



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Michel Brasil da Silva

**VALORIZAÇÃO DO BAGAÇO DE MAÇÃ MEDIANTE EXPLOSÃO A VAPOR
SEGUIDA DE PROCESSAMENTO ÁCIDO E SECAGEM**

FLORIANÓPOLIS

2021

Michel Brasil da Silva

**VALORIZAÇÃO DO BAGAÇO DE MAÇÃ MEDIANTE EXPLOÇÃO A VAPOR
SEGUIDA DE PROCESSAMENTO ÁCIDO E SECAGEM**

Proposta de Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Marinho Bastos Quadri.

FLORIANÓPOLIS

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

da Silva, Michel

VALORIZAÇÃO DO BAGAÇO DE MAÇÃ MEDIANTE EXPLOSÃO A VAPOR
SEGUIDA DE PROCESSAMENTO ÁCIDO E SECAGEM / Michel da Silva
; orientador, Marinho Quadri Bastos, 2021.
140 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Química. 2. Secagem; Hidrólise; Economia
Circular. I. Quadri Bastos, Marinho. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química. III. Título.

Michel Brasil da Silva

**VALORIZAÇÃO DO BAGAÇO DE MAÇÃ MEDIANTE EXPLOSÃO A VAPOR
SEGUIDA DE PROCESSAMENTO ÁCIDO E SECAGEM**

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Cristiano José de Andrade
UFSC/CTC – Departamento de Eng. Química

Prof. Dr. Bruno Augusto Mattar Carciofi
UFSC/CTC – Departamento de Eng. de Alimentos

Prof. Dr. César Milton Baratto
UNOESC – Universidade do Oeste de Santa Catarina

Prof. Dr. Luiz Antônio de Almeida Pinto
FURG – Universidade Federal do Rio Grande

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de doutor em Engenharia Química pela Pós Graduação em Engenharia Química da UFSC.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Marinho Bastos Quadri, Dr.

Orientador(a)

Florianópolis, 2021.

Este trabalho é dedicado ao meu filho Micael, minha esposa Luciana e aos meus queridos pais.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelas oportunidades que me foram concedidas e pela força para que eu pudesse concluir mais uma etapa em minha vida.

A minha esposa Luciana e ao meu filho Micael os quais são a minha fonte de inspiração e que sempre me apoiaram e me incentivaram nesta caminhada. Que suportaram todos os momentos difíceis incluindo a minha ausência.

Aos meus pais que me ensinaram e me motivaram a buscar o conhecimento, aos meus irmãos, a minha família e amigos.

Ao meu orientador Professor Marinho Bastos Quadri, pela orientação, pela participação decisiva na construção do modelo computacional, dedicação e por todo o ensinamento transmitido.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, acreditaram e me incentivaram a buscar meus sonhos.

A UNOESC por todo o suporte e empréstimo de equipamentos e estrutura dos seus laboratórios.

A UFSC pelos ensinamentos, suporte, estrutura e pela convivência.

RESUMO

O bagaço de maçã é rico em vários nutrientes, destacando-se as fibras alimentares solúveis e insolúveis. Apesar das inúmeras possibilidades de utilização do bagaço de maçã, inclusive aplicações com alto valor agregado, este resíduo é simplesmente descartado em aterro industrial o que resulta em produção de gases de efeito estufa ou então disponibilizado para o consumo bovino. Neste contexto, este estudo tem por objetivo processar o bagaço de maçã de forma a transformá-lo em um insumo de maior valor agregado para atividade agroindustrial e que atenda os fundamentos da economia circular. Além disso, busca-se analisar e descrever a secagem em camada delgada da pasta resultante do processamento ácido. Assim, o bagaço de maçã coletado da indústria produtora de suco foi processado para se obter uma farinha fina que passou por um processo de explosão a vapor e de reação ácida para extrair os compostos importantes e se obter uma pasta adequada para posterior industrialização. A análise centesimal foi utilizada para caracterizar as farinhas, DSC, FTIR e MEV para avaliar a estrutura e a capacidade de retenção de água e óleo para avaliar a funcionalidade das farinhas processadas. Após o processamento, a pasta resultante passou por uma etapa de secagem em camada delgada em túnel de vento com análise dos efeitos da temperatura do ar de secagem, que variou entre 60 °C e 70 °C, e da velocidade do ar que oscilou entre 1,7 m s⁻¹ e 2,5 m s⁻¹. Para bem dominar os efeitos das condições operacionais, desenvolveu-se um estudo de modelagem computacional da secagem. Os resultados demonstraram que as farinhas obtidas apresentaram teor de fibra alimentar total acima 62%. Os processos combinados de autoclavagem com explosão a vapor seguido de tratamento ácido pouco alteraram a estrutura das farinhas, mantendo suas características estruturais e funcionalidades, porém acelerando e aumentando consideravelmente a produção de açúcar redutor a partir do bagaço de maçã. Os grupos funcionais presentes na estrutura das farinhas, assim como a morfologia e o fluxo de calor absorvido pelas amostras tiveram poucas variações, sugerindo uma sutil hidrólise parcial dos carboidratos presentes na farinha do bagaço de maçã, preservando-se assim as principais características da farinha. Curvas de secagem em camada delgada da pasta de bagaço de maçã foram obtidas experimentalmente, verificando-se que a temperatura de 70 °C e velocidade do ar em 2,5 m s⁻¹ representam os menores tempos de secagem, assim como ao maior valor de velocidade de secagem no período de taxa constante de secagem. Além disso, empreendeu-se um esforço de modelagem computacional que foi capaz de descrever a dinâmica da secagem ao se considerar a atuação dos fenômenos de escoamento, transporte de massa e calor. Para

validar o modelo, reproduziram-se as curvas experimentais de secagem via simulação com coeficientes de determinação acima de $R^2 = 0,997$ e erros padrão inferiores a 0,010.

Palavras-chave: Bagaço de maçã, secagem, camada delgada, autoclavagem, explosão a vapor, fibras alimentares, economia circular.

ABSTRACT

Apple pomace is rich in several nutrients, especially soluble and insoluble dietary fibers. Despite the countless possibilities of using apple bagasse, including applications with high added value, this residue is simply discarded in industrial landfills or otherwise made available for bovine consumption. In this context, this study aims to process apple pomace in order to transform it into a higher value-added input for agro-industrial activity. In addition, it seeks to analyze and describe the thin layer drying of the paste resulting from acid processing. Thus, the apple bagasse collected from the juice producing industry was processed to obtain a fine flour that underwent a process of steam explosion and acid reaction to extract the important compounds and obtain a suitable paste for further industrialization. Proximate analysis was used to characterize the flours, DSC, FTIR and MEV to assess the structure and water and oil retention capacity to assess the functionality of processed flours. After processing, the resulting paste went through a step of drying in a thin layer in a wind tunnel with analysis of the effects of the drying air temperature, which ranged between 60 °C and 70 °C, and the air velocity that fluctuated between 1.7 m s⁻¹ and 2.5 m s⁻¹. In order to master the effects of operational conditions, a study of computational modeling of drying was developed. The results showed that the flours obtained had a total dietary fiber content above 62%. The combined processes of autoclaving with steam explosion followed by acid treatment did not alter the structure of the flours, maintaining their structural characteristics and functionalities, but accelerating and considerably increasing the production of reducing sugar from apple pomace. The functional groups present in the structure of the flours, as well as the morphology and the heat flux absorbed by the samples had few variations, suggesting a subtle partial hydrolysis of the carbohydrates present in the apple pomace flour, thus preserving the main characteristics of the flour. Thin-layer drying curves of apple pomace paste were obtained experimentally, verifying that the temperature of 70 °C and air velocity in 2.5 m s⁻¹ represent the shortest drying times, as well as the highest value of drying speed in the period of constant drying rate. In addition, a computational modeling effort was undertaken that was able to describe the dynamics of drying when considering the performance of the flow, mass transport and heat phenomena. To validate the model, the experimental drying curves were reproduced simulation with coefficients of determination above $R^2 = 0.997$ and standard errors below 0.010.

Keywords: Apple pomace, drying, thin layer, autoclaving, steam explosion, dietary fiber. circular economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução Total da Produção Mundial de Maçã.....	28
Figura 2 - Evolução Total da Produção de Maçã no Brasil.....	29
Figura 3 - Fluxograma do processo de produção do suco de maçã.....	30
Figura 4 - Representação das estruturas químicas da D-glicose e D-frutose	33
Figura 5 - Moléculas de lactose (A) e sacarose (B), dois importantes dissacarídeos encontrados na cana e no leite, respectivamente	34
Figura 6 - Representação da cadeia de amilose (A) e amilopectina (B).....	35
Figura 7 - Cadeia de celulose com ligações ($\beta 1 \rightarrow 4$) e destaque para as ligações de hidrogênio responsáveis pela rigidez estrutural	36
Figura 8 - Curvas de adsorção e dessorção e descrição do fenômeno de histerese	41
Figura 9 - Variedade das formas dos elementos finitos, de acordo com as dimensões.....	45
Figura 10 - Fluxograma de obtenção experimental da fibra alimentar a partir do bagaço de maçã.....	50
Figura 11 - Desenho esquemático do secador convectivo utilizado nos experimentos (1) Balança semi-analítica; (2) Sensor de temperatura; (3) Psicrômetros; (4) Anemômetro (5) módulo de aquecimento.....	58
Figura 12 - Bandeja com as amostras para secagem. Imagem (a) bandeja metálica, (b) bandeja com a pasta de bagaço de maçã e (c) bandeja com a amostra de bagaço de maçã antes da secagem	59
Figura 13 – Parte do domínio computacional onde se encontra a bandeja.....	61
Figura 14 - Malha gerada para simulação	62
Figura 15 - Gráfico do percentual de carboidratos totais nas farinhas processadas	79
Figura 16 - Gráfico do percentual de carboidratos não fibrosos das farinhas processadas	81
Figura 17 - Gráfico do percentual de fibra alimentar total nas farinhas processadas.....	82
Figura 18 - Gráfico do percentual de fibra alimentar solúvel nas farinhas processadas	83
Figura 19 - Gráfico do percentual de fibra alimentar insolúvel nas farinhas processadas	85
Figura 20 - Gráfico da concentração de açúcar redutor (C_{AR}) na solução ácida em função do tempo de reação	87
Figura 21 - Gráfico da velocidade de formação do açúcar redutor na solução ácida em função do tempo de reação	87
Figura 22 - Espectros de FTIR para as farinhas processadas em diferentes condições	89

Figura 23 - Análise de calorimetria exploratória diferencial para os diferentes produtos obtidos	91
Figura 24 - Imagens MEV com ampliação de 700x, 1000x, 3000x, 6000x e 10000x para as farinhas FB (A), FPA (B), FPAC (C) e FPAAC (D).....	93
Figura 25- Curva de secagem do bagaço de maçã e da pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de 2,5 m s ⁻¹ e 70 °C	97
Figura 26 - Curva de secagem do bagaço de maçã e da pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de 1,7 m s ⁻¹ e 70 °C.....	98
Figura 27 - Curva de secagem do bagaço de maçã e da pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de 2,5 m s ⁻¹ e 60 °C.....	99
Figura 28 - Curva de secagem do bagaço de maçã e da pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de 1,7 m s ⁻¹ e 60 °C.....	99
Figura 29 - Curva de secagem do bagaço de maçã e da pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de 2,1 m s ⁻¹ e 65 °C.....	100
Figura 30 - Curva da taxa de secagem e do teor de umidade em função do tempo para a pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de 2,5 m s ⁻¹ e 70 °C	101
Figura 31 - Curva da taxa de secagem e do teor de umidade em função do tempo para a pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de 1,7 m s ⁻¹ e 70 °C	102
Figura 32 - Curva da taxa de secagem e do teor de umidade em função do tempo para a pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de 2,5 m s ⁻¹ e 60 °C	102
Figura 33 - Curva da taxa de secagem e do teor de umidade em função do tempo para a pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de 1,7 m s ⁻¹ e 60 °C	103
Figura 34 - Curva da taxa de secagem e do teor de umidade em função do tempo para a pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de 2,1 m s ⁻¹ e 65 °C	103
Figura 35 - Curva da taxa de secagem em função do teor de umidade para a pasta de bagaço de maçã e para o bagaço na condição de secagem de 2,5 m s ⁻¹ e 70 °C	104
Figura 36 - Curva da taxa de secagem em função do teor de umidade para a pasta de bagaço de maçã e para o bagaço na condição de secagem de 1,7 m s ⁻¹ e 70 °C	105
Figura 37 - Curva da taxa de secagem em função do teor de umidade para a pasta de bagaço de maçã e para o bagaço na condição de secagem de 2,5 m s ⁻¹ e 60 °C	106
Figura 38 - Curva da taxa de secagem em função do teor de umidade para a pasta de bagaço de maçã e para o bagaço na condição de secagem de 1,7 m s ⁻¹ e 60 °C	106
Figura 39 - Curva da taxa de secagem em função do teor de umidade para a pasta de bagaço de maçã e para o bagaço na condição de secagem de 2,1 m s ⁻¹ e 65 °C	107

Figura 40 - Isotermas segundo o modelo de Oswin Modificado que atendem satisfatoriamente às curvas de secagem experimentais	111
Figura 41 - Perfis da concentração de água ao longo da espessura da pasta de bagaço de maçã na condição de 65 °C e 2,1 m s ⁻¹ para o tempo de secagem (a) 10 min, (b) 70 min e (c) 230 min.....	113
Figura 42 - Perfis da concentração de vapor de água ao longo da espessura da pasta de bagaço de maçã e tubulação na condição de 65 °C e 2,1 m s ⁻¹ para o tempo de secagem (a) 10 min, (b) 70 min e (c) 230 min.....	113
Figura 43 - Perfis de temperatura na pasta de bagaço de maçã e no seu entorno na condição de 65 °C e 2,1 m s ⁻¹ para os tempos de secagem de (a) 10 min, (b) 70 min e (c) 230 min.....	114
Figura 44 - Evolução da Temperatura média do sólido em função do tempo de secagem (s) na condição de 65 °C e 2,1 m s ⁻¹	115
Figura 45 - Evolução da Temperatura média do sólido em função da umidade (b.s.) na condição de 65 °C e 2,1 m s ⁻¹	116
Figura 46 - Gráfico comparativo do teor de água na pasta em função do tempo para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso 2,5 m s ⁻¹ e 70 °C	117
Figura 47 - Gráfico comparativo da taxa de secagem em função do teor de água na pasta para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso 2,5 m s ⁻¹ e 70 °C	117
Figura 48 - Gráfico comparativo do teor de água na pasta em função do tempo para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso 1,7 m s ⁻¹ e 70 °C	118
Figura 49 - Gráfico comparativo da taxa de secagem em função do teor de água na pasta para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso 1,7 m s ⁻¹ e 70 °C	118
Figura 50 - Gráfico comparativo do teor de água na pasta em função do tempo para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso 2,5 m s ⁻¹ e 60 °C	119
Figura 51 - Gráfico comparativo da taxa de secagem em função do teor de água na pasta para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso 2,5 m s ⁻¹ e 60 °C	119
Figura 52 - Gráfico comparativo do teor de água na pasta em função do tempo para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso 1,7 m s ⁻¹ e 60 °C	120
Figura 53 - Gráfico comparativo da taxa de secagem em função do teor de água na pasta para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso 1,7 m s ⁻¹ e 60 °C	120
Figura 54 - Gráfico comparativo do teor de água na pasta em função do tempo para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso 2,1 m s ⁻¹ e 65 °C	121
Figura 55 - Gráfico comparativo da taxa de secagem em função do teor de água na pasta para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso 2,1 m s ⁻¹ e 65 °C	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições operacionais empregados nos experimentos de secagem em camada delgada.....	59
Tabela 2- Equações para o cálculo da massa específica dos diferentes componentes da fibra do bagaço de maçã em função da sua temperatura.....	75
Tabela 3 - Expressões para a capacidade calorífica dos diferentes componentes em função da temperatura	76
Tabela 4 - Equações para a determinação da condutividade térmica de diferentes componentes, em função da temperatura	76
Tabela 5 - Caracterização dos materiais processados.....	78
Tabela 6 - Análise de Tukey ao nível significância $\alpha=0,05$ para o percentual de Carboidratos Total nas amostras	80
Tabela 7 - Análise de Tukey ao nível significância $\alpha=0,05$ para o percentual de carboidratos não fibrosos nas amostras	81
Tabela 8 - Análise de Tukey ao nível significância $\alpha=0,05$ para o percentual de fibra alimentar total nas amostras	82
Tabela 9 - Análise de Tukey ao nível significância $\alpha=0,05$ para o percentual de fibra alimentar solúvel nas amostras	84
Tabela 10 - Análise de Tukey ao nível significância $\alpha=0,05$ para o percentual de fibra alimentar insolúvel nas amostras.....	85
Tabela 11 - Concentração de açúcar redutor que se solubiliza na água (C_{AR}) e açúcar redutor total (C_{ART}) nas farinhas FB e FPA	86
Tabela 12 - Capacidades de retenção de água e de óleo nas amostras de todos os processamentos.....	94
Tabela 13 - Análise de Tukey ao nível significância $\alpha=0,05$ para a capacidade de retenção de água das amostras	95
Tabela 14 - Análise de Tukey ao nível significância $\alpha=0,05$ para a capacidade de retenção de óleo das amostras.....	95
Tabela 15 - Condições experimentais do ar ambiente para a secagem da pasta de bagaço de maçã.....	96
Tabela 16 - Condições experimentais do ar ambiente para a secagem do bagaço de maçã.....	96
Tabela 17 - Tempo total de secagem no período de taxa constante e de aquecimento e percentual de água evaporada, durante a secagem do bagaço de maçã.....	108

Tabela 18 - Tempo total de secagem no período de taxa constante e de aquecimento e percentual de água evaporada, durante a secagem da pasta do bagaço de maçã.....	109
Tabela 19 – Valores da taxa de evaporação de água na secagem da pasta e do bagaço de maçã	109
Tabela 20 - Tempo total de secagem e umidade final para os casos estudados de secagem da pasta e do bagaço de maçã.....	110
Tabela 21 - Constantes do modelo de isoterma ajustados aos dados experimentais.....	110
Tabela 22 - Conteúdo inicial de água para cada caso estudado.....	111
Tabela 23 - Taxa de evaporação de água do modelo computacional	112
Tabela 24 - Coeficiente de determinação para os casos avaliados na secagem em camada delgada da pasta de bagaço de maçã	122

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 - Grupos funcionais resumidos com seus dominantes para cada banda.	88
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a	Massa de glicose correspondente a 10 mL das soluções de Fehling	g
A	Área normal à direção do fluxo de calor	m ²
A _T	Percentual de açúcares totais	%
a _w	Atividade de água	(-)
c _{sat}	Concentração de vapor sob condições de saturação	mol m ⁻³
c _v	Concentração atual de vapor	mol m ⁻³
C _p	Calor específico a pressão constante	J kg ⁻¹ K ⁻¹
C _{p,p}	Capacidade calorífica do meio poroso	J kg ⁻¹ °K ⁻¹
C _{pi}	Capacidade calorífica dos componentes	J kg ⁻¹ °K ⁻¹
C _p	Calor específico a pressão constante	J kg ⁻¹ K ⁻¹
c _{i,ar}	Concentração da espécie i no ar	mol m ⁻³
c _i	Concentração da espécie i no meio poroso	mol m ⁻³
CRA	Capacidade de retenção de água	g óleo g ⁻¹ de bagaço
CRO	Capacidade de retenção de óleo	g óleo g ⁻¹ de bagaço
D _{i,ar}	Coefficiente de difusão da espécie i no ar	m ² s ⁻¹
D _{eff}	Difusividade efetiva	m ² s ⁻¹
D _{va}	Difusividade vapor-ar	m ² s ⁻¹
F	Força gravitacional	N m ⁻³
FDT	Fibra alimentar total	%
FAS	Fibra alimentar solúvel	%
FAI	Fibra alimentar insolúvel	%
FB	farinha bruta de bagaço de maçã	
FPA	farinha de bagaço de maçã processada em autoclave	
FPAC	farinha processada no ácido clorídrico	
FPAAC	farinha processada no autoclave e no ácido clorídrico	
h	Coefficiente de transferência de calor convectivo	J s ⁻¹ m ⁻² K ⁻¹

h_c	Coeficiente convectivo de transferência de calor	$J s^{-1} m^{-2} K^{-1}$
H_{vap}	Calor latente de evaporação	$J mol^{-1}$
ΔH	Calor de vaporização da água pura	$J kg^{-1}$
I	Vetor identidade	(-)
J_i	Fluxo difusivo molar da espécie i	$mol s^{-1} m^{-2}$
k_p	Condutividade térmica do meio poroso	$W m^{-1} K^{-1}$
k_f	Condutividade térmica do fluido	$W m^{-1} K^{-1}$
k_{eff}	Condutividade térmica efetiva	$W m^{-1} K^{-1}$
k_{tot}	Condutividade térmica total	$W m^{-1} K^{-1}$
k_m	Coeficiente convectivo de transferência de massa	$m s^{-1}$
K	Taxa de evaporação de água do modelo computacional	s^{-1}
m_A	Massa de água no material	kg
m_{ms}	Massa de material seco	kg
m_{mu}	Massa de material úmido	kg
m_c	Massa de cinzas ao final do experimento	g
m_r	Massa do resíduo da análise	kg
m_{vap}	Massa de evaporação	kg
$N_{i,ar}$	Fluxo molar da espécie i no ar	$mol m^{-2} s^{-1}$
$P_{sat,ar}$	Pressão de vapor saturado do ar	Pa
P_{atm}	Pressão atmosférica	Pa
P	Pressão de vapor de água	Pa
P_0	Pressão de vapor de água inicial	Pa
p_c	Pressão capilar no meio poroso	Pa
p_g	Pressão da fase gasosa no meio poroso	Pa
p_l	Pressão da fase líquida no meio poroso	Pa
∇P_g	Gradiente de pressão da fase gasosa no meio poroso	Pa
Q_{ar}	Vazão volumétrica do ar	$m^3 s^{-1}$
Q	Fonte de calor	$J kg^{-1}$

Q_{ev}	Calor de evaporação	$J\ kg^{-1}$
R	Taxa de reação	$mol\ m^{-3}\ s^{-1}$
r	Raio considerado no domínio	m
S_g	Saturação da fase gasosa	(-)
S_l	Saturação da fase líquida	(-)
T	Temperatura do ambiente	K
T_1	Temperatura do ar aquecido	K
T_{ev}	Taxa de evaporação de água	$kg\ h^{-1}$
T_{pico}	Temperatura de pico endotérmico	K
ΔT	Gradiente de temperatura entre a superfície e o fluido	K
V_{recep}	Volume do recipiente	m^3
v_{ar}	Velocidade de escoamento do ar	$m\ s^{-1}$
V_{bd}	Volume do balão de diluição	L
V	Volume do titulante gasto	L
u	Campo de velocidade da fase fluída	$m\ s^{-1}$
u_{ar}	Velocidade de entrada do ar na câmara de secagem	$m\ s^{-1}$
X_{bs}	Teor de umidade em base seca	(-)
X_{bu}	Teor de umidade em base úmida	(-)
x_i	Fração mássica dos componentes	(-)
X_{eq}	Umidade de equilíbrio	$kg\ de\ água\ kg^{-1}\ de\ material\ seco$
X_0	Umidade inicial da suspensão de fibra	$kg\ de\ água\ kg^{-1}\ de\ suspensão\ de\ fibra$
X_m	Conteúdo de água na amostra	$kg\ de\ água\ kg^{-1}\ de\ material\ seco$
z	Espessura considerada no domínio	m
ρ_{ar}	Massa específica do ar de secagem	$kg\ m^{-3}$
ρ_a	Massa específica da água	$kg\ m^{-3}$
ρ_p	Massa específica do meio poroso	$kg\ m^{-3}$

ρ_i	Massa específica dos componentes	kg m^{-3}
μ	Viscosidade do fluido	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
κ_l	Permeabilidade da fase líquida	m^2
κ_{rl}	Permeabilidade relativa para fase líquida	m^2
θ	Fração de volume da fase fluida	(-)
θ_p	Fração de volume da matriz porosa	(-)

Subíndice “i”

av	Espécie vapor	(-)
ss	Espécie sólido seco	(-)
as	Espécie líquida junto ao sólido	(-)
av	Espécie vapor no meio poroso	(-)
bu	Espécie sólido úmido	(-)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	24
1.1. OBJETIVOS.....	25
1.1.1. Objetivo Geral	25
1.1.2. Objetivos específicos	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1. PROCESSAMENTO DA MAÇÃ.....	27
2.1.1. Maçã	27
2.1.2. Suco de Maçã	28
2.1.3. Bagaço de Maçã	31
2.1.4. Composição Nutricional da Maçã	32
2.1.4.1. <i>Carboidratos</i>	32
2.1.4.2. <i>Monossacarídeos</i>	32
2.1.4.3. <i>Oligossacarídeos</i>	34
2.1.4.4. <i>Polissacarídeos</i>	35
2.1.4.5. <i>Fibras Alimentares</i>	36
2.1.4.5.1. Definição e origem das fibras alimentares	36
2.1.4.5.2. Fibra alimentar insolúvel	37
2.1.4.5.3. Fibra alimentar solúvel	38
2.2. EXPLOSÃO A VAPOR.....	39
2.3. HIDRÓLISE DA FIBRA ALIMENTAR.....	39
2.4. SECAGEM.....	40
2.4.1. Isotermas de Equilíbrio e calor isostérico	40
2.4.1.1. <i>Isotermas de Equilíbrio</i>	41
2.4.1.2. <i>Calor Isostérico</i>	42
2.5. MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	42
2.5.1. Comsol Multiphysics	44
2.5.2. Método dos Elementos Finitos	44
2.5.3. Classificação dos Escoamentos	46
2.6. CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DO ESTADO DA ARTE.....	47
2.6.1. Valorização do Bagaço de Maçã	47
2.6.2. Estudo cinético da reação ácida no Bagaço de Maçã	47

2.6.3. Estudos experimentais e de modelagem matemática da secagem do bagaço e da pasta de maçã.....	49
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	50
3.1. PROCESSAMENTO DO BAGAÇO DE MAÇÃ.....	50
3.1.1. Preparação do Bagaço de Maçã	51
3.2. CARACTERIZAÇÃO DO BAGAÇO DE MAÇÃ E DAS FARINHAS.....	51
3.2.1. Análise do teor de umidade.....	51
3.2.2. Análise do teor de proteínas total.....	52
3.2.3. Análise do teor de lipídeos	52
3.2.4. Análise do teor de carboidratos não fibrosos	53
3.2.5. Análise do teor de cinzas	53
3.2.6. Análise de Fibra Alimentar Insolúvel	54
3.2.7. Análise de Fibra Alimentar Solúvel	54
3.2.8. Análise de Fibra Alimentar Total	54
3.3. VALORIZAÇÃO DO BAGAÇO DE MAÇÃ.....	54
3.3.1. Explosão a Vapor.....	54
3.3.2. Hidrólise Ácida da Farinha de Bagaço de Maçã.....	55
3.3.3. Determinação de Açúcar Redutor e Açúcar Total	55
3.4. CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DAS FARINHAS PROCESSADAS.....	56
3.4.1. Caracterização de grupos funcionais por infravermelho (FTIR)	56
3.4.2. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	56
3.4.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	56
3.5. PROPRIEDADES FUNCIONAIS DAS FARINHAS PROCESSADAS.....	57
3.6. SECAGEM EM CAMADA DELGADA.....	57
3.6.1. Estudo Experimental.....	57
3.6.2. Equipamento de Secagem	57
3.6.3. Procedimento experimental	59
3.7. ESTUDO COMPUTACIONAL DA SECAGEM EM CAMADA DELGADA.....	60
3.7.1. Desenvolvimento do Modelo	60
3.7.2. Malha de Discretização	61
3.7.3. Modelagem fenomenológica.....	62
3.7.4. Fluxos de Duas Fases em Meio Poroso	63
3.7.4.1. Modelagem do Escoamento do Ar.....	64

3.7.4.2. Transporte de fase líquida no meio poroso.....	66
3.7.4.3. Transporte de vapor em meio poroso.....	68
3.7.4.3.1. Difusividade efetiva.....	68
3.7.4.3.2. Difusividade Molecular.....	69
3.7.4.3.3. Difusividade Capilar.....	69
3.7.4.4. Transferência de Calor em Meio Poroso.....	70
3.7.4.5. Permeabilidade da matriz porosa.....	73
3.7.5. Determinação do equilíbrio higroscópico entre a pasta de bagaço de maçã e o ar de secagem.....	74
3.7.6. Propriedades termo-físicas da fibra do bagaço de maçã.....	74
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	78
4.1. CARACTERIZAÇÃO CENTESIMAL DOS MATERIAIS PROCESSADOS.....	78
4.1.1. Análise dos carboidratos totais.....	79
4.1.2. Análise dos carboidratos não fibrosos.....	80
4.1.3. Análise Fibras Alimentares Total.....	81
4.1.4. Análise Fibra Alimentar Solúvel.....	83
4.1.5. Análise Fibra Alimentar Insolúvel.....	84
4.2. EFETIVIDADE E CINÉTICA DE PROCESSAMENTO.....	85
4.2.1. Determinação do Açúcar Redutor.....	85
4.2.2. Cinética da Reação Ácida.....	86
4.3. ANÁLISE DA ESTRUTURA DAS FARINHAS.....	88
4.3.1. Grupos funcionais por infra vermelho (FTIR).....	88
4.3.2. Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial.....	91
4.3.3. Análise Microscopia eletrônica de Varredura (MEV).....	92
4.4. ANÁLISE DAS FUNCIONALIDADES DAS FARINHAS PROCESSADAS.....	93
4.4.1. Capacidades de Retenção de Água e Óleo.....	93
4.5. RESULTADOS DA SECAGEM EM CAMADA DELGADA.....	95
4.5.1. Estudo Experimental da Secagem.....	96
4.5.1.1. Parâmetros obtidos durante os experimentos de secagem.....	96
4.5.1.2. Curvas de secagem da pasta e do bagaço de maçã.....	96
4.5.1.3. Análise dos períodos da secagem.....	107
4.5.2. Estudo computacional da secagem.....	110
4.5.2.1. Isoterma de equilíbrio higroscópico.....	110

<i>4.5.2.2. Parâmetros utilizados na simulação computacional</i>	111
<i>4.5.2.3. Análise da Simulação Computacional</i>	112
4.5.3. Comparação entre os estudos experimental e computacional	116
4.5.4. Avaliação Estatística do Modelo	121
5. CONCLUSÃO	123
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

1. INTRODUÇÃO

A maçã é um dos frutos mais produzidos e consumidos no mundo, principalmente por estar associado à prevenção de diversas doenças. Em 2016, a China se destacou como a maior produtora mundial deste fruto, com produção aproximada de 44,45 milhões de toneladas, os Estados Unidos da América (EUA) em segundo lugar, produziram 4,65 milhões de toneladas e o Brasil aparecendo em 21º lugar com 1,05 milhão de toneladas produzidas (FAO, 2020). No Brasil a produção de maçã está em franco crescimento com produção de 1,25 milhão de toneladas em 2018 (ABMP, 2018).

No Brasil, a produção se concentra nos três estados da Região Sul (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul). O Estado de Santa Catarina é o maior produtor, com a cidade de São Joaquim ficando com a maior produção, seguido de Fraiburgo. No Rio Grande do Sul a cidade de maior produção de maçã é Vacaria (ABMP, 2018).

Os consumidores de maçã são altamente exigentes, demandando um beneficiamento capaz de selecionar frutas com potencial para o mercado *in natura*. Como resultado disto, cerca de 30% da produção nacional de maçã não atinge a qualidade necessária para o consumo *in natura*. Essas maçãs que não são adequadas para o consumo, são então direcionadas para a industrialização, onde o principal produto é o suco (ABMP, 2018; SEBRAE, 2018).

No processamento para obter o suco de maçã, durante o processo de prensagem da fruta, ocorre a geração de um resíduo industrial, comumente chamado de bagaço o qual dependendo da tecnologia empregada pode representar até cerca de 25% da maçã processada na indústria. Este bagaço é composto de sementes, polpa e casca da fruta (SEBRAE, 2018).

O bagaço de maçã é rico em vários nutrientes, se destacando as fibras alimentares solúveis e insolúveis. Essas fibras apresentam inúmeras propriedades funcionais, que quando adicionadas em produtos industrializados podem promover aumento na textura, absorção de água e óleos, entre outras vantagens. Para a saúde humana, contribuem para aumentar a saciedade e prevenir inúmeras doenças (SUDHA et al., 2007).

Apesar das muitas possibilidades de utilização do bagaço de maçã, inclusive aplicações com alto valor agregado, este resíduo é simplesmente descartado em aterro industrial ou então disponibilizado para consumo bovino (VILLAS BOAS, 2001).

Os fatores primordiais que dificultam a industrialização do bagaço de maçã, são a presença de resíduos como gravetos, cascas, sementes, ceras e o seu alto teor de umidade, cerca de 80% (PAGANINI et al., 2005). Logo, para a utilização deste bagaço em larga escala na

indústria, são necessários um prévio processamento e um processo de secagem eficiente com baixa demanda de energia (SEBRAE, 2018).

Assim, o desenvolvimento de um processo que extraia os componentes indesejados no bagaço, que melhore as funcionalidades do bagaço de maçã e um estudo do processo de secagem do resíduo é indispensável, já que o primeiro aumenta as possibilidades de utilização do bagaço e do caldo resultante dos tratamentos ácidos e o segundo reduz a probabilidade da ocorrência de contaminações microbiológicas, aumentando assim o prazo de validade das fibras e reduzindo os custos com armazenagem e transporte. Desta maneira, o estudo de processos alternativos para extrair do bagaço componentes de alto valor para aplicações diversas e o estudo da secagem da pasta resultante deste processamento, assim como a secagem do bagaço de maçã são de extrema importância, para possibilitar a utilização deste resíduo industrial o desenvolvimento de projetos de secadores e futuras pesquisas em relação a secagem deste material, diminuindo assim os impactos ambientais causados por este resíduo (MARRETO, 2006; NASCIMENTO, 2013; VELÁZQUEZ GUTIÉRREZ et al., 2015; XUELI et al., 2014).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Este estudo tem por objetivo geral processar o bagaço de maçã mediante explosão a vapor seguida de tratamento ácido de forma a transformá-lo em um insumo de fibras alimentícias de elevado valor agregado para atividade agroindustrial atendendo aos fundamentos da economia circular. Além disso, busca-se analisar e descrever a secagem em camada delgada da pasta resultante do processamento.

1.1.2. Objetivos específicos

- a- Caracterizar o bagaço de maçã por meio de análise centesimal antes e após os processos térmico e ácido em diferentes condições;
- b- Investigar possíveis alterações estruturais dos sólidos antes e após os processamentos de explosão a vapor e com solução aquosa ácida;
- c- Verificar o impacto nas propriedades funcionais da farinha de bagaço devido aos tratamentos realizados;

- d- Obter o perfil cinético de produção de açúcar redutor durante o processo de tratamento ácido;
- e- Caracterizar a secagem em camada delgada do bagaço de maçã e da pasta resultante do tratamento ácido mediante a obtenção de curvas características experimentais em diferentes condições operacionais;
- f- Modelar e simular a secagem do bagaço em camada delgada considerando o sistema ar/meio poroso onde concorrem simultaneamente fenômenos fluidodinâmicos, de transferência de calor e massa de modo a representar os resultados experimentais e assim dominar a fenomenologia do processo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PROCESSAMENTO DA MAÇÃ

2.1.1. Maçã

A maçã de nome científico *Malus domestica Borkh.*, é um fruto globoso, com uma profunda depressão no seu ponto de inserção da haste, que o prende aos ramos. Apresenta coloração vermelha ou verde e pode apresentar manchas esverdeadas ou amareladas, dependendo da variedade (IWANAMI et al., 2018; SEBRAE 2018).

Típica de clima temperado, a frutífera macieira da família rosaceae, a qual produz a maçã, tem sua origem no Oriente Médio e Leste Asiático, exigindo frio para produzir adequadamente o seu fruto, como o encontrado em parte do hemisfério norte e o sul do Brasil (SEBRAE, 2018).

Dentre as inúmeras variedades de maçã, se destacam a Fugi e a Gala, sendo que no Brasil essas juntas, representam mais de 90% da área total plantada. Outros cultivares também são plantados, como a Eva, Golden Delicious, Brasil, Anna, Condessa, Catarina, Granny Smith, porém em menores quantidades (SEBRAE, 2018).

De modo geral, as características químicas e nutricionais das maçãs frescas, são consequências dos fatores naturais onde estão instalados os pomares, como o solo e o clima e dos fatores agrônômicos de produção da fruta, tais como, cultivares, tratamentos culturais, adubações, tratamentos fitossanitários e épocas de colheita (HAMANN et al., 2018; IWANAMI et al., 2018).

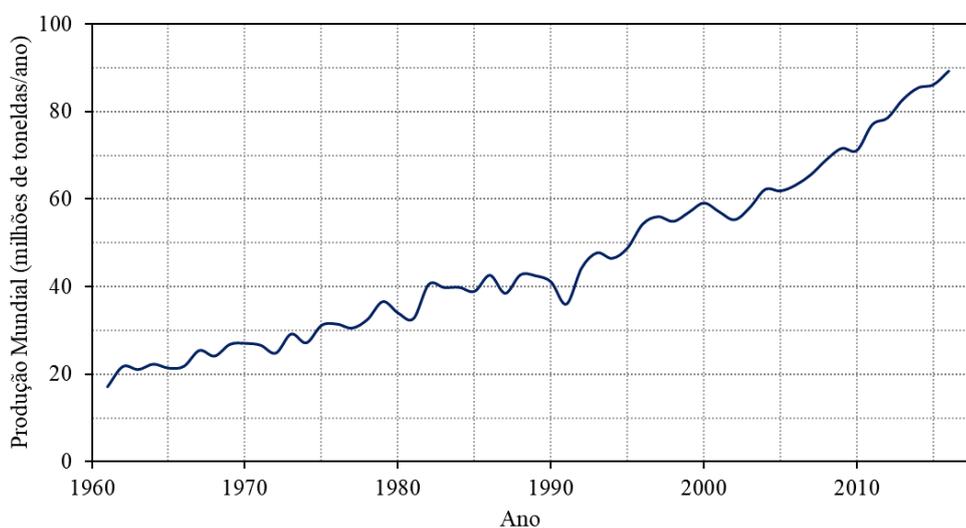
Essas características, transformam a maçã em uma das frutas mais consumidas no mundo todo, sendo isso, principalmente devido a sua composição nutricional, a qual é rica em fibras solúveis e insolúveis, antioxidantes e vitaminas B1, B2 e B3, os quais promovem a prevenção de inúmeras doenças, como diabetes, prisão de ventre, acidente vascular cerebral (AVC), doenças respiratórias, além de reduzir o colesterol e à saciedade o que contribui para redução de peso (SANSONE et al., 2018; BAJPAIA et al., 2019; CÓRDOVA et al., 2019).

Em relação a produção mundial este fruto apresenta um forte e contínuo crescimento, desde a década de 60 até os dias atuais, como visualizado na Figura 1. A China é o maior produtor de maçã, chegando em 2016, a 44,5 milhões de toneladas do fruto, representando cerca de 50% da produção total, os Estados Unidos da América o segundo e o Brasil se destacou

como o 21º maior produtor de maçã no mundo, com cerca de 1,1 milhão de toneladas de maçã produzidas no ano de 2016, onde este intenso crescimento começou na década de 80, e continua até as safras mais recentes, conforme observado na Figura 2 (FAO, 2020).

Cerca de 70% desta produção realizada no Brasil é direcionada para o consumo *in natura*, o qual exigem padrões elevados de qualidade. Os 30% restante são direcionados para a industrialização, pois são frutos de qualidade inferior, porém o suficiente para o processamento de suco, sendo este suco considerado o mais importante dos produtos, além das produções de doces, geleias, compotas e vinagre (SEBRAE, 2018).

Figura 1 - Evolução Total da Produção Mundial de Maçã

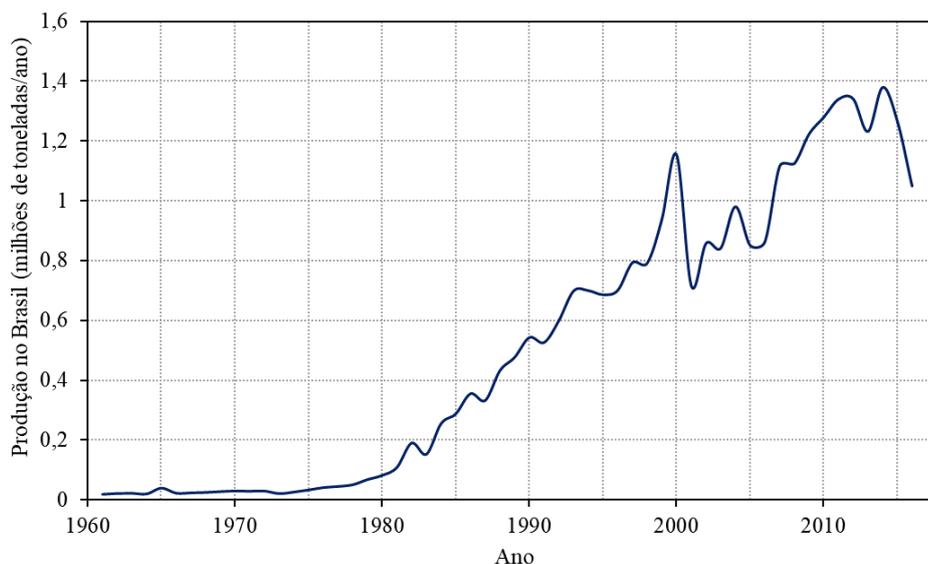


Fonte: FAO, 2020.

2.1.2. Suco de Maçã

Por meio de um processo tecnológico, o suco de maçã é extraído da parte comestível da maçã. O suco obtido apresenta coloração branca a translúcida, com sabor e aroma característicos da fruta. Entre os tipos de sucos, se destacam o concentrado com concentração mínima de 70 °Brix e o diluído com mínimo de 10,5 °Brix, sendo que ambos podem ainda ser distinguidos entre clarificado e não clarificado ou turvo (SEBRAE, 2018).

Figura 2 - Evolução Total da Produção de Maçã no Brasil



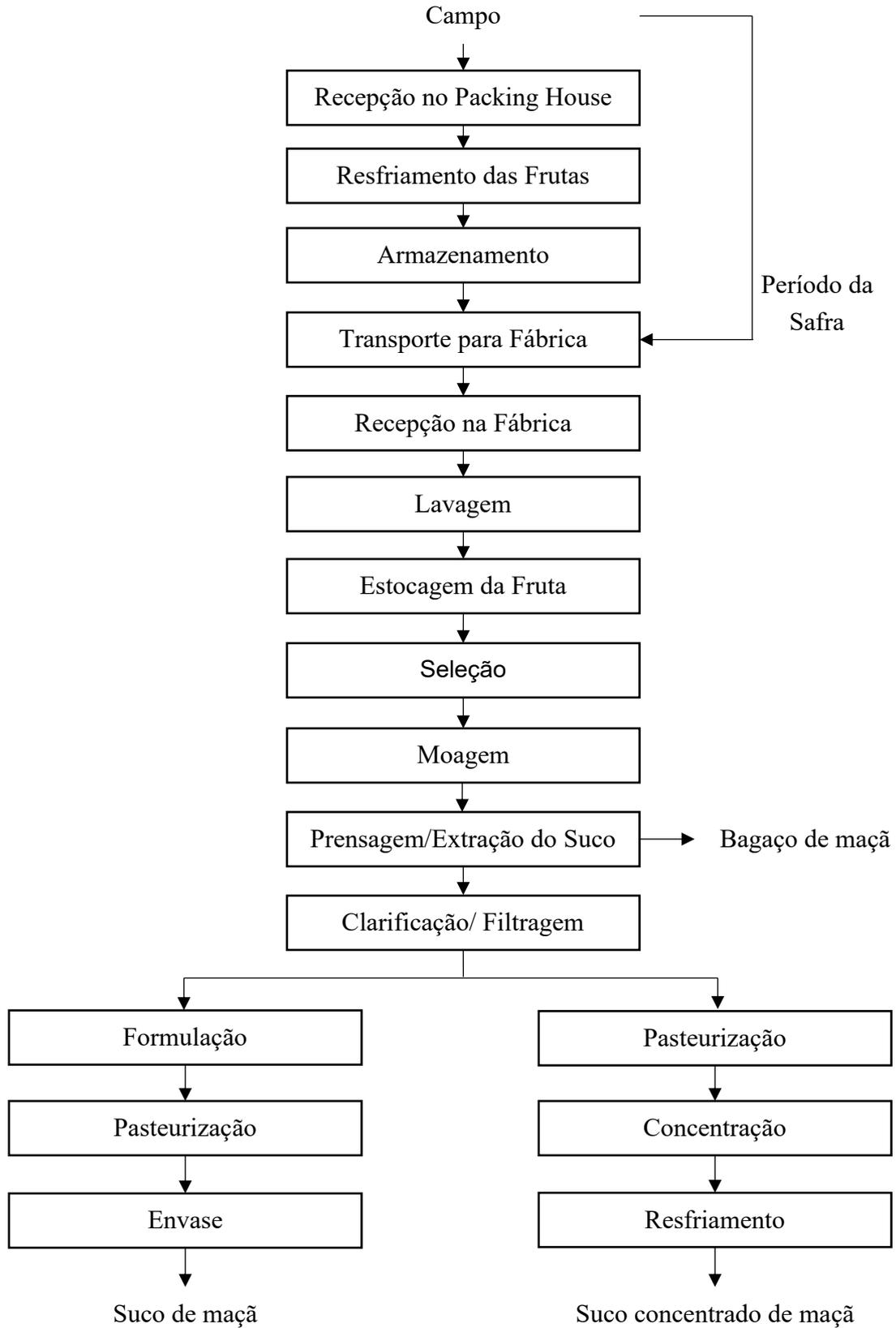
Fonte: FAO, 2020.

O processo de produção do suco está reportado na Figura 3. Para a produção do suco, são utilizadas as maçãs que não alcançaram a qualidade necessária para consumo *in natura*, onde no Brasil cerca de 30% das maçãs produzidas, são então direcionadas para industrialização. Partes destas maçãs são armazenadas nos *Packing House*, o qual se constitui de armazéns com atmosfera controlada para armazenagem das maçãs, com posterior consumo na indústria. A outra parcela de maçã, no período de safra são direcionadas do campo diretamente para a fábrica. Chegando na fábrica, são armazenadas em silos, onde nestes são lavadas para retirada de sujeiras mais grosseiras. Em geral nos processos industriais após esta etapa as maçãs são armazenadas, para aguardarem o seu processamento.

Continuando o processo, as frutas lesionadas ou apodrecidas, são retiradas da linha de produção na etapa de seleção. As maçãs remanescentes são posteriormente trituradas em moinhos especiais, os quais, transformam a polpa da maçã em uma espécie de purê.

Este purê é filtrado em filtros prensas, com o objetivo de extrair o suco. O resíduo sólido desta prensagem, dá origem ao bagaço de maçã, enquanto que o líquido é posteriormente clarificado com o uso de enzimas para despectinização e adição de carvão ativado para retirar os compostos que deixam turvo o suco de maçã. A clarificação é comumente finalizada com a passagem do líquido por uma etapa de ultrafiltração.

Figura 3 - Fluxograma do processo de produção do suco de maçã



Fonte: o autor.

Após a clarificação do suco, ou ele é concentrado ou é mantido diluído. Se continuar diluído, é adicionado ao suco, antioxidantes e acidulantes, com ulterior pasteurização, envase e armazenamento final do suco de maçã com cerca de 10,5 °Brix. A outra opção de processamento é a pasteurização, com posterior concentração do suco até 70 °Brix, resfriamento, envase e armazenamento final.

2.1.3. Bagaço de Maçã

O bagaço de maçã é o principal resíduo industrial do processo de produção do suco da maçã, gerado na etapa de filtração, conforme descrito no item anterior. Este é composto pela polpa e casca (94,5%), sementes (4,4%) e os centros (1,1%) da maçã (PAGANINI et al., 2005).

Em base seca, em média, o bagaço de maçã é composto por 51% de fibra total, sendo 36,5% de fibra insolúvel e 14,6% de fibra solúvel. Esta fibra alimentar é composta por 31% de celulose, 15% de lignina, 12% hemicelulose e 9% de pectina insolúvel em água (SUDHA et al., 2007).

A quantidade de bagaço produzido representa cerca de 16% a 25% do peso da maçã processada na industrialização para produção do suco de maçã, este percentual depende do tipo de tecnologia utilizada no processamento do suco. Em 2016, somente no Brasil, a produção de bagaço de maçã foi de aproximadamente 66 mil toneladas (SEBRAE, 2018).

Em geral no Brasil, o bagaço de maçã é utilizado como adubo orgânico com sua disposição diretamente no solo, ou então é inserido na ração animal, principalmente para consumo do gado, porém estudos como o de VILLAS BOAS (2001) informam que este pode ser prejudicial à saúde bovina.

No entanto, devido ao elevado teor de fibras alimentares, o bagaço de maçã se apresenta como excelente ingrediente para ser adicionado em inúmeros produtos alimentícios, pois além de ser um produto de baixo teor calórico, pode ser utilizado como agente espessante, promotor de textura e sabor aos alimentos industrializados; outro grande potencial é o de prevenir doenças (SUDHA et al., 2007).

Em relação as aplicações do bagaço de maçã, este tem sido utilizado como um agente enriquecedor dos atributos de diversos alimentos, como no iogurte onde a farinha do bagaço foi utilizada para aumentar o teor de fibras alimentares, segundo reportado no estudo de ISSAR e outros (2018).

Outra alternativa para o uso do bagaço é a substituição de parte da gordura de porco por farinha de bagaço de maçã na salsicha de frango. CHOI e outros (2016) obtiveram em seu estudo melhora na qualidade e redução do teor de gordura nas salsichas de frango processadas.

SHING e outros (2014), introduziram farinha de bagaço de maçã em produtos de panificação, como biscoitos, e reportaram resultados que demonstram a melhora em características importantes, entre elas: físicas, reológicas, químicas e sensoriais.

2.1.4. Composição Nutricional da Maçã

2.1.4.1. Carboidratos

Os carboidratos são componentes frequentes dos alimentos e podem ser tanto um componente natural ou adicionado como produto em alimentos. Apresentam muitas estruturas moleculares, tamanhos, propriedades físicas e químicas e configurações diferentes. Sofrem modificações químicas e bioquímicas e ambas são empregadas para melhorar suas propriedades e ampliar as aplicações. (DAMODARAN et al., 2010; FICHER et al., 2005; PRICHARD et al., 2016; SINGH et al., 2020).

O termo carboidrato reporta uma composição elementar geral $C_x(H_2O)_y$, representando moléculas com átomos de carbono e átomos de hidrogênio, porém a maioria dos carboidratos naturais não apresentam essa fórmula simples. Em vez disso, a grande parte dos carboidratos são formados por oligômero (oligossacarídeos) ou polímeros (polissacarídeos) de açúcares simples e também modificado. Nos tópicos seguintes iremos apresentar melhor esses carboidratos (PRICHARD et al., 2016).

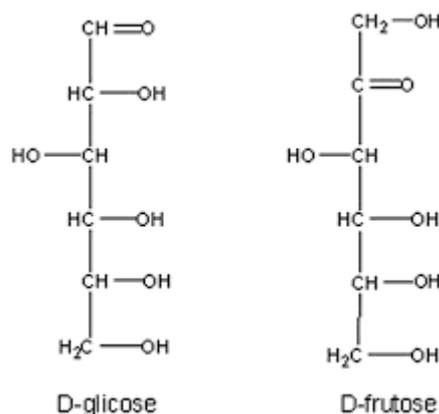
2.1.4.2. Monossacarídeos

Esses carboidratos são moléculas que não podem se dividir em carboidratos mais simples por hidrólise, desta maneira são chamados de açúcares simples. Os monossacarídeos são unidades monoméricas que unidas formam estruturas maiores como os oligossacarídeos e os polissacarídeos (DAMODARAN et al., 2010; LIU et al., 2018; SHINTANI, 2019). Os dois monossacarídeos mais abundantes na natureza são a Glicose e a Frutose (Estrutura química reportada na Figura 4) e esses são encontrados majoritariamente em frutas, como uva, maçã, laranja etc. Devido a fermentação destes monossacarídeos é que ocorre a produção de bebidas como o vinho e as sidras, cujo processo é anaeróbio e envolve a ação de microrganismos. Nesse processo de fermentação, os monossacarídeos são convertidos, principalmente, em etanol e

dióxido de carbono com liberação de energia. Em relação ao consumo dos monossacarídeos pelos seres humanos, temos que o metabolismo da glicose é a principal forma de suprimento energético (FICHER et al., 2005; PRICHARD et al., 2016).

Os monossacarídeos consistem somente de uma unidade depoliidroxialdeídos ou cetonas, as quais podem ter de três a sete átomos de carbono (SHINTANI, 2019). Em decorrência da elevada polaridade, os monossacarídeos são sólidos cristalinos em temperatura ambiente, solúveis em água e insolúveis em solventes não polares. A configuração de suas estruturas consiste em uma cadeia carbônica não ramificada, em que um dos átomos de carbono está ligado por meio de uma dupla ligação a um átomo de oxigênio, formando assim um grupo carbonila, enquanto que para os demais átomos de carbono possui um grupo hidroxila (PRICHARD et al., 2016; DAMODARAN et al., 2010).

Figura 4 - Representação das estruturas químicas da D-glicose e D-frutose



Fonte: DAMODARAN et al., 2010.

Os monossacarídeos podem ser classificados em aldose e cetose. Será uma aldose quando o grupo carbonila está localizado na extremidade da cadeia e quando o grupo carbonila estiver em outra posição, o monossacarídeo é uma cetose (LIU, et al., 2018; PRICHARD, et al., 2016).

Muitas vezes para simplificar a apresentação, os monossacarídeos são reportados na forma de cadeia linear. Outra importante característica dos monossacarídeos é a presença de pelo menos um carbono assimétrico (com exceção da diidroxicetona), fazendo com que eles ocorram em formas isoméricas opticamente ativas (FICHER, et al., 2005).

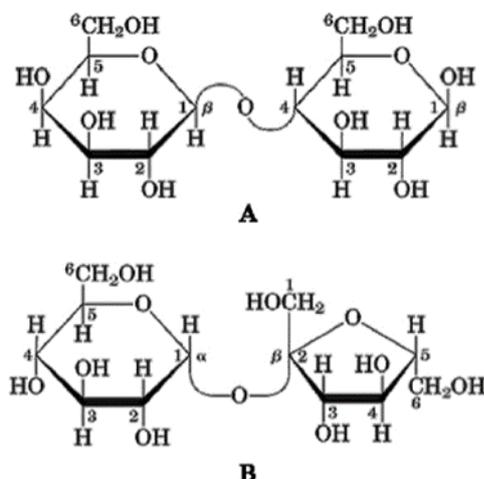
Por último, os monossacarídeos apresentam a capacidade de serem oxidados por íons cúpricos (Cu^{2+}) e férricos (Fe^{3+}), sendo os açúcares com tal propriedade denominados açúcares redutores (LIU, et al., 2018; ZHENG, et al., 2020).

2.1.4.3. Oligossacarídeos

Os oligossacarídeos são formados por cadeias curtas de monossacarídeos, contendo entre 2 e 20 unidades de açúcar, unidas por ligações glicosídicas. Os dissacarídeos são glicosídeos nos quais a aglicona é uma unidade monossacarídica. Um composto que contém três unidades monossacarídicas é um trissacarídeo (DAMODARAN et al., 2010; PRICHARD et al., 2016; SINGH et al., 2020; ZHENG et al., 2020).

São poucos os oligossacarídeos de ocorrência natural e maioria é produzida por hidrólise de polissacarídeos em unidades menores. Como as ligações glicosídicas fazem parte da estrutura acetal, elas sofrem hidrólise ácida em meio ácido e temperatura elevada (SHINTANI, 2019; SINGH et al., 2020). Entre os oligossacarídeos, os mais encontrados são os dissacarídeos, onde se destacam a sacarose e a lactose, ambos representados na Figura 5.

Figura 5 - Moléculas de lactose (A) e sacarose (B), dois importantes dissacarídeos encontrados na cana e no leite, respectivamente



Fonte: DAMODARAN, et al., 2010.

Os dissacarídeos têm em sua composição dois monossacarídeos unidos por uma ligação denominada glicosídica, as quais são hidrolisadas facilmente pelo aquecimento em meio aquoso com ácido diluído (DAMODARAN et al., 2010; FICHER et al., 2005; ZHENG et al., 2020). Tal ligação ocorre pela condensação entre o grupo hidroxila de um monossacarídeo com o

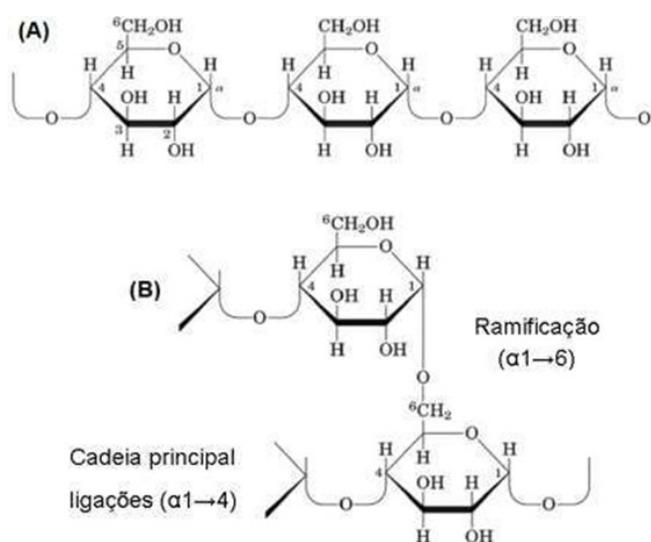
carbono anomérico de outro monossacarídeo. A extremidade da estrutura na qual se localiza o carbono anomérico é a extremidade redutora. Quando o carbono anomérico de ambos os monossacarídeos reage para formar a ligação glicosídica, o açúcar não é mais redutor, como podemos observar na sacarose (uma molécula de glicose e outra de frutose) e na lactose (uma molécula de galactose e outra de glicose) comporta-se, diferentemente da sacarose, como açúcar redutor, pois o carbono anomérico encontra-se disponível (LIU et al., 2018; SINGH et al., 2020; ZHENG et al., 2020).

2.1.4.4. Polissacarídeos

Os açúcares contendo mais de 20 unidades são os polímeros de monossacarídeos e recebem a denominação de polissacarídeos, os quais podem possuir milhares de monossacarídeos e são a forma predominante dos carboidratos na natureza. O que diferencia os polissacarídeos dos demais carboidratos são a unidade monomérica, o comprimento e a ramificação das cadeias. Quando os polissacarídeos contêm apenas um tipo de monossacarídeo, ele é denominado de homoglicano, porque apresentam todas as unidades glicosídicas do mesmo tipo como por exemplo a celulose, a amilose e a amilopectina. Se estiverem presentes dois ou mais tipos de monossacarídeos, o resultado é um heteroglicano como a goma guar e a goma locusta (DAMODARAN et al., 2010; SHINTANI, 2019; ZHENG et al., 2020).

O amido é composto por dois tipos de polímeros de glicose: a amilose e a amilopectina. A diferença básica entre estes é a ramificação da cadeia como reportado na Figura 6.

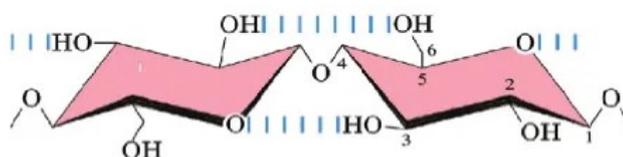
Figura 6 - Representação da cadeia de amilose (A) e amilopectina (B)



Fonte: DAMODARAN, et al., 2010.

Por sua vez a celulose a qual tem a sua estrutura a apresentada na Figura 7, é outro importante polissacarídeo. A celulose é uma substância fibrosa, resistente e insolúvel em água, sendo formada por unidades de glicose conectadas mediante ligações ($\beta 1 \rightarrow 4$), que lhe fornece propriedades estruturais características. A celulose, reporta unidades de glicose que formam cadeias retas e estendidas as quais se dispõem lado a lado, constituindo uma estrutura em fibras estabilizada por ligações de hidrogênio intra e intercadeias o que promove maior resistência à celulose (DAMODARAN et al., 2010; SHINTANI, 2019; SINGH et al., 2020).

Figura 7 - Cadeia de celulose com ligações ($\beta 1 \rightarrow 4$) e destaque para as ligações de hidrogênio responsáveis pela rigidez estrutural



Fonte: DAMODARAN, et al., 2010.

2.1.4.5. Fibras Alimentares

2.1.4.5.1. Definição e origem das fibras alimentares

A definição de fibra alimentar (FA) é bastante complexa e ainda apresenta uma evolução ao longo do tempo. Durante décadas o termo utilizado foi de fibra bruta, porém em 1953 Hipsley adotou o termo fibra alimentar ou alimentar, e tinha como objetivo descrever os componentes alimentares provenientes das paredes celulares de vegetais (CHAMP et al., 2003).

A definição aceita atualmente pela American Association of Cereal Chemistry (AACC), reporta que a fibra alimentar se caracteriza por ser a parte comestível de plantas ou carboidratos análogos, os quais são resistentes à digestão e absorção no intestino delgado, e que apresentam fermentação completa ou parcial no intestino grosso. Este conceito insere ainda os polissacarídeos, oligossacarídeos, lignina e substâncias associadas a vegetais (AACC, 2000, 2001).

As fibras originam-se a partir das células vegetais, primordialmente de celulose e lignina, as quais são substâncias indigeríveis e que se formam a partir da maturação das células vegetais (SANTANA, 2005). As fibras podem exibir diferentes propriedades de acordo com sua fonte, índice de maturação, processamento, entre outros (GUILLON; CHAMP, 2000; HUBER, 2012).

Os tecidos vegetais que apresentam um rápido crescimento, são constituídos basicamente de tecidos jovens ricos em hemicelulose e pectina. Por sua vez os tecidos vasculares exibem quantidades significativas de lignina no talo, tronco e folhas (SANTANA, 2005).

Em relação a estrutura das fibras, são essencialmente constituídas por ligações de polímeros de alta massa molar, sendo estas macromoléculas que compreendem dois grupos químicos. O primeiro grupo são os que apresentam estrutura de polissacarídeos vegetais, celulose, hemicelulose, pectina. Por outro lado, destacam-se outros grupos sem o referido arranjo, como a lignina, gomas e mucilagens (SANTANA, 2005).

Entre as várias aplicações das fibras alimentares, se destacam as aplicações como promissoras fontes de preenchedores de celulose para produção de compósitos biodegradáveis, uma vez que apresentam não apenas a capacidade funcional de substituir as amplamente utilizadas fibras de vidro, mas também apresentam algumas características interessantes, como abundância, leveza, não-toxicidade (PANDEY et al., 2010). Existem ainda trabalhos que têm demonstrado que a adição de fibra alimentares em alimentos como salsichas (CHOI et al., 2009) e em hambúrgueres (SAYAGO-AYERDI, 2009), em níveis de 2%, pode ser realizada sem impacto negativo na qualidade sensorial do alimento.

Como relatado a fibra alimentar representa uma diversidade de substâncias, destarte, pode ainda ser subdividida em fibra alimentar solúvel (FAS) e fibra alimentar insolúvel (FAI) por consequência do seu comportamento físico em meio aquoso (SPILLER, 2001).

2.1.4.5.2. Fibra alimentar insolúvel

As fibras alimentares insolúveis (FAI), se caracterizam por não se dissolverem em água. Sua estrutura é linear e apresenta a exposição de grupos hidroxilos ao longo das cadeias principais. Por consequência deste perfil, as FAI têm a capacidade de adsorver moléculas de água que ficam retidas nos espaços vazios disponíveis entre os polímeros, levando a um aumento de volume das fibras que a compõem. Esta capacidade de retenção de moléculas de água permite um amaciamento do bolo fecal e um aumento de volume, facilitando e reduzindo o tempo de trânsito intestinal (CHO et al., 1999, MCCLEARY et al., 2001; SPILLER, 2001). Os principais componentes das FAI são a celulose, lignina, algumas hemiceluloses e polissacáridos sintéticos (CHO et al., 1999).

As principais fontes das FAI, são os farelos de cereais, os grãos integrais de cereais, os frutos secos, as frutas quando ingeridas com casca e hortícolas (LUNN et al., 2007).

2.1.4.5.3. Fibra alimentar solúvel

A fibra alimentar solúvel (FAS), ou seja, se dissolve em água, é composta por β -glucanos, gomas e mucilagens, pectinas e ainda tipos de hemicelulose, incluindo como os principais, o arabinoxilano, polissacáridos sintéticos e polissacáridos de origem animal (HUBER, 2012).

Além de apresentar cadeia ramificada, sua principal característica é que quando em meio aquoso estes compostos apresentam um elevado grau de hidratação, possibilitando a formação de géis e soluções viscosas. Esta propriedade depende da forma como os monômeros estão ligados entre si, e ainda da presença de grupos funcionais e da massa molar do polímero (SANTANA, 2005; HUBER, 2012).

Analisando a cadeia ramificada das FAS, quanto maior for esta característica, maior será a sua dispersão e solubilidade, já que a presença de ramificações reduz as formações cristalinas, pois a irregularidade estrutural impede a agregação entre os polímeros favorecendo a sua dispersão e solubilidade. Polissacarídeos de menor massa molar também são mais solúveis em meio aquoso, uma vez que a presença de grupos funcionais polares (ex. COO^- e SO_3^-) também favorecem largamente a sua solubilidade (WURSCH et al., 1997; CHO et al., 1999; SPILLER, 2001).

Em relação a viscosidade promovida pela presença da FAS, esta resulta da interação molecular em solução e consiste na resistência à agitação mecânica da mesma. Se a quantidade de moléculas for baixa, por consequência, estarão mais dispersas e isoladas, porém o aumento da sua concentração promove aceleração no contato físico entre as moléculas, sobreposição e formação de ligações. Logo a viscosidade é resultado de um espessamento da solução e pode ser minimizada se exposta a agitação, já que esta irá separar as moléculas e reduzir as interações moleculares (CHO et al., 1999; MCCLEARY et al., 2001).

Em relação aos géis que se formam, estes resultam principalmente de uma reordenação estrutural molecular dos polissacáridos, o que constitui uma matriz tridimensional, devido ao estabelecimento de ligações entre as moléculas e pontes de hidrogénio com moléculas de água (CHO et al., 1999). A geração de géis e soluções viscosas discutidas, são responsáveis por muitos dos benefícios fisiológicos reconhecidos à FAS (CHO et al., 1999; MCCLEARY et al., 2001; LUNN et al., 2007).

As fibras alimentares solúveis são encontradas principalmente nos alimentos como as leguminosas, feijão, lentilha, soja, ervilha, grão-de-bico, as sementes de cereais e os seus farelos como a aveia, cevada, arroz, centeio, milho, trigo, as frutas as quais podemos citar a maçã, pera, laranja e banana e alguns hortícolas tais como a cenoura e a couve-flor (LUNN et al., 2007).

2.2. EXPLOSÃO A VAPOR

Nos últimos anos, diversas maneiras de se processar o bagaço de maçã estão sendo estudadas e desenvolvidas (LIANG et al., 2018). Entre esses métodos, podemos nos referir a explosão a vapor a qual é um método de pré-tratamento com processamento de alta eficiência. A função majoritária da explosão a vapor é abrir as paredes celulares da biomassa como um pré-tratamento para materiais lignocelulósicos. Assim, a amostra é exposta a um vapor de alta temperatura e alta pressão por um determinado tempo. Com estas condições o vapor é forçado a passar através das células e tecidos das amostras, e em seguida uma descompressão explosiva ocorre em milissegundos (LIANG et al., 2018). Durante esse curto período de tempo, o vapor superaquecido e a água líquida contidos nas amostras aumentam rapidamente e se separam da estrutura original. Desta maneira, a explosão a vapor tem muitas vantagens em relação a outros métodos de pré-tratamento, devido ao baixo consumo de energia, não utilizar aditivos químicos e pouca poluição ambiental (LIANG et al., 2018).

2.3. HIDRÓLISE DA FIBRA ALIMENTAR

A estrutura natural da fibra alimentar é composta por arranjos de microfibrilas, as quais são feixes de longas cadeias de celulose que estão estabilizadas por ligações de hidrogênio inter e intramoleculares (LIMA; BORSALI, 2004; SAMIR et al., 2005; AYUK et al., 2009). Essas microfibrilas se apresentam como os menores aglomerados de cadeia de celulose, reportando cadeias de cristais de celulose ligados por domínios dinâmicos (ZHAO et al., 2007).

As microfibrilas, em plantas, são dispostas em uma matriz constituídas dos componentes hemicelulose e lignina (LIMA; BORSALI, 2004; CORRÊA et al., 2010; PANDEY et al., 2010). A hemicelulose se caracteriza por ser um polissacarídeo não cristalino, que age como um plastificante natural, permeando as microfibrilas de celulose. Por sua vez, o outro principal componente a lignina, é formada pela desidrogenação de uma mistura de álcoois, onde os monômeros estão ligados por meio de ligações éter e carbono-carbono. A lignina é responsável pela vedação da parede e atua como um cimento amorfo das microfibrilas (HON e SHIRAISHI, 1990).

Os domínios amorfos de celulose em microfibrilas, reportados, são orientados aleatoriamente e são suscetíveis ao ataque ácido (LIMA; BORSALI, 2004; SAMIR et al., 2005). Por conseguinte, a hidrólise ácida da celulose ocorre, quando os íons hidrônio penetram nas regiões amorfas, promovendo a clivagem hidrolítica das ligações glicosídicas, o que resulta

em estruturas cristalinas semelhantes a agulhas, denominadas bigodes de celulose (CANDANEDO et al. 2005; HABIBI et al., 2010; PANDEY et al., 2010).

As hidrólises ácidas, geralmente ocorrem com a aplicação de ácidos fortes, como os ácidos sulfúrico (H_2SO_4) e clorídrico (HCl) (ARAKI et al., 1998; LIMA; BORSALI, 2004; SAMIR et al. 2005). A suspensão aquosa obtida da hidrólise de ácido sulfúrico é estável devido à repulsão eletrostática, gerada pela presença de íons sulfato que permanecem ligados à superfície da celulose após hidrólise, responsáveis por uma superfície de carga negativa (CAPADONA et al., 2009; LIMA; BORSALI, 2004). No entanto, a suspensão aquosa obtida a partir da hidrólise utilizando o ácido clorídrico não é estável eletrostaticamente (AYUK et al., 2009), porém é termicamente mais estável que o primeiro caso, devido à ausência de íons sulfato que podem causar degradação da celulose por meio de um processo de desidratação (ROMAN; WINTER, 2004; CORRÊA et al., 2010).

Desta maneira, é importante ressaltar que as características das fibras hidrolisadas dependem da sua fonte, devido aos diferentes graus de polimerização da celulose, bem como às condições de preparação da hidrólise, tais como tipo e concentração de ácido, duração e temperatura do processo de hidrólise (ARAKI et al., 1998; LIMA; BORSALI, 2004; SAMIR et al., 2005).

2.4. SECAGEM

O processo de evaporação de um líquido volátil contido em um sólido, é comumente chamado de secagem. Para remover este líquido, a secagem envolve as fenomenologias de transferência de massa e calor, os quais explicam a remoção da água, do interior do material até a sua superfície. Esta operação unitária tem por objetivo melhorar a preservação dos materiais, diminuindo os riscos de contaminações microbiológicas, e ainda reduzir peso e volume, o que proporciona redução dos custos em armazenagem, embalagem e transporte (GEANKOPLIS, 1993; MALAFRONTTE et al., 2012; FONTELES et al., 2018).

2.4.1. Isotermas de Equilíbrio e calor isostérico

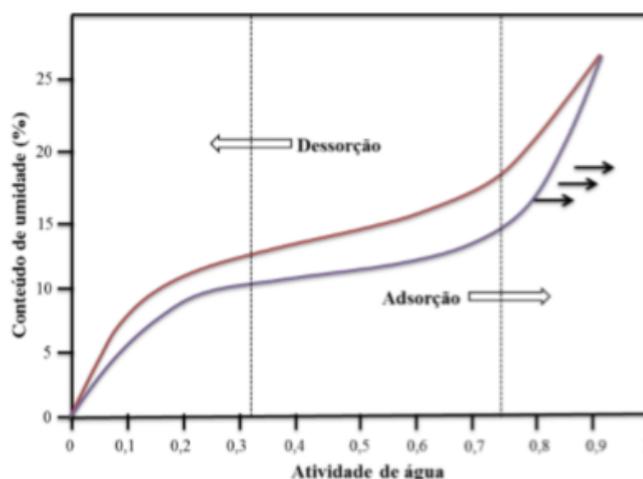
A fim de prever o teor de umidade em um material sólido ao longo do processo de secagem os conceitos de isotermas de equilíbrio e calor isostérico são apresentados a seguir.

2.4.1.1. Isotermas de Equilíbrio

Curvas de equilíbrio relacionando o conteúdo de umidade de um material em equilíbrio, com seu correspondente teor de umidade relativa do meio de secagem ou atividade de água, são chamadas de isotermas de sorção (DITCHFIELD, 2000; OLIVEIRA, 2006; PARK et al., 2007; PERUSSELLO, 2013; RESENDE et al., 2015; TIENDREBEOGO et al., 2015).

Estas isotermas de sorção, podem se apresentar de duas maneiras, como isoterma de adsorção ou dessorção. A isoterma de adsorção consiste na umidificação do material sólido, enquanto que a isoterma de dessorção representa a secagem do material sólido, e devido ao fenômeno da histerese, existem diferenças entre as curvas das isotermas de adsorção e de dessorção, logo elas não coincidem, como mostrado na Figura 8, para a *Spirulina*, na temperatura de 25 °C (OLIVEIRA, 2006; PARK et al., 2007).

Figura 8 - Curvas de adsorção e dessorção e descrição do fenômeno de histerese



Fonte: SOUZA (2015).

Para se determinar as curvas de equilíbrio, é necessário saber o teor de água final necessário para estabilizar um produto, por consequência é de extrema importância o conhecimento da atividade de água (a_w), pois esta é função da umidade relativa do ar (UR) em equilíbrio higroscópico com o produto, ou função da razão entre a pressão parcial de vapor d'água no material (P) e a pressão de vapor d'água pura (P_0), ambas na mesma temperatura (MULET et al., 2002).

Assim, a relação entre atividade de água e umidade relativa permite prever quais materiais biológicos irão ganhar ou perder umidade, quando expostos ao ar com uma determinada umidade. Destarte a Equação 1 apresenta a atividade de água. Sendo este fator uma medida da quantidade de moléculas de água livre ou ativas obtida em relação à pressão de

vapor da água pura (DITCHFIELD, 2000; OLIVEIRA, 2006; PARK et al., 2007; PERUSSELLO, 2013).

$$a_w = \frac{P}{P_0} = \frac{UR}{100} \quad (1)$$

Onde:

P: pressão de vapor de água (Pa);

P₀: pressão de vapor de água inicial (Pa);

UR: umidade relativa do ar (%).

2.4.1.2. Calor Isostérico

A diferença entre a entalpia da água na fase vapor e a entalpia na fase líquida adsorvida em um sólido conceitua termodinamicamente o Calor Isostérico. Esses dados de entalpia, são obtidos em geral a partir do equilíbrio higroscópico e, representam a quantidade de energia necessária para evaporar a água adsorvida na fase sólida do produto (LIMA et al., 2008).

O calor isostérico, comumente é considerado como um indicativo de forças de atração intermoleculares entre os sítios sortivos e a água, uma vez que o calor isostérico de sorção é maior que o calor latente de vaporização da água pura a uma dada temperatura (STRUMILLO, 2006 apud SOUSA, 2015).

As isotermas de sorção, são usadas para várias finalidades, como a determinação do tempo de secagem ou, ainda, previsões para misturar e embalar os produtos, prevendo as mudanças de umidade que ocorrem durante a armazenagem e, conseqüentemente, a sua estabilidade (RESENDE et al., 2015).

2.5. MODELAGEM COMPUTACIONAL

O desenvolvimento da modelagem físico-matemática é de extrema importância, para o projeto, otimização, controle e automação dos processos de secagem, o que contribui para que pesquisadores possam compreender melhor os fenômenos de transferência envolvidos na secagem (ALMEIDA, 2009; ROSA, 2010).

Desta maneira, o uso de métodos computacionais avançados, tem ganhado um importante espaço na descrição dos fenômenos envolvidos na secagem. Entre os diferentes métodos aplicados, a fluidodinâmica computacional, do inglês “*computational fluid dynamics*” (CFD), se destaca nas aplicações da área de engenharia (DEFRAEYE, 2014).

Os princípios da conservação de massa e energia, regem os mecanismos envolvidos na secagem. Estes princípios são denotados por equações matemáticas, sendo estas em geral representadas por equações diferenciais parciais (EDPs). Por sua vez o método CFD promove a resolução das EDPs, e com o avanço destas soluções no espaço e no tempo, se obtém a descrição numérica do campo de fluxo de interesse (WENDT, 1992).

O CFD tem uma importância tão forte na engenharia que é considerado como a terceira dimensão da dinâmica dos fluidos. As outras duas dimensões são as abordagens clássicas teórica e experimental (WENDT, 1992). Portanto, este ramo complementa a dinâmica de fluidos experimental e teórica, sendo uma alternativa mais barata e que permite o estudo de diversas condições operacionais que não são possíveis ou que são difíceis de serem obtidas experimentalmente (SANTOS, 2008; SAYMA, 2009).

Os softwares que utilizam o CFD, incluem interfaces modernas que apresentam códigos que contêm três elementos principais: um pré-processador, um solucionador (solver) e um pós-processador (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007; SAYMA, 2009).

O pré-processamento, refere-se à adição de informações a respeito do problema de escoamento que se deseja solucionar. Nesta fase inicial o usuário deve incluir a definição da geometria, a malha, a seleção dos fenômenos físicos e químicos que precisam ser modelados, a definição das propriedades dos materiais e as especificações das condições de contorno apropriadas (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Em relação a solução do problema físico pode ocorrer por variadas técnicas de solução numérica, o qual é resolvida dentro de cada subdomínio, gerado na malha. Usualmente as soluções numéricas mais praticadas são diferenças finitas, elementos finitos e métodos espectrais (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007; SIMIONI, 2015). A precisão das soluções resultantes, são regidas pelo número de elementos da malha e pela qualidade dos mesmos. Rotineiramente, quanto maior o número de elementos em uma malha, melhor será a precisão da solução, porém quanto maior for a precisão de uma solução, maior será o custo computacional e o tempo de cálculo para se obter as respostas (DEFRAEYE, 2014).

Por último o pós-processamento apresenta a visualização e a análise dos resultados. Os softwares que utilizam CFD estão equipados ainda, com ferramentas de visualização de dados, que incluem ilustrações em gráficos 2D e 3D, e até ferramentas de animação para exibição dos resultados de uma forma mais dinâmica (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

2.5.1. Comsol Multiphysics

O COMSOL Multiphysics foi o software utilizado neste estudo, para desenvolver a modelagem matemática. Este tem por intuito descrever as fenomenologias envolvendo a secagem em túnel de vento do bagaço e da pasta de bagaço de maçã.

O software utiliza-se de métodos numéricos avançados, com base na resolução de equações diferenciais parciais (EDPs), para modelar e simular problemas envolvendo diversas modalidades de fenômenos físicos (WANG et al., 2011; SANTOS, 2013; COMSOL, 2015).

Para desenvolver a modelagem, o COMSOL gera um sistema de equações lineares, a partir da compilação interna de um conjunto de equações que representam o modelo em sua totalidade, para posteriormente resolver este modelo por meio do método dos elementos finitos (MEF) (COMSOL, 2015).

O software consiste em três seções, o pré-processo, a solução e o pós-processo. A primeira representa a etapa de definição de parâmetros e criação do modelo de elementos finitos. A segunda etapa é referente a solução do conjunto de equações e a criação de malhas. Enquanto, por último no pós-processamento, ocorre a visualização e análise dos resultados obtidos na modelagem (WANG et al., 2011).

Neste estudo, foram utilizados 4 módulos do software para simular todo o processo de secagem, sendo dois para a transferência de massa, um que envolve a transferência de calor e um quarto a respeito do escoamento do ar no duto de secagem, sendo para este último utilizado um modelo de fluxo laminar.

2.5.2. Método dos Elementos Finitos

Uma das técnicas numéricas utilizada para resolver EDPs, é o conhecido método dos elementos finitos (MEF). Este artifício consiste em construir malhas, as quais são um conjunto de elementos ou células, sendo estes elementos a divisão do domínio em estudo (HUTTON, 2004; SAYMA, 2009; DHATT et al., 2012).

O método se dedica a obter uma solução para cada um dos elementos formados e, a partir desta, uma solução total é construída, somando as respostas individuais de cada elemento ao mesmo tempo, o que possibilita a união das fronteiras entre os elementos (WENDT, 1992; CHAPRA; CANALE, 2007; SAYMA, 2009).

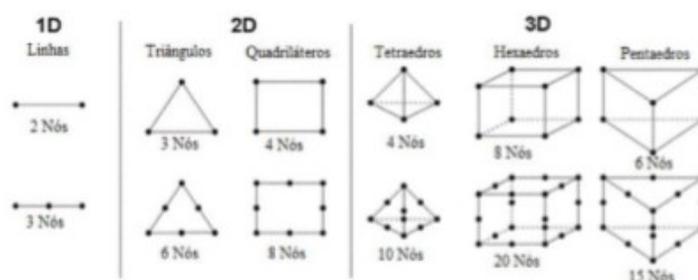
A crucial vantagem deste método é, que este tem a característica se adaptar às geometrias complexas, isto ocorre, pois, a malha não precisa ser estruturada. Desta maneira os

elementos podem possuir diferentes formas geométricas, desde perfis retilíneos até curvos (WENDT, 1992; CHAPRA; CANALE, 2007; SAYMA, 2009; DICKINSON et al., 2014).

O método dos elementos finitos apresenta um erro numérico associado. Este erro, também é evidenciado nos outros métodos numéricos discretos, os quais são utilizados para resolução de EDPs. Duas alternativas podem ser utilizadas para minimizar os erros da solução. A primeira maneira é introduzir elementos menores, com isto, serão obtidos erros menores de discretização; por outro lado, maiores serão os tempos de geração da malha e solução. A segunda possibilidade é refinar a malha em locais, onde os gradientes de fluxo mudam rapidamente (DICKINSON et al., 2014).

Para a implementação do método dos elementos finitos, um procedimento genérico é utilizado. O primeiro passo a ser seguido, é possibilitar uma série de opções de formas dos elementos, sendo que isto é possível a partir da discretização do domínio de solução em elementos finitos. Em termos de dimensões, podem ser de uma dimensão (linhas), duas dimensões (triângulos e quadriláteros) ou então tridimensionais (tetraedros, hexaedros, pentaedros e prisma) (WENDT, 1992). Na Figura 9 são apresentados exemplos de elementos empregados em uma, duas e três dimensões.

Figura 9 - Variedade das formas dos elementos finitos, de acordo com as dimensões



Fonte: DICKINSON et al., (2014).

O segundo passo para implementar o método dos elementos finitos, consiste em aproximar a solução do problema a partir de interpolações em cada elemento estudado. Neste passo, duas ações são realizadas. Na primeira se encontra a função conveniente, com coeficientes a serem descobertos, que irá aproximar a solução. Em seguida, a segunda ação a ser realizada é responsável pelo desenvolvimento da equação que representa o comportamento do elemento. Os coeficientes em questão tendem a ser determinados de maneira que a função se aproxime de uma solução ótima. A fim de encontrar esta solução ótima, métodos numéricos

são necessários, sendo estes de três modos: o método direto, o método dos resíduos ponderados e o método variacional (CHAPRA; CANALE, 2007).

O terceiro passo refere-se a montagem ou acoplamento de todo o sistema, de maneira a representar o comportamento de todo o conjunto, o qual é composto por um grupo de equações algébricas para cada elemento. A solução total é contínua, pois as respostas para cada um dos elementos contínuos são combinadas, uma vez que o processo é dirigido pelo conceito da continuidade, assim são equivalentes os valores dos nodos (CHAPRA; CANALE, 2007).

Para resolver o problema, sistemas algébricos são utilizados como técnicas para resolver os conjuntos de equações, a partir da aplicação das devidas condições de contorno. Chegando na etapa final do MEF, chamado de pós-processamento, onde nesta etapa, os resultados gerados são reportados em tabelas e gráficos (SANTOS, 2013).

2.5.3. Classificação dos escoamentos

É primordial entender a natureza dos escoamentos, para que se possa desenvolver estudos sobre a dinâmica dos fluidos, pois os escoamentos podem se diferenciar por inúmeras características, como a geometria, a presença de variações da velocidade e propriedades escalares.

Por sua vez a secagem por convecção apresenta escoamento do ar em torno de um material que se deseja secar, sendo este ar responsável pelo transporte de massa. Algumas classificações para os escoamentos são reportadas na literatura especializada, como escoamento transiente (as grandezas variam com o tempo) ou estacionário ou permanente (as grandezas não variam com o tempo) (DISCONZI, 2011).

Regime laminar ou turbulento é outra classificação atribuída aos escoamentos. Laminar é quando ocorre somente movimento molecular, o fluido se move como camadas escorregando uma sobre a outra, como lâminas. O Regime turbulento, por seu lado, demonstra movimento desordenado e macroscópico, sendo este comportamento devido aos componentes transversais ao movimento, provocando irregularidades no escoamento (SOUZA, 2009; WEISE; SCHOLL, 2009).

O número de Reynolds é utilizado para classificar o estado em que o fluido se encontra, ou seja, um escoamento em regime laminar ou turbulento. Este expressa a relação entre as forças inerciais (F_i) que ocorrem devido a velocidade de escoamento e as forças viscosas (F_μ). Quando calculado para escoamento em tubulações, Reynolds é um número adimensional e, é calculado pela Equação 2 (WEISE; SCHOLL, 2009).

$$R_e = \frac{\sum F_i}{\sum F_\mu} = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2)$$

Onde:

ρ : massa específica do fluido (kg m^{-3});

v : velocidade do escoamento (m s^{-1});

D : diâmetro da tubulação (m);

μ : viscosidade dinâmica do fluido ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$).

2.6. CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DO ESTADO DA ARTE

2.6.1. Valorização do Bagaço de Maçã

Encontrar alternativas para aproveitar e valorizar o consumo do bagaço de maçã são o tema de diversos estudos, como o desenvolvido por LUO et al. (2020), os quais aplicaram duas etapas levemente ácidas usando baixos teores de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Na primeira, a pectina foi extraída do bagaço de maçã usando solução aquosa de H_2SO_4 0,1 N a 100°C , e o resíduo sólido foi separado. A segunda etapa se caracterizou pela hidrólise efetiva das hemiceluloses com processamento ácido a 120°C . Com este processamento os autores conseguiram melhorar os benefícios econômicos e ambientais advindos da utilização do bagaço de maçã.

Outra maneira de aumentar o valor do bagaço de maçã envolve a extração das fibras alimentares solúveis, que possuem potencial significativo para o processamento de alimentos. XUELI et al. (2014) extraíram fibras solúveis por vários métodos: ácido que é o considerado o convencional; enzimático, utilizando a enzima celulase; micro-ondas; e ultrassom. De acordo com os autores do estudo, por todos os métodos foi possível hidrolisar o bagaço de maçã e obter a fibra alimentar solúvel com elevada funcionalidade.

2.6.2. Estudo cinético da reação ácida no Bagaço de Maçã

Em geral o tratamento ácido no bagaço de maçã tem por objetivo, melhorar a estrutura do bagaço, extrair a pectina e compostos fenólicos, além de obter álcoois. Fatores como temperatura de extração, pressão, solvente (tipo, polaridade, massa molar), razão sólido/líquido, tamanho de partícula de biomassa e distribuição de tamanho de partícula são conhecidos por afetar a cinética de extração (PERUSSELLO et al., 2017).

Em seu estudo, LUO et al. (2020) observaram a cinética de reação ácida do bagaço de maçã utilizando baixas concentrações de H_2SO_4 a 120°C , constatando uma mudança

significativa nas composições químicas e propriedades estruturais do bagaço de maçã; além do homopolissacarídeo da celulose, o heteropolissacarídeo das hemiceluloses foi digerido e solubilizado seletivamente a partir dos espaços intercelulares dos tecidos do bagaço de maçã.

PANCHEV et al. (1989) estudaram a cinética de extração da pectina do bagaço de maçã usando ácido nítrico 0,5% nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C, obtendo taxas de extração mais altas para temperaturas mais altas.

CHO e HWANG (2000) investigaram a cinética de extração da pectina do bagaço de maçã usando solução de ácido clorídrico (HCl) em diferentes temperaturas. A extração seguiu um modelo cinético de primeira ordem, e os resultados reportados mostraram que os polissacarídeos solúveis atingiram o rendimento máximo de extração mais cedo em uma temperatura mais alta, e o teor máximo também foi ligeiramente superior.

No trabalho desenvolvido por WANG e WELLER (2006), a razão solvente/matriz e o tamanho das partículas da matriz também influenciaram na cinética de extração da pectina por ultrassom, considerando a atenuação da intensidade do ultrassom para partículas de grande porte.

EL-NAWAWI e SHEHATA (1987) também corroboraram concluindo que rendimentos mais altos para extração da pectina podem ser obtidos com tamanhos de partícula menores devido ao aumento da área de contato entre a matriz e o solvente e ao pequeno caminho de difusão do solvente através da matriz. No entanto, partículas muito finas podem impedir o fluxo de solvente por todo o material.

Em seu estudo SIQUEIRA et al. (2010), utilizaram ácido sulfúrico em vez de ácido clorídrico, mesmo que este último permita obter partículas de celulose isentas de carga superficial da mesma maneira que se obtém realizando hidrólise enzimática. O tratamento de hidrólise ácida das fibras foi realizado com uma solução de H₂SO₄ a 55% em peso, pré-aquecido a 45 °C, 50 °C ou 60 °C, durante 30 ou 20 min.

Por sua vez, TAIPINA et al. (2012) realizaram a hidrólise das fibras alimentares utilizando ácido sulfúrico (H₂SO₄) 65 % em peso, a 55 °C por 30 min. Neste estudo foi observado a fragmentação das fibras após a hidrólise apresentando uma geometria tipo agulha.

PALME et al. (2016) realizou hidrólise ácida utilizando ácido clorídrico 0,4 M à 80 °C, variando o tempo de hidrólise em 15, 30, 60, 120 e 240 min. Após a hidrólise foi observado alteração na estrutura das fibras, com melhora nas suas propriedades funcionais.

2.6.3. Estudos experimentais e de modelagem matemática da secagem do bagaço e da pasta de maçã

No trabalho de SHARMA et al. (2016), a secagem do bagaço de maçã foi realizada em um secador tipo túnel de vento com o objetivo de aumentar a durabilidade de armazenamento do bagaço de maçã seco. Ficou demonstrado que o bagaço seco apresenta estabilidade e qualidade satisfatórias após o período de estocagem.

LUO et al. (2020) desenvolveram processos de secagem do bagaço de maçã e da pasta resultante do processamento ácido com H_2SO_4 em diferentes concentrações e a $120\text{ }^\circ\text{C}$, onde observaram que o processo de secagem da pasta ocorreu mais lentamente do que a secagem do bagaço de maçã devido às alterações ocorridas na estrutura do bagaço durante o processo de reação ácida.

YAN & KERR (2013) estudaram a secagem do bagaço de maçã em um secador de esteira com vácuo, variando a temperatura do ar de secagem entre $80\text{ }^\circ\text{C}$ e $110\text{ }^\circ\text{C}$ e mantendo uma espessura de material a ser seco de 5 mm. Nas análises efetivadas o rendimento da secagem foi adequado e as características do material seco foram mantidas para a faixa de temperatura do ar de secagem entre $80\text{ }^\circ\text{C}$ e $95\text{ }^\circ\text{C}$.

A secagem do bagaço de maçã com sua simulação no software Aspen[®] foi desenvolvida por ALMEIDA et al. (2015), segundo um modelo difusivo que considerou uma difusividade efetiva. A melhor condição de secagem obtida foi de $68,3\text{ }^\circ\text{C}$, $46,3\text{ kPa}$ com 4,27 horas de secagem. Nos casos estudados, os valores da difusividade efetiva variaram entre $1,61 \times 10^{-11}\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ a $6,8 \times 10^{-11}\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$.

LUO et al. (2020) para modelar os experimentos de secagem do bagaço de maçã e da pasta resultante do processamento ácido com H_2SO_4 em diferentes concentrações e a $120\text{ }^\circ\text{C}$, consideraram somente um modelo difusivo e do mesmo modo utilizaram a Primeira Lei de Fick da transferência de massa para avaliar o processo e calcular a difusividade efetiva.

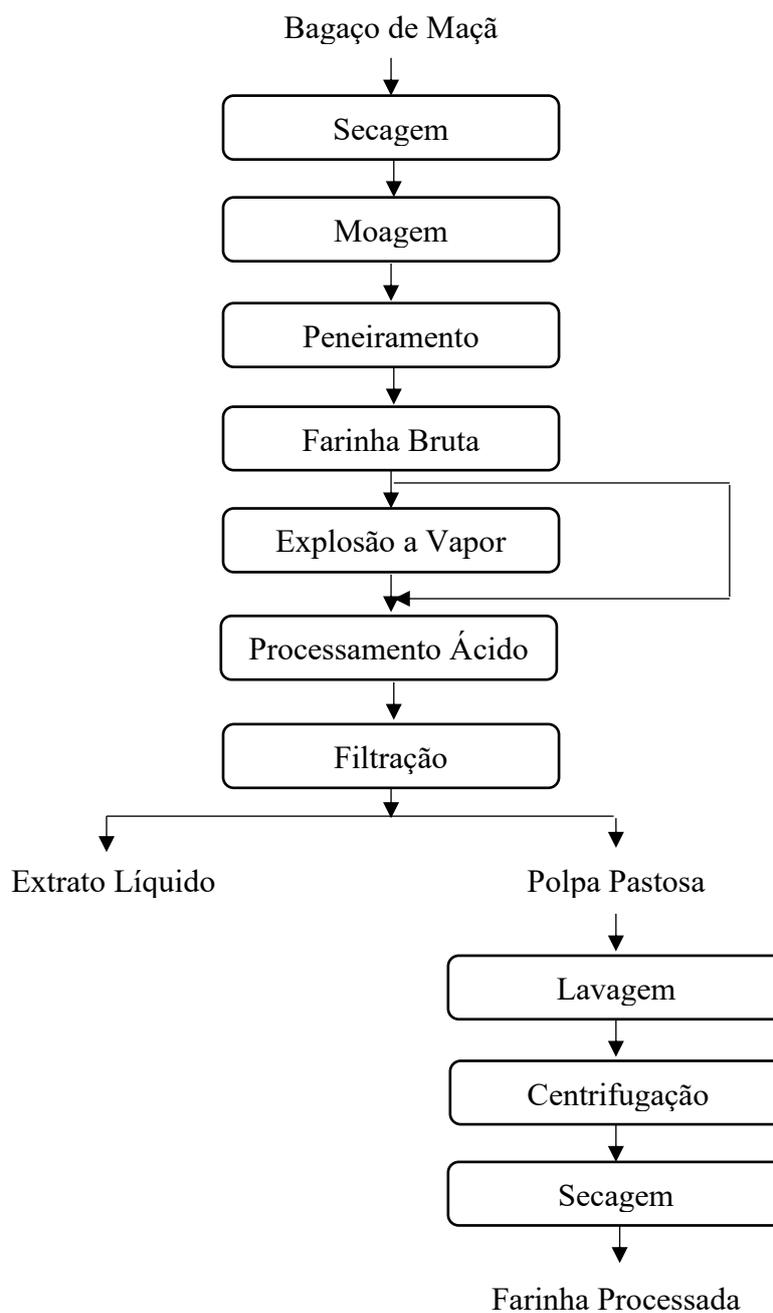
A secagem em camada delgada também foi investigada por WANG et al. (2007), com ar aquecido e depois com micro-ondas, onde a secagem ocorreu nas condições do ar de $105\text{ }^\circ\text{C}$ e fluxo de ar de $1,2\text{ m s}^{-1}$. Diversos modelos matemáticos foram avaliados no referido estudo, mas o que apresentou melhor desempenho foi o modelo difusivo da primeira Lei de Fick, obtendo-se difusividades efetivas entre $2,99 \times 10^{-8}\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ e $3,68 \times 10^{-8}\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. PROCESSAMENTO DO BAGAÇO DE MAÇÃ

As etapas de processamento e caracterização do bagaço e dos produtos resultantes em laboratório estão descritas nas etapas seguintes e apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma de obtenção experimental da fibra alimentar a partir do bagaço de maçã



Fonte: Desenvolvido pelo próprio autor.

Para o desenvolvimento do estudo foram obtidos 40 kg do bagaço, gentilmente cedidos pela empresa Fischer Sucos sediada em Videira SC, onde este resíduo foi coletado da fábrica de processamento de suco de maçã. Os cultivares de maçã utilizados para a produção deste suco foram Fuji e Gala, divididos em percentuais iguais.

3.1.1. Preparação do Bagaço de Maçã

Após o bagaço de maçã ser coletado na fábrica de suco de maçã, este foi preparado para ser processado. Para realizar isto, a amostra foi colocada em bandejas de alumínio de maneira homogênea. As bandejas foram colocadas em um secador convectivo com fluxo de ar transversal a uma temperatura média de 55 °C, por 8 h.

Após serem retiradas do secador, as amostras passaram pelo processo de moagem, em um moinho de martelo (MA600/CF - Marconi – Piracicaba – Piracicaba – São Paulo, Brasil), a 2500 rpm. Logo depois, o bagaço moído foi colocado em um conjunto de peneiras (Bertel – Caieiras – São Paulo, Brasil) e este conjunto foi colocado em um vibrador de peneiras (4893 – Bertel – Caieiras – São Paulo, Brasil) por 10 minutos, sendo aproveitado para as etapas seguintes, somente o bagaço que ao término da agitação, apresentou granulometria inferior a 212 µm (MESH 65).

3.2. CARACTERIZAÇÃO DO BAGAÇO DE MAÇÃ E DAS FARINHAS

Com o bagaço de maçã seco e moído, este passou por um processo de caracterização físico-química e funcional, para possibilitar uma posterior comparação com a farinha resultante após as etapas de processamento. As análises realizadas foram: proteína, fibra total, fibra solúvel, fibra insolúvel, cinzas, lipídeos, carboidratos não fibrosos e umidade, e todas elas se procederam em triplicatas e suas médias e desvios padrões foram calculados.

3.2.1. Análise do teor de umidade

Para realizar as análises de umidade, os cadinhos com 5 g de amostras de bagaço maçã ou farinha processada foram colocados em estufa digital e mantidos por 24 h a uma temperatura de 105 °C, de acordo com as normas da Associação Oficial de Análises Químicas (AOAC INTERNACIONAL, 2005), utilizando estufa digital com circulação de ar (Q314M242 - Quimis – Diadema – São Paulo, Brasil). Os valores de umidade das

triplicatas realizadas foram calculados conforme a Equação 3, para umidade do bagaço em base seca ($X_{b,bs}$) e pela Equação 4 para umidade do bagaço em base úmida ($X_{b,bu}$).

$$X_{b,bs} = \frac{m_A}{m_{ms}} \quad (3)$$

$$X_{b,bu} = \frac{m_A}{m_{mu}} \quad (4)$$

Onde:

m_A : massa de água no material (kg);

m_{ms} : massa de material seco (kg);

m_{mu} : massa de material úmido (kg).

3.2.2. Análise do teor de proteínas total

O método 46-12 da American Association of Cereal Chemistry International (AACC, 1999), adaptado do método Kjeldahl, foi utilizado para determinar o teor de proteína total nas amostras. O princípio deste método é determinar a quantidade total de nitrogênio após digestão da amostra em ácido sulfúrico e o fator de conversão de nitrogênio total em proteína utilizado foi 6,25 (AACC, 1999). Os ensaios foram realizados em triplicata em todas as amostras utilizando digestor (Q328521 – Quimis - Diadema – São Paulo, Brasil) e destilador (Q327M242 – Quimis - Diadema – São Paulo).

3.2.3. Análise do teor de lipídeos

A identificação do teor de lipídeos foi realizada de acordo com o método 30-25 da AACC (1999). Logo, 5 g de amostra foram colocadas em um cartucho de soxhlet e seguida direcionado para secar em estufa a 105 °C por 5 h. Balões contendo éter de petróleo, foram conectados ao extrator (Modelo TE188/6 - Tecnal - Piracicaba - São Paulo, Brasil) juntamente com um tubo extrator contendo o cartucho com a amostra previamente seca. Passado 4 h de extração, o éter foi recuperado e o balão com o resíduo foi posto na estufa a 105 °C por 1,5 h. O teor de lipídeos foi calculado com base na Equação 5.

$$\% \text{ Lipídeos} = \frac{m_L}{m_{am}} \times 100\% \quad (5)$$

Onde:

m_{am} : massa da amostra utilizada para análise;

m_L: massa de lipídeos encontrada na análise.

3.2.4. Análise do teor de carboidratos não fibrosos

Para proceder com o método de determinação de carboidratos não fibrosos, foi utilizado o método de Fehling, que consiste basicamente em preparar duas soluções padronizadas de Fehling. A primeira A com sulfato de cobre II penta hidratado e a segunda solução de Fehling B, com tartarato de sódio e potássio PA e hidróxido de sódio PA. Após isso as amostras que se desejam analisar são diluídas em ácido e fervidas, para posteriormente serem colocadas em autoclave. Na sequência estas foram neutralizadas com hidróxido de sódio e filtradas. O filtrado foi utilizado para titular uma solução de 10 mL de solução de Fehling A e 10 mL da B e 40 mL de água destilada, e o cálculo do teor de lipídeos e obtido pela Equação 6 (IAL, 2005).

$$A_T = \frac{V_{bd} \times a}{V \times m_{am}} \times 100\% \quad (6)$$

Onde:

A_T: percentual de açúcares totais (%);

a: gramas de glicose correspondente a 10 mL das soluções de Fehling (g);

V_{bd}: volume do balão de diluição (mL);

V: volume do titulante gasto (mL);

m_{ma}: massa da amostra (g).

3.2.5. Análise do teor de cinzas

O teor de cinzas foi obtido de acordo com o método 08-01 da AACC (1999). Foram medidos 5 g de amostra e colocadas em um cadinho de porcelana. O mesmo foi colocado na mufla (3000 3P-S – EDG – São Carlos – São Paulo, Brasil) durante 2 h a 200 °C, seguidas de 6 h a 550 °C. O percentual de cinzas foi então calculado conforme a Equação 7.

$$\% \text{ Cinzas} = \frac{m_c}{m_{am}} \times 100\% \quad (7)$$

Onde:

m_c: massa de cinzas ao final do experimento (kg);

m_{am} : massa inicial da amostra (kg).

3.2.6. Análise de Fibra Alimentar Insolúvel

O método para determinação de fibra alimentar insolúvel, foi o método gravimétrico de Weende. Este método procedeu com a adição de 2 g de amostra em um balão e adicionou-se 2 g de ácido tricloroacético, 5 mL de ácido nítrico e 70 mL de ácido acético a 70%. O balão com a amostra foi colocado em um sistema de refluxo para digerir a amostra por 30 min. Após isto a amostra foi filtrada sob vácuo em um cadinho de vidro. O cadinho foi secado em estufa a 105 °C por 4 h e o teor de fibra insolúvel foi calculado conforme a Equação 8 (Brasil, 2005; CECCHI, 2001).

$$FAI = \frac{m_r}{m_{ma}} \times 100\% \quad (8)$$

Onde:

m_r : massa do resíduo da análise;

m_{ma} : massa da amostra utilizada na análise;

FAI: teor de fibra alimentar insolúvel.

3.2.7. Análise de Fibra Alimentar Solúvel

Para obter o percentual de fibra alimentar solúvel, foi realizada a diferença entre 100% da massa da amostra e os teores de fibra alimentar insolúvel, cinzas, umidade, carboidratos não fibrosos, proteína total e lipídeos.

3.2.8. Análise de Fibra Alimentar Total

O teor de fibra alimentar total foi obtido a partir da soma dos percentuais das fibras alimentares solúveis e insolúveis.

3.3. VALORIZAÇÃO DO BAGAÇO DE MAÇÃ

3.3.1. Explosão a Vapor

Para realizar o processo de explosão a vapor, a amostra de farinha de bagaço de maçã foi mantida em autoclave com pressão de 1,2 kgf cm⁻² por 10 min com uma temperatura média de 120 °C, conforme metodologia sugerida por LIANG et al. (2018).

3.3.2. Hidrólise Ácida da Farinha de Bagaço de Maçã

Uma amostra de 20 g de bagaço de maçã moído, desidratado e peneirado em peneira de 210 μm , foi diluído em 0,4 L de uma solução de ácido clorídrico 0,1 mol L⁻¹. A solução foi posta em um banho termostático sob agitação contínua a temperatura de 80 °C por 100 min.

Posteriormente, cada uma das soluções que passaram pelo processo de hidrólise foi filtrada em filtro de papel. O material retido no filtro foi lavado com 0,5 L de água destilada e em seguida as amostras foram secadas em estufa com circulação de ar a 55 °C por 24 horas, com subsequente caracterização centesimal dos materiais.

Para avaliar o perfil cinético foi determinado a concentração de açúcar redutor na solução ácida ao longo do tempo. Para isto, amostras, na mesma diluição que o processo de hidrólise citado, foram colocadas em micro tubos de ensaios e estes mantidos no banho termostático com a mesma temperatura. De acordo com a variação de tempo os tubos de ensaios foram retirados e imediatamente refrigerados. Os tubos foram centrifugados e o teor de açúcar redutor na solução sobrenadante foi determinado pelo método DNS.

3.3.3. Determinação de Açúcar Redutor e Açúcar Total

O método de DNS foi utilizado para se determinar o teor de açúcar redutor e açúcar total. O teste de DNS (ácido dinitrosalicílico) baseia-se na reação entre o açúcar redutor e o ácido 3,5-dinitrosalicílico (cor amarelo), que é reduzido a um composto colorido avermelhado, o ácido 3-amino-5-nitrosalicílico, oxidando o monossacarídeo redutor e os sacarídeos redutores. Para proceder com o procedimento uma alíquota da amostra foi retirada e reagida com reagente DNS em ebulição e, em seguida resfriada. A leitura de absorvância desta amostra foi realizada em espectrofotômetro a 540 nm e comparado com a curva padrão para se obter o teor de açúcar redutor.

A análise do teor de açúcar total foi realizada utilizando o mesmo procedimento, com exceção da hidrólise da amostra que foi desenvolvida antes com ácido clorídrico 2,0 mol L⁻¹ em banho maria em ebulição por 10 min (BOBBIO, et al., 2005; CECCHI, et al., 2003).

3.4. CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DAS FARINHAS PROCESSADAS

3.4.1. Caracterização de grupos funcionais por infravermelho (FTIR)

Para caracterizar a estrutura da farinha de bagaço de maçã e das amostras processadas em autoclave e em solução ácida por grupos funcionais, bem como de seus materiais processados, foi realizada por meio da análise por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). As medidas foram feitas com um espectrômetro FTIR, Agilent, modelo Carry 660. As amostras processadas foram misturadas com KBr e analisadas no módulo de reflectância difusa. Para cada amostra foi feito a média de 50 varreduras no intervalo 4000 - 400 cm^{-1} e resolução de 4 cm^{-1} , sendo o mesmo procedimento realizado em todas as amostras.

3.4.2. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

As curvas de DSC das amostras de farinha de bagaço de maçã e das farinhas processadas em autoclave e solução ácida foram obtidas utilizando-se um equipamento Netzsch® Jupiter STA 449 F3 (Selb, Germany), calibrado com padrão referência de índio puro (99,99%). Amostras de aproximadamente 10 mg foram colocadas em placas de alumina, sob atmosfera de nitrogênio (100 mL min^{-1}) e aquecidas entre 30 °C e 400 °C com taxa de aquecimento de 20 °C min^{-1} .

3.4.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A análise por MEV (JEOL JSM 6390 LV) foi realizada no Centro de Microscopia Eletrônica (Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil). As amostras foram fixadas nos stubs e, devido as amostras apresentarem baixa condução elétrica, foram recobertas com uma fina camada de ouro. A fim de avaliar a estrutura física das diferentes farinhas processadas em autoclave e solução ácida a análise de microscopia de varredura foi realizada com ampliações de 700x, 1000x, 3000x, 6000x e 10000x, com os quatro tipos de farinhas processadas nos experimentos.

3.5. PROPRIEDADES FUNCIONAIS DAS FARINHAS PROCESSADAS

A capacidade em reter água (CRA) e retenção de óleo (CRO) são características primordiais das fibras alimentares, pois possibilita a sua aplicação industrial. Por consequência esta propriedade também foi analisada. Logo, seguindo o método proposto por NAVARRO-GONZALEZ et al. (2011), apud LI et al. (2014), em um tubo de ensaio de 50 mL, foi colocado uma amostra de 250 mg de resíduo de maçã seco medido em balança analítica e moído e adicionado 25 mL de água destilada para análise de CRA e 25 mL de óleo de soja refinado para determinar a capacidade de retenção de óleo. Por conseguinte, a mistura foi mantida sob agitação em vortex shaker (586 - Quimis - Diadema – São Paulo, Brasil) por 30 min a temperatura ambiente e em seguida colocada em uma centrífuga de bancada (8BT – ITR – SP Labor – Presidente Prudente – São Paulo, Brasil) a uma velocidade de 3000 rpm por 25 min. No final da centrifugação o sobrenadante foi descartado e a capacidade de retenção de água foi expressa por g de água absorvida por 1 g de amostra e a capacidade de retenção de óleo foi expressa por g de óleo absorvido por 1 g de amostra.

3.6. SECAGEM EM CAMADA DELGADA

Para o estudo da secagem em camada delgada do material processado, oriundo do bagaço de maçã, foram utilizadas duas abordagens: a primeira de cunho experimental e a segunda orientada por princípios de modelagem matemática e simulação.

3.6.1. Estudo Experimental

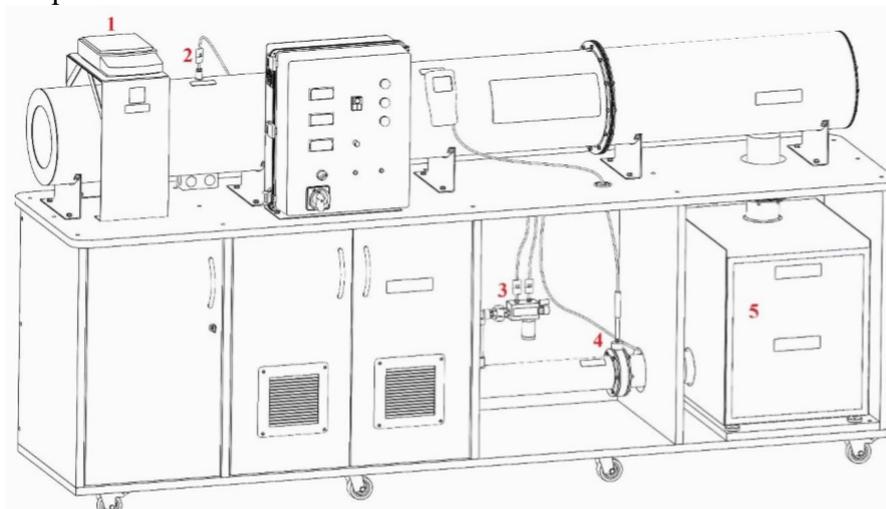
Referente ao estudo experimental este foi dividido em duas partes. Inicialmente, o equipamento utilizado na secagem da pasta de bagaço de maçã foi minuciosamente descrito, enquanto na segunda parte, são apresentados os procedimentos e parâmetros empregados durante os experimentos.

3.6.2. Equipamento de Secagem

Os experimentos envolvendo a secagem em camada delgada da pasta de bagaço de maçã foram realizados em um secador convectivo do tipo túnel de vento, localizado no Laboratório de Processos Industriais da Universidade do Oeste de Santa Catarina

(UNOESC) Campus Videira. A representação do secador utilizado está reportada no desenho esquemático na Figura 11.

Figura 11 - Desenho esquemático do secador convectivo utilizado nos experimentos (1) Balança semi-analítica; (2) Sensor de temperatura; (3) Psicrômetros; (4) Anemômetro (5) módulo de aquecimento



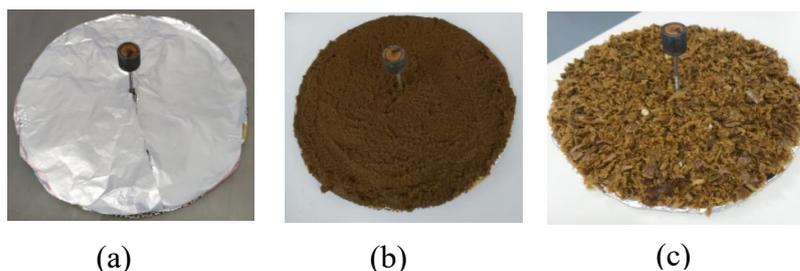
Fonte: o autor.

O Secador Túnel de Vento utilizado, com um túnel de 2,6 m de comprimento e 0,2 m de diâmetro é composto por um soprador de ar centrifugo de 1 CV com controle de vazão de ar por inversor de frequência que fornece o ar para a secagem. A velocidade do fluxo de ar foi medida com um anemômetro de fio quente digital e portátil (4) com uma precisão de $0,1 \text{ m s}^{-1}$. O aquecimento do ar foi realizado enquanto o ar fluía através de um módulo de aquecimento (5) contendo um conjunto de resistências elétricas e um sensor de temperatura (pt-100). As temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido do ar antes do aquecimento foram medidas no psicrômetro utilizando sensores de temperatura tipo pt-100 (3), enquanto a temperatura do ar de secagem foi medida por termopar pt-100 (2) com controlador PID (modo de ação proporcional, integral e derivativo) em conjunto com o módulo de aquecimento. A pesagem foi realizada através de uma balança eletrônica semi analítica (1) com precisão de 0,01 g. Para efetivar a secagem, a pasta de bagaço de maçã foi uniformemente distribuída sobre uma bandeja metálica acoplada ao sistema de pesagem. A bandeja circular tinha 0,186 m de diâmetro e 0,006 m foi a espessura da camada de pasta e do bagaço.

3.6.3. Procedimento experimental

Uma camada de aproximadamente 0,006 m de espessura de pasta de bagaço de maçã e de bagaço de maçã foi colocada sobre uma bandeja metálica de diâmetro igual a 0,168 m. A Figura 12 exibe as imagens das amostras com a referida bandeja.

Figura 12 - Bandeja com as amostras para secagem. Imagem (a) bandeja metálica, (b) bandeja com a pasta de bagaço de maçã e (c) bandeja com a amostra de bagaço de maçã antes da secagem



Fonte: o autor.

A fim de avaliar o comportamento da secagem dos materiais, foram empregadas condições de temperatura e velocidade do ar próximos aos melhores desempenhos observados em estudos anteriores, como em BATISTA et al. (2007) e DOTTO et al. (2018) e também em ensaios preliminares. Essas condições operacionais reportam melhores eficiência energética e reprodução computacional. As condições de secagem empregadas estão reportadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Condições operacionais empregados nos experimentos de secagem em camada delgada

Experimentos	Condições operacionais	
	Temperatura (°C)	Velocidade (m s ⁻¹)
1	70	2,5
2	70	1,7
3	60	2,5
4	60	1,7
5	65	2,1
6	65	2,1
7	65	2,1

Fonte: o autor.

Para os primeiros 3 min do processo de secagem, a massa úmida da pasta foi contabilizada em intervalos de 20 s; entre os 3 min e 5 min a cada 30 s; entre 5 min e 10

min a cada 01 min; e entre 10 min e 20 min a cada 02 min. Após este tempo foram realizadas anotações a cada 05 min até o término da secagem o qual se caracterizou pela não variação da massa da amostra por no mínimo 05 min. A determinação da massa de sólido seco, que permite calcular a umidade do produto ao longo de cada experimento, foi realizada em estufa operando a 70 °C, durante 24 h.

3.7. ESTUDO COMPUTACIONAL DA SECAGEM EM CAMADA DELGADA

Para desenvolver a modelagem computacional a fim de simular a secagem em camada delgada da pasta de bagaço de maçã, considerou-se a secagem como uma evaporação em meio poroso, onde os seguintes fenômenos foram considerados: escoamento do ar de secagem, transferência de calor e transferência de massa nos estados líquido e vapor. Todos esses efeitos foram fortemente acoplados no COMSOL Multiphysics usando interfaces predefinidas.

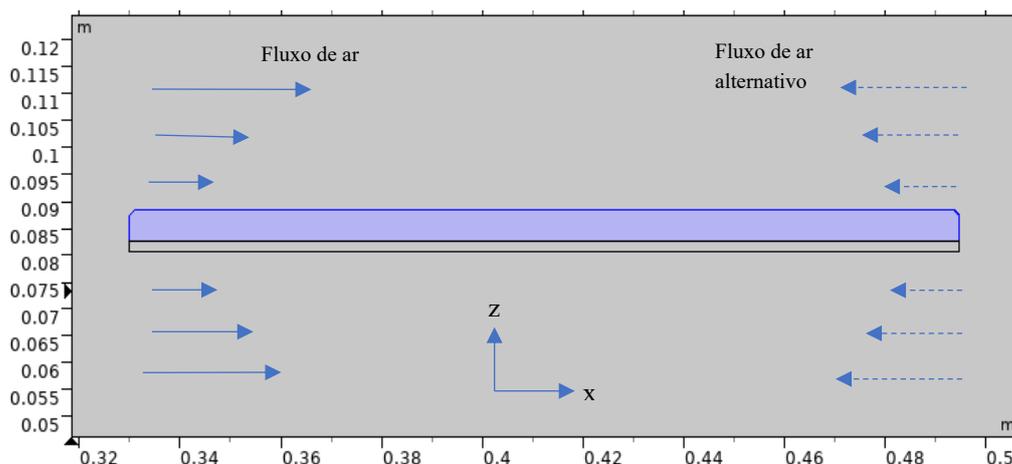
3.7.1. Desenvolvimento do Modelo

Neste modelo, a variação da saturação de água dentro do meio poroso foi calculada. Este modelo focou nas etapas necessárias para implementar o fluxo multifásico no meio poroso junto com a evaporação da fase líquida para a fase gasosa.

Desta maneira o modelo descreve um fluxo laminar de ar úmido através de um meio poroso contendo vapor de água e água líquida. Assim, um modelo plano em duas dimensões (2D) foi desenvolvido para descrever os fenômenos envolvidos na secagem em camada delgada da pasta de bagaço de maçã. A seção de secagem do domínio computacional, onde se encontra a bandeja (que corresponde a um corte vertical e longitudinal), bem como a indicação do fluxo de ar cuja direção é alterada a cada 600 s, é mostrada na Figura 13.

As dimensões apresentadas na Figura 13 correspondem àquelas utilizadas na simulação. Como o modelo é bidimensional, a bandeja é assimilada a um quadrado de mesma área que o círculo que corresponde à bandeja original; assim, o quadrado é de 0,165 m de lado e da mesma maneira o túnel foi considerado como um canal de seção transversal quadrada com altura de 0,177 m. As espessuras da bandeja e da camada de polpa de bagaço permaneceram as mesmas: 0,002 m e 0,006 m, respectivamente.

Figura 13 – Parte do domínio computacional onde se encontra a bandeja



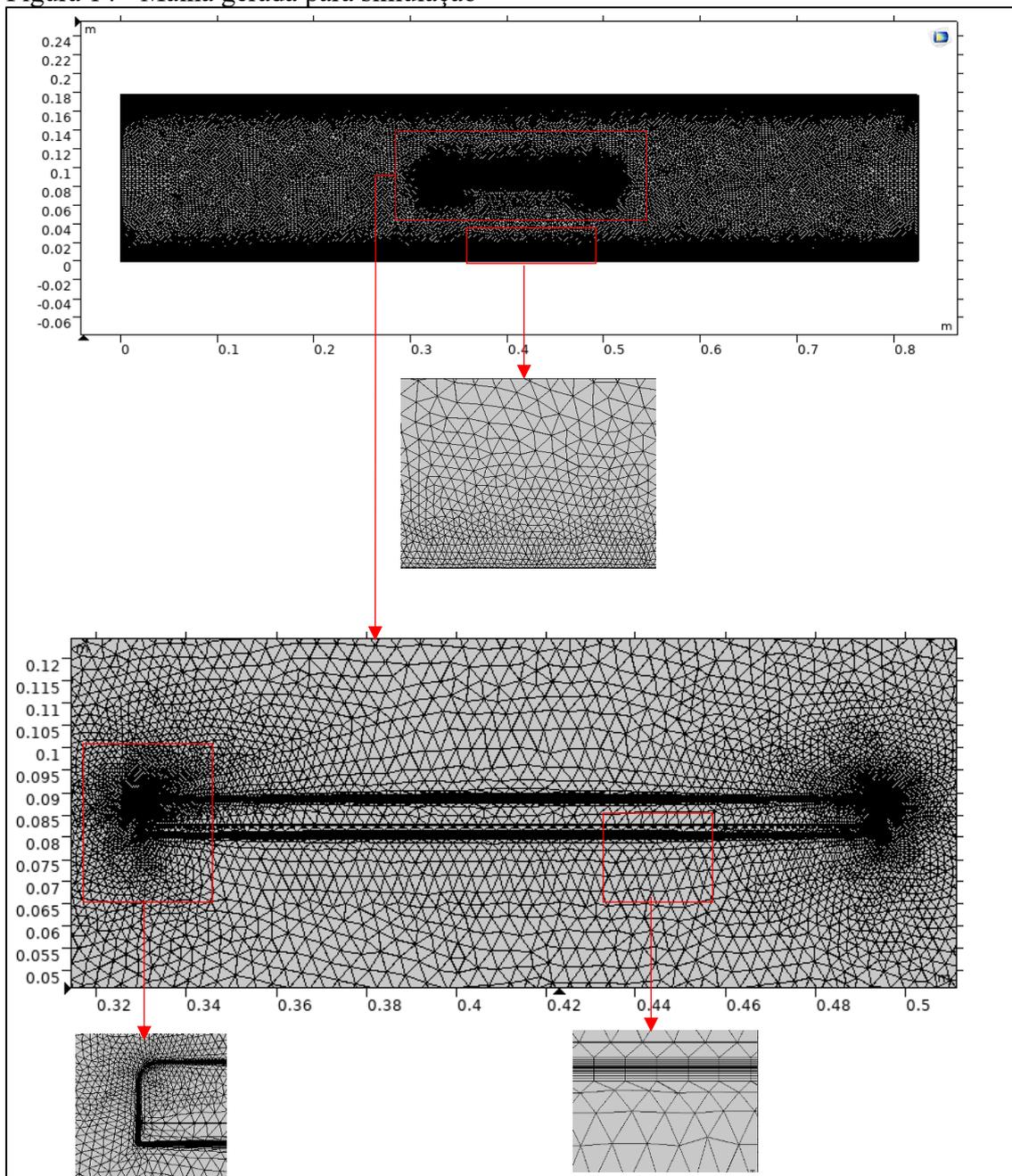
Fonte: o autor.

3.7.2. Malha de Discretização

O método numérico discreto utilizado para integrar as equações de conservação da massa, energia e quantidade de movimento presentes no modelo proposto necessita de uma malha adequada para a correta convergência da solução. Logo, para resolver o sistema de equações diferenciais que descrevem o problema em estudo, uma malha foi gerada para a sua resolução numérica (Figura 14). Para a geração da malha, a fim de representar de maneira mais aproximada quanto possível a unidade experimental de secagem, foram considerados como requisito a convergência, representação adequada da geometria, custo computacional e tipo de escoamento.

A malha utilizada na simulação é constituída de 60.218 elementos triangulares, além de 15.502 elementos quadrangulares dispostos em camadas de 8 elementos de espessura alojadas nas paredes do canal e superfícies da bandeja com a pasta do bagaço.

Figura 14 - Malha gerada para simulação



Fonte: o autor.

3.7.3. Modelagem fenomenológica

O modelo desenvolvido segue, com adaptações, aquele apresentado por DATTA (2007a e 2007b). As hipóteses básicas adotadas para o processo de secagem foram as seguintes:

- i. o efeito de encolhimento da pasta devido à secagem não foi considerado;
- ii. há consumo de água líquida e geração de vapor de água no meio poroso;

- iii. o ar de secagem é admitido no processo sob condições constantes de temperatura, pressão, teor de umidade e regime laminar de escoamento;
- iv. o secador foi assumido como adiabático e qualquer efeito de radiação foi considerada como negligenciável;
- v. a evaporação ocorre em toda a extensão do meio poroso e mediada pela disponibilidade da fase líquida;
- vi. para a transferência de calor considera-se os mecanismos de condução e convecção tanto no interior do meio poroso quanto no escoamento externo do ar de secagem e na própria bandeja onde se encontra a pasta de bagaço (meio poroso);
- vii. o fluxo de entrada do ar de secagem tem seu sentido invertido a cada 10 minutos para simular o procedimento de girar a bandeja em 180° no plano horizontal para se obter uma secagem uniforme;
- viii. admite-se que os efeitos de transferência de calor e massa a partir do meio poroso não interferem no regime de escoamento do ar de secagem, de maneira que o mesmo é resolvido e considerado em estado estacionário e desacoplado dos demais fenômenos segundo cada ciclo e sentido de entrada do ar no canal.

A secagem da pasta de bagaço de maçã é modelada segundo a consideração dos fenômenos de transferência de momento, de calor e de massa. A transferência de momento considera a física de fluxo laminar; a transferência de calor, a física envolvendo fluidos e sólido poroso; e a transferência de massa, a física de transporte de espécies diluídas, segundo os componentes: água líquida e vapor de água.

3.7.4. Fluxos de Duas Fases em Meio Poroso

O princípio básico da modelagem de fluxo de duas fases em meios porosos utiliza variáveis de saturação (S) que cumprem a restrição imposta pela Equação 9.

$$S_g + S_l = 1 \quad (9)$$

Onde:

S_g : saturação da fase gasosa (que neste modelo é ar úmido);

S_l : saturação da fase líquida (que neste modelo é água).

O fluxo monofásico em meios porosos é descrito pelas Equações de Brinkman apresentadas em DATTA (2007a), que são responsáveis também pela continuidade do

fluxo dentro e fora do meio poroso. Com uma fase líquida adicional, os efeitos capilares também podem ser descritos, sendo que o fluxo de líquido é conduzido por um gradiente de pressão e pressão capilar, conforme a Equação 10.

$$p_c = p_g - p_l \quad (10)$$

Onde:

p_c : pressão capilar no meio poroso (Pa);

p_g : pressão da fase gasosa no meio poroso (Pa);

p_l : pressão da fase líquida no meio poroso (Pa).

Os efeitos capilares são tratados segundo um termo de difusão adicional na equação de transporte (DATTA, 2007a). As Equações de Brinkman são usadas para calcular o campo de fluxo u_g e a distribuição de pressão p_g do ar úmido no meio poroso. Portanto, a porosidade ε deve levar em consideração que apenas uma fração do espaço vazio é ocupada pela fase gasosa.

A velocidade da fase líquida é pequena em comparação com a velocidade do ar úmido e tal que a lei de Darcy é definida em termos do gradiente de pressão da fase gasosa para calcular a velocidade da água u_l de acordo com Equação 11.

$$u_l = -\frac{\kappa_l}{\mu_l} \nabla P_g \quad (11)$$

Onde:

u_l : velocidade da água na fase líquida ($m\ s^{-1}$);

κ_l : permeabilidade da fase líquida (m^2);

μ_l : viscosidade da fase líquida ($kg\ m^{-1}\ s^{-1}$);

∇P_g : gradiente de pressão da fase gasosa no meio poroso (Pa).

3.7.4.1. Modelagem do Escoamento do Ar

Para o escoamento do ar utilizou-se um modelo laminar para baixas velocidades. A interface física empregada para a simulação do escoamento resolve as equações da conservação da quantidade de movimento e a Equação da continuidade para conservação de massa.

A conservação da massa é considerada segundo a Equação 12, sendo que as Equações 13 e 14 descrevem a conservação da quantidade de movimento.

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (12)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + K] + F \quad (13)$$

$$K = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot u)I \quad (14)$$

Onde:

ρ : massa específica (kg m^{-3});

μ : viscosidade dinâmica do fluido ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$);

I: vetor identidade;

u: vetor velocidade (m s^{-1});

F: força gravitacional (N m^{-3}).

a) Condição inicial

Inicialmente é considerado que o ar está parado e pressão dentro do duto é a atmosférica (referência). Assim a pressão inicial (diferença entre a pressão absoluta e pressão de referência) e a velocidade do ar dentro do duto valem zero. A partir dessas condições calcula-se o regime estacionário.

b) Condições de contorno

As condições de contorno para o estudo computacional do escoamento do ar no duto de secagem em 2D estão reportados a seguir:

- A velocidade de entrada do ar (u_{ar0}) de secagem no duto foi determinada experimentalmente de acordo como o valor discriminado na Tabela 1 da secção 3.5.3;

- A condição de contorno para o escoamento na saída do duto é de pressão de referência ($p = 1 \text{ atm}$), ou seja, a pressão relativa na saída é igual a zero e sem qualquer efeito de transferência de quantidade de movimento ($p_0 = 0$), Equação 15.

$$[-pI + K] = -p_0 n \quad (15)$$

Onde:

p_0 : pressão relativa na saída do domínio;

p: pressão relativa;

I: vetor identidade.

c) Condição de aderência

Nas paredes, a condição de contorno para a velocidade do ar é zero ($u_{arp} = 0$).

3.7.4.2. *Transporte de fase líquida no meio poroso*

Para descrever o transporte da fase líquida no interior do meio poroso utiliza-se o módulo de Transporte de Espécies Diluídas do Comsol Multiphysics®, que considera o balanço diferencial de massa para a variável concentração c da espécie, de acordo com a Equação 16.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{N} = R \quad (16)$$

Onde:

$\partial c/\partial t$: derivada da concentração de água em relação ao tempo ($\text{mol m}^3 \text{s}^{-1}$);

$\nabla \cdot \mathbf{N}$: divergente do fluxo molar de massa de água ($\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$);

R: taxa de reação ($\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$).

Além da equação de balanço, fazem-se necessárias informações adicionais:

a) Condição inicial

A pasta de bagaço de maçã está inicialmente submetida a uma umidade de 76,6% em base úmida.

b) Condições de contorno

Para a simulação, considera-se que não há fluxo de entrada ou saída de água no estado líquido através de todas as fronteiras do meio poroso, conforme a condição:

$$-n \cdot \mathbf{N}_A = 0, \text{ para } t > 0 \quad (17)$$

Presume-se que nenhuma água líquida pode deixar o domínio poroso. A partir de agora, a concentração c_w descreve a concentração de água e é antes uma variável auxiliar, uma vez que a saturação é crucial para este processo. A correlação para a concentração de água c_w e saturação da fase líquida S_l é dada pela Equação 18.

$$S_l = \frac{c_w M_w}{\rho_w \varepsilon} \quad (18)$$

Onde:

M_w : massa molar da água (kg kmol^{-1});

ρ_w : massa específica da água (kg m^{-3});

ε : porosidade do meio poroso;

c_w : concentração de água (kmol m^{-3});

S_l : saturação da fase líquida.

O campo de velocidade na Equação 19 deve levar em conta que o espaço poroso não está totalmente saturado com água. Além disso, a permeabilidade para a fase líquida κ_l depende da permeabilidade geral da matriz porosa κ e uma permeabilidade relativa κ_{rl} . O gradiente de pressão ∇P_g é resolvido com as Equações de Brinkman e o efeito capilar é introduzido como o coeficiente de difusão D_{cap} que depende do teor de umidade (DATTA, 2007b).

$$u_l = - \frac{\kappa \kappa_{rl}}{S_l \varepsilon \mu_w} \nabla P_g \quad (19)$$

Onde:

∇P_g : Gradiente de pressão (Pa);

S_l : Saturação da fase líquida (adimensional);

ε : Porosidade do meio poroso (adimensional);

μ_w : Viscosidade da água na fase líquida ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$);

κ_{rl} : Permeabilidade relativa para fase líquida (m^2).

Para calcular a quantidade de água que evapora e levar em consideração a redução de líquido e a proporção crescente de ar úmido, é utilizada a Equação 20, onde m_{evap} é igual a taxa mássica ($\text{mol m}^3 \text{s}^{-1}$) de água evaporada:

$$m_{evap} = K(a_w c_{sat} - c_v) \quad (20)$$

Onde:

K : constante de evaporação (s^{-1});

c_{sat} : concentração de vapor sob condições de saturação (mol m^{-3});

c_v : concentração atual de vapor (mol m^{-3});

a_w : atividade de água.

O fator a_w permite considerar o efeito de redução da taxa de evaporação à medida que se reduz a disponibilidade de água líquida.

3.7.4.3. Transporte de vapor em meio poroso

O procedimento para derivar a equação de transporte para o vapor de água é semelhante ao que se fez na seção anterior para a água líquida. Partindo da equação de conservação (Equação 16) deve-se implementar o fluxo devido à convecção, enquanto o campo de velocidade já é conhecido das Equações de Brinkman e precisa ser aplicado à fase de vapor.

3.7.4.3.1. Difusividade efetiva

O segundo mecanismo de transporte é o fluxo devido à difusão binária de vapor d'água no ar seco. Assim, uma correlação comum para uma difusividade efetiva D_{eff} para dois componentes em meio poroso é dada pela equação de Millington e Quirk (DATTA, 2007a) (Equação 21):

$$D_{eff} = D_{va} \varepsilon^{4/3} S_g^{10/3} \quad (21)$$

Onde:

D_{va} : difusividade vapor-ar, com valor igual $2,6 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$;

S_g : saturação da fase gasosa;

ε : porosidade do meio poroso;

D_{eff} : difusividade efetiva ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$).

Esses efeitos fornecem o campo de velocidade que é aplicado à equação de transporte de vapor de água (Equação 22):

$$u_{ar} = \frac{u_g}{S_g \varepsilon} - \frac{M_a D_{eff}}{M_{ma} \rho_{ma}} \nabla \rho_{ma} \quad (22)$$

Onde:

M_{ma} : massa molar do ar úmido (kg mol^{-1});

M_a : massa molar do ar (kg mol^{-1});

ρ_{ma} : massa específica do ar úmido (kg m^{-3});

S_g : saturação da fase gasosa;

ε : porosidade do meio por;

D_{eff} : difusividade efetiva ($\text{m}^2 \text{s}$);

$\nabla\rho_{ma}$: gradiente da massa específica do ar úmido (kg m^3);

u_g : velocidade do vapor de água (m s^{-1});

u_{ar} : velocidade do ar (m s^{-1}).

3.7.4.3.2. Difusividade Molecular

A difusão molecular (na fase gasosa) torna-se mais importante quando o nível de saturação de água diminui e mais espaço dos poros é ocupado pela fase gasosa. A Equação 23 é usada para expressar a difusividade efetiva na fase gasosa que regula o movimento de umidade segundo a lei de Fick; a força motriz é o teor de umidade total, incluindo aquele na fase líquida. Esta difusividade efetiva em materiais é diferente da difusividade molecular que se refere apenas à fase gasosa, particularmente quando um material possui grandes quantidades de água líquida. A difusividade molecular (D_g) do vapor depende da temperatura, umidade, porosidade e tortuosidade do meio (DATTA, 2007b; FORBIO, et al., 1981).

$$D_g = D_{va} (S_g \varepsilon)^{\frac{4}{3}} \quad (23)$$

Onde:

D_g : difusividade molecular na fase gasosa do meio poroso ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);

S_g : saturação da fase gasosa;

D_{va} : difusividade vapor-ar, com valor igual $2,6 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$;

ε : porosidade da matriz porosa.

3.7.4.3.3. Difusividade Capilar

A difusividade capilar possui dois componentes principais, o primeiro devido ao gradiente de umidade, e o segundo devido ao gradiente de temperatura. Geralmente os dados que separam esses dois efeitos não existem, e muitos estudos normalmente ignoram o gradiente de temperatura. Neste estudo o valor da difusividade capilar da água (D_w) foi

obtido a partir do modelo proposto por DATTA (2007b), considerando apenas o teor de umidade conforme demonstrado na Equação 24.

$$D_w = 1,0 \times 10^{-8} \exp(-2,8 + 2,0 X_m) \quad (24)$$

Onde:

X_m : Conteúdo de água em base seca na pasta de bagaço de maçã.

D_w : Difusividade capilar da água ($m^2 s^{-1}$).

3.7.4.4. *Transferência de Calor em Meio Poroso*

O modelo considera um balanço de energia para modelar o fenômeno de transferência de calor na matriz porosa (Equação 25):

$$d_z \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho c_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q_0 \quad (25)$$

Onde:

d_z : espessura associada ao plano de simulação (m);

ρ : massa específica do meio ($kg m^{-3}$);

c_p : calor específico do meio ($J kg^{-1} K^{-1}$);

u : campo de velocidades ($m s^{-1}$);

$q = d_z k \nabla T$, fluxo de calor ($W m^{-2}$);

k : condutividade térmica do meio ($W m^{-1} K^{-1}$);

Q_0 : fonte de calor ($J kg^{-1}$).

T : temperatura (K);

No subdomínio que contém apenas ar úmido escoando livremente o campo de velocidades obtido da resolução da equação para fluxo laminar é considerado para descrever a transferência de calor por convecção. No interior do subdomínio poroso o campo de velocidade global para as fases líquida e vapor contribui para o termo de convecção de calor. Desse modo, é necessário considerar propriedades térmicas médias, como descrito a seguir.

A massa específica média no meio poroso é obtida pela Equação 26:

$$\rho_{avg} = S_g \rho_{ma} + S_l \rho_w \quad (26)$$

Onde:

ρ_{ma} : massa específica do ar úmido (kg m^{-3});

ρ_w : massa específica da água (kg m^{-3});

S_l : saturação da fase líquida (adimensional);

S_g : saturação da fase gasosa (adimensional);

ρ_{avg} : massa específica média (kg m^{-3}).

O calor específico médio é calculado segundo a Equação 27:

$$c_{p,avg} = \frac{S_g \rho_{ma} c_{p,ma} + S_l \rho_w c_{p,w}}{\rho_{avg}} \quad (27)$$

Onde:

$c_{p,avg}$: calor específico médio ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$);

$c_{p,ma}$: calor específico do ar úmido ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$);

$c_{p,w}$: calor específico da água ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$);

Por sua vez a condutividade térmica média é calculada pela Equação 28:

$$k_{avg} = S_g k_{ma} + S_l k_w \quad (28)$$

Onde:

k_{avg} : condutividade térmica média ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$);

k_{ma} : condutividade térmica do ar úmido ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$);

k_w : condutividade térmica da fase líquida ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$).

Ainda, a velocidade pode ser expressa como a média das velocidades do ar seco, do vapor de água e da água líquida, segundo a Equação 29:

$$u_{avg} = \frac{n_a c_{p,a} + n_v c_{p,v} + n_w c_{p,w}}{\rho_{avg} c_{p,avg}} \quad (29)$$

Onde:

$c_{p,a}$: calor específico do ar seco ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$);

$c_{p,v}$: calor específico do vapor de água ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$);

$c_{p,w}$: calor específico da água líquida ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$);

$c_{p,avg}$: calor específico médio ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$);

n_a : fluxo de ar seco ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$);

n_v : fluxo de vapor ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$);

n_w : fluxo de água líquida ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$).

Finalmente, o calor de evaporação (Q_{ev}) é inserido como um termo fonte na equação de balanço de energia (Q_0 na Equação 30), segundo:

$$Q_{ev} = -H_{vap}m_{vap} \quad (30)$$

Onde:

H_{vap} : calor latente de evaporação ($J\ mol^{-1}$).

m_{vap} : massa de evaporação (kg).

Q_{ev} : calor de evaporação ($J\ kg^{-1}$).

Quanto ao fluxo de calor por condução no meio poroso, considera-se a lei de Fourier segundo uma condutividade térmica efetiva:

$$q = -d_z k_{eff} \nabla T \quad (31)$$

Onde:

q : fluxo de calor (W);

d_z : elemento de espessura (m);

k_{eff} : condutividade térmica efetiva ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$);

∇T : gradiente de temperatura (K);

$$k_{eff} = \theta_p k_p + (1 - \theta_p) k \quad (32)$$

Onde:

k : condutividade térmica total do ar úmido e fase líquida ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$);

k_p : condutividade térmica da matriz porosa ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$);

θ_p : fração de volume da matriz porosa.

a) Condição inicial

Inicialmente, a temperatura do ar de escoamento é igual a temperatura ambiente (T_{amb}) e a pasta de bagaço de maçã está submetida à temperatura ambiente (T_{amb}), conforme condição:

$$T = T_{amb}, \text{ para } t = 0 \quad (33)$$

b) Condições de contorno

Na fronteira denominada entrada de ar no duto de secagem é imposta uma temperatura de acordo com os valores discriminados no item 3.6.3 (Tabela 1) utilizados para definir os experimentos e respectivas simulações. Da mesma maneira a temperatura na parede no duto foi considerada a temperatura do ar aquecido de acordo com a mesma Tabela 1, impondo que não ocorre transferência de calor através do duto devido a presença de isolamento térmico.

3.7.4.5. Permeabilidade da matriz porosa

A permeabilidade da matriz porosa κ define a permeabilidade absoluta. Quando duas fases estão presentes, a permeabilidade de cada fase depende também da saturação. Isso é definido pelas permeabilidades relativas κ_{rl} e κ_{rg} para a fase líquida e gasosa, respectivamente, de modo que $\kappa_l = \kappa \kappa_{rl}$ e $\kappa_g = \kappa \kappa_{rg}$. A determinação das curvas de permeabilidade relativa é frequentemente de natureza empírica ou experimental e a forma depende fortemente das propriedades do material poroso e dos próprios líquidos. As funções que são usadas neste modelo são baseadas no estudo de DATTA (2007b) e são definidas de forma que sejam sempre positivas, conforme Equações 34 e 35.

$$\kappa_{rg} = \begin{cases} 1 - 1,1S_l, & S_l < 1/1,1 \\ \text{eps}, & S_l \geq 1/1,1 \end{cases} \quad (34)$$

Onde:

κ_g : permeabilidade relativa da fase gasosa (m^2).

S_l : saturação da fase líquida (adimensional);

eps: Precisão relativa de ponto flutuante (epsilon da máquina, 2^{-52} ou cerca de $2,2204 \cdot 10^{-16}$, para números de ponto flutuante duplo).

$$\kappa_{rl} = \begin{cases} \left(\frac{S_l - S_{li}}{1 - S_{li}} \right)^3, & S_l > S_{li} \\ \text{eps}, & S_l \leq S_{li} \end{cases} \quad (35)$$

Onde:

κ_l : permeabilidade relativa da fase líquida (m^2).

S_l : saturação da fase líquida;

S_{li} saturação irreduzível da fase líquida.

A variável S_{li} é a saturação irreduzível da fase líquida, descrevendo a saturação da fase líquida que permanecerá dentro do meio poroso.

3.7.5. Determinação do equilíbrio higroscópico entre a pasta de bagaço de maçã e o ar de secagem

A relação de equilíbrio entre umidade relativa do ar (UR) e a umidade da pasta de bagaço de maçã (X_{eq}) foi obtida ajustando os dados experimentais deste estudo ao modelo de Oswin modificado. Este modelo foi utilizado nos estudos de COSTA et al. (2013) para determinação de isotermas de pastas e apresentou bons resultados. Assim a Equação 36 fornece o teor de umidade na pasta de bagaço de maçã como função da atividade de água e da temperatura (COSTA et al., 2013).

$$X_{eq} = \frac{(a+bT)}{\left[\frac{a_w}{(1-a_w)} \right]^c} \quad (36)$$

Onde:

X_{eq} : teor de umidade de equilíbrio ($kg\ kg^{-1}$);

a_w : atividade de água (adimensional);

T: temperatura (K);

a, b e c: constantes do modelo.

3.7.6. Propriedades termo-físicas da fibra do bagaço de maçã

Expressões matemáticas em função da temperatura foram utilizadas a fim de se descrever as propriedades termo-físicas da fibra do bagaço de maçã, segundo CHOI e

OKOS (1986) para tratar das propriedades térmicas dos componentes primordiais presentes nos alimentos. Estas equações estão reportadas nas Tabelas 7, 8 e 9, e são válidas para temperaturas entre 0 e 150 °C (APRAJEETA et al., 2015; RAO et al., 2014).

Primeiramente, para se determinar a massa específica do meio poroso (ρ_p), foi utilizada uma expressão (Equação 37) em função da composição bioquímica, conforme desenvolvida por CHOI e OKOS (1986) apud RAO et al. (2014).

$$\frac{1}{\rho_p} = \sum \frac{x_i}{\rho_i} \quad (37)$$

Onde:

ρ_p : massa específica do meio poroso (kg m^{-3});

x_i : fração mássica dos componentes;

A massa específica de cada um dos componentes principais da fibra do bagaço da maçã, podem ser determinadas segundo as relações apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2- Equações para o cálculo da massa específica dos diferentes componentes da fibra do bagaço de maçã em função da sua temperatura

Componente	ρ (kg m^{-3})
Água	$997,18 + 3,1439 \times 10^{-3} T - 3,7574 \times 10^{-3} T^3$
Proteína	$1329,90 - 5,1840 \times 10^{-1} T$
Lipídio	$925,59 - 4,1757 \times 10^{-1} T$
Carboidrato	$1599,10 - 3,6589 \times 10^{-1} T$
Cinza	$2423,80 - 2,8063 \times 10^{-1} T$

Fonte: CHOI e OKOS (1986) apud RAO et al., (2014).

Por sua vez, a capacidade calorífica das fibras foi obtida a partir da Equação 38:

$$C_{p,p} = \sum x_i C_{pi} \quad (38)$$

Onde:

$C_{p,p}$: capacidade calorífica das fibras do bagaço ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$);

x_i : fração mássica dos componentes;

C_{pi} : capacidade calorífica dos componentes ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

A Tabela 3, reporta as expressões utilizadas para a capacidade calorífica de cada um dos componentes presente nas fibras do bagaço de maçã.

Tabela 3 - Expressões para a capacidade calorífica dos diferentes componentes em função da temperatura

Componente	C_p (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)
Água	$4176,2 - 0,0909T + 5,4731 \times 10^{-3} T^2$
Proteína	$2008,2 + 1,2089 T - 1,3129 \times 10^{-3} T^2$
Lipídio	$1984,2 + 1,4373 T - 4,8008 \times 10^{-3} T^2$
Carboidrato	$1548,8 + 1,9625 T - 5,9399 \times 10^{-3} T^2$
Cinza	$1092,6 + 1,8896 T - 3,6817 \times 10^{-3} T^2$

Fonte: CHOI e OKOS (1986) apud RAO et al., (2014).

A Equação 39 é empregada para estabelecer a condutividade térmica das fibras:

$$k_p = \sum x_i k_i \quad (39)$$

Onde:

κ_p : condutividade térmica das fibras (W m⁻¹ °C⁻¹);

x_i : fração mássica dos componentes;

κ_i : condutividade térmica dos componentes (W m⁻¹ °C⁻¹).

A condutividade térmica dos componentes é obtida a partir das expressões presentes na Tabela 4.

Tabela 4 - Equações para a determinação da condutividade térmica de diferentes componentes, em função da temperatura

Componente	κ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)
Água	$0,57109 + 1,7620 \times 10^{-3} T - 6,7036 \times 10^{-6} T^2$
Proteína	$0,17881 + 1,1958 \times 10^{-3} T - 2,7178 \times 10^{-6} T^2$
Lipídio	$0,18071 - 2,7604 \times 10^{-3} T - 1,7749 \times 10^{-6} T^2$
Carboidrato	$0,20141 + 1,3874 \times 10^{-3} T - 4,3312 \times 10^{-6} T^2$
Cinza	$0,32961 + 1,4011 \times 10^{-3} T - 2,9069 \times 10^{-6} T^2$

Fonte: CHOI e OKOS (1986) apud RAO et al., (2014).

A Equação 40 permite determinar a porosidade do bagaço de maçã (ϵ_{pm}):

$$\varepsilon_{pm} = 1 - \frac{\rho_{b,pm}}{\rho_p} \quad (40)$$

Onde:

$\rho_{b,pm}$: massa específica bulk da suspensão da pasta de bagaço de maçã (kg m^{-3});

ρ_p : massa específica das fibras (kg m^{-3}).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta secção serão apresentados os resultados obtidos antes e após o processamento do bagaço de maçã, a secagem experimental e computacional. Primeiramente serão apresentadas as características centesimais da farinha de bagaço de maçã e das farinhas processadas após a explosão a vapor, depois da hidrólise ácida e também da farinha que passou pelos dois processos, pela explosão a vapor e pela hidrólise ácida. Em seguida será apresentada a análise do perfil cinético da reação ácida a qual o material foi submetido. A característica estrutural dos materiais processados, com base nos grupos funcionais a partir da análise FTIR, a análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC) e por MEV para avaliar a morfologia das farinhas e a funcionalidade dos produtos obtidos, quanto a capacidade de retenção de água e óleo. Por último as curvas clássicas da secagem em camada delgada da pasta e do bagaço de maçã e a análise dos experimentos com a simulação computacional estão reportados.

4.1. CARACTERIZAÇÃO CENTESIMAL DOS MATERIAIS PROCESSADOS

Os resultados referentes a análise centesimal em base seca dos produtos processados estão dispostos na Tabela 5 e suas análises reportadas nos tópicos seguintes.

Tabela 5 - Caracterização dos materiais processados

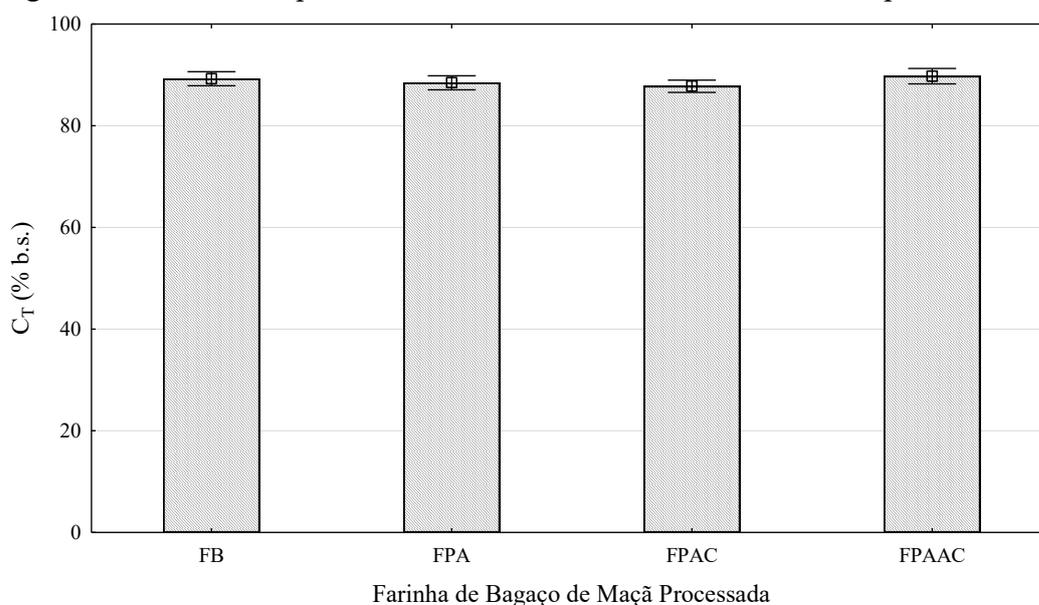
Caracterização	FB	FPA	FPAC	FPAAC
Umidade (X_{bu})	5,8 ± 0,2	5,7 ± 0,5	5,6 ± 0,3	5,8 ± 0,2
Proteínas total (% b.s.)	6,6 ± 0,3	6,7 ± 0,3	7,7 ± 0,2	5,8 ± 0,6
Lipídeos (% b.s.)	3,7 ± 0,3	3,4 ± 0,3	3,2 ± 0,0	3,0 ± 0,1
Cinzas (% b.s)	0,5 ± 0,0	1,4 ± 0,2	1,4 ± 0,2	1,4 ± 0,2
Carboidratos Totais (% b.s.)	89,3 ± 0,5	88,5 ± 0,5	87,8 ± 0,4	89,8 ± 0,5
Carboidratos não fibrosos (% b.s.)	21,7 ± 1,0	25,2 ± 0,5	25,3 ± 0,3	23,9 ± 0,5
Fibra alimentar total (% b.s.)	67,6 ± 1,3	63,2 ± 0,6	62,5 ± 0,7	65,8 ± 1,0
Fibra alimentar solúvel (% b.s.)	37,1 ± 1,5	36,4 ± 0,9	27,9 ± 0,9	35,5 ± 0,6
Fibra alimentar insolúvel (% b.s.)	30,5 ± 0,5	26,9 ± 0,3	34,5 ± 0,5	30,3 ± 0,5

Fonte: desenvolvido pelo autor. Os valores na tabela são referentes as médias e os desvios padrão de três análises para cada condição experimental. FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave; FPAC: farinha processada no ácido clorídrico; FPAAC: farinha processada na autoclave e no ácido clorídrico.

4.1.1. Análise dos carboidratos totais

Principal componente de interesse para as farinhas resultantes dos processamentos é o carboidrato total que é a soma dos carboidratos não fibrosos e da fibra alimentar total. Como reportado na Tabela 5 e ilustrado no gráfico da Figura 15 os valores destes componentes ficaram muito próximos em todas as farinhas obtidas, sendo necessário realizar o Teste de Tukey com nível de significância $\alpha=0,05$ para possibilitar a comparação dos resultados e identificar possíveis diferenças. Os valores médios de carboidratos total em base seca foi para a farinha bruta de bagaço de maçã (FB) de 89,3%, para a farinha de bagaço de maçã processada em autoclave (FPA) 88,5%, a farinha processada no ácido clorídrico (FPAC) com 87,8% e a farinha processada na autoclave e depois no ácido clorídrico com 89,8% de carboidratos total.

Figura 15 - Gráfico do percentual de carboidratos totais nas farinhas processadas



Fonte: o autor.

FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave; FPAC: farinha processada no ácido clorídrico; FPAAC: farinha processada na autoclave e no ácido clorídrico.

Com base no Teste de Tukey exibido na Tabela 6, foi observado que o teor de carboidratos totais em base seca presente na farinha de bagaço de maçã (FB) é estatisticamente igual ao teor presente na farinha processada na autoclave (FPA) e na farinha processada na autoclave mais o ácido clorídrico (FPAAC) e diferente do teor de carboidrato contido na farinha processada somente no ácido clorídrico. Este comportamento pode ter ocorrido porque quando processada a farinha somente no ácido clorídrico, parte dos carboidratos se dissociaram e/ou se diluíram na solução de ácido

clorídrico, comportamento diferente do reportado nas outras farinhas pois na farinha processada somente na autoclave pode ter ocorrido a hidrólise parcial dos carboidratos mas sem a diluição. E, para a farinha processada na autoclave e no ácido clorídrico, o processo foi mais agressivo o que resultou em maior desprendimento, possivelmente uma hidrólise parcial principalmente dos carboidratos menores, aumentando o teor de polissacarídeos na farinha resultante.

Tabela 6 - Análise de Tukey ao nível significância $\alpha=0,05$ para o percentual de Carboidratos Total nas amostras

Casos	(FB) 89,3	(FPA) 88,5	(FPAC) 87,8	(FPAAC) 89,8
FB		0,3539	0,0458 ^a	0,7027
FPA	0,3539		0,4808	0,0810
FPAC	0,0458 ^a	0,4808		0,0104 ^b
FPAAC	0,7027	0,0810	0,0104 ^b	

Fonte: o autor. ^{a, b} representam médias em (% b.s) significativamente diferentes ao nível $\alpha=0,05$.

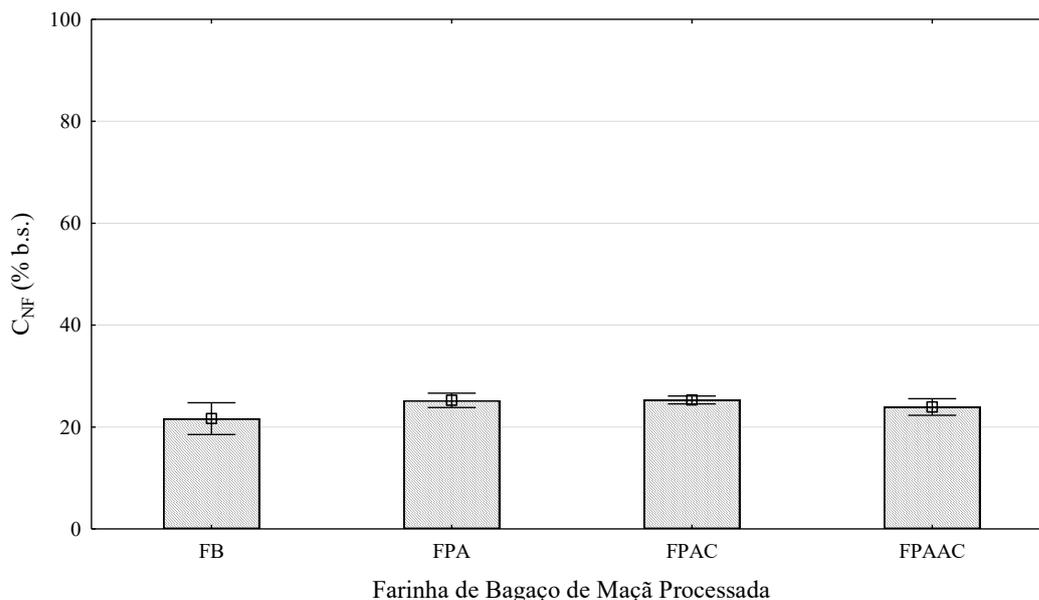
FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave; FPAC: farinha processada no ácido clorídrico; FPAAC: farinha processada na autoclave e no ácido clorídrico.

4.1.2. Análise dos carboidratos não fibrosos

Outra análise realizada foi a de carboidratos não fibrosos e, podemos observar que neste caso o teor na farinha de bagaço de maçã (FB) foi a menor em comparação com todos os processos estudados, apresentando a média das triplicatas em 21,7% (Figura 16). Este comportamento corrobora o que a literatura especializada informa que nas condições nas quais a farinha de bagaço de maçã foi exposta parte dos polissacarídeos tendem a se fragmentar formando possivelmente monossacarídeos que são carboidratos não fibrosos.

O Teste Tukey exibido na Tabela 7, apresenta a análise estatística de comparação das médias do teor de carboidrato não fibroso, sugerindo que não existem ao nível de significância $\alpha=0,05$ diferenças significativas entre as farinhas processadas, porém o teor de todas essas farinhas é maior do que o teor presente na farinha de bagaço de maçã (FB).

Figura 16 - Gráfico do percentual de carboidratos não fibrosos das farinhas processadas



Fonte: o autor.

FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave; FPAC: farinha processada no ácido clorídrico; FPAAC: farinha processada na autoclave e no ácido clorídrico.

Tabela 7 - Análise de Tukey ao nível significância $\alpha=0,05$ para o percentual de carboidratos não fibrosos nas amostras

Casos	(FB) 21,7%	(FPA) 25,2%	(FPAC) 25,3%	(FPAAC) 24,0%
FB		0,0023 ^a	0,0020 ^b	0,0294 ^c
FPA	0,0023 ^a		0,9989	0,2531
FPAC	0,0020 ^b	0,9989		0,2094
FPAAC	0,0294 ^c	0,2531	0,2094	

Fonte: o autor. ^{a, b, c} representam médias em (% b.s) significativamente diferentes ao nível $\alpha=0,05$.

FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave; FPAC: farinha processada no ácido clorídrico; FPAAC: farinha processada na autoclave e no ácido clorídrico.

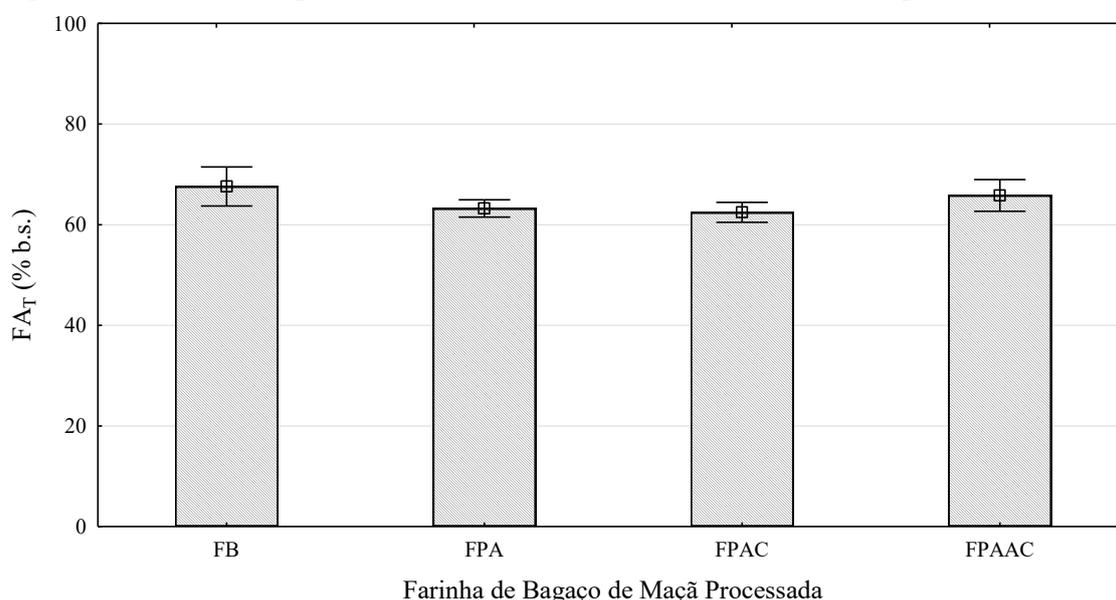
4.1.3. Análise Fibras Alimentares Total

Os teores de fibras total nos processos realizados foram ilustrados no gráfico da Figura 17, onde observamos que aparentemente os teores médios de fibras são similares na farinha de bagaço de maçã (FB) (67,6% b.s) e na farinha processada em autoclave mais ácido clorídrico (FPAAC) (65,8% b.s) e, o comportamento entre as farinhas dos outros processos também são similares entre si, 63,2% b.s na FPA e 62,5% b.s na FPAC, porém são diferentes em relação as duas primeiras. Este comportamento se deve ao fato de que o processo FPAAC é mais intenso, assim os compostos que fazem parte do material acabaram se diluindo no ácido nas mesmas proporções.

A Tabela 8 reportando o Teste de Tukey descreve a comparação entre as médias dos teores de fibra total corroborando que as farinhas FB e FAAC apresentam as mesmas médias e que ambas diferem das outras duas farinhas FPA e FPAC que são consideradas iguais, ao nível de confiança de 95%.

Os resultados dos teores de fibras alimentar total são importantes, uma vez que, em seus estudos SUDHA et al. (2007) encontraram 51,1% de teor de fibra alimentar total em base seca e CHEN et al. (1988) identificaram 61,9%, ambos inferiores ao valor encontrado neste estudo.

Figura 17 - Gráfico do percentual de fibra alimentar total nas farinhas processadas



Fonte: o autor.

FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave; FPAC: farinha processada no ácido clorídrico; FPAAC: farinha processada na autoclave e no ácido clorídrico.

Tabela 8 - Análise de Tukey ao nível significância $\alpha=0,05$ para o percentual de fibra alimentar total nas amostras

Casos	(FB) 67,6%	(FPA) 63,2%	(FPAC) 62,5%	(FPAAC) 65,8%
FB		0,0066 ^a	0,0025 ^b	0,2907
FPA	0,0066 ^a		0,8389	0,0892
FPAC	0,0025 ^b	0,8389		0,0279 ^c
FPAAC	0,2907	0,0892	0,0279 ^c	

Fonte: o autor. ^{a, b, c} representam médias em (% b.s.) significativamente diferentes ao nível $\alpha=0,05$.

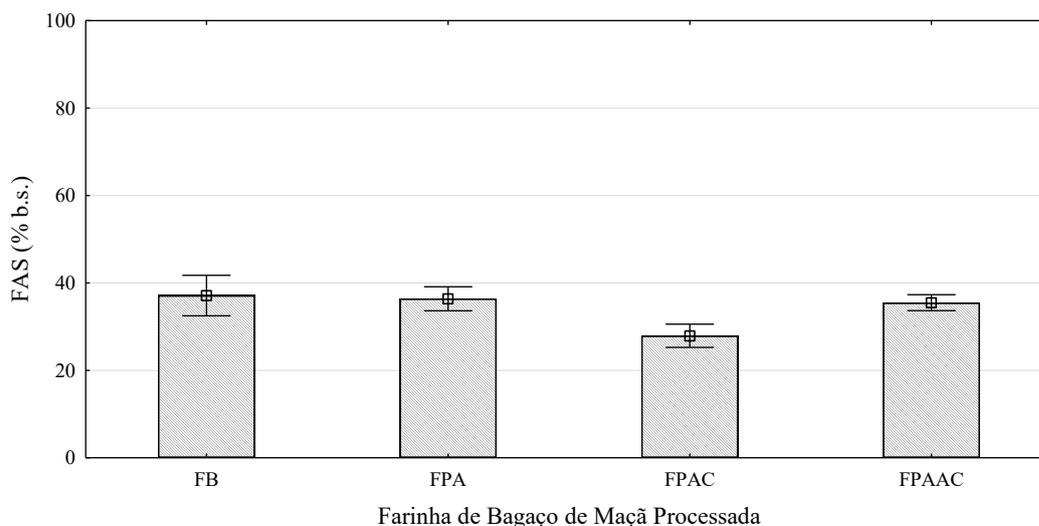
FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave; FPAC: farinha processada no ácido clorídrico; FPAAC: farinha processada na autoclave e no ácido clorídrico.

4.1.4. Análise Fibra Alimentar Solúvel

A fibra alimentar solúvel (FAS) por sua vez tem os seus valores médios para todos os tipos de farinha ilustrados na Figura 18 e a análise dos resultados do Teste de Tukey reportados na Tabela 9. A partir dos dados obtidos é possível sugerir que as médias dos teores em base seca de fibra alimentar solúvel para as farinhas FB (37,1% b.s.), FPA (36,9% b.s.) e FPAAC (35,5% b.s) são iguais ao nível de significância $\alpha=0,05$, ao mesmo tempo em que essas apresentam médias de fibra solúvel diferente do teor contido na FPAC (27,9% b.s.). Os valores encontrados são todos superiores, ao obtido por SUDHA et al. (2007) que relataram 14,6% de fibra alimentar solúvel em base seca.

Este comportamento ocorre supostamente porque o processo de autoclavagem abre as paredes da estrutura das fibras favorecendo que um percentual considerável da fibra solúvel seja diluído em solução ácida, como por exemplo a pectina, a qual é uma das majoritárias fibras alimentares solúveis existente no bagaço de maçã.

Figura 18 - Gráfico do percentual de fibra alimentar solúvel nas farinhas processadas



Fonte: o autor.

FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave; FPAC: farinha processada no ácido clorídrico; FPAAC: farinha processada na autoclave e no ácido clorídrico.

Tabela 9 - Análise de Tukey ao nível significância $\alpha=0,05$ para o percentual de fibra alimentar solúvel nas amostras

Casos	(FB) 37,1%	(FPA) 36,9%	(FPAC) 27,9%	(FPAAC) 35,5%
FB		0,8892	0,0002 ^a	0,4377
FPA	0,8892		0,0003 ^b	0,8196
FPAC	0,0002 ^a	0,0003 ^b		0,0005 ^c
FPAAC	0,4377	0,8196	0,0005 ^c	

Fonte: o autor. ^{a, b, c} representam médias em (% b.s) significativamente diferentes ao nível $\alpha=0,05$.

FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave; FPAC: farinha processada no ácido clorídrico; FPAAC: farinha processada na autoclave e no ácido clorídrico.

4.1.5. Análise Fibra Alimentar Insolúvel

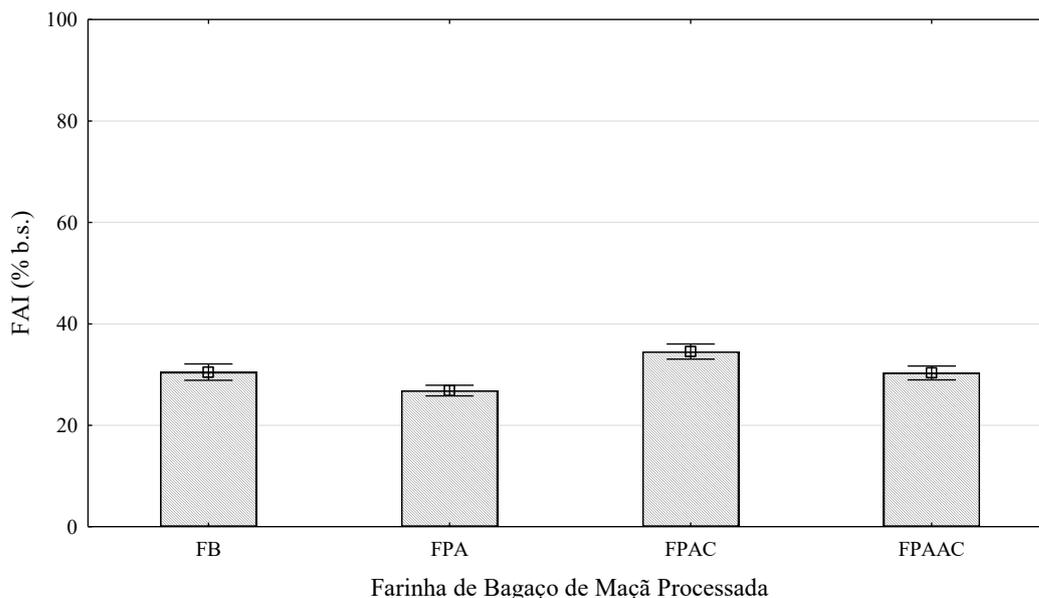
O comportamento da fibra alimentar insolúvel é praticamente o contrário da solúvel, ou seja, a tendência é que ela não se dissolva facilmente na solução ácida. Este comportamento é corroborado quando comparamos a média dos teores de fibra alimentar insolúvel em base seca da FB e da FPAC com médias de 30,5% e 34,5% respectivamente (Figura 19). Na análise do Teste de Tukey com nível de significância ($\alpha=0,05$) temos que essas médias são diferentes, explicado pelo fato de que somente o tratamento ácido não foi suficiente para dissolver as fibras insolúveis, em especial a celulose, na solução ácida, logo as fibras insolúveis ficaram retidas no material sólido aumentando o teor de fibra alimentar insolúvel na FPAC.

Comparando o teor em base seca de fibra insolúvel na FB com o teor na FPA é constatado que ocorreu uma leve redução, mas significativa de acordo com o Teste Tukey (Tabela 10), de 30,5% para 26,9%, o que parece ter ocorrido devido ao desprendimento de frações de fibras insolúveis do material sólido devido ao processo de explosão a vapor.

Observando os teores de fibra solúvel, é possível inferir que são todos inferiores, ao obtido por SUDHA et al. (2007) que relataram 36,5% de fibra alimentar insolúvel em base seca.

Uma ulterior análise foi desenvolvida comparando o teor de fibra alimentar insolúvel em base seca na FB com a FPAAC, sendo que ao nível de significância $\alpha=0,05$ observamos igualdade em suas médias (Tabela 10), sugerindo que isso aconteceu primeiro devido a diminuição do teor de fibras insolúveis quando aconteceu a hidrólise no processo de explosão a vapor e depois a concentração do teor no material sólido quando aconteceu o processo de tratamento em solução ácida.

Figura 19 - Gráfico do percentual de fibra alimentar insolúvel nas farinhas processadas



Fonte: o autor. FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave; FPAC: farinha processada no ácido clorídrico; FPAAC: farinha processada na autoclave e no ácido clorídrico.

Tabela 10 - Análise de Tukey ao nível significância $\alpha=0,05$ para o percentual de fibra alimentar insolúvel nas amostras

Casos	(FB) 30,5%	(FPA) 26,9%	(FPAC) 34,5%	(FPAAC) 30,3%
FB		0,0003 ^a	0,0002 ^b	0,9871
FPA	0,0003 ^a		0,0002 ^c	0,0004 ^d
FPAC	0,0002 ^b	0,0002 ^c		0,0002 ^e
FPAAC	0,9871	0,0004 ^d	0,0002 ^e	

Fonte: o autor. a, b, c representam médias em (% b.s) significativamente diferentes ao nível $\alpha=0,05$.

FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave; FPAC: farinha processada no ácido clorídrico; FPAAC: farinha processada na autoclave e no ácido clorídrico.

4.2. EFETIVIDADE E CINÉTICA DE PROCESSAMENTO

4.2.1. Determinação do Açúcar Redutor

A fim de verificar a eficiência do processo de explosão a vapor e do tratamento ácido, foi determinado a concentração de açúcar redutor e de açúcar total nas amostras de farinha de bagaço de maçã (FB) e na farinha após processo de explosão a vapor (FPA). Primeiramente foi determinado nas amostras de FB e FPA o teor de açúcar redutor que se dilui em água e em seguida foi avaliado a quantidade de açúcar redutor total presente nas amostras. Os resultados estão exibidos na Tabela 11, onde podemos constatar que a

concentração de açúcar redutor aumentou da FB para a FPA nas duas situações avaliadas, somente dissolvendo a amostra em água de $123,0 \mu\text{mol g}^{-1} \text{ b.s.}$ para $145,3 \mu\text{mol g}^{-1} \text{ b.s.}$ e, na determinação de açúcar redutor total na amostra de $241,7 \mu\text{mol g}^{-1} \text{ b.s.}$ para $359,5 \mu\text{mol g}^{-1} \text{ b.s.}$, o que reporta que o processo de explosão a vapor melhorou a performance na obtenção de açúcares redutores. Sendo que provavelmente os polissacarídeos solúveis como a pectina e carboidratos não fibrosos são os principais componentes que hidrolisaram ou se fragmentaram e formaram açúcares redutores como a glicose (DAMODARAN, et al, 201).

Tabela 11 - Concentração de açúcar redutor que se solubiliza na água (C_{AR}) e açúcar redutor total (C_{ART}) nas farinhas FB e FPA

Tratamento	C_{AR} ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{ b.s.}$)	C_{ART} ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{ b.s.}$)
FB	$123,0 \pm 6,0$	$241,7 \pm 11,7$
FPA	$145,3 \pm 3,3$	$359,5 \pm 3,9$

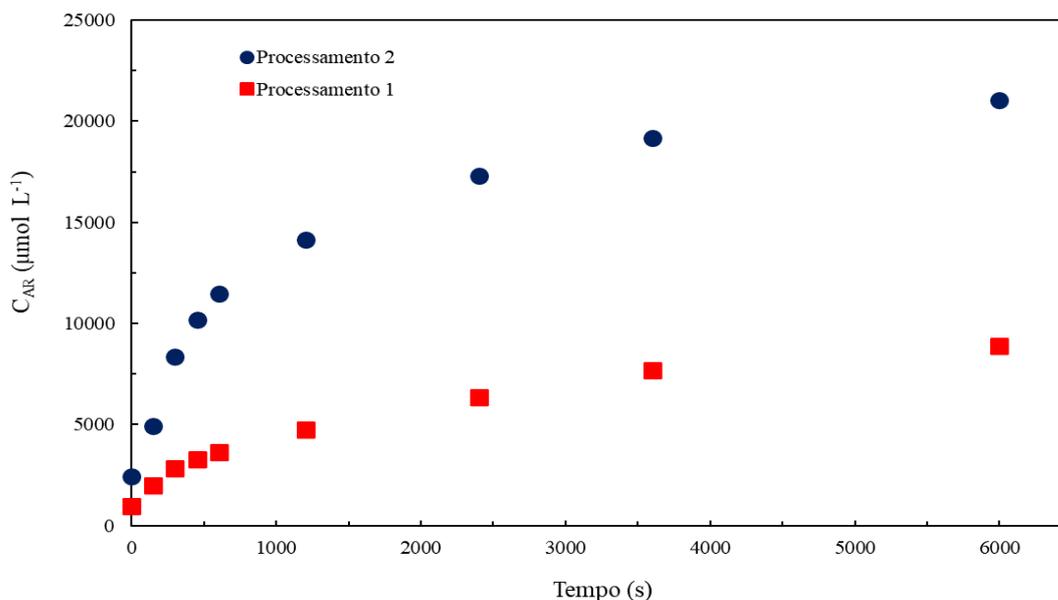
Fonte: o autor. Os valores na tabela são referentes as médias e os desvios padrão de três análises para cada condição experimental. FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave.

4.2.2. Cinética da Reação Ácida

Uma vez que o açúcar redutor é produzido na reação é ácida, é interessante acompanhar a evolução da concentração deste açúcar na solução ácida, porque a presença deste açúcar representa o quanto está ocorrendo de hidrólise ou diluição dos carboidratos durante o processo (ARNOUS et al., 2009).

Neste contexto, a Figura 20 exibe o perfil de concentração do açúcar redutor na solução ácida ao longo do tempo e, demonstra que os perfis dos processos de reação ácida quando utilizadas como matéria prima a farinha de bagaço de maçã (FB) (processamento 1) e a farinha de bagaço de maçã pós explosão a vapor (FPA) (processamento 2) são semelhantes, mas com intensidade bastante distintas. Obtendo assim maiores concentrações de açúcares redutores durante a reação ácida utilizando a farinha FPA. Este comportamento, de acordo com LIANG et al. (2018), ocorre porque o processo de explosão a vapor abre as paredes das estruturas dos carboidratos, facilitando a penetração do ácido e a ocorrência da hidrólise parcial.

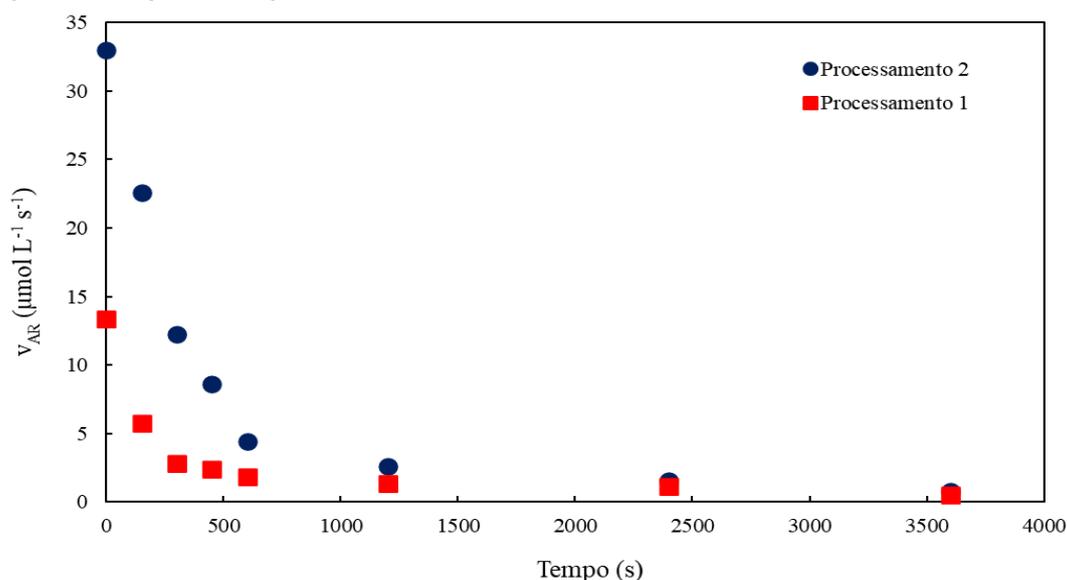
Figura 20 - Gráfico da concentração de açúcar redutor (C_{AR}) na solução ácida em função do tempo de reação



Fonte: o autor.

Devido ao mesmo motivo reportado a velocidade de formação do açúcar redutor também aumenta consideravelmente quando a reação ácida acontece utilizando a farinha FPA como matéria prima, aumentando drasticamente principalmente no começo da reação, pois no primeiro momento da reação parte considerável do carboidrato já hidrolisou ainda na explosão a vapor facilitando a diluição e consequente hidrólise na solução ácida, como ilustrado no gráfico da Figura 21.

Figura 21 - Gráfico da velocidade de formação do açúcar redutor na solução ácida em função do tempo de reação



Fonte: o autor.

4.3. ANÁLISE DA ESTRUTURA DAS FARINHAS

4.3.1. Grupos funcionais por infra vermelho (FTIR)

Quando as moléculas absorvem radiação no infravermelho, são excitadas para atingir um estado de energia maior, sendo então um processo quantizado. Desta maneira, uma molécula absorve apenas frequências selecionadas de radiação no infravermelho, correspondendo à faixas de frequências vibracionais de estiramento e dobramento das ligações na maioria das moléculas. Outro fator importante, como reportado na literatura especializada, as posições das bandas de absorção no espectro de infravermelho fornecem informações sobre a presença ou ausência de grupos funcionais específicos em uma molécula. A relação dos grupos funcionais e seus dominantes estão expostos no Quadro 1.

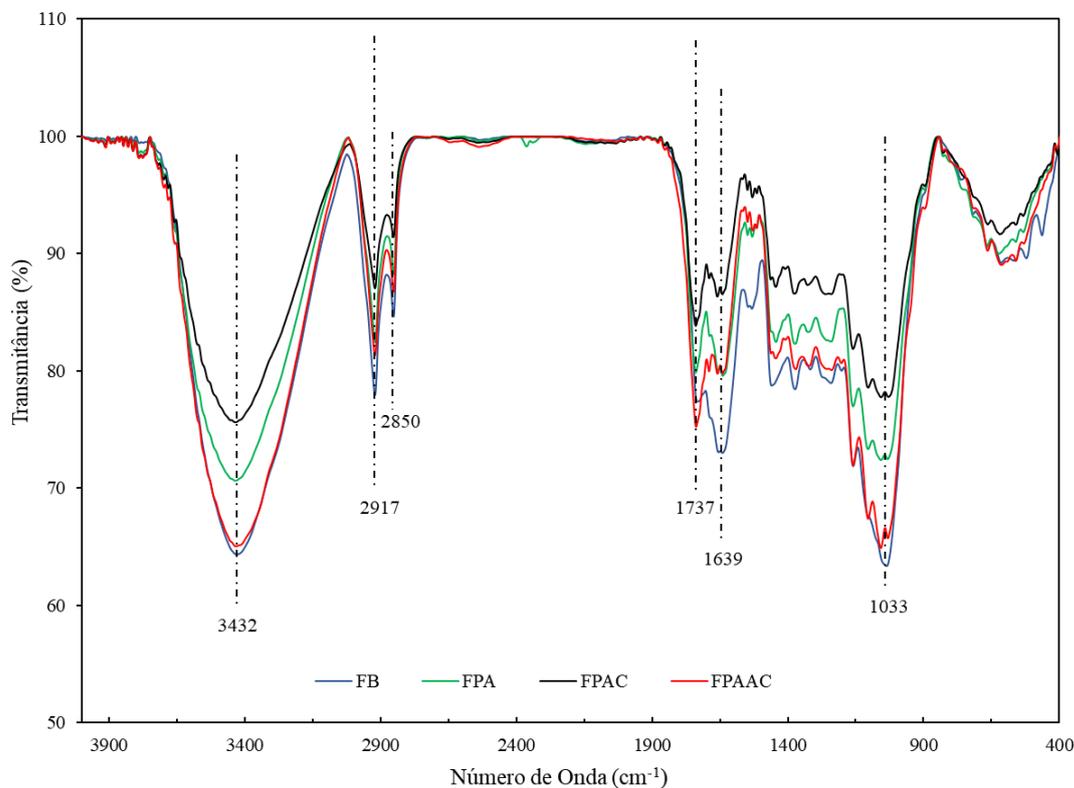
Quadro 1 - Grupos funcionais resumidos com seus dominantes para cada banda

Grupo Funcional	Possíveis Compostos	Vínculo Predominante
O-H estiramento	Grupo hidroxila da celulose, hemicelulose e ceras. Grupos hidroxila fenólica e alifática da lignina.	Celulose
C-H estiramento	Compostos alifáticos e alquílicos de celulose; Grupos metil de hemicelulose; Grupos metoxil de lignina; e grupos metileno de ceras.	-
C=O estiramento	Éster carbonílico e carboxílico de ácido carboxílico de hemicelulose; Carbonila de aldeído ou cetona e carboxílico de ácido carboxílico de lignina; Éster carboxílico de pectina e éster carbonílico de ceras.	Hemicelulose
C=C estiramento	Modo esquelético aromático de lignina.	Lignina
O=CH ₃	Grupos metoxila de lignina.	Lignina
O-H e C-H dobramento	Celulose, hemicelulose e lignina.	-
C-C alongamento	Anéis aromáticos de lignina	Lignina
C-O-C alongamento	Celulose, hemicelulose, lignina, pectina e ceras.	Lignina
C-O alongamento e deformação	Grupos de álcool de celulose.	Celulose
C-H flexão fora do plano	Hidrogênio aromático de lignina.	Lignina

Fonte: Adaptado de JAYAMANI et al., 2020.

Neste contexto, observando as curvas do gráfico da Figura 22, no pico de comprimento de onda de 3432 cm^{-1} , tem-se que o estiramento da ligação O-H foi devido à presença de grupos hidroxila de celulose, hemicelulose e ceras, bem como grupos hidroxila fenólicos e alifáticos da lignina; comportamento esse semelhante ao reportado por KACURAKOVA et al., 1999 e por JAYAMANI et al. (2020). Esta banda é forte e larga e é reportada em todos os espectros observados, porém com diferentes intensidades dos picos. Estas diferenças de intensidade podem ter ocorrido devido aos processamentos de explosão a vapor e tratamento ácido que a farinha de bagaço de maçã sofreu durante os estudos. Este comportamento sugere que o grupo funcional O-H se dissolveu na solução ou hidrolisou parcialmente durante os processos e no tratamento completo das moléculas de celulose que sofreram alteração em sua estrutura se diluíram na solução ácida, enquanto que parte das moléculas que ficaram contidas no sólido se assemelha àquela encontrada na amostra de farinha de bagaço de maçã (LÓPEZ-CÓRDOBA, et al., 2015).

Figura 22 - Espectros de FTIR para as farinhas processadas em diferentes condições



Fonte: o autor.

FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave; FPAC: farinha processada no ácido clorídrico; FPAAC: farinha processada na autoclave e no ácido clorídrico.

O número de onda 2917 cm^{-1} representa o estiramento assimétrico da ligação C-H, presente na celulose e hemicelulose, devido aos compostos alifáticos e alquílicos de celulose, grupos metil de hemicelulose e grupos metoxil de lignina e grupos metileno de ceras. Neste número de onda é possível observar que houve uma redução no estiramento do grupo funcional C-H em todos os tipos de farinhas processadas em relação à farinha bruta (FB).

O pico mais fraco de número de onda 2850 cm^{-1} indica o estiramento axial da ligação -CH do grupo formila de aldeídos.

O pico de estiramento C=O do éster ou grupos carboxilato em 1737 cm^{-1} é característico de éster carbonílico e carboxílico de ácido carboxílico de hemicelulose, carbonila de aldeído ou cetona e carboxílico de ácido carboxílico de lignina, éster carboxílico de pectina e éster carbonílico de ceras, enquanto, o pico do número de onda 1639 cm^{-1} origina-se da vibração de compostos não esterificados em pectinas (CHYLÍNSKA et al., 2016). Este último pico relatado aparece com intensidade média de transmitância somente para a FB, sendo de intensidade fraca nas FPA e FPAC e não aparecendo na FPAAC o que sugere que a pectina presente na farinha de bagaço de maçã, diluiu-se ou hidrolizou-se parcialmente na solução ácida no qual foi exposta.

A faixa das bandas entre 1600 cm^{-1} e 1000 cm^{-1} representam as absorvâncias dos monossacarídeos e dissacarídeos (YAMANAKA et al., 2007). Para os açúcares, houve muitos picos, como os modos de alongamento CO e C - OH, que intrincadamente se sobrepuseram, especialmente na região de 1.200 cm^{-1} a 950 cm^{-1} . Esses picos dependem da estrutura do açúcar e da interação entre as moléculas de açúcar. O pico de 1033 cm^{-1} representa as moléculas de glicose e do seu lado o da frutose com pico em aproximadamente 1065 cm^{-1} , ambos monossacarídeos (YAMANAKA et al., 2007). A intensidade do pico na banda da glicose é bastante elevada na FB e na FPAAC, indicando que inicialmente a concentração de glicose é elevada e depois dos processos sofridos pela FB, o teor de glicose se mantém elevado devido às alterações sofridas nas estruturas dos carboidratos.

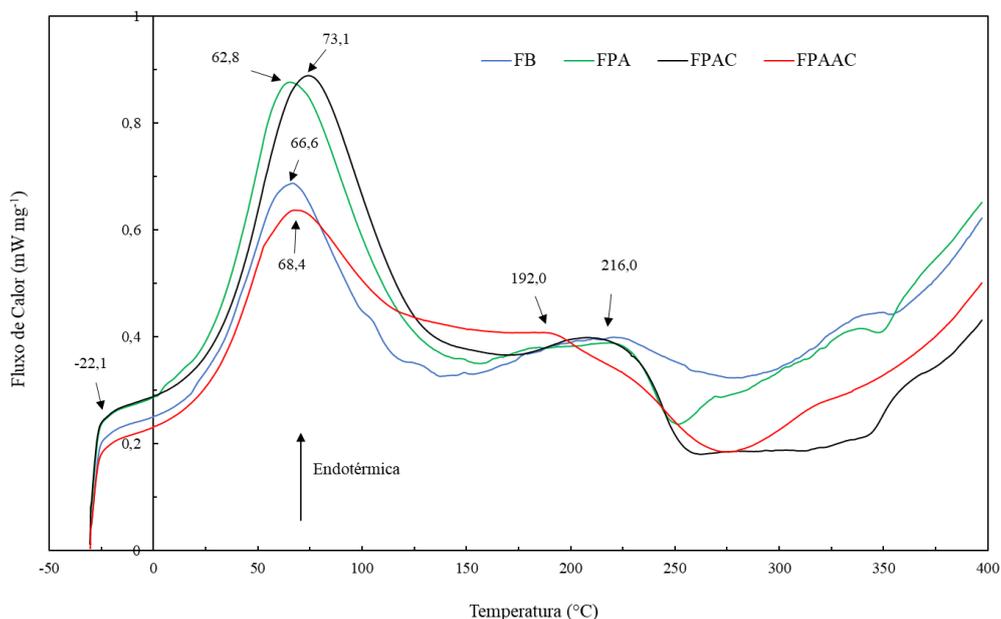
Assim com base nas análises dos espectros FTIR sugere-se que houve uma pequena alteração nas estruturas dos carboidratos maiores, como os polissacarídeos, com destaque para a diluição da pectina e ainda os dados indicam o desprendimento dos monossacarídeos, em especial da glicose.

4.3.2. Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial

A temperatura de transição da estrutura, ou seja, o ponto de fusão e a instabilidade de estruturas sólidas devido a um aumento na desordem molecular, podem ser observados na análise de calorimetria exploratória diferencial. Desta maneira, a Figura 23 apresenta as curvas de DSC e relata o comportamento da estrutura dos materiais de bagaço de maçã antes e após os processamentos.

A farinha de bagaço de maçã (FB) apresentou evento endotérmico ($T_{\text{pico}} = 66,6$ °C) bem definido, no entanto para os demais materiais sólidos (FPA, FPAC e FPAAC) com deslocamento do pico e aumento na intensidade do fluxo de calor absorvido, o que pode ser atribuído aos processos de explosão a vapor, tratamento ácido ou dos dois processos simultaneamente, que devem ter reduzido a quantidade de polissacarídeos presente na amostra sólida inicial, devido a uma hidrólise parcial ou diluição dos grupos funcionais.

Figura 23 - Análise de calorimetria exploratória diferencial para os diferentes produtos obtidos



Fonte: o autor.

FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave; FPAC: farinha processada no ácido clorídrico; FPAAC: farinha processada em autoclave e no ácido clorídrico.

A endotérmica de fusão típica para a celulose pode ser observada no pico de 216,0 °C (FILHO et al., 2007). Este pico não se apresenta com uma boa definição devido à

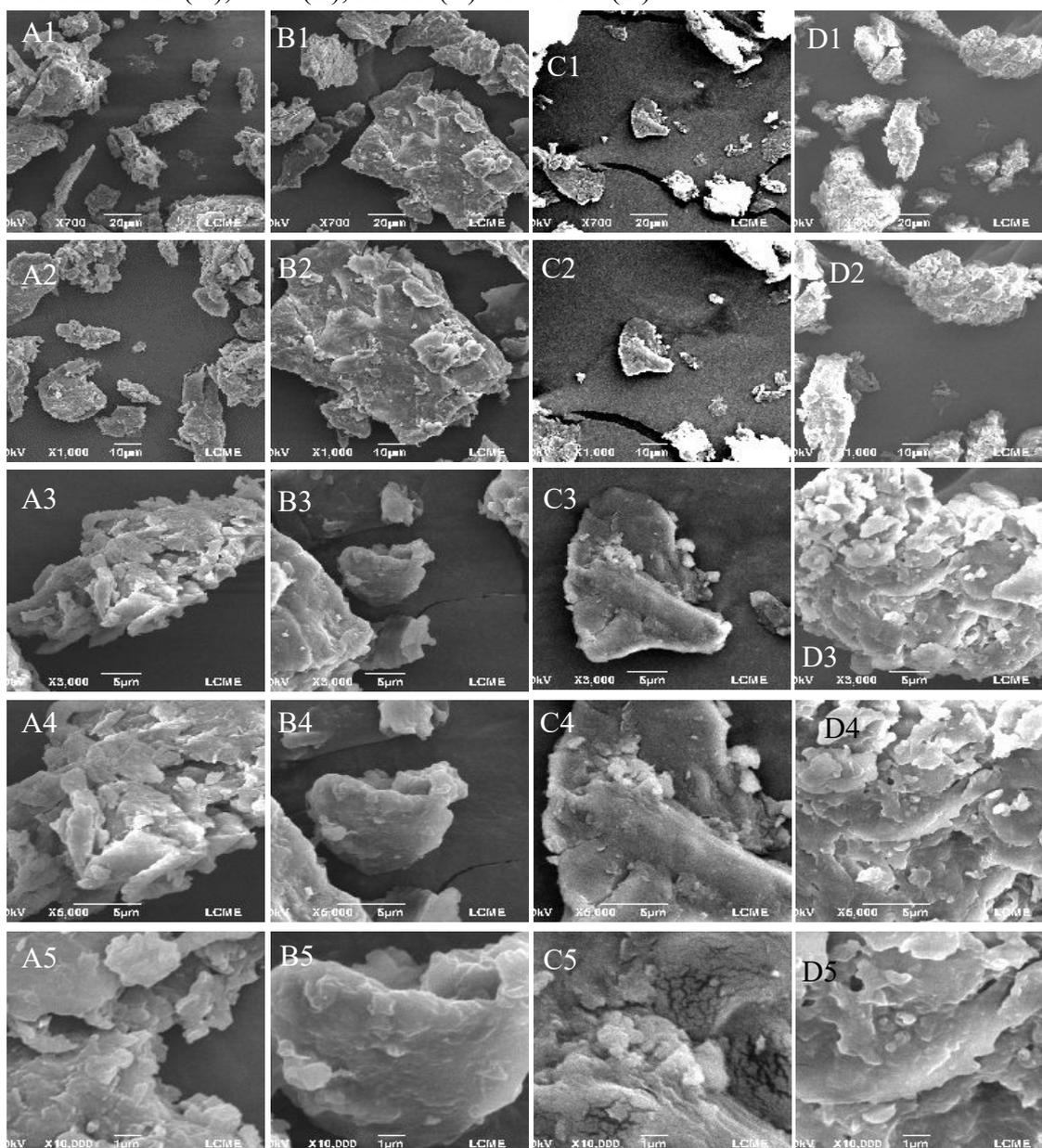
presença de outros carboidratos que apresentam região endotérmica de fusão semelhante, provocando sobreposição dos picos.

4.3.3. Análise Microscopia eletrônica de Varredura (MEV)

A fim de avaliar a estrutura física das diferentes farinhas processadas a análise de microscopia de varredura foi realizada e apresentada na Figura 24. Nesta Figura, são reportadas as imagens A1, A2, A3 e A4 que representam as imagens da farinha FA com ampliações de 700x, 1000x, 3000x, 6000x e 10000x respectivamente, da mesma maneira para a farinha FPA, representadas pelas imagens B1, B2, B3, B4 e B5, para farinha FPAC representadas pelas imagens C1, C2, C3, C4 e C5 e por último a farinha FPAAC com as imagens D1, D2, D3, D4 e D5. Na comparação entre as imagens A1, B1, C1 e D1 que estão reportadas com ampliação de 700x, é constatado que após os diferentes processamentos da farinha bruta, a morfologia das amostras permaneceram semelhantes mantendo o mesmo formato, todavia ocorreu uma ligeira modificação na estrutura da farinha sugerindo um aumento da fragmentação da estrutura dessas farinhas que foram processadas, sendo mais acentuada a fragmentação na farinha processada em autoclave e ácido clorídrico, comportamento este ocorrido provavelmente devido à explosão a vapor seguida do tratamento ácido os quais promovem a ruptura de estruturas fibrosas. Na medida em que se ampliam as imagens, observa-se que a estrutura da farinha processada em autoclave e ácido clorídrico está mais fragmentada e porosa (Imagem D5 da Figura 24), o que sugere que este processo interfere com maior intensidade na estrutura da farinha de bagaço de maçã bruta.

Assim, enquanto se ampliam as imagens, mais profundamente são observados os poros da farinha processada em autoclave seguido de tratamento ácido, e assim é observado que com as modificações na estrutura, os poros ficaram aparentemente mais abertos, o que tende a facilitar a absorção de água e óleo sugerindo um aumento na capacidade de retenção destes componentes. Estes comportamentos também foram observados por FERRERO et al. (1999), em processos de hidrólise ácida de fibras. Em relação à farinha processada somente no ácido clorídrico, este comportamento não é observado.

Figura 24 - Imagens MEV com ampliação de 700x, 1000x, 3000x, 6000x e 10000x para as farinhas FB (A), FPA (B), FPAC (C) e FPAAC (D)



Fonte: o autor.

FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave; FPAC: farinha processada no ácido clorídrico; FPAAC: farinha processada na autoclave e no ácido clorídrico.

4.4. ANÁLISE DAS FUNCIONALIDADES DAS FARINHAS PROCESSADAS

4.4.1. Capacidades de Retenção de Água e Óleo

As capacidades de retenção de água e óleo são de extrema importância para se avaliar a funcionalidade das farinhas processadas, porque quanto maior forem estes parâmetros nas farinhas, melhor será a aplicabilidade delas principalmente em alimentos.

Observando a Tabela 12 que exibe as capacidades de retenção de água e óleo em todas as farinhas, é possível sugerir que se obteve os melhores resultados com a farinha FB, com um nível de significância de $\alpha=0,05$, como reportado nas análises do Testes de Tukey das Tabelas 9 e 10. A provável justificativa para este resultado se deve ao fato da FB ter um maior teor de carboidratos e de fibra alimentares, sendo que as fibras apresentam as maiores capacidades de retenção de água e óleo entre os compostos que fazem parte das farinhas processadas (XUELI et al., 2014).

No estudo desenvolvido por XUELI et al. (2014), este obteve o valor de $3,0 \text{ g g}^{-1}$ de capacidade de retenção de água e $1,3 \text{ g g}^{-1}$ de capacidade de retenção de óleo na fibra alimentar isolada, processando o bagaço de maçã com solução ácida em condições semelhantes a deste estudo. Dessa maneira, é possível inferir que os resultados obtidos, tanto para capacidade de água como de óleo, são altamente satisfatórios visto que os menores valores de CRA e CRO foram de $6,5 \text{ g g}^{-1}$ e $4,6 \text{ g g}^{-1}$, ambos para a FPAAC. Atribui-se as elevadas capacidades de retenção ao tratamento de explosão a vapor em conjunto com a reação ácida que promovem a despolarização dos polissacarídeos abrindo a estrutura da parede celular com aumento da porosidade o que facilita a penetração de água e óleo e intensifica as interações com os grupos hidrofílicos das fibras das farinhas processadas (XUELI et al., 2014).

Tabela 12 - Capacidades de retenção de água e de óleo nas amostras de todos os processamentos

Caracterização	FB	FBPA	FPAC	FPAAC
Capacidade de Retenção de Óleo ($\text{g óleo g massa seca}^{-1}$)	$6,8 \pm 0,1$	$6,2 \pm 0,5$	$5,5 \pm 0,3$	$4,6 \pm 0,0$
Capacidade de Retenção de Água ($\text{g água g massa seca}^{-1}$)	$8,8 \pm 0,1$	$7,2 \pm 0,1$	$7,2 \pm 0,1$	$6,5 \pm 0,1$

Fonte: o autor. Os valores na tabela são referentes as médias e os desvios padrão de três análises para cada condição experimental.

FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave; FPAC: farinha processada no ácido clorídrico; FPAAC: farinha processada na autoclave e no ácido clorídrico.

Assim, a capacidade de retenção de óleo (CRO) pode refletir a capacidade dos carboidratos, incluindo principalmente as fibras alimentares, de adsorver gordura ou óleo, o que é importante para prevenção da perda de gordura e para a garantia da estabilização de produtos com alto teor de gordura e emulsões durante o processamento de alimentos (ELLEUCH et al. 2011). A capacidade de retenção de água (CRA) é uma propriedade de hidratação, que se refere à capacidade de reter água na matriz da fibra (GUILLON E

CHAMP, 2000). A fibra alimentar com alta propriedade de hidratação pode ser usada como ingrediente funcional, modificar a textura de alguns alimentos formulados (GRIGELMO-MIGUEL E MARTIN-BELLOSO, 1999) e aumentar a viscosidade dos alimentos.

Tabela 13 - Análise de Tukey ao nível significância $\alpha=0,05$ para a capacidade de retenção de água das amostras

Tratamento	(1) 8,8 g água g massa seca-1	(2) 7,2 g água g massa seca-1	(3) 7,2 g água g massa seca-1	(4) 6,5 g água g massa seca-1
FB		0,0002 ^a	0,0002 ^b	0,0002 ^c
FPA	0,0002 ^a		0,9892	0,0002 ^d
FPAC	0,0002 ^b	0,9892		0,0002 ^e
FPAAC	0,0002 ^c	0,0002 ^d	0,0002 ^e	

Fonte: o autor. ^{a, b, c, d, e} representam médias (g água g massa seca⁻¹) significativamente diferentes ao nível $\alpha=0,05$.

FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave; FPAC: farinha processada no ácido clorídrico; FPAAC: farinha processada na autoclave e no ácido clorídrico.

Tabela 14 - Análise de Tukey ao nível significância $\alpha=0,05$ para a capacidade de retenção de óleo das amostras

Tratamento	(1) 6,8 g óleo g massa seca ⁻¹	(2) 6,2 g óleo g massa seca ⁻¹	(3) 5,5 g óleo g massa seca ⁻¹	(4) 4,6 g óleo g massa seca ⁻¹
FB		0,0002 ^a	0,0002 ^b	0,0002 ^c
FPA	0,0002 ^a		0,0002 ^d	0,0002 ^e
FPAC	0,0002 ^b	0,0002 ^d		0,0002 ^f
FPAAC	0,0002 ^c	0,0002 ^e	0,0002 ^f	

Fonte: o autor. ^{a, b, c, d, e, f} representam médias em g óleo g massa seca⁻¹ significativamente diferentes ao nível $\alpha=0,05$.

FB: farinha bruta de bagaço de maçã; FPA: farinha de bagaço de maçã processada em autoclave; FPAC: farinha processada no ácido clorídrico; FPAAC: farinha processada na autoclave e no ácido clorídrico.

4.5. RESULTADOS DA SECAGEM EM CAMADA DELGADA

Nesta seção são reportados os resultados e discussão acerca do estudo da secagem do bagaço de maçã em camada delgada, nas abordagens experimental e computacional.

4.5.1. Estudo Experimental da Secagem

4.5.1.1. Parâmetros obtidos durante os experimentos de secagem

Os valores calculados para as propriedades do ar de secagem em cada um dos casos, bem como os valores de temperatura de bulbo seco (T_{bs}) e bulbo úmido. (T_{bu}), obtidos experimentalmente, estão apresentados nas Tabelas 15 e 16, para a secagem da pasta e do bagaço de maçã, respectivamente e foram utilizados para compreender o comportamento da secagem em todos os experimentos e como dado de entrada do modelo computacional. Ocorreram pequenas variações nestes parâmetros o que sugere que estas não interferiram na diferenciação do comportamento da secagem nos diferentes experimentos conduzidos.

Tabela 15 - Condições experimentais do ar ambiente para a secagem da pasta de bagaço de maçã

Parâmetros do Ar de Secagem	T_{bs} (°C)	T_{bu} (°C)	P_{sat} (Pa)	UR (%)	UA_{amb} (kg H_2O kg^{-1} ar seco)	$c_{A\infty}$ (mol H_2O m^{-3} ar seco)
2,5 $m\ s^{-1}$ e 70 °C	18,7	16,4	2159	79,6	0,01073	0,613
1,7 $m\ s^{-1}$ e 70 °C	18,3	15,6	2114	75,7	0,00997	0,569
2,5 $m\ s^{-1}$ e 60 °C	19,3	16,0	2244	71,4	0,01000	0,589
1,7 $m\ s^{-1}$ e 60 °C	19,7	17,7	2289	82,6	0,01183	0,697
2,1 $m\ s^{-1}$ e 65 °C	19,6	17,5	2278	82,0	0,01168	0,677

Fonte: o autor.

Tabela 16 - Condições experimentais do ar ambiente para a secagem do bagaço de maçã

Parâmetros do Ar de Secagem	T_{bs} (°C)	T_{bu} (°C)	P_{sat} (Pa)	UR (%)	UA_{amb} (kg H_2O kg^{-1} ar seco)	$c_{A\infty}$ (mol H_2O m^{-3} ar seco)
2,5 $m\ s^{-1}$ e 70 °C	19,1	17,3	2269	85,2	0,01183	0,676
1,7 $m\ s^{-1}$ e 70 °C	17,4	14,8	2013	76,1	0,00955	0,545
2,5 $m\ s^{-1}$ e 60 °C	19,0	18,0	2246	89,8	0,01264	0,745
1,7 $m\ s^{-1}$ e 60 °C	18,2	16,4	2117	84,5	0,01118	0,659
2,1 $m\ s^{-1}$ e 65 °C	17,7	15,3	2061	78,0	0,01003	0,582

Fonte: o autor.

4.5.1.2. Curvas de secagem da pasta e do bagaço de maçã

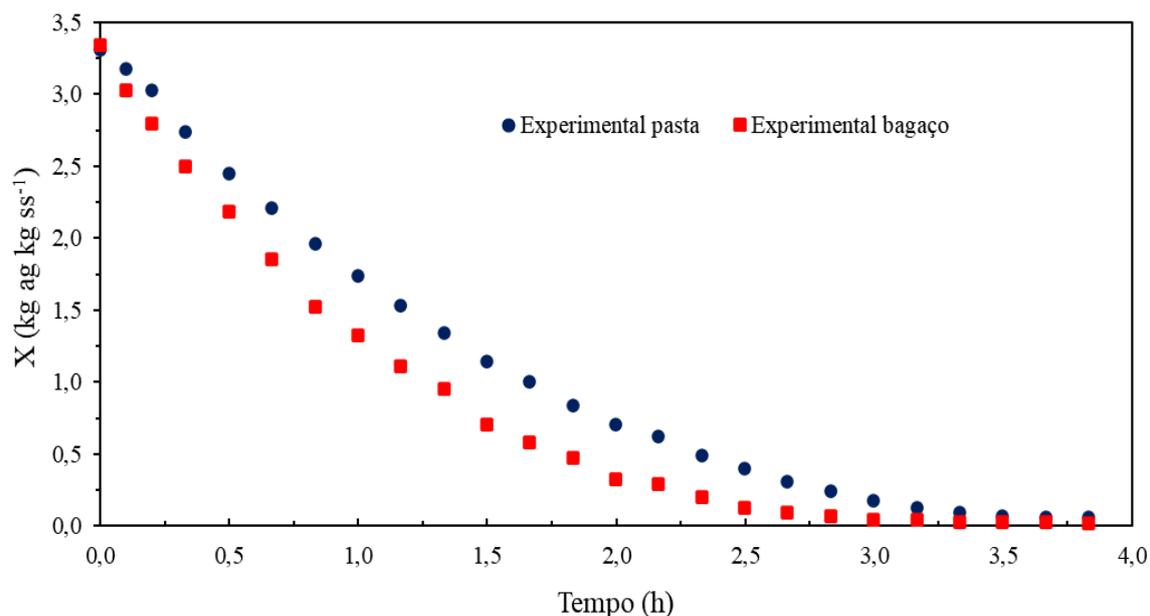
Os gráficos reportados nas Figuras 25 a 29 apresentam o teor de umidade em base seca do material em função do tempo, representando assim as curvas que mostram o comportamento de secagem em camada delgada da pasta e do bagaço de maçã nos testes

conduzidos. Observando as curvas de secagem é possível identificar os diferentes tipos de períodos de secagem, em cada uma das condições estudadas. Em geral, tanto para a pasta como para o bagaço de maçã, no início da secagem percebe-se um período de aquecimento do material, seguido pelo período de secagem a taxa constante e na sequência é observado o período de taxa decrescente.

O comportamento reportado nas curvas de secagem também foi observado por AGHBASHLO et al. (2008) secando frutas, por SANDER (2007) secando material poroso e ZHOU et al. (2019) na desidratação do bagaço de pêssego.

Quando a amostra úmida foi colocada no duto de secagem estava em uma temperatura inicial menor do que a de equilíbrio termo-higroscópico que se obtém durante a secagem. Assim, imediatamente após o contato com o ar de secagem, a temperatura do material úmido atingiu a temperatura de bulbo úmido do ar.

Figura 25- Curva de secagem do bagaço de maçã e da pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de $2,5 \text{ m s}^{-1}$ e $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$

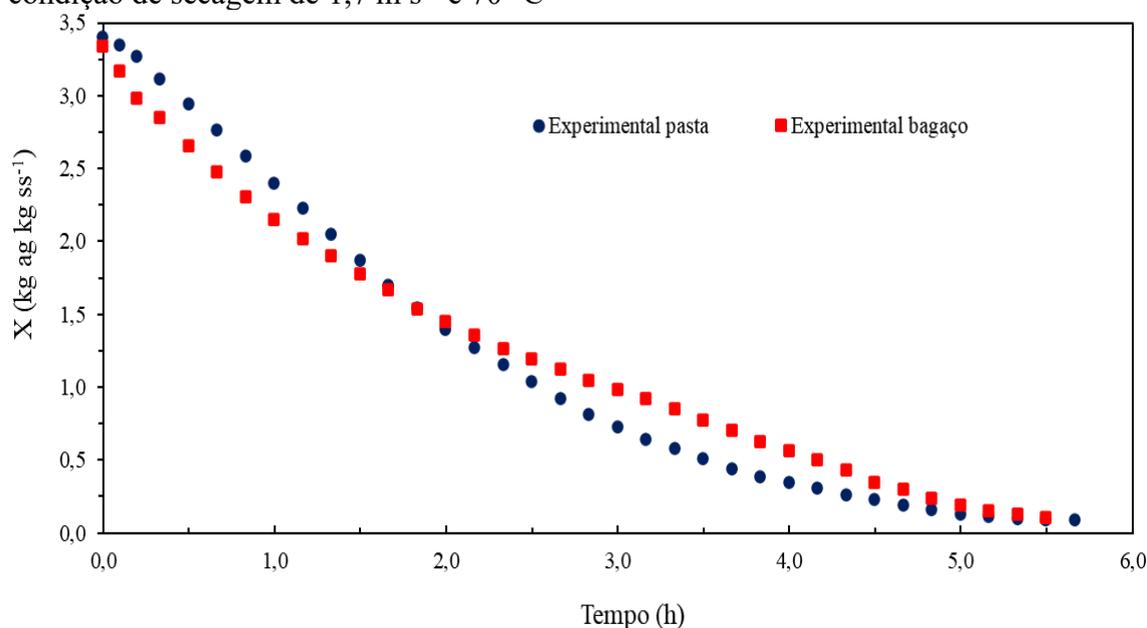


Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Durante este período inicial, a secagem ocorreu em condição transiente até atingir o período de taxa de secagem constante sendo observado este comportamento de maneira mais acentuada na secagem da pasta de bagaço de maçã, provavelmente devido ao maior teor de água superficial. O tempo de permanência neste período foi relativamente curto onde aconteceram fenômenos de transferências simultâneas de calor e massa como corroborado pela literatura especializada (GEANKOPLIS, 1993; SANDER, 2007).

O segundo período é o da taxa constante, o qual apresenta a maior velocidade de retirada de água do material e este comportamento é reportado em todos os experimentos conduzidos e é possível observar em todos os ensaios que com as mesmas condições a velocidade de secagem a taxa constante no bagaço de maçã é maior do que na pasta. Este comportamento pode ter ocorrido por que é de se esperar que o fluxo de saída de água do bagaço de maçã seja mais fácil do que da pasta, porque o bagaço reporta um maior controle da secagem devido ao movimento do líquido por difusão, comportamento típico de alimentos, enquanto que a pasta perde parte deste comportamento como visualizado nas curvas devido aos processos de preparação que sofreu, os quais promoveram principalmente a redução do tamanho de partícula do sólido presente na pasta.

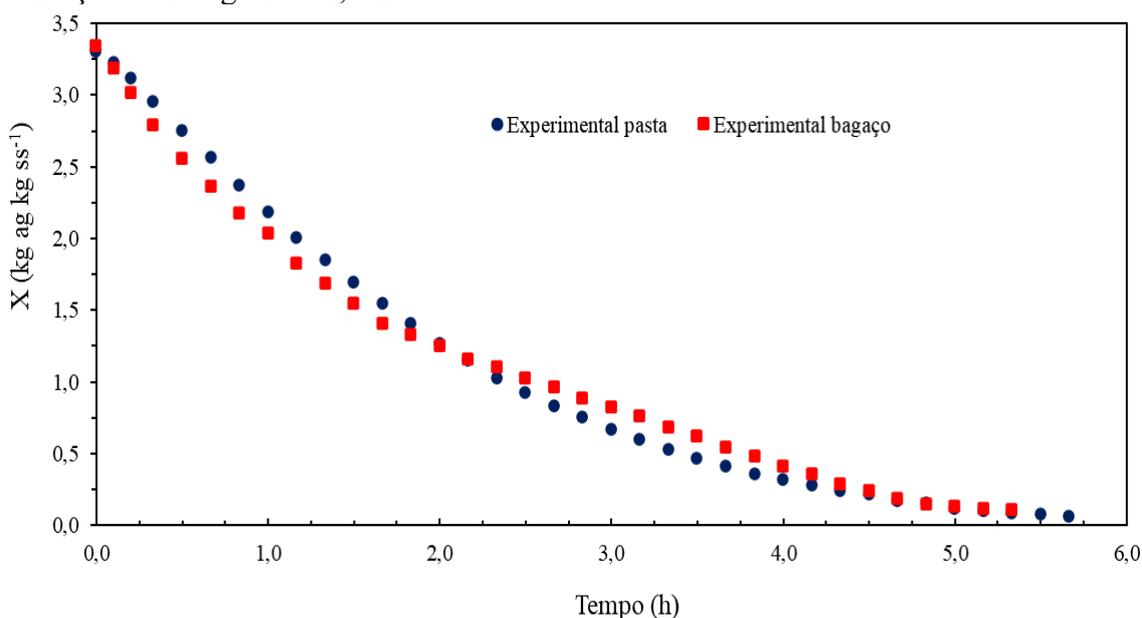
Figura 26 - Curva de secagem do bagaço de maçã e da pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de $1,7 \text{ m s}^{-1}$ e $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

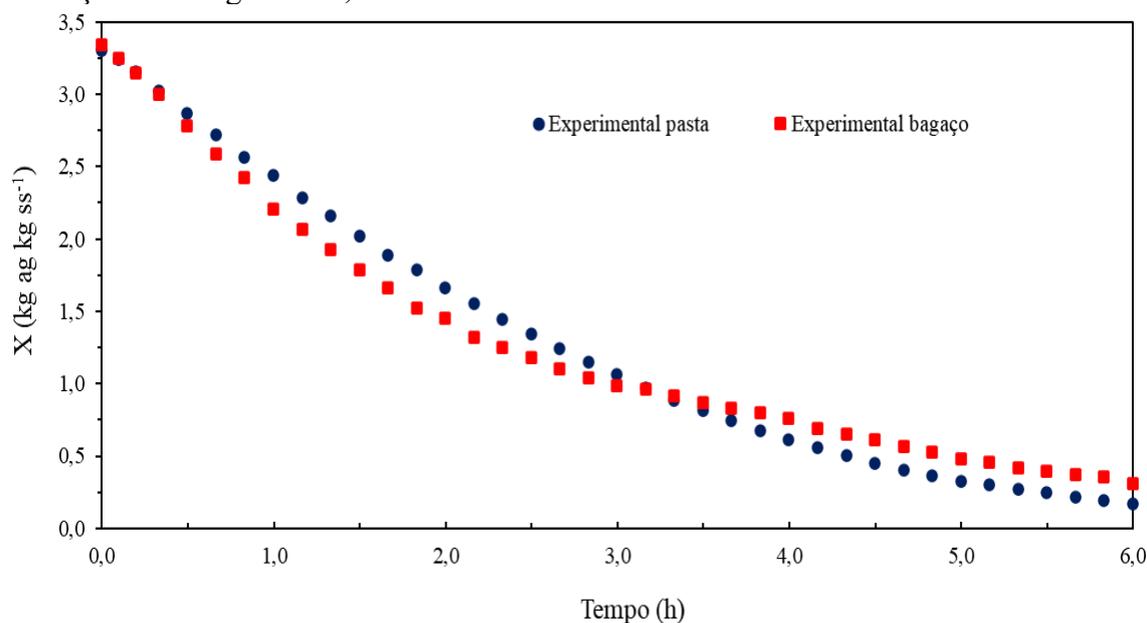
No período de taxa constante a secagem ocorre somente devido a fenômenos de transferência de massa uma vez que a temperatura do material se mantém próxima a temperatura de saturação na condição próxima a temperatura de bulbo úmido do ar secante até o término deste período. Por consequência destas fenomenologias a condição de secagem da pasta de bagaço de maçã a $2,5 \text{ m s}^{-1}$ e $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ apresentou o menor tempo de secagem no período de taxa constante.

Figura 27 - Curva de secagem do bagaço de maçã e da pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de $2,5 \text{ m s}^{-1}$ e $60 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Figura 28 - Curva de secagem do bagaço de maçã e da pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de $1,7 \text{ m s}^{-1}$ e $60 \text{ }^\circ\text{C}$



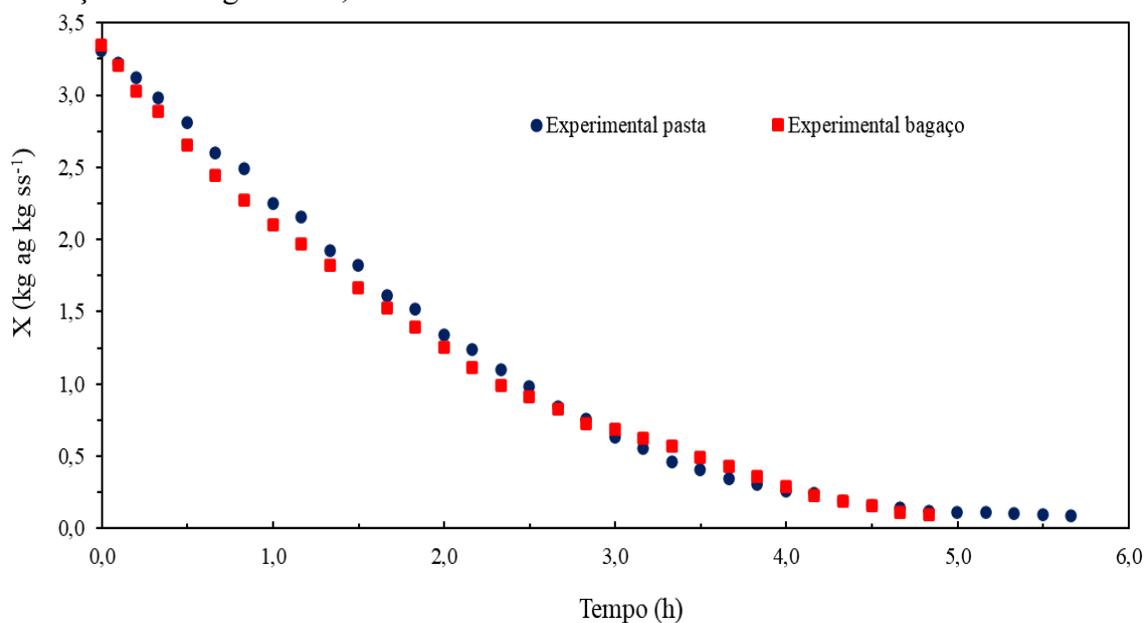
Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Após o período de taxa constante temos a taxa decrescente, que se caracteriza pela redução acentuada do teor de umidade do material com o tempo. Este período é observado em todos os ensaios conduzidos e são demonstrados nas curvas das Figuras 25 a 29 e se estende até o final do processo de secagem, se caracterizando este último como o período que mais impacta no tempo de secagem. De acordo com BABALIS e BELESSIOTIS

(2004), este comportamento é típico de frutas e materiais biológicos, como o utilizado neste estudo.

Na secagem do bagaço de maçã e na pasta não foi possível observar os dois períodos de taxa decrescente, foi observado somente um período como na maior parte dos estudos (BATISTA et al., 2007 e DOTTO et al., 2011). A velocidade da secagem durante a taxa decrescente foi maior quando a amostra era a pasta de bagaço de maçã do que quando secava o bagaço e este comportamento se deve ao fato do período de taxa decrescente ser governado pelo movimento de umidade no material que ocorre porque a superfície da amostra não está mais saturada de água e com o diâmetro médio das partículas do bagaço são maiores é de se esperar que se tenha maior dificuldade de se retirar a umidade do centro do material.

Figura 29 - Curva de secagem do bagaço de maçã e da pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de $2,1 \text{ m s}^{-1}$ e $65 \text{ }^\circ\text{C}$



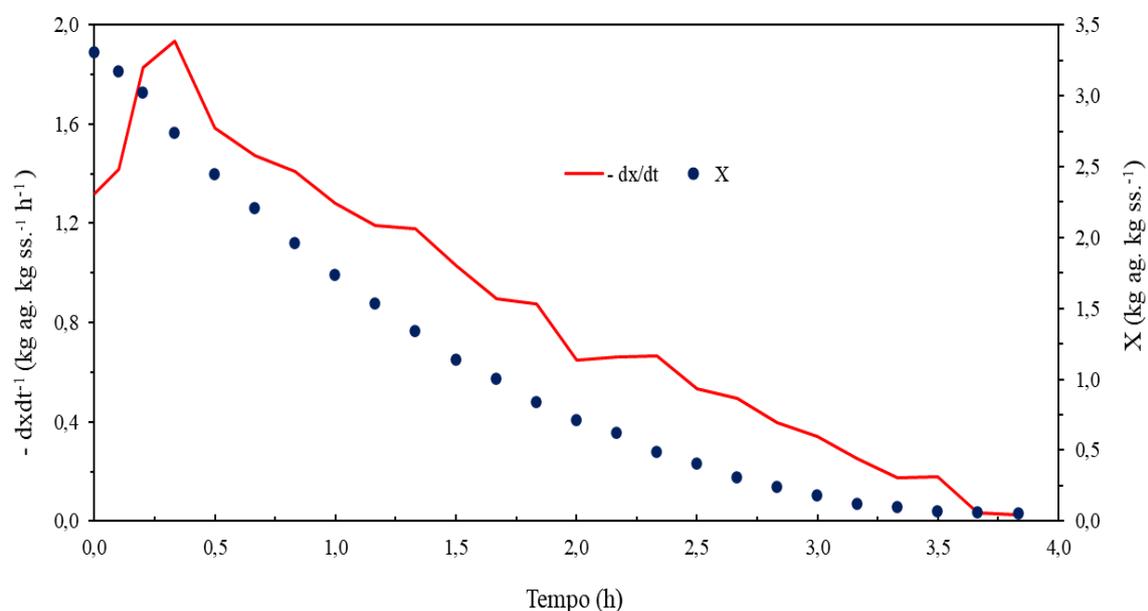
Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Para corroborar com o reportado anteriormente em relação a secagem da pasta de bagaço de maçã foram desenvolvidas as curvas típicas do fluxo de secagem e do teor de umidade em função do tempo e estão reportadas nas Figuras 30 a 34, onde foram observados com maior facilidade os períodos da secagem, podendo observar um comportamento típico de um material biológico como alimentos.

A primeira fase de aquecimento da amostra e aumento da velocidade de secagem é observado em todos os ensaios. A fase de taxa constante da mesma maneira é

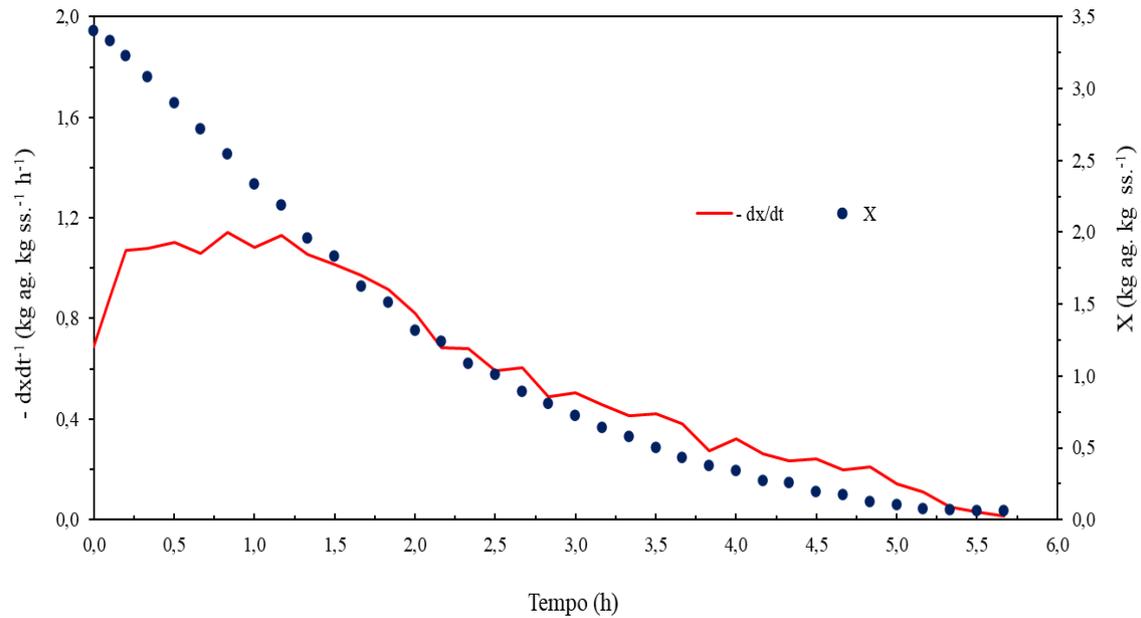
evidenciada em todos experimentos, com destaque para a condição de secagem com temperatura de 70 °C e 2,5 m s⁻¹ que devido a elevada capacidade de transferência de energia e massa, rapidamente retira a umidade livre da amostra. No período de taxa decrescente é difícil de se observar a presença das duas fazes decrescente o que indica que a difusão de calor e massa está diminuindo e que com as condições operacionais utilizadas não foi possível retirar a umidade que fica retida em pequenas bolsas em poros pequenos espalhados em todo o sólido.

Figura 30 - Curva da taxa de secagem e do teor de umidade em função do tempo para a pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de 2,5 m s⁻¹ e 70 °C



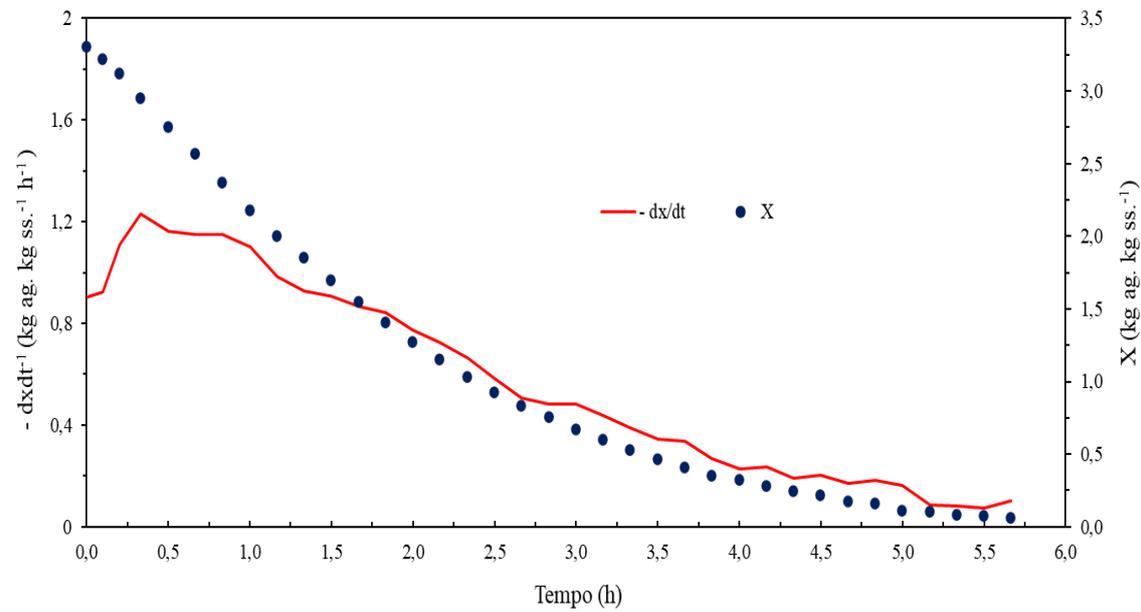
Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Figura 31 - Curva da taxa de secagem e do teor de umidade em função do tempo para a pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de $1,7 \text{ m s}^{-1}$ e $70 \text{ }^\circ\text{C}$



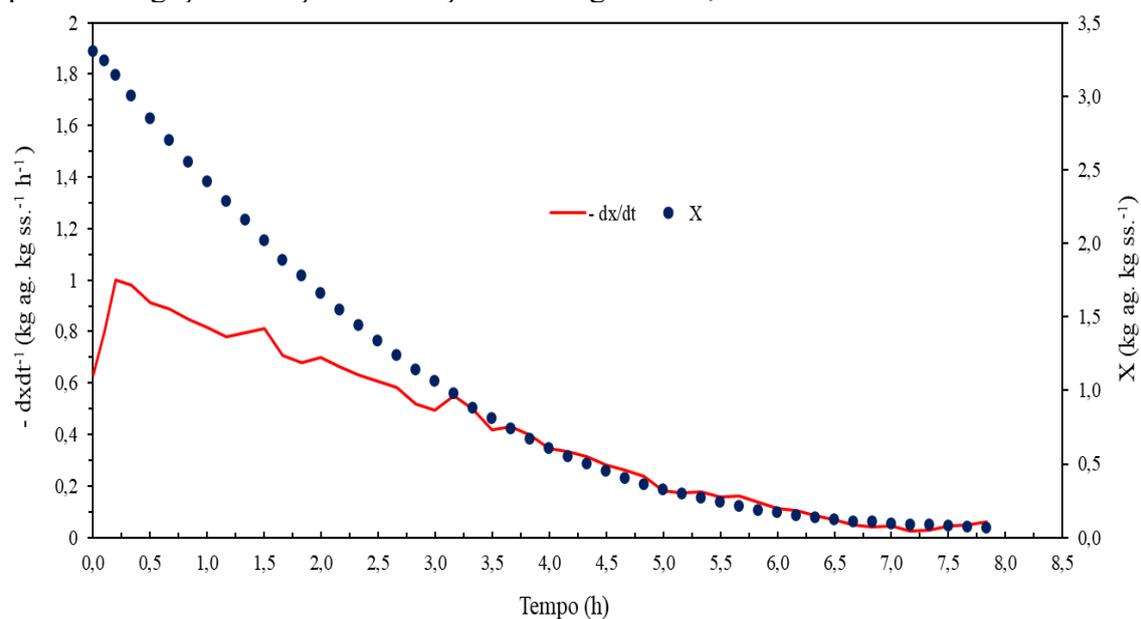
Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Figura 32 - Curva da taxa de secagem e do teor de umidade em função do tempo para a pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de $2,5 \text{ m s}^{-1}$ e $60 \text{ }^\circ\text{C}$



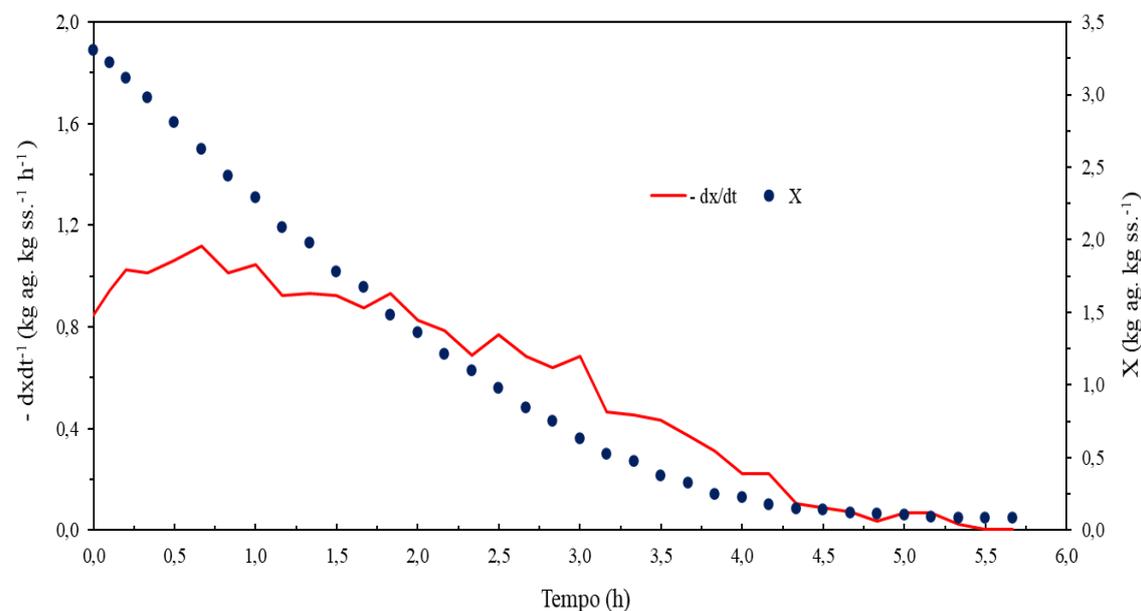
Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Figura 33 - Curva da taxa de secagem e do teor de umidade em função do tempo para a pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de $1,7 \text{ m s}^{-1}$ e $60 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Figura 34 - Curva da taxa de secagem e do teor de umidade em função do tempo para a pasta de bagaço de maçã na condição de secagem de $2,1 \text{ m s}^{-1}$ e $65 \text{ }^\circ\text{C}$



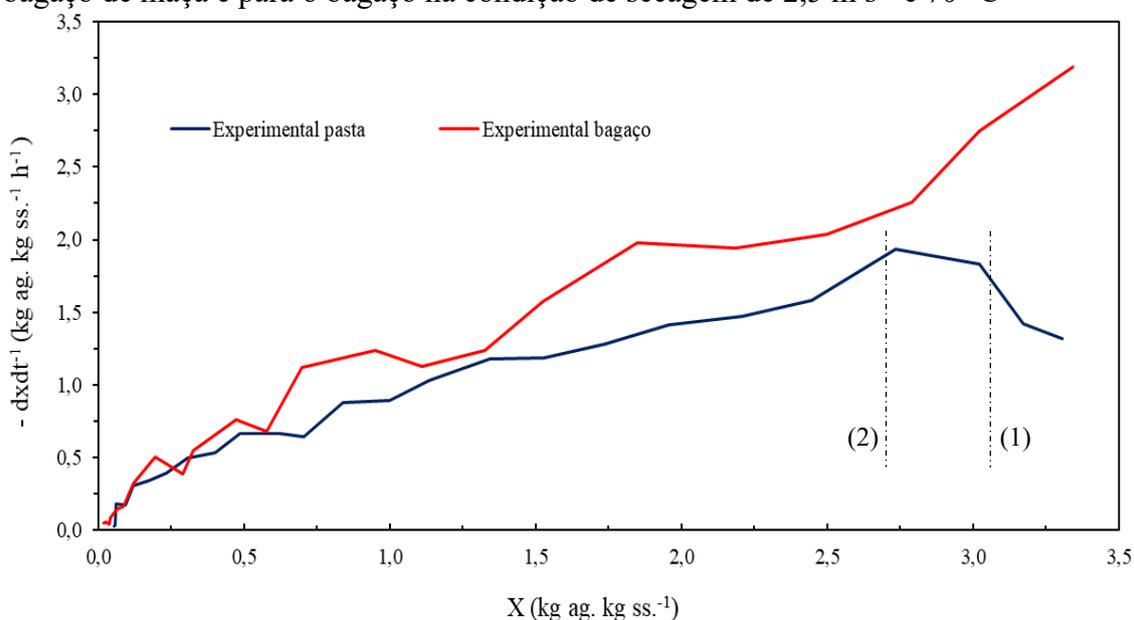
Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

A clássica curva de secagem que apresenta a velocidade de secagem em função do teor de umidade é reportada para cada um dos ensaios conduzidos nas Figuras 35 a 39, e neste estudo as curvas foram utilizadas para analisar o efeito da temperatura e da velocidade do ar de secagem na comparação entre os perfis de secagem da pasta de bagaço de maçã com a do bagaço de maçã.

Em todos os casos avaliados, os perfis de velocidade de secagem reportam o mesmo padrão de comportamento. O que diferencia um estudo do outro é a velocidade com a qual o conteúdo de água é retirado da pasta e do bagaço. Para o caso com temperatura de 70 °C e velocidade do ar de 2,5 m s⁻¹, a água é rapidamente retirada do material, provavelmente das regiões próximas à superfície da pasta ou do bagaço, enquanto que para o caso a 60 °C e 1,7 m s⁻¹ a velocidade de retirada de água é sensivelmente reduzida. Este comportamento está totalmente em acordo com as teorias fundamentais da secagem (GEANKOPLIS, 1993; WELTY et al., 2008).

O efeito da velocidade do ar de secagem também pode ser evidenciado no início do processo de secagem, implicando que o processo de evaporação ocorreu mais rapidamente no experimento de temperatura de 70 °C e velocidade do ar 2,5 m s⁻¹ em comparação com o experimento com mesma temperatura a 70 °C e menor velocidade do ar a 1,7 m s⁻¹. Da mesma maneira podemos relatar a maior velocidade de secagem do experimento 60 °C e 2,5 m s⁻¹ quando comparado com o ensaio conduzido a 60 °C e 1,7 m s⁻¹ (Figuras 35 à 39) e este comportamento também é encontrado na literatura especializada (GEANKOPLIS, 1993; WELTY et al., 2008).

Figura 35 - Curva da taxa de secagem em função do teor de umidade para a pasta de bagaço de maçã e para o bagaço na condição de secagem de 2,5 m s⁻¹ e 70 °C

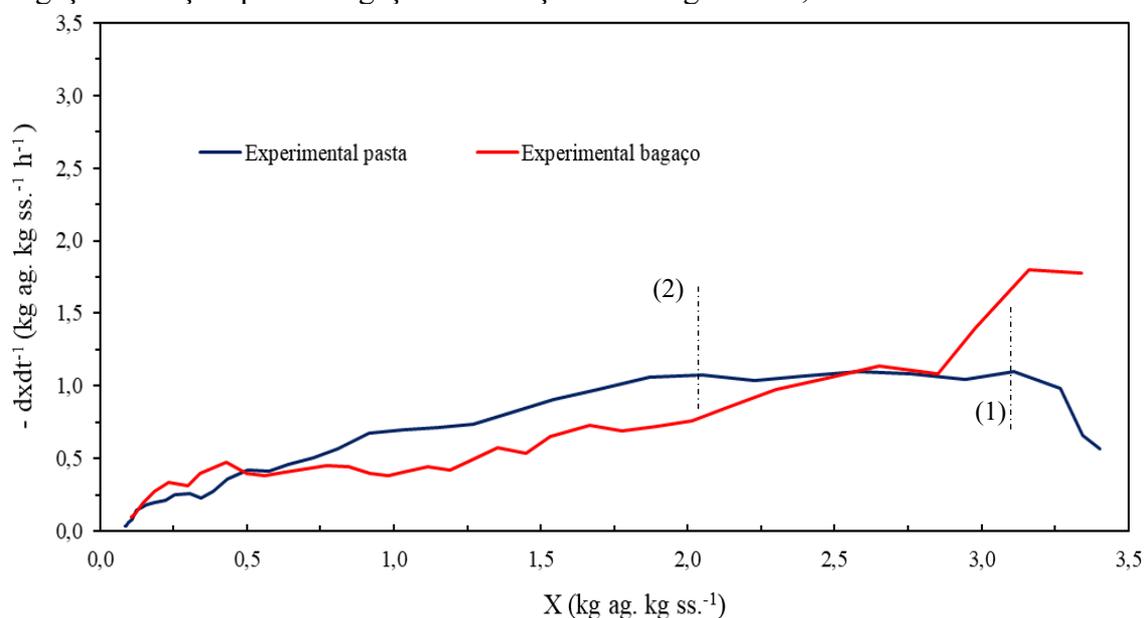


Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

O efeito da temperatura na velocidade de secagem é evidenciado nas Figuras 35 a 39, e assim como a velocidade do ar de secagem, os ensaios conduzidos com maiores temperaturas e mesma velocidade do ar apresentaram maiores velocidades de secagem,

primordialmente no começo do processo de secagem, tanto para pasta como para o bagaço. O processo de evaporação ocorreu mais rapidamente no experimento de temperatura de 70 °C e velocidade do ar 2,5 m s⁻¹ em comparação com o experimento com menor temperatura a 60 °C e mesma velocidade do ar a 2,5 m s⁻¹. Da mesma maneira podemos relatar a maior velocidade de secagem do experimento 70 °C e 1,7 m s⁻¹ quando comparado com o ensaio conduzido a 60 °C e 1,7 m s⁻¹ (Figuras 35 a 39), este comportamento semelhante também foram reportados em estudos com secagem de alimentos e materiais biológicos, como o estudo desenvolvido por SIMIONI, 2015, e também na literatura especializada (GEANKOPLIS, 1993; WELTY et al., 2008).

Figura 36 - Curva da taxa de secagem em função do teor de umidade para a pasta de bagaço de maçã e para o bagaço na condição de secagem de 1,7 m s⁻¹ e 70 °C

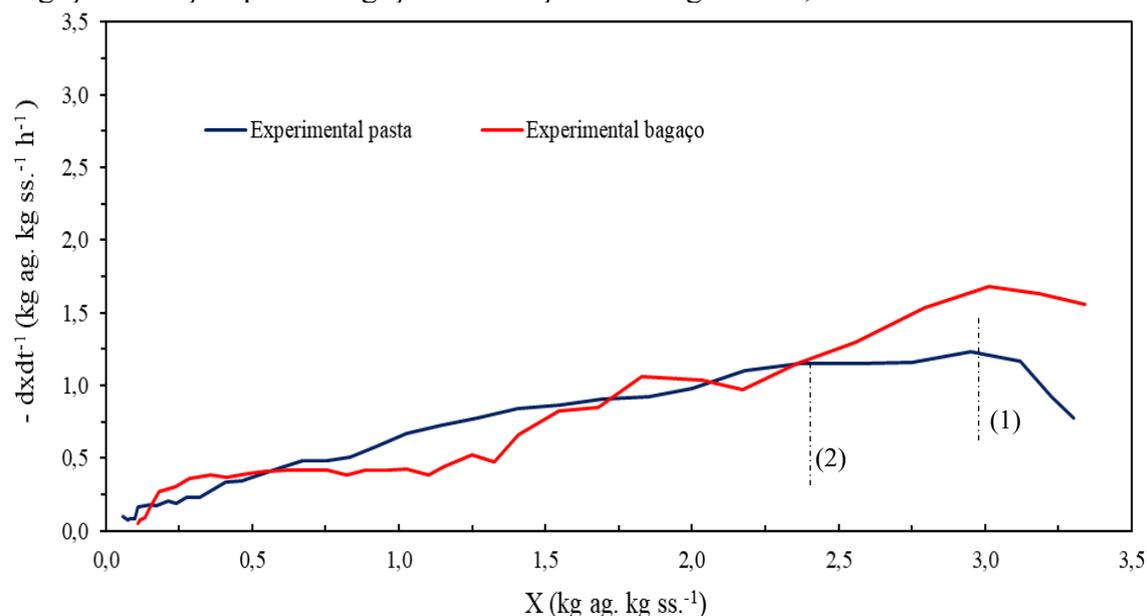


Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Os períodos da secagem são melhores visualizados nos gráficos das Figuras 35 – 39, onde o término do período de aquecimento e início da taxa constante são informados pela linha tracejada (1) em todos os gráficos, enquanto que o término do período de taxa constante e início da taxa decrescente estão marcados pela linha tracejada (2). E, em geral o conteúdo de água no início da taxa constante nos estudos realizados ficou entre 3,1 g g⁻¹ e 2,9 g g⁻¹ em base seca e no término da taxa constante entre 2,7 g g⁻¹ e 2,1 g g⁻¹ em base seca. Nos estudos com condições operacionais diferentes os conteúdos de água que identificam a troca dos períodos estão relativamente próximos o que sugere que as condições operacionais testadas pouco interferem no conteúdo de água associado a essas transições.

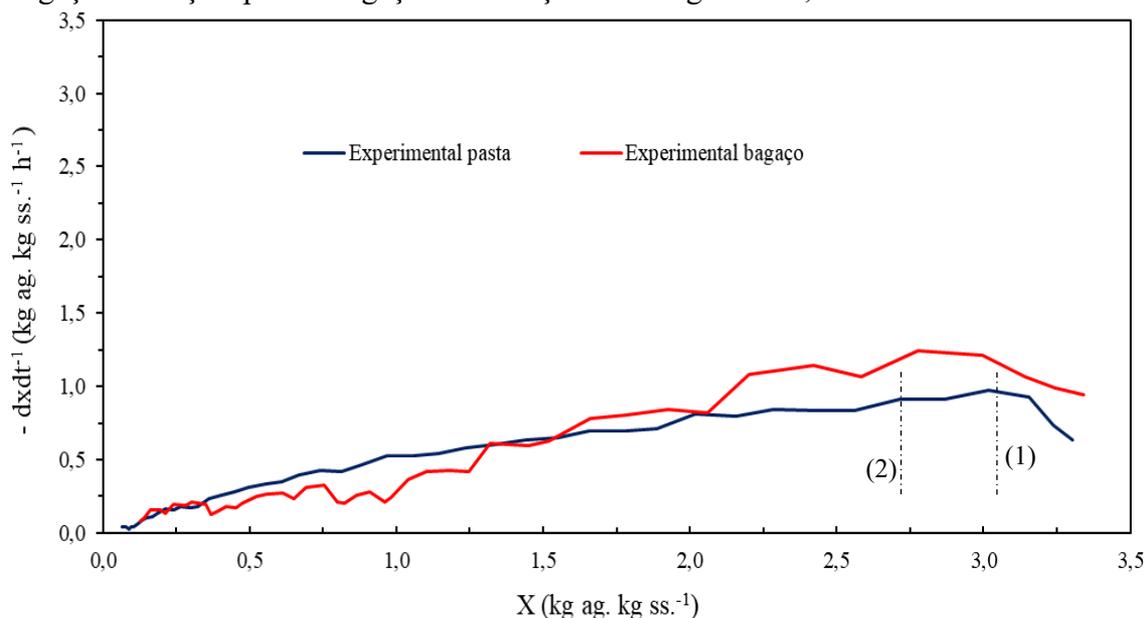
Porém, analisando o tempo da secagem que correspondem às transições em cada um dos períodos citados é possível visualizar que as condições operacionais estudadas, velocidade e temperatura do ar de secagem, podem influenciar decisivamente no tempo da secagem e essa análise será melhor analisada a seguir na Tabela 17.

Figura 37 - Curva da taxa de secagem em função do teor de umidade para a pasta de bagaço de maçã e para o bagaço na condição de secagem de $2,5 \text{ m s}^{-1}$ e $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$



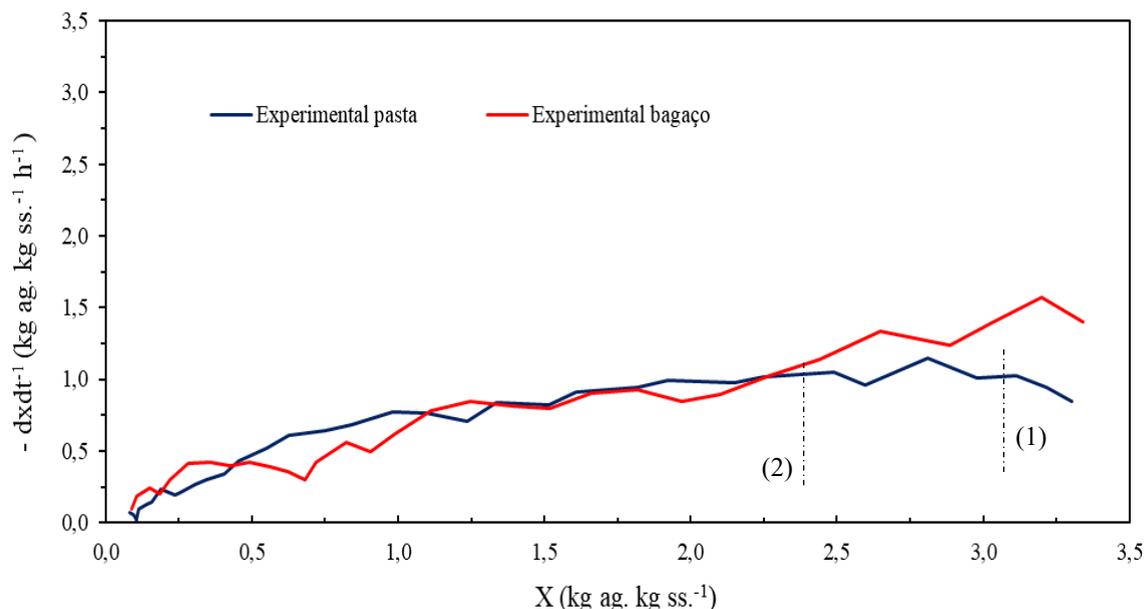
Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Figura 38 - Curva da taxa de secagem em função do teor de umidade para a pasta de bagaço de maçã e para o bagaço na condição de secagem de $1,7 \text{ m s}^{-1}$ e $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Figura 39 - Curva da taxa de secagem em função do teor de umidade para a pasta de bagaço de maçã e para o bagaço na condição de secagem de $2,1 \text{ m s}^{-1}$ e $65 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: o autor.

4.5.1.3. Análise dos períodos da secagem

Para determinação dos períodos de secagem foram utilizadas as marcações do teor de água reportados nas linhas tracejadas apresentadas nas Figuras 35 a 39, onde o período de aquecimento foi considerado o momento em que a velocidade de secagem parou de aumentar e ficou aparentemente constante. O período de taxa constante terminou quando o sólido atingiu o teor de umidade a partir do qual não ocorreram mais suprimentos de água, em tempo hábil, por difusão do interior do sólido até sua superfície. Este é o início do período também chamado de período de taxa decrescente, o qual ocorre quando a superfície fica pobre em líquido, diminuindo a velocidade de evaporação da água devido ao abandono da umidade de todos os poros superficiais, ou seja, não há na superfície qualquer área significativamente saturada do líquido.

Observando as Tabelas 17 e 18, temos o menor tempo de aquecimento (6 min para o bagaço e 9 min para a pasta) para a condição que trabalhou com a maior temperatura e maior velocidade do ar de secagem o que corrobora este comportamento, enquanto que o experimento processado com a menor temperatura e menor velocidade reportou o maior tempo (10 min para o bagaço e 15 min para a pasta) para aquecer a amostra e atingir o período de taxa constante. Em relação ao teor de água evaporada entre os estudos realizados obteve-se de 7,1% à 10,8% no bagaço de maçã e de 6,1% à 8,8% na pasta de bagaço de maçã. Este comportamento, de acordo com GEANKOPLIS (1993) ocorre

porque com maiores velocidade e temperatura os aspectos de convecção são maiores, favorecendo a transferência de massa e calor e porque a pasta apresenta maior teor de água superficial do que o bagaço.

Ainda em relação às mesmas Tabelas 17 e 18, temos o tempo do período de taxa constante, porque uma vez que o regime permanente tenha sido atingido, terá início o período de velocidade constante de secagem, onde toda a superfície exposta do sólido está saturada de água, desta maneira a secagem ocorre como se fosse a evaporação de um filme líquido, sem haver influência direta do sólido na taxa de secagem (GEANKOPLIS, 1993, WANG et al., 2007). Na secagem do bagaço de maçã o menor tempo deste período foi de 29 min na temperatura do ar de secagem em 70 °C e velocidade 2,5 m s⁻¹ e de 10 min na secagem da pasta de bagaço de maçã nas mesmas condições, assim como os maiores percentuais de evaporação de água aconteceram nas mesmas condições para ambos materiais secados, o que reporta um comportamento esperado uma vez que maiores velocidades e temperatura do ar favorecem a evaporação da água do material sólido, como também reportado por SHARMA, 2016.

Tabela 17 - Tempo total de secagem no período de taxa constante e de aquecimento e percentual de água evaporada, durante a secagem do bagaço de maçã

Parâmetros do Ar de Secagem	Tempo Período de Aquecimento (min)	Tempo da Taxa Constante (min)	Água Evaporada no período de aquecimento (%)	Água Evaporada na Taxa Constante (%)
2,5 m s ⁻¹ e 70 °C	6	29	8,1	30,2
1,7 m s ⁻¹ e 70 °C	12	48	10,8	24,9
2,5 m s ⁻¹ e 60 °C	12	43	9,8	27,3
1,7 m s ⁻¹ e 60 °C	14	56	7,1	31,2
2,1 m s ⁻¹ e 65 °C	12	48	7,8	27,7

Fonte: o autor.

A partir das Tabelas 17 e 18 foi calculado o tempo da secagem no período de taxa decrescente em todos os casos estudados. Para a secagem do bagaço de maçã o tempo de secagem no período de taxa decrescente variou de 175 min a 365 min e evaporou o percentual de água de 61,7% a 64,5%. Da mesma maneira, para a secagem da pasta de bagaço de maçã o tempo na taxa decrescente variou de 211 min à 270 min na secagem da pasta de bagaço de maçã e o teor de água evaporada oscilou entre 59,4% a 80,0% nas condições de 70 °C com velocidades de 1,7 m s⁻¹ e 2,5 m s⁻¹, respectivamente. Comportamento semelhante a este desempenho na secagem de materiais biológicos

também foram evidenciados por WANG et al., LUO, et al., YAN & KERR 2013 e SHARMA, 2016.

Tabela 18 - Tempo total de secagem no período de taxa constante e de aquecimento e percentual de água evaporada, durante a secagem da pasta do bagaço de maçã

Parâmetros do Ar de Secagem	Tempo Período de Aquecimento (min)	Tempo da Taxa Constante (min)	Água Evaporada no período de aquecimento (%)	Água Evaporada na Taxa Constante (%)
2,5 m s ⁻¹ e 70 °C	9	10	6,1	12,1
1,7 m s ⁻¹ e 70 °C	20	53	8,8	29,4
2,5 m s ⁻¹ e 60 °C	21	120	7,0	16,6
1,7 m s ⁻¹ e 60 °C	15	147	6,1	12,2
2,1 m s ⁻¹ e 65 °C	12	38	6,1	24,2

Fonte: o autor.

A Tabela 19 exhibe os resultados da produtividade dos ensaios de secagem desenvolvidos. Como relatado na literatura especializada, os experimentos que utilizaram as condições do ar de secagem com maior temperatura e maior velocidade (2,5 m s⁻¹ e 70 °C) apresentaram as maiores taxas de evaporação de água (T_{ev}), logo reportam os menores tempos de secagem como exibido na Tabela 20. O contrário também aconteceu como o esperado, ou seja, as condições com menores temperatura e menores velocidade do ar apresentaram as menores taxas de evaporação de água (T_{ev}) (Tabela 19) e os maiores tempos de secagem (Tabela 20), sendo que este comportamento também foi verificado nos estudos desenvolvido por WANG et al., LUO, et al., YAN & KERR 2013 e SHARMA, 2016.

Tabela 19 – Valores da taxa de evaporação de água na secagem da pasta e do bagaço de maçã

Parâmetros do Ar de Secagem	Taxa evaporação de água da Pasta de Bagaço de Maçã (g h ⁻¹)	Taxa evaporação de água da Bagaço de Maçã (g h ⁻¹)
2,5 m s ⁻¹ e 70 °C	37,4	24,0
1,7 m s ⁻¹ e 70 °C	23,5	14,8
2,5 m s ⁻¹ e 60 °C	23,0	15,4
1,7 m s ⁻¹ e 60 °C	16,6	11,2
2,1 m s ⁻¹ e 65 °C	22,6	16,8

Fonte: o autor.

A partir da análise dos dados obtidos nos ensaios experimentais foi possível observar que não existe variações consideráveis em relação as condições operacionais testadas, exceto para a condições de velocidade do ar de 2,5 m s⁻¹ e temperatura a 70 °C, que se obteve um tempo de secagem consideravelmente menor o que favorece a

construção de equipamentos de secagem que atuem com essas condições, o que confirma o mencionado em literatura especializada (GEANKOPLIS, 1993; WELTY et al., 2008).

Tabela 20 - Tempo total de secagem e umidade final para os casos estudados de secagem da pasta e do bagaço de maçã

Parâmetros do Ar de Secagem	Pasta de Bagaço de Maçã		Bagaço de Maçã	
	Tempo Secagem Total (min)	Umidade Final (% b.s.)	Tempo Secagem Total (min)	Umidade Final (% b.s.)
2,5 m s ⁻¹ e 70 °C	230	5,0±0,1	210	7,8±0,1
1,7 m s ⁻¹ e 70 °C	340	5,6±0,1	330	10,9±0,2
2,5 m s ⁻¹ e 60 °C	340	5,4±0,1	320	9,6±0,1
1,7 m s ⁻¹ e 60 °C	470	5,9±0,2	435	9,9±0,2
2,1 m s ⁻¹ e 65 °C	345	6,8±0,2	295	8,2±0,1

Fonte: o autor. Os valores na tabela são referentes as médias e os desvios padrão de três análises para cada condição experimental.

4.5.2. Estudo computacional da secagem

O estudo computacional com o objetivo de prever os fenômenos presentes durante a secagem em camada delgada e identificar as melhores condições operacionais que permita minimizar os custos do processo, bem como impedir a perda de qualidade do produto é apresentada a seguir.

4.5.2.1. Isoterma de equilíbrio higroscópico

Para representar a interação entre a fase líquida e a matriz sólida do meio poroso no modelo computacional, utilizou-se o modelo de isoterma de Oswin Modificado, de acordo com o estudo desenvolvido por COSTA et al., 2013. Para atender aos diferentes experimentos, foi ajustado um grupo de constantes como reportado na Tabela 21.

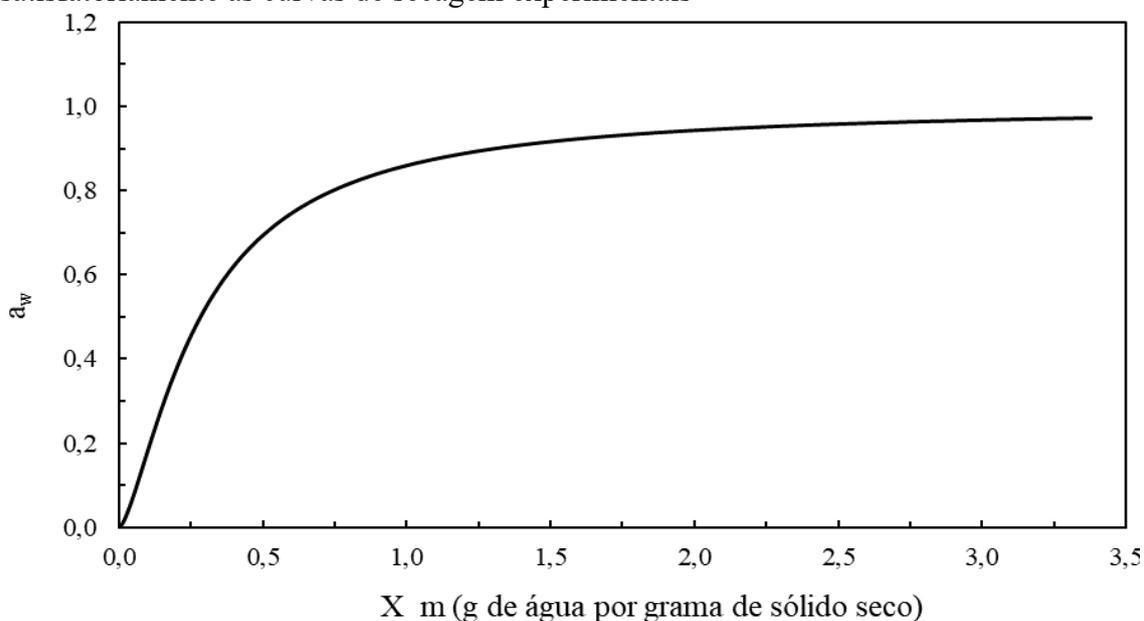
Tabela 21 - Constantes do modelo de isoterma ajustados aos dados experimentais

Constantes		
a	b	c
0,002	0,004	1,43

Fonte: o autor.

Na Figura 40, apresenta-se a curva correspondente ao modelo de Oswin Modificado que atendem satisfatoriamente ao comportamento das curvas de secagem experimentais.

Figura 40 - Isotermas segundo o modelo de Oswin Modificado que atendem satisfatoriamente às curvas de secagem experimentais



Fonte: o autor.

4.5.2.2. Parâmetros utilizados na simulação computacional

O conteúdo inicial de umidade na pasta de bagaço de maçã (X_m) utilizada nas simulações foi baseada nos dados experimentais e está reportada na Tabela 22, para os cinco casos estudados. O teor desta umidade ao longo de toda a espessura da pasta foi considerado uniforme no início do processo de secagem.

Tabela 22 - Conteúdo inicial de água para cada caso estudado

Parâmetros dos Ensaio	X_m (g de água por g sólido seco)
2,5 m s ⁻¹ e 70 °C	3,3
1,7 m s ⁻¹ e 70 °C	3,4
2,5 m s ⁻¹ e 60 °C	3,3
1,7 m s ⁻¹ e 60 °C	3,3
2,1 m s ⁻¹ e 65 °C	3,3

Fonte: o autor.

Outro parâmetro importante utilizado na simulação computacional, foi a taxa de evaporação de água do modelo (K) e que para sua determinação precisou ser ajustada conforme condições operacionais dos experimentos conduzidos e seus valores estão dispostos na Tabela 23.

Tabela 23 - Taxa de evaporação de água do modelo computacional

Parâmetros do Ar de Secagem	Taxa de evaporação do Modelo (s ⁻¹)
2,5 m s ⁻¹ e 70 °C	11.000
1,7 m s ⁻¹ e 70 °C	7.000
2,5 m s ⁻¹ e 60 °C	6.000
1,7 m s ⁻¹ e 60 °C	5.500
2,1 m s ⁻¹ e 65 °C	6.500

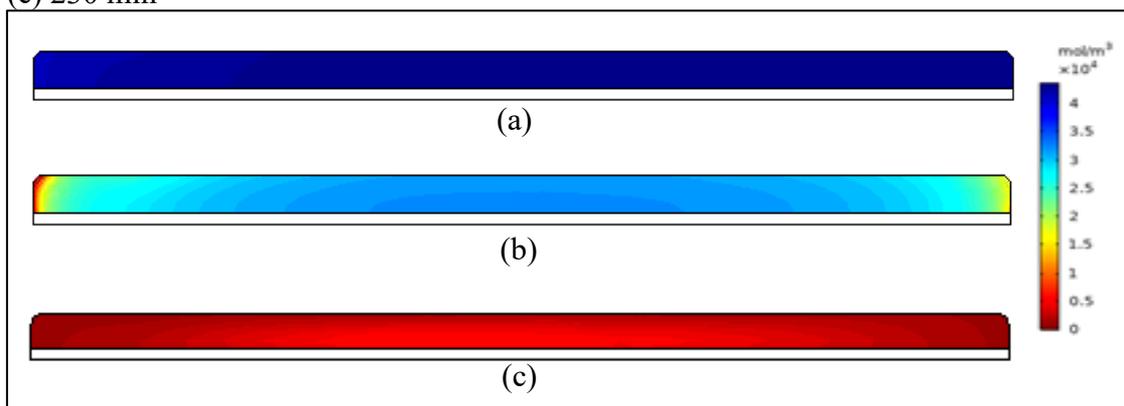
Fonte: o autor.

4.5.2.3. *Análise da Simulação Computacional*

A Figura 41, apresenta a distribuição da umidade (g de água por g de sólido seco) no domínio da pasta de bagaço de maçã para o caso experimental estudado que melhor foi representado pela simulação computacional, na condição do ar de secagem com temperatura de 65 °C e velocidade 2,1 m s⁻¹, nos tempos de 10 min próximo ao final do período de aquecimento da amostra (Figura 41 - a), 70 min próximo ao término da taxa constante (Figura 41 - b) e 230 minutos próximo ao final do período de taxa decrescente (Figura 41 - c). Os perfis de distribuição de umidade reportam uma rápida retirada de água das regiões próximas à superfície da pasta com preferência para as áreas mais externas ao longo da espessura da pasta, comportamento sensivelmente observado na imagem da Figura 41- b. A região central como observado nas imagens reteve por mais tempo o teor de água. Este comportamento está totalmente em acordo com as teorias fundamentais da secagem (GEANKOPLIS, 1993; WELTY et al., 2008).

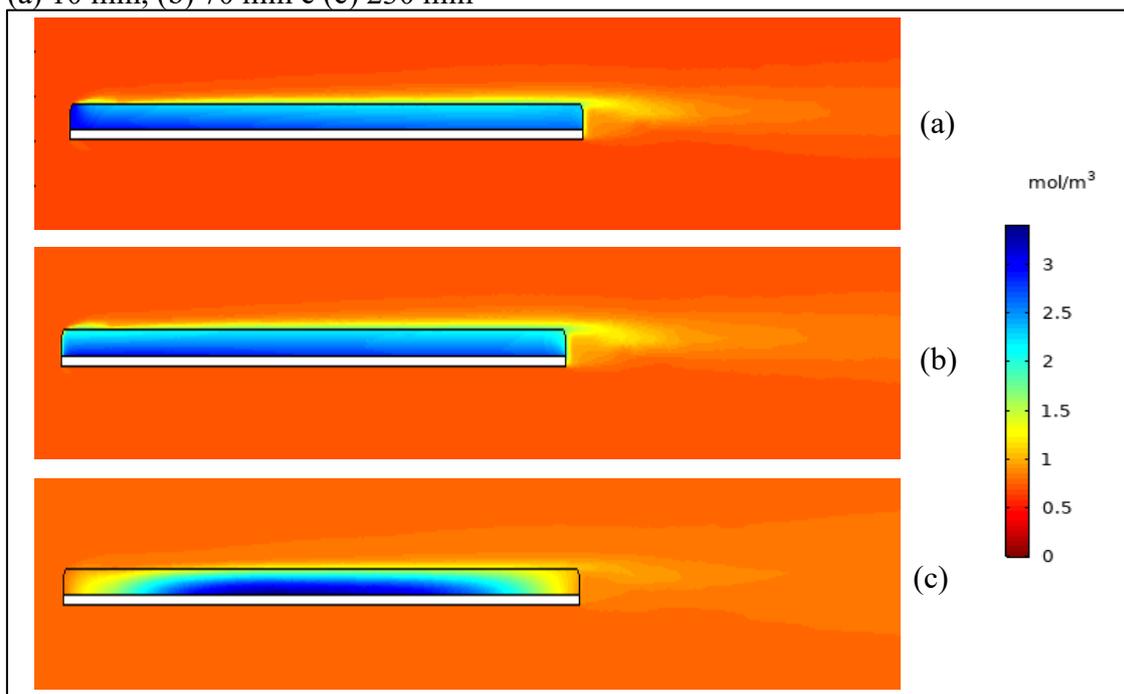
Perfis da distribuição de vapor de água estão reportados nas imagens da Figura 42 nos mesmos tempos das imagens da Figura 41, e foram desenvolvidos para apresentar o nível de precisão do modelo computacional em estudo uma vez que o teor de vapor de água é sensivelmente baixo em relação ao conteúdo total de água na amostra. O teor de vapor de água é maior na região central da pasta e reduz ao longo da espessura da pasta em direção a superfície da mesma como reportado nas teorias fundamentais da secagem (GEANKOPLIS, 1993; WELTY et al., 2008). Nas imagens também é possível visualizar o vapor se despreendendo da amostra e se difundindo na corrente do ar de secagem.

Figura 41 - Perfis da concentração de água ao longo da espessura da pasta de bagaço de maçã na condição de $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $2,1\text{ m s}^{-1}$ para o tempo de secagem (a) 10 min, (b) 70 min e (c) 230 min



Fonte: o autor.

Figura 42 - Perfis da concentração de vapor de água ao longo da espessura da pasta de bagaço de maçã e tubulação na condição de $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $2,1\text{ m s}^{-1}$ para o tempo de secagem (a) 10 min, (b) 70 min e (c) 230 min



Fonte: o autor.

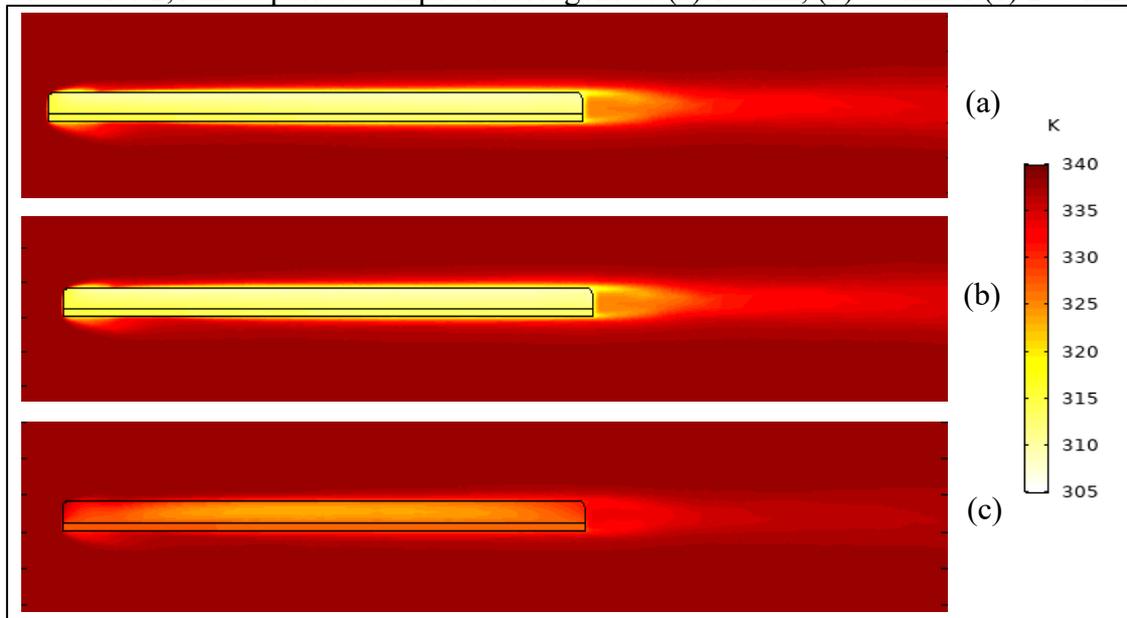
Os perfis de temperatura no domínio do meio poroso estão apresentados, nas imagens da Figura 43, nos mesmos tempos reportados nas Figuras 41 e 42. É possível evidenciar o ar de secagem aquecido passando ao redor da pasta de bagaço de maçã e aquecendo a amostra. Nas imagens (a) e (b) da Figura 43 a temperatura do ar é maior que a temperatura da amostra, primeiro porque a amostra está aquecendo (Figura 43 – a) e

segundo porque no período de taxa constante a amostra se mantém na temperatura de bulbo úmido do ar (Figura 43 – b). A imagem (a) da Figura 43 exibe maior temperatura da amostra o que significa que a secagem está no período decrescente. Ainda é possível observar a redução da temperatura próximo a superfície da pasta e o gradiente de temperatura na saída após ter passado pela pasta e ter retirado umidade.

Em todos os casos estudados, os gradientes de temperatura na pasta favorecem o de fluxo de calor no sentido do ar aquecido para o interior da pasta.

Comportamento semelhante também foram reportados em estudos com secagem de alimentos e materiais biológicos, como o estudo desenvolvido por SIMIONI (2015), e também na literatura especializada (GEANKOPLIS, 1993; WELTY et al., 2008).

Figura 43 - Perfis de temperatura na pasta de bagaço de maçã e no seu entorno na condição de 65 °C e 2,1 m s⁻¹ para os tempos de secagem de (a) 10 min, (b) 70 min e (c) 230 min

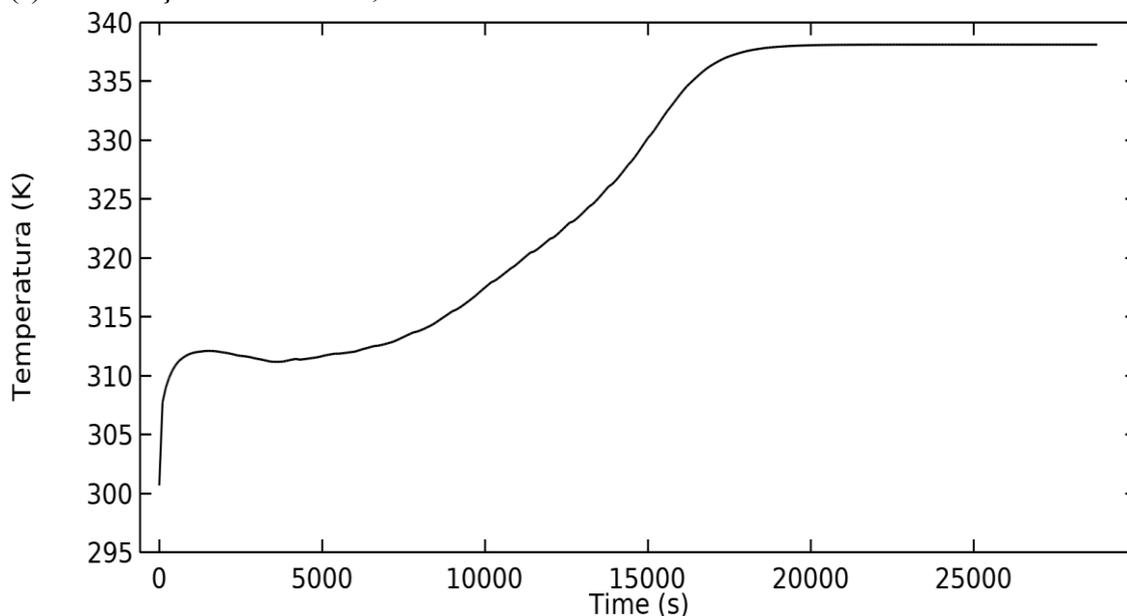


Fonte: o autor.

A evolução da Temperatura média do sólido em função do tempo de secagem é reportada na Figura 44. No início do processo a temperatura da pasta estava próxima à temperatura ambiente, aumentando logo em que esta entrou em contanto com o ar aquecido. Com o passar do tempo de secagem a amostra teve sua temperatura aumentada até próxima a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem e se manteve até o final do período de secagem a taxa constante. Após o término deste período, a temperatura retornou a crescer até estabilizar próxima a temperatura do ar de secagem como observado no gráfico da Figuras 44 e como observado nos demais parâmetros analisados a

temperatura média do sólido também seguiu o comportamento sugerido na literatura especializada (GEANKOPLIS, 1993; WELTY et al., 2008).

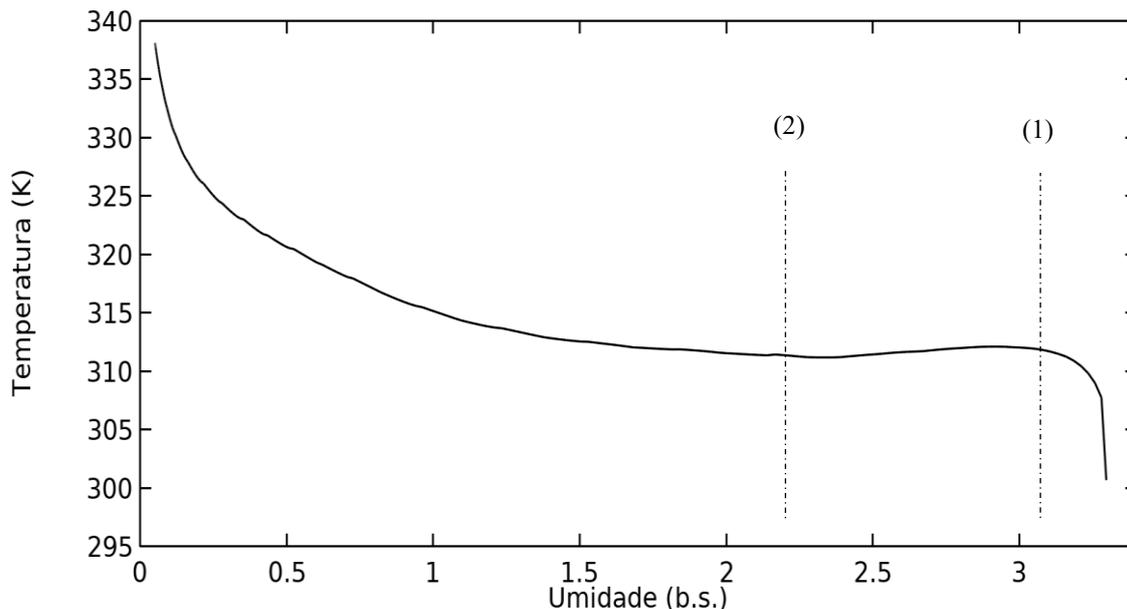
Figura 44 - Evolução da Temperatura média do sólido em função do tempo de secagem (s) na condição de 65 °C e 2,1 m s⁻¹



Fonte: o autor.

Na Figura 45 a temperatura média do sólido é mostrada em função da umidade do meio poroso. Este gráfico é importante para se observar a faixa de umidade na qual o material se mantém em cada um dos períodos da secagem. A linha pontilhada (1) no gráfico mostra o término do período de aquecimento e início do período de taxa constante sendo o valor desta transição próximo ao teor de umidade de 3,1 g g⁻¹ em base seca. A linha pontilhada (2) reporta o fim do período de taxa de aquecimento e início do período decrescente ao redor do teor de umidade de 2,2 g g⁻¹ em base seca. No gráfico da Figura 45 é possível visualizar com maior nitidez que nesta secagem não ocorre o segundo período de taxa decrescente.

Figura 45 - Evolução da Temperatura média do sólido em função da umidade (b.s.) na condição de 65 °C e 2,1 m s⁻¹



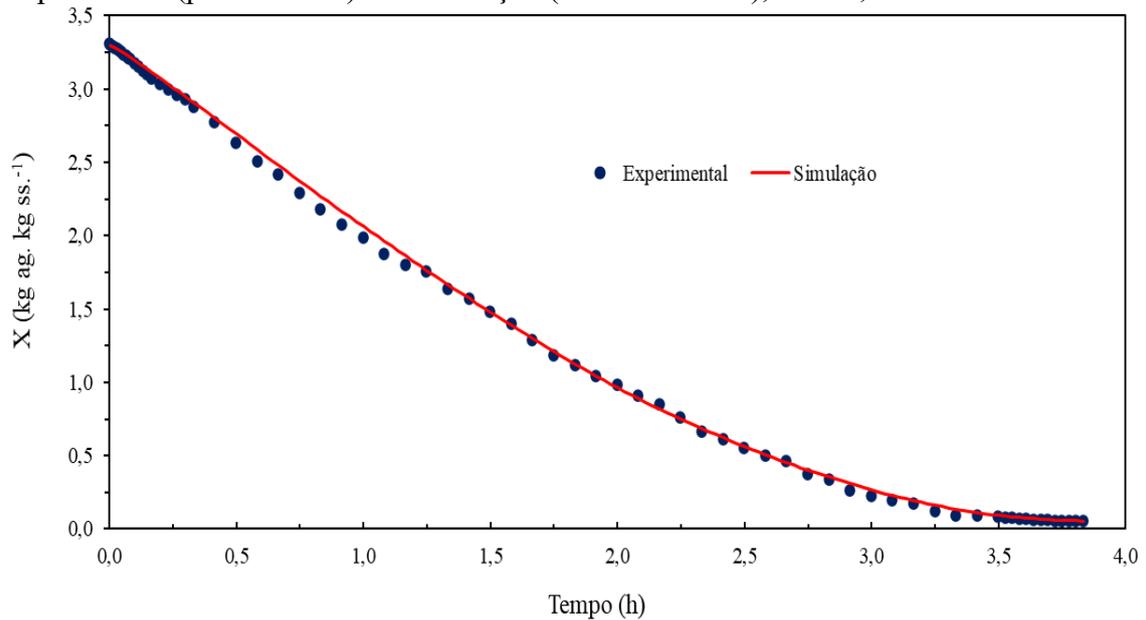
Fonte: o autor.

4.5.3. Comparação entre os estudos experimental e computacional

Nas Figuras 46 a 55 são apresentados os gráficos comparativos entre experimento e respectiva simulação do conteúdo de água na pasta de bagaço de maçã em função do tempo e da velocidade de secagem em função do teor de água na pasta. Diferem segundo o caso, as condições operacionais.

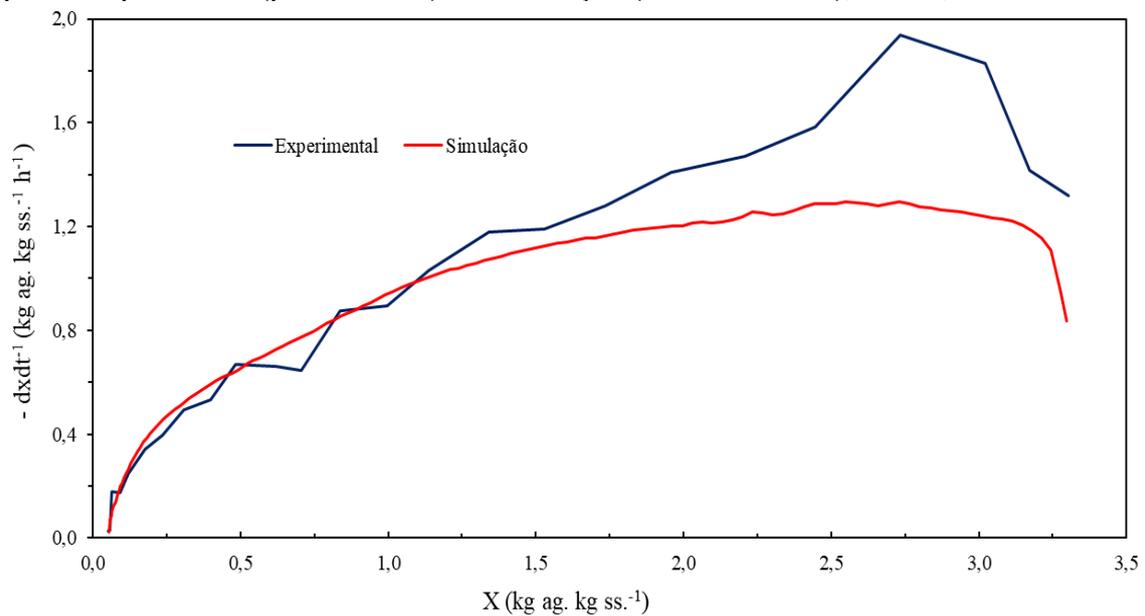
Conforme observado nas Figuras 46 - 55 os resultados obtidos com as simulações computacionais reproduzem a tendência observada nos experimentos de secagem. A boa aderência do modelo cobre especialmente os períodos de aquecimento, taxa constante e começo da taxa decrescente. No período de taxa decrescente (parte final da secagem) observa-se um leve afastamento entre os dados experimentais e os valores simulados, sendo isso provavelmente devido a rachaduras do material na etapa final da secagem, uma vez que esse efeito não foi considerado na modelagem desenvolvida. Nas curvas de secagem para os experimentos com condições do ar a 70 °C e 2,5 m s⁻¹ (Figura 46 e 47) e 60 °C e 2,5 m s⁻¹ (Figura 50 e 51) foi observado anormalmente, já mais cedo, um pequeno descolamento entre a simulação e os dados experimentais, o que pode ter ocorrido devido ao surgimento de fissuras na superfície da amostra, provocados pela velocidade do ar mais alta, que levaram a uma variação mais acelerada de seu conteúdo de água e conseqüente encolhimento precoce.

Figura 46 - Gráfico comparativo do teor de água na pasta em função do tempo para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso $2,5 \text{ m s}^{-1}$ e $70 \text{ }^\circ\text{C}$



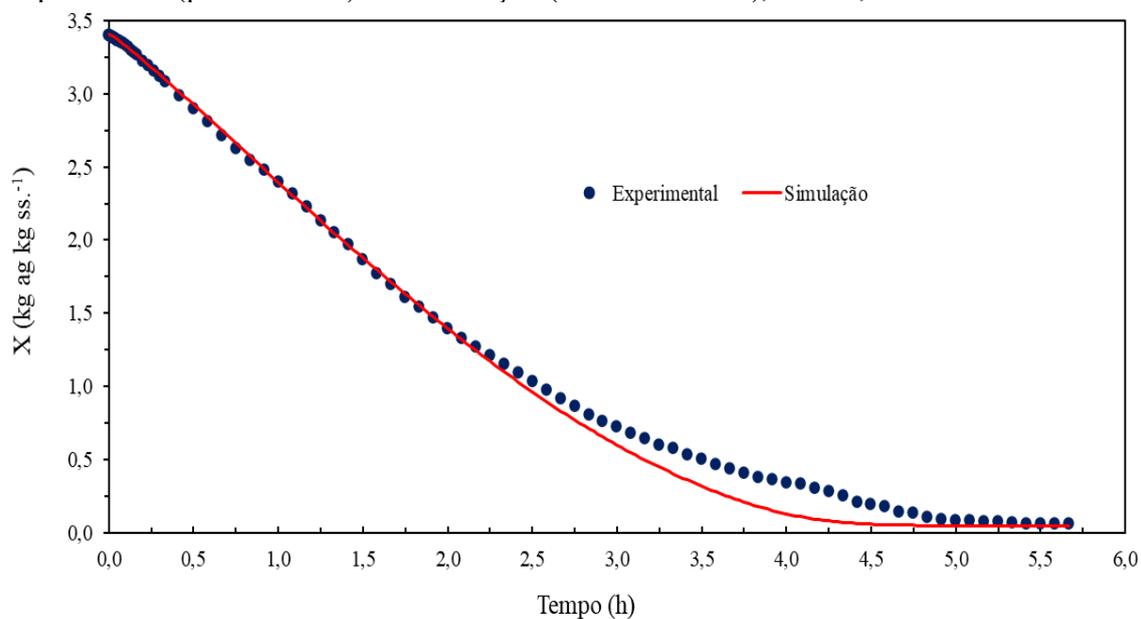
Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Figura 47 - Gráfico comparativo da taxa de secagem em função do teor de água na pasta para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso $2,5 \text{ m s}^{-1}$ e $70 \text{ }^\circ\text{C}$



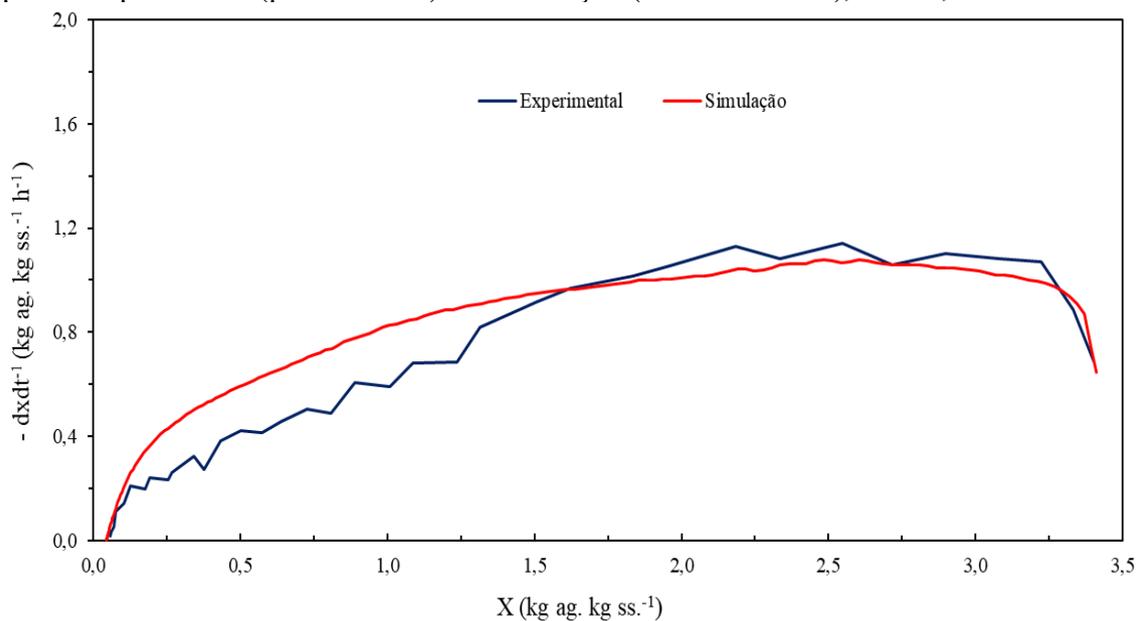
Fonte: o autor.

Figura 48 - Gráfico comparativo do teor de água na pasta em função do tempo para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso $1,7 \text{ m s}^{-1}$ e $70 \text{ }^\circ\text{C}$



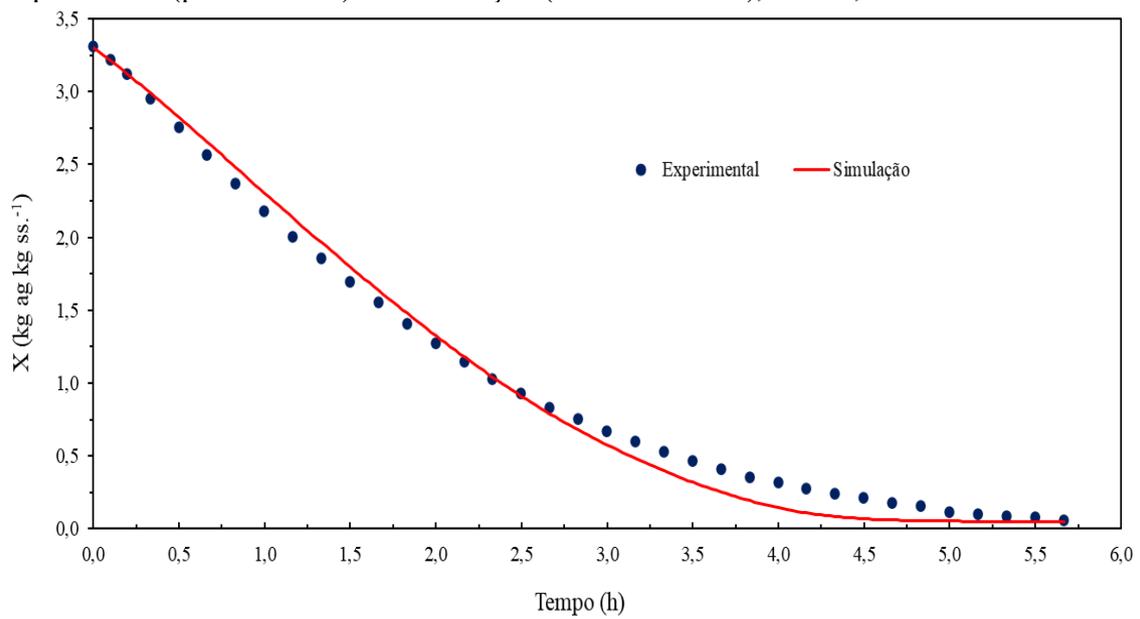
Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Figura 49 - Gráfico comparativo da taxa de secagem em função do teor de água na pasta para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso $1,7 \text{ m s}^{-1}$ e $70 \text{ }^\circ\text{C}$



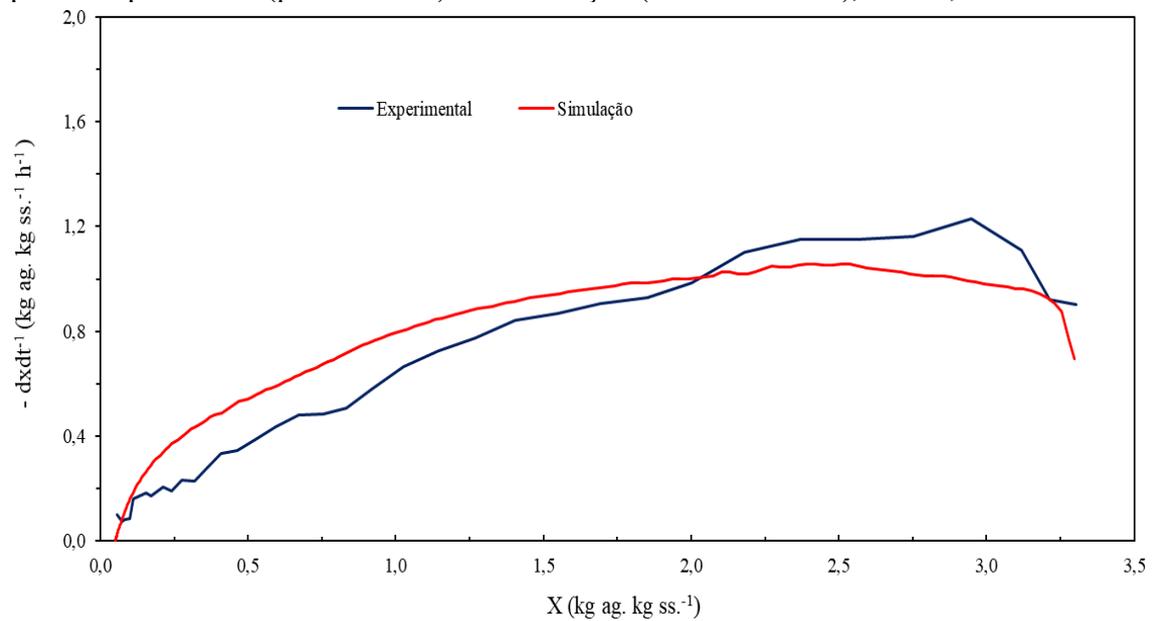
Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Figura 50 - Gráfico comparativo do teor de água na pasta em função do tempo para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso $2,5 \text{ m s}^{-1}$ e $60 \text{ }^\circ\text{C}$



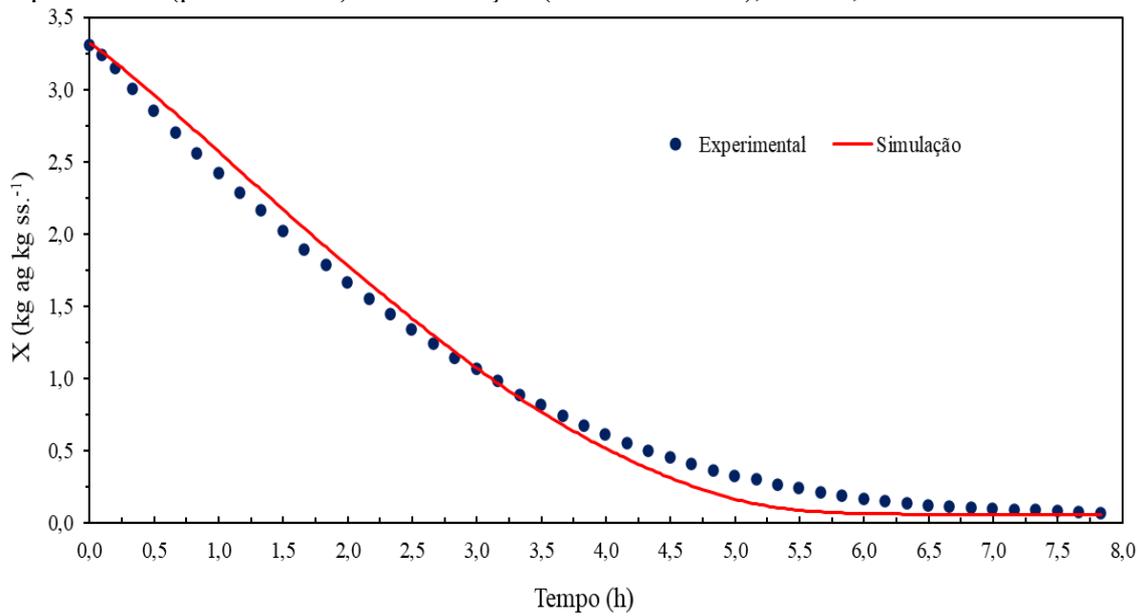
Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Figura 51 - Gráfico comparativo da taxa de secagem em função do teor de água na pasta para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso $2,5 \text{ m s}^{-1}$ e $60 \text{ }^\circ\text{C}$



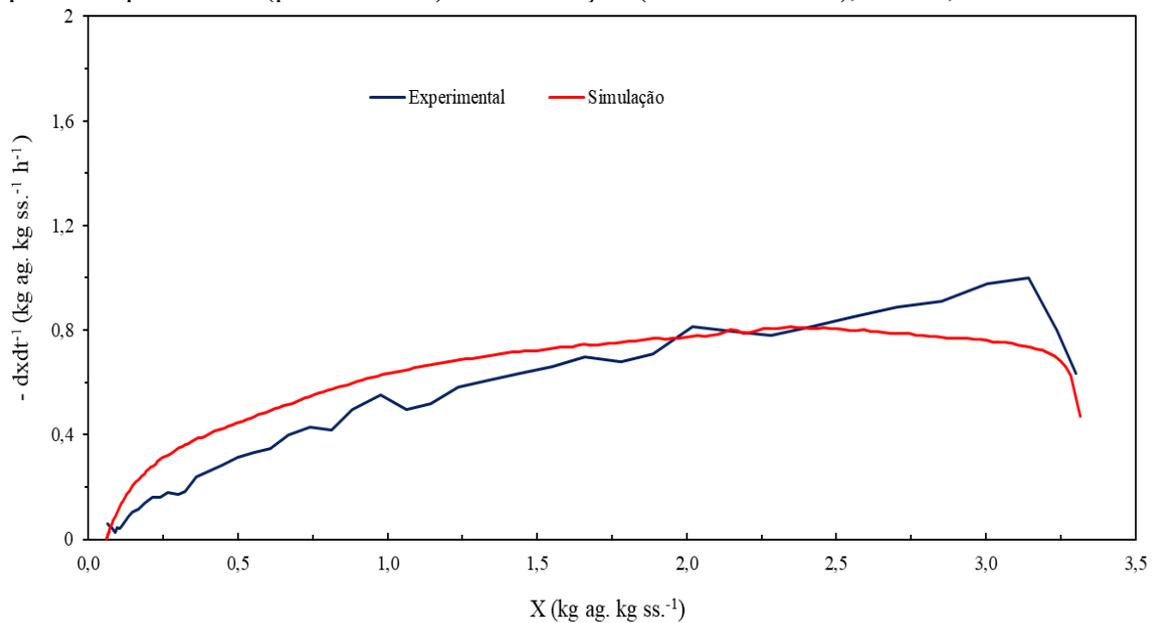
Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Figura 52 - Gráfico comparativo do teor de água na pasta em função do tempo para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso $1,7 \text{ m s}^{-1}$ e $60 \text{ }^\circ\text{C}$



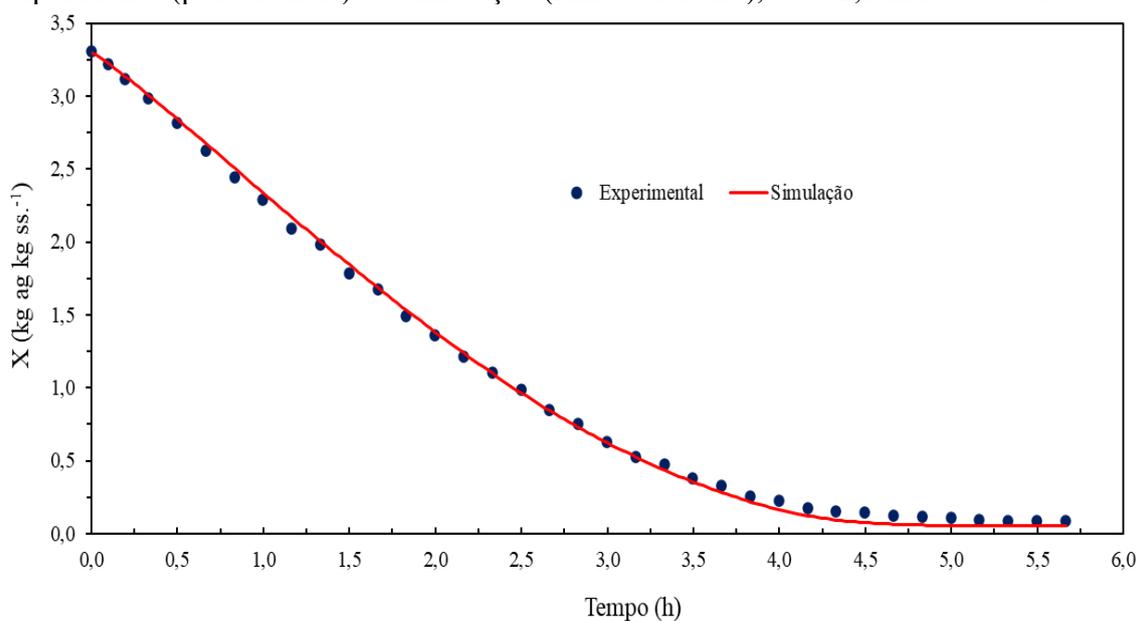
Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Figura 53 - Gráfico comparativo da taxa de secagem em função do teor de água na pasta para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso $1,7 \text{ m s}^{-1}$ e $60 \text{ }^\circ\text{C}$



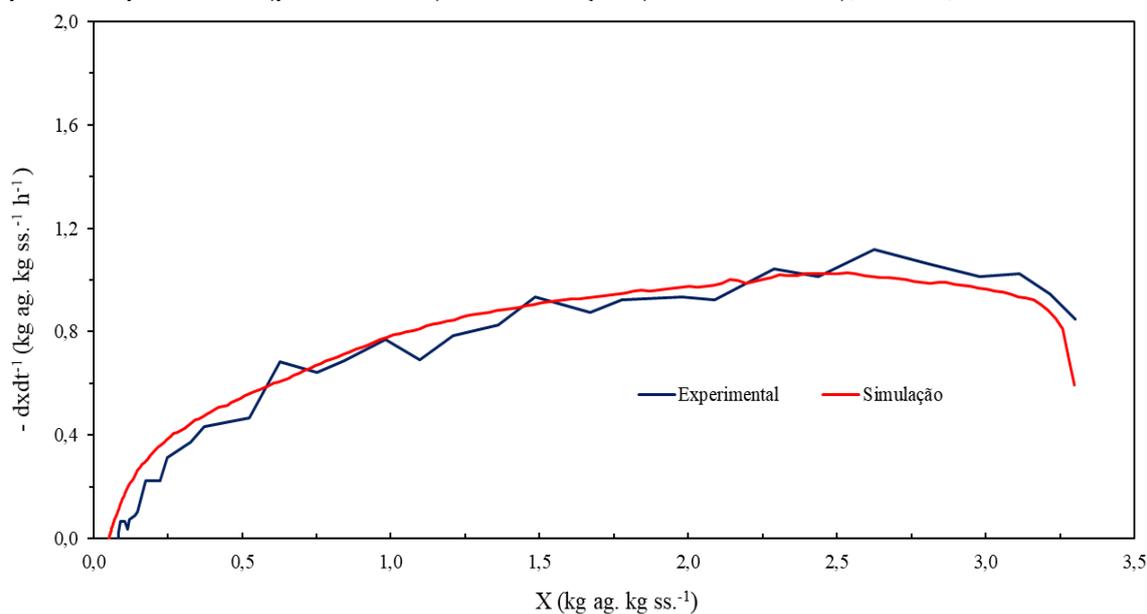
Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Figura 54 - Gráfico comparativo do teor de água na pasta em função do tempo para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso $2,1 \text{ m s}^{-1}$ e $65 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

Figura 55 - Gráfico comparativo da taxa de secagem em função do teor de água na pasta para o experimento (pontos azuis) e a simulação (linha vermelha), caso $2,1 \text{ m s}^{-1}$ e $65 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: o autor. ag: água. ss: sólido seco.

4.5.4. Avaliação Estatística do Modelo

A avaliação estatística do modelo computacional foi realizada com a comparação da massa da amostra experimental com a obtida na simulação ao longo do tempo. Para análise, utilizaram-se o coeficiente de determinação e o erro padrão.

O coeficiente de determinação (R^2), o qual está apresentado na Tabela 24, para cada um dos casos analisados indica o quanto o modelo se aproxima dos valores experimentais. Todos os valores do coeficiente de determinação (R^2) obtidos ficaram acima de 0,997, sugerindo que o modelo simulado consegue descrever e reproduzir a tendência observada nos dados experimentais coletados a partir na secagem do bagaço de maçã.

O erro padrão (divisão entre o desvio padrão e a raiz quadrada do tamanho amostral) que foi calculado a partir dos resíduos gerados, ou seja, a diferença entre os dados experimentais e simulados, também está reportado na Tabela 24, e demonstra que o erro ficou abaixo de 0,010% que sugere que a intensidade dos resíduos gerada é baixa, o que corrobora para a validação do modelo computacional.

Tabela 24 - Coeficiente de determinação para os casos avaliados na secagem em camada delgada da pasta de bagaço de maçã

Parâmetros dos Ensaios	Coeficiente de Determinação (R^2)	Erro Padrão (%)
2,5 m s ⁻¹ e 70 °C	0,997	0,010
1,7 m s ⁻¹ e 70 °C	0,998	0,006
2,5 m s ⁻¹ e 60 °C	0,998	0,006
1,7 m s ⁻¹ e 60 °C	0,998	0,006
2,1 m s ⁻¹ e 65 °C	0,998	0,004

Fonte: o autor.

5. CONCLUSÃO

A análise centesimal de todas as farinhas permitiu identificar que o teor total de fibras alimentares nas amostras apresentou valores mais elevados do que os encontrados na literatura especializada chegando a 67,6% de fibra alimentar total na farinha bruta. As fibras alimentares estão entre os componentes mais desejados do bagaço de maçã devido a sua elevada funcionalidade.

A estrutura das farinhas resultantes dos processos de explosão a vapor e reação ácida, foram ligeiramente alteradas pelos processos empregados, possivelmente por uma sutil hidrólise parcial com formação de açúcares redutores que podem ser utilizados como nutrientes em processos ou estudos ulteriores. Este comportamento foi evidenciado nas análises FTIR nos quais foram observadas alterações nas intensidades e larguras de picos de transmitâncias em determinados números de onda, essas alterações também foram reportadas nas análises de DSC pelas alterações de fluxos de calor e pelas análises de MEV que sugeriram redução nos tamanhos médios das partículas e pequenas alterações na porosidade e morfologia.

Avaliando a capacidade de retenção de água e óleo entre as farinhas processadas com explosão a vapor e reação ácida temos resultados melhores quando comparados com aqueles encontrados na literatura, chegando a valores de CRA e CRO de 8,8 g g⁻¹ e 6,8 g g⁻¹, respectivamente. Isso indica a possibilidade da aplicação destas farinhas como aditivos em alimentos com o objetivo de melhorar as propriedades funcionais e assim atender aos princípios fundamentais da economia circular de gerar valor aos resíduos, desenvolver novos produtos e evitar a disposição de resíduos em aterros e assim diminuir as emissões de gases de efeito estufa.

A partir da análise da cinética de reação ácida foi possível perceber que o processo de explosão a vapor contribui para acelerar largamente o processo, aumentando a quantidade de açúcar redutor produzido.

Curvas típicas de secagem foram obtidas e analisados os períodos da velocidade de secagem: aquecimento, taxa constante e período de taxa decrescente. Durante o período de taxa decrescente foi observado somente um dos dois períodos de taxa decrescente como acontece na secagem da maior parte dos materiais biológicos. Este comportamento esteve presente em todos os casos estudados tanto para a pasta como para o bagaço de maçã.

A análise das taxas de secagem serviu para elucidar o comportamento dos períodos de aquecimento e de taxa constante, sendo constatado que a soma da quantidade de água evaporada nestas duas etapas é menor do que a quantidade evaporada durante o período de taxa decrescente a qual evaporou até 64,5% do conteúdo de água contida na amostra.

Ainda, em relação às curvas de secagem, foi observado que a secagem do bagaço de maçã ocorreu mais rapidamente em comparação com a secagem da pasta de bagaço de maçã, comportamento este possivelmente relacionado à maior porosidade do bagaço o facilita o fluxo do ar acelerando a transferência de calor e massa.

O modelo computacional desenvolvido apresentou boa aderência aos dados experimentais da secagem da pasta do bagaço de maçã, representando todos os períodos da secagem, aquecimento, taxa constante e taxa decrescente, sendo que apenas um leve descolamento na comparação entre experimento e simulado foi observado durante o período de taxa decrescente, provavelmente devido a rachaduras e encolhimento que ocorreram na amostra durante a secagem e que não foram considerados neste estudo.

Com a modelagem foi possível verificar a evolução da temperatura da amostra em função da umidade do material sólido e do tempo de secagem, o que permitiu a visualização dos períodos de secagem com maior sensibilidade. Os perfis de conteúdo de água líquida e vapor e temperatura também foram investigados e visualizados ao longo da espessura da amostra e do comprimento do tubo de secagem em função do tempo de secagem o que evidenciou a precisão e complexidade da simulação computacional desenvolvida.

Estatisticamente, foi encontrado um elevado coeficiente de determinação (maior que $R^2=0,977$) e um baixo erro padrão (menor que 0,010%), quando comparadas as curvas de secagem experimentais com as respectivas simulações, o que validou o modelo computacional desenvolvido no COMSOL.

Para finalizar, o modelo computacional desenvolvido é bastante minucioso, porém a utilização do mesmo pode ser ajustada para outras condições operacionais ou até mesmo para secagem de outros materiais o que possibilita o desenvolvimento de outros estudos, incluindo o desenvolvimento de projetos de secadores e a otimização de processos de secagem.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Desenvolver a modelagem computacional da secagem em camada delgada da pasta de bagaço de maçã considerando os efeitos de encolhimento e aparecimento de rachaduras na mostra.

Aplicar o modelo computacional para a secagem do bagaço de maçã.

Realizar aplicações das farinhas desenvolvidas em alimentos.

Desenvolver um modelo matemático para a cinética de reação ácida para que seja possível prever o seu comportamento e assim facilitar o desenvolvimento de projetos e processos.

Desenvolver metodologia para aproveitamento do bagaço de maçã que evite a necessidade de duas etapas de secagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AACC. **American Association of Cereal Chemists**. The definition of dietary fiber. *Cereal Foods World*, v. 46, n. 3, p. 112-126, 2001.

ABMP, 2018. **Associação Brasileira de Produtores de Maçã. Anuário Brasileiro da Maçã 2018**. <http://www.abpm.org.br/anuarios-da-maca> (acesso em 13/10/2018).

ADEODATO, Melissa Gurgel. **Análise da fluidodinâmica de leito de jorro durante o recobrimento de partículas**. 2003. 208 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

AGBEDE, O. O.; OKE, E. O.; AKINFENWA, S. I.; WAHAB, K. T.; OGUNDIPE, S.; AWORANTIA, O. A.; ARINKOOLA, A. O.; AGARRYA, S. E. Thin layer drying of green microalgae (*Chlorella* sp.) paste biomass: Drying characteristics, energy requirement and mathematical modeling. **Bioresource Technology Reports**, 11, 100467, 2020.

AGHBASHLO, M.; KIANMEHR, M. H.; SAMIMI-AKHIAHANI, H. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). **Energy Conversion and Management**, 49, 2865–2871, 2008.

AHSAN, M. Numerical analysis of friction factor for a fully developed turbulent flow using $k-\epsilon$ turbulence model with enhanced wall treatment. **Beni-suef University Journal of Basic and Applied Sciences**, [s.l.], v. 3, n. 4, p. 269-277, dez. 2014.

ALMEIDA, A. R. F. **Análise da secagem de pastas em leito de jorro**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

ALMEIDA, F.; MEDINA, E.; ORTEGA, E.; SAMERON, O AND PEREZ, V. Vacuum Drying Optimization and Simulation as a Preservation Method of Antioxidantes in Apple Pomace. *Journal of Food Process Engineering*, 37, 575-587, 2015.

ALTZIBAR, H. et al. Minimum spouting velocity of conical spouted beds equipped with draft tubes of different configuration. **Industrial & Engineering Chemical Research**, v. 52, p. 2995-3006, 2013.

ALTZIBAR, H. et al. Operating and peak pressure drops in conical spouted beds equipped with draft tubes of different configuration. **Industrial & Engineering Chemical Research**, v. 53, p. 415-427, 2014.

AMERI, B.; HANINI, S.; BOUMAHDI, M. Influence of drying methods on the thermodynamic parameters, effective moisture diffusion and drying rate of wastewater sewage sludge. **Renewable Energy**, 147, 1107 e 1119, 2020.

APRAJEETA, J.; GOPIRAJAH, R.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. **Journal of Food Engineering**, [s.l.], v. 144, p. 119-128, jan. 2015.

ARAKI, J.; WADA, M.; KUGA, S.; OKANO, T. (1998) Flow properties of microcrystalline cellulose suspension prepared by acid treatment of native cellulose. **Colloids and Surfaces A**, v. 142, p. 75–82, nov. 1998.

ARNOUS, A. and MEYER, A. A. Quantitative Prediction of Cell Wall Polysaccharide Composition in Grape (*Vitis vinifera* L.) and Apple (*Malus domestica*) Skins from Acid Hydrolysis Monosaccharide Profiles. **Journal Agricultural Food Chemistry**, Vol. 57, No. 9, 2009.

ARTETXE, MAITE et al. Styrene recovery from polystyrene by flash pyrolysis in a conical spouted bed reactor. **Waste Management**, [s.l.], v. 45, p.126-133, nov. 2015.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., **Handbook Fundamentals**, 2009.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). **Official Methods of the AOAC International**, 18th ed. Maryland: AOAC, 2005.

AYUK, J. E.; MATHEW, A. P.; OKSMAN, K. The effect of plasticizer and cellulose nanowhisker content on the dispersion and properties of cellulose acetate butyrate nanocomposites. **J Appl Polym Sci** 114:2723–2730, 2009.

BABALIS, S. J.; BELESSIOTIS, V. G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, v. 65, p. 449–458, 2004.

BAJPAIA, V. K.; PARKB, I.; LEEB, J.; SHUKLA, S.; NILEC, S. H.; CHUND, H. S.; OHF, I. K. S. Y.; LEEF, H.; HUHF, Y. S.; NAB, M.; HANA, Y. K. Antioxidant and antimicrobial efficacy of a biflavonoid, amentoflavone from *Nandina domestica* in vitro and in minced chicken meat and apple juice food models. **Food Chemistry**, v. 271, p. 239–247, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.159>.

BATISTA, L. M.; Rosa, C. A.; Pinto, L. A. A. Diffusive model with variable effective diffusivity considering shrinkage in thin layer drying of chitosan. **Journal of Food Engineering** 81 (2007) 127–132.

- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport phenomena**. New York: John Wiley & Sons, Inc., p. 920, 2002.
- BOBBIO, F. O.; BOBBIO, P. A. *Química de Alimentos*. São Paulo: Varela, 2005.
- BRASIL. **Ministério da Saúde**. Métodos físico-químicos para análise de alimentos. 4^o ed. Ministério da Saúde – Anvisa, p. 1018, 2005.
- CANDANEDO, S. B.; ROMAN, M.; GRAY, D. G. Effect of reaction conditions on the properties and behavior of wood cellulose nanocrystal suspensions. **Biomacromol**, v. 6, p. 1048–1054, 2005.
- CAPADONA, JR; SHANMUGANATHAN, K.; TRITTSCHUH, S.; SEIDEL, S.; ROWAN, S.J.; WEDER, C. Polymer nanocomposites with nanowhiskers isolated from microcrystalline cellulose. **Biomacromol**, v. 10, p. 712–716, 2009.
- CECCHI, H. M. **Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos**. Campinas: UNICAMP, p. 212, 2001.
- CHAMP, M.; LANGKILDE, A. M.; BROUNS, F.; KETTLITZ, B.; YLE, B. C. Advances in dietary fibre characterisation. Definition of dietary fibre, physiological relevance, health benefits and analytical aspects. **Nutrition Research Reviews**, v. 16, p. 71–82, 2003.
- CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos numéricos para ingenieros**. 5th ed. [s.l.]: McGraw-Hill, p. 1001, 2007.
- CHEN, H.; RUBENTHALER, G. L.; SCHANUS, E. G. Effect of apple fiber and cellulose on the physical properties of wheat flour. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 53, n. 1, p. 304-305, 1988.
- CHYLIŃSKA, M.; SZYMAŃSKA-CHARGOT, M. AND ZDUNEK, A. FT-IR and FT-Raman characterization of non-cellulosic polysaccharides fractions isolated from plant cell wall. *Carbohydrate Polymers*, Vol. 154, 48-54, 2016.
- CHO, S. S.; PROSKY, L.; DREHER, M. **Complex Carbohydrates in Foods**. Marcel Dekker, Inc., p. 10-15, 25, 26, 327, 329, 340-344, 1999.
- CHO, Y.J.; HWANG, J. K. Modeling the yield and intrinsic viscosity of pectin in acidic solubilization of apple pomace. *Journal Food Eng*, 44 (2): 85–9, 2000.
- CHOI, Y. S. Characteristics of low-fat meat emulsion systems with pork fat replaced by vegetable oils and rice bran fiber. **Meat Science**, v. 82, p. 266-271, 2009.

CHOI, Y. S.; KIM, Y. B.; HWANG, K. E.; SONG, D. H.; HAM, Y. K.; KIM, H. W.; SUNG, J. M. Effect of apple pomace fiber and pork fat levels on quality characteristics of uncured, reduced-fat chicken sausages. *Poultry Science* 95:1465–1471, 2016.

COMSOL. COMSOL Multiphysics® reference guide. Version 5.0. 2015.

CÓRDOVA, A.; SAAVEDRA, J.; MONDACA, V.; VIDAL, J.; ASTUDILLO-CASTRO, C. Quality assessment and multivariate calibration of 5-hydroxymethylfurfural during a concentration process for clarified apple juice. *Food Control*, v. 95, p. 106–114, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.07.050>.

CORRÊA, A. C.; TEIXEIRA, E.M.; PESSAN, L. A.; MATTOSO, L.H.C.; Cellulose nanofibers from curaua fibers. *Cellulose*, v. 17, p. 1183–1192, 2010.

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E.C. Isotermas de desorção e calor isostérico dos frutos de crambe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.4, p.412–418, 2013.

DAMORADAN, S.; PARKIN, K. L.; OWEN, R. F. Química de Alimentos Fennema. 4°ed, Editora Artmed S.A.

DATTA, A.K. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. *Journal of Food Engineering*, 80, 80–95, 2007a.

DATTA, A.K. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. II: Property data and representative results. *Journal of Food Engineering*, vol. 80, 2007b.

D'ARCHIVIO, A. A.; MAGGI, M. A. Investigation by response surface methodology of the combined effect of pH and composition of water-methanol mixtures on the stability of curcuminoids. *Food Chemistry*, v. 219, p. 414 – 418, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.167>

DEFRAEYE, T. Advanced computational modelling for drying processes - A review. *Applied Energy*, v. 131, p. 323–344, 2014.

DHATT, G.; TOUZOT, G.; LEFRANÇOIS, E. *Finite Element Method*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

DICKINSON, E. J. F.; EKSTRÖM, H.; FONTES, E. COMSOL Multiphysics®: Finite element software for electrochemical analysis. A mini-review. *Electrochemistry Communications*, v. 40, p. 71–74, 2014.

DIEB, J. T. et al. Análise das taxas de evaporação e eficiência térmica do secador de leite de jorro, p. 284-289. In: **São Paulo: Blucher**, 2013.

DISCONZI, Fernanda Perazzolo. **Análise numérica da transferência de calor no interior de cilindros de compressores alternativos de refrigeração doméstica**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

DITCHFIELD, C. **Estudos dos métodos para a medida da atividade de água**. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Química). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

DOTTO, G. L. et al. Influence of Drying Techniques on the Characteristics of Chitosan and the Quality of Biopolymer Films. **Drying Technology**, [s.l.], v. 29, n. 15, p.1784-1791, dez. 2011. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2011.60281>.

DOWNING, D. L. Apple cider. In: Processed apple products. New York: Van Nostrand Reinhold, v. 1, p. 169-187, 1989.

EL-NAWAWI, S.A.; SHEHATA, F.R. Extraction of pectin from Egyptian orange peel. Factors affecting the extraction. **Biol Waste**, 20(4):281–90, 1987.

ELLEUCH, M., BEDIGIAN, D., ROISEUX, O., BESBES, S., BLECKER, C. and ATTIA, H. Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: A review. **Food Chemistry**. 124, 411–421, 2011.

FAO 2020, **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>, acesso em 09/19/2020.

FICHER, K.; Bipp, H-P. Generation of organic acids and monosaccharides by hydrolytic and oxidative transformation of food processing residues. **Bioresource Technology**, vol. 96, 831–842, 2005

FILHO, G. R.; TOLEDO, L. C.; CERQUEIRA, D. A.; ASSUNÇÃO, R. M. N.; MEIRELES, C. S.; OTAGURO, H.; ROGERO, S. O.; LUGÃO, A. B. Water flux, DSC, and cytotoxicity characterization of membranes of cellulose acetate produced from sugar cane bagasse, using PEG 600. *Polymer Bulletin*, 59, 73–81, 2007.

FONTELES, T. V., et al. Ultrasound processing to enhance drying of cashew apple bagasse puree: Influence on antioxidant properties and in vitro bioaccessibility of bioactive compounds. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 31, p. 237–249, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.01.003>.

FORBITO, P.; URBICAIN, M. J. & ROTSTEIN, E. Water vapor–air effective diffusivity in apple tissues. **Journal of Food Science**, 46, 1960–1961, 1981.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport processes and unit operations**. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall Int., p. 921, 1993.

GHAZANFARI, A.; EMAMI, S.; TABIL, L. G.; PANIGRAHI, S. Thin-Layer Drying of Flax Fiber: I. Analysis of Modeling Using Fick's Second Law of Diffusion. **Drying Technology**, 24: 1631–1635, 2006.

GRIGELMO-MIGUEL, N. and MARTIN-BELLOSO, O. Characterization of dietary fiber from orange juice extraction. *Food Res. Int.* 31, 355–361, 1999.

GUILLOIN, F.; CHAMP, M. Structural and physical properties of dietary fibres, and consequences of processing on human physiology. **Food Research International**, v. 33, p. 233-245, 2000.

HABIBI, Y.; LUCIA, L.; ROJAS, O. Cellulose nanocrystals: chemistry, self-assembly, and applications. **Chem Rev**, v. 110, p. 3479–3500, 2010.

HAMANN, F. A.; CZAJA, S.; HUNSCHE, M.; NOGA, G.; FIEBIGA, A. Monitoring physiological and biochemical responses of two apple cultivars to water supply regimes with non-destructive fluorescence sensors. **Scientia Horticulturae**, v. 242, p. 51–61, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.07.008>.

HON, D. N. –S.; SHIRAIISHI, N. Wood and cellulose chemistry, Chaps 2–5, 10, 1990. **Marcel Dekker Inc, New York**.

HUBER, E. **Desenvolvimento de produtos cárneos reestruturados de frango (hambúrguer e empanado) com adição de fibras vegetais como substitutos totais de gordura**. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

HUTTON, D. V. Fundamentals of finite element analysis. **New York: McGraw Hill**, p. 500, 2004.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6th ed. Editora LTC. p. 997, 2007.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ (IAL). **Métodos químicos e físicos para análises de alimentos**. 3. ed. São Paulo: INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 1985.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ (IAL). Normas Analíticas do INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos Químicos e Físicos para Análises de Alimentos**. 4ed. Brasília, p. 129-130, 2005.

ISSARI, K.; SHARMA, P.C.; GUPTA, A. Utilization of apple pomace in the preparation of fiber-enriched acidophilus yoghurt. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41: e13098, 2017.

IWANAMI, H.; MORIYA-TANAKA, Y.; HONDA, C.; HANADA, T.; WADA, M. A model for representing the relationships among crop load, timing of thinning, flower bud formation, and fruit weight in apples. *Scientia Horticulturae*, v. 242, p. 181–187, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.001>.

JAYAMANI, E.; LOONG, T. G.; BAKRI, M. K. Comparative study of Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis of natural fibres treated with chemical, physical and biological methods. *Polymer Bulletin*, vol. 77, 1605–1629, 2020.

JONES, W. P.; LAUNDER, B. E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, [s.l.], v. 15, n. 2, p. 301-314, fev. 1974.

KACURAKOVA, M.; WELLNER, N.; EBRINGEROVA, A.; HROMADKOVA, Z.; WILSONB, R. H.; BELTONB, P. S. Characterisation of xylan-type polysaccharides and associated cell wall components by FT-IR and FT-Raman spectroscopies. *Food Hydrocolloids*, 13, 35-41, 1999.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology*, v. 15, n. 10, p. 2441-2458, nov. 1997.

LAVOYER, F. C. G. **Estuda da secagem de polpa de coco verde em leite de jorro e viabilidade de sua utilização na indústria**. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2012.

LIANG, X.; RAN, J.; SUN, T.; WANG, T.; JIAO, Z.; HE, H.; ZHU, M. Steam-explosion-modified optimization of soluble dietary fiber extraction from apple pomace using response surface methodology. *CYTA – JOURNAL OF FOOD*, 2018VOL. 16, NO. 1, 20–26, 2018.

LIMA, E. E. et al. Estudo das isotermas e calor isostérico de adsorção da farinha da coroa de frade. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*. vol. 10, n. 2, p. 163-170, 2008.

LIMA, M. M. S.; BORSALI, R. Rodlike cellulose microcrystals: structure, properties, and applications. *Macrom Rapid Commun*, v. 25, p. 771–787, 2004.

LIU, H and Chen, Y. Enhanced Methane Production from Food Waste Using Cysteine To Increase Biotransformation of L-Monosaccharide, Volatile Fatty Acids, and Biohydrogen. *Environmental Science & Technology*, 52, 3777–3785, 2018.

LÓPEZ-CÓRDOBA, A.; MATERA, S.; DELADINO, L, HOYA, A, NAVARRO, A.; MARTINO, M. Compressed tablets based on mineral-functionalized starch and co-crystallized sucrose with natural antioxidants. *Journal of Food Engineering*, 146, 234–242, 2015.

LUNN, J.; BUTTRISS, J. L. Review Carbohydrates and dietary fibre. **British Nutrition Foundation Nutrition Bulletin**, v. 32, p. 21–64, 2007.

LUO, J.; MA, Y.; XU, Y. Valorization of apple pomace using a two-step slightly acidic processing strategy. **Renewable Energy**, 152 (2020) 793 – 798.

MALAFRONTÉ, L. et al. Combined convective and microwave assisted drying: Experiments and modeling. **Journal of Food Engineering**, v. 112, n. 4, p. 304–312, 2012.

MARRETO, R. N. **Estudo da técnica de leito de jorro convencional para secagem de microcápsulas de caseína e pectina**. 199 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Farmacêuticas, Programa de Pós-graduação em Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2006.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 2th ed. Rio de Janeiro: COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. **New York: Academic Press**, 1974.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. *Unit Operations of Chemical Engineering*. 5th ed. [s.l.]: McGraw Hill, p. 1130, 1993.

MCCLEARY, B. V.; PROSKY, L. *Advanced Dietary Fiber Technology*. **Blackwell Science Ltd.**, p. 66-67, 152, 169, 227, 503-505, 509, 510, 2001.

MEDEIROS, M. F. D. et al. Drying of pastes in spouted beds: influence of the paste composition on the material retention in the bed. **Drying**, v. C. São Paulo, p. 1529-1536, 2004.

MOCHI, V. T.; PACHECO, J. R.; CREMASCO, M. A. Response Surface Methodology Applied to Ozone Generation. **Ozone: Science & Engineering**, v. 32, p. 372–378, 2010. DOI: 10.1080/01919512.2010.508676.

- MORAES FILHO, F. C. **Avaliação da aplicação de modelos para a secagem de pastas e suspensões em leito de jorro com alimentação contínua**. 2013. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 4th ed. New York: CRC Press, p. 1334, 2015.
- MUJUMDAR, S. A. Spouted beds: Principles and recent developments. **Anais do XVII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos – ENEMP**. São Carlos, v. 1, p. 03–13, 1989.
- MULET, A. et al. Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchella esculenta*). **Journal of Food Engineering**, v. 53, p. 75–81, 2002.
- NASCIMENTO, B. S. **Análise do efeito da composição química na secagem de suspensão em leito de jorro**. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.
- NGO, I. L.; JEON, S.; BYON, C. Thermal conductivity of transparent and flexible polymers containing fillers: A literature review. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s.l.], v. 98, p.219-226, jul. 2016.
- OLIVEIRA, E. G. **Secagem de *Spirulina platensis*: análise das técnicas de leito de jorro e camada delgada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2006.
- PAGANINI, C.; NOGUEIRA, A.; SILVA, N. C.; WOSIACKI, G. Utilization of apple pomace for ethanol production and food fiber obtainment. **Ciências agrotécnica**, Lavras, v. 29, n. 6, p. 1231-1238, nov./dez., 2005.
- PALME, A.; THELIANDER, H.; BRELID, H. Acid hydrolysis of cellulosic fibres: Comparison of bleached kraft pulps and cotton textile cellulose. **Carbohydrate Polymers**, v. 136, p. 1281 – 1287, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.10.015>
- PANCHEV, I.N.; KIRTCHEV, N. A.; KRATCHANOV, C. Kinetic model of pectin extraction. **Carbohydr Polym**, vol 11(3), 193–204, 1989.
- PANDEY, J. K.; LEE, C. S; AH, S. H. Preparation and properties of bio-nanoreinforced composites from biodegradable polymer matrix and cellulose whiskers. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 115, p. 2493–2501, 2010. DOI 10.1002/app.31205.

PARK, K. J. et al. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Centro de Tecnologia e Engenharia de Alimentos, Campinas, 2007. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>>

PASSOS, M. L.; COSTA Jr., E. F. Secagem de sólidos granulados em leito de jorro. In: FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M. Fenômenos de transporte em sistemas particulados: fundamentos e aplicações. São Carlos: **Editora Suprema**, p. 165-200, 2009.

PASSOS, M. L.; MASSARANI, G.; FREIRE, J. T.; MUJUNDAR, A. S. Drying of pastes in spouted beds of inert particles. Design criteria and modeling. **Drying Technology**. New York, v. 15, n. 2, p. 605 – 624, 1997.

PERAZZINI, M. T. B. **Análise do efeito das condições operacionais e características geométricas do leito de jorro na secagem de pastas**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

PERUSSELLO, C. A. **Análise numérica e experimental da secagem osmoconvectiva do Yacon (*Smallanthus sonchifolius*)**. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

PERUSSELLO, C. A.; ZHANG, Z.; MARZOCHELLA, A. and TIWARI, B. K. Valorization of Apple Pomace by Extraction of Valuable Compounds. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Vol. 16, 2017.

PRICHARD, R.; ROSSI, M.; MUIR, J.; YAO, C.; WHELAN, K.; LOMER, M. Fermentable oligosaccharide, disaccharide, monosaccharide and polyol content of foods commonly consumed by ethnic minority groups in the United Kingdom. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, vol. 67, 383-390, 2016.

RAO, M. A. et al. **Engineering Properties of Foods**. 4th ed. New York: CRC Press, 2014.

RESENDE, O. et al. Isotermas e calor isostérico de sementes de *Buchenavia capitata* (Vahl). **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 3, p. 516–523, 2015.

ROMAN, M.; WINTER, T. Effect of sulfate groups from sulfuric acid hydrolysis on the thermal degradation behavior of bacterial cellulose. **Biomacromol**, v. 5, p. 1671–1677, jun. 2004. DOI: 10.1021/bm034519.

ROSA, C, A.; FREIRE, J. T. Secagem de Material Particulado em Leito de Jorro Contínuo. In: FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C. **Aplicações em sistemas particulados**. São Carlos: Editora Suprema, 2009. p. 114-140.

- ROSA, C. A. **Estudo experimental e numérico da fluidodinâmica e das transferências de calor e massa em um leito de jorro contínuo: Uso da técnica CFD**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.
- SAMIR, M; ALLOIN, F; DUFRESNE, A. Review of recent research into cellulosic whiskers, their properties and their application in nanocomposite field. **Biomacromol**, v. 6, p. 612–626, 2005.
- SANDER, A. Thin-layer drying of porous materials: Selection of the appropriate mathematical model and relationships between thin-layer models parameters. **Chemical Engineering and Processing**, 46, 1324–1331, 2007.
- SANSONE, K.; KERN, M.; HONG, M. Y.; LIU, C.; HOOSHMAND, S. Acute Effects of Dried Apple Consumption on Metabolic and Cognitive Responses in Healthy Individuals. **JOURNAL OF MEDICINAL FOOD**, V. 0, p. 1–7, 2018. DOI: 10.1089/jmf.2017.0152
- SANTANA, M. F. S. **Caracterização físico-química de fibra alimentar de laranja e maracujá**. Tese (Doutorado Engenharia de Alimentos) Universidade Estadual de Campinas. Campinas 2005.
- SANTOS, K. G. **Estudo da fluidodinâmica do leito de jorro por CFD com malhas tridimensionais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- SANTOS, R. M. **Estudo da secagem e do consumo de gás natural em uma Rama têxtil de aquecimento direto**. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- SANTOS Jr., S. F. **Estudo experimental e de modelagem da secagem de biomassa de microalgas em leito de jorro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- SAYAGO-AYRDI, S. G.; BRENES, A.; GOÑI, I. Effect of grape antioxidant dietary fiber on the lipid oxidation of raw and cooked chicken hamburgers. **LWT - Food Science and Technology**, v. 42, p. 971-976, 2009.
- SAYMA, A. **Computational fluid dynamics**. [s.l.]: Abdalnaser SAYMA & VENTUS Publishing ApS, 2009.
- SEBRAE 2018. <http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-cultivo-e-o-mercado-da-maca,ea7a9e665b182410VgnVCM100000b272010aRCRD> (acesso em 13/10/2018).

SHARMA, P.C.; GUPTA, A.; ISSARI, K.; Effect of Packging and Storage on Dried Apple Pomace and Fiber Extracted From Pomace. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41: e12913, 2017.

SHING, A.; RANA, I.; CHAND, K. Utilization of apple pomace as a source of dietary fibre in biscuits *International Agricultural Engineering Journal*, Volume 23, Issue 4, Pages 28-35, 2014.

SHINTANI, T. Food Industrial Production of Monosaccharides Using Microbial, Enzymatic, and Chemical Methods. *Fermentation*, 5, 47, 2019.

SIMIONI, T. **Estudo comparativo da secagem de microalgas *Scenedesmus acuminatus* em camada delgada e leito de jorro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

Singh, R. P.; Prakash, S.; Bhatia, R.; Negi, M.; Singh, J.; Bishnoi, M.; Kondepudi, K. K. Generation of structurally diverse pectin oligosaccharides having prebiotic attributes *Food Hydrocolloids*, Vol. 108, 2020.

SIQUEIRA, G.; TAPIN-LINGUA, S.; BRAS, J.; PEREZ, D. S.; DUFRESNE, A. Morphological investigation of nanoparticles obtained from combined mechanical shearing, and enzymatic and acid hydrolysis of sisal fibers. *Cellulose*, v. 17, p. 1147–1158, 2010. DOI 10.1007/s10570-010-9449-z.

SOUSA, R. C.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Análise da cinética de atrição de partículas esféricas no leito de jorro convencional. **In: In Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados - ENEMP 2015** [=Blucher Engineering Proceedings]. São Paulo: Blucher, p. 1-8, 2015.

SOUSA, R. C. **Secagem de materiais pastosos e granulares no leito de jorro mecânico e convencional**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

SOUZA, S. J. **Secagem de mistura de polpa de frutas tropicais em leito de jorro**. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

SOUZA, J. F. A. et al. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. *Revista Brasileira de Geografia*, [s.l.], v. 29, n. 1, p.21-41, mar. 2011.

SPILLER, G. A. **CRC Handbook of Dietary Fiber in Human Nutrition**, 3rd Edition. CRC Press LLC, p. 3-5, 40, 391, 2001.

STATSOFT. **STATISTICA** (data analysis software system), version 10.0.
www.statsoft.com.

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

SUDHA, M. L.; BASKARAN, V.; LEELAVATHI, K. Apple pomace as a source of dietary fiber and polyphenols and its effect on the rheological characteristics and cake making. **Food Chemistry**, v. 104, p. 686–692, 2007.
doi:10.1016/j.foodchem.2006.12.016.

TAIPINA, M. O.; FERRAREZI, M. M. F.; GONÇALVES, M. C. Morphological evolution of curauá fibers under acid hydrolysis. **Cellulose**, v. 19, p. 1199–1207, 2012.
DOI 10.1007/s10570-012-9715-3.

TIENDREBEOGO, E. S. et al. Characterization of Two Different Stumps of *Spirulina platensis* Drying: Assessment of Water Transport Coefficient. **Food Sciences and Nutrition**, v. 6, p. 1437–1449, 2015.

VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R. *Fundamentos da termodinâmica clássica*. 3rd ed.
São Paulo: Blücher, 1993.

VELÁZQUEZ - GUTIÉRREZ, S. K. et al. Sorption isotherms, thermodynamic properties and glass transition temperature of mucilage extracted from chia seeds (*Salvia hispanica* L.). **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 121, p. 411-419, maio 2015.

VERSTEEG, H.K. MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. 2st ed. Harlow: Pearson Education Limited, p. 517, 2007.

VIEIRA, G. N. A. **Monitoramento em tempo real e simulação de controle da umidade de pós produzidos pela secagem de pastas em leite de jorro**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

VILLAS BOAS, S. G.; ESPOSITO, E. Bioconversão do bagaço de maçã. *Biotecnologia - Ciência & Desenvolvimento*, Brasília, p. 38-42, 2001.

WANG, L.; WELLER, C. L. Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants. **Trends Food Sci Tech**, 17:300–12, 2006.

WANG, Y.; QIN, X.; HUANG, S.; LU, L.; ZHANG, Q.; FENG, J. Structural-borne acoustics analysis and multi-objective optimization by using panel acoustic participation

and response surface methodology. **Applied Acoustics**, v. 116, p. 139-151, jan. 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.09.013>

WELTY, J.R. et al. Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer. 5th ed. New York: **John Wiley & Sons, Inc.**, p. 729, 2008.

WANG, X. et al. The Application of COMSOL Multiphysics in Direct Current Method Forward Modeling. **Procedia Earth And Planetary Science**, [s.l.], v. 3, p. 266-272, 2011.

WANG, Z. G. et al. Numerical simulations of hydrodynamic behaviors in conical spouted beds. **China Particuology**, v. 4, n.3-4, p. 194-203, 2006.

WANG, Z.; SUN, J.; CHEN, F.; LIAO, X AND HU, X. Mathematical modelin on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. **Journal of Food Engineering**, 80, 536-544, 2007.

WEISE, F.; SCHOLL, S. Evaporation of pure liquids with increase viscosity in a falling film evaporator. **Heat Mass Transfer**, v. 45, p. 1037 – 1046, 2009.

WENDT, J. F. Computational fluid dynamics: An Introduction. New York: Editora Springer, p. 298, 1992.

WURSCH P.; PI-SUNYER, F. X. The Role of Viscous Soluble Fiber in the Metabolic Control of Diabetes: A review with special emphasis on cereals rich in β -glucan. **Diabetes Care**, v. 20(11), p. 1774-1780, 1997. doi.org/10.2337/diacare.20.11.1774.

XUELI, L. I.; XIULI, H. E.; YUANPING, L. V.; QIANG, H. E. Extraction and functional properties of water-soluble dietary fiber from apple pomace. **Journal of Food Process Engineering**, v. 37, p. 293–298, 2014.

YAN, H. AND KERR, W. Total phenolics content, anthocyanins, and dietary fiber content of apple pomace powders produced by vacuum-belt drying. **Journal Science Food Agriculture**, 93: 1499–1504, 2013.

YAMANAKA, A.; HASHIMOTO, A.; MATSUO, T.; KANO, M.; SUEHARA, K. I.; KAMEOKA, T. Analysis of kinetic uptake phenomena of monosaccharide and disaccharide by suspension TBY-2 cells using an FT-IR/ATR method. **Bioprocess Biosyst Eng**, vol. 30, 457–468, 2007.

ZHAO, H.; KWAK, J. H.; ZHANG, Z. C.; BROWN, H. M.; AREY, B.; HOLLADAY, J. E. (2007) Studying cellulose fiber structure by SEM, XRD, NMR and acid hydrolysis. **Carbohydrate Polymers**, v. 68, p. 235–241, 2007.

ZHENG, Y.; YAN, S.; QI, J.; ZHAO, Y.; GUO, X.; SHI, B. Protective effect of chitosan oligosaccharide against oxidative damage of peripheral blood mononuclear cells in dairy cows induced by diethylenetriamine/nitric oxide via NF- κ B signalling pathway. **Italian Journal of Animal Science**, vol. 19, 602-609, 2020.

ZHOU, M.; LI, C.; BI, J.; JIN, X.; LYU, J.; LI, X. Towards understanding the enhancement of moisture diffusion during intermediate-infrared drying of peach pomace based on the glass transition theory. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 54, 143–151, 2019.