52
3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE LAVAGEM NAS PROPRIEDADES DO AMIDO DE MILHO MODIFICADO POR ACETILAÇÃO	53
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE GERADO NAS ETAPAS DE LAVAGEM EM HIDROCLONES E FILTRO PRENSA DO AMIDO DE MILHO ACETILADO	58
4.3 RESULTADOS DA INFLUÊNCIA DO SECADOR NAS PROPRIEDADES DO AMIDO MODIFICADO POR ACEILAÇÃO	63
5 CONCLUSÃO	68
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

O milho é usado como alimento humano, ração para gado e como fonte de vários produtos e subprodutos industriais, como o amido. Este é um polissacarídeo que se acumula como grânulos de diferentes tamanhos, formas e composição e representa 86 % a 89 % do endosperma dos grãos de milho (Eliasson, 2004).

O amido de milho é isolado comercialmente por uma moagem úmida, na qual o milho é embebido em uma solução aquosa com baixo nível de dióxido de enxofre com o objetivo de amolecer os grãos e melhorar a separação dos componentes. Essa etapa é realizada em um período de 24 a 48 horas a uma temperatura entre 48 °C e 52 °C (ECKHOFF et al., 2009). Após a imersão e moagem úmida, o germe é removido e o amido e a proteína são separados dos polissacarídeos não amiláceos por peneiramento. Após a remoção da fibra dietética, o amido é separado da proteína por centrifugação ou sedimentação e, finalmente, é enviado para lavagem e secagem (ECKHOFF et al., 2009).

Globalmente, além das restrições econômicas, as preferências de sabor e textura desempenham um papel significativo na determinação do tipo de amido a ser utilizado. Os amidos regulares são adicionados aos alimentos com o propósito de alterar uma característica específica como textura, sabor e coloração (SJÖÖ; NILSSON, 2017). No entanto, o uso do amido regular em alimentos é limitado em função das suas propriedades físicas e químicas. Por exemplo, os grânulos são insolúveis em água fria, exigindo o cozimento para conseguir a dispersão. Além disso, a viscosidade do amido regular cozido é muito alta para o uso em certas aplicações e possui tendência a retrogradação. Neste sentido, a modificação do amido por ação física, química, termoquímica ou enzimática é utilizada para alterar suas propriedades para certas aplicações industriais.

A modificação do amido por acetilação é uma alternativa para melhorar suas propriedades e diversificar sua aplicação nas indústrias de alimentos (SILVA, 2010). A acetilação tem sido aplicada a amidos que requerem melhores características espessantes (SINGH et al., 2004), declínio da temperatura de gelatinização e na tendência para retrogradação, melhoria na claridade da pasta e na estabilidade frente aos ciclos de congelamento e descongelamento (GONZALEZ; PEREZ, 2002).

Após a etapa de modificação, o amido passa por uma etapa de lavagem para cessar as reações e remover as proteínas solúveis e insolúveis e fibras em

suspensão. Industrialmente, essa lavagem pode ser realizada em hidroclones ou filtro prensa. O sistema de lavagem em hidroclones é contínuo e o amido é lavado com um fluxo de água contracorrente. Na sequência, faz-se necessária uma etapa de centrifugação para remoção do excesso de água da torta de amido. Por outro lado, a lavagem em filtro prensa ocorre em batelada e as etapas de lavagem e desaguamento são realizadas no mesmo equipamento através de placas filtrantes que são ligadas mecanicamente para abrir e fechar em sequência, geralmente por um sistema hidráulico com cilindro(s). Uma vez fechadas, a solução de amido com água fica retida na superfície filtrante dentro da câmara e forma uma torta. Os sólidos são comprimidos por uma bomba de pressão e/ou por uma membrana de borracha, a qual é inflada com ar comprimido ou água pressurizada. Depois de comprimido, uma maior remoção de umidade pode ser realizada forçando a passagem de ar comprimido através das tortas do filtro (PEPPER et al., 2010). Além das funções mencionadas anteriormente, a lavagem do amido após a modificação tem o objetivo de reduzir o teor de sais e obter uma torta de amido sem odor e sem sabor. Assim, as características da pasta formada após a lavagem são determinantes para a qualidade do produto final.

Após a lavagem, o amido modificado passa para etapa de secagem e, geralmente, são comercializados com 10 % a 14 % de umidade. Atualmente, a secagem *flash* (ou pneumática) é o método comumente utilizado para a secagem de amido (BEMILLER; WHISTLER, 2009). O secador *Flash* é um sistema bastante interessante para materiais granulados que escoam livremente, pois quando estão dispersos na corrente de ar não aglomeram e nem aderem às paredes (CAVICHIOLO, 2010). O *ring dryer* é um tipo especial de secador *flash* equipado com anéis que permitem que partículas finas, que secam rapidamente, deixem o secador, enquanto que as partículas maiores permanecem mais tempo até atingir o valor de umidade requerido. Essa tecnologia permite um tempo de residência mais prolongado dentro do sistema, garantindo uma secagem mais uniforme (WILEY, 2012). A secagem é uma das operações de maior consumo energético na planta industrial de produção de amido e melhorias nessa etapa são de grande interesse para a indústria. O investimento para aquisição de um secador *ring* é maior em comparação com um secador *flash*. Porém, além do secador *ring* oferecer uma secagem mais uniforme, existe a possibilidade do consumo energético desse

secador ser menor em função de proporcionar um maior tempo de residência do produto no secador.

Apesar de muitos trabalhos na literatura avaliarem as propriedades de amidos modificados, poucos se dedicam a explorar a influência das etapas de lavagem e secagem nas propriedades do produto final. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência do método de lavagem (em hidroclones e filtro prensa) e da tecnologia de secagem (*flash dryer* convencional e *ring dryer*) nas características reológicas e físico-químicas do amido de milho acetilado. Além disso, foram analisadas as características dos efluentes gerados nas etapas de lavagem e comparados os consumos energéticos dos secadores avaliados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste estudo foi avaliar o efeito do método de lavagem (hidroclones e filtro prensa) e da tecnologia de secagem (*flash dryer* e *ring dryer*) do amido acetilado nas características reológicas e físico-químicas finais do produto.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a influência da lavagem do amido acetilado via hidroclones e via filtro prensa nas características da torta e do produto final obtido após secagem (umidade, atividade de água, pH, condutividade elétrica, cinzas, percentual de grupos acetila, grau de substituição, dióxido de enxofre - SO₂, tamanho das partículas, viscosidade, densidade compactada, percentual de amido não waxy, coloração, inchamento e solubilidade dos grânulos);
- Comparar o consumo de água na etapa de lavagem de amido modificado usando as tecnologias de hidroclones e filtro prensa;
- Analisar os efluentes gerados durante a lavagem do amido por hidroclones e filtro prensa quanto ao teor de sólidos totais e insolúveis, DQO total e insolúvel;
- Avaliar os grânulos de amido pelos testes de inchamento e solubilidade para verificar se há diferenças devido à tecnologia de lavagem ou secagem aplicada;

- Avaliar a influência de dois tipos de secadores *flash* (tradicional e *ring dryer*) nos parâmetros de qualidade do amido acetilado;
- Avaliar o consumo de vapor, energia elétrica e eficiência energética dos secadores *flash dryer* e *ring dryer*.

1.2 DIAGRAMA CONCEITUAL DO TRABALHO

INFLUÊNCIA DAS ETAPAS DE LAVAGEM E SECAGEM NAS PROPRIEDADES DO AMIDO DE MILHO MODIFICADO POR ACETILAÇÃO
Motivação • A escassez de informações sobre a influência da lavagem após a modificação dos amidos acetilados nas características do produto final; • Avaliar se o sistema de lavagem (hidroclones x filtro prensa) pode alterar as características reológicas e físico-químicas do amido de milho modificado acetilado; • Avaliar o consumo de água e o efluente gerado por cada tecnologia de lavagem; • Avaliar se a tecnologia do secador <i>flash</i> (convencional ou <i>ring dryer</i>) interfere nas características reológicas e físico-químicas do amido acetilado; • A ausência de informações sobre a secagem de amido de milho em secadores do tipo <i>ring dryer</i>; • Comparar o consumo energético dos secadores <i>flash</i> tradicional e <i>ring dryer</i>.
O que já foi feito? Salmela e Oja (2006) avaliaram a lavagem da torta de amido em um filtro prensa e apresentaram uma modelagem matemática e simulação (através de métodos numéricos) do processo de lavagem. O estudo mostrou que a lavagem de amidos em filtro prensa é um método fácil, simples e confiável para lavagem de tortas de amido. No entanto, os autores não a compararam com outro método de lavagem. Cavichiolo (2010) estudou a secagem de bagaço de laranja em secador <i>flash</i> e relatou que o consumo de energia nesse secador é menor

em comparação com o secador rotativo.

Chapuis et al. (2016) propuseram um modelo matemático para descrever e simular a secagem de amido em secador *flash*. As simulações foram realizadas utilizando dados de secagem de partículas de amido de mandioca obtidos de cinco instalações industriais (três secadores da Tailândia e dois secadores do Paraguai). Os resultados mostraram que o modelo matemático proposto foi capaz de descrever satisfatoriamente os perfis de velocidade, teor de umidade e temperatura das partículas e do ar de secagem. Existe uma relação entre o comprimento do duto de secagem e o consumo específico de energia. O tempo de residência é o fator mais influente no consumo energético do secador, por isso deve ser maximizado no processo. A temperatura do ar deve ser ajustada ao máximo permitido em função das restrições de qualidade do produto, uma vez que aumenta a eficiência energética do secador. Os resultados dessas simulações proporcionam uma maior percepção da influência relativa de diferentes variáveis de projeto de secadores pneumáticos.

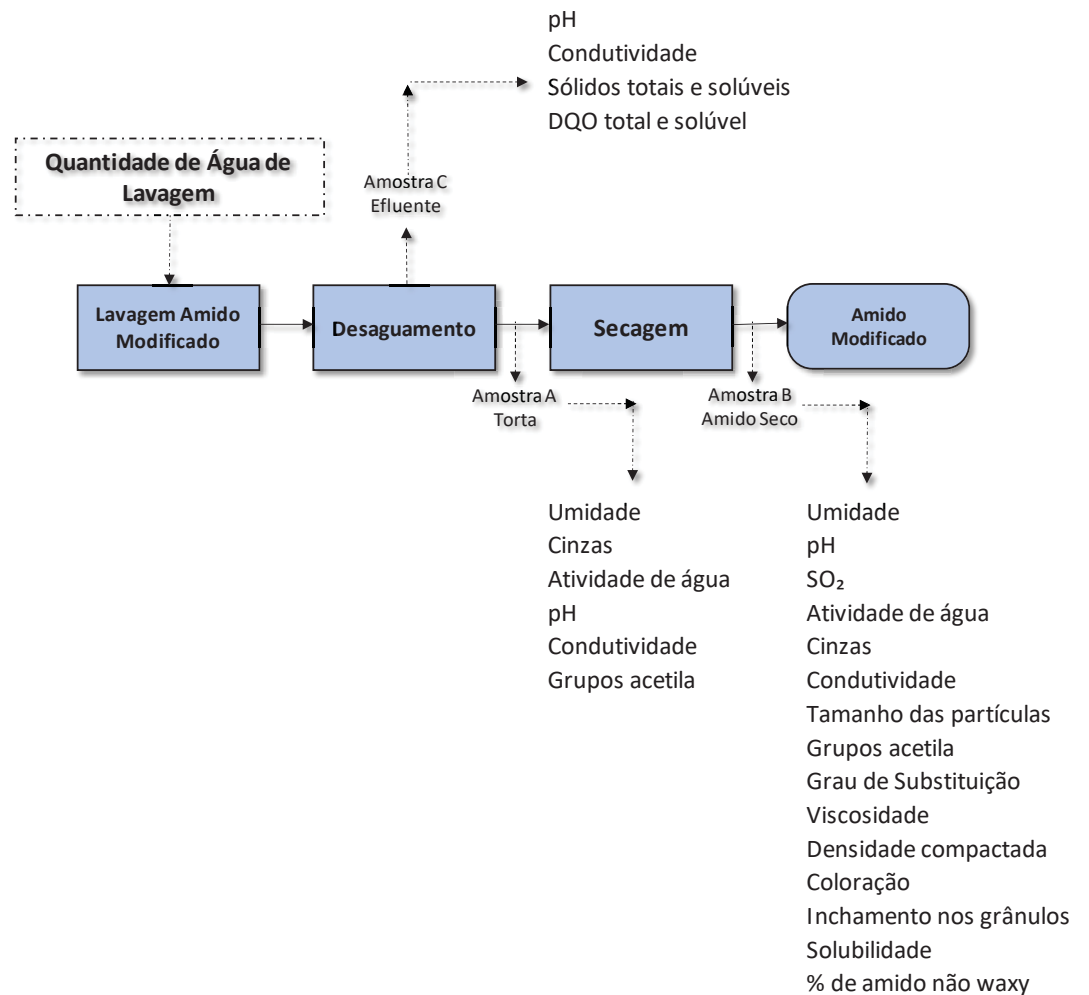
Há diversos estudos sobre as propriedades de amidos modificados. No entanto, são raros estudos que avaliaram a influência das etapas de lavagem e da tecnologia de secagem nessas características.

Hipóteses

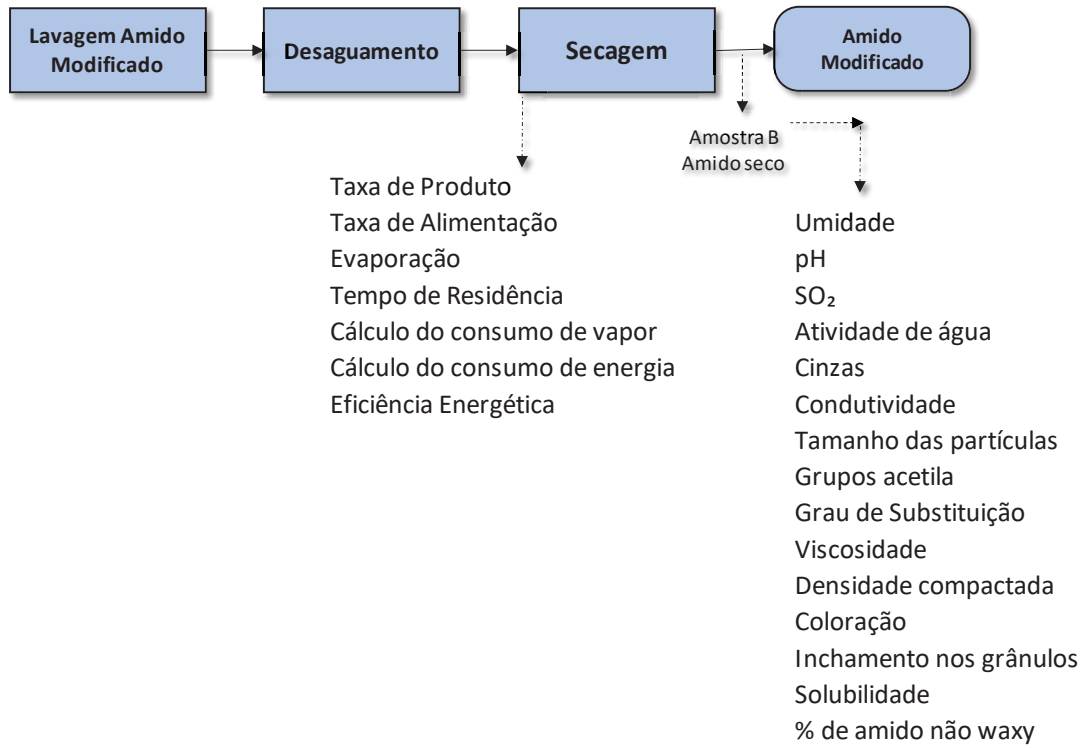
- O método de lavagem dos amidos modificados interfere nas propriedades da torta obtida e na qualidade final do amido após a secagem;
- Há diferenças no consumo de água e nas características dos efluentes gerados nas etapas de lavagem em filtro prensa e hidroclones para se atingir determinadas propriedades na torta de amido;
- O secador *ring dryer* é mais eficaz que o *flash dryer* convencional em relação à qualidade do amido seco;
- O consumo energético do secador *ring dryer* é menor que o do secador *flash dryer*.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

1.3.1 ANÁLISE DA ETAPA DE LAVAGEM DO AMIDO ACETILADO



1.3.2 ANÁLISE DA ETAPA DE SECAGEM DO AMIDO ACETILADO



2 REVISÃO DA LITERATURA

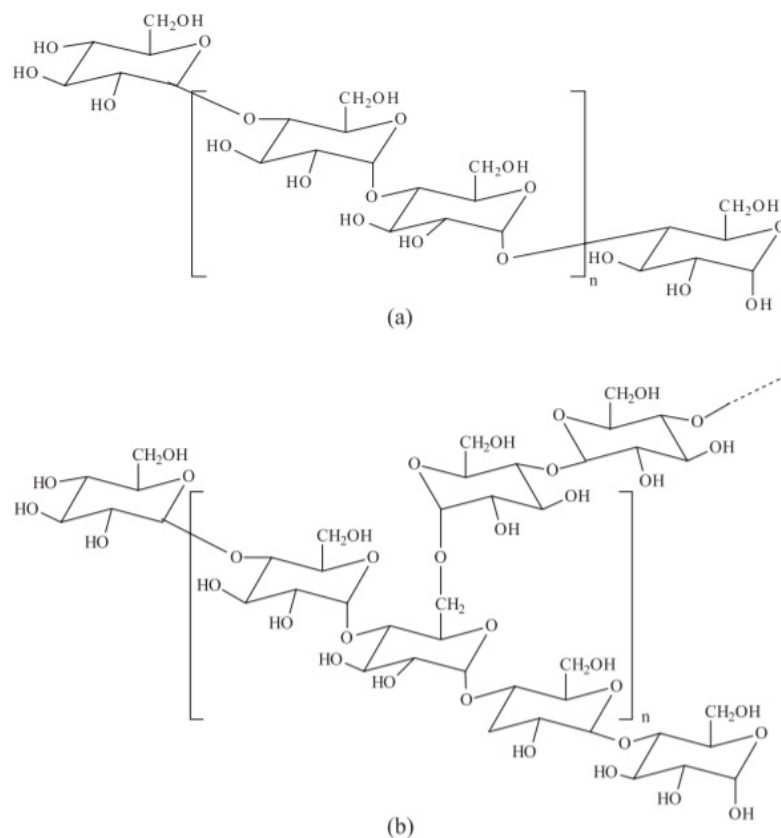
2.1 AMIDO DE MILHO

O mercado global de amido de milho projeta um crescimento de 3,3 % no período 2021-2026, com produção estimada em 96 milhões de toneladas (IMARC. 2021; EMR, 2021). O crescimento é associado ao elevado interesse do uso do amido de milho por diversas indústrias (de alimentos, farmacêuticas, papel e celulose), devido à capacidade do amido em modificar propriedades físico-químicas e térmicas quando incorporado a diferentes produtos (WATERSCHOOT; GOMAND; FIERENS; DELCOUR, 2015).

O amido é o carboidrato encontrado nas sementes, tubérculos ou raízes das plantas. Embora o amido ocorra em todo o mundo vegetal, apenas algumas plantas são utilizadas para produzi-lo comercialmente, e o milho é a principal fonte de amido produzido em todo o mundo (HALLAUER, 2001).

Quimicamente, o amido de milho é composto por duas moléculas estruturalmente distintas, a amilose e a amilopectina. A amilose é uma molécula essencialmente linear composta por unidades de D-glucose ligadas em alfa (1-4) com pequeno número de ramificações. A amilopectina é altamente ramificada e composta por unidades de D-glucose ligadas em alfa (1-4) e com 5 % a 6 % de ligações alfa (1-6) nos pontos de ramificação (FIGURA 1).

FIGURA 1 – ESTRUTURA QUÍMICA DA AMILOSE (A) E AMILOPECTINA (B).



FONTE: CORRADINI et al (2014).

A proporção de amilose e amilopectina no grânulo de amido, assim como a sua organização física são responsáveis pelas propriedades físico-químicas e funcionais do amido e também pela sua susceptibilidade ao ataque enzimático, características particulares à fonte botânica da qual o amido é extraído (SILVA et al., 2008). O amido regular rico em amilose tende a causar gelificação ou junções de cristais de amido. Essas junções geram texturas granuladas muito rígidas. Os alimentos que requerem mais translucidez, como recheios de frutas e geleias, requerem o uso de amidos ricos em amilopectina. Como a amilopectina possui cadeias ramificadas, quando sofre ataque químico ou enzimático, sua cadeia principal permanece intacta, proporcionando géis mais translúcidos. O tamanho molecular da amilose varia drasticamente com base na origem do amido. O milho comum pode ter em média de 700 a 900 unidades de glicose anidra. As diferenças moleculares não só conferem características de estrutura de gel, mas também podem influenciar a solubilidade, afetando assim a textura e o sabor dentro de uma matriz alimentar (SJÖÖ; NILSSON, 2017).

A compreensão da estrutura dos grânulos de amido é importante no entendimento de suas propriedades físico-químicas, as quais determinam o comportamento do amido natural ou modificado, nos mais diversos processos industriais a que eles normalmente são submetidos (BEMILLER; WHISTLER, 2009).

O amido é muito utilizado por apresentar baixo custo nas indústrias de alimentos como ingrediente calórico para melhorar propriedades como umidade, textura, aparência, consistência, viscosidade e estabilidade no armazenamento. É utilizado também para ligar ou desintegrar, expandir ou adensar, clarear ou tornar opaco, produzir textura lisa, coberturas leves ou crocantes e para estabilizar emulsões e formar filmes resistentes a óleo (CEREDA et al., 2000).

O amido de milho pode ser normal, ceroso ou conter um elevado teor de amilose. O amido de milho ceroso é composto por quase que 100 % de amilopectina, enquanto que o amido normal possui 20 % a 30 % de amilose e o de alto teor de amilose contém de 40 % a 70 % de amilose (KONG et al., 2015). Há relatos que o milho ceroso foi encontrado pela primeira vez na China e este milho é uma matéria-prima promissora, pois apresenta muitas características diferenciadas como, por exemplo, maior estabilidade a baixas temperaturas e os géis feitos com esse amido são fracos, altamente viscosos no cozimento, claros e coesivos (WANG et al., 2009). O amido de milho ceroso é indicado também para produtos que requerem armazenamento sob refrigeração (WEBER et al., 2009). Os amidos com elevado teor de amilose gelificam e formam filmes com facilidade devido ao alto conteúdo de amilose. Por isso, esses amidos são usados principalmente em produtos aos quais confere crocância e previne a penetração excessiva de óleo durante a fritura. Também são muito utilizados na indústria de balas de gomas (WEBER et al., 2009).

Os amidos regulares podem ser usados em uma mistura de ingredientes secos para controle de umidade, além de proporcionar espessamento e economia. Porém sua função é limitada devido às restrições das condições de processamento como temperatura (gelatinização entre 62 °C a 80 °C) e pH (não são resistentes a pH inferiores a 4). Nesse cenário, essas limitações podem ser solucionadas com a modificação química, física ou enzimática do amido (VAN de BIJ, 1976 e SJÖÖ; NILSSON, 2017).

2.2 AMIDO MODIFICADO

Conforme mencionado anteriormente, o uso de amido regular em alimentos é limitado por suas propriedades físicas e químicas. Para sanar essas limitações, a aplicação de amidos modificados tem sido implementada nas indústrias de alimentos, pois é possível sua aplicação em uma ampla faixa de pH, temperatura e possui maior resistência ao cisalhamento mecânico. Além disso, sua utilização auxilia na alteração de outras características funcionais, como textura, aparência, consistência, viscosidade, umidade, o que levou ao seu maior uso. Uma outra vantagem da utilização do amido modificado é que o custo para sua obtenção é mínimo (SJÖÖ; NILSSON, 2017).

Na indústria de alimentos, os amidos modificados são utilizados para estabilizar e modificar a viscosidade e a textura de sistemas alimentícios. Eles são usados na preparação de recheios de torta, pão, pudins, alimentos para bebês, sopas e molhos para salada, alimentos extrusados, entre outros. Os amidos modificados não só desempenham um papel importante em termos das propriedades do produto final, diminuindo a retrogradação, mas também são importantes para facilitar o processamento e o armazenamento (STEPHEN et al., 2006).

A maioria dos amidos modificados foi desenvolvida antes de 1980 e sua natureza e níveis de tratamento se mantêm a fim de cumprir os regulamentos estabelecidos pela U.S. Food and Drug Administration (FDA), a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), e outros grupos (STEPHEN et al., 2006). Há diferentes regulamentações de acordo com a fonte do amido, processo de modificação e suas aplicações. É muito importante estar ciente de todas as questões regulamentares, restrições e definições globais antes de utilizar um amido. Atualmente, o amido não é apenas um estabilizador e fonte de carboidratos, mas através da sua modificação se tornou um contribuinte significativo dentro da área de nutrição (SJÖÖ; NILSSON, 2017). A modificação do amido pode ser feita por meio de condições físicas ou químicas. A modificação física é feita utilizando calor e umidade (pré-gelatinização); enquanto os tratamentos químicos envolvem a introdução de grupos funcionais na molécula de amido usando reações de derivatização (eterificação, esterificação e reticulação) ou decomposição (hidrólise e oxidação ácida ou enzimática) (SINGH et al., 2007).

2.2.1 AMIDO DE MILHO MODIFICADO QUIMICAMENTE

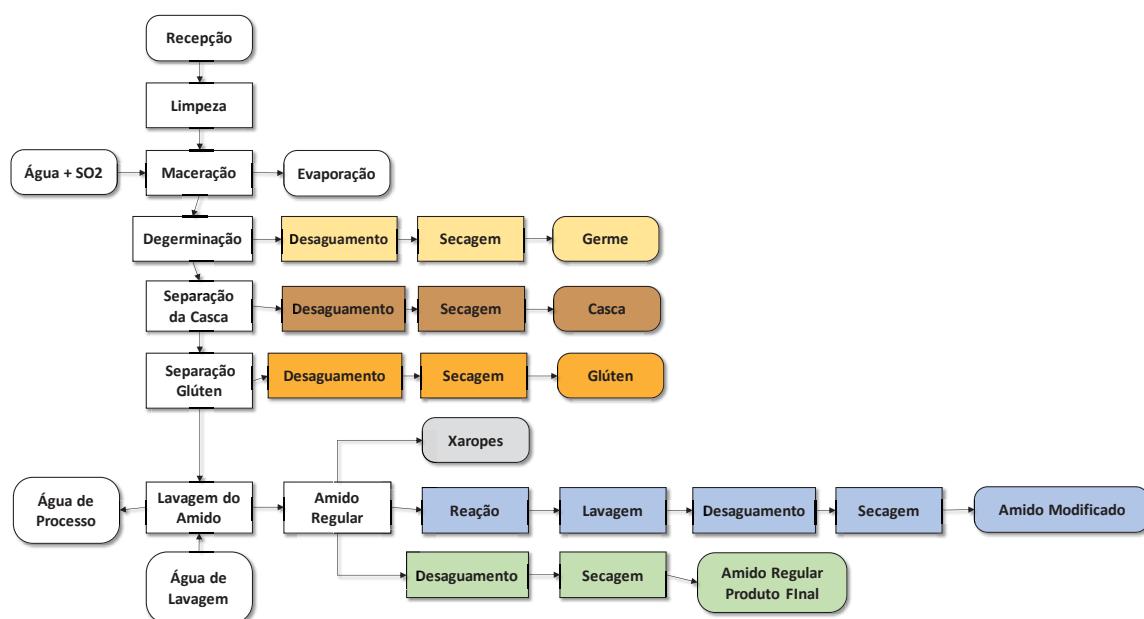
A modificação química do amido é feita com a introdução de grupos funcionais como carboxil, acetil, hidroxipropil, amina, amida, entre outros. Os novos grupos funcionais formam amidos com propriedades específicas que melhoram seu funcionamento e nutrição na indústria de alimentos (Eliasson, 2004).

Na modificação do amido por acetilação, a substituição dos grupos hidroxila por grupos acetila ocorre através de uma reação de substituição nucleofílica, onde as hidroxilas dos carbonos C2, C3 ou C6 (grupo nucleófilo) atacam o grupo eletrófilo (C insaturado de uma das carbonilas do anidrido acético) a partir do mecanismo de adição-eliminação. O grau de acetilação depende de vários fatores, como a fonte de amido, a concentração de reagentes (anidrido acético, catalisador), o tempo de reação e o pH do meio (SINGH et al., 2007). Conforme o grau de substituição, a molécula de amido adquire certa hidrofobicidade ficando mais estável em relação à retrogradação. O amido acetilado apresenta redução na temperatura de gelatinização, aumento na claridade de pasta e na capacidade de absorção de água durante a gelatinização (BELLO-PÉREZ et al., 2010).

2.3 OBTENÇÃO/PROCESSAMENTO DE AMIDO DE MILHO

O processamento do milho por via úmida vem sendo continuamente aperfeiçoado e é utilizado para a separação dos seus componentes, possibilitando a obtenção de produtos com maior valor agregado. São quatro componentes de maior interesse como produto do milho: o amido, o germe, a casca e a proteína. Para separação desses ingredientes há uma cadeia de seis etapas principais: a maceração, separação de germe, separação de casca, separação de glúten-amido, lavagem e secagem do amido (RAUSCH, 2016). Após a lavagem, o amido pode seguir para etapa de desaguamento e posterior secagem, sendo comercializado como amido de milho regular ou ir para etapas de modificação, lavagem e secagem, sendo comercializado como amido modificado ou ir para refinarias para se tornar xarope, (BEMILLER; WHISTLER, 2009) como ilustrado na Figura 2.

FIGURA 2 – FLUXOGRAMA DO PROCESSAMENTO DO MILHO POR VIA ÚMIDA



FONTE: Adaptado de SILVA; SILVA (2019).

2.3.1 LIMPEZA E MACERAÇÃO

O milho gerado no campo é seco, armazenado e enviado às empresas de processamento por caminhões ou trens. Quando esses chegam ao destino, a qualidade da carga é avaliada. Para isso, amostras são coletadas em diferentes pontos do caminhão. Em paralelo, uma avaliação visual da carga é realizada (SENAR, 2017). Através da inspeção inicial busca-se confirmar a ausência de defeitos graves (grãos ardidos ou mofados) e defeitos leves (grãos fermentados, germinados, carunchados, imaturos ou gessados). A presença de qualquer um desses defeitos gera uma deficiência na separação e altera as condições de processo (SENAR, 2017).

O grão descascado é recebido a granel em fábricas de moagem úmida e pode conter grandes e pequenos pedaços de espiga, palha, areia, sementes de ervas daninhas, outros grãos de cereais e outros materiais indesejáveis. A limpeza do milho é um primeiro passo importante no processo de moagem úmida (BEMILLER; WHISTLER, 2009). Essa limpeza é realizada para remoção de materiais (partículas metálicas, pó e outras) e impurezas (pedaços de sabugo e outras) (SILVA; SILVA, 2019).

Após o recebimento, classificação e limpeza, o milho é direcionado à maceração. Nesta etapa, o milho fica submerso em uma solução de água com dióxido de enxofre entre 24 e 48 horas. Após a maceração, a umidade do milho aumenta de 15 % para aproximadamente 45 % e o grânulo dobra de volume, o que facilita a separação física dos componentes. A presença do SO₂ quebra as ligações de proteínas e amido, facilitando a separação desses componentes em etapas futuras. A água rica em proteínas solúveis é destinada a uma etapa de concentração e o milho macerado é enviado para a separação do germe (RAUSCH, 2016).

2.3.2 SEPARAÇÃO DO GERME

O germe é rico em óleo, sendo que aproximadamente de 85 % do óleo presente no milho está no germe. Como o óleo é uma substância mais leve que o restante do milho, o processo mais adequado para separá-lo é por gravidade. Para isso, após a maceração, o milho é direcionado para moinhos, onde é quebrado, tomando o cuidado para que o germe se mantenha inteiro. A mistura é direcionada a uma sequência de ciclones, onde um vórtex é criado e a fase menos densa é direcionada para a parte superior do ciclone. Essa fase é rica no germe, porém pode carregar pequenas frações de proteínas e amido. Assim, é necessário passar por uma peneira para lavar e reter o germe e retirar as impurezas. O germe segue para secagem. A fase mais densa, retirada pela parte inferior da bateria de ciclones, é constituída por milho quebrado, com a presença de casca, amido e glúten. Porém, pequenas porções de germe podem estar presentes. Para a recuperar essas porções, mais uma etapa de moinho e ciclones pode ser empregada (RAUSCH, 2016).

2.3.3 SEPARAÇÃO DA CASCA

A fase mais densa proveniente da separação de germe é composta por amido e proteína e a casca. Embora grande parte do amido e das proteínas já tenham sido solubilizados, uma pequena parte desses ainda está incrustada na casca. Para separar esses componentes da casca, são utilizados moinhos de impacto com alta rotação. Após passar pelos moinhos de impacto, a mistura é dirigida para uma bateria de peneiras curvas com água de lavagem adicionada à corrente. A fase líquida com água, amido e glúten passa pela peneira e a casca fica retida. A casca é direcionada para a secagem, gerando matéria-prima para rações

animais e a suspensão de amido e glúten é direcionada à etapa de separação (RAUSCH, 2016).

2.3.4 SEPARAÇÃO DE GLÚTEN-AMIDO

Nesta etapa também há uma grande diferença de densidade entre as substâncias. O amido é muito mais denso que a proteína (glúten), portanto a separação física é a mais indicada. Para realizar esse procedimento, centrífugas industriais com pratos são empregadas. A mistura entra pelo centro da centrífuga e é dispersa no tambor, repleto de pratos, que ajudam a criar diversos vetores de velocidade na mistura. A fase menos densa (glúten) terá menor velocidade centrífuga e se destina ao centro dos pratos e por consequência ao topo da máquina centrífuga. A fase mais densa (amido) gera maior velocidade centrífuga, se direcionando as extremidades dos pratos e paredes da centrífuga, sendo retirada pela parte inferior da máquina. O glúten é destinado a um sistema de desaguamento e secagem, e também é utilizado como matéria-prima de rações animais. O amido é destinado às etapas de lavagem e secagem (RAUSCH, 2016).

2.3.5 LAVAGEM DE AMIDO

Nesta etapa o amido é colocado em contracorrente com água, com objetivo de retirar o residual de proteína (glúten) presente no meio, com a finalidade de se obter um amido mais puro e melhor para conversão e reação. O processo é realizado em uma bateria de equipamentos centrífugos. Algumas indústrias processadoras de amido utilizam ciclones e outros equipamentos patenteados pela Dorr-Oliver (Fluid Quip), os quais são em formato de “*clamshell*” e tem o nome de hidroclones. Estes possuem uma placa central, repleta de ciclonetes, onde é realizada a mistura e a alimentação do equipamento. Nos ciclonetes ocorre a separação por densidade. Em um dos lados é retirado a água com glúten residual e do outro lado o amido. O amido avança um estágio e a água com proteína segue sentido o primeiro estágio. Assim, o amido entrando no processo recebe a água que passou por todos os estágios e o amido saindo do processo recebe água limpa (RAUSCH, 2016).

Após a lavagem, a torta de amido pode ser processada de diferentes formas:

- (i) ser submetida à secagem e comercializada como amido de milho não modificado;
- (ii) ser modificada por tratamento químico, enzimático ou físico (de forma a preservar

a estrutura granular) e em seguida submetida a outra etapa de lavagem (para remoção dos reagentes residuais) e posterior secagem; (iii) ser gelatinizada e seca e (iv) destinada a outros produtos, como os xaropes (BEMILLER; WHISTLER, 2009).

2.3.6. LAVAGEM DO AMIDO DE MILHO MODIFICADO

As propriedades do amido variam dependendo da fonte de amido e da modificação feita. Isto torna as operações de lavagem dos amidos modificados um desafio, pois as características do tipo de amido interferem na etapa de lavagem e filtração (BEMILLER; WHISTLER, 2009).

O amido de milho regular, após passar pela transformação, a qual pode ser física, química ou enzimática, para se tornar um amido de milho modificado é lavado novamente. Esta etapa de lavagem pode ser realizada através de um processo similar ao mencionado no item 2.3.5, em hidroclones ou em filtro prensa.

No sistema de lavagem com hidroclones, o amido é lavado com um fluxo de água contracorrente e as proteínas solúveis são retiradas juntamente com as proteínas e fibras insolúveis. O produto da estação de lavagem é o amido concentrado. A água residual desse processo pode ser utilizada para lavagem de germe, casca e parte retorna para maceração (UNITED STATES PATENT., 1978).

De acordo com Valadão (2008), o filtro prensa de placas horizontais é uma tecnologia recente de filtração e se caracteriza pela obtenção de torta com menor umidade e menor custo de operação, porém com alto custo de investimento.

Em filtro prensa, tradicionalmente, o amido é lavado em uma centrífuga, utilizando o princípio de lavagem por diluição. A água de lavagem é continuamente trazida sobre a torta, que é diluída até que os resíduos provenientes da modificação do amido sejam retirados. Uma maneira mais eficiente é a lavagem por deslocamento, na qual uma certa quantidade de água de lavagem é trazida para a parte superior da torta em um filtro prensa que possui câmaras de filtro horizontais. A torta é formada pela primeira vez e filtrada a uma pressão constante, e depois comprimida com um diafragma a outra, geralmente mais alta, pressão constante. Após a compressão, o teor de umidade da torta é cerca de 35 % a 45 % (SALMELA; OJA, 1999).

De acordo com Guimarães (2011), a lavagem do amido em filtro prensa (Figura 3) consiste em:

Etapa 1: O amido em suspensão é bombeado para dentro de todas as câmaras simultaneamente e as tortas são formadas, enquanto o filtrado começa a fluir.

Etapa 2: Água ou ar altamente pressurizado preenche os diafragmas em todas as câmaras, comprimindo as tortas.

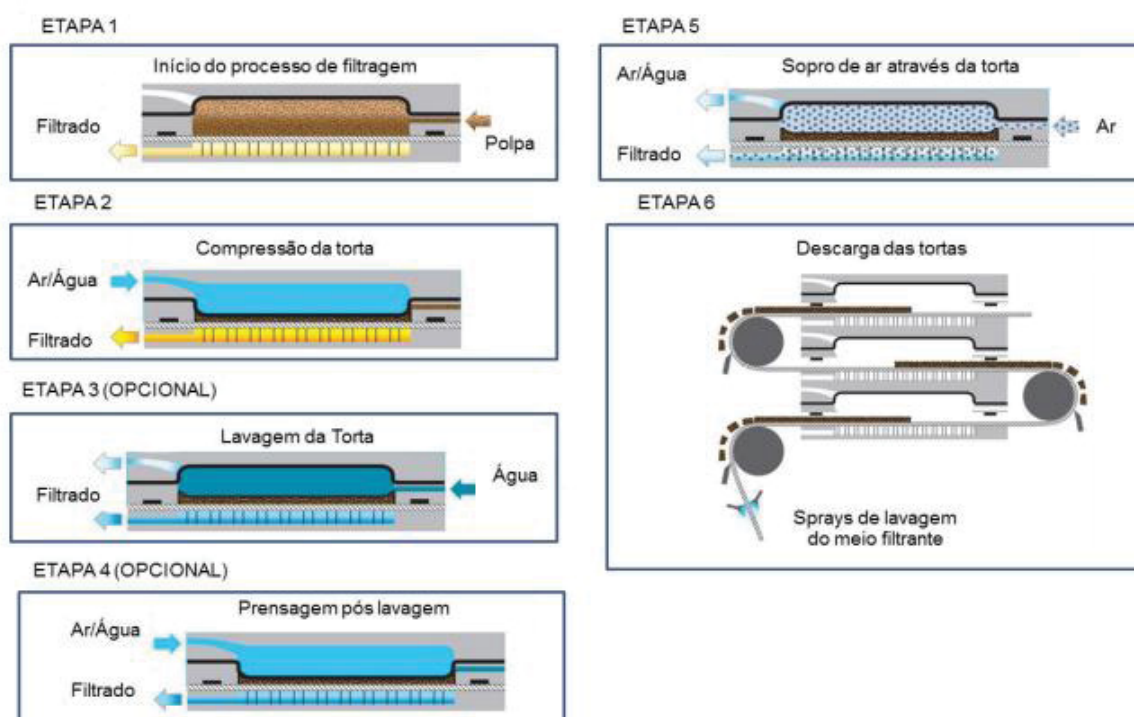
Etapa 3: Água de lavagem é bombeada para o interior de todas as câmaras.

Etapa 4: Após a lavagem da torta, água ou ar altamente pressurizado preenchem novamente todos os diafragmas para máxima recuperação do filtrado.

Etapa 5: Ar comprimido é insuflado através das tortas, reduzindo ainda mais a umidade.

Etapa 6: Todas as placas do filtro abrem-se automaticamente e a esteira filtrante move-se para frente proporcionando descarga total das tortas. O meio filtrante é em seguida lavado. A pressão de operação durante a alimentação da suspensão é 8×10^5 Pa e durante a compressão da torta, $1,6 \times 10^6$ Pa.

FIGURA 3 - CICLO DE UM FILTRO PRENSA



Fonte: Larox (2007)

Salmela e Oja (2006) avaliaram a lavagem da torta de amido modificado de trigo, cevada, batata e milho em um filtro prensa. Os autores observaram que cada

tipo de amido apresenta sua forma de partícula e distribuição de tamanho de partícula. Estas propriedades afetam a porosidade, estrutura, saturação inicial, homogeneidade, a resistência específica da torta de filtro e a compressibilidade do amido. Portanto, os autores indicam que diferentes tipos de amido têm que ser tratados como diferentes materiais. Cada tipo de amido precisa de suas próprias condições de filtração, lavagem e desaguamento. Os amidos de milho e de batata mostraram ser bastante independentes da pressão de filtração na faixa de pressão de 1 bar a 8 bar. O menor valor da resistência de filtração observada para o amido de batata foi explicado pelo maior tamanho de partícula. De forma geral, os resultados obtidos mostraram que a lavagem da torta de amido pode ser efetivamente realizada em um filtro prensa.

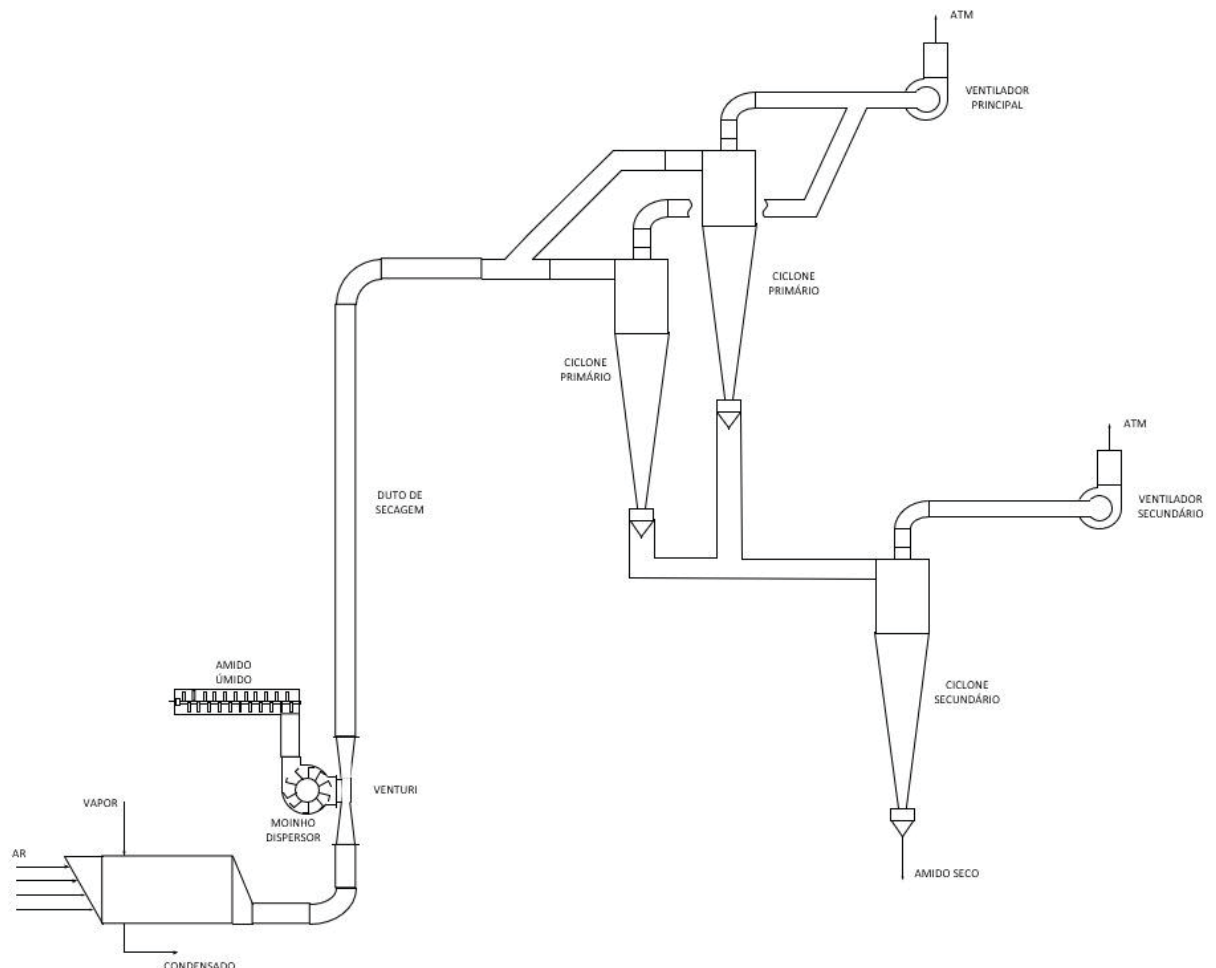
2.3.7 SECAGEM DE AMIDO

A maioria dos amidos são comercializados com teor de umidade entre 10 % e 14%. A secagem *flash*, também conhecida como secagem pneumática, é a mais utilizada universalmente para a secagem de amidos, glúten e ração de glúten (BEMILLER; WHISTLER, 2009). Os secadores pneumáticos são compostos basicamente por: (i) um tubo longo, no qual um ventilador impulsiona o ar que circula em alta velocidade; (ii) um aquecedor para o ar; (iii) um alimentador para dispersão do sólido na corrente de ar e (iv) ciclones para a separação ar-sólido seco (FARIA, 1986).

Os secadores pneumáticos apresentam versatilidade na secagem, principalmente por realizar a remoção da umidade superficial de forma rápida e eficiente. Deste modo, esses secadores têm sido usados em escala crescente em muitos processos industriais. Nos secadores de grande porte, para facilitar o modo de alimentação do produto, a maioria dos secadores *flash* (Figura 4) tem o emprego de dois ventiladores para manter a pressão ligeiramente abaixo da pressão atmosférica no ponto de alimentação dos sólidos úmidos. São utilizados fechos rotativos de ar ou transportadores do tipo parafuso na alimentação e na descarga de sólidos para evitar o vazamento excessivo de ar para o sistema. Para garantir o aumento do tempo médio de permanência das partículas no secador, a maioria dos secadores comerciais apresentam dispositivos adequados para mistura e classificação granulométrica, utilizando dutos com diversas configurações ou câmara de expansão. (CAVICHIOLO, 2010). De acordo com Chapuis et al. (2016), a

gelatinização potencial do amido é uma grande limitação para preservar a qualidade do produto durante a secagem, e diz respeito à mudança de fase que pode ocorrer quando a temperatura ultrapassa 60°C e o teor de umidade ultrapassa o valor de $0,35 \text{ kg kg}^{-1}$. Para garantir a homogeneidade da qualidade do produto, e apesar das variações nos parâmetros de entrada como vazão de ar e umidade inicial do amido, o processo requer controle contínuo. Chapuis et al. (2016) relataram também que uma série de fatores afeta o desempenho de um secador *flash*, desde o projeto da tubulação de secagem (dimensões) até as condições operacionais utilizadas, incluindo a temperatura do ar, velocidade e taxa de alimentação.

FIGURA 4 – MODELO DE SECADOR *FLASH DRYER*



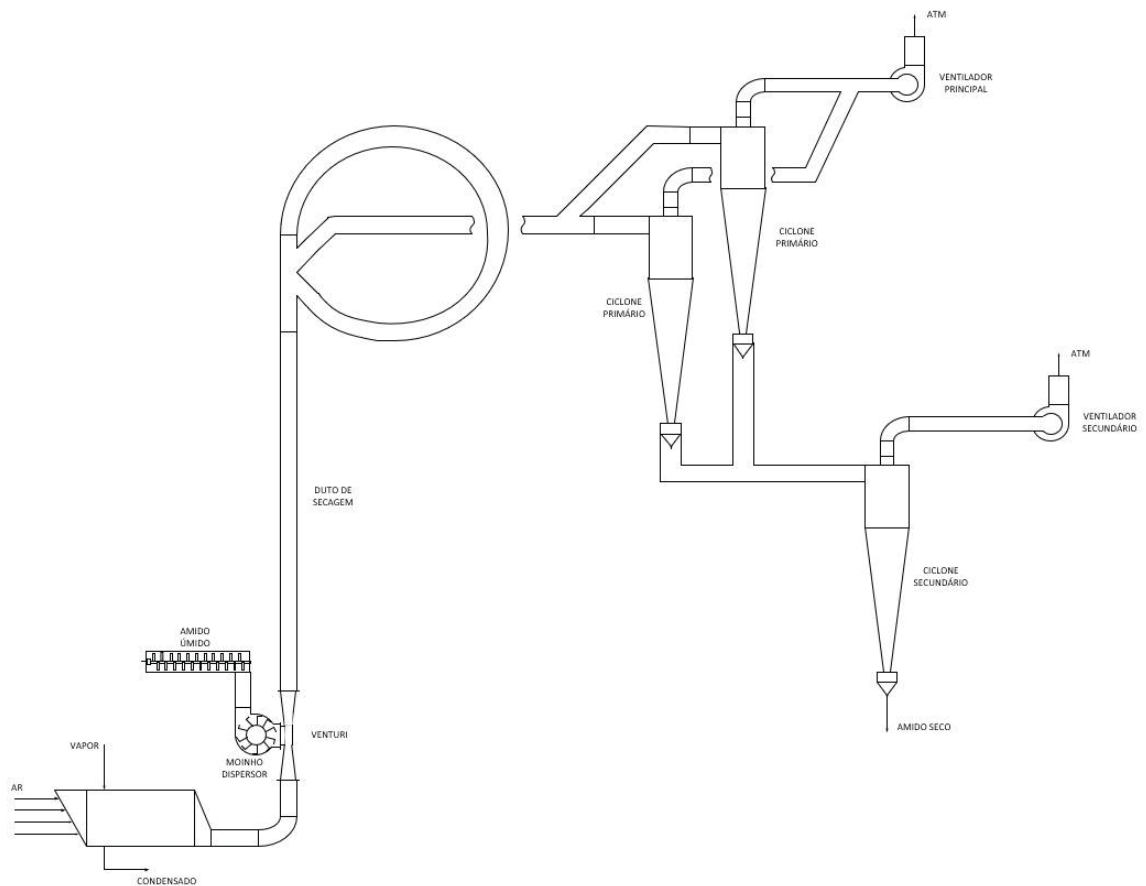
FONTE: Autor (2021).

O secador *ring* é um segundo modelo de secador de *flash*. Neste tipo de secador, o produto pode ser introduzido de forma semelhante à utilizada no secador

flash padrão. No entanto, o produto é trazido para um anel de tubo onde o ar a alta velocidade e a força centrífuga mantêm as partículas maiores no anel, enquanto partículas menores saem do secador. A porta de entrada e saída são tangenciais ao anel e dois ventiladores são utilizados; um como um exaustor para fornecer o ar motor e o segundo para fornecer a recirculação em circuito fechado e introduzir o produto no anel (VOGEL; TODARU, 2014).

O secador *ring* funciona como um secador com *flash* (pneumático), em que as partículas úmidas são secas dispersando-as uniformemente em um fluxo ascendente de ar quente. Porém, o secador *ring* permite a reciclagem de partículas mais grosseiras, parcialmente secas, prolongando o seu tempo de permanência dentro do duto de secagem, ao mesmo tempo que libera imediatamente as partículas finas e secas do sistema. Os principais componentes desse secador são: rosca transportadora, moinho dispersor, venturi, sistema de duto de ar em forma de anel e ciclones (Figura 5). O sistema de duto de ar começa com uma entrada de ar fresco que é aquecido pelo radiador, o qual possui um filtro de ar para reter as impurezas. Ao final do duto de secagem está instalado o *ring*, o produto após passar pelo *ring* é direcionado para o ciclone. Este separa o ar das partículas secas. Em funcionamento, o ventilador principal succiona ar fresco para o sistema de duto de ar, movimentando o amido dentro do duto de secagem. Ventiladores secundários podem ser aplicados para auxiliar no transporte pneumático (SVONJA; CRANKSHAW, 1996).

O secador *ring* providencia o controle do tempo de permanência e do tamanho das partículas, resultando em uma secagem eficiente e homogênea (VOGEL; TODARU, 2014).

FIGURA 5 - MODELO SECADOR *RING DRYER*

FONTE: Autor (2021).

De acordo com Strumillo et al. (2006) um secador eficiente é um secador que maximiza o uso do calor sensível presente no ar de secagem para evaporar a água do produto. Idealmente, o ar de saída deve ser saturado com umidade e sua temperatura deve ser a mais baixa possível. No caso da secagem isentálpica (remoção da água livre a uma temperatura constante), a temperatura mínima do ar de saída corresponde à temperatura de saturação adiabática. De acordo com Kudra (2012) um indicador comum usado para caracterizar o desempenho de um secador é seu consumo específico de energia, definido como a energia necessária para evaporar 1 kg de água do produto.

Chapuis et al. (2016) propuseram um modelo matemático para descrever e simular a secagem de amido em secador *flash* utilizando dados de três secadores da Tailândia e dois secadores do Paraguai. O modelo proposto foi aplicado com sucesso a um secador de amido de mandioca para calcular os perfis de velocidade, teor de umidade e temperatura das partículas e do ar de secagem. Os resultados

mostraram que existe uma relação entre o comprimento dos secadores e o consumo de energia. O tempo de residência é o fator mais influente no consumo energético do secador, por isso deve ser maximizado no processo. A temperatura do ar deve ser ajustada ao máximo permitido em função das restrições de qualidade do produto, uma vez que melhora a eficiência energética do secador. Os autores citam que a secagem é a operação mais exigente em termos de energia dentro do processo de fabricação de amido, e seu controle é crucial para garantir que o produto produzido seja de alta qualidade.

Pakowski e Mujumdar (1995) citam que o desempenho dos secadores pode ser analisado pela sua eficiência energética, eficiência térmica, consumo específico de energia térmica e consumo energético específico. Bittencourt (2001) utilizou esses índices em seu estudo sobre secagem de banana em um secador do tipo cabine com bandejas. Com relação à secagem, foi observado que o equipamento apresenta algumas deficiências quanto à uniformidade na câmara de secagem, tanto na distribuição de temperatura como na distribuição da corrente de ar. No entanto, proporciona a obtenção de um produto de qualidade, atingindo padrões requeridos para a comercialização no mercado europeu. O secador apresentou uma eficiência energética de 29,13 %, o ciclo total de secagem foi de 51,3 horas, sendo 38,3 horas de secagem e 13 horas de repouso, e um consumo específico de calor de 7.988,70 kJ kg⁻¹ de água evaporada.

Cavichiolo (2010) avaliou o desempenho de um secador pneumático na produção do farelo de polpa cítrica para fabricação de ração animal e comparou com a secagem em secadores rotativos. Os resultados indicaram menor consumo de energia no secador tipo *flash* quando comparado ao secador rotativo. Além disso, o consumo específico de energia do secador *Flash* reduziu em 25 % (de 2471,40 kJ kg⁻¹ para 1854,22 kJ kg⁻¹ de água evaporada) ao aumentar-se a quantidade de produto a ser desidratado de 2 kg para 5 kg. Isso devido ao maior aproveitamento da energia térmica fornecida pelo sistema de aquecimento do ar. As variáveis temperatura e velocidade do ar e vazão do produto apresentaram influência significativa na energia consumida durante a secagem no secador *flash*.

Silveira et al. (2004) utilizaram o método de Valero para o cálculo do consumo de energia e perdas de calor em todas as fases do processo de secagem de fécula de mandioca em um secador *flash*. Os autores concluíram que o método permite uma visão global dos fluxos de ar, calor e fécula de mandioca, o que possibilitou

uma análise termo econômica que permitiu uma gestão dos investimentos no projeto com o objetivo de diminuir custos de produção. O isolamento térmico no tubo de secagem reduziu significativamente as perdas de calor. O custo de produção de ar quente usando lenha foi menor em comparação com o uso de óleo diesel e energia elétrica.

Embora os secadores *flash* e *ring* sejam os mais indicados para secagem de amido, não foram encontrados na literatura estudos que avaliem o efeito dessas técnicas sobre as propriedades do amido, bem como estudos que comparem o consumo energético de ambas as tecnologias. Assim, este trabalho propõe-se a verificar a influência do tipo de secador nas propriedades reológicas e físico-química do amido acetilado e também comparar o gasto energético entre as duas tecnologias de secagem.

2.3.8 EFLUENTE NA INDÚSTRIA DE PROCESSAMENTO DE MILHO

De acordo com Jackson & Shandera (1995), o gerenciamento do efluente gerado na indústria de processamento de milho é um desafio contínuo, pois são produzidas grandes quantidades de efluente. Por exemplo, a produção de uma tonelada de amido de milho requer um grande volume de água (principalmente nas etapas maceração, moagem e lavagem), gerando em torno de 5 m³ a 11 m³ de efluente. (SHUBHANEEL et al., 2018). Os efluentes da indústria de processamento de milho são conhecidos por seu elevado potencial de poluição devido ao alto teor de proteína e amido. Eles geralmente apresentam: elevada carga orgânica, sendo a DQO (demanda química de oxigênio) de característica solúvel e biodegradável de média de 6700 mg L⁻¹ e sólidos com média de 4793 mg L⁻¹; elevada turbidez (podendo chegar a valores próximos de 1000 NTU) e concentração média de nitrogênio e fósforo variando de 84 a 174 mg L⁻¹ e de 33 a 125 mg L⁻¹, respectivamente (ROSS, 1989; ERSAHIN et al., 2006). A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) é normalmente representada com valores médios de 4000 a 9000 mg L⁻¹ (DUBEY, 2006).

Diante do exposto, propõe-se no presente estudo comparar as características dos efluentes gerados durante a lavagem do amido acetilado em hidroclones e filtro prensa.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram divididos entre a avaliação da etapa de lavagem do amido acetilado em hidroclones e filtro prensa, incluindo a análise do efluente gerado em ambos os sistemas, e a avaliação da etapa de secagem do amido em secador *flash dryer* tradicional e *ring dryer*. Todos os experimentos e análises foram realizados na planta de processamento de amido da empresa Ingredion, localizada em Balsa Nova-PR.

3.1 PROCESSAMENTO DO AMIDO ACETILADO

A conversão química do amido regular por acetilação foi realizada em um tanque de reação com volume de 50 m³.

As etapas de conversão foram realizadas na seguinte sequência:

- 1 – Foi realizado o branqueamento com clorito de sódio e aquecimento até 50 °C.
- 2 - Ao final do branqueamento (quando o amido atingiu uma tonalidade branco neve), ajustou-se a concentração de SO₂ e o pH com soda cáustica (para 5,0 a 6,0).
- 3 - Em seguida, foi dosado trimetafosfato de sódio e a reação foi homogeneizada por 45 minutos (nesta etapa o trimetafosfato reage com o amido, fazendo com que esse crie resistência para a etapa de acetilação (o trimetafosfato cria uma camada em volta do amido para proteger sua cadeia principal).
- 4 - Após a reação, a mistura foi resfriada em um trocador de calor e o pH corrigido para 8,0 – 8,5 (pH ótimo para reação com acetila) com a adição de hidróxido de sódio.
- 5 - Iniciou-se a dosagem de anidrido acético, e para manter o pH da reação na faixa de 8,0 – 8,5, adicionou-se hidróxido de sódio.
- 6 - Após a adição dos reagentes, a mistura foi mantida em homogeneização por 60 minutos para completar a reação de acetilação. Em seguida, o pH foi corrigido para 5,0 – 6,0 com a adição de ácido clorídrico, finalizando a reação.

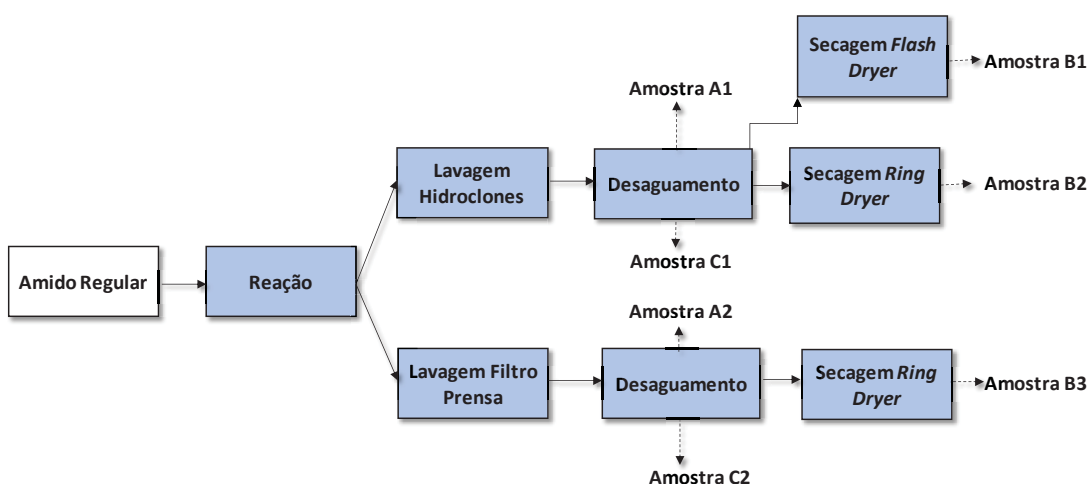
Em seguida, essa mistura foi direcionada aos sistemas de lavagem em estudo. A lavagem por hidroclones foi realizada de forma contínua com água em fluxo contracorrente. Por outro lado, a lavagem por filtro prensa foi realizada em batelada. Para tal, a água foi misturada com o amido em suspensão e a solução foi comprimida ao passar pelo filtro e pela torta que se formou entre as placas do filtro.

Após a lavagem, o amido passou pelo desaguamento e foi enviado para a etapa de secagem em *ring dryer* ou *flash dryer*.

3.2 COLETA DAS AMOSTRAS

Com o objetivo de avaliar a influência do método de lavagem (em hidroclones e filtro prensa) e da tecnologia de secagem (secador *flash* tradicional e *ring dryer*) nas propriedades reológicas e físico-químicas do amido modificado por acetilação, amostras foram coletadas diretamente da planta de processamento, conforme indicado no diagrama de blocos apresentado na Figura 6. Após as etapas de lavagem e desaguamento foram coletadas amostras da torta de amido acetilado lavado em hidroclones (Amostra A1) e lavado em filtro prensa (Amostra A2). Também foram coletadas amostras do efluente gerado em ambos os métodos de lavagem (Amostra C1 nos hidroclones e Amostra C2 no filtro prensa). Após a etapa de secagem, foram coletadas amostras submetidas à lavagem em hidroclones e secagem em *flash dryer* (Amostras B1) e *ring dryer* (Amostra B2) e, por último, amostras submetidas à lavagem em filtro prensa e secagem em *ring dryer* (Amostras B3).

FIGURA 6 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSAMENTO DE AMIDO MODIFICADO POR ACETILAÇÃO



FONTE: Autora (2021).

3.3 AVALIAÇÃO DA ETAPA DE LAVAGEM DO AMIDO ACETILADO

3.3.1 INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE LAVAGEM NAS CARACTERÍSTICAS DO AMIDO ACETILADO

Para avaliar a influência do método de lavagem em hidroclones e filtro prensa nas características/propriedades (reológicas e físico-químicas) de amido acetilado, cinco (5) amostras foram coletadas (em duplicata) após as etapas de lavagem e desaguamento, com diferença de uma hora entre as coletas (totalizando dez amostras para cada condição avaliada). As amostras intituladas A1 foram lavadas em hidroclones e as amostras intituladas A2 foram lavadas no filtro prensa.

A lavagem do amido modificado acetilado em filtro prensa ocorreu em batelada. Par tal, o amido acetilado foi direcionado para o equipamento e a água de lavagem conduzida sobre a torta. Desta forma, os resíduos provenientes da modificação do amido foram removidos. A etapa de desaguamento ocorreu no próprio filtro prensa que comprimiu a solução resultando na separação da torta de amido e o efluente. A lavagem em hidroclones ocorreu de forma contínua com fluxo contracorrente entre a torta de amido modificado e a água de lavagem. Após essa etapa, a torta foi enviada para etapa de desaguamento em uma centrífuga com rotação máxima de 850 rpm.

As amostras A1 e A2 foram submetidas às seguintes análises: umidade, atividade de água, pH, condutividade elétrica, cinzas, grau de substituição e percentual de grupos acetila, conforme metodologias descritas no item 3.5.

Para avaliar a influência do método de lavagem no amido modificado seco, após a etapa de desaguamento o amido acetilado foi submetido à secagem contínua em *ring dryer* (Capacidade Nominal de 120 toneladas por dia (TPD)) com ar quente a temperatura de 170°C, umidade relativa inicial de 75 %, velocidade de aproximadamente 31 m s⁻¹. Ao final da etapa de secagem, foram coletadas cinco (5) amostras (em duplicata) com diferença de uma hora entre as coletas para cada condição avaliada (lavagem em hidroclones ou filtro prensa), conforme apresentado na Figura 6. As amostras B2 (lavadas em hidroclones) e B3 (lavadas em filtro prensa) foram submetidas às seguintes análises: umidade, atividade de água, pH, condutividade elétrica, cinzas, percentual de grupos acetila, grau de substituição, dióxido de enxofre (SO₂), tamanho das partículas, viscosidade, densidade

compactada, porcentagem de amido não waxy, coloração, inchamento e solubilidade dos grânulos, conforme metodologias descritas no item 3.5.

3.3.2 INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE LAVAGEM NA QUANTIDADE E CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE GERADO

Para cada método de lavagem avaliado (hidroclones e filtro prensa), foram medidas a quantidade de água utilizada no processo (de forma a manter o teor de cinzas do amido menor que 0,3 %) e as características do efluente gerado, o qual é posteriormente enviado para estação de tratamento de efluentes. Para tal, foram coletadas três (3) amostras do efluente gerado na etapa de desagumamento com intervalo de 8 horas entre as coletas. Conforme apresentado na Figura 6, as amostras C1 correspondem ao efluente gerado nos hidroclones e as amostras C2 ao efluente gerado no filtro prensa.

Os efluentes foram analisados quanto ao pH, condutividade elétrica, sólidos totais e solúveis e DQO total e solúvel, conforme metodologias descritas no item 3.5.

3.3.3 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE EFLUENTE GERADO

Para comparação da quantidade de efluente gerado nos dois métodos de lavagem avaliados, usou-se como base de cálculo uma entrada de 1000 kg de amido acetilado (base seca). A quantidade de água necessária para lavagem do amido modificado em hidroclones e filtro prensa foi definida em testes preliminares de forma a manter o teor de cinzas no amido de no máximo 0,3 %. A concentração da suspensão de amido alimentada em ambos os sistemas de lavagem foi determinada em graus Baumé (°B), utilizando um densímetro de vidro.

3.3.3.1 BALANÇO DE MASSA NOS HIDROCLONES

Durante o processo, a vazão volumétrica da suspensão de amido de milho e a vazão de água foram acompanhadas pela tela de operação do processo e obtidas em $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$. Através da leitura do °B da suspensão de amido (a qual foi 17 °B) foi possível determinar a vazão mássica e a fração de sólidos e água na corrente de entrada, conforme relação apresentada na Tabela 1 (International Starch Institute, 2021). A umidade da torta obtida após o processo de lavagem em hidroclones foi determinada através da metodologia apresentada no item 3.5. A corrente de entrada de água é pura e a fração de sólidos totais do efluente foi determinada de acordo

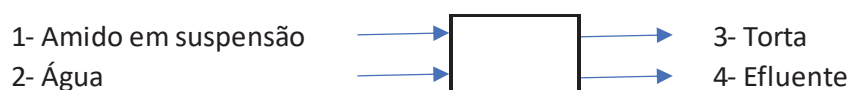
com a metodologia também apresentada no item 3.5. Com esses dados, foi realizado o balanço de massa no sistema de hidroclones (Figura 7) e, assim, obteve-se a massa de efluente gerado para a lavagem de 1000 kg de amido de acetilado (base seca).

TABELA 1 - MASSA ESPECÍFICA E MASSA SECA DO AMIDO EM SUSPENSÃO COM 17 °B

Massa específica (kg m⁻³)	Massa seca (%)
1,133	30,21

Fonte: International Starch Institute (2021)

FIGURA 7 - DIAGRAMA PARA BALANÇO DE MASSA NO SISTEMA DE LAVAGEM DE AMIDO MODIFICADO



FONTE: Autora (2021).

3.3.3.2 BALANÇO DE MASSA NO FILTRO PRENSA

Para realização do balanço de massa no filtro prensa (Figura 7), o próprio equipamento fornece na tela de operação a quantidade de amido em base seca (por um medidor mássico que mede a densidade e a vazão mássica) e a quantidade de água (por um medidor de vazão eletromagnético). Assim, para a determinação da massa de efluente gerada foi realizado o balanço de massa considerando como base de cálculo 1000 kg de amido acetilado (em base seca) e as mesmas condições mencionadas no item 3.3.3.1.

Através dos balanços de massa foi possível obter o volume total de efluente gerado durante a etapa de lavagem de 1000 kg de amido (base seca) para as duas tecnologias de lavagem avaliadas.

3.4 AVALIAÇÃO DA ETAPA DE SECAGEM DO AMIDO ACETILADO

3.4.1 INFLUÊNCIA DO TIPO DE SECADOR NAS PROPRIEDADES DO AMIDO MODIFICADO

Com o objetivo de avaliar a influência do tipo de secador (*ring dryer* e *flash dryer*) nas características reológicas e físico-químicas do amido de milho acetilado,

cinco amostras foram coletadas após a etapa de secagem (em duplicata), com diferença de uma hora entre uma coleta e outra (totalizando dez amostras para cada condição avaliada). Essas amostras foram intituladas de Amostras B, conforme nomenclatura apresentada na Tabela 2.

TABELA 2 - NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS B DE ACORDO COM A TECNOLOGIA DE LAVAGEM E SECAGEM

AMOSTRA	LAVAGEM	SECAGEM
B1	Hidroclones	<i>flash dryer</i>
B2	Hidroclones	<i>ring dryer</i>
B3	filtro prensa	<i>ring dryer</i>

As amostras B1 e B2 foram comparadas para verificar a influência do secador no produto final e as amostras B2 e B3 para analisar a interferência da tecnologia de lavagem no produto final.

A secagem do amido modificado ocorreu em regime permanente e foi realizada em dois tipos de secadores: (i) *flash dryer* e (ii) *ring dryer* com temperatura do ar do secador em 170 °C, velocidade entre 21,7 m s⁻¹ – 31,0 m s⁻¹ e umidade relativa do ar de entrada de 75 %. Após a secagem, foram coletadas as “Amostras B”, as quais foram submetidas às seguintes análises: umidade, atividade de água, pH, condutividade elétrica, cinzas, percentual de grupos acetila, grau de substituição, dióxido de enxofre (SO₂), tamanho das partículas, viscosidade, densidade compactada, percentual de amido não waxy, coloração e inchamento e solubilidade dos grânulos (conforme metodologias descritas no item 3.5).

A escolha da temperatura de entrada do ar de secagem foi baseada no estudo de CHAPUIS et al. (2016). Os autores mostraram que a utilização de uma temperatura do ar inferior a 140°C aumenta consideravelmente o tempo de secagem, o que significa que para atingir a eficiência energética será necessário um tempo de contato maior do produto no duto dos secadores, exigindo tubulações mais longas.

3.4.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E TÉRMICA NOS SECADORES *FLASH* E *RING*

Com o intuito de avaliar o consumo energético específico (CE_{total}) (representado por unidade de energia consumida para evaporar 1 kg de água) e a

eficiência energética dos secadores *flash* e *ring*, foram determinados: a taxa de alimentação (F); a taxa de evaporação; o tempo de residência do produto no secador; o consumo específico de vapor (CET) e o consumo específico de energia elétrica (CEE).

A taxa de produto (P) foi estimada a partir da capacidade nominal do secador fornecida pelo fabricante (130 toneladas por dia no *flash dryer* e 120 toneladas por dia no *ring dryer*). A partir da taxa de produto, calculou-se a taxa de alimentação (F) utilizando a Equação 1.

$$F = \frac{P \cdot x_p}{x_F} \quad (1)$$

em que x_P e x_F são a fração de sólidos no produto e na alimentação, respectivamente.

A taxa de evaporação foi determinada pela diferença entre a taxa de produto e a taxa de alimentação. A relação ar:produto foi determinada pela razão entre a vazão de ar e a capacidade nominal do secador, ambos especificados pelo fabricante dos secadores. A área da seção transversal do duto dos secadores foi determinada a partir do diâmetro do duto de secagem e também foi medido seu comprimento com uma trena. A velocidade do produto no secador foi estimada a partir da razão entre a vazão volumétrica de ar e a área do duto. Por fim, o tempo de residência do produto no secador foi determinado pela razão entre o comprimento do duto do secador e velocidade do produto.

Para o cálculo do consumo específico de energia elétrica (CEE) foram consideradas as potências dos motores dos ventiladores, os quais são os equipamentos responsáveis pelo maior consumo de energia elétrica no sistema. O secador *flash* possui um ventilador com potência de 350 hp e o *ring* dois ventiladores, sendo um de 350 hp e o outro de 125 hp. O CEE foi calculado conforme a Equação 2.

$$CEE = \frac{EE_f}{m_a} \quad (2)$$

em que EE_f é a energia elétrica fornecida em 1 hora de operação e m_a é a massa de água evaporada nesse período.

O consumo específico de energia térmica (CET) foi calculado de acordo com a Equação 3. Para tal, foi acompanhado o consumo diário de vapor (utilizado para o aquecimento do ar de secagem) de cada secador no período de janeiro de 2020 a junho de 2021.

$$CET = \frac{ET_f}{m_a} \quad (3)$$

em que ET_f é a energia térmica fornecida pelo vapor durante 1 hora de operação (calculada a partir do produto entre a massa de vapor utilizada e a entalpia de condensação do vapor - obtida pelo *software* Companion chemicalogic Steam tab utilizando como referência o vapor produzido na caldeira com pressão de 325 Psi e temperatura de 220 °C - 1858,5 kJ kg⁻¹).

O consumo energético total específico (CE_{total}) foi calculado pelo somatório do consumo específico de energia elétrica (CEE) e do consumo específico de energia térmica (CET). A energia total fornecida (E_{total}) durante 1 hora de operação foi determinada pelo somatório da energia elétrica fornecida (EE_f) e da energia térmica fornecida na condensação do vapor (ET_f).

A eficiência energética (η_e) dos secadores foi determinada de acordo com a Equação 4.

$$\eta_e = \frac{E_{min}}{E_{total}} \quad (4)$$

em que E_{min} é energia mínima para evaporação considerando 1 hora de operação, calculada através da Equação 5.

$$E_{min} = m_F * (U_i - U_f) * \Delta \hat{H} \quad (5)$$

em que m_F é a massa de amido alimentada no secador usando como base 1 hora de operação, U_i é a umidade inicial do amido, U_f é umidade final e $\Delta \hat{H}$ é a entalpia específica de vaporização da água a 60 °C (2358,81 kJ kg⁻¹).

3.5 METODOLOGIA DAS ANÁLISES

A seguir são apresentadas as metodologias das análises realizadas na torta de amido acetilado após a lavagem/desaguamento, no efluente gerado na etapa de

lavagem e no amido acetilado seco. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

3.5.1 UMIDADE

Para a determinação da umidade foi utilizada a metodologia n° 920.151^a da AOAC (2012). Para tal, 5 gramas de amido foram pesados e submetidos à secagem em estufa a vácuo por 4 horas e repesados.

3.5.2 ATIVIDADE DE ÁGUA

A atividade de água (a_w) das amostras foi determinada através da medida do ponto de orvalho a 25 °C, utilizando um higrômetro digital (Aqualab, modelo series 3 TE, EUA).

3.5.3 pH

A medição de pH foi realizada através de um pHmetro (Mettler Toledo, Seven Easy, EUA), equipado com eletrodos InLab Expert Go. O eletrodo foi lavado cuidadosamente com água destilada entre uma amostra e outra.

FIGURA 8- MEDIÇÃO DO pH



FONTE: Autora (2021).

3.5.4 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Para realizar a análise de condutividade elétrica das amostras de amido, foi preparada uma solução de amido com 30 % de sólidos utilizando água destilada. Para a análise das amostras de efluente não foi necessária nenhuma diluição. A condutividade foi medida através de um condutivímetro (Gehaka, CG 2000, Alemanha) e expressa em $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$.

3.5.5 DIÓXIDO DE ENXOFRE (SO₂)

A análise de dióxido de enxofre foi baseada na metodologia de Coker (1986), a amostra foi misturada com álcool etílico 5 % até que se obteve uma suspensão, a qual foi filtrada em filtro a vácuo. Em seguida, foi retirado uma alíquota de 100 mL do filtrado que foi titulado com iodo 0,010 mol L⁻¹ até a primeira cor azul permanente. Assim, calculou-se o Título (T), o qual provém do volume do título da amostra subtraído do branco (título para água destilada). Por fim, a concentração de SO₂ foi determinada em ppm conforme Equação 6.

$$SO_2 = \frac{(T * 0,01 * 0,032 * 1.000.000 * 200)}{m * 100} \quad (6)$$

em que T é o título em ml e m massa de amostra em g.

3.5.6 CINZAS

Para determinação de cinzas, 10 gramas de amostra foram alocadas em cadinhos de porcelana, previamente pesados, e colocadas em forno mufla (previamente aquecido) a 550 °C por 6 horas. Depois de esfriar em dessecador, o conjunto cadinho+amostra foi pesado e calculada a porcentagem de cinzas em relação a massa inicial da amostra.

3.5.7 PERCENTUAL DE GRUPOS ACETILA E GRAU DE SUBSTITUIÇÃO

O percentual de grupos acetila (% Ac) foi determinado por titulometria, de acordo com o método proposto por Würzburg (1986) com algumas modificações. Aproximadamente 5 g de cada amostra foi adicionado a frascos de vidro com tampa e acrescido de 50 mL água destilada. Foram adicionados às amostras 25 ml de hidróxido de sódio 0,45 mol L⁻¹ e a mistura foi mantida sob agitação por 30 minutos a 25°C. Decorrido esse tempo, o excesso de alcalinidade foi titulado com HCl 0,2 N, utilizando fenolftaleína como indicador. O percentual de grupos acetila (% Ac) foi calculado de acordo com a Equação 7.

$$\%Ac = \frac{(TB - TA) * 0,2 * 0,045 * 100}{m * x_s} \quad (7)$$

onde TB é o título do branco em ml; TA é o título da amostra em ml; m é a massa da amostra em g e x_s é o teor de sólidos da amostra.

O grau de substituição (GS) foi calculado de acordo com a Equação 8.

$$GS = \frac{\%Ac * 3,77}{100 - \%Ac} \quad (8)$$

em que o grau de substituição é definido como a razão entre grupos de substituição (moles substituintes) e unidades de glicose anidra.

3.5.8 VISCOSIDADE

As mudanças na viscosidade das amostras de amido foram determinadas durante um programa de aquecimento com taxa de cisalhamento constante utilizando o viscoamilógrafo Brabender (Brabender, modelo PT-100, Alemanha). Para tal, foram pesados 30 gramas de amido (base seca) e misturados com 450 ml de água destilada. O aquecimento dessa suspensão foi realizado de uma temperatura inicial de 25 °C até 95 °C (permanecendo por 30 minutos a essa temperatura) e posterior resfriamento até 50 °C, ambos a uma taxa de 1,5 °C min⁻¹. A partir do viscoamilograma gerado pelo equipamento determinou-se a viscosidade referente ao início de gelatinização e viscosidade máxima (95 °C) de cada amostra (expressa BU), com base na metodologia proposta por Mazurs et al. (1959).

3.5.9 TAMANHO DAS PARTÍCULAS

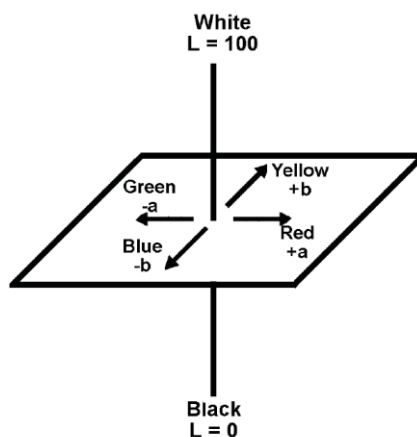
Para análise do tamanho das partículas, amostras de 50 gramas foram peneiradas em uma peneira específica de 150 mesh (abertura de 0,106 mm), baseado na série de peneiras padrão americano. Os resultados foram expressos como a porcentagem do material retido na peneira em relação a massa total de amostra.

3.5.10 COLORAÇÃO

A avaliação da cor das amostras foi feita pela leitura direta de refletância das coordenadas “L”, “a” e “b” (Figura 9), utilizando um colorímetro (HunterLab, ColorFlex Hunter EZ, EUA) (Figura 10). A luminosidade ou brilho (L) é o atributo de cores em uma superfície plana que varia desde o preto (0) ao branco (100), a

saturação é também chamada de Chroma (a e b), possuindo intensidades variadas do verde (-a) ao vermelho (+a) e do azul (-b) ao amarelo (+b).

FIGURA 9 - ILUSTRAÇÃO DAS COORDENADAS DO COLORÍMETRO HUNTER EZ



FONTE: Manual do equipamento (2021).

FIGURA 10 - MEDIÇÃO DA COR NO EQUIPAMENTO COLORFLEX EZ



FONTE: Autora (2021).

A variação da cor (ΔE) das amostras em relação à amostra padrão do laboratório de qualidade da empresa Ingredion foi calculada conforme Equação (9).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (9)$$

3.5.11 PORCENTAGEM DE AMIDO NÃO WAXY

Como o amido de milho modificado acetilado deste estudo é derivado de 65 % a 75 % de milho regular e 35 % a 25 % de milho ceroso (waxy), este teste é

realizado para verificar a porcentagem correspondente desses nas amostras. Para tal, pesou-se 3 gramas de amido, adicionou-se água destilada e agitou. Posteriormente, foi adicionado iodo e agitou-se a mistura com um bastão de vidro polido. Uma gota dessa amostra foi colocada na lâmina e observada em microscópio (Leica, DM 2000, Alemanha) com lente de aumento de até 200 vezes para contar separadamente os grânulos azuis (não waxy) e vermelhos (milho waxy). A porcentagem de amido não waxy foi determinada multiplicando o número de grânulos azuis por 100 e dividindo o resultado pelo número de grânulos totais.

3.5.12 DENSIDADE COMPACTADA

A densidade compacta das amostras foi obtida vertendo-se aproximadamente 30 g de amido em uma proveta graduada, a qual foi colocada em um agitador por 5 minutos até a observação de uma altura de leite constante. A partir da massa da amostra adicionada à proveta e do volume ocupado, a densidade compactada do leite de partículas foi determinada e expressa em kg m^{-3} .

3.5.13 TESTE DE INCHAMENTO E SOLUBILIDADE

O poder de inchamento e a solubilidade dos grânulos de amidos foram determinados de acordo com metodologia proposta por Schoch (1964) com algumas modificações. Para tal, suspensões de amidos foram preparadas (com 5 % de amido e 95 % de água destilada – m m^{-1}), alocadas em tubos de centrífuga e submetidas à gelatinização em banho de água a 90 °C com agitação constante por 30 minutos. Depois de resfriados até 25°C, os tubos foram centrifugados a 3000 rpm por 15 minutos. Uma alíquota do sobrenadante foi recolhida e pesada em placas de vidro (de massa conhecida), e seca em estufa a 105 °C até massa constante. A solubilidade foi determinada pela porcentagem da massa de sólidos presentes no sobrenadante (obtida após secagem) em relação a massa inicial de amostra (base seca). O poder de inchamento foi determinado pela razão entre a massa do amido sedimentado e a massa inicial de amido (base seca).

3.5.14 SÓLIDOS TOTAIS E SÓLIDOS SOLÚVEIS

Para a determinação do teor de sólidos totais e solúveis dos efluentes gerados na etapa de lavagem, a metodologia usada foi baseada na norma ABNT/NBR 10664 (1989). Aproximadamente 50 mL de amostra foram transferidas

para uma cápsula previamente tarada e submetida à evaporação em banho-maria e posteriormente seca em estufa a vácuo a 100 °C por uma hora. Após, a amostra foi resfriada em dessecador e a massa final mensurada em balança analítica (Shimadzu, AY220, Japão). A concentração de sólidos totais foi calculada pela razão entre a massa do resíduo e o volume da amostra e expressa em mg L^{-1} .

Para o cálculo dos sólidos solúveis, a massa do resíduo solúvel (obtida por filtração e secagem) foi dividida pelo volume inicial da amostra. Para obter-se o filtrado, a amostra foi filtrada em papel de filtro Whatman n° 2V e a massa mensurada.

3.5.15 DQO TOTAL E DQO SOLÚVEL

Para determinação de DQO total e DQO solúvel, 0.2 mL da amostra foi pipetada no kit ácido para determinação de DQO na faixa de 2 a 40 mg L^{-1} e foi agitado por 30 minutos a 160 °C em bloco de aquecimento (Macherey Nagel, Nanocolor Vario Mini, Alemanha). Depois de resfriada, a leitura do DQO total e solúvel foi realizada em espectrofotômetro (Macherey Nagel, Nanocolor VIS II, Alemanha). Na leitura, os tubos de ensaios possuíam códigos de barra que eram lidos pelo fotômetro, o qual automaticamente selecionou o comprimento de onda para a leitura da concentração de O^{2-} . Os resultados foram expressos como mg L^{-1} .

3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) no software Statistica 8.0, e as diferenças das médias comparadas através do teste de Tukey a um nível de 5 % de significância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE LAVAGEM NAS PROPRIEDADES DO AMIDO DE MILHO MODIFICADO POR ACETILAÇÃO

Os resultados das análises realizadas nas tortas de amido modificado acetilado obtidas após a etapa de lavagem/desaguamento em hidroclones (A1) e em filtro prensa (A2) são apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 – PROPRIEDADES DAS TORTAS DE AMIDO ACETILADO OBTIDAS APÓS AS ETAPAS DE LAVAGEM/DESAGUAMENTO EM HIDROCLONES (AMOSTRA A1) E FILTRO PRENSA (AMOSTRA A2).

ANÁLISES	AMOSTRA A1	AMOSTRA A2
Umidade (%)	39,4±0,3 ^a	37,8±0,1 ^a
Cinzas (%)	0,11±0,02 ^a	0,06±0,03 ^b
Percentual de grupos acetila (%)	1,15±0,07 ^a	1,05±0,03 ^b
GS	0,043±0,000 ^a	0,040±0,000 ^a
pH	5,3±0,1 ^a	5,5±0,2 ^a
Condutividade elétrica (μS cm ⁻¹)	506±28 ^a	538±141 ^a
aw	0,998±0,000 ^a	0,997±0,001 ^a

Letras iguais na mesma linha não diferem estatisticamente de acordo com teste de Tukey a 5 % de significância.

GS: grau de substituição

Observa-se que as propriedades das tortas do amido de milho acetilado obtidas após as etapas de lavagem em hidroclones e filtro prensa são estatisticamente iguais. Embora a análise de cinzas e percentual de grupos acetila tenha apresentado diferença estatística a 5 % de significância ($p > 0,05$), os resultados estão de acordo com as especificações de aceitação do produto (de 1,0 % a 1,3 % para percentual de grupos acetilas e teor de cinzas menor que 0,3 %). De modo geral, pode-se dizer que o método de lavagem não interferiu na qualidade da torta, e ambos os métodos avaliados atenderam as especificações do produto.

A lavagem do amido modificado é uma etapa importante dentro do processo, pois remove os excessos de sais resultante da reação da modificação do amido. Nessa reação, conhecida por reação de salificação, ou de neutralização, além do sal forma-se também água. Em solução aquosa, os sais sempre formam pelo menos um cátion diferente do H^+ ou um ânion diferente do OH^- . Os sais também interferem no ponto de gel do amido, na proteção ao inchamento do grânulo, no cozimento durante

a aplicação, então, o objetivo é retirar parte deste sal para que não tenha tanta interferência na maioria das aplicações, pois, o amido tem papel importante na textura, estabilidade, cremosidade entre outras.

Os resultados da influência da tecnologia de lavagem nas propriedades dos amidos acetilados submetidos à secagem em *ring dryer* (Amostras B2 e B3) são apresentados na Tabela 4. As amostras B2 foram lavadas em hidroc clones e as amostras B3 foram lavadas em filtro prensa, sendo ambas secas em *ring dryer*.

TABELA 4 - PROPRIEDADES DOS AMIDOS ACETILADOS LAVADOS EM HIDROCLONES (AMOSTRA B2) E FILTRO PRENSA (AMOSTRA B3) E SECADOS EM RING DRYER.

ANÁLISES	AMOSTRA B2	AMOSTRA B3
Umidade (%)	11,8±0,6 ^b	12,4±0,2 ^a
Cinzas (%)	0,14±0,02 ^a	0,20±0,09 ^a
Grupo acetila (%)	1,12±0,08 ^a	1,13±0,07 ^a
GS	0,043±0,000 ^a	0,043±0,000 ^a
pH	5,2±0,1 ^b	5,8±0,1 ^a
Condutividade (μS cm ⁻¹)	593±10 ^b	638±19 ^a
a _w	0,444±0,030 ^a	0,378±0,030 ^b
Cor (L)	96,5±0,2 ^b	96,8±0,1 ^a
Cor (a)	-0,46±0,01 ^a	-0,44±0,00 ^a
Cor (b)	5,2±0,1 ^b	5,8±0,1 ^a
SO ₂	0	0
Densidade (kg m ⁻³)	580±1 ^b	618±1 ^a
Amido não waxy (%)	70,00±0,04 ^a	68,00±0,02 ^a
Tamanho das partículas (%)	0,13±0,02 ^b	0,29±0,02 ^a
Viscosidade máxima (BU)	425±33 ^a	483±86 ^a
Início gelatinização (BU)	15±2 ^a	16,4±1,0 ^a
Solubilidade (%)	31,9±3,3 ^a	30,5±4,3 ^a
Poder de inchamento (g g ⁻¹)	0,74±0,00 ^a	0,75±0,00 ^a

Letras iguais na mesma linha não diferem estatisticamente de acordo com teste de Tukey a 5% de significância.

GS: Grau de substituição

Observa-se na Tabela 4 que os resultados das análises de umidade, pH, condutividade elétrica, a_w, cor, densidade e tamanho das partículas do amido de

milho acetilado seco lavados em hidroclones e filtro prensa (Amostras B2 e B3) apresentaram diferença estatística a 5 % de significância ($p \leq 0,05$).

A umidade das amostras B2 e B3 variaram de 11,8 % a 12,4 %. Embora a análise de umidade tenha apresentado diferença estatística a 5 % de significância ($p \leq 0,05$), os valores encontrados estão de acordo com o aceitável para a comercialização do amido para ambas as amostras, o qual é de 10 % a 14 % de acordo com Bemiller & Whistler (2009).

O teor de cinzas é um dos parâmetros mais importantes a ser avaliado após a etapa de lavagem do amido modificado, pois após esta etapa deve ficar retido ao amido a menor quantidade de resíduos inorgânicos. Os resultados não apontaram diferenças significativas ($p > 0,05$) no teor de cinzas para ambas as amostras de amido acetilado. Além disso, os valores foram menores que o padrão estabelecido para esse produto – o qual é de 0,3 % de cinzas, mostrando a eficiência de ambas as tecnologias de lavagem avaliadas neste estudo. Souza e Andrade (2000) encontraram em seu estudo teores de cinzas de 0,14 % em amido de milho comercial, valor idêntico a amostra B2.

A condutividade elétrica é determinada pela presença de substâncias dissolvidas que se dissociam em ânions e cátions e corresponde ao seu grau de mineralização. Para o amido de milho acetilado seco, a condutividade variou de 593 $\mu\text{S cm}^{-1}$ a 678 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Para este produto atender ao padrão do teste de cinzas, o máximo aceitável para condutividade é de 840 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

Nos resultados das análises de grupo acetila, observa-se que o percentual de grupos acetila nas amostras B2 e B3 são próximas: 1,12 para amostra B2 e 1,13 para amostra B3. Lawal (2004) acetilando amido de milho híbrido, com 10 % e 15 % de anidrido acético, obteve 1,05 % de grupos acetil, valor próximo do obtido neste estudo. As mudanças nas propriedades físico-químicas e funcionais de amidos acetilados em comparação com amidos regulares é proporcional ao grau de acetilação (PHILLIPS, et al., 1999). A legislação brasileira permite o uso de anidrido acético e produto final com o máximo de 2,5 % de grupos acetil (BRASIL, 1977).

O grau de substituição (GS) foi de 0,043 para ambas as amostras, o que as caracterizam como baixo GS. Mark & Meltretter (1972) apresentam em seu estudo que os amidos acetilados, de acordo com o GS, são classificados como de baixo GS ($< 0,1$), médio GS (0,1-1,0) e de alto GS. O grau de acetilação depende de vários fatores, como da fonte de amido, da concentração de reagentes (anidrido acético,

catalisador), do tempo de reação e do pH do meio (SINGH et al., 2007). De acordo com Biswas et al. (2008), os amidos acetilados com baixo GS são empregados na indústria de alimentos como promotores de consistência, textura e estabilidade. Além disso, acetatos de amido com baixo e alto GS têm sido sugeridos como materiais biodegradáveis na elaboração de embalagens e em diversas aplicações farmacêuticas (BISWAS et al., 2008; CHI et al., 2008)

O pH do amido modificado seco variou de 5,2 a 5,8 para os processos avaliados. Houve diferença estatística a 5 % de significância ($p \leq 0,05$), porém, para o produto do estudo, a margem de aceitação do pH é de 5,0 a 6,0. Assim, ambos os amidos acetilados atendem os requisitos do produto. Shirai et al. (2007) obtiveram médias de pH de 5,1 para amido de milho regular e 7,0 para amido modificado com peróxido de hidrogênio. Por outro lado, os teores de acidez foram maiores para os amidos modificados, o que pode estar associado ao maior conteúdo de carboxilas. Takizawa et al. (2004) estudaram amido de milho oxidado com permanganato de potássio e ácido láctico e encontraram valores de pH de 4,9 para o amido regular e 5,7 no amido modificado e concluíram que o pH de tuberosos modificados é inferior quando se comparado ao regular (o pH da cenoura diminuiu de 5,3 para 4,5 e o pH da mandioca diminuiu de 5,9 para 4,7). No caso de cereais, como o milho, o pH aumentou depois da modificação. Pode-se concluir que o pH de um amido de milho regular é próximo de 5, e o pH do amido modificado aumenta ou diminui de acordo com a fonte e a modificação feita no amido.

A cor possui fator impactante na qualidade e apreciação pelo consumidor que muitas das vezes preferem produtos com a presença de cores do amarelo ao branco. Quanto mais próximo de 100 o fator L^* , mais branco é o amido modificado. Observa-se que o fator L^* das amostras de amido acetilado variou de 96,50 a 96,8. Embora o amido de milho modificado lavado em filtro prensa (amostra B3) tenha apresentado valores mais próximos do 100, essa variação de cor não foi perceptível a olho nu ($\Delta E < 2$). A variação de cor (ΔE) da amostra B2 foi de 1,63 e da amostra B3 foi de 1,98.

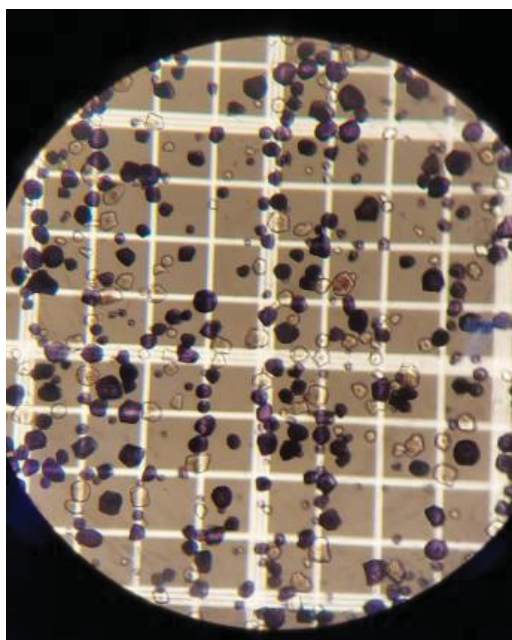
Neste estudo, todas as amostras obtiveram 0 ppm para o teste de SO_2 . A ingestão de aditivos com sulfitos tem sido associada a reações adversas em algumas pessoas, tais como broncoespasmos em indivíduos asmáticos sensíveis. Sérios distúrbios neurológicos (LOCK; JAGER, 1995) também foram diagnosticados em uma pequena parcela da população com reduzida atividade da enzima sulfito

oxidase, responsável pela conversão de sulfito a sulfato, este último, inócuo e rapidamente excretado pelo organismo (WONG, 1989)

Como os resultados das análises foram 0 ppm, todas as amostras são consideradas seguras para serem utilizadas em alimentos.

Para análise de porcentagem de amido não waxy, a recomendação para composição do amido de milho acetilado em estudo é de 25 % a 35 % de milho ceroso e 65 % a 75 % de milho regular. As amostras B2 e B3 ficaram dentro do recomendado para o produto.

FIGURA 11 - LÂMINA DO MICROSCOPIO ILUSTRANDO A QUANTIDADE DE AMIDO WAXY (VERMELHOS) E NÃO WAXY (AZUIS).



FONTE: Autora (2021)

Os valores das porcentagens das amostras B2 e B3 retidas na peneira de 150 mesh (abertura de 0,106 mm) apresentaram diferença estatística a 5 % de significância ($p < 0,05$), sendo de 0,13 % de partículas com diâmetro maior que 0,106 mm para as amostras lavadas em hidroclones (B2) e 0,29 % de partículas com diâmetro maior que 0,106 mm para as amostras lavadas em filtro prensa (B3). No entanto, ambas as amostras estão de acordo com o padrão de aceitação para o produto, o qual é de até 0,5 % de partículas retidas.

Os viscoamilogramas obtidos pelo viscoamilógrafo Brabender refletem as características do amido durante a formação do gel, bem como a resistência do gel às forças mecânicas no aquecimento e a tendência à retrogradação, mediante

análise do comportamento no resfriamento. As curvas de viscosidade representam uma importante ferramenta para as observações do comportamento do gel com as condições de processamento da indústria, tais como aquecimento, agitação e resfriamento (Marcon et al., 2007). No presente estudo, observa-se na Tabela 4 que os valores de viscosidade máxima (obtida a 95 °C) das amostras B2 e B3 foram similares ($p > 0,05$), sendo de 425 BU e 483 BU, respectivamente. Observa-se também que os valores de viscosidade correspondente ao início da gelatinização (a 70 °C) foram bem próximos, mostrando que as duas pastas tiveram comportamentos similares. Assim, pode-se considerar que o tipo de lavagem não interferiu na curva da viscosidade do produto final.

A solubilidade das amostras B2 e B3 apresentaram valores bem próximos, os quais foram de 31,9 % para amostra B2 e 30,5 % para amostra B3. O poder de inchamento também apresentou valores similares, 0,74 g g⁻¹ e 0,75 g g⁻¹ para as amostras B2 e B3 respectivamente, mostrando que a etapa de lavagem não influenciou significativamente nesses parâmetros.

Embora algumas análises apresentaram diferença estatística a 5 % de significância ($p \leq 0,05$), os resultados atendem a ficha de especificação do produto para ambos sistemas de lavagem avaliados. Desta forma, em escala industrial, a tecnologia de lavagem de amido modificado em hidroclones ou filtro prensa não alterou a qualidade desejada do produto final.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE GERADO NAS ETAPAS DE LAVAGEM EM HIDROCLONES E FILTRO PRENSA DO AMIDO DE MILHO ACETILADO

Os resultados das análises dos efluentes gerados durante a etapa de lavagem do amido de milho acetilado em hidroclones (C1) e filtro prensa (C2) são apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 - PROPRIEDADES DOS EFLUENTES GERADOS NA ETAPA DE LAVAGEM DO AMIDO ACETILADO EM HIDROCLONES (AMOSTRA C1) E FILTRO PRENSA (AMOSTRA C2).

AMOSTRA	C1	C2
Ph	4,8±0,2 ^a	4,8±0,3 ^a
Condutividade elétrica (µS cm⁻¹)	9,4±1,9 ^a	10,3±2,3 ^a
DQO total (mg L⁻¹)	7400±1600 ^b	10867±680 ^a
DQO solúvel (mg L⁻¹)	6567±1527 ^b	9733±838 ^a
Sólidos totais (mg L⁻¹)	8699±451 ^b	18591±1242 ^a
Sólidos solúveis (mg L⁻¹)	7566±1040 ^b	17591±1434 ^a

Letras iguais na mesma linha não diferem estatisticamente de acordo com teste de Tukey a 5 % de significância.

O pH e a condutividade elétrica dos efluentes gerados no processo de lavagem com hidroclones e filtro prensa foram similares.

Segundo Guo et al. (2015), o efluente do processamento de milho e da fabricação de amido é um dos mais poluentes da indústria de alimentos. Geralmente, o efluente enviado à estação de tratamento apresenta o pH ácido de 3,0 a 5,5, sendo observado neste estudo pH igual a 4,8. Ovez et al. (2001) avaliaram o efluente da moagem úmida de milho e observaram um pH de 5,2, sendo próximo ao valor encontrado neste estudo.

Para a avaliação de um efluente, a condutividade, por sua facilidade, confiabilidade de medição e por ser indicador de alterações na qualidade no efluente é parâmetro que vem sendo muito utilizado por diversas indústrias. (DAN et al., 2003). Este parâmetro afeta a eficiência da corrente elétrica, a tensão da célula e o consumo de energia elétrica, isso ocorre porque quando a condutividade é alta ela reduz a resistência a passagem de corrente entre ânodo e cátodo (DANESHVAR et al., 2007). A condutividade de um efluente ou de uma solução aquosa está relacionada com a presença de íons, sendo que com o aumento da concentração destes íons, a condutividade também irá aumentar (MOREIRA et al., 2015). É possível aumentar a condutividade de uma solução ou de um efluente pela adição de diferentes tipos de eletrólitos, como NaCl, BaCl₂, KCl, Na₂SO₄ e KI. Geralmente, é aplicado o NaCl para gerar um aumento na condutividade (SAHU et al., 2014).

Para as análises de DQO solúvel e total e sólidos solúveis e totais nota-se um valor mais elevado para as amostras C2. Isso ocorre porque a quantidade de água utilizada para lavagem de amido acetilado nos hidroclones é maior que a quantidade

de água necessária para lavagem de amido acetilado em filtro prensa, assim, consequentemente, o volume de efluente gerado também é maior. Abdel-Fatah et al. (2015) apontaram em sua pesquisa valores médios para caracterização de efluente de uma indústria de processamento de milho e os resultados apresentados pelos autores foram de 8000 mg L^{-1} de DQO total, temperatura de aproximadamente 35°C e pH de 5 a 8. Ewida (2020), ao caracterizar o efluente de uma indústria de processamento de milho do Egito, encontrou valores para pH de 7,3 e DQO total variou de 11.200 a 12.100 mg L^{-1} .

Cremones et al. (2013) apresentaram como resultados para efluente de processamento do milho pH de 5,4, DQO igual a 4767 mg L^{-1} e sólidos solúveis de $3,1 \text{ mg L}^{-1}$, sendo estes últimos (DQO total e sólidos solúveis) inferiores aos encontrados neste estudo.

A quantidade de água utilizada para lavagem de 1000 kg de amido acetilado (base seca) no filtro prensa foi de 798,7 litros. Esta quantidade foi definida com base nas indicações do fornecedor do filtro prensa e foi adequada para o amido modificado por acetilação atingir um teor de cinzas de no máximo de 0,3 %. Por outro lado, a quantidade de água necessária para lavar a mesma quantidade de amido acetilado em hidroclones foi de 2703,6 litros. Esta quantidade também foi definida em testes preliminares visando a obtenção de uma torta com no máximo 0,3 % de cinzas. Dessa forma, os processos foram ajustados para consumir o mínimo de água necessário para atingir o teor de cinzas adequado ($< 0,3 \%$). Assim, para determinação da carga do efluente gerado nos hidroclones e filtro prensa, levando em consideração a lavagem de 1000 kg de amido na base seca e a quantidade de água utilizada, foi realizado o balanço de massa para obter-se a massa do efluente gerado. Esses resultados estão apresentados nas Tabelas 6 e 7 e Figuras 12 e 13.

Durante a etapa de lavagem, uma fração de amido pode ser lixiviada. No entanto, por se tratar de uma escala industrial, essa fração é insignificante em relação a quantidade total da corrente de amido em suspensão que entra no sistema. Desta forma, foi considerado em ambos os balanços que a torta sai com 1000 kg (base seca). Além disso, considerou-se a densidade do efluente igual da água a 25°C (1000 kg m^{-3}). Com essas considerações, foi possível obter o volume de efluente, o qual foi de 2500,41 litros para o filtro prensa e 4396,94 litros para hidroclones.

TABELA 6 - BALANÇO DE MASSA NO FILTRO PRENSA PARA OBTER O VOLUME TOTAL DE EFLUENTES PARA LAVAGEM DE 1000 kg DE AMIDO ACETILADO

	SUSPENSÃO	ÁGUA	TORTA	EFLUENTE
Sólidos (kg)	1000	-	1000	46,49
Água (kg)	2310,2	798,74	608,49	2453,92
Total efluente (kg)				2500,41

TABELA 7 - BALANÇO DE MASSA NOS HIDROCLONES PARA OBTER O VOLUME TOTAL DE EFLUENTES PARA LAVAGEM DE 1000 kg DE AMIDO ACETILADO

	SUSPENSÃO	ÁGUA	TORTA	EFLUENTE
Sólidos (kg)	1000	-	1000	38,25
Água (kg)	2310,2	2703,60	616,81	4358,69
Total efluente (kg)				4396,94

FIGURA 12 - VOLUME DE ÁGUA E EFLUENTE GERADOS NA LAVAGEM DE AMIDO ACETILADO EM HIDROCLONES (C1) E FILTRO PRENSA (C2)

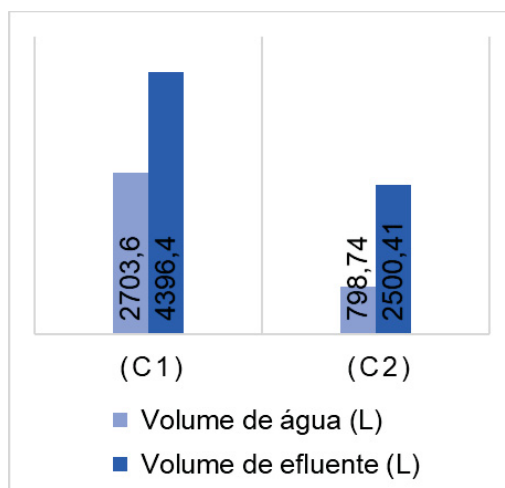
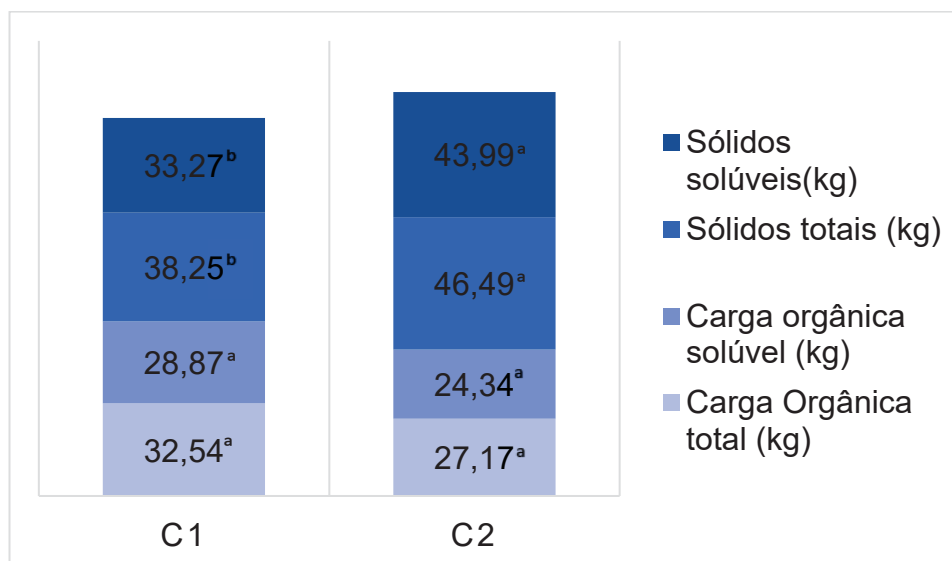


FIGURA 13 - PROPRIEDADES DOS EFLUENTES OBTIDOS APÓS A ETAPA DE LAVAGEM EM HIDROCLONES (AMOSTRA C1) E FILTRO PRENSA (AMOSTRA C2).



Letras iguais na mesma linha não diferem estatisticamente de acordo com teste de Tukey a 5 % de significância.

Resultados obtidos para lavagem de 1000 kg de amido em base seca.

Os resultados são para 4396,4 litros de efluente para hidroclones e 2500,41 litros para filtro prensa.

Observa-se que o efluente gerado nos hidroclones (Amostra C1) apresentou uma carga orgânica solúvel e total maior que o efluente gerado pelo filtro prensa (Amostra C2), embora a amostra C2 tenha uma maior quantidade de sólidos totais e solúveis. Gauto et al. (2011) mencionaram em seu estudo que um efluente com alto valor de carga orgânica possui uma maior quantidade de substâncias contendo carbono, hidrogênio, nitrogênio, entre outras. Isso lhe confere maior capacidade de poluição. De acordo com Libânio et al. (2005), um efluente com alta carga de matéria orgânica ao ser lançado no corpo hídrico pode causar eutrofização ao favorecer a proliferação de microrganismos aeróbios, o que por consequência pode levar ao grande consumo do oxigênio dissolvido na água, reduzindo assim, a concentração de oxigênio.

Assim, conclui-se que a amostra C1 é mais poluente que a amostra C2. Além disso, cabe destacar que para se atingir um teor de cinzas na torta inferior a 0,3 % foi necessário um consumo de água nos hidroclones 238,5 % maior em comparação ao consumo no filtro prensa, projetando um volume de efluente 75 % maior na estação de tratamento. Por isso, para o produto analisado, comparando os efluentes, pode-se considerar que o filtro prensa é mais vantajoso para a lavagem do amido deste estudo.

4.3 RESULTADOS DA INFLUÊNCIA DO SECADOR NAS PROPRIEDADES DO AMIDO MODIFICADO POR ACEILAÇÃO

Os resultados da influência da tecnologia de secagem nas propriedades do amido de milho acetilado seco são apresentados na Tabela 8. As amostras intituladas B1 foram lavadas em hidroclores e secas em secador *flash dryer* e as amostras B2 foram lavadas em hidroclores e secas em *ring dryer*.

TABELA 8 - PROPRIEDADES DOS AMIDOS ACETILADOS OBTIDOS APÓS A ETAPA DE SECAGEM EM *FLASH DRYER* (AMOSTRA B1) E *RING DRYER* (AMOSTRA B2).

ANÁLISES	AMOSTRA B1	AMOSTRA B2
Umidade (%)	12,0±0,3 ^a	11,8±0,6 ^a
Cinzas (%)	0,08±0,00 ^a	0,09±0,00 ^a
Grupo acetila (%)	1,18±0,07 ^a	1,12±0,08 ^a
GS	0,045±0,000 ^a	0,043±0,000 ^a
pH	5,3±0,1 ^a	5,2±0,1 ^b
Condutividade (μs cm ⁻¹)	622±9 ^a	593±10 ^b
a _w	0,451±0,030 ^a	0,444±0,030 ^a
Cor (L)	96,9±0,1 ^a	96,5±0,2 ^a
Cor (a)	-0,490±0,010 ^a	-0,460±0,010 ^b
Cor (b)	5,2±0,3 ^a	5,2±0,1 ^a
SO ₂	0	0
Densidade (kg m ⁻³)	582±1 ^a	580±1 ^a
Amido não waxy (%)	69±0 ^a	70±0 ^a
Tamanho das partículas (%)	0,30±0,03 ^a	0,13±0,02 ^b
Viscosidade (BU)	446±52 ^a	425±33 ^a
Início gelatinização (BU)	15±1 ^a	15,6±2 ^a
Solubilidade (%)	21,9±1,3 ^b	31,9±3,3 ^a
Poder de inchamento (g g ⁻¹)	0,76±0,00 ^a	0,74±0,00 ^a

Letras iguais na mesma linha não diferem estatisticamente de acordo com teste de Tukey a 5 % de significância.

GS: Grau de substituição

Os resultados das análises apresentaram diferenças estatísticas ao nível de 5% apenas para o pH, condutividade elétrica, tamanho das partículas e solubilidade. O pH variou de 5,2 (Amostra B2) para 5,3 (Amostra B1), a condutividade elétrica variou de 593 a 622 μs cm⁻¹ (Amostra B2 e B1 respectivamente). Para o tamanho das partículas, os resultados foram de 0,13 % e 0,30 % de material retido (produto

com diâmetros maiores que 0,106 mm) para amostras B2 e B1, respectivamente. Porém, como mencionado no item 4.1, o pH do produto deve estar entre 5 e 6 e a condutividade é aceitável até $840 \mu\text{S cm}^{-1}$ na ficha de especificação do produto. Em relação ao tamanho das partículas, para este produto, o aceitável é até 0,5 %, ou seja, embora tenham sido observadas diferenças estatísticas a nível de 5%, em escala industrial, essa diferença é aceitável, pois as propriedades estão dentro do recomendado para a comercialização do produto.

O poder de inchamento das amostras teve valores próximos, de 0,74 e 0,76 g g^{-1} para as amostras submetidas à secagem em *ring dryer* e *flash dryer*, respectivamente. A solubilidade da amostra B2 foi 1,45 vezes maior que a solubilidade da amostra B1. De acordo com Tester & Morrison (1990) as propriedades de poder de inchamento e solubilidade são influenciadas pela estrutura da amilopectina, pela composição do amido, pela conformação estrutural do grânulo e pela presença de outros constituintes como os fosfolipídios e fosfatos monoéster. Como utilizou-se a mesma amostra de amido, apenas foram separados na etapa de secagem, não houve diferenças das características citadas por Testes & Morrison (1990). Assim, faz-se necessário a realização de análises complementares, para identificação de possível alteração molecular ou estrutural que pode ter influenciado essa diferença de solubilidade. Xiao et al. (2018) estudaram a acetilação de amido de castanha e verificaram que o tratamento mostrou um aumento na solubilidade e poder de inchamento das amostras. Os autores observaram que a solubilidade do amido regular elevou de 13 % para 23 % no amido modificado, e o poder de inchamento aumentou de 19 g g^{-1} para 28,5 g g^{-1} . Esse aumento ocorreu pelo enfraquecimento nas ligações internas das moléculas do amido causado pela modificação, o qual possibilitou uma maior penetração e absorção de água pelo grânulo. Estes resultados foram bem diferentes deste estudo, embora a modificação do amido também tenha sido realizada por acetilação. De acordo com Balagopalan et al. (1998) e Hoover (2001) as diferenças nas propriedades de solubilidade e poder de inchamento acontecem porque a capacidade de inchamento do grânulo depende da força e da natureza das forças associativas no interior do grânulo de amido. Alguns fatores são fundamentais para determinar essas forças associativas, tais como razão entre amilose e amilopectina, massa molecular das frações, distribuição da massa molecular, grau de ramificação, conformação, e comprimento das cadeias

ramificadas mais externas de amilopectinas, que podem compartilhar ligações associativas.

Com relação a cor do amido acetilado seco, não foram observadas diferenças significativas entre os parâmetros L, a e b das amostras B1 e B2. O ΔE da amostra B1 foi de 1,40 e da amostra B2 foi de 1,63, ambos abaixo de 2 corroborando a análise visual (na qual não foi detectada diferença de cor).

Apesar dos valores encontrados para algumas propriedades apresentarem diferenças estatísticas a nível de 5%, as propriedades do amido de milho acetilado submetidos à secagem em *flash dryer* e *ring dryer* atendem as especificações do produto. De modo geral, pode-se dizer que a tecnologia do secador não interferiu nas características reológicas e físico-químicas do amido acetilado.

Para analisar a eficiência das tecnologias dos secadores, foi estimado a taxa de produto, taxa de alimentação, evaporação, tempo de residência do amido no secador, o consumo específico de energia elétrica, consumo específico de vapor e a eficiência do secador. Os resultados estão apresentados na Tabela 9.

TABELA 9 – CARACTERÍSTICAS E CONSUMO ENERGÉTICO DOS SECADORES *RING DRYER* E *FLASH DRYER* UTILIZADOS NO ESTUDO.

SECADOR	FLASH	RING
Capacidade nominal (t dia ⁻¹)	130	120
Taxa de alimentação (kg h ⁻¹)	7866	7090
Umidade inicial da torta (%)	39,4	37,8
Taxa de produto (kg h ⁻¹)	5417	5000
Umidade final do amido (%)	12,0	11,8
Taxa de evaporação (kg h ⁻¹)	2449	2090
Vazão de ar (m ³ h ⁻¹)	61400	87600
Relação ar/produto	20	30
Diâmetro do duto (m)	1,0	1,0
Área do duto (m ²)	0,785	0,785
Comprimento do duto (m)	26,9	56,6
Velocidade do ar (m s ⁻¹)	21,7	31,0
Tempo de residência (s)	1,239	1,827
CEE (kJ kg ⁻¹)	383,29	609,53
CET (kJ kg ⁻¹)	3213,31	2200,78
CE _{Total} (kJ kg ⁻¹)	3596,60	2810,31
η_e	0,55	0,73

CEE:Consumo específico de energia elétrica

CET:Consumo específico de energia térmica

CE_{TOTAL}: Consumo específico total η_e : Eficiência energética

A capacidade, diâmetro do duto, temperatura de entrada e a velocidade do ar dos secadores utilizados neste estudo foram similares ao dos secadores *flash* de cinco instalações industriais; três na Tailândia e duas no Paraguai; avaliadas por Chapuis et al. (2016). Os secadores industriais em funcionamento na Tailândia têm capacidades na faixa de 100 a 400 toneladas de amido seco por dia, utilizando dutos de secagem com um diâmetro de cerca de 1-2 metros e comprimento total de 40 a 60 metros. A temperatura de entrada do ar de secagem de tais secadores está geralmente na faixa de 170-180 °C e a velocidade do ar de 15 m s⁻¹ a 25 m s⁻¹. Chapuis et al. (2016) mencionam que a temperatura máxima do ar que deve ser usada para a secagem de amido de mandioca é de 180 °C, uma vez que uma

temperatura acima desta pode aquecer as partículas de amido acima de 60 °C e causar sua gelatinização. Entretanto, deve-se observar também que o uso de uma temperatura inferior a 140°C aumenta consideravelmente o tempo de secagem, o que significa que será necessário um tubo longo para atingir níveis razoáveis de eficiência energética. Para o comprimento do tubo, não é aconselhável construir tubos mais curtos que 20-25 m, pois isso requer o uso de diluições (razões entre as vazões de ar e produto) muito altas, algo que provavelmente causará problemas de gelatinização e levará a baixos níveis de eficiência energética. O comprimento do duto do secador *flash* deste estudo, embora seja menor que o comprimento do secador *ring*, está dentro do recomendado por Chapuis et al. (2016).

Com relação à avaliação energética dos secadores *flash* e *ring*, observou-se que o consumo específico de energia elétrica (CEE) foi maior para o *ring dryer*, pois esse secador possui um ventilador primário de 350 hp de potência e um secador secundário de 125 hp. Já o secador *flash* utiliza somente um ventilador de 350 hp.

Comparando o consumo de vapor por quilograma de água evaporada durante a secagem (CET), nota-se na Tabela 9 que o consumo do secador *ring* (2200,78 kJ kg⁻¹) foi menor que o do secador *flash* (3213,31 kJ kg⁻¹), ou seja, o consumo específico de um secador *flash* é 46 % maior quando comparado com o secador *ring*. Isso se deve ao maior comprimento da tubulação do *ring dryer* (56,6 metros), proporcionando um maior tempo de residência do amido acetilado no secador (1,827 segundos). De acordo com Chapuis et al. (2016) o uso de tubos mais longos é crucial para garantir tanto a eficiência energética dos secadores quanto a qualidade do produto. Bittencourt (2001) avaliou a secagem de banana em um secador do tipo cabine com bandejas e observou um consumo específico de calor de 7.988,70 kJ kg⁻¹ de água evaporada, valor elevado quando comparado ao resultado deste estudo. Cavichiolo (2010) avaliando o desempenho de um secador pneumático e um secador rotativo na produção do farelo de polpa cítrica para fabricação de ração animal obteve um consumo específico de calor de 4219,03 kJ kg⁻¹ para o secador rotativo, valor superior ao calculado neste estudo; e obteve 2471,40 kJ kg⁻¹ de água evaporada para o secador *flash*, valor próximo ao observado para o secador *ring* deste estudo.

O consumo energético específico total (CE_{total}) do *ring dryer* foi menor em comparação com o *flash dryer* e sua eficiência energética foi aproximadamente 27 % maior. Comparando os resultados de Chapuis et al. (2016) com o presente estudo,

pode-se confirmar que o secador *ring* apresenta um consumo energético menor devido ao maior comprimento do duto, maior velocidade e maior tempo de residência das partículas no secador quando comparados com o secador *flash*.

5 CONCLUSÃO

Com o intuito de avaliar o efeito do método de lavagem (hidroclones e filtro prensa) e da tecnologia de secagem (*flash dryer* e *ring dryer*) do amido acetilado nas características reológicas e físico-químicas finais do produto, notou-se que, de forma geral, o tipo de processo de lavagem do amido acetilado em hidroclones ou filtro prensa não impacta nas propriedades reológicas e físico-químicas do produto final. Porém, para o produto analisado, pode-se concluir que a lavagem em filtro prensa é mais eficiente que a lavagem em hidroclones, pois a carga orgânica do efluente gerado por filtro prensa é inferior ao gerado pelos hidroclones. Isso se deve à necessidade de um menor consumo de água no filtro prensa para se atingir o teor de cinzas desejado e ao menor volume de efluente a ser enviado à estação de tratamento de água.

Para a tecnologia do secador, os resultados das análises foram dentro do esperado para o produto em estudo, inclusive as amostras B1 e B2 tiveram resultados mais próximos que as amostras B2 e B3, o que mostra que a tecnologia de secagem interferiu menos na qualidade do produto final que a etapa de lavagem. Embora ambos os secadores atendam a qualidade final do produto, a aquisição de um secador *ring* exige um maior investimento, e um consumo maior de energia elétrica. No entanto, este secador apresentou uma melhor eficiência energética e o consumo de vapor é bem menor devido ao duto ser maior e permitir um maior tempo de residência. Como o vapor tem um valor mais significativo quando comparado à energia elétrica, o investimento em um secador *ring* pode ser vantajoso quando analisado a longo prazo.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em estudos futuros, poderia utilizar outros tipos de amido modificado para testar a tecnologia da lavagem e seus respectivos efluentes. Poderia também analisar os custos envolvidos para instalar um filtro prensa e um sistema de hidroclones, bem como o espaço físico para instalação dos mesmos. Outro ponto, seria estudar as propriedades morfológicas dos amidos acetilado, pois, com o cenário da Covid, não foi possível fazer a microscopia eletrônica de varredura.

REFERÊNCIAS

ABDEL-FATAH, M. A.; SHERIF, H. O.; HAWASH, S. I. Investigation on wastewater treatment of maize processing effluent. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 6, n. 7, p. 264-268, 2015.

ALTINBAS, M.; AYDIN, A. F.; SEVIMLI, M. F.; OZTURK, I. Advanced oxidation of biologically pretreated baker's yeast industry effluents for high recalcitrant cod and color removal. **Journal of Environmental Science and Health**, v. 38, n. 10, p. 2229-2240, 2003.

AOAC INTERNATIONAL. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 19th. ed. Chicago: Pharmabooks, 2012.

ABNT, ABNT NBR 10664: Waters – Determination of Residues (Solids) – vimetric Method – Method of Test, 1989.

BALAGOPALAN, C., et al. Properties of cassava starch. In: **Cassava in food, feed and industry**, CRC Press, 1988, p.116-126

BEMILLER, J.; WHISTLER, R. Starch: Chemistry and Technology (3th ed.). **Food Science and Technology International Series**, 879 p. 2009.

BELLO-PÉREZ, L. A.; AGAMA-ACEVEDO, E.; ZAMUDIO-FLORES, P. B.; MENDEZMONTEALVO, G.; RODRIGUEZ-AMBRIZ, S. L. Effect of low and high acetylation degree in the morphological, physicochemical and structural characteristics of barley starch. **LWT – Food Science and Technology**, v. 43, p. 1434-1440, 2010.

BISWAS, A.; SHOGREN, R. L.; SELLING, G.; SALCH, J.; WILLETT, J. L.;

BRASIL. Ministério da Saúde. Resoluções n.38 e 39/76. Fixa as características de identidade e qualidade a serem atendidas pelos amidos modificados. In: **ABIA. Compêndio da legislação de alimentos**. São Paulo, 1977. v.1/A, Seção L Parte 1.

BITTENCOURT, J. **Avaliação de um secador de bananas do tipo cabine com bandejas**. Campinas, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. 64 p.

CAVICHIOLO, J. R. **Secagem do bagaço de laranja em secador tipo flash**. Dissertação (mestrado em Engenharia agrícola) – Setor Concentração tecnologia pós colheita, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

CEREDA, M. P., FRANCO, C. M. L., DAIUTO, E. R., DEMIATE, I. M., CARVALHO, L. J. C. B., LEONEL, M., VILPOUX, M., SARMENTO, S. B. S. Propriedades gerais do amido. **Fundação Cargill, (Série: Culturas de tuberosas amiláceas latino-americanas-americanas)**, V.1, 221 p. 2001.

CHAPUIS, A. PRECOPPE, J. M., MÉOT, K., SRIROYH., TRAN, T. Pneumatic drying of cassava starch: Numerical analysis and guidelines for the design of efficient small-scale dryers. **Drying Technology**, v.35, n° 4, p. 393-408, 2016.

CHI, H. XU, K. CHEN, Q. XUE, D. SONG, C. ZHANG, W. WANG, P. Effect of acetylation on the properties of corn starch. **Food Chemistry**, London, v. 106, n. 3, p. 923-928, 2008.

COKER, L.E. uses and analysis of sulfites in the corn wet milling industry. **Journal-Assoc. of Anal. Chem.**, vol 69, n°1, pp 8-10, 1986.

CORRADINI, E., LOTTI, C., MEDEIROS, E. S. D., CARVALHO, A. J., CURVELO, A. A., MATTOSO, L. H. Estudo comparativo de amidos termoplásticos derivados do milho com diferentes teores de amilose. **Polímeros**, v. 15, n. 4, p. 268-273, 2005.

CORN REFINERY ASSOCIATION **The Corn Refining Process**. Disponível em: <https://corn.org/wp-content/uploads/2009/11/CornRefiningProcess.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2020.

CREMONEZ, A. C., FEIDEN, A. SANTOS, R. F. ROSSI, E. NADALETI, W. C., ANTONELLI, J., **Biodigestão anaeróbica no tratamento de água residuárias de**

fecularias, Universidade estadual do oeste do Paraná – Mestrado, Cascavel, Paraná, p.99, faculdade de engenharia civil, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, p. 1, 2013.

DAN, N. P., KRISTENSEN, G. G., VREDENBREGT, L.H.J. Comparative Evaluation of Yeast and Bacterial Treatment of High Salinity Wastewater based on biokinetic coefficients. **Bioresource Technology**, v.87, p. 51-56, 2003.

DANESHVAR, N.; KHATAEE, AR.; AMANI, GHADIM, AR.; RASOULIFARD, M.H. Decolorization of C.I.Acid Yellow 23 solution by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC). **Journal of Hazardous Materials**, v. 148, n.3, p. 566-572, 2007.

DUBEY S. Study of wastes and effluents treatment in starch and allied industries. **Science Technology**, v. 3, p. 69–77, 2006.

ECKHOFF, S. R., WATSON, S. A., in: BEMILLER, J., WHISTLER, R. (Eds.), Starch: Chemistry and Technology, **Academic Press, New York**, p 373–439.2009.

ELIASSON, A. C. Starch in food: structure, function and applications (1st ed.). **USA: Taylor & Francis**.2004.

EMR disponível em: <https://www.expertmarketresearch.com/reports/corn-starch-market>. Accessed on: Nov. 2021.

ERSAHIN, M.E.; TEZER, B.H.; OZTURK, I.; BILGE, C. Pollution profile and waste minimisation study for corn processing industry. **Journal of ITU**, v.16, p. 25-35, 2006.

EWIDA, A. Y. I. Bio-treatment of maize processing wastewater using indigenous microorganisms. **Sustainable Environment Research**, v. 30, n. 1, 2020.

FARIA, L.J.G., **Estudo experimental do secador pneumático vertical**, 1986, 190p. Dissertação (Mestrado), DEQ/FEQ/UNICAMP, Campinas, SP.

GAUTO, M. A.; ROSA, G. R. Processos e operações unitárias da indústria química. Rio de Janeiro: **Ciência Moderna**, 2011.

GONZALEZ, Z.; PEREZ, E. Effect of acetylation on some properties of rice starch. **Starch**, 54, 148-154, 2002.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. dissertação de mestrado, curso de Pós-Graduação em engenharia metalúrgica e de minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 129p. 2011.

GUO J.; ZHANG, Y.; ZHAO, J.; ZHANG, Y.; XIAO, X.; WANG, B.; SHU, B. Characterization of a bioflocculant from potato starch wastewater and its application in sludge dewatering. **Applied Microbiology Biotechnology**, v. 99, n. 13, p. 5429-5437, 2015.

HALLAUER, A. R. Specialty Corns, Second Edition. **CRC Press**, P 1-479. 2000.

HOOVER, Ratnajothi. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. *Carbohydrate Polymers*, v. 45, n. 3, p. 253–267, 1 jul. 2001.

IMARC 2021 disponível em: <https://www.imarcgroup.com/corn-starch-manufacturing-plant>. Accessed on: Nov. 2021.

INTERNATIONAL STARCH INSTITUTE. Disponível em: <http://www.starch.dk/isi/tables/density.asp>. Acesso em: 04 Mai. 2021.

JACKSON, D. S.; SHANDERA, D. L. Corn wet milling: separation chemistry and technology. **Advances in Food and Nutrition Research**, v. 38, p. 271–300, 1995.

KONG, X.; ZHU, P.; SUI, Z.; BAO, J. Physicochemical properties of starches from diverse rice cultivars varying in apparent amylose content and gelatinisation temperature combinations. **Food Chemistry**, Oxford, v. 172, n. 1, p. 433–440, 2015.

KUDRA, T. Energy performance of convective dryers. **Drying Technology**, v. 30, n. 11-12, p. 1190-1198, 2012.

LAROX. Pressure Filtration. fev. 2007. 62.

LAWAL, O.S. Composition, physicochemical properties and retrogradation characteristics of native, oxidized, acetylated and acid-thinned new cocotam (Xanthosoma sagittifolium) starch. **Food Chemistry**, v.87, 112, p. 205-218, 2004b.

LIBÂNIO, P.A.; CHERNICHARO, C.C.A.L.; NASCIMENTO, N.O. A dimensão da qualidade de água: avaliação da relação entre indicadores sociais, de disponibilidade hídrica, de saneamento e de saúde pública. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 10, n.3, p. 219-228, 2005

LOCK, E.; JAGER, M. Conservación química de los alimentos, características, usos, efectos. 2º Edición. **Zaragoza: Editora Acribia**; 1995.

MARCON, M.J.A.; AVANCINI, S.R.P.; AMANTE, E.R. **Propriedades Químicas e Tecnológicas do Amido de Mandioca e do Polvilho Azedo**. Florianópolis: UFSC, 101p. 2007.

MARK, A. M., MEHLTRETTER, C. L. Facile preparation of starch triacetates. **Starch/Starke**, v. 24, p. 73-76, 1972.

MAZURS, E.G.; SCHOCH, T.J.; KITE, F.E. Graphical analysis of the Brabender viscosity curves of various starches. **Cereal Chemistry**, V. 34, p. 141-152. 1959.

MOREIRA, F. C.; BOAVENTURA, R. A. R.; BRILLAS, E.; VILAR, V. J. P. Remediation of a winery wastewater combining aerobic biological oxidation and electrochemical advanced oxidation processes. **Water Research**, v. 75, p. 95-108, 2015.

OVEZ, S.; EREMEKTAR, G.; GERMIRLI-BABUNA, F.; ORHON, D. Pollution profile of a corn wet mill. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 10, n. 12, p. 539-544, 2001.

PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S. Basic Process calculations in drying. In: **MUJUMDAR, A.S. Handbook of industrial drying**. New York: Marcel Dekker, Inc, 1995. p.71-112.

PARIZOTTO, A. **Eficiência de lagoas de sedimentação na remoção de cargas orgânicas, nutrientes e coliforms totais em despejos industriais de fecularia**. Dissertação (mestrado em engenharia agrícola). Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel. 1999.

PEPPER, D., RULE, C.M., MULLIGAN, M. Cost-effective pressure filtration for platinum concentrates. The 4th International Platinum Conference, Platinum in transition 'Boom or Bust', **The Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, 2010.

PHILLIPS, D. L.; LIU, H. L.; PAN, D.; CORKE, H. General application of Raman spectroscopy for the determination of level of acetylation in modified starches. **Cereal Chem**, 76, 439-443, 1999.

RAUSCH, K. D., ECKHOFF, S. R. **Maize: Wet Milling**. Illinois: Elsevier. 2016.

ROSS, W.R. Anaerobic treatment of industrial effluent in South Africa. **Water SA**, v.15, n.4, p. 231-238, 1989.

SAHU, O.; MAZUMDAR, B.; CHAUDHARI, P. K. Treatment of wastewater by electrocoagulation: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 21, p. 2397-2413, 2014.

SALMELA, N., Oja, M. Washing and dewatering of different starches in pressure filters. **Fluid/Particle Separation Journal**, v.12, p 134–139. 1999.

SALMELA, N., Oja, M. Monitoring and modelling of starch cake washing. **International journal of food science & technology**, v. 41, n. 6, p. 688-697, 2006.

SCHOCH, T. J. Swelling power and solubility of granular starches. In: WHISTLER, R. L. **Methods in Carbohydrate Chemistry; Starch**. New York: Academic Press, v.4, p 106-109. 1964.

SENAR. Grãos: classificação de soja e milho / Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. **Brasília: SENAR**, p. 152, 2017. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/178-GR%C3%83OS.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2020.

SHIRAI, M. A., HAAS, Â., FERREIRA, G. F., MATSUGUMA, L. S., FRANCO, C. M. L., DEMIATE, I. M. Características físico-químicas e utilização em alimentos de amidos modificados por tratamento oxidativo. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, 27(2): 239-247, abr.-jun. 2007.

SILVA, R. M., FERREIRA, G. F., SHIRAI, M. A., HAAS, A., SCHERER, M.L., FRANCO, C. M. L., DEMIATE, I. M. Características físico-químicas de amidos modificados com permanganato de potássio/ácido láctico e hipoclorito de sódio/ácido láctico. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, V.28, p 66-77. 2008.

SILVA, R. G. V. **Caracterização físico-química de farinha de batata-doce para produtos de panificação**. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Itapetinga, Bahia, 2010.

SILVA, A. T., SILVA, M. **Análise do processo de produção do amido de milho**. XIII Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial. 2019.

SILVEIRA, J, L. Análise termoeconômica de um secador flash dryer. **10º Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT**, 2004.

SINGH, J.; KAUR, L.; SINGH, N. Effect of acetylation on some properties of corn and potato starches. **Starch/Stärke**, v. 56, p. 586-601, 2004.

SINGH, J., KAUR, L., MCCARTHY, O.J. Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications. **A review. Food Hydrocolloids**, v.21, p 1–22. 2007.

SJÖÖ, M., NILSSON, L. Starch in Food: Structure, Function and Applications: Second Edition. **Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition**, p 1-893. 2017.

SHUBHANEEL, N.; APURBA, D.; KUMAR, C. P. Corn starch industry wastewater pollution and treatment processes – A review. **Journal of Biodiversity and Environmental Sciences**, v. 12, p. 283-293, 2018.

SOUZA, R. C. R.; ANDRADE, C. T. **Investigação dos Processos de Gelatinização e Extrusão de amido de Milho**. Polímeros vol.10 São Carlos. 2000.

STEPHEN, A. M., PHILLIPS, G. O., WILLIAMS, P. A. Food Polysaccharides and Their Applications: Second Edition. **Taylor & Francis Group**, P 1-733. 2006.

STRUMILLO, C., JONES, P. L., & ZYLLA, R. 46 Energy Aspects in Drying. In Handbook of Industrial Drying. **CRC Press**, 2006.

SVONJA, G., CRANKSHAW, C. Ring dryer: A tool for transforming waste for reuse or disposa. **Powder and Bulk Engineering**, p.87-98, 1996

TESTER, Richard F; MORRISON, William R. Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose, and lipids. **Cereal Chemistry**, v. 67, p. 551-557, 1990.

TAKIZAWA, F. F., et al. Characterization of tropical starches modified with potassium permanganate and lactic acid. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 47, n. 6, p. 921-931, 2004.

UNITED STATES PATENT. BONNYAY, L et al. **Corn wet milling system and process for manufacturing starch**. US4207118, 18 Dec. 1978.

VALADÃO, G. E. S. Separação Sólido-Líquido. Escola de Engenharia da UFMG,

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.2008.

VAN de BIJ, J. The analysis of starch derivatives. Examination and analysis of starch. **London: Applied Science Publisher**, 189 p. 1976.

VOGEL, C. H., TODARO, C. M. **Fermentation and Biochemical Engineering Handbook Principles, Process Design, and Equipment**. 3.ed. Elsevier Inc. 2014.

XIAO, L., et al. Structural and physicochemical properties of chemically modified Chinese water chestnut [*Eleocharis dulcis* (Burm. f.) Trin. ex Hensch] starches. **International journal of biological macromolecules**, v. 120, p. 547-556, 2018.

WANG, B.; WANG, L.-J., LI, D.; ÖZKAN, N.; LI, S.-J.; MAO, Z.-H. Rheological properties of waxy maize starch and xanthan gum mixtures in the presence of sucrose. **Carbohydrate Polymers**. Barking, v. 77, p. 472–481, 2009.

WATERSCHOOT, J., GOMAND, S. V., FIERENS, E., & DELCOUR, J. A. Production, structure, physicochemical and functional properties of maize, cassava, wheat, potato and rice starches. **Stärke**, p 1-67. 2015.

WEBER, F. H.; COLLARES-QUEIROZ, F. P.; CHANG, Y. K. Caracterização físicoquímica, reológica, morfológica e térmica dos amidos de milho normal, ceroso e com alto teor de amilose. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 29, n. 4, p. 748-753, 2009.

WILEY, J., SONS. **Drying in the process industry**. Hoboken. United States Copyright Act, 2012.

WONG, D, W. Química de los alimentos: Mecanismos y teoria. Zaragoza: **Editora Acribia**; 1989.

WÜRZBURG, O. B. **Modified Starches: Properties and Uses Boca Raton**, Florida: CRC-Press, Inc., 1986.