



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS

ANDRESSA BARBOSA BARROSO

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA OZONIZAÇÃO NA QUALIDADE DO AMIDO DE
ARARUTA E DA FARINHA DE TRIGO E SUA INFLUÊNCIA NA PRODUÇÃO DE
PÃES

FORTALEZA

2025

ANDRESSA BARBOSA BARROSO

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA OZONIZAÇÃO NA QUALIDADE DO AMIDO DE
ARARUTA E DA FARINHA DE TRIGO E SUA INFLUÊNCIA NA PRODUÇÃO DE
PÃES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Área de concentração: Ciência e tecnologia de produtos de origem vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Audino Zambelli.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B285a Barroso, Andressa Barbosa.

Avaliação dos efeitos da ozonização na qualidade do amido de araruta e da farinha de trigo e sua influência na produção de pães / Andressa Barbosa Barroso. – 2025.
180 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Rafael Audino Zambelli.

1. Ozônio. 2. Ozonização. 3. Tecnologia de alimentos. 4. Modificação. 5. Pão - Qualidade. I. Título.
CDD 664

ANDRESSA BARBOSA BARROSO

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA OZONIZAÇÃO NA QUALIDADE DO AMIDO DE
ARARUTA E DA FARINHA DE TRIGO E SUA INFLUÊNCIA NA PRODUÇÃO DE
PÃES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Área de concentração: Ciência e tecnologia de produtos de origem vegetal.

Aprovada em: 19/05/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rafael Audino Zambelli (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Andressa Maria Medeiros Theóphilo Galvão
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Pedro Henrique Campelo Felix
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

A Deus.

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me ajudado a chegar até aqui, por colocar pessoas maravilhosas e iluminadas em minha vida e por guiar todos os meus caminhos.

Às pessoas mais importantes da minha vida: meus pais. Meu pai João Barroso, que com o suor do seu trabalho nunca deixou que me faltasse nada, que fez o possível e o impossível para ver a sua única filha formada e agora mestra. Minha mãe Francilda Barbosa, que com o seu amor, doçura e dedicação, sempre me educou da melhor maneira. Os dois que com carinho e afeto me ensinaram sobre respeito, gratidão, dignidade, honestidade, fé, companheirismo, amor, dentre outras infinitudes de coisas.

À minha família, principalmente às minhas tias e madrinhas, Francilma e Francinalva, por acreditarem no meu potencial.

Ao meu orientador Rafael Zambelli, pela excelente orientação, disponibilidade e paciência.

À banca examinadora nas pessoas dos professores Pedro Henrique e Andressa Galvão.

À professora Sueli Rodrigues que cedeu o seu laboratório para que eu pudesse realizar o tratamento das minhas matérias-primas. Sem ela, este trabalho não seria possível.

À professora Luciana Gama e ao diretor do Instituto de Desenvolvimento Rural Prof. Lucas Nunes da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB) que me ajudaram na obtenção e processamento dos rizomas de araruta.

Ao professor Pablo Daniel Ribotta da Universidade Nacional de Córdoba (UNC), que me acolheu tão bem, não só na universidade, mas também na cidade.

À Fernanda, também da UNC, que me auxiliou com maestria nas análises realizadas lá.

Às professoras Andréa Aquino, Lucicléia Barros e Dorasilvia, que cederam os laboratórios que são responsáveis para que eu pudesse realizar minhas análises.

À Thaísa Valéria por ter me ajudado com a obtenção da farinha de trigo, sem ela tudo seria bem mais complicado. Você é luz, amiga.

À Monalisa Menezes, que também me ajudou com a obtenção de farinha de trigo.

Ao meu amigo Matheus Calixto, que eu considero como sendo um anjo em minha vida, o qual eu compartilho dramas, vitórias, derrotas e coisas aleatórias. Além do mais, me auxilia em qualquer dúvida acadêmica que me surja. Me ajuda e acolhe meus surtos.

Aos bolsistas do laboratório de biomateriais alimentícios, que estiveram no sufoco

ao meu lado, me auxiliando nas análises e compartilhando os perrengues da vida. Em especial à Mariana Anjos, Larissa Ribeiro, Hyorranes Alencar e Wesley Pereira. À doutoranda Diana também, por toda a ajuda nos processos.

À minha amiga Jéssica Azevedo, que esteve comigo desde o processo seletivo até hoje.

À minha amiga Izabel Couto, que me auxiliou tanto na realização das análises, como me apoiou psicologicamente.

À Maryana Frota e Rosenildo Nascimento pelo auxílio durante as análises.

Ao Francisco Alessandro, que me auxiliou no desenrolar de uma análise.

Ao Júnior, que deixa os meus dias na UFC mais leves.

À Sole Lopez, que foi minha maior companheira na cidade de Córdoba, aumentando ainda mais o encanto pela cidade e ajudando com que os dias lá fossem mais alegres.

À Gabriela, que foi quem me acolheu na minha chegada à Córdoba, sendo uma pessoa doce, prestativa e divertida.

A todas as pessoas que me ajudaram na viagem para a Argentina.

Aos meus amigos que sempre me apoiam, incentivam e acreditam no meu potencial, em especial às minhas estrelas, ao meu napolitano, às minhas afilhadas e à minha primeira comadre.

Ao Lucas Moura que me deu apoio físico e moral.

À Central Analítica - UFC/CT-INFRA/MCTI-SISNANO/Pró-Equipamentos CAPES.

Ao Laboratório de Raios-X da UFC.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES - Código de Financiamento 001

“Cada tic-tac é um segundo da vida que passa, foge, e não se repete. E há nele tanta intensidade, tanto interesse, que o problema é só sabê-lo viver. Que cada um o resolva como puder” (Frida Kahlo).

RESUMO

Diante das crescentes demandas da indústria de alimentos por processos sustentáveis e eficientes, a aplicação de tecnologias emergentes tem se mostrado uma estratégia promissora para a modificação de matérias-primas. Nesse contexto, o ozônio (O_3) destaca-se por sua elevada capacidade oxidante, pela possibilidade de ser gerado diretamente no local de aplicação, nas formas gasosa e aquosa, e pela rápida decomposição em oxigênio (O_2), características que o tornam ambientalmente seguro e tecnicamente viável. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da ozonização sobre as propriedades físico-químicas, estruturais, térmicas e reológicas da farinha de trigo comercial, do amido de araruta e dos pães produzidos a partir dessas farinhas modificadas. Foram realizadas análises morfológicas (MEV), estruturais (FTIR), funcionais (Índice de Absorção e Poder de Inchamento), além de determinação de umidade, glúten seco e úmido, número de queda, farinografia e teor de amido danificado na farinha. Para o amido, foram avaliados comportamento reológico, estabilidade frente a ciclos de congelamento, viscosidade (RVA), propriedades térmicas (DSC) e distribuição de tamanho de partícula. As características tecnológicas dos pães foram analisadas por meio da determinação do volume específico, fator e índice de expansão, bem como do volume produzido durante a fermentação. Os resultados demonstraram que o ozônio promoveu alterações significativas nas propriedades das farinhas e dos amidos, embora sem modificações estruturais detectáveis por MEV no amido de araruta e nos pães, FTIR também não apresentou diferenças significativas nas farinhas e nos amidos analisados. As farinhas ozonizadas apresentaram aumento no Poder de Inchamento e no Índice de Absorção, associado à redução da umidade e ao incremento dos teores de glúten seco e úmido. Observou-se, ainda, redução do número de queda, indicativa de maior atividade de *alfa*-amilase, aumento na absorção de água e variações na estabilidade farinográfica, dependentes das condições de tratamento, também houve elevação do teor de amido danificado. No amido de araruta, houve um aumento da luminosidade nas amostras tratadas, a ozonização resultou em menor sinérese, indicando maior estabilidade, e em redução das viscosidades máxima, mínima e de ruptura. As temperaturas de gelatinização (T_o , T_p e T_c) foram superiores nas amostras tratadas, que também apresentaram redução na entalpia de transição. Quanto aos pães, as farinhas ozonizadas levaram à redução do volume específico, do fator e do índice de expansão nos tratamentos prolongados, enquanto o volume durante a fermentação foi favorecido em tratamentos de menor duração. Os dados obtidos evidenciam que a ozonização configura-se como uma estratégia tecnológica eficiente e sustentável para

promover modificações direcionadas nas propriedades físico-químicas, térmicas e reológicas da farinha de trigo e do amido de araruta, ampliando suas possibilidades de aplicação industrial e desenvolvimento de novos processos e produtos na cadeia de alimentos.

Palavras-chave: modificação; ozônio; tecnologia alimentícia.

ABSTRACT

Given the increasing demands of the food industry for sustainable and efficient processes, the application of emerging technologies has proven to be a promising strategy for the modification of raw materials. In this context, ozone (O_3) stands out due to its high oxidative capacity, its ability to be generated directly at the point of application in gaseous or aqueous forms, and its rapid decomposition into oxygen (O_2), characteristics that make it environmentally safe and technically feasible. This study aimed to evaluate the effects of ozonation on the physicochemical, structural, thermal, and rheological properties of commercial wheat flour, arrowroot starch, and bread produced from these modified flours. Morphological (SEM), structural (FTIR), and functional analyses (Water Absorption Index and Swelling Power) were carried out, in addition to moisture content, wet and dry gluten content, falling number, farinograph parameters, and damaged starch content in the flour. For the starch, rheological behavior, freeze-thaw stability, viscosity (RVA), thermal properties (DSC), and particle size distribution were evaluated. The technological properties of the bread were assessed by measuring specific volume, expansion factor and index, as well as the volume produced during fermentation. The results showed that ozone promoted significant changes in the properties of the flours and starches, although no structural modifications were detected by SEM in the arrowroot starch and the breads. FTIR analysis also revealed no significant differences in the flours and starches analyzed. Ozonated flours showed an increase in Swelling Power and Water Absorption Index, associated with reduced moisture content and increased wet and dry gluten levels. A reduction in the falling number was also observed, indicating higher α -amylase activity, along with increased water absorption and variations in farinograph stability depending on the treatment conditions. An increase in the damaged starch content was also observed. In arrowroot starch, an increase in luminosity was observed in treated samples. Ozonation resulted in lower syneresis, indicating greater stability, and reduced peak, minimum, and breakdown viscosities. Gelatinization temperatures (T_o , T_p , and T_c) were higher in treated samples, which also showed reduced enthalpy of transition. Regarding the bread, ozonated flours led to reductions in specific volume, expansion factor, and expansion index in prolonged treatments, while the volume produced during fermentation was enhanced in shorter treatments. The data obtained demonstrate that ozonation is an efficient and sustainable technological strategy to promote targeted modifications in the physicochemical, thermal, and rheological properties of wheat flour and

arrowroot starch, expanding their potential for industrial applications and enabling the development of new processes and products within the food supply chain.

Keywords: modification; ozone; food technology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Reator utilizado na ozonização da farinha de trigo.....	46
Figura 2	– Sistema de ozonização na farinha de trigo.....	47
Figura 3	– Parâmetros de elipse truncada.....	53
Figura 4	– Gráfico FTIR das farinhas de trigo.....	56
Figura 5	– Influência da ozonização no Poder de Inchamento das farinhas de trigo.....	60
Figura 6	– Influência da ozonização no Índice de Absorção das farinhas de trigo.....	60
Figura 7	– Influência da ozonização na umidade das farinhas de trigo.....	61
Figura 8	– Influência da ozonização no teor de glúten úmido das farinhas de trigo.....	65
Figura 9	– Influência da ozonização no teor de glúten seco das farinhas de trigo.....	65
Figura 10	– Influência da ozonização no <i>falling number</i> das farinhas de trigo.....	67
Figura 11	– Influência da ozonização na absorção de água das farinhas de trigo.....	69
Figura 12	– Influência da ozonização no tempo de desenvolvimento das massas.....	70
Figura 13	– Influência da ozonização na estabilidade das massas.....	71
Figura 14	– Efeito da ozonização no teor de amido danificado das farinhas de trigo.....	73
Figura 15	– Microscopia Eletrônica de Varredura dos pães produzidos a partir das farinhas de trigo modificadas em um aumento de 1500 x.....	74
Figura 16	– Efeito da ozonização no índice de expansão dos pães.....	77
Figura 17	– Efeito da ozonização no fator de expansão dos pães.....	78
Figura 18	– Efeito da ozonização no volume específico dos pães.....	80
Figura 19	– Efeito da ozonização no volume produzido durante a fermentação dos pães.....	80
Figura 20	– Colheita dos rizomas de araruta.....	86
Figura 21	– Rizoma lavado e pronto para descascamento e corte.....	86

Figura 22 – Rizomas triturados.....	86
Figura 23 – Fibra de araruta.....	86
Figura 24 – Sedimentação.....	87
Figura 25 – Amido em placa de Petri para secagem.....	87
Figura 26 – Amido sendo peneirado.....	88
Figura 27 – Amido em pote para armazenamento.....	88
Figura 28 – Reator utilizado para ozonização do amido de araruta.....	89
Figura 29 – Sistema de ozonização no amido de araruta.....	91
Figura 30 – Fibras após a primeira lavagem.....	97
Figura 31 – Gráfico FTIR dos amidos de araruta.....	98
Figura 32 – Microscopia Eletrônica de Varredura dos amidos de araruta com aumento de 1500x.....	100
Figura 33 – Influência da ozonização no Índice de Absorção à temperatura ambiente dos amidos de araruta.....	103
Figura 34 – Influência da ozonização no Índice de Absorção sob ação do calor (90 °C) dos amidos de araruta.....	104
Figura 35 – Influência da ozonização no Poder de Inchamento à temperatura ambiente (25 °C) dos amidos de araruta.....	106
Figura 36 – Poder de Inchamento sob ação do calor (90 °C) dos amidos de araruta.....	107
Figura 37 – Efeito da ozonização na luminosidade dos amidos de araruta.....	111
Figura 38 – Efeito da ozonização no parâmetro a* dos amidos de araruta.....	112
Figura 39 – Efeito da ozonização no parâmetro b* dos amidos de araruta.....	112
Figura 40 – Influência da ozonização na viscosidade dos amidos de araruta.....	115
Figura 41 – Influência da ozonização na sinérese dos amidos de araruta (Ciclo 1).....	118

Figura 42 – Influência da ozonização na sinérese dos amidos de araruta (Ciclo 2).....	119
Figura 43 – Influência da ozonização na sinérese dos amidos de araruta (Ciclo 3).....	120
Figura 44 – Influência da ozonização na viscosidade máxima dos amidos de araruta.....	125
Figura 45 – Influência da ozonização na viscosidade mínima dos amidos de araruta.....	125
Figura 46 – Influência da ozonização na viscosidade de ruptura dos amidos de araruta..	126
Figura 47 – Influência da ozonização na viscosidade final dos amidos de araruta.....	126
Figura 48 – Influência da ozonização na temperatura de gelatinização dos amidos de araruta.....	127
Figura 49 – Influência da ozonização na temperatura inicial de gelatinização dos amidos de araruta.....	132
Figura 50 – Influência da ozonização na temperatura de pico de gelatinização dos amidos de araruta.....	133
Figura 51 – Influência da ozonização na temperatura final de gelatinização dos amidos de araruta.....	133
Figura 52 – Influência da ozonização na variação de entalpia dos amidos de araruta.....	134
Figura 53 – Padrões de difração de raios x com e sem ruído dos amidos de araruta.....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Impactos do ozônio nas propriedades de amidos e farinhas modificados....	36
Tabela 2 -	Delineamento Composto Central das farinha de trigo.....	48
Tabela 3 -	Formulação controle de pão tipo forma.....	52
Tabela 4 -	Poder de Inchamento e Índice de Absorção em água da farinha de trigo...	58
Tabela 5 -	Teor de umidade (%) das farinhas de trigo.....	61
Tabela 6 -	Teor de glúten seco e glúten úmido (%) das farinhas de trigo.....	63
Tabela 7 -	Valores de <i>falling number</i> das farinhas de trigo.....	66
Tabela 8 -	Valores de amido danificado nas amostras de farinha de trigo.....	72
Tabela 9 -	Delineamento Composto Central do amido de araruta.....	90
Tabela 10 -	Índice de absorção de água e poder de inchamento dos amidos de araruta em temperatura ambiente e sob a ação do calor.....	108
Tabela 11 -	Parâmetros colorimétricos dos amidos de araruta.....	110
Tabela 12 -	Modelo reológico dos amidos de araruta.....	114
Tabela 13 -	Sinérese (%) dos amidos de araruta durante ciclos de congelamento/descongelamento e viscosidade.....	117
Tabela 14 -	Propriedades de pasta dos amidos de araruta.....	110
Tabela 15 -	Propriedades térmicas dos amidos de araruta.....	124
Tabela 16 -	Características da distribuição do tamanho de partícula dos amidos de araruta.....	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFB1	Aflotoxina B1
AFLs	Aflotoxinas
BaCl ₂	Cloreto de Bário
cP	centiPoise
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
DCC	Delineamento Composto Central
EPA	Agência de Proteção Ambiental
IAA	Índice de Absorção de Água
EX	Extensibilidade da Massa
FDA	Food and Drug Administration
h	Hora(s)
IAA	Índice de Absorção de Água
IN	Instrução Normativa
KBr	Brometo de Potássio
kg	Quilograma
L	Litro
L.min ⁻¹	Litro por minuto
log	Logaritmo
Min	Minuto(s)
Mg	Megagrama
mg.Kg ⁻¹	Miligramma por quilo

mg L ⁻¹	Miligrama por litro
m/m	Massa por massa
NaCl	Cloreto de Sódio
NaOH	Hidróxido de Sódio
O	Átomo de oxigênio
O ₂	Oxigênio molecular
O ₃	Ozônio
PAT	Patulina
pH	Potencial Hidrogeniônico
ppm	Parte por milhão
p/v	Peso por volume
RM	Resistência Máxima
rpm	Rotações por minuto
RVU	Rapid Visco Unit
UV	Ultravioleta
V	Volt
v/v	Volume por volume

LISTA DE SÍMBOLOS

°C Graus Celsius

% Porcentagem

ΔH Variação da Entalpia

ΔG Energia de Gibbs

< Menor que

> Maior que

= Igual

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1	Ozônio.....	26
2.2	Histórico	27
2.3	Propriedades do ozônio.....	28
2.4	Papel do ozônio na decomposição de compostos.....	29
2.5	Áreas de aplicação do ozônio.....	30
2.6	Geração de ozônio.....	31
2.7	Processo de Ozonização.....	32
2.8	Ozonização em Alimentos.....	33
2.9	Limitações do uso do ozônio.....	36
2.10	Farinha de trigo.....	37
2.11	Araruta.....	40
2.12	Pão.....	42
3	CAPÍTULO II - AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA OZONIZAÇÃO NA QUALIDADE DA FARINHA DE TRIGO E SUA INFLUÊNCIA NA PRODUÇÃO DE PÃES.....	44
3.1	INTRODUÇÃO.....	44
3.2	METODOLOGIA.....	44
3.2.1	<i>Ozonização da farinha de trigo.....</i>	46
3.2.2	<i>Tratamento com ozônio.....</i>	48

3.2.3	<i>Análises da farinha de trigo</i>	49
3.2.3.1	<i>Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR)</i>	49
3.2.3.2	<i>Poder de Inchamento e Índice de Absorção em Água</i>	49
3.2.3.3	<i>Umidade</i>	50
3.2.3.4	<i>Glúten Úmido e Glúten Seco</i>	50
3.2.3.5	<i>Falling Number</i>	50
3.2.3.6	<i>Farinografia</i>	51
3.2.3.7	<i>Amido Danificado</i>	51
3.2.4	<i>Produção de Pães</i>	51
3.2.5	<i>Análises de qualidade das massas e dos pães</i>	53
3.2.5.1	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	53
3.2.5.2	<i>Avaliação do processo de fermentação</i>	53
3.2.5.3	<i>Volume Específico</i>	54
3.2.5.4	<i>Índice de Expansão</i>	54
3.2.5.5	<i>Volume das massas produzido durante a fermentação</i>	55
3.2.6	<i>Análise estatística</i>	55
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
3.3.1	<i>Análises da farinha de trigo</i>	56
3.3.1.1	<i>Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR)</i>	56
3.3.1.2	<i>Poder de Inchamento e Índice de Absorção em Água</i>	58
3.3.1.3	<i>Umidade</i>	61

3.3.1.4	<i>Glúten Úmido e Glúten Seco</i>	63
3.3.1.5	<i>Falling Number</i>	66
3.3.1.6	<i>Farinografia</i>	68
3.3.1.7	<i>Amido Danificado</i>	72
3.3.2	<i>Análises de qualidade das massas e dos pães</i>	75
3.4	CONCLUSÃO	82
4	CAPÍTULO III - AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA OZONIZAÇÃO NA QUALIDADE DO AMIDO DE ARARUTA	85
4.1	INTRODUÇÃO	85
4.2	METODOLOGIA	86
4.2.1	<i>Ozonização do amido de araruta</i>	86
4.2.2	<i>Rendimento do amido de araruta</i>	91
4.2.3	<i>Tratamento com ozônio</i>	91
4.2.4	<i>Análises do amido de araruta</i>	93
4.2.4.1	<i>Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR)</i>	93
4.2.4.2	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	93
4.2.4.3	<i>Poder de Inchamento e Índice de Absorção em Água</i>	93
4.2.4.4	<i>Cor</i>	93
4.2.4.5	<i>Comportamento reológico</i>	94
4.2.4.6	<i>Estabilidade a ciclos de congelamento e descongelamento</i>	94
4.2.4.7	<i>Viscoamilografia</i>	95

4.2.4.8	<i>Análise térmica (DSC)</i>	95
4.2.4.9	<i>Distribuição granulométrica das partículas</i>	96
4.2.4.1	<i>Difração de raio-x</i>	96
4.2.5	<i>Análise estatística</i>	97
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
4.3.1	<i>Rendimento do amido de araruta</i>	97
4.3.2	<i>Análises do amido de araruta</i>	98
4.3.2.1	<i>Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR)</i>	98
4.3.2.2	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	101
4.3.2.3	<i>Poder de Inchamento e Índice de Absorção em Água</i>	103
4.3.2.4	<i>Cor</i>	111
4.3.2.5	<i>Comportamento reológico</i>	114
4.3.2.6	<i>Estabilidade a ciclos de congelamento e descongelamento</i>	117
4.3.2.7	<i>Viscoamilografia</i>	122
4.3.2.8	<i>Análise térmica (DSC)</i>	130
4.3.2.9	<i>Distribuição granulométrica das partículas</i>	137
4.3.2.1	<i>Difração de raio-x</i>	140
4.4	CONCLUSÃO	144
	REFERÊNCIAS	148
	APÊNDICE A – GRÁFICOS REFERENTES À ANÁLISE DE FARINOGRAFIA	167

APÊNDICE B – GRÁFICO REFERENTE À ANÁLISE DE DSC.....	179
APÊNDICE C – GRÁFICO REFERENTE À ANÁLISE NO RVA.....	180

1 INTRODUÇÃO

O interesse em novas tecnologias para o melhoramento e a modificação de alimentos, bem como garantir a qualidade microbiológica na produção de alimentos tem sido destaque na última década. Deste modo, torna-se imprescindível a implementação de novas tecnologias na indústria de alimentos (Queroz *et al.*, 2020; Souza, 2016).

Estas novas tecnologias não devem agredir o meio ambiente. Elas são chamadas de tecnologias não convencionais, inovadoras, emergentes, limpas e de baixo impacto ambiental (Souza, 2016). Dentre essas, pode-se destacar a utilização de ozônio (O₃), um componente gerado a partir da combinação de um átomo de oxigênio (O) com oxigênio molecular (O₂) através de uma reação química (Hänninen, 2019). O gás ozônio (O₃) desperta interesse por poder ser gerado no próprio local de aplicação, na forma gasosa ou solubilizado em água, e o produto de sua degradação é o próprio oxigênio (O₂) (Alves *et al.*, 2019).

O processo de ozonização passou a ser difundido no Brasil como alternativa aos métodos convencionais de pré-cloração e pré-aeração em tratamentos de águas superficiais, a partir de 1983 (Jacques *et al.*, 2015). Já em relação aos alimentos, a Instrução Normativa (IN) nº 18 de 2009, que apresenta o regulamento técnico para processamento, armazenamento e transporte de produtos orgânicos, permite o uso do ozônio como produto de limpeza e desinfecção para uso em contato com alimentos orgânicos (Brasil, 2009).

A portaria nº 888 de 2021 do Ministério da Saúde, fala sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu controle de potabilidade, e estabelece valores de concentração e temperatura da água para utilização do ozônio como desinfetante (Brasil, 2021). E a IN nº 2 de 2008 estabelece a obrigatoriedade de um ozonizador no sistema de oxidação de agrotóxicos da água de lavagem das aeronaves agrícolas (Brasil, 2008).

A ozonização tem sido utilizada na Europa para sanitizar a água consumida pela população. Outros usos comerciais incluem: tratamento de piscinas, sanitização de galões de água e de câmaras frias, além da inativação da microbiota contaminante (Cavalcante *et al.*, 2015). Pesquisas constataam que a utilização de ozônio em produtos cárneos, derivados lácteos, aves, peixes, frutas e vegetais, aumentam a vida de prateleira destes, e que o gás pode ser usado como sanitizante na área alimentícia (Couto *et al.*, 2016). Entretanto, estudos recentes têm dado uma atenção especial na aplicação do ozônio na modificação de algumas matérias-primas alimentícias como fibras de plantas (Bhattacharyya e Baheti, 2023), amido de

arroz (Li *et al.*, 2023), amido de batata (He *et al.*, 2023) e amido de milho (Özaslan e Ibanoglu, 2022).

Em relação à utilização do ozônio, tem três formas: gasosa, névoa e líquida. Cada finalidade tem uma melhor forma de utilização, por exemplo, na forma líquida, passa-se pelo processo de dissolução principalmente na água, formando-se água ozonizada. Entretanto, em relação ao ozônio gasoso, é possível que apresente um maior risco à saúde, necessitando uma maior atenção em relação à segurança. Já se tratando da névoa, apresenta como sendo mais recente e mais investida durante o período da pandemia do coronavírus, onde se necessitou de um cuidado e higienização mais efetivamente em ambientes e objetos. Desta forma, a névoa ozonizada pode ser utilizada em ambientes fechados, embalagens, alimentos, veículos, grãos armazenados e objetos (Maxconsulting, 2021). O ozônio nesta forma não tem cheiro e não provoca irritação (Montenegro, 2021). Neste contexto, o ozônio consiste em uma ferramenta de fácil aplicação e que pode ser incluída no processamento de diversos alimentos, tais como amidos e farinhas.

Nos últimos anos, tem sido relatada a aplicação de ozônio gasoso ou aquoso no processamento de farinha (Hu *et al.*, 2020). Zhang *et al.* (2021) estudaram farinhas de grão de trigos perolados e ozonizados, e puderam perceber que a ozonização não alterou as composições e não prejudicou o teor de amido das farinhas, além de melhorar o brilho em todas as amostras. O tratamento com ozônio também aumentou a resistência da massa das farinhas de grãos não perolados e perolizados, aumentando o efeito com o aumento do grau de perolização. A aplicação de O₃ subiu o pico de viscosidade da farinha e resultou num aumento do teor de polímeros proteicos insolúveis na farinha de grãos fortemente perolados, mas teve apenas um ligeiro efeito nos grãos não perolados e levemente perolados.

O amido é um biopolímero de origem vegetal, abundante em plantas e raízes, com alto valor nutricional e energético, muito utilizado na indústria. No entanto, em sua forma nativa, apresenta limitações tecnológicas, o que leva à necessidade de modificações químicas, físicas ou enzimáticas para aprimorar suas propriedades. Essas modificações visam melhorar características como gelificação, retrogradação, formação de géis, estabilidade térmica e poder emulsificante, tornando o amido mais versátil e adequado para diferentes aplicações, especialmente nas indústrias alimentícia e química. Uma das fontes de amido não convencionais que precisa ser estudada mais profundamente, por apresentar um alto valor deste polissacarídeo, é a araruta (*Maranta arundinacea L.*). Nesse contexto, o ozônio surge como um agente oxidante capaz de promover alterações nessas propriedades, contribuindo

para a obtenção de amidos com características funcionais diferenciadas (Silveira, 2016; Pereira, 2014).

Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação de ozônio na qualidade da farinha de trigo comercial, do amido de araruta e dos pães elaborados com farinhas de trigo ozonizadas, estudar o impacto de diferentes tempos de tratamento com ozônio e diferentes quantidades de amostra no reator nas propriedades físicas e reológicas da farinha de trigo e nas propriedades físicas do amido de araruta.

2 CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ozônio

O ozônio (O_3) se apresenta como uma estrutura composta por três átomos de oxigênio. A sua estrutura é formada pela dissociação de moléculas de oxigênio (O_2), que geram radicais livres altamente reativos. Estes radicais interagem com as outras moléculas de oxigênio presentes dando origem ao O_3 (Ribeiro, 2016). Quimicamente, o ozônio é o resultado de um rearranjo atômico da exposição de moléculas de oxigênio a descargas elétricas com alta voltagem (Tiwari *et al.*, 2008).

Segundo Mansas *et al.* (2020), a capacidade do ozônio de reagir com compostos eletrofílicos ou nucleofílicos se deve ao deslocamento eletrônico entre as três moléculas de oxigênio que o compõem. Este fato permite maior mobilidade molecular ao ozônio. A reatividade do ozônio resulta de sua estrutura molecular única.

A palavra “ozônio”, do grego “ozein”, quer dizer “aquilo que cheira”, destacando seu odor forte e característico, podendo ser percebido pelo olfato humano em concentrações que variam entre 0,002 e 0,004 ppm (Ribeiro, 2016).

Na natureza, o O_3 é constituído em níveis baixos, na camada da estratosfera, é formado pela ação da radiação UV proveniente dos raios solares no oxigênio. Uma parcela pequena é gerada na troposfera, originária das reações fotoquímicas que acontecem entre hidrocarbonetos, oxigênio e nitrogênio resultantes da atividade humana, vulcânica ou pelas florestas (Maciel, 2022).

Industrialmente, a geração de ozônio é realizada a partir do ar ou oxigênio puro em câmaras de descarga elétrica. Deste modo, o oxigênio molecular é separado em dois átomos de oxigênio altamente reativos que, quando encontram O_2 , juntam-se formando uma molécula O_3 , consideravelmente instável. Devido a sua instabilidade, o O_3 é degradado de forma rápida, liberando um átomo de oxigênio livre ($O\bullet$), que pode se juntar com outro átomo de oxigênio livre formando O_2 ou pode também se combinar com outras moléculas químicas, com o intuito de ocasionar oxidação. Este oxigênio livre é o que confere ao ozônio seu poder oxidante, se apresentando como sua principal característica, fazendo com que ele seja um excelente agente desinfetante e sanitizante para indústrias, inclusive, para a indústria alimentícia (Yan *et al.*, 2020; Prabha *et al.*, 2015).

2.2 Histórico

Desde o seu descobrimento, o ozônio foi e vem sendo objeto de diversas pesquisas que permitem o desenvolvimento de experimentos e aparelhos que melhoram e expandem as suas formas de aplicação (Montenegro, 2021). Os primeiros indícios tratando de ozônio são de 1783 quando Marum, um físico holandês, pôde observar uma descarga elétrica no ar, por meio da sua máquina de eletrostática e foi observado também um odor intenso bastante característico (Amorim, 2011). Guzel-Seydim, Greene e Seydim (2004), afirmam que o ozônio foi descoberto pelo pesquisador europeu Christian Friedrich Schönbein no ano de 1839. Já em 1888, Charles A. Fewson publicou uma patente americana, onde foi apresentado um sistema de ozonização para desodorizar gases de esgoto. Em 1902, na Alemanha, Siemens e Halske produziram a primeira planta geradora de ozônio, sendo utilizada para tratamento de água (Amorim, 2011). Em 1906, começou-se a utilizar a desinfecção de água de abastecimento com ozônio, na França (Graham, 1997).

Nos Estados Unidos, o ozônio foi primeiramente utilizado para remover íons de ferro, manganês, odores, sabores e corantes da água e produtos alimentícios. Desde o ano de 1933, diferentes estudos foram realizados com diversas fontes alimentícias como maçã, tomate, batata, morango, pêra, brócolis, laranjas, uvas, pêssegos, milho e soja. Em 1940, instalou-se a primeira estação de tratamento de água com ozonização contínua (Souza, 2016). E em 1953, descobriu-se que o ar contendo ozônio sob baixa pressão era mais satisfatório que o dióxido de enxofre para esterilizar contêineres vazios para alimentos, por este motivo iniciou seu uso em garrafas de vidro na Suíça em 1956 (Amorim, 2011).

No ano de 1997, o ozônio foi autorizado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos para utilização no tratamento de água de resfriamento reciclada. Um ano depois, um painel técnico, classificou-o como uma substância Geralmente Reconhecida como Segura (GRAS) para uso como sanitizante para alimentos, apenas se usado conforme as boas práticas de fabricação (Mostafidi *et al.*, 2020; Guzel-Seydim; Greene; Seydim, 2004). Por fim, em 2000, o ozônio foi aprovado pela Food and Drug Administration (FDA) para ser utilizado como um agente antimicrobiano para o processamento, tratamento e estocagem de alimentos, permitindo seu uso em qualquer uma das fases: aquosa e gasosa (FDA, 2001). Desta forma, o ozônio ganhou espaço na indústria de alimentos e processadores de sucos comerciais da Europa e Estados Unidos, sendo utilizado para a pasteurização do produto (Tiwari *et al.*, 2008), o que sucedeu na publicação de um guia de recomendações às indústrias que processam sucos com a utilização de ozônio, pela FDA, em 2004 (FDA, 2004).

2.3 Propriedades do Ozônio

O ozônio é um gás de coloração azulada em temperatura ambiente, no entanto, em concentrações usadas nas desinfecções apresenta-se incolor (Cardoso *et al.*, 2003). O potencial de oxidação do ozônio é de -2,07V (Kim, Yousef, e Dave, 1999). Depois do fluor, o ozônio é o agente oxidante mais poderoso, sendo ainda 1,5 vezes mais potente que o cloro (Ferreira, 2014). O ozônio não forma subprodutos halogenados com a matéria orgânica, como é o caso do cloro, porém, é possível a formação de outros subprodutos orgânicos e inorgânicos (Lapolli *et al.*, 2003). Apesar de apresentar benefícios, o ozônio também pode reagir e oxidar compostos orgânicos, causando efeitos nocivos no trato respiratório, isto quando ele está presente no ar poluído (Braidly *et al.*, 2018).

De acordo com Graham (1997), o ozônio é levemente solúvel em água e exibe uma característica única de auto decomposição, produzindo diversas espécies de radical livre, principalmente, o radical hidroxila (OH^\cdot), neste contexto, a produção deste radical é maior com o aumento da temperatura e do pH do meio reativo. O pH elevado interfere na decomposição do ozônio, acontecendo a formação de diferentes compostos oxidantes, exibindo reatividades diferentes (Di Bernardo; Dantas, 2005; Lapolli *et al.*, 2003). Outras variáveis importantes como a radiação UV e/ou a presença de catalisadores à base de paládio, manganês e óxido de níquel, metais, óxidos de metais, hidróxidos e peróxidos, aceleram a decomposição do ozônio (Lapolli *et al.*, 2003).

A solubilidade do ozônio em água diminui de acordo com o aumento da temperatura (Ribeiro, 2016), a mesma relação é observada com relação à decomposição do ozônio. Quando o ozônio se apresenta menos solúvel e menos estável, a sua taxa de reação com o substrato aumenta. É importante salientarmos que a pureza da água afeta consideravelmente a taxa de solubilização do ozônio, as duas grandezas são diretamente proporcionais (Amorim, 2011). O ozônio possui uma poderosa ação oxidante e seu potencial de desinfecção é capaz de destruir ligações duplas em compostos orgânicos, gerando produtos simples de baixo peso molecular (Chandravarnan; Agyei; Ali, 2022).

O O_3 é relativamente instável em soluções aquosas decompondo-se ininterruptamente em oxigênio (Khadre; Yousef; Kim, 2001). Por este motivo, é necessário que ele seja produzido no seu local de aplicação, diminuindo desta forma, gastos e perigos relacionados, como por exemplo, o transporte e a estocagem (Bortolotto, 2014). O ozônio entra em auto decomposição, não permitindo com que permaneçam resíduos nos alimentos (Amorim, 2011).

O ozônio é encontrado em estado líquido na temperatura de $-111,9^{\circ}\text{C}$ e sólido em $-192,7^{\circ}\text{C}$. Já em temperatura ambiente, a substância se mantém na forma de um gás instável que, se degrada com facilidade, apesar de apresentar um tempo de meia-vida maior no estado gasoso do que em solução aquosa. Sendo de aproximadamente 30 min, dissolvido em água a uma temperatura menor que 20°C e pH neutro. Entretanto, com o aumento da temperatura para 25°C e 30°C , a meia-vida do ozônio é de 15 e 8 min, respectivamente (MKS instruments, 2004). No entanto, alguns autores já mencionaram uma meia-vida de 165 min. E na fase gasosa, o ozônio mostra-se mais estável, apresentando uma meia-vida no ar atmosférico, medida pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, sendo de 12 h (Di Bernardo; Dantas, 2005; Vidal, 2003). Suas propriedades físico-químicas são: massa molar de $48,0\text{ g/mol}$, solubilidade em água a 0°C de 20 g/m^3 , e a 30°C de $1,5\text{ g/m}^3$, ponto de ebulição de $-111,9^{\circ}\text{C}$, ponto de fusão de $-192,5^{\circ}\text{C}$, (Silva *et al.*, 2011).

A molécula de ozônio pode agir como um agente eletrofílico, dipolo ou como um agente nucleofílico. As reações com ozônio molecular são excessivamente seletivas e restritas aos componentes aromáticos insaturados e alifáticos assim como aos grupos funcionais específicos. Os mecanismos de ação do ozônio competem pelo substrato, sendo este o composto a ser oxidado. Devido à característica e seletividade, mínimas doses de ozônio geram grande efeito sobre determinadas etapas no sistema de tratamento de águas e efluentes. Já as reações indiretas ocorrem rapidamente e de forma não seletiva, a hidroxilação normalmente se segue da abertura do ciclo aromático, formando aldeídos, cetonas e ácidos (Vidal, 2003).

2.4 Papel do ozônio na decomposição de compostos

O ozônio, além de reagir com microorganismos, também reage com outros compostos em ambientes ricos em matéria orgânica. A água utilizada em processamento de alimentos costumeiramente possui substâncias orgânicas e inorgânicas oxidáveis, podendo reagir com o ozônio, diminuindo assim a sua meia vida. A efetividade do ozônio depende, em sua maior parte, da concentração residual do que da quantidade de ozônio utilizada. Subprodutos não desejáveis da reação do ozônio com compostos orgânicos podem interferir negativamente na vida de prateleira, mudando a qualidade sensorial ou afetando a segurança do produto (Amorim, 2011).

A oxidação de grupos sulfidrilas, que são consideráveis em quantidade nas enzimas microbianas, pode explicar a rápida inativação de microorganismos por ozônio. A

oxidação causada pelo ozônio pode levar à saída de componentes celulares e possivelmente causar lise, causando também rapidamente a morte da célula, inativação enzimática e redução da atividade de transcrição do DNA (Khadre; Yousef e Kim, 2001).

Em comparação com outros agentes oxidantes, o ozônio apresenta o benefício de ser reconhecido como uma “tecnologia ambientalmente amigável” em relação à sua produção e aplicação, devido ao fato dele se dissociar em oxigênio e não deixar resíduos nos alimentos. No entanto, a característica de rápida dissociação tem relação com a grande instabilidade do ozônio em estado gasoso (Maciel, 2022).

Uma das suas principais e significantes propriedades é o produto de degradação do ozônio, um produto não poluente e que não gera resíduos, o oxigênio, ou eliminação de recipientes de produtos químicos. Deste modo, seu uso torna-se atraente no controle de insetos e fungos em grãos armazenados, e ainda não forma metabólitos nocivos à saúde humana e animal (Ferreira, 2014).

A utilização do ozônio na diminuição de micotoxinas e agrotóxicos pode levar à formação de subprodutos das reações de degradação, resultante da ozonólise. Entretanto, a toxicidade de uma quantidade significativa destes, tem sido reduzida quando comparada ao composto original. O ozônio pode degradar completamente o composto ou provocar modificações químicas, diminuindo assim sua atividade biológica, isto só dependerá da estrutura química a ser degradada (Diao *et al.*, 2013).

O uso da ozonização é vantajoso para indústria de alimentos, uma vez que não deixa resíduos, é internacionalmente aprovada para uso em alimentos (Furtado, 2017), e traz benefícios para os consumidores através dos produtos.

2.5 Áreas de aplicação do ozônio

É importante salientar que uma das principais funções do ozônio é sua capacidade de formar uma camada protetora na estratosfera, atuando como um escudo contra os raios ultravioletas, os quais são prejudiciais aos organismos vivos (González-Arias; Horta-Rangel, 2017). O seu uso no tratamento de água, indo de piscinas até água para consumo, não é novidade, mas com o alcance da tecnologia também pode ser utilizado na sanitização e remoção de agrotóxicos das superfícies dos alimentos, na esterilização e remoção de odores de ambientes reduzidos, na desinfecção dos objetos, na remoção de mofo de superfícies, na higiene pessoal e das roupas, bem como na produção do óleo ozonizado, aplicado pela área da saúde (Montenegro, 2021).

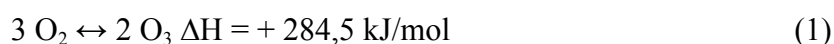
Em relação a seu uso como desinfetante, acontece de diferentes maneiras. A utilização em materiais clínicos é uma das diversas. Um estudo realizado por Zanzarini (2019) comprovou a eficiência do gás na desinfecção de bisturis elétricos. Há ainda pesquisas que mostram o ozônio sendo uma alternativa no tratamento de patologias de origem infecciosa, inflamatória e isquêmica, atuando como desinfetante atóxico e indolor em feridas abertas. (Santiago; Gomes, 2019). Outra utilização bastante difundida é nos alimentos. O efeito do ozônio traz benefícios, aumentando a vida útil dos alimentos, contribuindo assim para a logística também no agronegócio.

O uso de ozônio tem sido bastante utilizado na descontaminação de alimentos como frutas, vegetais frescos, sucos, farinhas e cereais. Bem como na aplicação para sanitização e desinfecção de equipamentos de processamentos de alimentos, superfícies e materiais de embalagem (Maciel, 2022). Também pode ser utilizado como coadjuvante no processamento de alimentos e bebidas, atuando na produção de sidra, na purificação e envelhecimento artificial de bebidas alcoólicas, como vinhos e destilados, bem como agente desinfetante e controlando o odor (Souza, 2016). O ozônio pode ser utilizado de diversas maneiras, indo do uso em laboratório até aplicações industriais (Ferreira, 2014).

2.6 Geração de ozônio

Para que aconteça a geração do gás ozônio, necessita-se a quebra da ligação O-O, e para isso precisa-se de uma quantidade significativa de energia (Souza, 2016).

A reação global para geração do ozônio a partir do oxigênio pode ser descrita de acordo com Furtado (2017) pela Equação 1:



Ela se apresenta como endotérmica e não é espontânea ($\Delta G = + 161,3 \text{ kJ/mol}$), é explicada porque o ozônio não se gera pela ativação térmica do oxigênio, pois o mesmo se decompõe de forma rápida quando aquecido (Vidal, 2003).

Existem dois sistemas de geração de ozônio: um a partir do ar e outro por meio do oxigênio puro. Para que o ar seja utilizado, necessita-se um pré-tratamento (filtração, compressão, resfriamento e desumidificação). A produção utilizando de oxigênio puro tem um maior rendimento, exigindo assim a alimentação do gerador com um tanque de oxigênio

líquido acompanhado de um evaporador, sendo uma desvantagem em relação ao custo (Souza, 2016).

Por conta da pequena quantidade obtida naturalmente, o ser humano passou a testar maneiras que possibilitasse sua produção de forma artificial e controlada, por isto que, além do processo fotoquímico, apareceram outros métodos, como é o caso do processo térmico, processo eletroquímico, processo radioquímico, absorção de luz ultravioleta, descarga elétrica por geradores de ozônio e pelo processo corona, este último sendo o mais usado nas atividades industriais e comerciais (Yan *et al.*, 2020; Montenegro, 2021).

Quando se trata da utilização do ozônio em indústrias, ele é costumeiramente produzido no ponto de aplicação em sistemas fechados. Uma opção são as lâmpadas UV (188 nm) (Amorim, 2011), porém, quando a finalidade é alcançar concentrações maiores, a técnica de descarga elétrica por efeito corona é habitualmente empregada. Esta última compreende em dispor duas placas planas, sendo dois eletrodos, submetidos à diferença de potencial alta (próxima de 1000 V) (Bortolotto, 2014), ou seja, um de alta, outro de baixa tensão, separadas por um material dielétrico, podendo ser vidro, cerâmica ou outro material, e um intervalo pequeno entre elas. Ao se aplicar uma corrente alternada de alta voltagem por meio do intervalo de descarga, onde passa o ar seco, acontece a excitação dos elétrons e, conseqüentemente, a ruptura das moléculas de oxigênio. Estas moléculas de oxigênio se juntam com outros átomos de oxigênio, formando ozônio (Graham, 1997; Guzel-Seydim; Greene; Seydim, 2004). O gás ozônio é obtido através do ar ou do oxigênio puro utilizando geradores de ozônio (Benato; Sigrist; Rocha, 2005).

2.7 Processo de Ozonização

A ozonização aparece como uma tecnologia emergente não térmica atuando em diferentes matrizes alimentícias, degradando compostos e amenizando efeitos de toxicidade (Maciel, 2022). Esta tecnologia tem apresentado interessantes resultados na área alimentícia, atuando na conservação e processamento de alimentos. Entretanto, é importante citar que a ozonização de alimentos, com o intuito de melhorar a qualidade, pode causar efeitos indesejáveis, podendo afetar as propriedades tecnológicas do alimento, promovendo a degradação oxidativa dos constituintes químicos, desenvolvendo aromas e sabores indesejáveis, provocando perda de cor, e descaracterizando a qualidade nutricional e sensorial do produto (Trombete, 2016).

O uso de ozônio depende de vários fatores para que aconteça de maneira eficaz. Alguns exemplos são: o tempo de exposição ao ozônio, a forma como é aplicado, a concentração, o teor de umidade do alimento, dentre outros. São várias as reações envolvidas na ozonização, podendo acontecer simultaneamente por dois mecanismos distintos:

1- Reação indireta: onde a decomposição acontece por meio da reação em cadeia que resulta na produção de radicais livres hidroxila;

2- Reação direta: por meio de reações seletivas com as substâncias presentes na matriz. Na reação direta, o ozônio molecular pode agir como um agente eletrofílico, nucleofílico ou como um dipolo em razão de sua estrutura molecular (Maciel, 2022).

Segundo O'Donnell *et al.* (2012), um sistema de ozonização completo é composto por um concentrador de oxigênio ou tratamento de ar, um gerador de ozônio, um controlador de ozônio dissolvido com medidores de vácuo, pressão e vazão, um injetor de ozônio/água, tanque de contato e saída de gás, uma bomba de reforço e linhas para entrada de água e saída de água contendo ozônio e uma quebra de vácuo para prevenção de refluxo. A qualidade do gás que alimenta um gerador de ozônio é um aspecto altamente importante, principalmente se a produção acontecer através de descarga de corona. O ar atmosférico contém substâncias, sendo elas gases de hidrocarbonetos, nitrogênio, vapor d'água e alguns contaminantes. Quando o ozônio entra em contato com tais compostos, ele reage com rapidez, promovendo a incrustação de superfícies dielétricas, diminuindo o desempenho e consequentemente aumentando a necessidade de manutenção do equipamento. Por fim, o ozônio ainda pode ser aplicado na fase gasosa diretamente no alimento, ou também pode ser borbulhado em água, originando a água ozonizada.

2.8 Ozonização em Alimentos

A influência da ozonização na qualidade de grãos de trigo quando expostos a diferentes valores de concentração de ozônio, tempo de exposição e massa de grãos foi estudada por Trombete (2016). Pode-se observar que a ozonização influenciou positivamente ($p < 0,05$) a tenacidade e o número de quedas da farinha obtida a partir dos grãos ozonizados. O estudo apresentou que a ozonização gasosa não causa impacto negativo na qualidade dos grãos de trigo.

Em um estudo realizado por Ibanoglu (2001), foi observado que durante a lavagem de grãos de trigo com água ozonizada ($1,5 \text{ mg.L}^{-1}$), o ozônio desapareceu completamente da água depois de 40 min, não deixando resíduos. Cavalcante (2007), ao sanitizar alface americana com água ozonizada ($1,0 \text{ mg.L}^{-1}$), pôde observar que não houve diminuição da concentração de ozônio na água, até 20 min, no entanto ao decorrer de 60 min, o ozônio foi parcialmente consumido pela matéria orgânica.

Sandhu *et al.* (2012) relataram sobre a utilização de O_3 em farinha de trigo. Afirmaram que a concentração de 1500 mg.kg^{-1} por 45 min, promove a despolimerização das amilopectinas de alto peso molecular, e conseqüentemente aumento em polímeros de baixo peso, podendo ser útil quando o foco são farinhas de baixa viscosidade, alta claridade e baixa estabilidade térmica. O aroma indesejável após o processamento é uma característica que a ozonização pode causar, isso acontece por causa da formação de compostos voláteis de baixo peso molecular. É importante saber que a aeração da farinha ou o armazenamento com ar circulando pode eliminar de maneira rápida e fácil essa característica (Trombete, 2016).

Sabendo-se que o Brasil é um dos países que mais faz uso de agrotóxicos na produção agrícola, veio com este fato a importância de procurar meios promissores para sanitizar e higienizar alimentos que se utilizam de agrotóxicos, pensando na saúde dos consumidores (Montenegro, 2021). Então ozônio aparece como uma nova tecnologia realizando este papel de remoção, pois a sua utilização em frutas, legumes e hortaliças, quando administrado em concentrações certas, possibilita a degradação dos resíduos de agrotóxicos em um curto período (Lozowicka *et al.*, 2016). É válido dizer que para esta finalidade, a utilização do ozônio não altera a qualidade nutricional e sensorial do alimento (Jafari; Therdthai, 2022).

Uma pesquisa realizada por Heleno (2013) utilizou morangos contaminados com difenoconazol e foram colocados em contato com o gás ozônio, nas concentrações de 0,3, 0,6 e $0,8 \text{ mg.L}^{-1}$, durante uma hora. Os tratamentos com ozônio reduziram até 95% os resíduos de difenoconazol nos morangos. Os frutos foram monitorados durante o armazenamento a 4°C por 10 dias. Algumas características como diferença total de cor, pH e perda de massa não foram significativamente ($p < 0,05$) alterados. A ozonização influenciou significativamente ($p < 0,05$) nos parâmetros acidez titulável, sólidos solúveis e ácido ascórbico, evitando a queda acentuada dessas características durante o tempo observado. Nesta pesquisa foi avaliada a remoção de clorotalonil de amostras de uva pela imersão das frutas em água destilada com ozônio. Pôde-se observar a remoção de 60% do clorotalonil da casca e da polpa das uvas,

independente da concentração de ozônio. Entretanto, a qualidade dos frutos armazenados foi afetada com o tratamento.

As micotoxinas em alimentos são um problema de saúde pública, podendo causar efeitos negativos à saúde devido a sua toxicidade, dentre esses a citotoxicidade, carcinogenicidade, genotoxicidade teratogenicidade e imunotoxicidade (Stoev, 2015). As principais micotoxinas relacionadas com contaminação de alimentos são as aflatoxinas, zearalenona, fumonisinas, citrinina, patulina, desoxinivalenol, ocratoxina A1 e outros tricotecenos (ROCHA *et al.*, 2014). Elas se destacam por fazerem parte de um dos grupos de toxinas de maior relevância ambiental e a forma B1 apresenta maior potencial tóxico nesse grupo, com alta atividade hepatocarcinogênica e imunossupressora (Magnussen, 2013).

Para prevenir a formação de micotoxinas, o O₃ é utilizado em baixas concentrações. Entretanto, para que aconteça a destruição das micotoxinas, é necessário o uso de altas concentrações (Feliziani *et al.*, 2014). Luo *et al.* (2014) pesquisaram a toxicidade dos produtos de degradação advindos da ozonização (AFB1 em milho), realizando o estudo e utilizando como modelo as células do carcinoma hepatocelular (HepG2). Os autores comprovaram que os efeitos causados pelo milho que sofreu ozonização não apresentaram diferença do milho não contaminado.

É importante lembrar que a eficiência do ozônio depende de diversos fatores, inclusive a sua concentração, as propriedades de cada alimento e os fatores do meio em que se encontram (Bortolotto, 2014).

Na Tabela 1 é possível observar alguns impactos da utilização do ozônio nas propriedades dos amidos e farinhas modificadas, de diferentes fontes alimentícias.

Alves (2019) avaliou aspectos microbiológicos e físico-químicos de morangos da variedade *Portola*, tratados com gás ozônio em concentrações diferentes e mantidos sob refrigeração durante 6 dias. As concentrações de ozônio utilizadas foram 0, 4, 9, 14 e 18 mg.L⁻¹, com uma vazão de 1,0 L.min⁻¹, na temperatura de 25 °C, durante 30 min. Em relação à qualidade microbiológica, observaram se havia a presença de *Salmonella* spp. e quantificaram coliformes totais, *Escherichia coli*, bolores, leveduras e mesófilos aeróbios. Já se tratando da qualidade físico-química, foram avaliadas a perda de massa, acidez total titulável, sólidos solúveis totais, a correlação entre os dois, pH, e a coloração dos frutos. Não foi detectada a presença de *Salmonella* spp. nos frutos submetidos ou não ao tratamento com ozônio. Em relação à *Escherichia coli*, a contagem foi inferior ao limite de detecção. A contagem de coliformes totais nos frutos foi ínfima e irregular, não permitindo saber a capacidade do ozônio de inativar microrganismos desse grupo. A ozonização mostrou-se eficiente no

controle de bolores e de leveduras, e de mesófilos aeróbios em morangos, e não alterou negativamente a qualidade físico-química dos morangos. Entretanto, os frutos ozonizados apresentaram menor perda de massa, quanto maior foi a concentração de exposição ao gás.

Tabela 1 – Impactos do ozônio nas propriedades de amidos e farinhas modificadas.

Fonte alimentícia	Resultado da aplicação de ozônio	Referências
Quinoa	Diminuição da amilose, pH e cristalinidade relativa; Aumento do teor de carboxila/ carbonila, claridade da pasta e capacidade de absorção de óleo; despolimerização da amilose; aumento significativo no diâmetro médio das partículas de amido; modificação branda dos grânulos de amido; aumento na temperatura de início da gelatinização; viscosidade aparente, pseudoplasticidade e índice de consistência.	Ramos (2019)
Trigo	Diminuição da tendência de retrogradação; redução significativa nos valores dos parâmetros de colagem; diminuição do pico de viscosidade (<i>PV</i>); aumento dos coeficientes de consistência (<i>K</i>); maior comportamento de afinamento.	Çatal; Ibanoglu (2014)
Trigo	Aumento apenas na tenacidade e no número de quedas da farinha. Peso do hectolitro, extração da farinha, valores de glúten, força, extensibilidade da massa, composição química, mineral e características sensoriais e colorimétricas não apresentaram diferença significativa.	Trombete (2016)
Trigo	Aumento no tempo de desenvolvimento, a estabilidade térmica e de cozimento e o pico de torque da farinha.	Li <i>et al.</i> (2012)
Batata	Melhoria nas propriedades de pasta e na textura dos géis.	Castanha; Matta Júnior; Augusto (2017)

Arroz	Aumento na viscosidade e textura de géis.	Ibanoglu; Ozaslan; Ibanoglu (2018)
--------------	---	---

Fonte: Autora

Maciel (2022) buscou determinar o tempo necessário para a saturação e modelar a cinética de decomposição do gás ozônio na farinha de trigo. Onde a circunstância do ozônio se decompor rapidamente faz com que não se deixe resíduos nos alimentos, tornando-se bastante interessante para a implementação dessa nova tecnologia em diversos setores alimentícios.

2.9 Limitações do uso do ozônio

Apesar de a ozonização ser uma tecnologia com potencial e mais complexa que outras alternativas desinfetantes, por causa das características do ozônio, a ozonização apresenta certas limitações. Sabendo que o ozônio é altamente reativo, é necessário o uso de materiais resistentes à corrosão, como é o caso do aço inoxidável, uma vez que o ozônio se apresenta reativo com a borracha natural, sendo exposto por longos períodos. Além do mais, se for usado e manipulado de forma errada e em altas concentrações, o gás ozônio pode ser tóxico e irritante, por este motivo o seu excesso no ambiente precisa ser destruído impedindo assim o contato com as pessoas. E é por conta do seu potencial tóxico que há a necessidade de formular determinadas restrições para o seu uso em áreas públicas (ANVISA, 2020).

Os efeitos adversos do ozônio são amplamente conhecidos e estudados. Então, segundo a EPA (2016), a exposição primária acontece quando as pessoas respiram o ar ambiente que contém ozônio. Na exposição a curto prazo, sendo de até 8 h, o ozônio pode causar e manifestar lesões pulmonares, irritação na garganta, tosse, queimação, dor ou mesmo desconforto no peito ao respirar profundamente, chiado, sensação de aperto no peito e dispnéia. Deste modo, é importante salientar que é sempre necessário fazer o uso do ozônio de forma planejada e correta, obedecendo às quantidades e formas de uso recomendadas (Montenegro, 2021).

No Brasil, a Norma Regulamentadora nº 15, Portaria nº 3.214/78 do Ministério de Estado do Trabalho, determina que o limite de exposição ao ozônio pelos trabalhadores seja de 0,08 ppm para uma jornada de trabalho de 48 horas semanais (BRASIL, 1978). À

temperatura ambiente, o ozônio pode ser percebido em concentrações de 0,01 a 0,02 ppm, logo, pode ser identificado pelos trabalhadores antes que chegue a uma concentração de risco. Mesmo em críticas concentrações, os efeitos imediatos do ozônio não são tóxicos, apenas sintomáticos. Por este motivo, é necessária a presença de um detector de ozônio em ampla faixa de concentração (Bortolotto, 2014).

2.10 Farinha de trigo

O segundo cereal mais cultivado do mundo é o trigo (USDA, 2020), no Brasil, só em 2020 foram produzidas 6,23 milhões de toneladas de trigo mole. O país importou ainda 6,6 milhões de toneladas. Isso tudo devido ao alto consumo per capita (57 kg por ano) (ABITRIGO, 2018). Esta produção e o consumo são quase exclusivos do trigo mole (*Triticum aestivum*), a utilização do trigo duro (*Triticum durum*) é praticamente limitada. A finalidade industrial do trigo é definida pelas propriedades reológicas que definem a qualidade tecnológica da farinha. A viscoelasticidade e qualidade proteica do trigo fazem dele a matéria-prima para a produção de massas, bolos, macarrão e pães (Santos *et al.*, 2022; Verdú *et al.*, 2017).

A maior parte da produção de trigo é destinada à fabricação de farinha, que posteriormente é aplicada na produção de pães, bolos, massas e biscoitos. No Brasil, a produção está mais aplicada à indústria de panificação (46,9%), seguido pelo uso doméstico (18,7%), e o restante sendo consumido pela indústria de massas (17,9%), biscoitos (11,9%) e outros (4,5%) (ABITRIGO, 2020).

É possível observar que os consumidores estão exigindo produtos que os satisfaça em todos os pontos, especialmente em relação à garantia de qualidade. Um produto que tem ganhado destaque, por conta da sua gama de utilização é a farinha de trigo, esta também se torna interessante por ser dividida em farinha comum e integral (Lanzarini *et al.*, 2020).

O processamento da farinha de trigo cresceu com o aperfeiçoamento da tecnologia de moagem. O que acarretou na diminuição do valor nutricional deste produto, embora as características sensoriais da farinha de trigo de alta precisão tenham sido melhoradas (Zhang *et al.*, 2023).

As propriedades tecnológicas da farinha são definidas pela sua composição química, pela vulnerabilidade de alguns ingredientes à transformação bioquímica, e pelo entrosamento entre os ingredientes da massa (Piechowiak; Józefczyk; Balawejder, 2018). É

por meio do amassamento da farinha de trigo que se forma a massa com propriedades viscoelásticas, esta característica atende às necessidades de processamento de vários alimentos, sendo o glúten o principal elemento estrutural da massa de trigo (Singh e Macrutchie, 2001).

Os principais componentes do glúten são a gliadina e a glutenina (Wang; Jin e Xu, 2015). Estas, sob a influência de hidratação e cisalhamento, se interligam através de dissulfeto, se ligando para formar uma enorme estrutura de rede de glúten. As gliadinas possuem forte viscosidade e extensibilidade, e a glutenina detém forte elasticidade, mas não apresenta extensibilidade. O glúten é uma junção macromolecular formado por subunidades de glúten de baixo e alto peso molecular que podem construir ligações dissulfeto intra e intermoleculares. Sua mistura torna o glúten fibroso e favorável à agregação (Kontogiorgos, 2011).

O principal componente da massa é o amido e é um elemento chave na determinação da qualidade dos produtos à base de farinha. A interação entre macromoléculas biológicas, como as proteínas e o amido nestes produtos têm um impacto considerável na microestrutura, características de textura, propriedades reológicas e características de cozimento do sistema de massa (Larsson *et al.*, 2000). Esta função importante do amido na qualidade do grão e desempenho da massa ocorre por meio da sua estrutura interna, interação amido-glúten e propriedades físicas e químicas. Estas últimas e a estabilidade da massa são influenciadas pela distribuição do tamanho das partículas do próprio amido (Cao *et al.*, 2019). Ademais, a quantidade de amilose e o comprimento das cadeias de amilopectina do amido no trigo podem afetar o envelhecimento do pão (Inokuma *et al.*, 2016).

As enzimas presentes na farinha são as principais responsáveis pela taxa de transformação dos ingredientes durante o armazenamento da farinha, produção, fermentação da massa e cozimento do pão. As enzimas, que influenciam na definição da qualidade da farinha, pertencem principalmente à classe das oxidoredutase e das hidrolases, como as amilases, lipases e proteases (Piechowiak; Józefczyk; Balawejder, 2018).

É imprescindível a realização de análises laboratoriais para determinação das características físico-químicas e reológicas em farinhas de trigo, devido à grande diversidade de genótipos deste cereal (Lanzarini *et al.*, 2020). Os métodos mais utilizados relacionam-se com a reologia da massa, por meio de uma mistura simples de água e farinha, servindo para a definição da finalidade da farinha (Caldeira *et al.*, 2003).

Para realização da análise da reologia da massa pode utilizar a análise do número de queda. Esta comprova a presença da enzima α -amilase, apresentando indícios das possíveis

características finais de um pão. Outro método é a análise da força do glúten, definido pelo aparelho alveógrafo, indicando as curvas de extensão, demonstrando a força da farinha (ICTA, 2017). Outras análises importantes que determinam a qualidade, estão relacionadas com os métodos físico-químicos, sendo elas, análise de cinzas, análise de umidade e análise de cor (Lanzarini *et al.*, 2020).

Após o conjunto de análises mencionadas é que a farinha pode ser utilizada. Pois os resultados satisfatórios resultarão em produtos de boa qualidade feitos a partir desta farinha (Lanzarini *et al.*, 2020).

Quando se trata de panificação, a farinha deve apresentar características específicas. Sendo elas, alta capacidade de absorção de água, glúten de força média a forte, boa tolerância ao amassamento e alto teor de proteínas, produzindo de maneira uniforme um produto atrativo, a um custo competitivo (Rao e Rao, 1993).

A hidrólise do amido causa a formação de açúcares fermentescíveis que produzem gás e formam compostos que conferem sabor durante a fermentação da massa. Deste modo, o pão feito com farinha de trigo apresenta um grande volume e uma estrutura esponjosa (Piechowiak; Józefczyk; Balawejder, 2018).

2.11 Araruta

A Araruta ‘Comum’ (*Maranta arundinacea L.*) pertence à família *Marantaceae* sendo uma planta com ampla faixa de distribuição geográfica, desde o Nordeste até o Sul do país (Brasil, 2010). Esta é considerada uma hortaliça não convencional. Ela já foi tradicionalmente consumida pela população brasileira, mas entrou em desuso nos últimos 50 anos (Vieira *et al.*, 2015), exceto em algumas regiões do interior do estado de São Paulo (Ranieri; Zanirato, 2021), e Amazonas, que ainda utilizam a planta como fonte alimentar (Gonçalves, 2017). A Araruta possui rizomas, que são caules que crescem dentro da terra e acumulam reservas de amido para formar uma nova planta (Coelho *et al.*, 2005), ricos em amido de boa digestibilidade, não contém glúten (Silveira *et al.*, 2013) e deles se extrai uma fécula fina e limpa (Costa *et al.*, 2022).

Por apresentar alta capacidade de formar uma matriz contínua, em comparação com os demais polissacarídeos, o amido é o que apresenta maior potencialidade, apresentando ainda abundância e baixo custo (Sartori e Menegalli, 2016). Apesar da diversidade de matéria-prima para obtenção, é possível que haja escassez de amidos comuns, como milho, batata e trigo, para aplicações industriais no futuro, devido ao crescimento populacional, é por

este motivo que a busca por novas fontes naturais de amido tem sido incentivada. E uma dessas fontes, são os rizomas da araruta, eles não apresentam importância socioeconômica em muitos países e, portanto, não são considerados matéria-prima de alta prioridade (Gordillo, Valência, Zapata e Henao, 2014).

Silveira, Tavares e Silva (2013) relataram que os índios extraíam o amido de araruta, e o utilizavam para engrossar sopas que serviam no tratamento da diarreia. Também era usado para fortificar parturientes e para purificar o sangue de idosos. O amido é recomendado para pessoas que apresentam debilidade orgânica e para crianças de 6 a 8 meses, por ser um alimento restaurador de energia.

Coelho *et al.* (2005) relatam que os índios também usavam farinha e polvilho, obtido a partir do rizoma da araruta, para fazer beijus. Com o passar dos anos, o polvilho foi introduzido na culinária tradicional brasileira na forma de biscoitos e bolos leves. É válido salientar que o polvilho de araruta é muito fino e delicado, comparado ao polvilho de mandioca ou do milho, ele se apresentando muito mais leve, dando aos biscoitos produzidos com o polvilho de araruta, a característica de se dissolver na boca.

A araruta vem atraindo interesses das indústrias que produzem amido no Brasil, uma vez que apresenta aplicações diferenciadas no preparo de produtos alimentícios. Os rizomas desta planta tem usos culinários (Kinupp e Lorenzi, 2014), a fécula pode ser usada para várias receitas simples, sendo recomendada na dieta de pessoas com restrições alimentares ao glúten (Silveira *et al.*, 2013). Pode também contribuir para dietas hipocalóricas e vegetarianas, pois apresenta um baixo teor de calorias. A planta pode ainda ser utilizada para fins medicinais devido a sua alta composição nutricional, minimizando febres, dores de estômago e atuando como laxante para crianças (Coelho *et al.*, 2005).

O amido de araruta tem grande potencial para substituir os amidos convencionais, pois pode agir como hidrocolóide, agente espessante e gelificante, bem como agente encapsulante e de revestimento e embalagens de alimentos (Nogueira *et al.*, 2018). Além de apresentar características físico-químicas especiais, como alto teor de amilose (variou de 16 a 27%) (Moorthy, 2002), o que é desejável para a produção de filmes com boas propriedades funcionais (Fakhoury *et al.*, 2012).

De acordo com Harmayani *et al.* (2011), a composição nutricional da fécula de araruta é: amilose (25,9 %), água (11,9 %), fibra insolúvel (8,7 %) e fibra solúvel (5,0 %), gordura (0,84 %), cinzas (0,58 %) e proteína (0,14 %).

Souza *et al.* (2019) afirmam que o uso do amido de araruta é uma alternativa bastante viável para utilização no processamento industrial. Fernandes e Nascimento (2020),

dizem que este amido pode atuar como substituto de gordura em alimentos, sendo utilizado também na formulação de alguns cosméticos, na produção de embalagens biodegradáveis de alimentos e como agente de encapsulamento em produtos farmacêuticos e gastronômicos. O amido de araruta também pode ser adicionado em outros produtos, como biscoitos, bolos, cremes, doces, mingaus, sopas, como constituinte de chocolate e outros confeitados finos (Silveira, Tavares e Silva, 2013). Na panificação, por exemplo, este amido fornece alimentos adequados para crianças, idosos ou pacientes com distúrbios intestinais (Nogueira *et al.*, 2020).

Silveira, Tavares e Silva (2013) concluíram que a araruta é rentável. No trabalho de Abrão (2019) a produtividade da araruta foi de 18,62 Mg.ha⁻¹, e R\$ 32.398,80 e R\$ 9.512,77 de renda bruta e líquida respectivamente. Já Moreno *et al.* (2017) observaram que a produtividade dos rizomas é de 32,92 t.ha⁻¹, sendo produtividade da planta de 33,41 t.ha⁻¹ e renda bruta de R\$ 36.751,00.

Segundo Lima *et al.* (2019), a solubilidade do amido de araruta em leite foi maior do que em água e o índice de absorção foi maior em leite, sendo confirmado o potencial do amido aplicado em alimentos à base de leite, como os panificados. Os autores observaram também que quanto maior foi a concentração de amido de araruta, maior foi a sua capacidade de formação de gel.

A araruta comum é produto com baixa perecibilidade, seus rizomas não se degradam tão rapidamente, o que torna possível o transporte ou armazenamento por um período maior de tempo (Souza *et al.*, 2016). Apresenta boa capacidade de gelatinização a temperatura elevada (61 - 85,8 °C) (Hoover, 2001), alto teor de amilose (16% - 27%) e controle de difração de raios X do tipo B ou C (PEPE *et al.*, 2016; GUTIÉRREZ *et al.*, 2018). Logo, este amido possui potencial para aplicação em alimentos.

2.12 Pão

Registros históricos apontam que o pão já era produzido em civilizações antigas, como Grécia, Egito, Babilônia e Roma, em épocas anteriores ao nascimento de Cristo. Nos dias de hoje, ele continua sendo um dos alimentos mais consumidos globalmente (Teixeira *et al.*, 2020). O pão é um alimento essencial na dieta de diversas culturas ao redor do mundo, sendo elaborado a partir de trigo ou de outros cereais (Ferreira *et al.*, 2020).

As massas utilizadas na produção de pães são classificadas como fluidos viscoelásticos, devido à combinação de características de sólidos, como a elasticidade, e de

líquidos, como a plasticidade. Por isso, o pão é considerado uma espuma instável, elástica e sólida, composta por uma fase contínua formada por uma rede de proteínas responsáveis pela formação do glúten, interligadas a moléculas poliméricas de amido, principalmente amilose (Gray e Bemiller, 2003).

As características do pão e de outros produtos fermentados estão diretamente ligadas à formação da rede de glúten. Essa estrutura não apenas facilita a retenção do gás gerado durante a fermentação, mas também contribui para o desenvolvimento da estrutura celular do miolo. Após o cozimento, essa estrutura proporciona uma textura e atributos sensoriais únicos, diferenciando esses produtos de outros itens assados (Cauvain e Young, 2009). O glúten é o principal responsável por conferir à massa propriedades como extensibilidade, elasticidade, viscosidade e capacidade de reter gás, além de influenciar diretamente na aparência e na estrutura do miolo dos pães (Capriles; Arêas, 2011).

De acordo com Kent (1987), o pão de forma, após ser assado, apresenta um miolo de textura macia e poros finos. Esse pão deve exibir características específicas de aparência, como massa cozida, simetria, cor, aroma e sabor. A cor da casca externa superior deve ser dourada ou amarelada, natural e uniforme. A espessura da crosta deve variar entre 1 a 2 mm. O miolo deve ter uma cor uniforme branco-creme, ser poroso, leve, homogêneo e elástico, sem aderir aos dedos quando pressionado. Um pão de forma de boa qualidade possui um miolo consistente, com textura macia, aveludada, sedosa e elástica. Miolos frágeis ou com muitos buracos podem ser resultado de falhas na formulação e no processamento, como excesso de melhoradores, mistura inadequada, massa muito dura, moldagem mal executada ou fermentação incorreta (Ferreira; Oliveira; Pretto, 2001).

As principais características que definem uma boa massa são a capacidade de reter o dióxido de carbono gerado durante a fermentação e o equilíbrio adequado entre as forças de elasticidade e extensibilidade. Essas propriedades possibilitam que o pão se expanda corretamente e mantenha sua forma arredondada nas primeiras fases do cozimento (Cauvain e Young, 2009).

A qualidade de um produto de panificação não deve ser atribuída exclusivamente à deterioração microbiológica, pois fatores como a perda de umidade durante o armazenamento, a retrogradação do amido, o endurecimento do miolo e outras formas de deterioração também contribuem para a redução da aceitabilidade do produto (Cauvain e Young, 2009). A qualidade de um produto de panificação envolve diversos aspectos, entre os quais se destacam: a perda de peso após o forneamento, o volume, a densidade, a textura do

miolo e da crosta, as características estruturais do miolo e a estabilidade da cor (Zambelli, 2015).

Com o objetivo de minimizar os problemas na panificação, o desenvolvimento de tecnologias para esse setor tem se tornado cada vez mais comum. (Pariza; Johnson, 2001). Para garantir boas qualidades sensoriais e otimizar a formação da rede de glúten, a indústria de panificação utiliza melhoradores de farinha. Dentre esses, os agentes oxidantes são fundamentais, pois agem diretamente sobre a estrutura das proteínas do glúten, fortalecendo a rede por meio da formação de ligações dissulfídicas (Lopes *et al.*, 2007). De acordo com a legislação (Brasil, 2005), diversas substâncias podem ser adicionadas à mistura para tratar a farinha de trigo, com o objetivo de torná-la mais adequada para a panificação. Entre essas substâncias estão as enzimas amilases e proteolíticas, amaciadores, agentes branqueadores e oxidantes.

3 CAPÍTULO II - AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA OZONIZAÇÃO NA QUALIDADE DA FARINHA DE TRIGO E SUA INFLUÊNCIA NA PRODUÇÃO DE PÃES

3.1 INTRODUÇÃO

A Instrução Normativa (IN) nº 8 de 2005 diz que a farinha de trigo é o produto elaborado com grãos de trigo (*Triticum aestivum L.*) ou outras espécies de trigo do gênero *Triticum*, ou ainda combinações por meio de trituração ou moagem e outras tecnologias ou processos. Este regulamento técnico estabelece também os requisitos da farinha de trigo, sendo eles, apresentar-se limpa, seca e isenta de odores ou sabores estranhos ou impróprios ao produto (Brasil, 2005).

Esta mesma IN contém a classificação da farinha de trigo: a farinha de trigo tipo 1 é considerada mais pura por apresentar teor de cinzas máximo de 0,8%, este tipo também mostra um teor de proteína mínimo de 7,5%. Já a farinha de trigo tipo 2, apresenta teor de cinzas máximo de 1,5% e de proteína mínimo de 8,0%. E a farinha de trigo integral, deve conter um teor de cinzas máximo de 2,5% e um teor de proteína mínimo de 8,0% (Brasil, 2005).

Estudos mostram que o processo de ozonização tanto dos grãos de trigo quanto da farinha resulta em um produto de melhor qualidade do ponto de vista tecnológico e comercial. Com a expansão da ozonização no trigo, seu efeito nas propriedades da farinha vem ganhando atenção (Zhu, 2018). A aplicação de ozônio pode causar alterações nas propriedades da massa e de alimentos à base de farinha, porém o efeito varia de acordo com o tipo de trigo e a

condição do tratamento (Li *et al.*, 2015; Chittrakorn *et al.*, 2014). Acredita-se que as mudanças nas propriedades da farinha causadas pelo ozônio tenham correlação com a mudança estrutural da proteína e do amido (Gozé *et al.*, 2017).

A panificação é possivelmente uma das práticas mais antigas da humanidade, remontando a períodos anteriores aos primeiros registros históricos. Os vestígios mais antigos do pão datam de milhares de anos antes de Cristo, quando era produzido a partir de bolotas de carvalho e faia trituradas, posteriormente lavadas em água fervente para eliminar o amargor. A variedade de pães existente resulta das diferentes combinações de farinhas, fermentos e métodos de cocção utilizados (Bezerra *et al.*, 2006).

Por definição, o pão é um alimento elaborado a partir de farinha de trigo e/ou outras farinhas, misturadas a líquidos, que pode passar por fermentação ou não, sendo posteriormente assado. Além disso, é possível incluir outros ingredientes, desde que não alterem sua essência. O produto pode variar em cobertura, recheio, formato e textura (Brasil, 2005). Já a classificação "pão de forma" refere-se ao pão assado em moldes, caracterizado por miolo uniforme e elástico, com poros pequenos, além de uma crosta fina e macia (Brasil, 2000).

O pão é tradicionalmente feito com farinha de trigo, água, levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) e sal. Entretanto, outros ingredientes podem ser adicionados em proporções variadas para aprimorar tanto o processamento da massa quanto às características do produto final. Entre esses aditivos estão emulsificantes, enzimas, agentes oxidantes, reguladores de acidez, entre outros (Cauvain e Young, 2009). Neste trabalho foi utilizado o agente oxidante gás ozônio. Geralmente os agentes oxidantes mais usados na panificação são: ácido ascórbico, azodicarbonamida e bromato de potássio (Rosell *et al.*, 2003), eles reagem de forma similar, mas, seus efeitos são diferentes, considerando o estágio em que cada um reage durante o processo de fabricação do pão (Rasiah *et al.*, 2005; Tilley *et al.*, 2001). O amido caracteriza-se como um polissacarídeo natural, biodegradável, amplamente disponível e facilmente obtido (Cazón *et al.*, 2017). É a reserva mais importante de nutrição de todos os vegetais superiores, disponível principalmente em sementes, tubérculos, rizomas e bulbos. Fornece ainda 70 a 80% das calorias consumidas pelo homem e é composto principalmente por dois polímeros, a amilose e a amilopectina, sendo responsáveis pela funcionalidade e organização física do amido (Hemamalini e Dev, 2018).

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Ozonização da farinha de trigo

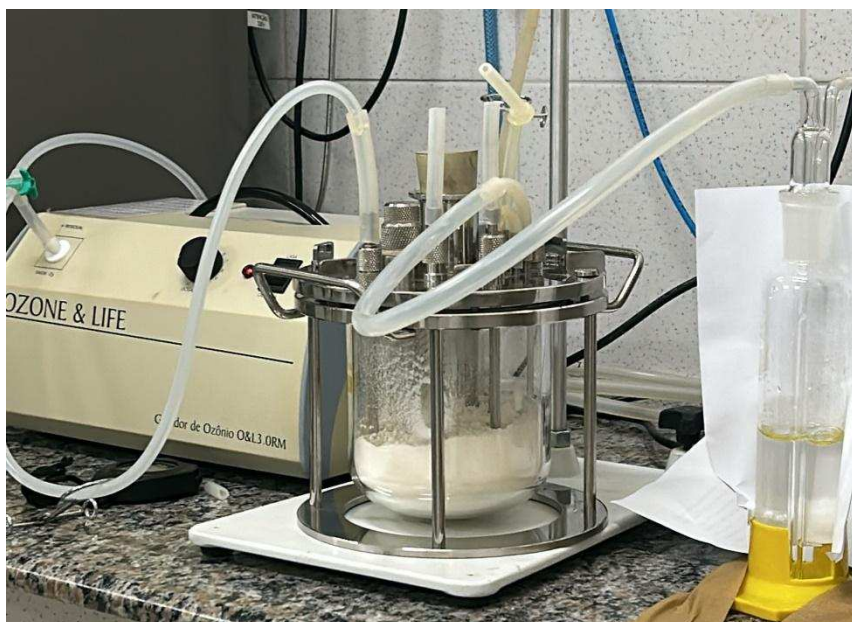
As farinhas de trigo foram obtidas por meio de doação por uma empresa localizada na cidade de Aquiraz-CE. Em seguida foram transportadas para o Laboratório de Biotecnologia, localizado no Departamento de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Ceará, onde foram divididas e distribuídas aleatoriamente em níveis, sendo o primeiro deles o controle, ou seja, sem adição de tratamento (T_0), e os demais tratamentos variando o tempo e a quantidade em gramas de produto dentro do reator. Os níveis utilizados foram definidos a partir de pré-testes realizados no reator (Figura 1), e no sistema de ozonização (Figura 2), uma vez que alguns aspectos operacionais inviabilizam a aplicação de determinados níveis de vazão. O interior do reator em questão é formado por espirais de aço inoxidável, onde apresentam furos distribuídos uniformemente para que a amostra seja ozonizada por completo.

Figura 1 – Reator utilizado na ozonização da farinha de trigo



Fonte: Autora (2024).

Figura 2 – Sistema de ozonização na farinha de trigo



Fonte: Autora (2024).

Após os testes realizados, foi feito um Delineamento Composto Central (Tabela 2) no programa Statistica 10.0, para otimização dos tratamentos. A farinha de trigo foi tratada no Laboratório de Biotecnologia (LABIOTEC), do Departamento de Engenharia de Alimentos (DEAL) da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde foi tratado variando o tempo e a quantidade em gramas de amido dentro do reator para estas amostras. Posteriormente, as análises foram realizadas no Laboratório de Controle de Qualidade e Secagem de Alimentos (Poder de Inchamento e Índice de Absorção), Laboratório de Biomateriais Alimentícios (cor e análises dos pães), Laboratório de Cereais (umidade, glúten seco e úmido, farinografia, amido danificado e *falling number*), Central Analítica da Química e do Departamento de Física (MEV e FTIR) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Tabela 2 – Delineamento Composto Central das farinhas de trigo.

Ensaio	Massa (g)	Tempo (min)
1	300,00	20,00
2	600,00	20,00
3	300,00	40,00
4	600,00	40,00
5	450,00	20,00
6	450,00	40,00
7	300,00	30,00
8	600,00	30,00
9	450,00	30,00
10	450,00	30,00
11	450,00	30,00

Fonte: Autora (2024).

3.2.2 Tratamento com ozônio

O ozônio foi produzido a partir de um gerador de ozônio da marca Ozontechnik (Modelo Ozonic Medic AA), baseado no método por efeito corona, sendo utilizado oxigênio comercial com grau de pureza de 99,5% como gás de alimentação. O reator utilizado foi desenvolvido para operação em batelada da seguinte forma: O reator foi alimentado por meio de uma mangueira de silicone que sai do gerador de ozônio, o gás remanescente do reator foi coletado por outra mangueira de silicone que desta vez sai do reator e é levado para um lavador de gás, onde continha iodeto de potássio, este, por sua vez, continha uma mangueira acoplada a um destruidor de ozônio. A carga de ozônio que as amostras receberam esteve de acordo com a Equação 2:

$$\text{Carga de ozônio (mg/min)} = C * c.$$

(2)

Onde:

C = Concentração de ozônio em mg.L⁻¹.

c = Concentração em L.min⁻¹ recebidos no reator (de acordo com a posição de recebimento de O₂ no ozonizador).

É importante ressaltar que para o tratamento da farinha de trigo, o dosador esteve na posição 1, logo, a farinha de trigo recebeu 22,35 mg de O₃.min⁻¹.

3.2.3 Análises da farinha de trigo

3.2.3.1 Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR)

A análise de espectroscopia de infravermelho foi realizada em um espectrômetro Agilent modelo Cary 630, em uma faixa de varredura de 400 a 4000 cm⁻¹

3.2.3.2 Poder de Inchamento e Índice de absorção em água

Os parâmetros de poder de inchamento e índice de absorção em água foram obtidos conforme metodologia descrita por Bae *et al.* (2014), com modificações. Então, 0,5 g da amostra foi misturada com 30 mL de água à temperatura ambiente (25 °C), durante 30 min. Em seguida, foi centrifugada a 3000 rpm durante 20 min e o sobrenadante foi seco em estufa a 105 °C por duas h. A análise foi realizada em triplicata. Os parâmetros foram calculados de acordo com as equações 3 e 4.

$$\text{Poder de Inchamento} = \frac{\text{Peso do sedimento úmido}}{[\text{Peso da amostra seca} \times (\frac{1-SA\%}{100})]}$$

(3)

$$\text{Índice de absorção de água(IAA)} = \frac{\text{Peso do sedimento úmido}}{\text{Peso da amostra seca}}$$

(4)

3.2.3.3 Umidade

A análise de umidade foi realizada segundo o proposto por Lins (2021) no determinador de umidade Ohaus (Estados Unidos). Desta forma, foram pesados 10 g de farinha de trigo e aquecido à temperatura de 130 °C por 10 min. Ao fim da análise o resultado foi apresentado em porcentagem no visor do equipamento.

3.2.3.4 Glúten Úmido e Glúten Seco

A análise de teor de glúten foi realizada no Sistema Determinador de Glúten (Glutomatic, Centrífuga e Glutork) da marca Perten (Estados Unidos). Então, 10 g de farinha de trigo foram pesados, misturados em câmara, em duplicata, e adicionado 4,8 mL de solução NaCl a 2% na amostra, e foram acoplados ao Glutomatic (Estados Unidos) para iniciar a lavagem. Terminado a lavagem, as amostras foram transferidas para peneiras metálicas e levadas para a centrífuga, onde foram centrifugadas por 1 min. Após a centrifugação foi raspado e pesado o glúten que atravessou a peneira e, em seguida, todo o glúten úmido resultante da lavagem (retido + passante), o qual resultou no valor do glúten úmido (GU). Ao término da pesagem, o glúten úmido foi comprimido e secado no Glutork durante 4 minutos. Ao final da secagem, a amostra foi pesada, dando o valor do Glúten seco (GS) (Lins, 2021). Para o cálculo do percentual de glúten úmido e glúten na base 14% de umidade são utilizadas as equações 5 e 6.

$$\% \text{Glúten úmido} = \frac{GU \cdot 860}{100 - U}$$

(5)

$$\% \text{Glúten seco} = \frac{GS \cdot 860}{100 - U}$$

(6)

3.2.3.5 Falling Number

O número de queda foi obtido segundo o proposto por Lins (2021) através do equipamento de *Falling Number* (Perten, Estados Unidos). Em uma balança analítica foi

pesado 7 g de farinha de trigo em dois tubos viscosimétricos e adicionado 25 mL de água destilada, sendo agitados para homogeneização. Logo após, foram introduzidas as agulhas nos tubos e acoplados ao equipamento. Então o sensor detectou os tubos e agulhas, e iniciou a contagem de tempo em que as agulhas levaram do topo até atingir o fundo. O resultado foi dado em segundos.

3.2.3.6 Farinografia

A análise de farinografia foi realizada no Farinógrafo (Brabender, Alemanha). Antes do início da análise, os dados da amostra foram adicionados ao formulário, como o nome da amostra, a umidade e o tempo de análise. Depois de adicionada a umidade, o *software* Brabender Farinograph version 4.2.1 indicou a quantidade de farinha a ser colocada no equipamento para realização da análise. A amostra de farinha de trigo foi adicionada à masseira e adicionada água a 30 °C, a quantidade de água adicionada variou de acordo com a umidade de cada amostra, indicada pelo *software*, assim como ocorreu com a quantidade de farinha. Ao final dos 20 min de análise, o resultado foi expresso em um gráfico o qual mostrou informações sobre tempo de desenvolvimento da massa, estabilidade, índice de tolerância à mistura e absorção de água (Lins, 2021).

As especificações da farinha de acordo com cada categoria de produtos que será utilizada são dadas da seguinte forma: Absorção de água para massas (60-64%), pães (>55%), biscoitos fermentados e biscoitos doces (< 55%), desenvolvimento para massas (8-13 min), pães (4-9min), bolos(1-2 min), biscoitos fermentados (3-6 min), biscoitos doces (1-3 min), estabilidade para massas (> 15 min), pães (12-18 min), bolos (2-4 min), biscoitos fermentados (6-12 min) e biscoitos doces (2-4 min) (ICTA, 2013).

3.2.3.7 Amido Danificado

De acordo com o método AACC 76-33.01 (AACC, 2010), foi preparada uma solução composta por 120 mL de água destilada, 3 g de ácido bórico, 3 g de iodeto de potássio e 1 gota de tiosulfato de sódio. Esta solução foi colocada no recipiente de reação. Cerca de 1 g de farinha foi colocado em um suporte plástico inserido no instrumento SDMatic (Chopin, França). A solução foi aquecida a 35 °C e o instrumento vibrou automaticamente para carregar a amostra na solução. Os valores de amido danificado foram registrados após aproximadamente 10 min e exibidos no visor do equipamento.

3.2.4 Produção de pães

A produção dos pães tipo forma foi realizada com base em uma formulação controle, com adaptações, utilizada por Gragnani (2010) e adaptada por Zambelli (2014). Os ingredientes foram adquiridos no comércio local da cidade de Fortaleza-CE, com exceção da farinha de trigo. A formulação utilizada está na Tabela 3.

Tabela 3 – Formulação controle de pão tipo forma.

Ingredientes (%)	
Farinha de trigo	100,00
Fermento biológico seco	3,30
Gordura vegetal hidrogenada	3,00
Açúcar	15,00
Sal	2,00

Fonte: Zambelli (2014).

Os ingredientes foram pesados em balança semi-analítica separadamente. Para a produção dos pães, foi aplicado o método direto, onde todos os ingredientes são colocados simultaneamente no início da etapa de mistura, com exceção do sal e da água. Foram homogeneizados em masseira de escala semi-industrial LIEME-BP 06 durante 1 min em baixa velocidade, em seguida foi adicionado sal e logo em seguida foi se adicionando a água aos poucos, até a massa ficar homogênea.

As massas foram divididas em porções de aproximadamente 250 g e moldadas na forma de elipses manualmente. Foram colocadas em formas de folha galvanizada de ferro de chapa única para pão de forma sem tampa com dimensões de fundo de 13,5 cm x 6,0 cm e dimensão da parte superior de 15,0 cm x 7,5 cm x 4,5 cm.

Logo em seguida, as massas foram colocadas em câmara de fermentação regulada a uma temperatura de $28\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante duas horas. Ao final da fermentação, os pães foram assados sem vapor durante 20 min a temperatura de $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ em forno elétrico.

3.2.5 Análises de qualidade das massas e dos pães

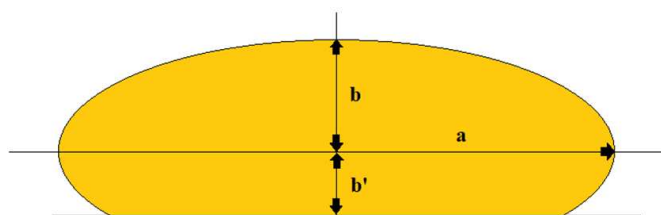
3.2.5.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise de microscopia eletrônica de varredura foi realizada para avaliar a microestrutura do pão produzido, bem como observar a superfície da rede do glúten e dos grânulos de amido. Foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura da marca INSPECT S50. As amostras foram armazenadas em sílica gel por 12 h. Foram utilizados 15 kV e aumento progressivo de 1.500x (Trombete, 2016).

3.2.5.2 Avaliação do processo de fermentação

A expansão das massas durante o processo de fermentação foi obtida por meio do procedimento experimental de Perfil Livre de Expansão adotado por Gabric *et al.* (2011), com adaptações, onde as massas foram consideradas como elipses truncadas (Figura 3). Foram medidas, a cada 10 min, as dimensões de altura e comprimento das massas com o auxílio de régua milimetrada simples. Para a avaliação do Perfil Livre de Expansão, as massas foram colocadas em fôrmas de alumínio com dimensões de 30 cm x 20 cm para permitir a sua livre expansão sem restrições dimensionais.

Figura 3 - Parâmetros de elipse truncada



Fonte: Gabric *et al.* (2011).

O volume das massas para cada tempo de medição foi calculado com base na fórmula da elipse e sua rotação em torno do eixo y, conforme demonstra a Equação 7.

$$V_{(cm^3)} = V_{(cm^3)} = \pi a \left(\frac{2b}{3} + b' - \frac{b^3}{3b'^2} \right).$$

(7)

Onde:

a = largura da elipse (cm);

b = altura da elipse – do centro para a parte superior (cm);

b' = altura da elipse – do centro para a parte inferior (cm)

O fator de expansão do volume (cm³) – VEF foi calculado através da Equação 8.

$$VEF = \frac{V-V_o}{V_o}.$$

(8)

Onde: V = Volume da massa ao longo do tempo de fermentação (cm³);

V_o = Volume inicial da massa (cm³).

3.2.5.3 Volume Específico

O volume deslocado dos pães foi medido através de preenchimento de recipiente plástico e transparente (Bécker) com semente de painço. Parte das sementes foi substituída pela amostra de pão e o volume completado até a borda, onde realizou-se o nivelamento com auxílio de régua metálica. As sementes remanescentes, correspondente ao volume deslocado pela amostra, foram colocadas em proveta graduada de 1000 ml, expressando o resultado em mL.

O volume específico foi calculado pela divisão do volume deslocado do pão (mL) pela sua massa (g), segundo método n° 72-10 da AACC (2000).

3.2.5.4 Índice de Expansão

Para o cálculo do índice de expansão foi utilizada a metodologia de Silva, Garcia e Ferreira (2003) para pão de queijo, com adaptações, e aplicada para o cálculo do índice de expansão para pães tipo forma por Zambelli (2014). As massas foram moldadas na forma esférica para permitir as medições do diâmetro e da altura, com auxílio de régua milimetrada simples. A análise foi realizada em triplicata. O Índice de Expansão dos pães foi calculado através da Equação 9:

$$\text{Índice de expansão} = \frac{\frac{D_p + H_p}{2}}{\frac{D_m + H_m}{2}} \quad (9)$$

Onde:

D_p = Diâmetro dos pães

H_p = Altura dos pães

D_m = Diâmetro das massas moldadas

H_m = Altura das massas moldadas

3.2.5.5 Volume das massas produzido durante a fermentação

Porções de massa de aproximadamente 15 g foram colocadas em provetas de 100 mL previamente esterilizadas para medição dos volumes das massas durante o processo de fermentação, que foi realizado por duas horas. Para o cálculo do volume produzido, utilizou-se a subtração entre o volume final produzido, após duas horas de fermentação, e o volume inicial das massas nas provetas. As medidas foram realizadas em triplicata e os resultados expressos em mL.

3.2.6 Análise Estatística

Os resultados das análises físico-químicas, reológicas, morfológicas e estruturais foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) e as médias, comparadas pelo teste de Tukey a um nível de 5% de significância. A análise estatística foi realizada com o auxílio do *software* Statistica 10.0. (Statsoft, Estados Unidos) O *software* também foi utilizado para realização dos gráficos de superfície de resposta e curvas de contorno a partir da coleta dos dados das variáveis dependentes no Delineamento Composto Central Rotacional. Foi utilizado ainda o *software* Excel 2010 (Microsoft, Estados Unidos) para plotagem de gráficos.

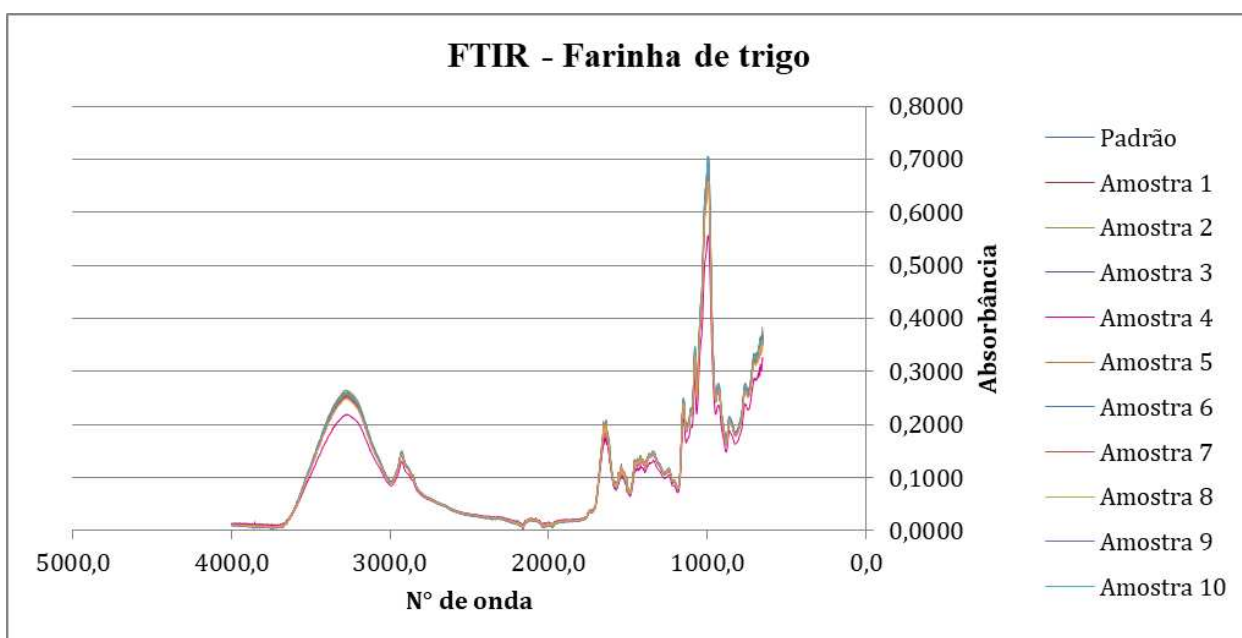
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO,

3.3.1 Análises da farinha de trigo

3.3.1.1 Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR) das farinhas de trigo

Os resultados para Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR) das farinhas de trigo estão apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Gráfico FTIR das farinhas de trigo



Fonte: Autora (2024).

Amostras: 1(300g/20min); 2(600g/20min); 3(300g/40min); 4(600g/40min); 5(450g/20min); 6(450g/40min); 7(300g/30min); 8(600g/30min); 9(450g/30min); 10(450g/30min); 11(450g/30min).

As amostras foram avaliadas para determinar a presença de grupos funcionais por meio de bandas, que explicam sua estrutura e para a verificação de possíveis alterações causadas pela ozonização. No gráfico acima demonstrado, o eixo x representa o número de onda (cm^{-1}), que está relacionado à energia da radiação infravermelha absorvida pelas moléculas da amostra. No eixo y, está sendo representada a absorbância, que indica a quantidade de radiação infravermelha que foi absorvida pela amostra em cada número de

onda. Quanto maior a absorbância, maior a concentração do grupo funcional correspondente. Os picos no gráfico correspondem às frequências nas quais as moléculas da amostra absorvem energia, vibrando de maneira característica.

Ao realizar uma análise da posição dos picos, é possível identificar a presença de grupos funcionais como carbonilas (C=O), hidroxilas (O-H) e amidas, que são característicos de biomoléculas presentes na farinha de trigo. A região de 3500-3200 cm^{-1} corresponde às vibrações de estiramento da ligação O-H, indicando a presença de grupos hidroxila, como nos álcoois e ácidos carboxílicos. Já a região de 3100-2800 cm^{-1} , corresponde às vibrações de estiramento da ligação C-H, indicando a presença de grupos metila e metileno. Na região de 1750-1650 cm^{-1} , às vibrações de estiramento da ligação C=O, indicando a presença de grupos carbonila, como em ésteres, ácidos carboxílicos e amidas. E na região de 1200-1000 cm^{-1} : corresponde às vibrações de estiramento de ligações C-O e C-N, indicando a presença de éteres, álcoois e amidas. Pode-se observar uma semelhança na estrutura em todas as concentrações em relação à amostra controle, no entanto, a amostra 4 foi a que apresentou os picos mais distantes em relação às outras amostras, sendo menor que as outras, a intensidade de 1022 cm^{-1} (corresponde à estrutura amorfa) diminuiu, implicando aumento da cristalinidade do amido (Soest *et al.*, 1995).

No estudo de Sandhu, Manthey e Simsek (2012) foi realizada a espectroscopia de absorção na região do infravermelho para a caracterização das farinhas. As amostras estudadas apresentaram as bandas referentes a deformações moleculares existentes nas moléculas de amido (3400 e 1650 cm^{-1}), atribuídas ao estiramento e a deformação angular de ligações -OH. Além dessas bandas, foi possível observar a banda próximo a 2926 cm^{-1} , atribuída à deformação axial de ligações C-H. As bandas na região 1200 a 1000 cm^{-1} , são consideradas bandas características do amido e são atribuídas a vibrações de deformação axial de C-O em álcoois e a vibrações de deformação axial do sistema O-C-O.

Já na pesquisa de Hu *et al.* (2022), o amido de trigo sarraceno modificado com ozônio foi analisado através de FTIR, onde se verificou a intensidade da transmitância de 3328, 2926, 1642 e 1157 cm^{-1} , que corresponderam respectivamente à vibração de alongamento O-H, vibração de alongamento C-H na unidade de glicose desidratada α -D-(+), vibração flexural de absorção de água na região amorfa do amido e vibração de alongamento C-O-C, todas mostraram uma tendência a aumentar inicialmente e depois diminuir com o prolongamento do tempo de tratamento com ozônio (Luo *et al.*, 2006). Em particular, a intensidade dos picos de banda em 995, 1047 cm^{-1} (corresponde à ordem molecular, cristalino

hidratado de polímeros de amido) aumentou, já a intensidade corresponde à estrutura amorfa diminuída, bem como no presente estudo.

3.3.1.2 Poder de Inchamento e Índice de absorção em água

Os resultados para o poder de inchamento e índice de absorção de água das farinhas de trigo são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Poder de Inchamento e Índice de Absorção em água da farinha de trigo.

Amostras	Índice de Absorção de água (%)	Poder de inchamento (g de água/g de farinha)
Controle	1,93 ^c ±0,04	1,85 ^a ±0,04
1	2,07 ^b ±0,02	2,09 ^b ±0,02
2	2,10 ^{deg} ±0,01	2,13 ^b ±0,03
3	2,23 ^a ±0,03	2,22 ^b ±0,03
4	2,09 ^{de} ±0,01	2,09 ^b ±0,02
5	2,18 ^{af} ±0,02	2,18 ^b ±0,01
6	1,99 ^c ±0,03	1,99 ^b ±0,01
7	2,02 ^{bc} ±0,02	2,00 ^b ±0,01
8	2,16 ^{fg} ±0,02	2,15 ^b ±0,02
9	2,14 ^{fg} ±0,04	2,11 ^b ±0,03
10	2,16 ^{fg} ±0,03	2,09 ^b ±0,03
11	2,16 ^{fg} ±0,01	2,10 ^b ±0,01

Fonte: Autora (2025).

Amostras: 1(300g/20min); 2(600g/20min); 3(300g/40min); 4(600g/40min); 5(450g/20min); 6(450g/40min); 7(300g/30min); 8(600g/30min); 9(450g/30min); 10(450g/30min) 11(450g/30min).

Cada valor representa a média e o desvio controle das repetições.

Valores com letras minúsculas diferentes em cada coluna representam diferença significativa ($p < 0,05$).

É possível observar um ligeiro aumento do índice de absorção e do poder de

inchamento em todas as amostras tratadas, em relação à amostra controle. Estando a amostra 3 (300g/40min), a mais distante da amostra controle em ambos os parâmetros. No entanto, em relação ao Poder de Inchamento, todas as amostras tratadas foram estatisticamente ($p < 0,05$) iguais, diferindo significativamente apenas da amostra controle. Já em relação ao Índice de Absorção, a amostra controle se apresentou estatisticamente igual à amostra 6 e 7 e diferente das demais amostras.

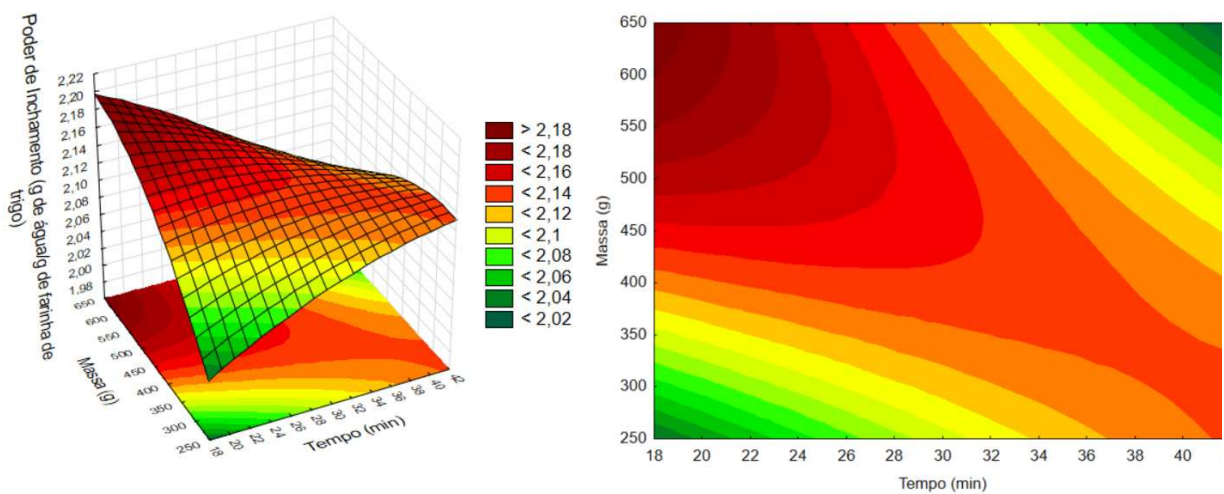
O poder de inchamento reflete a capacidade das proteínas (principalmente o glúten) e dos amidos presentes na farinha de absorverem água e expandirem, conferindo elasticidade, resistência e retenção de gases na massa, ou seja, farinhas com alto poder de inchamento geram massas mais expansíveis, que crescem bem durante a fermentação e assamento, resultando em pães mais volumosos, macios e com boa estrutura. Logo, as farinhas tratadas apresentaram melhores características para a utilização em pães, o que corrobora com o resultado do Fator de expansão, onde ao se utilizar o tempo de exposição de até 30 min, correlacionados com uma massa de farinha de até 450 g, este parâmetro apresentou aumento.

Este ligeiro aumento pode ser explicado pela oxidação do amido causada pelo ozônio (Sandhu, Manthey e Simsek, 2012). Os agentes oxidantes podem oxidar grupos hidroxila presentes nas posições C2, C3 e C6 na molécula de glicose em grupos carbonila e carboxila, e a introdução de grupos carboxila e carbonila pode aumentar o poder de inchamento e alterar as propriedades de colagem do amido (Sandhu *et al.*, 2012; Chan, Bhat e Karim, 2009). Portanto, o aumento no poder de inchamento dos amidos oxidados com ozônio tem correlação com a introdução de grupos carboxila hidrofílicos. As cargas negativas dos grupos carboxila se repelem, causando aumento do inchaço dos grânulos de amido durante o aquecimento em água (Kuakpetoon e Wang, 2001). Além disso, o aumento na absorção de água também pode ser devido às mudanças oxidativas e hidrolíticas nas proteínas (Obadi *et al.*, 2018).

Silva (2011) verificou o aumento da absorção de água da farinha de trigo ozonizada em todas as concentrações estudadas (0,54; 1,07; 1,61 e 2,14 mg.L⁻¹), quando comparada com a farinha controle. Este aumento é parcialmente atribuído à redução do teor de água da farinha ocasionada pela ozonização (Morita *et al.*, 2002; Hallen *et al.*, 2004). No entanto, a explicação mais aceita é que a oxidação dos componentes do glúten permite maior entrelaçamento da rede proteica, favorecendo a retenção de água (Hallen *et al.*, 2004; Azzeh *et al.*, 2009).

A influência da ozonização no Poder de Inchamento pode ser observada na Figura 5, onde podemos observar que quando houve mais farinha no reator (600 g), por um menor tempo (20 min), o Poder de Inchamento foi maior (2,18). No entanto, quando a quantidade de farinha no reator foi de 300 g e 600 g e o tempo foi de 20 min e 40 min, o poder de Inchamento foi menor ($< 2,08$). Em contrapartida, quando o tempo foi de 40 min e a massa de 300 g, o Poder de Inchamento subiu para $< 2,14$, mesmo nenhuma das amostras tendo apresentado diferença significativa ($p < 0,05$).

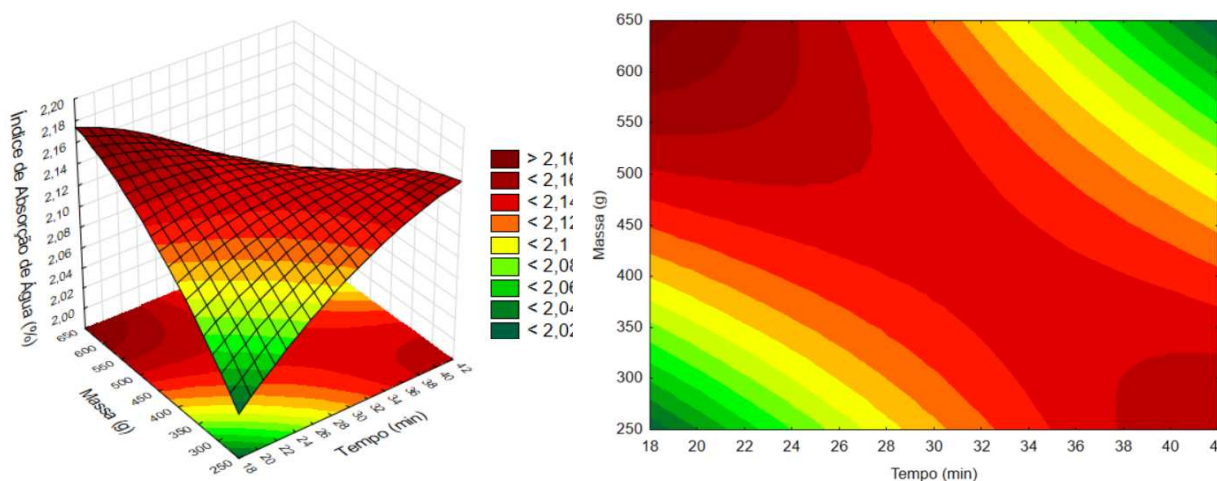
Figura 5 – Influência da ozonização no Poder de Inchamento das farinhas de trigo



Fonte: Autora (2025).

No Índice de Absorção, o gráfico de superfície de resposta e as curvas de contorno (Figura 6) se apresentam de maneira similar ao Poder de Inchamento em relação às extremidades (menor tempo e menor massa e maior tempo e maior massa), no entanto, no tempo de 40 min e massa de 300 g, o resultado foi próximo ao resultado da amostra que foi submetida a 20 min de tratamento e 600 g no reator.

Figura 6 – Influência da ozonização no Índice de Absorção das farinhas de trigo



Fonte: Autora (2025).

A absorção de água é uma propriedade fundamental do amido que influencia significativamente a sua funcionalidade em aplicações alimentares, particularmente no volume, na obtenção de consistência e na melhoria do desempenho de panificação. Na panificação, a capacidade de absorção de água do amido determina sua capacidade de inchar e gelatinizar durante o aquecimento, o que contribui para a viscosidade da massa, integridade estrutural e formação de migalhas (Rashwan *et al.*, 2024).

3.3.1.3 Umidade

Os resultados expressos na Tabela 5 mostram que todas as farinhas tratadas estão em conformidade com a norma técnica da legislação brasileira, que estabelece um teor máximo permitido de 15% (Brasil, 2005), portanto, todas as amostras se apresentaram dentro deste parâmetro, sendo a de maior valor, a amostra controle (14,08%). O alto teor de umidade pode acelerar o processo de deterioração, além de desencadear reações químicas, também acelera reações enzimáticas (Freo, 2011). No trabalho de Trombete, (2016), o autor também constatou uma diminuição da umidade nas amostras ozonizadas, em relação à amostra controle ($p < 0,05$). É possível observar que a amostra controle diferiu significativamente ($p < 0,05$) de todas as outras amostras, bem como as amostras 1, 2 e 4. Estando estatisticamente iguais às amostras 3, 5 e 6, 7 e 8, 9, 10 e 11.

Tabela 5 – Teor de umidade (%) das farinhas de trigo.

Amostras	Umidade (%)
Controle	14,08 ^a ±0,03
1	5,00 ^d ±0,05
2	13,51 ^b ±0,18
3	7,40 ^f ±0,05
4	7,75 ^c ±0,13
5	7,31 ^f ±0,06
6	7,46 ^f ±0,10
7	9,17 ^e ±0,02
8	9,31 ^e ±0,10
9	6,15 ^g ±0,13
10	6,26 ^g ±0,04
11	6,24 ^g ±0,03

Fonte: Autora (2025).

Amostras: 1(300g/20min); 2(600g/20min); 3(300g/40min); 4(600g/40min); 5(450g/20min); 6(450g/40min); 7(300g/30min); 8(600g/30min); 9(450g/30min); 10(450g/30min) 11(450g/30min).

Cada valor representa a média e o desvio controle das repetições.

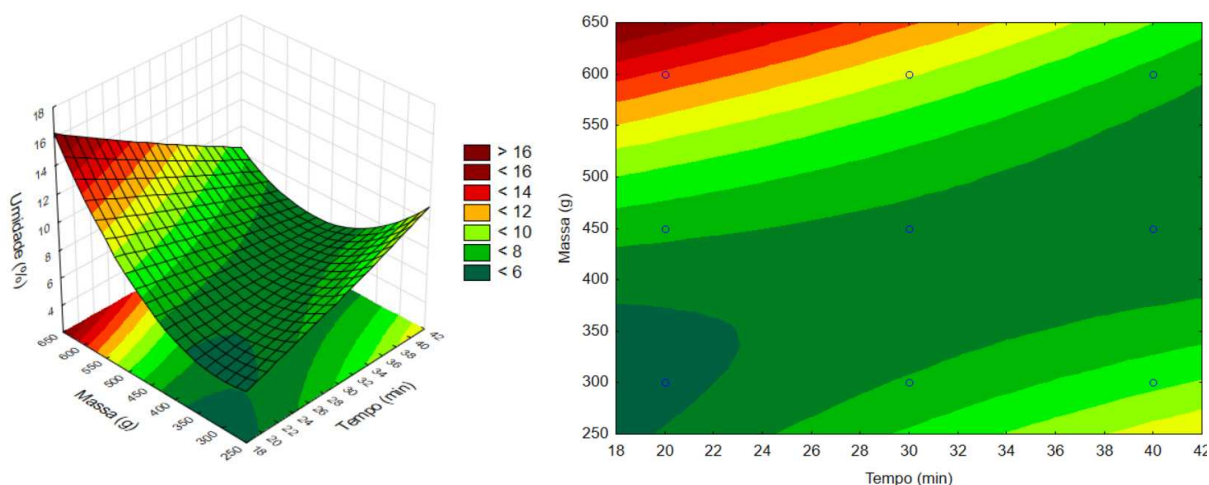
Valores com letras minúsculas diferentes em cada coluna representam diferença significativa ($p < 0,05$).

De acordo com Li *et al.*, (2013) foi observada uma significativa diminuição em relação à atividade de água nas farinhas tratadas com ozônio. Os autores relacionam esta diminuição à interação mais compacta de água e outros componentes internos causada pelo tratamento com ozônio. O que podemos verificar também com o aumento do poder de inchamento e do índice de absorção de água.

É possível observar também que algumas amostras reduziram o teor de umidade mais que outras. Sendo a amostra 1, a que apresentou menor teor de umidade (5,00 %±0,05), e dentre as tratadas, a amostra 2 foi a que apresentou maior teor (13,51 %±0,18).

É possível perceber a partir da Figura 7 que a maior influência da ozonização é observada onde teve o menor tempo de tratamento com menor quantidade de farinha no reator, no entanto, quando a massa no reator foi de até 450 g, a influência do ozônio na diminuição da umidade foi bem acentuada, independente do tempo de tratamento. Já quando a quantidade de farinha no reator foi de 600 g, o tempo de 40 min foi o que mais influenciou nesta diminuição.

Figura 7 - Influência da ozonização na umidade das farinhas de trigo



Fonte: Autora (2025).

3.3.1.4 Glúten úmido e glúten seco

Os resultados de glúten úmido e glúten seco das farinhas de trigo estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Teor de glúten seco e glúten úmido (%) das farinhas de trigo.

Amostras	Glúten úmido (%)	Glúten seco (%)
Controle	24,19 ^b ±0,23	8,27 ^a ±0,28
1	25,78 ^b ±0,64	9,68 ^{ac} ±0,85
2	24,35 ^b ±0,21	8,54 ^b ±0,18
3	27,72 ^a ±0,13	9,80 ^a ±0,2
4	24,82 ^b ±1,13	9,26 ^{abc} ±0,22

5	25,23 ^b ±0,60	8,87 ^{bc} ±0,09
6	24,66 ^b ±0,21	8,85 ^{bc} ±0,04
7	24,70 ^b ±0,27	8,95 ^{abc} ±0,09
8	25,94 ^b ±0,35	8,86 ^{bc} ±0,02
9	25,87 ^b ±1,15	9,51 ^{ac} ±0,42
10	25,80 ^b ±0,04	9,30 ^{abc} ±0,12
11	25,92 ^b ±0,04	9,15 ^{abc} ±0,12

Fonte: Autora (2025).

Amostras: 1(300g/20min); 2(600g/20min); 3(300g/40min); 4(600g/40min); 5(450g/20min); 6(450g/40min); 7(300g/30min); 8(600g/30min); 9(450g/30min); 10(450g/30min) 11(450g/30min).

Cada valor representa a média e o desvio controle das repetições.

Valores com letras minúsculas diferentes em cada coluna representam diferença significativa ($p < 0,05$).

É recomendado que a farinha de trigo apresente percentual de glúten úmido igual ou superior a 26%, e de 8,5% para glúten seco, para a fabricação de produtos panificáveis dentro dos padrões (Costa, 2018). Das amostras estudadas neste trabalho, apenas a amostra 3 (27,72±0,13) apresentou valor de glúten úmido acima de 26% e apenas a amostra controle (8,27±0,28) apresentou valor de glúten seco abaixo de 8,5%. As demais amostras variaram entre 24,19%±0,23 (controle) e 25,94%±0,35 (amostra 8) em relação ao valor de glúten úmido. Já em relação ao valor de glúten seco, as amostras tratadas variaram de 8,54±0,18 (amostra 2) até 9,80±0,20 (amostra 3). Logo, as farinhas tratadas mostraram valores maiores, tanto de glúten seco, quanto de glúten úmido, quando comparadas à farinha controle.

Apenas a amostra 3 diferiu significativamente ($p < 0,05$) de todas as amostras (incluindo a controle) em relação ao glúten úmido. Em relação ao glúten seco, a amostra controle diferiu significativamente das amostras 2, 5, 6 e 8.

No estudo de Paes (2011), os teores de glúten úmido e seco da farinha de trigo ozonizada apresentaram valores inferiores à farinha controle, no entanto, observou-se aumento do teor de glúten úmido com o período de exposição ao ozônio gasoso para as concentrações de 0,54 mg L até 12,8 h e de 1,07 mg L até 4,68 h de ozonização e do teor de glúten seco na concentração de 0,54 mg L até 13,17 h. É possível perceber que no presente estudo não foi preciso utilizar tempos de tratamento tão altos como o de Paes (2011) para que

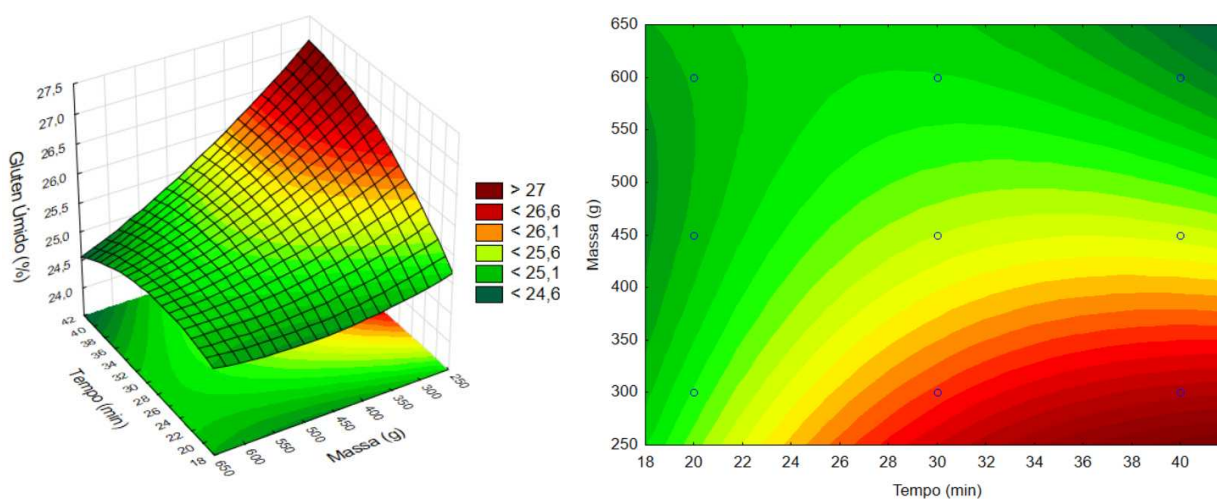
os resultados de glúten úmido e seco se apresentassem maior que da amostra controle, provavelmente pelo fato da concentração de ozônio utilizada neste trabalho ser maior.

A oxidação da estrutura protéica causada pelo gás ozônio promove o aumento da fração de proteína insolúvel da farinha de trigo, sendo esse aumento correlacionado com a redução das frações de glutenina solúveis, enquanto as outras frações protéicas se mantêm inalteradas (Desvignes *et al.*, 2008). Logo, o processo de ozonização proporciona um aumento da insolubilidade da glutenina, e, como consequência, o fortalecimento da rede de glúten (Desvignes *et al.*, 2008; Sandhu *et al.*, 2011).

Possivelmente, essa alteração na estrutura proteica deve ocorrer nas ligações dissulfídicas, devido à oxidação pelo gás ozônio dos grupos tiol dos resíduos de cisteínas ou de outras ligações covalentes causadas pela oxidação do aminoácido, com o aumento do período de exposição (Cataldo, 2003; Sandhu *et al.*, 2011). Segundo Sandhu *et al.* (2011), o aumento do período de exposição da farinha de trigo ao gás ozônio acarretou fortalecimento da estrutura da rede de glúten pelo aumento da fração proteica insolúvel.

A partir da Figura 8 podemos observar que a maior influência do ozônio ocorreu a partir de 30 min de tratamento, com uma massa de 300 g de farinha dentro do reator. Quando a massa foi de 450 g no reator, os tempos maiores (30 min e 45 min) também apresentaram influência no aumento do teor de glúten úmido.

Figura 8 – Influência da ozonização no teor de glúten úmido das farinhas de trigo

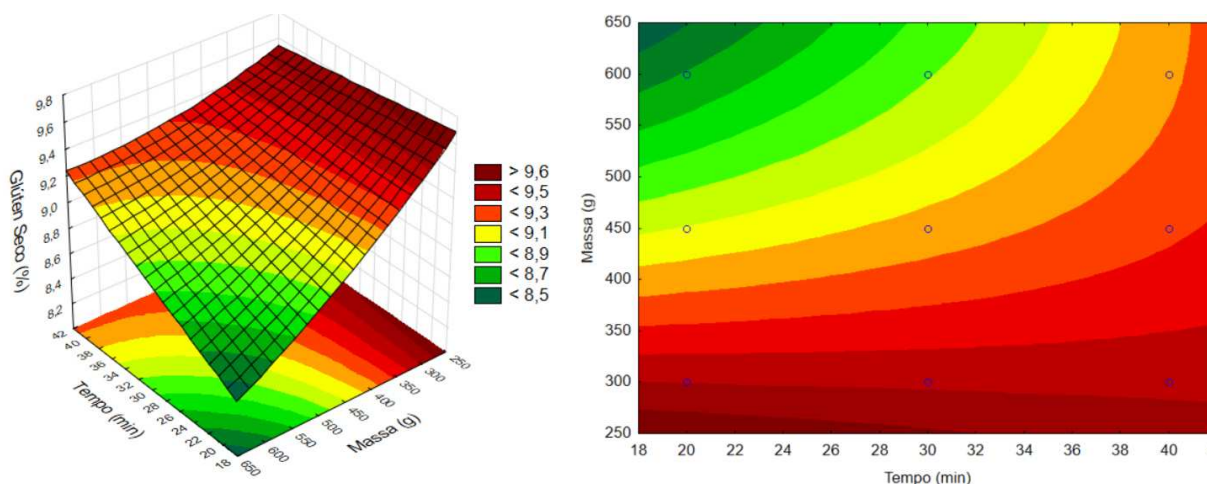


Fonte: Autora (2025).

Já em relação ao glúten seco, como podemos perceber na Figura 9, na massa de 300 g o teor de glúten seco foi maior, independente do tempo, já nas demais quantidades (450

g e 600 g), o teor de glúten seco foi aumentando conforme o tempo de tratamento também aumentou.

Figura 9 – Influência da ozonização no teor de glúten seco das farinhas de trigo



Fonte: Autora (2025).

De acordo com Weegels *et al.* (1996) e Yoshida *et al.* (2001), a oxidação causa maior entrecruzamento de cadeias proteicas, produzindo enrijecimento da estrutura da rede de glúten formada. Este fato aumenta as forças de cisalhamento, principalmente durante a mistura, as quais, se muito elevadas, levam ao rompimento de ligações tanto covalentes como não covalentes, destruindo a rede de glúten. No entanto, de acordo com Pizzinatto (1999), a farinha de trigo ozonizada pode ser classificada como boa para panificação.

3.3.1.5 *Falling number*

Os valores de *falling number* das amostras tratadas e da amostra controle estão na tabela 9. ICTA (2013) especifica o valor de *falling number* para alguns produtos, tais como massas (> 350), pães (225-275) e bolos (200-250). Paixão (2022) afirmou que para produtos de panificação, os valores ideais de *falling number* devem estar na faixa de 200 a 350 segundo.

Os valores de *falling number* (Tabela 7) variaram de $361 \pm 2,00$ (amostra 4) até $455 \pm 6,00$ (amostra controle). A amostra controle diferiu significativamente ($p < 0,05$) de todas as amostras tratadas, apresentando um valor maior que todas as amostras. As amostras 2 e 3, 5 e 6 e 8, 9 e 10 não apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$).

Tabela 7 – Valores de *falling number* das farinhas de trigo.

Amostras	Falling Number (seg)
Controle	455 ^g ±6,00
1	364 ^c ±4,00
2	394 ^b ±5,00
3	385 ^b ±2,00
4	361 ^c ±2,00
5	396 ^{de} ±3,00
6	395 ^{de} ±4,00
7	427 ^a ±3,00
8	406 ^f ±3,00
9	405 ^f ±3,00
10	403 ^f ±3,00
11	406 ^f ±3,00

Fonte: Autora

Amostras: 1(300g/20min); 2(600g/20min); 3(300g/40min); 4(600g/40min); 5(450g/20min); 6(450g/40min); 7(300g/30min); 8(600g/30min); 9(450g/30min); 10(450g/30min) 11(450g/30min).

Cada valor representa a média e o desvio controle das repetições.

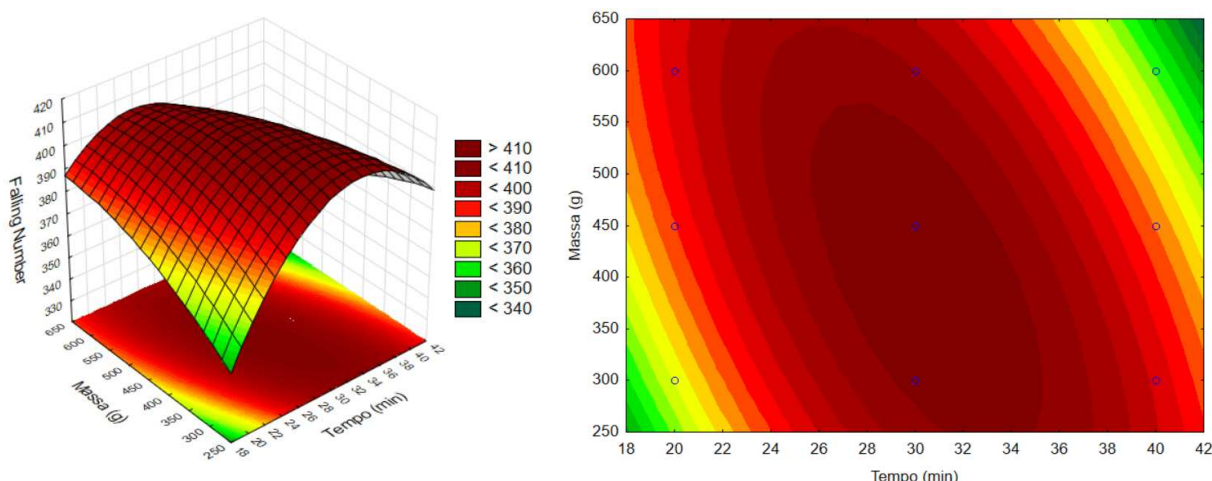
Valores com letras minúsculas diferentes em cada coluna representam diferença significativa ($p < 0,05$).

O estudo feito por Paes (2011) apresentou uma resposta diferente da qual foi encontrada no presente estudo. A autora encontrou números de queda maiores para as farinhas tratadas com ozônio, em comparação com a farinha controle. Ou seja, nas concentrações utilizadas na pesquisa em questão, o ozônio causou um aumento no *falling number*.

Na Figura 10, observa-se que a ozonização teve maior impacto — indicado pelos menores valores de *falling number* — nas condições extremas do experimento. Isso ocorreu tanto no maior tempo de tratamento com maior quantidade de amido no reator (40 minutos e

600 g), quanto no menor tempo com menor quantidade (20 minutos e 300 g). O menor valor de *falling number* (< 360 segundos) foi registrado na condição de maior tempo de tratamento e maior massa processada.

Figura 10 – Influência da ozonização no *falling number* das farinhas de trigo



Fonte: Autora (2025).

Nas concentrações de ozônio utilizadas neste trabalho, o tratamento favoreceu a atividade enzimática da *alfa-amilase* na farinha de trigo. Isso porque o *falling number* é inversamente proporcional à atividade dessa enzima — quanto menor o *falling number*, maior a atividade enzimática (Balhmann e Lanzarini, 2013). Esse efeito foi positivo para a farinha analisada, uma vez que a farinha controle apresentou um *falling number* muito acima do recomendado para panificação. Embora as farinhas ozonizadas ainda tenham permanecido acima do valor ideal, o tratamento contribuiu para a redução desse índice. Ou seja, quando houver necessidade de redução deste parâmetro na indústria, a ozonização se mostrou capaz de otimizar este processo, principalmente quando se utilizou 300 g no reator, com 20 min de tratamento.

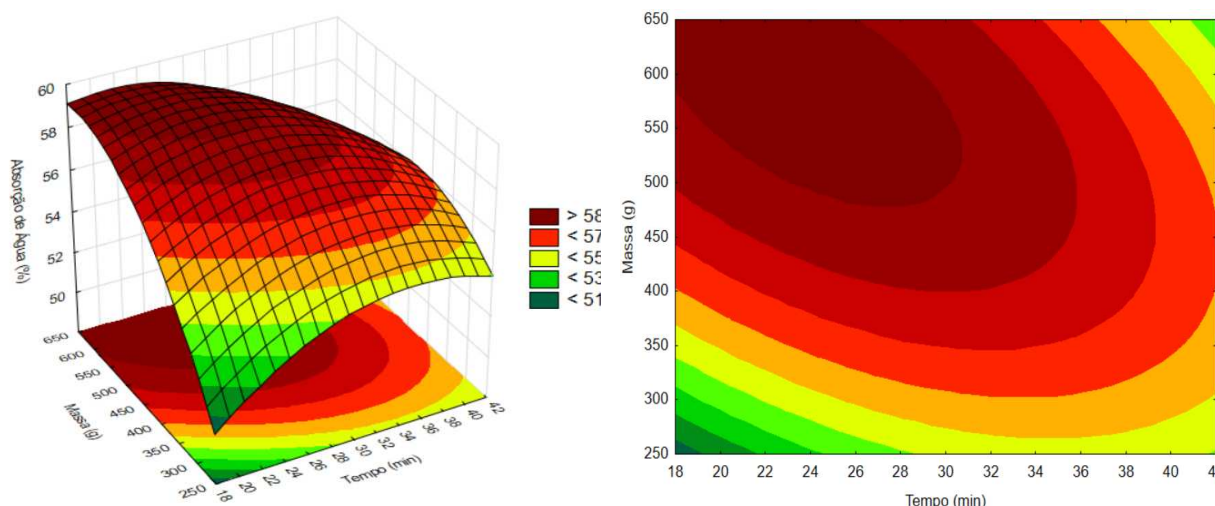
3.3.1.6 Farinografia

Os resultados da farinografia das farinhas de trigos estão apresentados nas Figuras 11, 12 e 13. A absorção de água é a quantidade de água que a massa absorve para que a curva do gráfico mantenha-se em 500 unidades farinográficas (UF) - Tempo em que a massa suporta a mistura (EMBRAPA, 2009). Na Figura 11, podemos observar que os menores valores de absorção de água foram referentes à menor quantidade de farinha trigo dentro do reator (300

g), sendo > 53 % quando o tempo de tratamento foi 20 min e > 55% quando o tempo de tratamento foi de 30 e 40 min. Quando analisamos a quantidade de farinha maior no reator, temos que a absorção de água aumenta, quanto maior a massa e menor o tempo. Já quando a quantidade de farinha no reator é maior e o tempo de tratamento também aumenta, a absorção de água diminui, sendo > 57% quando a quantidade de farinha no reator foi de 450g e 20 min, < 58% com 30 min e < 57% quando o tempo de tratamento foi de 40 min, quando foi 600 g no reator com tempo de 20 min, a absorção de água foi de > 58% quando o tempo de tratamento foi de 30 min, a absorção foi <58% e quando o tempo de tratamento foi de 40 min, a absorção de água ficou entre >55% e <57%. A amostra controle apresentou um índice de absorção de água de 55%, logo, todas as amostras, com exceção da amostra com menor quantidade no reator por menos tempo, estavam dentro dos valores de absorção de água recomendados para a fabricação de pães.

Bem como aconteceu na análise de absorção de água em conjunto com o poder de inchamento, houve o aumento da absorção de água pela farinha de trigo ozonizada. Este resultado é vantajoso, pois contribui para o maior rendimento da massa e prolonga o tempo de prateleira do produto final (Hruskova *et al.*, 2006; Figoni, 2008; Paraskevopoulou *et al.*, 2010). Este aumento na farinha de trigo ozonizada, em comparação à controle, no período de exposição ao gás e à quantidade de farinha no reator, pode ser parcialmente atribuído à redução do teor de água na farinha ozonizada (Morita *et al.*, 2002; Hallén *et al.*, 2004). Contudo, a explicação mais provável é que a oxidação dos componentes do glúten favorece um maior entrelaçamento da rede protéica, resultando em maior retenção de água. Além disso, também pode estar relacionado a possíveis alterações na estrutura do amido (Hallén *et al.*, 2004; Azzeh *et al.*, 2009) provocadas pela oxidação do ozônio.

Figura 11 – Influência da ozonização na absorção de água das farinhas de trigo



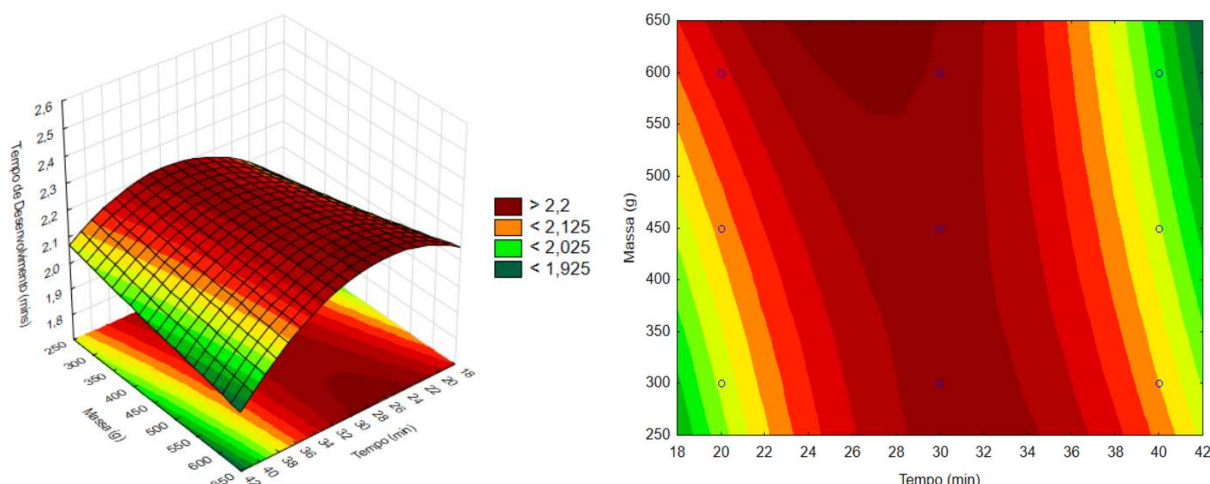
Fonte: Autora (2025).

Quando observamos o tempo de desenvolvimento da massa (Figura 12), todas as amostras, incluindo a controle (1,9 min), não atingiram o tempo mínimo recomendado para a produção de pães, sendo os valores obtidos mais apropriados para a produção de biscoitos doces. É possível notar que a influência da ozonização no desenvolvimento da massa não foi representativa, estando os valores entre < 2,0 min e > 2,2 min.

Sandhu *et al.*, (2011) também observaram alterações quando utilizaram 1500 mg de O₃ por 45min na farinha de trigo. Quanto maior foi a exposição ao ozônio, maior o tempo de desenvolvimento da massa. Mas os maiores valores estavam compreendidos no tempo médio de tratamento (30 min), independente da quantidade de massa no reator.

O aumento do tempo de desenvolvimento da farinha de trigo pode ser atribuído à oxidação proteica. Um maior grau de oxidação promove um entrelaçamento mais intenso e o fortalecimento da rede proteica, prolongando o tempo necessário para alcançar a máxima consistência da massa (Sandhu *et al.*, 2011). Além disso, quanto maior a absorção de água pela farinha de trigo, mais tempo é necessário para formar a rede de glúten (Paraskevopoulou *et al.*, 2010).

Figura 12 – Influência da ozonização no tempo de desenvolvimento das massas



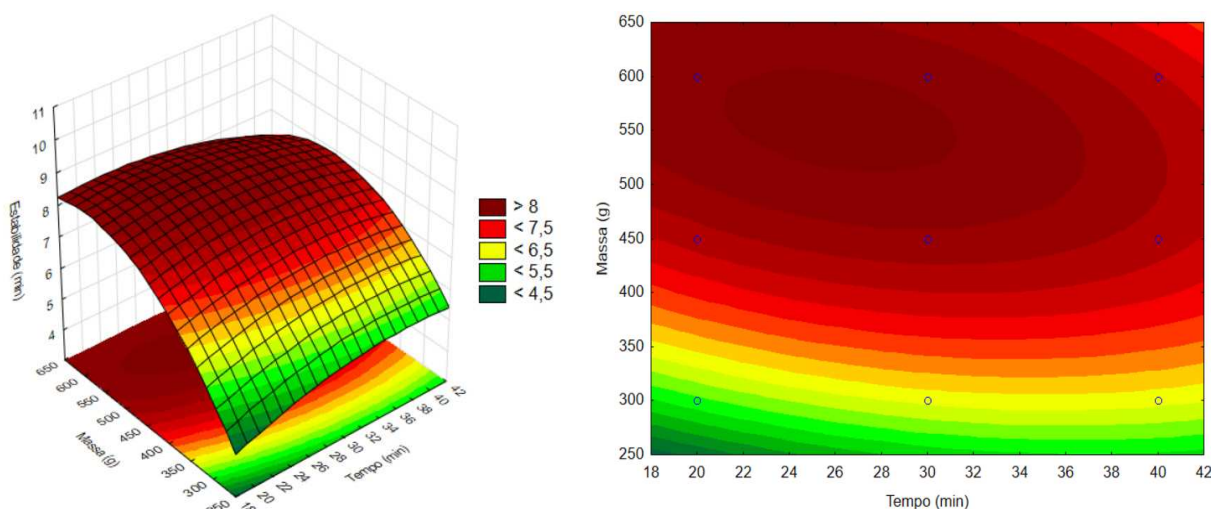
Fonte: Autora (2025).

A estabilidade é o tempo que a curva do gráfico (Apêndice A) se mantém na linha das 500 UF. O resultado indica a força de uma farinha (EMBRAPA, 2009). Na Figura 13, os valores obtidos estavam compreendidos acima do valor de referência para farinhas fracas e abaixo do valor para farinhas fortes, estando, portanto, caracterizada como farinha de força média. Já que os valores de referência são: ≤ 2 muito fraca; 2,1-4 fraca; 10,1-15: forte) (ICTA, 2013).

A farinha controle apresentou tempo de estabilidade de 7 min, enquanto as farinhas ozonizadas apresentaram valores $> 4,5$ min até $< 8,0$ min, sendo as amostras com maiores quantidade de farinha no reator (600 g e 450 g) com maior similaridade com a amostra controle, apresentando valores entre $< 8,0$ min e $> 7,5$ min. A menor quantidade de massa dentro do reator (300 g), com 20 min de tratamento, apresentou valores $< 5,5$ min de estabilidade e com 30 e 40 min de tratamento, apresentou $< 6,5$ min de estabilidade. Logo, o tratamento com ozônio com menor quantidade de farinha dentro do reator, independente do tempo, enfraqueceu a massa.

Em relação à estabilidade, o aumento nos valores observados na farinha de trigo ozonizada, quando comparada à farinha controle, sugere uma maior resistência da massa ao tratamento mecânico. Contudo, em alguns casos, a estabilidade da farinha ozonizada não apresentou diferença em relação à farinha controle, ou até mesmo, houve uma diminuição, o que pode ser explicado pelo aumento do tempo necessário para a formação da massa, ou seja, o tempo de chegada (Silva *et al.*, 2010). Essa queda está relacionada à maior capacidade de entrelaçamento proteico requerido para completar a formação da rede de glúten.

Figura 13 – Influência da ozonização na estabilidade das massas



Fonte: Autora (2025).

Na pesquisa realizada por Paes (2011), os valores médios de absorção de água e tempo de desenvolvimento da farinha de trigo ozonizada, apresentaram diferença significativa da farinha controle ($p < 0,05$), bem como no presente trabalho, houve um aumento no tempo de desenvolvimento da farinha de trigo ozonizada, na medida em que aumentou o período de exposição, com exceção para o tempo de desenvolvimento na concentração de $1,07 \text{ mg.L}^{-1}$. Já em relação à estabilidade da farinha ozonizada, os valores médios também apresentaram resultados significativos e superiores aos encontrados para a farinha controle. A absorção de água da farinha de trigo aumentou com o período de exposição ao gás em algumas concentrações, ficando constante em outras.

No trabalho de Trombete, (2016), que utilizou grãos de trigo ozonizados para produzir a farinha, os resultados da farinografia mostraram que a ozonização não promoveu alteração significativa ($p < 0,05$) em nenhum dos parâmetros estudados. Li *et al.*, (2012) aplicaram 5 g de ozônio durante 60min diretamente na farinha de trigo e verificaram que o tratamento promoveu aumento no tempo de desenvolvimento da massa e na estabilidade. De acordo com estes autores, o ozônio pode ser utilizado como agente oxidante da farinha, quando é desejado um aumento da força. Em contrapartida, Ibanolu (2001), assim como Trombete, (2016), não relatou alterações nos parâmetros de farinografia quando ozonizaram diretamente a farinha de trigo. Naito (1990), estudando farinha de trigo tratada com o gás ozônio na concentração de 50 ppm também verificou que o processo de ozonização não alterou os parâmetros absorção de água, estabilidade da massa, tempo de desenvolvimento e índice de tolerância à mistura, obtidos pelo farinógrafo.

3.3.1.7 Amido danificado

Os valores de amido danificado das amostras tratadas e da amostra controle das farinhas de trigo estão na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores de amido danificado nas amostras de farinha de trigo.

Amostras	Amido danificado (%)
Controle	5,18 ^a ±0,21
1	6,12 ^c ±0,37
2	6,37 ^c ±0,41
3	6,92 ^c ±0,04
4	6,51 ^c ±0,31
5	5,91 ^b ±0,15
6	7,00 ^c ±0,10
7	6,56 ^c ±0,14
8	6,14 ^c ±0,68
9	6,93 ^c ±0,17
10	6,88 ^c ±0,10
11	7,07 ^c ±0,67

Fonte: Autora

Amostras: 1(300g/20min); 2(600g/20min); 3(300g/40min); 4(600g/40min); 5(450g/20min); 6(450g/40min); 7(300g/30min); 8(600g/30min); 9(450g/30min); 10(450g/30min) 11(450g/30min).

Cada valor representa a média e o desvio controle das repetições.

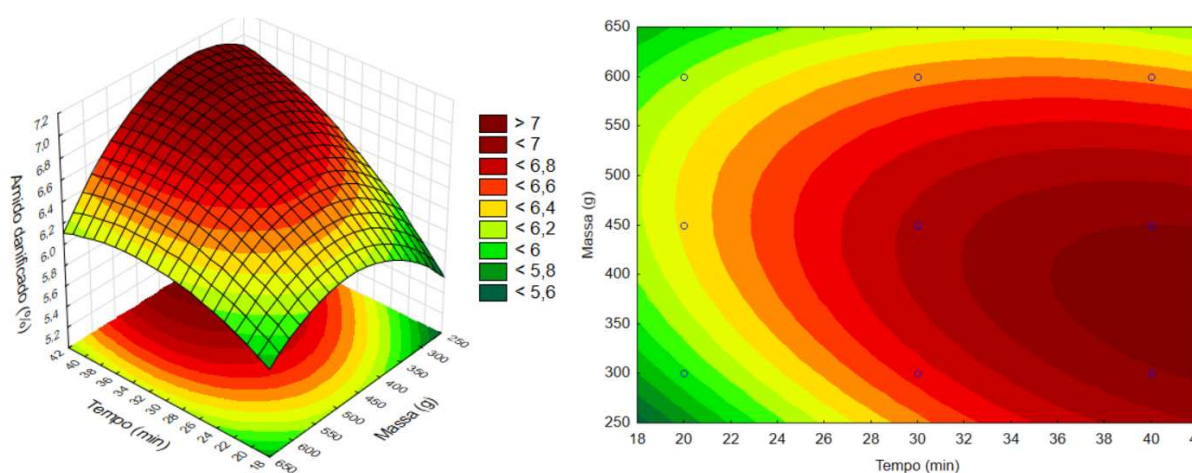
Valores com letras minúsculas diferentes em cada coluna representam diferença significativa ($p < 0,05$).

No presente estudo, as amostras variaram de 5,18%±0,21 (amostra controle) e 7,07%±0,67 (amostra 11). No entanto, na panificação, o recomendado é que o teor de amido danificado esteja entre 6 e 9% (Labuschagne, Claassen e Deventer, 1997). Apenas a amostra controle (5,18%±0,21) e a amostra 5 (5,91±0,15) apresentaram valores abaixo do

recomendado. Todas as amostras diferiram significativamente ($p < 0,05$) da amostra controle, no entanto, a única amostra tratada que diferiu significativamente ($p < 0,05$) das demais, foi a amostra 5. O teor de amido danificado abaixo do ideal pode causar prejuízo na qualidade panificável, pois o amido danificado auxilia na absorção de água e na atividade das enzimas. O resultado de amido danificado da amostra controle e da amostra 5 pode resultar em massas menos hidratadas, fermentação deficiente, menor volume do pão e características sensoriais inferiores. Assim, o controle adequado do teor de amido danificado é fundamental para garantir o desempenho tecnológico ideal da farinha em produtos panificados. Logo, todas as amostras permaneceram dentro do que foi citado por Labuschagne, Claassen e Deventer (1997), como recomendado para produtos de panificação.

Ao analisarmos o gráfico de superfície de resposta e de curva de contorno presentes na Figura 14, podemos observar que quando a farinha no reator é de 450 g e o tempo de tratamento é de 40 min, tem-se um maior valor de amido danificado < 7 . Quando o tempo de tratamento é baixo (20 min), o teor de amido danificado é baixo, independente da quantidade de farinha no reator. O teor de amido danificado foi aumentando gradativamente ao decorrer que o tempo de tratamento foi aumentando, sendo a quantidade média (450 g) onde houve o maior valor, seguida da menor quantidade (300 g) e por fim a de maior quantidade (600 g).

Figura 14 – Efeito da ozonização no teor de amido danificado das farinhas de trigo



Fonte: Autora (2025).

Desvignes *et al.* (2008) observaram uma redução no teor de amido danificado em farinhas de trigo provenientes da moagem de grãos ozonizados. No entanto, os autores

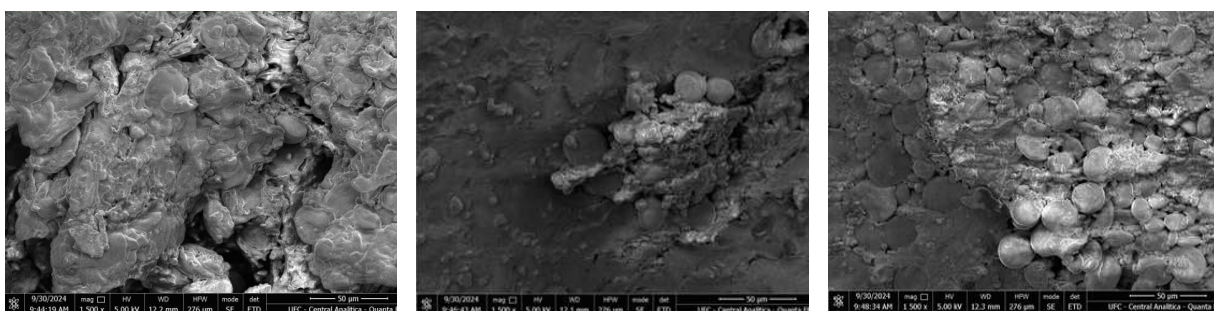
atribuíram essa redução à menor energia necessária na moagem, e não diretamente ao efeito do ozônio. Além desse, não foram encontrados outros estudos que avaliem o teor de amido danificado em farinha de trigo tratada com ozônio. Entretanto, é possível que o ozônio, por se tratar de um agente oxidante, tenha atuado modificando a estrutura do amido, aumentando a quantidade de amido danificado devido à quebra parcial dos grânulos de amido. Podendo impactar características como absorção de água e funcionalidade em processos de panificação. Bem como o teor de amido danificado aumentou nas amostras ozonizadas no presente trabalho, foi possível perceber que a absorção de água nestas farinhas também aumentou, estando a amostra 3 (300g/40min) significativa em ambos os parâmetros.

3.3.2 Análises de qualidade das massas e dos pães

A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para investigar a morfologia dos grânulos de amido nos pães produzidos com as farinhas ozonizadas e com a farinha controle. Na Figura 15 estão as imagens da MEV.

É possível observar que os grânulos de amido nas amostras de pão (Figura 15), apresentaram tamanho médio de 19 μm e aspecto arredondado e liso. No entanto, alguns apresentaram pequenos amassados que podem ter sido originados devido ao efeito de enzimólise da amilase nas sementes do trigo (Dar *et al.*, 2018; Georgi e Kreft, 2012). Os grânulos de amido das amostras tratadas e da amostra controle também mostraram bastante semelhança, não sendo possível a observação de diferenças ou alterações nas superfícies.

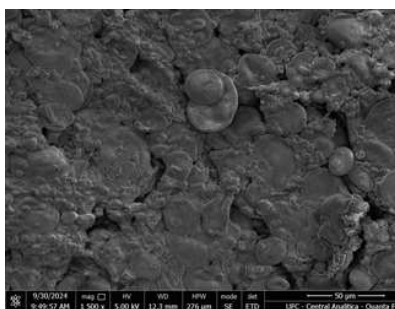
Figura 15 – Microscopia Eletrônica de Varredura dos pães produzidos a partir das farinhas de trigo modificadas em um aumento de 1500 x



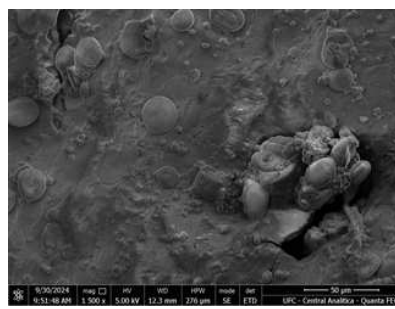
Amostra 1

Amostra 2

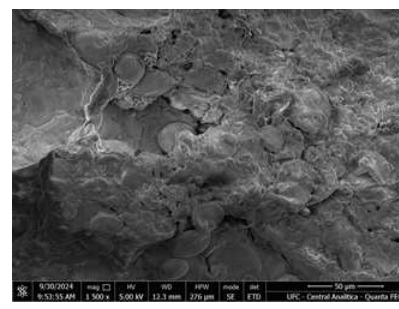
Amostra 3



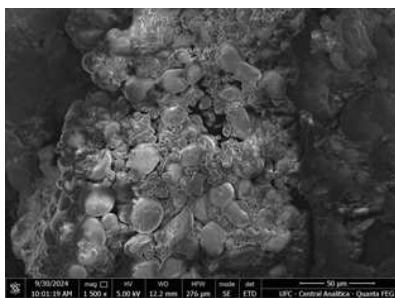
Amostra 4



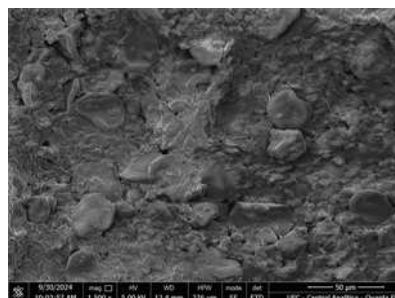
Amostra 5



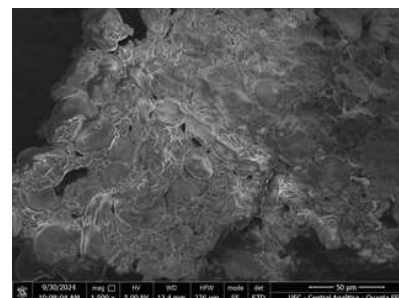
Amostra 6



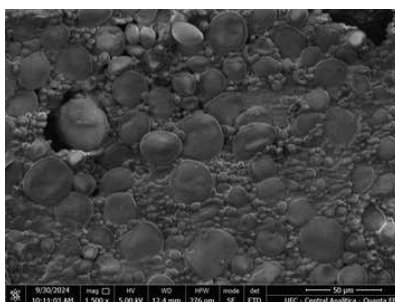
Amostra 7



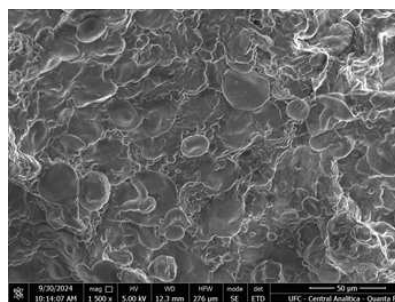
Amostra 8



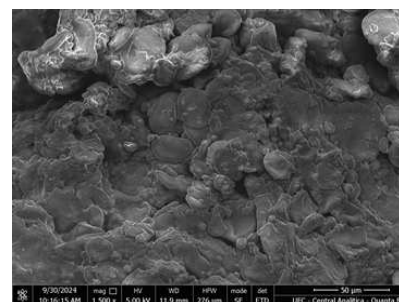
Amostra 9



Amostra 10



Amostra 11



Amostra controle

Fonte: Autora (2024).

Hu *et al.*, (2022) modificaram o amido de trigo com ozônio e observaram que os danos mais aparentes e cavidades mais profundas foram exibidos no amido tratado por 20 min. Obadi *et al.*, (2018) verificaram que o tratamento com ozônio alterou as características de microestrutura da farinha de trigo integral, causando algum dano físico às partículas e uma perda de zonas verdes nos grânulos de amido, não apresentando degradação das partículas de amido ou alteração na proteína com o tratamento de 5 min.

Alguns pesquisadores relataram que o amido oxidado apresenta danos físicos visíveis quando observados por microscopia eletrônica de varredura, e ruptura tanto dentro quanto fora dos grânulos de amido conforme a concentração do oxidante aumenta (Rutenberg e Solarek, 1984; Boruch, 1985; Han e Ahn, 2002). No entanto, no presente trabalho, não foi possível observar estas alterações, sendo possível que a carga utilizada não tenha sido suficiente para que a oxidação fosse visível neste aspecto.

Os resultados da influência da ozonização na qualidade das massas e dos pães elaborados a partir das farinhas de trigo ozonizadas estão expressos nas Figuras 16, 17, 18 e 19.

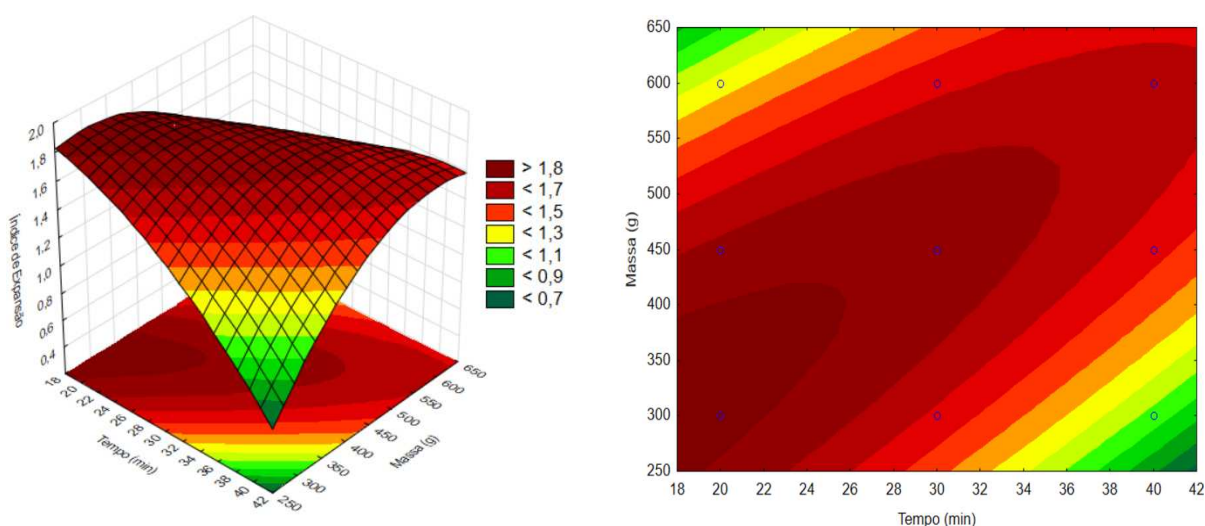
O Índice de Expansão dos pães foi influenciado pela massa de farinha que foi ozonizada no reator, bem como pelo tempo de exposição ao ozônio. A partir da análise da Figura 48 é possível observar que houve um aumento do índice de expansão dos pães ($> 1,5$) quando o tempo de exposição foi de 30 min, correlacionados com uma massa de farinha de até 450 g. A partir de massas maiores e tempos de exposição maiores, o Índice de Expansão dos pães é reduzido para valores inferiores a 1,3. Por outro lado, ao se utilizar massas menores (abaixo de 400 g), correlacionados com tempo de exposição mais elevados, como, por exemplo, superiores a 34 min, pode-se observar também uma redução no Índice de Expansão dos pães. Este Índice de Expansão pode ter sofrido alteração na formação do glúten, impactando a retenção de gases durante a fermentação. Este fato é corroborado pelo resultado obtido na análise de glúten úmido, que está intimamente ligada ao fortalecimento da rede do glúten, onde se observou a maior influência do ozônio a partir de 30 min de tratamento, com uma de até 450 g no reator.

O Índice de Expansão mede a capacidade da massa em expandir-se nas direções verticais e horizontais (Brasil *et al.*, 2014), logo, é uma medida que avalia a capacidade da massa de crescer durante o processo de fermentação. É possível que o ozônio possa ter oxidado as proteínas do glúten, já que com tempos maiores de exposição e com menos massa no reator, este índice decaiu. Pois, Barak, Mudgil e Khaktar (2013) correlacionam o glúten com a capacidade de expansão das massas. Quando a massa possui um glúten com baixa elasticidade leva a um baixo poder de expansão, a relação inversa também ocorre, massas com elevada elasticidade possuem maior capacidade de expansão, no entanto, um glúten muito elástico impede a expansão das células de gás, o que condiciona à redução da capacidade de expansão. Portanto, a ozonização em um tempo muito alto pode ter modificado a elasticidade do glúten formado na massa e consequentemente o Índice de Expansão. No entanto, em um tempo baixo (30 min) e quantidade média de farinha no reator, apresentou uma melhora no Índice de Expansão dos pães, já que utilizando a farinha controle, o mesmo foi 1,30.

O Fator de Expansão reflete a relação entre o volume inicial da massa e o volume obtido após a fermentação. Sendo este, crucial para entender a eficiência da levedura e a produção de gases durante a fermentação, o que resulta diretamente no aumento do volume do pão. Um fator de expansão elevado pode resultar em pães mais aerados e com maior volume,

atributos desejáveis na maioria dos tipos de pães.

Figura 16 – Efeito da ozonização no índice de expansão dos pães

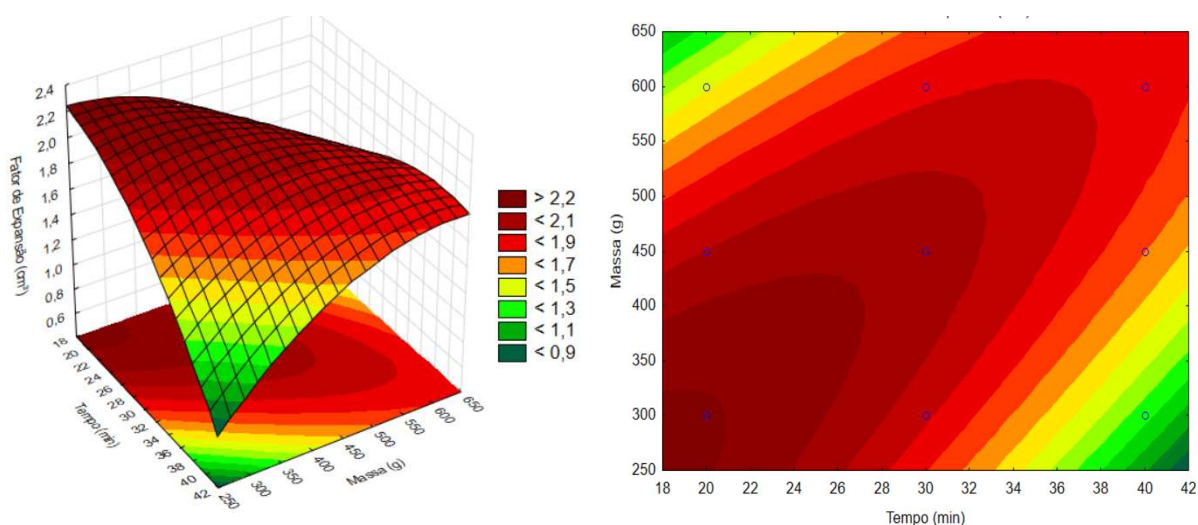


Fonte: Autora (2025).

Uma análise semelhante ao Índice de Expansão pode ser feita em relação ao Fator de Expansão. É possível ver na Figura 16 que o Fator de Expansão dos pães também foi influenciado tanto pela massa de farinha que foi ozonizada no reator, quanto pelo tempo de exposição ao ozônio. É possível observar que houve um aumento do fator de expansão dos pães ($> 1,9 \text{ cm}^3$) quando o tempo de exposição foi de até 30 min, correlacionados com uma massa de farinha de até 450 g. É importante salientar que o Fator de Expansão desejável para a panificação é acima de $2,00 \text{ cm}^3$ (Zambelli, 2015), logo, os pães produzidos com as farinhas tratadas com menor tempo e menor massa estão dentro deste parâmetro. Com massas e tempos de exposição maiores, o Fator de Expansão dos pães diminui para valores inferiores a $1,5 \text{ cm}^3$. Por outro lado, ao se utilizar massas abaixo de 400 g, correlacionados com tempo de exposição superiores a 33 min, pode-se observar também uma redução no Fator de Expansão dos pães.

É possível que com uma massa maior no reator e um tempo menor de exposição ao gás, a carga de ozônio não tenha sido suficiente para aumentar o Fator de Expansão, já que com uma quantidade menor no reator, pode-se observar um maior Fator de Expansão. Bem como ocorreu no Índice de Expansão, é possível que tenha acontecido a oxidação das proteínas do glúten ou a interação do ozônio com as leveduras presentes na massa, ocasionando a diminuição da função destas, por isto o decaimento do parâmetro em relação a um aumento de tempo, com uma massa menor.

Figura 17 – Efeito da ozonização no fator de expansão dos pães



Fonte: Autora (2025).

O volume específico é uma importante propriedade física dos pães, exercendo uma forte influência na preferência do consumidor (Capriles, 2011). Ele é a relação entre o volume e a massa do produto final, sendo um indicador importante da qualidade da estrutura do pão. Um volume específico adequado reflete uma boa alveolagem, o que contribui para uma textura mais agradável ao consumidor. Esta alveolagem e a formação de bolhas de ar podem ser afetadas pela farinha de trigo ozonizada, resultando em um pão com uma textura diferente daquela obtida com farinhas não ozonizadas. O controle do volume específico também está ligado ao controle da umidade e à formação de gases durante a fermentação, essa análise ajuda a garantir que o pão não seja excessivamente denso ou com a estrutura comprometida.

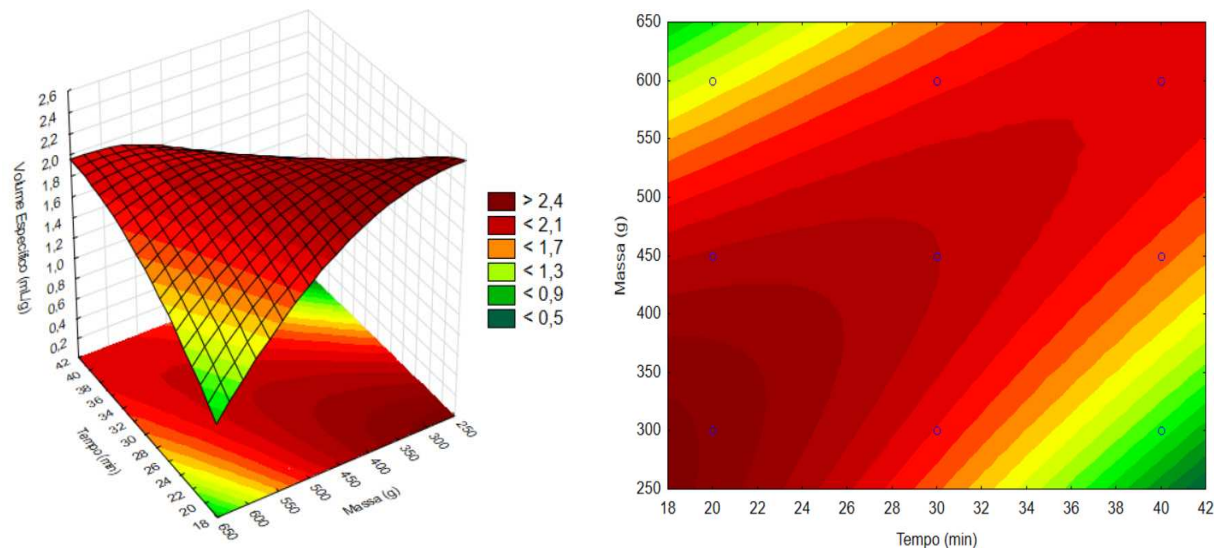
O volume específico apresentou comportamento semelhante ao índice e ao fator de expansão, como é mostrado na Figura 52, a influência da farinha ozonizada no reator e do tempo de exposição ao ozônio se deu da seguinte forma: houve um aumento do volume específico dos pães ($> 2,1 \text{ mL/g}$) quando o tempo de exposição foi de até 30 min e a massa de farinha de até 450 g. Com massas acima de 500 g e tempos de exposição acima de 38 min, o volume específico dos pães diminuiu para valores inferiores a $2,1 \text{ mL/g}$. Ao se utilizar massas abaixo de 350 g, e tempos de exposição superiores a 34 min, pode-se observar também uma redução no volume específico dos pães.

No trabalho de Sandhu *et al.* (2011) foi utilizado ozônio também na fase gasosa para tratamento de farinha de trigo, foram produzidos pães, e estes apresentaram maior volume específico, miolo mais branco e número de células no miolo do pão superiores à apresentada pelo pão controle. Verificou-se também um aumento na proteína polimérica insolúvel. Os pães que foram produzidos com farinhas ozonizadas em menor concentração, apresentaram resultados próximos ao pão controle. As de maior concentração apresentaram volume específico maior. Mendez *et al.* (2003) observou que a farinha de trigo obtida dos grãos ozonizados não apresentou diferenças significativas nas propriedades de panificação, em especial no que refere-se ao volume e volume específico dos pães, quando comparada com a farinha de trigo obtida de grãos não ozonizados.

No presente estudo, o volume específico das farinhas ozonizadas apresentou-se menor que o volume específico da farinha controle (2,5 mL/g). O que corrobora com o estudo de Paes (2011), onde o volume específico dos pães elaborados com farinha de trigo ozonizada foi na maioria das vezes significativamente menor que o do controle. No entanto, no presente estudo, nenhuma das amostras de pães, incluindo a controle, esteve dentro do valor recomendado para qualidade de pães (3,0 mL/g) (Zambelli, 2014). Este resultado já era esperado, pois na análise do tempo de desenvolvimento da massa, nenhuma das amostras se mostraram dentro do valor de referência. Silva (2011) observou a redução do teor de proteína das farinhas com o aumento do período de exposição. O que pode ser explicado pelo processo de oxidação de proteínas causado pelo ozônio (Kells *et al.*, 2001; Zhanggui *et al.*, 2003). Bushuk (1985) diz que a quantidade de proteínas presente nas farinhas de trigo não está diretamente relacionada à qualidade das proteínas, mas com a capacidade de formação da massa, fazendo uma correlação entre o teor de proteína e o volume de pão produzido.

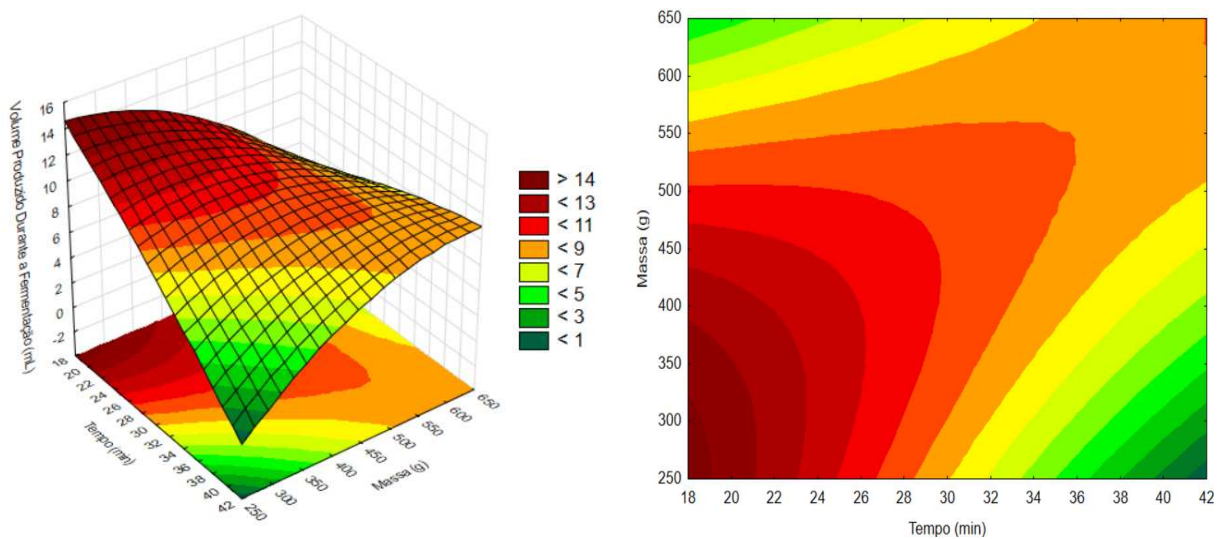
Já o volume produzido durante a fermentação no pão controle foi de 8,3 mL/g, sendo bem semelhante às amostras de pães produzidos com farinhas tratadas por 30 min em com 450 g e 300 g de farinha dentro do reator (>9,0 mL). Como pode ser observado na Figura 53, bem como os outros parâmetros de pães estudados até agora, pode-se ver que os maiores resultados de volume produzido durante a fermentação se deu nos menores tempos e menores massas. Quanto maior o tempo e menor a massa, menor o volume produzido durante a fermentação dos pães e quanto maior a massa e menor o tempo, também é menor o volume produzido durante a fermentação.

Figura 18 – Efeito da ozonização no volume específico dos pães



Fonte: Autora (2025).

Figura 19 – Efeito da ozonização no volume produzido durante a fermentação dos pães



Fonte: Autora (2025).

Segundo Almeida (2012), cerca de 8% das células de gás se formam na etapa de mistura da massa, quando o ar (79% nitrogênio e 21% oxigênio) é incorporado. Durante a fermentação, o oxigênio é consumido pelas leveduras, enquanto o CO_2 se difunde na massa, equilibrando-se entre as fases líquida e gasosa. Com o aumento da pressão, o CO_2 passa para o estado gasoso, expandindo o volume do pão e preenchendo as células de gás, que se tornam os alvéolos durante o forneamento.

3.4 CONCLUSÃO

Com base nas análises realizadas, verificou-se que o tratamento com ozônio, nas condições de concentração, tempo e massa avaliadas, promoveu alterações nas propriedades da farinha de trigo, refletindo-se, conseqüentemente, nas características tecnológicas dos pães elaborados com essa farinha. A farinha de trigo controle é uma farinha comercial tida como padrão, no entanto, foi possível perceber que em alguns parâmetros, ela não esteve dentro dos padrões estabelecidos, desta forma, a ozonização apresentou potencial para estabelecer valores dentro destes padrões.

Na análise de FTIR foi possível identificar a presença de grupos funcionais como carbonilas, hidroxilas, amidas, álcoois, ácidos carboxílicos, metila, metileno, carbonila e ésteres. A amostra 4 (600g/40min) foi a que apresentou os picos mais distantes em relação às outras amostras, indicando aumento da cristalinidade do amido presente na farinha de trigo.

Os resultados indicaram que o índice de absorção de água e o poder de inchamento foram superiores em todas as amostras submetidas ao tratamento, em comparação à amostra controle. Dentre elas, a amostra 3 (300 g/40 min) apresentou os maiores desvios em ambos os parâmetros, estando mais distante da amostra controle. No entanto, em relação ao poder de inchamento, todas as amostras tratadas foram estatisticamente iguais entre si ($p < 0,05$), diferindo significativamente apenas da amostra controle. Dessa forma, o tratamento mais viável sob a perspectiva industrial seria aquele realizado com maior carga de massa no reator e menor tempo de exposição, visto que oferece ganhos semelhantes em desempenho tecnológico, com maior eficiência operacional. Considerando que farinhas com elevado poder de inchamento e maior índice de absorção de água possuem ampla aplicação na indústria de alimentos, tais características são altamente desejáveis, pois promovem melhorias significativas nas propriedades tecnológicas dos produtos. Na panificação, esse tipo de farinha contribui para a obtenção de pães com maior volume, melhor retenção de umidade e maior estabilidade durante os processos mecânicos e fermentações prolongadas. Além disso, são particularmente vantajosas na formulação de produtos congelados, como massas, pizzas e pães, devido à sua capacidade de reduzir a sinérese e preservar a elasticidade e a textura após os ciclos de congelamento e descongelamento.

A umidade da farinha de trigo diminuiu com o tratamento com ozônio, sendo a amostra 1 (300g/20min) a que apresentou menor teor de umidade. Esta redução pode ser resultante da combinação de efeitos como a oxidação de grupos hidrofílicos e modificação da estrutura proteica, tornando-a menos apta a reter água livre.

Em relação ao glúten úmido e glúten seco, a amostra 3 (300 g/40 min), bem como na análise de poder de inchamento e índice de absorção, foi a que apresentou maior valor em ambos os parâmetros. Como todas as amostras apresentaram maiores valores em relação à amostra controle, é certo dizer que aquelas possuem maior capacidade tecnológica, especialmente para aplicações que demandam formação de rede de glúten, como na panificação e na fabricação de massas.

Houve uma diminuição nos valores de *falling number* em todas as amostras tratadas, no entanto, quando utilizados os tempos extremos, estes valores diminuíram ainda mais. Ou seja, quando uma farinha apresenta valores acima do permitido em relação a este parâmetro na indústria, a ozonização se mostrou capaz de otimizar este processo, nos binômios 40 minutos e 600 g e 20 minutos e 300 g. A diminuição do *falling number* proporciona uma maior disponibilidade de açúcares para as leveduras durante a fermentação, resultando em pães com maior volume e melhor desenvolvimento do miolo. A redução controlada também é empregada para corrigir farinhas com elevado teor de glúten e baixa atividade enzimática, tornando as massas mais equilibradas em termos de elasticidade e extensibilidade.

A absorção de água aferida no farinógrafo foi maior nas farinhas ozonizadas, no entanto isto ocorreu quando houve maior quantidade de massa no reator e menor o tempo de tratamento. Os maiores valores de tempo de desenvolvimento da massa estavam compreendidos no tempo médio de tratamento (30 min), independente da quantidade de massa no reator. Já o tempo de estabilidade da farinha foi em maior parte diminuído pelo tratamento com ozônio, sendo a menor quantidade de massa dentro do reator, com 20 min de tratamento o binômio que mais enfraqueceu esta massa.

Houve um aumento no teor de amido danificado também, onde foi possível observar que quando a farinha no reator foi de 450 g e o tempo de tratamento de 40 min, foi onde o ozônio mais influenciou para este aumento. Logo, farinhas com maior teor de amido danificado são tecnologicamente desejáveis porque favorecem a absorção de água, melhoram a ação enzimática, otimizam o desenvolvimento da rede de glúten e proporcionam melhores características de textura e maciez nos produtos finais.

Tratando das análises dos pães, no MEV, as amostras apresentaram tamanho médio de 19 μm e aspecto arredondado e liso. Os grânulos de amido das amostras tratadas e da amostra controle não apresentaram diferenças ou alterações nas superfícies. O índice de expansão dos pães aumentou quando o tempo de exposição foi de 30 min, correlacionados com uma massa de farinha de até 450 g, bem como aconteceu com o Fator de expansão, no

mesmo binômio tempo de tratamento-quantidade de massa no reator. No volume específico, as amostras que também foram submetidas a 30 min de tratamento com 450 g no reator apresentaram aumento neste parâmetro, no entanto, com massas acima de 500 g e tempos de exposição acima de 38 min, o volume específico dos pães diminui. O volume produzido durante a fermentação apresentou seus maiores resultados quando houve os menores tempos de tratamento e menor quantidade de amostra no reator.

Diante do exposto, é possível concluir que a ozonização na concentração utilizada no presente estudo pode ser uma boa alternativa para o melhoramento tecnológico de farinhas de trigo, utilizando diferentes tempos de tratamento e diferentes quantidades de farinha no reator, a depender do propósito que se deseja alcançar com este tratamento. A farinha controle, utilizada como referência por ser um produto comercial considerado padrão, apresentou desvios em alguns parâmetros em relação aos limites estabelecidos pela legislação ou pela literatura técnica. Nesse contexto, a aplicação do ozônio demonstrou potencial para corrigir essas não conformidades, ajustando os parâmetros da farinha para dentro dos padrões exigidos.

4 CAPÍTULO III - AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA OZONIZAÇÃO NA QUALIDADE DO AMIDO DE ARARUTA

4.1 INTRODUÇÃO

O amido pode ser utilizado para preparar diversos pratos culinários como pães, bolos, biscoitos e mingau (Lestari *et al.*, 2017) ou para produzir estabilizadores de sorvete e espessantes (Jyothi *et al.*, 2010). O amido de tubérculos e de raízes vem sendo utilizado há muitos anos na alimentação humana, nos mais variados produtos culinários. No entanto, para que um vegetal seja considerado como fonte de amido, deve conter quantidade deste carboidrato, ser de fácil extração e apresentar interesse econômico pelas suas propriedades. Este último justifica a extração de amidos com baixo rendimento (Amante, 1986).

Uma das fontes de amido é a araruta (*Maranta arundinacea L.*), planta que produz rizomas que acumulam este polissacarídeo. Esse amido tem características consideradas inigualáveis, sendo alto teor de amido, isenta de glúten e possui elevado valor de mercado. Entretanto, são poucos os estudos sobre essa espécie, com escassos dados de produção (Costa, 2022). O amido de araruta se adapta a todas as combinações, sendo água ou leite, consequentemente à confecção de inúmeros pratos, biscoitos, bolos, cremes e doces, sendo recomendada, sobretudo para convalescentes e crianças de 6 a 8 meses (Pereira, 1999).

Há um crescente interesse na pesquisa e desenvolvimento de amidos modificados para aplicações industriais. Nos últimos tempos, estudos focados em modificações químicas, como hidrólise ácida, oxidação, succinilação e acetilação, têm atraído atenção devido ao potencial desses amidos em produtos alimentícios, com ênfase na compreensão dos efeitos desses tratamentos (Mendes, 2011). Dentre estes, podemos destacar a utilização do ozônio como agente oxidante para a modificação de amidos.

Alguns amidos oxidados por ozônio são convencionais, como os de mandioca, milho normal, sagú, arroz normal e ceroso, trigo e inhame (Chan, Bhat e Karim, 2009; Chan *et al.*, 2011; Sandhu *et al.*, 2012; Oladebeye *et al.*, 2013; Ding *et al.*, 2015; Klein *et al.*, 2014; Çatal e Ibanoglu, 2014). Estes estudos têm se concentrado em avaliar o processo oxidativo, o teor de carboxilas gerado, as alterações na massa molecular dos componentes do amido e as mudanças nas propriedades de pasta, desses, poucos trabalhos têm investigado o efeito da ozonização sobre o amido, correlacionando estas modificações com a funcionalidade do mesmo.

4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Ozonização do amido de araruta

Os rizomas de araruta foram obtidos através de doação pela Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB). A colheita (Figura 20) foi realizada na Fazenda Experimental Piroás (FEP) no município de Redenção-CE, onde foram lavados (Figura 21), descascados e cortados. Estes, foram transportados até a cidade de Fortaleza-CE, armazenados sob refrigeração e posteriormente pesados. Após esse processo inicial, foram triturados (Figura 22) em um liquidificador industrial (Industrial Shop IPXL) com água destilada, na proporção de 2:1 e a mistura foi filtrada com um pano de algodão, com a finalidade de separar o amido da fibra. A fibra (Figura 23) foi armazenada em geladeira para repetição do processo de extração de amido. O mesmo foi repetido por duas vezes. Por fim, a suspensão (água + amido) foi deixada durante 24 h de repouso em Becker de vidro graduado, em temperatura controlada de 16 °C, para que ocorresse a sedimentação (Figura 24). Após as 24 h de decantação, foi possível separar o amido. Logo em seguida, o amido foi colocado em placas de Petri (Figura 25) e seco em estufa (60 °C por 16h) (Pafo, 2023). Após a secagem, o amido foi triturado no liquidificador, peneirado na peneira de 20 mesh (Figura 26), pesado, colocado em potes de vidro (Figura 17) e mantido na geladeira até a realização dos tratamentos e análises.

Figura 20 – Colheita dos rizomas de araruta



Fonte: Autora (2024).

Figura 21– Rizoma lavado e pronto para descascamento e corte

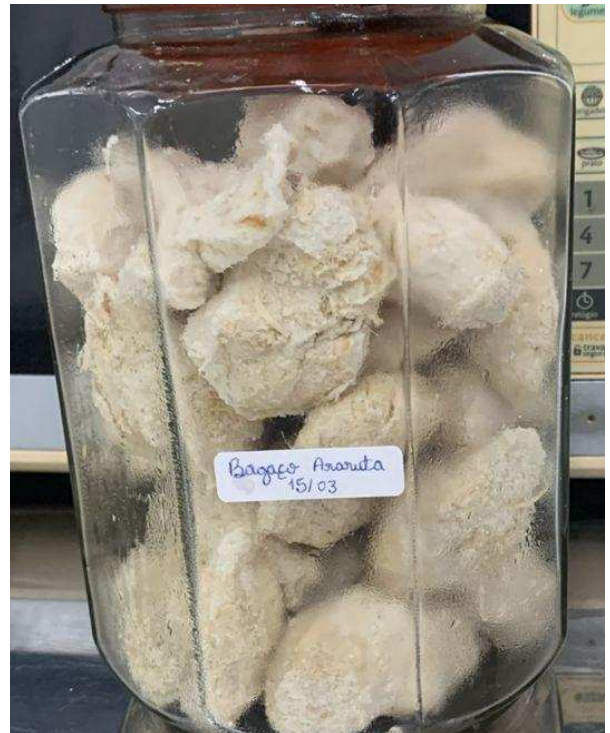


Fonte: Autora (2024).

Figura 22– Rizomas triturados



Figura 23– Fibra de araruta



Fonte: Autora (2024).

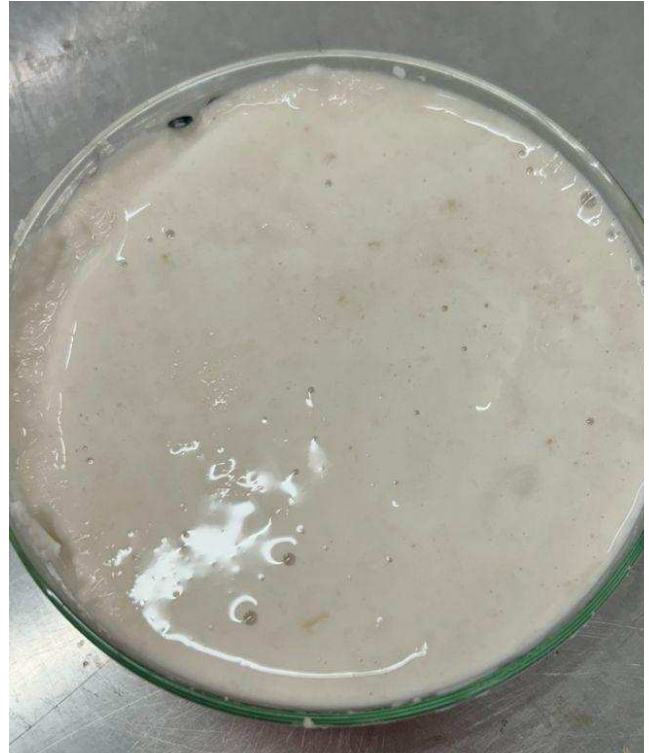
Figura 24– Sedimentação



Fonte: Autora (2024).

Fonte: Autora (2024).

Figura 25– Amido em placa de Petri para secagem



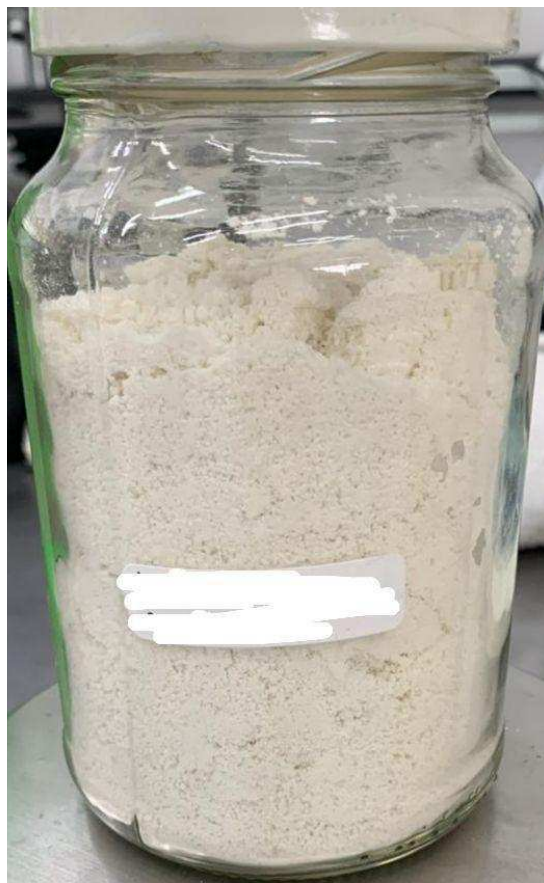
Fonte: Autora (2024).

Figura 26– Amido sendo peneirado



Fonte: Autora (2024).

Figura 27– Amido em pote para armazenamento



Fonte: Autora (2024).

O amido de araruta foi tratado no Laboratório de Biotecnologia (LABIOTEC), do Departamento de Engenharia de Alimentos (DEAL) da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde foi tratado variando o tempo e a quantidade em gramas de amido dentro do reator (Figura 28), também foi utilizado um Delineamento Composto Central (DCC) (Tabela 9) para estas amostras.

Posteriormente, as análises foram realizadas no Laboratório de Controle de Qualidade e Secagem de Alimentos (Poder de Inchamento e Índice de Absorção), Laboratório de Biomateriais Alimentícios (estabilidade a ciclos de congelamento e descongelamento), Laboratório de Frutos e Hortaliças (comportamento reológico), Central Analítica da Química e do Departamento de Física (MEV e FTIR) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Uma

parte das análises também foi realizada nos Laboratórios do Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos Córdoba (ICYTAC) e do Instituto Superior de Investigación, Desarrollo y Servicios en Alimentos (ISIDSA) da Universidad Nacional de Córdoba (UNC) (viscoamilografia, DSC e distribuição granulométrica das partículas).

Figura 28– Reator utilizado para ozonização do amido de araruta



Fonte: Autora

Tabela 9 – Delineamento Composto Central do amido de araruta.

Ensaio	Massa (g)	Tempo (min)
1	30,00	5,00
2	30,00	10,00
3	60,00	5,00
4	60,00	10,00
5	30,00	7,50
6	60,00	7,50
7	45,00	5,00
8	45,00	10,00
9	45,00	7,50
10	45,00	7,50
11	45,00	7,50

Fonte: Autora (2024).

4.2.2 *Rendimento do amido de araruta*

O rendimento do amido de araruta foi obtido a partir do que foi descrito por Silva (2022), relacionando o peso do amido extraído e o peso dos rizomas descascados. O rendimento foi calculado a partir da Equação 10.

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{\text{Peso do amido extraído (g)}}{\text{Peso dos rizomas descascados (g)}} \times 100$$

(10)

4.2.3 *Tratamento com ozônio*

O ozônio foi produzido a partir de um gerador de ozônio da marca Ozontechnik (Modelo Ozonic Medic AA) (Figura 29), baseado no método por efeito corona, sendo utilizado oxigênio comercial com grau de pureza de 99,5% como gás de alimentação. O reator utilizado foi desenvolvido para operação em batelada da seguinte forma: O reator foi alimentado por meio de uma mangueira de silicone que sai do gerador de ozônio, o gás remanescente do reator foi coletado por outra mangueira de silicone que desta vez sai do reator e é levado para um lavador de gás, onde continha iodeto de potássio, este, por sua vez, continha uma mangueira acoplada a um destruidor de ozônio. A carga de ozônio que as amostras receberam esteve de acordo com a Equação 11:

$$\text{Carga de ozônio (mg/min)} = C * c. \quad (11)$$

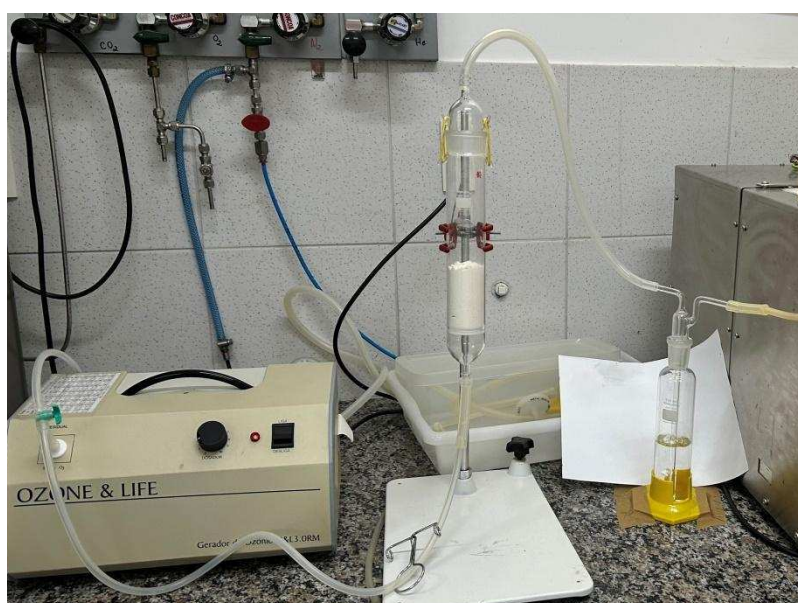
Onde:

C = Concentração de ozônio em mg.L^{-1} .

c = Concentração em L.min^{-1} recebidos no reator (de acordo com a posição de recebimento de O_2 no ozonizador).

É importante ressaltar que para o tratamento da farinha de trigo, o dosador esteve na posição 1 e para o tratamento do amido de araruta, na posição 0. Logo, a farinha de trigo recebeu $22,35 \text{ mg de O}_3.\text{min}^{-1}$ e o amido de araruta recebeu $20,00 \text{ mg de O}_3.\text{min}^{-1}$.

Figura 29– Sistema de ozonização no amido de araruta



Fonte: Autora

4.2.4 Análises do amido de araruta

4.2.4.1 Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR)

A análise de espectroscopia de infravermelho foi realizada em um espectrômetro Agilent modelo Cary 630, em uma faixa de varredura de 400 a 4000 cm⁻¹.

4.2.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise de microscopia eletrônica de varredura foi realizada para avaliar a superfície dos grânulos de amido. Foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura da marca INSPECT S50. As amostras foram armazenadas em sílica gel por 12 h. Foram utilizados 15 kV e aumento progressivo de 1.500x (Trombete, 2016).

4.2.4.3 Poder de Inchamento e Índice de absorção em água

Os parâmetros de poder de inchamento e índice de absorção em água foram obtidos conforme metodologia descrita por Bae *et al.* (2014), com modificações. Então, 0,5 g da amostra foi misturada com 30 mL de água à temperatura ambiente (25 °C) e sob calor (90 °C), durante 30 min. Em seguida, foi centrifugada a 3000 rpm durante 20 min e o sobrenadante foi seco em estufa a 105 °C por duas h. A análise foi realizada em triplicata. Os parâmetros foram calculados de acordo com as Equações 12 e 13.

$$\text{Poder de Inchamento} = \frac{\text{Peso do sedimento úmido}}{[\text{Peso da amostra seca} \times (\frac{1-SA\%}{100})]}$$

(12)

$$\text{Índice de absorção de água(IAA)} = \frac{\text{Peso do sedimento úmido}}{\text{Peso da amostra seca}}$$

(13)

4.2.4.4 Cor

A análise de cor foi feita de acordo com o que Lins (2021) realizou. A cor foi medida pelo colorímetro portátil da marca 3nh e modelo NR60CP+. As amostras foram colocadas em placas de Petri para a realização da análise. É importante salientar que o equipamento foi calibrado antes da introdução do canhão nas amostras, para assim ser realizada a medição. O resultado foi expresso em $L^*a^*b^*$ (L^* preto = 0 ao branco = 100); a^* (verde (-) ao vermelho (+)) e b^* (azul (-) ao amarelo (+)). A diferença total de cor entre a amostra ozonizada e a controle foi calculada usando-se a Equação 14 (Minolta, 1994), que indica a magnitude da mudança de cor após o tratamento.

$$\Delta E = \sqrt{((L_1 - L_0)^2 + (a_1 - a_0)^2 + (b_1 - b_0)^2)} \quad (14)$$

Onde: L_0 , a_0 e b_0 são os valores de cor da amostra controle de amido de araruta, e L_1 , a_1 e b_1 são os parâmetros de cor da amostra ozonizada.

4.2.4.5 Comportamento reológico

O comportamento reológico foi realizado de acordo com Silva (2019). Para a realização das análises foram preparadas soluções de amido (2%) submetidas à agitação a 70 °C por 30 min. O comportamento reológico da solução de amido foi determinado através de um reômetro da Brookfield, modelo R/S plus. As medidas foram feitas na temperatura de 25 °C, a qual foi ajustada através de um banho termostático acoplado ao equipamento. O equipamento forneceu os dados de tensão de cisalhamento e taxa de deformação através do *software* RHEO V 2.8. As análises reológicas foram obtidas com um tempo de 2 min e leitura de 50 pontos para cada curva. As leituras foram feitas em triplicata e em cada medida foi utilizada uma nova amostra.

4.2.4.6 Estabilidade a ciclos de congelamento e descongelamento

A estabilidade a ciclos de congelamento e descongelamento foi realizada de acordo com metodologia proposta por White, Abbas e Johnson (1989). Foi preparada uma suspensão de amido em água (5g.100 mL) e aquecida a 90 °C com agitação por 30 min. Em

seguida, 25 g do gel obtido foi colocado em tubo de centrífuga, fechado hermeticamente e submetido a 3 ciclos sucessivos de congelamento e descongelamento. O congelamento foi realizado em *freezer* doméstico por 24 h em temperatura média de -13 °C e o descongelamento em banho termostático a 30 °C por 90 min. O sobrenadante foi pesado e a sinérese foi calculada conforme a Equação 15.

$$\text{Sinérese} \left(\frac{g}{100g} \right) = \frac{M_s (g)}{M_p (g)} \times 100$$

(15)

Onde:

Ms = massa de água do sobrenadante;

Mp = massa total da pasta.

4.2.4.7 Viscoamilografia

Para determinação das propriedades viscoamilógrafas foi utilizado o Rapid Visco Analyzer (RVA series 4500, Perten Instruments), de acordo com o método n. 76-21, da AACC. Foram pesados 3,5 g de amostra e suspensas em $25 \pm 0,1$ mL de água destilada dentro de um recipiente de alumínio próprio para utilização no equipamento. O equipamento foi previamente aquecido a 50 °C e calibrado com um recipiente de alumínio vazio. As amostras foram mantidas a 50 °C durante 1 min, em seguida foram aquecidas até 95 °C a uma taxa de 12 °C.min⁻¹ por 2,5 min e por fim o sistema foi resfriado até 50 °C a uma taxa de 11,8 °C.min⁻¹. Cada batelada teve duração de 13 min e a rotação das pás foi mantida constante a 160 rpm. O *software* do equipamento forneceu um resultado gráfico e cinco parâmetros (Canalis, 2017):

- Viscosidade de Pico (VP): viscosidade máxima alcançada pelo sistema. Ocasionalmente pelo inchamento dos grânulos de amido, devido a absorção de água e aumento da temperatura do sistema;
- Viscosidade Média (VM): viscosidade registrada após o sistema atingir a viscosidade máxima. Acontece a ruptura dos grânulos de amido e liberação da amilose, diminuindo a viscosidade;
- Viscosidade Final (VF): valor de viscosidade atingido na etapa de resfriamento. Ocorre a reassociação de moléculas de amilose e a viscosidade aumenta;

· Breakdown (VP-VM): mostra a facilidade com que os grânulos de amido podem ser desintegrados pela ação de forças de cisalhamento, é a quebra da viscosidade;

4.2.4.8 *Análise térmica (DSC)*

Realizou-se a análise térmica do amido pela técnica de calorimetria diferencial de varredura, utilizando-se o equipamento DSC 823e - Mettler (Toledo, Suíça) com o auxílio do *software* STARe (V 9.00, Mettler Toledo, Suíça) para análise dos resultados. Inicialmente pesou-se 20 µg de amido em cada cápsula de alumínio e adicionou-se 60 µg de água destilada. As cápsulas de alumínio foram hermeticamente seladas e permaneceram em repouso a temperatura ambiente por 24 h. Após o equilíbrio térmico do equipamento (25°C), as cápsulas foram submetidas a aquecimento até 120 °C a uma taxa de 10°C.min⁻¹. Uma cápsula vazia foi utilizada como referência em todos os ensaios. As transições térmicas foram caracterizadas pelas medidas da temperatura de início (T_o), temperatura de pico (T_p), temperatura final (T_f) e entalpia de transição (ΔH), calculada através da integralização dos picos endotérmicos. As temperaturas foram expressas em °C e a entalpia em J/g de amido.

4.2.4.9 *Distribuição granulométrica das partículas*

A distribuição granulométrica das partículas foi investigada pela técnica de difração a laser utilizando-se o analisador Horiba (LA 960, Irvine, Califórnia) com *range* de 100 nm a 500 µm. Esta técnica baseia-se no princípio de quando as partículas são expostas a um feixe de luz, desviam com um ângulo fixo. Quando o tamanho da partícula é menor, maior é o ângulo de difração de um feixe luminoso que a atravessa. Essa técnica não verifica o tamanho das partículas individuais. Através de transformações matemáticas complexas calcula-se a distribuição de tamanho de uma população de partículas (Canalis, 2017). Foram inseridas cerca de 0,5 g de amostra no equipamento, e a medição ocorreu quando a transmitância estava dentro dos padrões determinados pelo equipamento em cada amostra (ocorreu em aproximadamente dois min). Os ensaios foram realizados em duplicata, encontrando os valores de D10, D50, D90 e D4,3, onde D10 representa o diâmetro da partícula abaixo do qual 10% do volume total das partículas está distribuído, D50 representa o diâmetro da partícula abaixo do qual 50% do volume total das partículas está distribuído, D90 representa o diâmetro da partícula abaixo do qual 90% do volume total das partículas está distribuído, D4,3 é uma medida do diâmetro médio ponderado pelo volume, também

conhecido como diâmetro médio volumétrico, ele é calculado considerando o volume das partículas, ou seja, as partículas maiores têm um peso maior na média do que as partículas menores. E a largura da distribuição indica o quão ampla ou estreita é a distribuição dos tamanhos das partículas.

4.2.4.10 Difração de raio-x

Os padrões de raios X foram realizados no difratômetro de raios-X (PANalytical X'Pert PRO MDP). As amostras foram escaneadas na faixa de ângulos de 10-100 ° 2θ a uma taxa de 2 ° / min a 25 ° C. A cristalinidade relativa dos amidos foi calculada por deconvolução dos picos das curvas de difração de raios X, tomando-se uma função de distribuição gaussiana como formato dos picos cristalinos e halos amorfos. Utilizando-se o software Origin 2025, foram estimados os índices de cristalinidade com base nas áreas sob os picos cristalinos e a área total após a correção da baseline aplicando a Equação 16.

$$\text{Cristalinidade relativa (\%)} = \frac{\text{Área cristalina}}{\text{Área total}} \times 100 \quad (16)$$

4.2.5 Análise Estatística

Os resultados das análises físico-químicas, reológicas, morfológicas e estruturais foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) e as médias, comparadas pelo teste de Tukey a um nível de 5% de significância. A análise estatística foi realizada com o auxílio do *software* Statistica 10.0. (Statsoft, Estados Unidos) O *software* também foi utilizado para realização dos gráficos de superfície de resposta e curvas de contorno a partir da coleta dos dados das variáveis dependentes no Delineamento Composto Central Rotacional. Foi utilizado ainda o *software* Excel 2010 (Microsoft, Estados Unidos) para plotagem de gráficos.

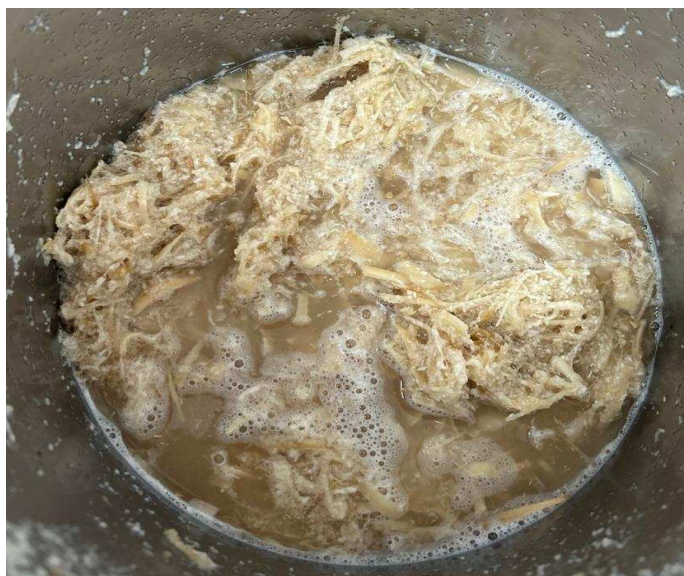
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Rendimento do amido de araruta

O rendimento de amido de araruta foi, em média, de 15,5%. Verificou-se que quantidades consideráveis de amido permaneceram aderidas às fibras após a primeira lavagem

(Figura 30). Portanto, foram realizadas um total de quatro lavagens para extrair o amido remanescente aderido às fibras. Assim, quanto maior o número de vezes que a fibra foi lavada, maior a quantidade de amido extraída. Os resultados obtidos neste estudo estão de acordo com os encontrados por Nogueira *et al.*, (2018) e Surendran *et al.*, (2025), onde o produto final obtido também foi um pó branco e inodoro com rendimento de 16,0% e 15,48% em base seca, respectivamente.

Figura 30- Fibras após a primeira lavagem



Fonte: Autora (2024).

Outra estratégia que pode ser adotada para aumentar a produtividade é processar os rizomas imediatamente após a colheita, considerando os resultados obtidos por Souza *et al.* (2016), que observaram maior produtividade quando os rizomas não foram armazenados sob refrigeração. Assim, observa-se que o processo de extração do amido de araruta é fortemente influenciado pela temperatura e tempo de armazenamento dos rizomas (Pafo, 2023).

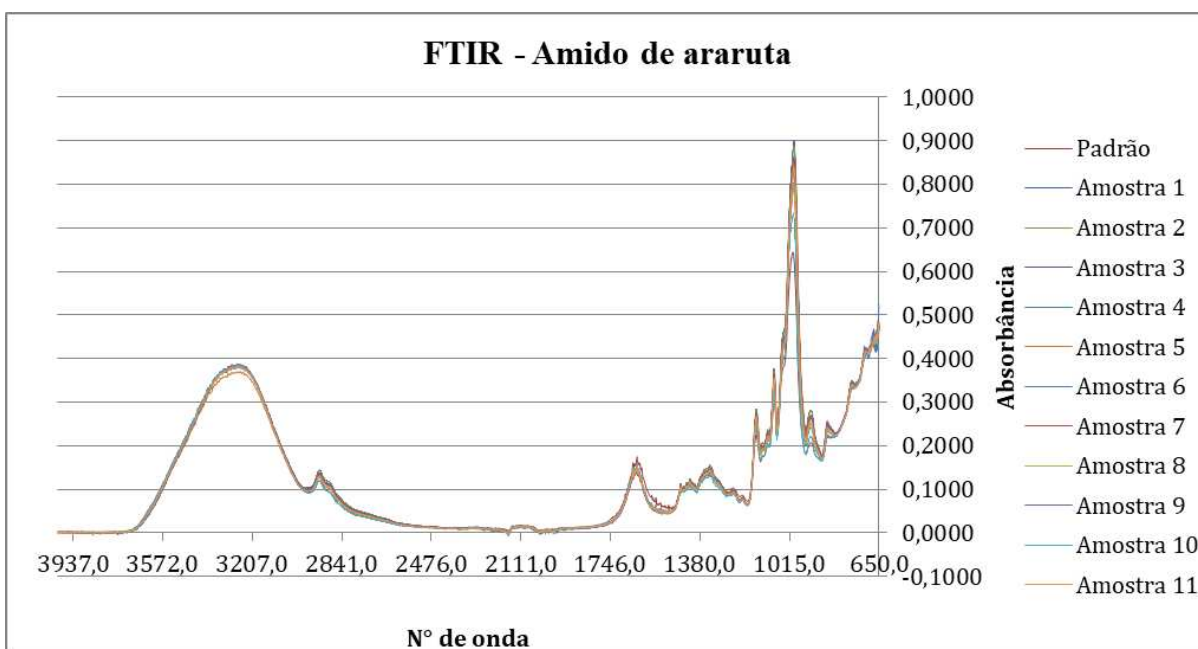
4.3.2 Análises do amido de araruta

4.3.2.1 Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR) das farinhas de trigo e dos amidos de araruta

Os resultados para Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR) dos amidos de araruta estão apresentados na Figura 31.

As amostras foram avaliadas para determinar a presença de grupos funcionais por meio de bandas, que explicam sua estrutura e para a verificação de possíveis alterações causadas pela ozonização. Nos gráficos acima demonstrados, o eixo x representa o número de onda (cm^{-1}), que está relacionado à energia da radiação infravermelha absorvida pelas moléculas da amostra. No eixo y, está sendo representada a absorbância, que indica a quantidade de radiação infravermelha que foi absorvida pela amostra em cada número de onda. Quanto maior a absorbância, maior a concentração do grupo funcional correspondente. Os picos no gráfico correspondem às frequências nas quais as moléculas da amostra absorvem energia, vibrando de maneira característica.

Figura 31– Gráfico FTIR dos amidos de araruta



Fonte: Autora (2024).

Amostras: 1(30g/5min); 2(30g/10min); 3(60g/5min); 4(60g/10min); 5(30g/7,5min); 6(60g/7,5min); 7(45g/5min); 8(45g/10min); 9(45g/7,5min); 10(45g/7,5min); 11(45g/7,5min).

O espectro é típico de um polissacarídeo, visto que ocorrem picos atribuídos ao anel de glicopirranose na região de $900\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$, além de outros picos característicos como 1645 cm^{-1} , mostrando a presença de grupos carboxílicos em amidos (Demiate *et al.*, 2000; Delval *et al.*, 2004). A banda larga em 3395 cm^{-1} está relacionada à presença de ligações de hidrogênio de grupos -OH . A região de $3500\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$ também corresponde às vibrações de estiramento da ligação O-H , indicando a presença de grupos hidroxila da D-glicose presente

no amido (Wang *et al.*, 2009), neste caso, que estão envolvidos nas ligações de hidrogênio inter e intramoleculares, e a sua largura atribuída à formação de ligações de hidrogênio inter e intramoleculares (Saikia; Konwar, 2012). Na região de 2900-2800 cm^{-1} está indicando a presença de grupos metil e metileno na cadeia carbônica da amilose e amilopectina. Já a região de 1650-1600 cm^{-1} está associada à água adsorvida ou à água presente em grupos hidroxila. E por fim, a região de 1150-1000 cm^{-1} , corresponde às vibrações de estiramento de ligações C-O, C-C e C-O-C, características da estrutura glicosídica do amido, lipídios (2.929 e 2.922 cm^{-1}). Bandas localizadas a, aproximadamente, 860 cm^{-1} são designadas como vibrações associadas com grupos CH_2 (Dantas *et al.*, 2013). Não foi possível observar grandes diferenças entre as amostras nas bandas de absorção, havendo apenas pequenas mudanças em suas absorbâncias.

A oxidação conduz à modificação de grupos hidroxila em grupos carbonila e carboxila nas moléculas de amido. A introdução de grupos carbonila pode ser confirmada por espectroscopia FTIR (Matta Júnior, 2015). Zhang *et al.* (2012) observaram uma banda na região de 1735,6 cm^{-1} que foi associada à formação de grupos carbonila e/ou carboxila. Entretanto, nos espectros dos amidos oxidados no presente trabalho, não foi possível identificar banda característica de carbonila (-C=O) dos grupos aldeídos e/ou carboxilas.

No estudo de Cunha (2016), as bandas de 3305 cm^{-1} para araruta redonda e para araruta seta, foram atribuídas aos grupos OH existentes nas moléculas do amido, que estão interagindo por ligações de hidrogênio. Já as bandas encontradas em 2922 cm^{-1} e 2929 cm^{-1} foram atribuídas à deformação axial da ligação C-H. Bandas de absorção em 1651 cm^{-1} foram relacionadas à vibração dos grupos OH pertencentes às moléculas de água ligadas à região amorfa dos grânulos de amido. As bandas de absorção em 1339 cm^{-1} a 1337 cm^{-1} são relacionadas a deformações de grupos C-OH.

Em um estudo realizado por Matta Júnior (2015), a análise dos espectros de FTIR das diferentes amostras de amidos de milho e de mandioca e dos seus pares modificados por oxidação, apresentou semelhança entre os espectros, com pequenas modificações da intensidade em apenas algumas bandas. Os espectros dos amidos de mandioca não mostraram uma modificação significativa na estrutura em nível molecular que permita uma diferenciação dos demais. Tanto o espectro do amido nativo, como o submetido ao processo de oxidação, mostrou bandas na região 2900-3000 cm^{-1} (estiramento de CH), em 1158, 1124 e 1103 cm^{-1} (estiramentos das ligações de C-O, C-C e algumas contribuições C-OH), em 1082, 1051, 1021, 994 e 928 cm^{-1} (deformação angular de C-OH e C-CH₂) e em 859 cm^{-1} (estiramento de

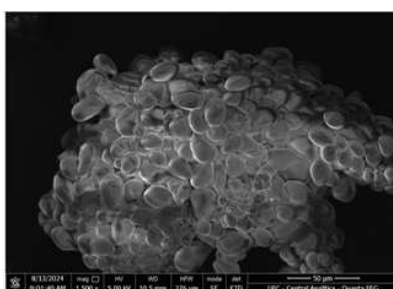
C-O-C e deformação de CH) (Cael; Koenig; Blackwell, 1973; Cael; Koenig; Blackwell, 1975).

Já no estudo de Nascimento (2021), analisando o amido de araruta, foram observados alongamentos de grupos –OH associado às bandas vibracionais entre 3.600 e 3.200 cm^{-1} , alongamento de grupos –CH em 2.940 – 2.875 cm^{-1} , vibração de grupos –OH de água presentes no amido em 1.653 – 1.645 cm^{-1} , torção dos grupos –CH₂ a 1.465 – 1.430 cm^{-1} e a banda de absorção na região de 1336 cm^{-1} se refere ao estiramento do grupo carboxílico CO₂. Bandas na região do espectro entre 1.082 – 1.070 cm^{-1} foram associadas a vibrações assimétricas C-O-C e 950 e 810 cm^{-1} , vibrações simétricas C-O-C, um típico alongamento característico em amidos, sendo bem semelhante ao que foi verificado no presente trabalho.

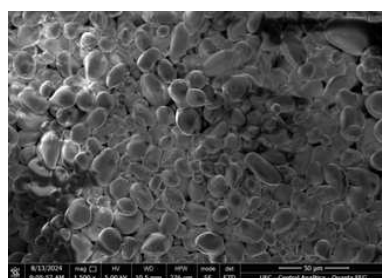
4.3.2.2 MEV

A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para investigar a morfologia dos grânulos de amido, bem como o efeito da modificação com ozônio. Na Figura 32 estão as imagens da MEV do amido de araruta.

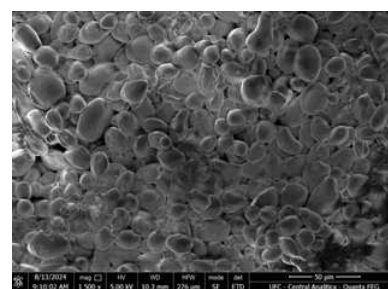
Figura 32– Microscopia Eletrônica de Varredura dos amidos de araruta com aumento de 1500x



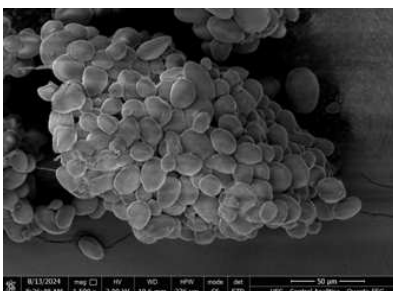
Amostra 1



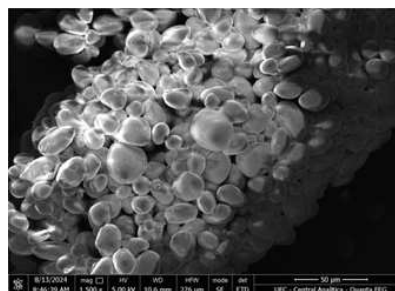
Amostra 2



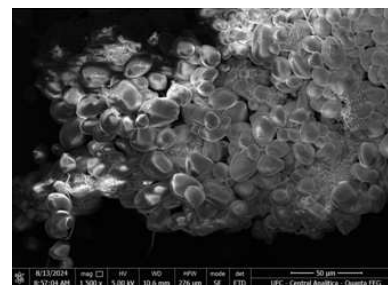
Amostra 3



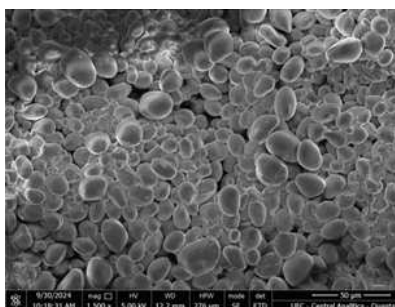
Amostra 4



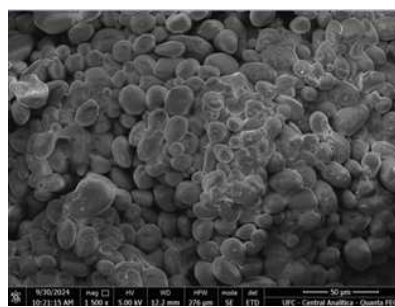
Amostra 5



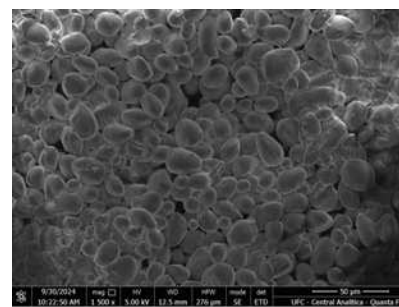
Amostra 6



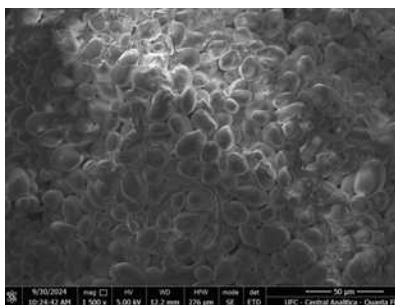
Amostra 7



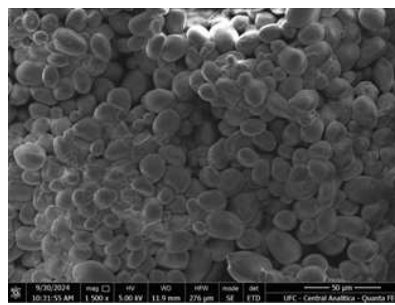
Amostra 8



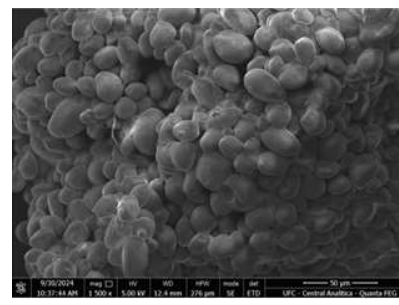
Amostra 9



Amostra 10



Amostra 11



Amostra controle

Fonte: Autora (2024).

É possível observar na Figura 32 que os grânulos de amido de araruta apresentam formas predominantemente circulares, com a maioria apresentando uma forma oval e alguns apresentando contornos irregulares. O tamanho médio desses grânulos é de aproximadamente 17 μm , com superfícies lisas e homogêneas, livres de rugosidades ou trincas aparentes. A suavidade e integridade das superfícies dos grânulos indicam a alta pureza do amido extraído (Silva *et al.*, 2023), sugerindo que os processos de extração e purificação foram eficientes e não causaram danos significativos à estrutura dos grânulos. Esta característica é importante para aplicações que exigem amidos de alta qualidade, como na indústria alimentícia, onde a textura e a consistência são fatores críticos.

Leonel, Cereda e Sarmento (2002) também utilizaram a microscopia eletrônica de varredura para analisar a forma e tamanho de grânulos de amido de araruta e, como no presente trabalho, observaram grânulos circulares e ovalados. O trabalho de Ferrari, Leonel e Sarmento (2005) mostrou que há diferença no tamanho dos grânulos do amido de araruta dependendo do estágio de desenvolvimento da planta. Com 12 meses de cultivo, o tamanho médio do diâmetro fica na faixa de 20 a 27 μm e para amidos com 14 meses de cultivo, o tamanho do grânulo sobe para 25 a 32 μm . Isso pode implicar que no presente estudo, a planta poderia estar um pouco antes dos 12 meses de cultivo ou o local de plantio tenha influenciado no tamanho destes grânulos, comparado com o que constatou Ferrari, Leonel e Sarmento (2005).

Diferentemente do que foi observado neste estudo, Li *et al.* (2023) perceberam que à medida que o tempo de oxidação aumentou, mais faces dos grânulos de amido foram rompidas. Quando o tempo de oxidação foi aumentado para 4 h, a superfície dos grânulos de amido de arroz ceroso ozonizado era quase toda côncava e a morfologia dos grânulos era poligonal. Essas descobertas indicaram que o ozônio atacou primeiro a superfície dos grânulos de amido e então penetrou no interior dos grânulos. O maior tempo de oxidação causou deformação severa dos grânulos de amido. É possível que a resposta à ozonização neste estudo tenha sido diferente em decorrência da diferença de matriz utilizada e de diferentes tempos de exposição ao ozônio, visto que no trabalho de Li *et al.* (2023) os autores utilizaram um tempo 24 vezes maior que o utilizado no presente trabalho.

No estudo de Sandhu, Manthey e Simsek. (2012), a análise visual por microscopia eletrônica de varredura também não indicou efeitos do tratamento com ozônio no amido de trigo. No estudo de Yang *et al.*, (2024) não foi possível perceber variação na morfologia dos nanocristais de amido após ser tratado com ozônio, provavelmente devido à cristalinidade relativamente alta com estrutura de superfície compacta.

Amidos de quinoa foram estudados e apresentaram similaridades sem rachaduras ou poros visíveis, tanto o nativo, quanto os ozonizados (Ramos *et al.*, 2024). He *et al.* (2023) e Castanha *et al.*, (2020) trataram amido de batata-doce (15–60 min) e de milho (15 min), respectivamente, com ozônio e também não observaram diferenças significativas na superfície e no formato dos grânulos após o tratamento.

Çatal e Ibanoglu (2012) observaram que amidos de batata ozonizados por 60 min apresentaram superfícies mais rugosas e fibrosas, no entanto estas alterações foram de difícil visualização até para os próprios autores. Alguns fatores são responsáveis pela divergência sobre a intensidade de modificação dos amidos ozonizados, tais como: diferenças na concentração de ozônio e tempo de exposição ao gás, fonte de amido e tempo de reação (Klein *et al.*, 2014; Oladebeye *et al.*, 2013). É possível perceber que estudos que apresentaram algumas diferenças entre os amidos tratados e não tratados com ozônio, foram os que se utilizaram de maiores períodos de exposição ao ozônio do que os utilizados neste trabalho.

A ozonização não promoveu modificações estruturais visíveis no amido de araruta. Os grânulos mantiveram sua morfologia original, com superfícies lisas e sem fissuras ou rugosidades aparentes, mesmo após exposição ao ozônio. Isto sugere que o processo de ozonização, nas condições aplicadas, não alterou significativamente a aparência física ou integridade dos grânulos de amido. No entanto, é importante notar que embora não tenham sido observadas alterações visuais, a ozonização ainda pode ter induzido modificações

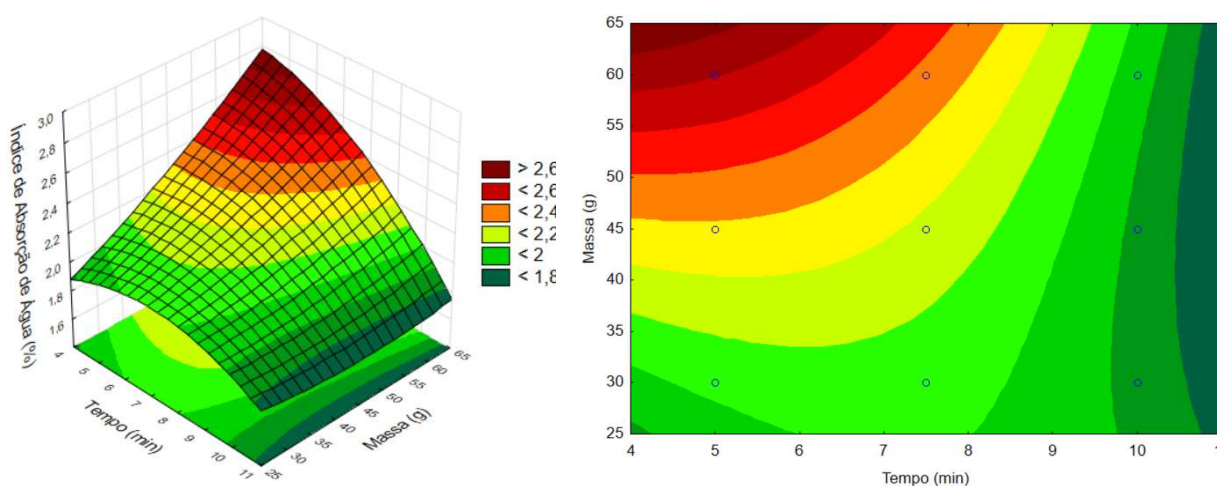
químicas ou moleculares sutis, como a oxidação de grupos hidroxila ou a clivagem de ligações glicosídicas, o que poderia afetar as propriedades funcionais do amido.

Além disso, a ausência de trincas pode estar ligada à menor suscetibilidade à degradação enzimática e à maior estabilidade durante o processamento térmico. Essas propriedades morfológicas e estruturais do amido de araruta destacam seu potencial para uso em formulações que exigem controle preciso de viscosidade, gelificação e retenção de água, como em molhos, sobremesas e produtos de panificação.

4.3.2.3 Poder de Inchamento e Índice de absorção em água

Analisando a Figura 33, podemos verificar que o Índice de Absorção em Água à temperatura ambiente apresenta seu ponto máximo (2,6%) no tempo de tratamento de 5 min e quantidade de 60 g dentro do reator (maior massa e menor tempo). Quando a quantidade de amido no reator foi de 30 g, o IAA foi de $< 2,0\%$, independente do tempo de exposição. Já em menores quantidades de amido no reator, o tempo influenciou para a diminuição de absorção de água. Os maiores valores de IAA estão mais próximos do amido não tratado. Isso implica que o tratamento com ozônio influenciou na sua diminuição, já que quanto maior o tempo, menor o IAA.

Figura 33 – Influência da ozonização no Índice de Absorção à temperatura ambiente dos amidos de araruta

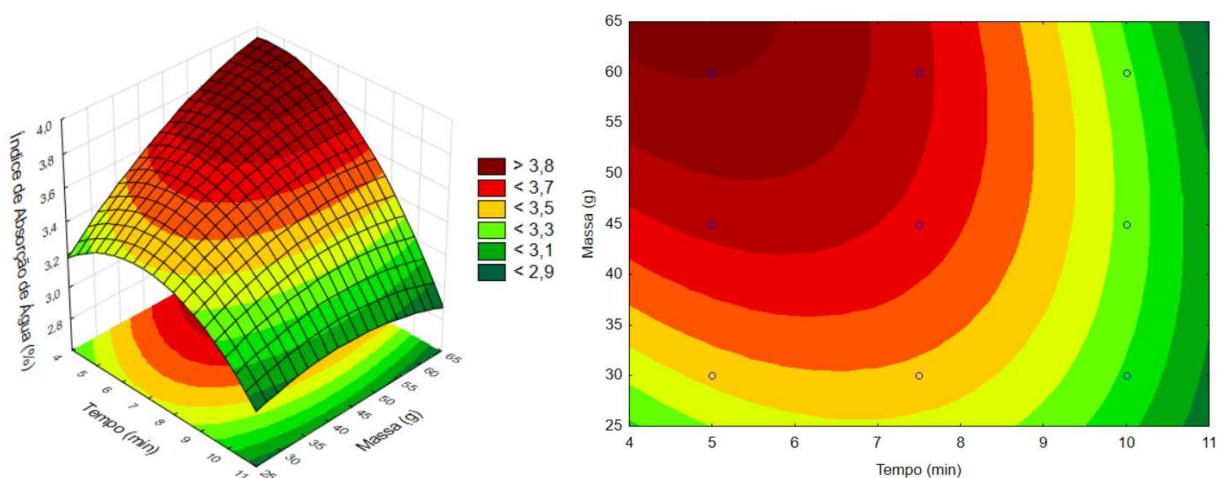


Fonte: Autora (2025).

Quando analisamos a Figura 34 podemos perceber basicamente o mesmo

comportamento do Índice de absorção à temperatura ambiente, no entanto, sob a ação do calor, os valores do Índice de Absorção são maiores, estando o ponto 6 (60g/7,5min) se apresentando até maior que o IAA da amostra controle. É possível perceber que seu ponto máximo ($> 3,6$) foi quando a massa foi maior (60 g) em um tempo menor (5 min). Este parâmetro apresentou diminuição combinando o aumento do tempo e redução da massa.

Figura 34 – Influência da ozonização no Índice de Absorção sob ação do calor (90 °C) dos amidos de araruta



Fonte: Autora (2025).

O índice de absorção de água dos amidos foi influenciado significativamente ($p < 0,05$) pela quantidade de amido inserida no reator e pelo tempo de exposição ao ozônio. Observou-se que os amidos à temperatura ambiente (25 °C) apresentaram maior IAA quanto maior a quantidade de amido inserida no reator, principalmente em períodos de exposição de até 7 min ($> 2,6\%$). Como o tempo de exposição foi prolongado, independente da quantidade de amido no reator, os valores do índice de absorção de água foram menores ($< 2,4\%$).

O amido nativo obteve um IAA de $(2,06 \pm 0,02$ a 25 °C e $4,46 \pm 0,07$ a 90 °C), portanto, a modificação do ozônio tem um efeito redutor nos valores de IAA no amido de araruta. O mesmo comportamento pode ser observado quando os amidos foram expostos à temperatura de 95 °C durante o processo de gelatinização. O IAA aumentou quando comparado aos amidos expostos a 25 °C. Foi observada menor influência do tempo de modificação do ozônio e também da quantidade de amido utilizado. Assim, se utilizarmos 35 g de amido no reator correlacionado com até 8 min de processo, obtemos IAA superior a

3,5%.

Neste contexto, a redução na capacidade de absorção de água dos amidos pode estar associada a alterações estruturais e químicas nas moléculas do amido causadas pela exposição ao ozônio. Neste caso, o ozônio pode estar agindo através de alguns mecanismos: I) degradação das cadeias de amido; II) aumento da compactação estrutural; III) perda de grupos hidrofílicos e IV) redução da capacidade de intumescimento.

O mecanismo I está relacionado à clivagem oxidativa das cadeias polissacarídicas (amilose e amilopectina) presentes no amido. Essa degradação reduz o comprimento das cadeias poliméricas, resultando em moléculas menores e com menor capacidade de formar redes tridimensionais capazes de reter água (Gong *et al.*, 2024). Este efeito é particularmente importante nas regiões amorfas do amido, que são mais suscetíveis à ação oxidativa e são as primeiras a sofrer degradação.

Por outro lado, no mecanismo II, a oxidação promovida pelo ozônio pode levar à introdução de novos grupos funcionais, como carbonilas (-C=O) e carboxilas (-COOH) nas moléculas de amido, o que provoca uma reorganização das cadeias poliméricas, proporcionando maior compactação da estrutura granular (Lima *et al.*, 2020). Quando a estrutura granular se comporta desta forma, a capacidade da água de penetrar e interagir com as moléculas de amido é reduzida.

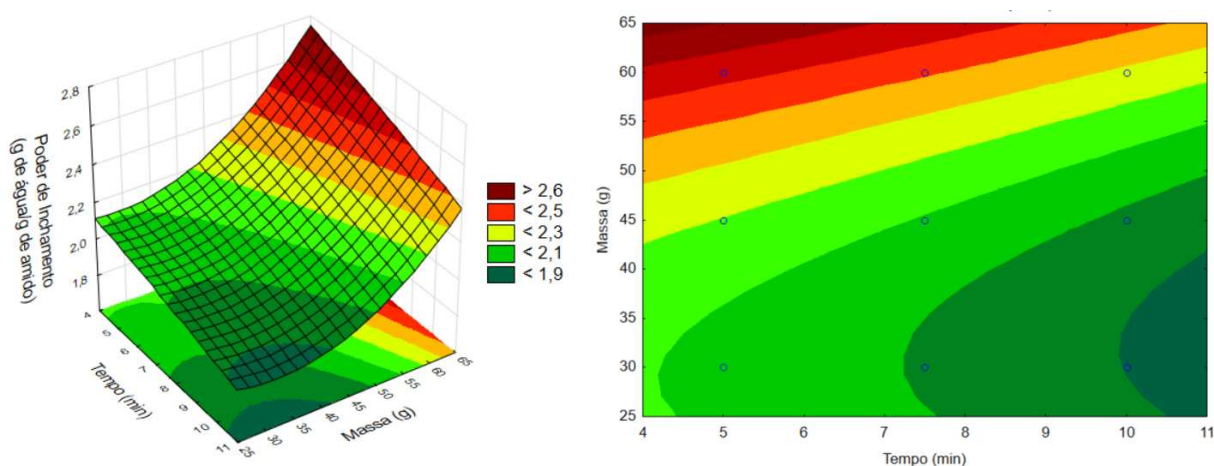
Durante o processo de oxidação, através do mecanismo III, os grupos hidroxila (-OH) nas cadeias de amido podem ser convertidos em outros grupos funcionais, como carbonilas e carboxilas. As hidroxilas desempenham papel fundamental na absorção de água pelo amido, portanto, a redução destes grupos promove a redução do número de pontos de ligação disponíveis para as moléculas de água, limitando a capacidade de hidratação do amido (Vanier *et al.*, 2017).

Em relação ao Poder de Inchamento à temperatura ambiente (Figura 35), este também apresentou o seu ponto máximo ($> 2,5$) quando a quantidade de amido no reator foi maior (60 g) e o tempo foi menor (5 min). Conforme a quantidade de amido no reator vai diminuindo e o tempo aumentando, o Poder de Inchamento decresce.

O Poder de Inchamento sob ação do calor (Figura 36) apresentou valores maiores e um aumento gradativo em relação ao aumento da massa, embora seja possível perceber que neste parâmetro o ponto máximo também tenha sido quando o tempo foi menor e a quantidade de amido no reator foi maior. Quando a massa de amido foi baixa (30 g) e o tempo de tratamento alto (10 min), o Poder de Inchamento apresentou seu ponto mínimo ($> 4,5$).

O poder de inchamento do amido foi significativamente influenciado pela quantidade de amido introduzido no reator e pela duração do processo de ozonização. Em geral, quando a quantidade de amido no reator ultrapassou 55 g, o poder de inchamento à temperatura ambiente apresentou valores mais elevados ($> 2,3$ g de água/g de amido). Por outro lado, o aumento do tempo de ozonização reduziu o poder de inchamento, principalmente quando menores quantidades de amido foram utilizadas no reator. Isto ocorre porque, em condições com menos amido disponível, há maior interação entre o ozônio e as moléculas de amido, resultando em modificações estruturais mais intensas que restringem o inchaço à temperatura ambiente.

Figura 35 – Influência da ozonização no Poder de Inchamento à temperatura ambiente (25 °C) dos amidos de araruta

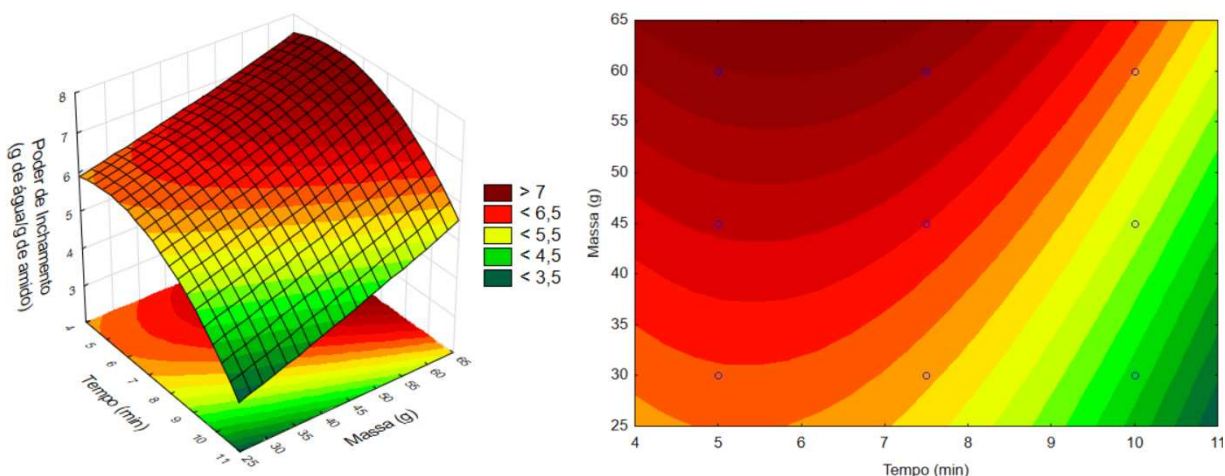


Fonte: Autora (2025).

Porém, quando o amido foi submetido ao processo de gelatinização a 90 °C, foi observado um aumento significativo no poder de inchamento, atingindo valores acima de 6,5 g de água/g de amido, mesmo em condições com menores quantidades de amido no reator. A esta temperatura, a gelatinização parece minimizar os efeitos negativos da ozonização, pois o calor promove a quebra das ligações intermoleculares e o inchaço das cadeias poliméricas. Para tempos de exposição ao ozônio de até 7 min, o poder de inchamento manteve-se elevado, com valores superiores a 6,0 g de água/g de amido. Além disso, à medida que a quantidade de amido no reator aumentou, o poder de inchamento apresentou uma tendência crescente, sugerindo que maiores quantidades de amido podem diluir o efeito oxidativo do ozônio, preservando a funcionalidade do amido. Quando a quantidade de amido no reator é elevada (> 55 g), o ozônio disponível por grama de amido é relativamente menor. Isto reduz a

intensidade das reações oxidativas, preservando melhor a estrutura granular do amido e, consequentemente, permitindo maior poder de inchamento.

Figura 36 – Poder de Inchamento sob ação do calor (90 °C) dos amidos de araruta



Fonte: Autora (2025).

É possível observar que tanto o poder de inchamento, quanto o índice de absorção foram maiores nas amostras submetidas à ação do calor, isso se dá porque quando o amido é aquecido em excesso de água, acima da temperatura de empastamento, a estrutura cristalina é rompida pelo relaxamento das pontes de hidrogênio e as moléculas de água interagem com os grupos hidroxilas da amilose e da amilopectina. Isso causa um aumento do tamanho dos grânulos devido ao inchamento com parcial solubilização (Hoover, 2001).

O resultado das médias e desvios controle do Índice de Absorção e Poder de Inchamento do amido, na temperatura ambiente e sob a ação do calor, estão expressos na Tabela 10.

Em relação às amostras submetidas ao calor, os valores foram maiores. Como podemos observar na Tabela 10, no Índice de Absorção à temperatura ambiente a amostra controle diferiu significativamente ($p < 0,05$) das amostras 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10 e 11. As amostras 2, 3, 4 e 6 diferiram significativamente de todas as outras, as amostras 9, 10 e 11, como esperado, não diferiram a um nível de significância de 5%. Já em relação ao Índice de Absorção sob ação do calor, a amostra controle diferiu significativamente ($p < 0,05$) de todas as outras, bem como a amostra 3, as amostras 9, 10 e 11 não diferiram neste parâmetro, assim como no Poder de Inchamento, independente da temperatura.

Tabela 10 - Índice de absorção de água e poder de inchamento dos amidos de araruta em temperatura ambiente e sob a ação do calor.

Amostras	Índice de absorção (%) T = 25 °C	Índice de absorção (%) T = 90 °C	Poder de inchamento (g de água/g de amido) T = 25 °C	Poder de inchamento (g de água/g de amido) T = 90 °C
Controle	2,06 ^f ±0,02	4,46 ^g ±0,07	2,08 ^{ef} ±0,04	4,48 ^a ±0,04
1	2,05 ^f ±0,01	3,50 ^{de} ±0,03	2,04 ^{ef} ±0,03	6,17 ^{eh} ±0,02
2	1,77 ^d ±0,02	3,08 ^c ±0,02	1,82 ^d ±0,03	4,20 ^d ±0,03
3	2,65 ^a ±0,01	3,97 ^a ±0,04	2,65 ^a ±0,02	7,37 ^b ±0,02
4	1,87 ^c ±0,02	3,12 ^c ±0,02	2,36 ^b ±0,03	5,79 ^f ±0,03
5	2,11 ^{fg} ±0,02	3,50 ^{de} ±0,01	2,10 ^{eg} ±0,02	6,04 ^e ±0,04
6	2,40 ^b ±0,03	3,75 ^b ±0,02	2,21 ^c ±0,02	7,65 ^a ±0,01
7	2,20 ^e ±0,01	3,59 ^{df} ±0,03	2,11 ^g ±0,02	6,95 ^c ±0,03
8	2,04 ^f ±0,01	3,47 ^e ±0,04	1,97 ^f ±0,01	5,63 ^f ±0,03
9	2,13 ^{eg} ±0,03	3,60 ^f ±0,08	2,12 ^g ±0,02	6,28 ^{gh} ±0,02
10	2,16 ^g ±0,04	3,65 ^f ±0,01	2,12 ^g ±0,03	6,34 ^g ±0,04
11	2,13 ^g ±0,02	3,66 ^{bf} ±0,03	2,12 ^g ±0,02	6,27 ^{gh} ±0,02

Fonte: Autora

Amostras: 1(30g/5min); 2(30g/10min); 3(60g/5min); 4(60g/10min); 5(30g/7,5min); 6(60g/7,5min); 7(45g/5min); 8(45g/10min); 9(45g/7,5min); 10(45g/7,5min); 11(45g/7,5min).

Cada valor representa a média e o desvio controle das repetições.

Valores com letras minúsculas diferentes em cada coluna representam diferença significativa ($p < 0,05$).

Em relação ao Poder de Inchamento, a amostra controle não diferiu significativamente das amostras 1, 5 e 8, as demais amostras diferiram entre si, já o Poder de Inchamento sob a ação do calor, a amostra controle só não diferiu da amostra 6. A amostra 1 não diferiu da amostra 5 nem das amostras 9 e 10. A amostra 4 também não se diferenciou da amostra 8. As demais amostras diferiram entre si.

Wang e Wang (2003) dizem que a oxidação favorece o poder de inchamento dos grânulos de amido, isto ocorre por conta do processo de despolimerização das cadeias de amilose e amilopectina, sendo que a amilose é mais suscetível a despolimerização devido à sua natureza mais acessível e à sua estrutura linear. Este aumento do poder de inchamento do

amido oxidado pode se dar também devido à introdução de grupos carboxílicos hidrofóbicos e da repulsão entre cargas negativas (Chan *et al.*, 2009). Conforme Chan *et al.* (2009) e An *et al.* (2009), a oxidação com gás ozônio leva ao aumento do poder de inchamento do amido de milho e de arroz, respectivamente.

O poder de inchamento e o índice de absorção de água foram significativamente maiores nas amostras submetidas ao tratamento térmico. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que quando o amido é aquecido em excesso de água a temperaturas acima do seu ponto de gelatinização, a estrutura cristalina é rompida. Esse processo ocorre pelo relaxamento das ligações de hidrogênio, permitindo que as moléculas de água penetrem e interajam com os grupos hidroxila presentes na amilose e na amilopectina. Como resultado, os grânulos de amido sofrem uma expansão volumétrica considerável, acompanhada por uma solubilização parcial dos polímeros constituintes. Além disso, o aquecimento pode levar ao desenrolamento parcial das cadeias de amilopectina, aumentando ainda mais a capacidade do amido de absorver água (Du *et al.*, 2024). Esta propriedade é crucial em diversas aplicações alimentícias, como melhorar a textura e aumentar a retenção de umidade em produtos processados (Hoover, 2001; Du *et al.*, 2023).

O aumento do poder de inchamento observado no amido oxidado também pode ser atribuído à introdução de grupos carboxílicos, que apresentam características hidrofílicas. Esses grupos potencializam a interação com as moléculas de água, facilitando a penetração da água nos grânulos de amido. Além disso, a presença de cargas negativas nos grupos carboxílicos gera repulsão eletrostática entre as cadeias poliméricas do amido, contribuindo para a expansão dos grânulos e aumento da capacidade de retenção de água.

No entanto, é possível perceber redução deste poder de inchamento em algumas amostras, à temperatura ambiente. Lawal *et al.* (2005) explicam que esta diminuição após a oxidação é atribuída a uma desintegração estrutural dentro do grânulo de amido durante o processo de modificação.

O alto poder de inchamento e o elevado índice de absorção de água conferem ao amido características funcionais desejáveis para aplicações em produtos que requerem textura macia, elevada viscosidade e maior estabilidade na formação de géis. Por outro lado, amidos que apresentam baixo poder de inchamento são mais indicados para formulações de produtos secos e crocantes, ou em sistemas onde se busca mínima interferência na textura e no teor de umidade.

4.3.2.4 Cor

Na Tabela 11 estão expressos os valores de L^* , a^* (verde (-) ao vermelho (+)) e b^* ((azul (-) ao amarelo (+)) e ΔE dos amidos de araruta, onde pode-se perceber diferenças significativas ($p < 0,05$) nas amostras entre si, em relação à amostra controle. As amostras que não diferiram significativamente foram apenas a 5 e 6, 2 e 10 e 8 e 9. O parâmetro L^* variou de $93,37 \pm 0,44$ (amostra controle) até $96,27 \pm 0,56$ (amostra 8), a^* variou de $0,32 \pm 0,05$ (amostra 2) à $0,80 \pm 0,06$ (amostra 3), b^* variou de $7,13 \pm 0,18$ (amostra 7) à $8,33 \pm 0,19$ (amostra 3) e ΔE variou de 0,50 (amostra 7) à 2,64 (amostra 11).

Tabela 11 - Parâmetros colorimétricos dos amidos de araruta.

Amostras	L^*	a^*	b^*	ΔE
Controle	$93,37^a \pm 0,44$	$0,79^a \pm 0,05$	$8,16^a \pm 0,46$	-
1	$94,06^{ab} \pm 0,84$	$0,59^{ab} \pm 0,03$	$7,43^a \pm 0,42$	$2,07^b$
2	$96,59^b \pm 1,09$	$0,32^b \pm 0,05$	$7,30^a \pm 0,57$	$1,15^f$
3	$94,05^{ab} \pm 1,27$	$0,80^a \pm 0,06$	$8,33^a \pm 0,19$	$1,95^c$
4	$94,65^{ab} \pm 0,38$	$0,62^{ab} \pm 0,21$	$7,68^a \pm 0,59$	$1,43^e$
5	$96,13^{ab} \pm 1,03$	$0,48^{ab} \pm 0,19$	$7,44^a \pm 0,36$	$1,51^d$
6	$94,60^{ab} \pm 1,06$	$0,66^{ab} \pm 0,19$	$7,35^a \pm 0,2$	$1,61^d$
7	$95,02^{ab} \pm 1,24$	$0,50^{ab} \pm 0,06$	$7,13^a \pm 0,18$	$0,50^h$
8	$96,27^{ab} \pm 0,56$	$0,56^{ab} \pm 0,11$	$7,49^a \pm 0,24$	$0,76^g$
9	$95,71^{ab} \pm 1,25$	$0,53^{ab} \pm 0,17$	$8,00^a \pm 0,85$	$0,76^g$
10	$95,14^{ab} \pm 0,50$	$0,53^{ab} \pm 0,05$	$7,43^a \pm 0,17$	$1,15^f$
11	$93,48^a \pm 1,16$	$0,49^{ab} \pm 0,09$	$7,41^a \pm 0,58$	$2,64^a$

Fonte: Autora

Amostras: 1(30g/5min); 2(30g/10min); 3(60g/5min); 4(60g/10min); 5(30g/7,5min); 6(60g/7,5min); 7(45g/5min); 8(45g/10min); 9(45g/7,5min); 10(45g/7,5min); 11(45g/7,5min).

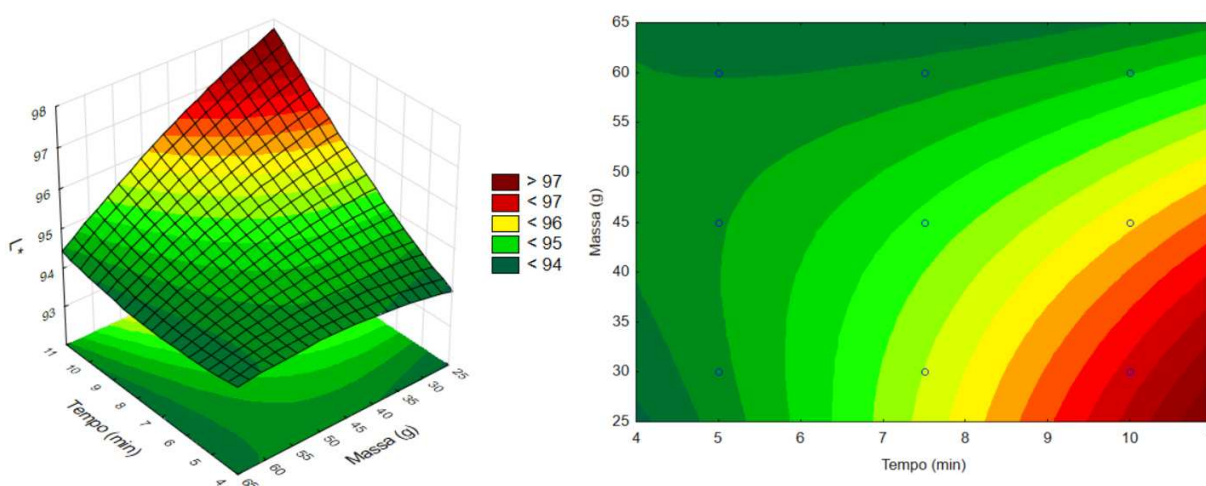
Cada valor representa a média e o desvio controle das repetições.

Valores com letras minúsculas diferentes em cada coluna representam diferença significativa ($p < 0,05$).

As amostras 2, 4, 7, 8, 9 e 10 apresentaram pouca distinção em relação à amostra controle, já as demais amostras apresentaram apenas distinção em relação a esta, já que o parâmetro é dividido em “muito distintas”, “distintas” e “pouco distintas” quando o valor de ΔE foi superior a 3,0, entre 1,5 e 3,0, e inferior a 1,5, respectivamente (Tiwari *et al.*, 2008).

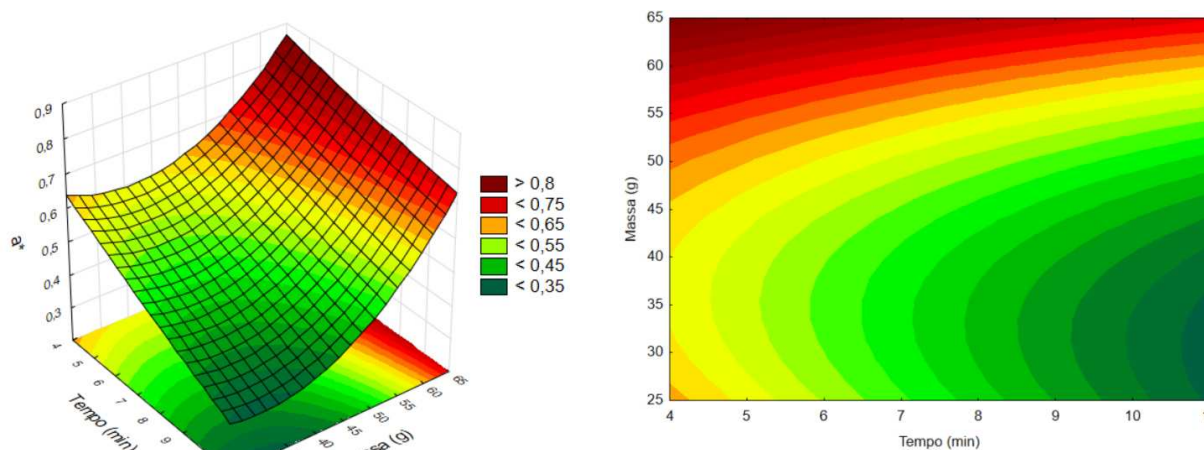
Analisando cada um dos parâmetros em relação à influência da ozonização, temos os gráficos de superfície de resposta (Figuras 37, 38 e 39) que mostram que quanto maior o tempo de tratamento e menor a quantidade de amido no reator, mais branca é a amostra, com valores de L^* maior que 97 (já que quanto mais próximo de 100, mais branca é a amostra (Ortolan; Hecktheuer e Miranda, 2010)). Já em relação ao parâmetro a^* , tem-se que quanto maior a massa, maior o valor de a^* , com uma pequena influência do tempo quando este foi de 5 min, logo, quanto maior a massa de amostra no reator, mais a amostra tende para tons vermelhos. E por fim, no parâmetro b^* , a influência do ozônio se comportou de maneira semelhante ao parâmetro anterior, no entanto, sendo de forma menos gradativa, seu menor valor (mais azul) foi na amostra com menos tempo de tratamento (5 min) e menor massa (30 g). É possível que esses valores de aumento de luminosidade e aproximação da cor azulada sejam devido a oxidação causada pela ozonização.

Figura 37 – Efeito da ozonização na luminosidade dos amidos de araruta



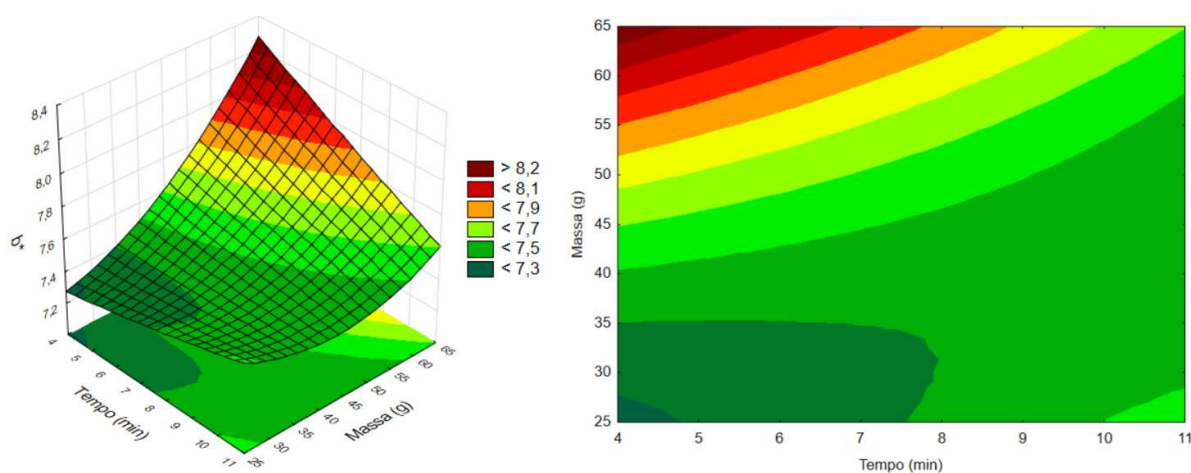
Fonte: Autora (2025).

Figura 38 – Efeito da ozonização no parâmetro a^* dos amidos de araruta



Fonte: Autora (2025).

Figura 39 – Efeito da ozonização no parâmetro b^* dos amidos de araruta



Fonte: Autora (2025).

No trabalho de Ozaslan e Ibanoglu (2022) foi observado que houve um aumento estatisticamente significativo no valor de luminosidade L das amostras ozonizadas com o aumento do tempo de ozonização ($P \leq 0,05$). Os valores de (a) das amostras diminuíram com o aumento do tempo de ozonização, conforme mostrado pelo aumento dos valores negativos

de a. O exame visual das amostras a olho nu mostrou que não foi possível detectar nenhuma mudança de cor macroscopicamente.

Já no estudo de Amorim (2011), os valores de L^* das amostras de amido de mandioca submetidas aos tratamentos de ozonização nas condições estudadas não diferiram significativamente dos valores das amostras controle e controle. O efeito do tempo de exposição não foi observado quando o amido foi tratado nas concentrações de ozônio empregadas. No entanto, para o tratamento a 40 ppm, o valor de a^* , no tempo de 30 min, diferiu dos valores nos demais tempos de exposição. Para o tratamento a 118 ppm, o valor de a^* também variou com o tempo de exposição. Com relação aos valores de b^* , houve diferença significativa entre as amostras ozonizadas, por 30 e 60 min, e as amostras controle e controle, tendo as amostras tratadas valores de b^* superiores aos das amostras controle e controle. Para os tempos de 90 e 120 min de tratamento, por sua vez, não foi observada diferença significativa entre os valores de b^* das amostras avaliadas. Os valores de ΔE indicaram a diferença total de cor, expressa pela diferença de cor entre as amostras ozonizadas e a controle.

Foi possível notar maior luminosidade nas amostras tratadas e distinção destas em relação à amostra controle, principalmente nas amostras que passaram por maior tempo de tratamento.

4.3.2.5 Comportamento reológico

Como podemos observar na Tabela 12, todas as amostras de amidos de araruta estudadas no presente trabalho apresentaram um comportamento Newtoniano, logo, a viscosidade permanece constante, independentemente da taxa de deformação ou tensão de cisalhamento aplicada. É possível perceber que neste parâmetro, as amostras não diferiram entre si, nem mesmo em relação à amostra controle. Em relação à viscosidade, pode-se observar que a amostra controle não diferiu significativamente ($p < 0,05$) das amostras 4 (60g/10 min) e 5 (30g/7,5 min), estas diferiram entre si. As amostras 6 (60g/7,5 min) e 7 (45g/5 min) também não diferiram significativamente e como esperado, as amostras 9, 10 e 11 (45g/7,5 min) também não diferiram entre si. As demais amostras apresentaram diferença significativa com o teste de Tukey a 5% de significância.

Tabela 12 - Modelo reológico dos amidos de araruta.

Amostras	Modelo Reológico	Modelo Matemático	Coefficiente de Determinação (R²)	Viscosidade (Pa.s)
Controle	Newtoniano	$y = 0,0050x + 0,0765$	0,9987	0,0050 ^{ab} ±0,00
1	Newtoniano	$y = 0,0018x + 0,0749$	0,9960	0,0018 ^d ±0,00
2	Newtoniano	$y = 0,0033x + 0,005$	0,9974	0,0033 ^f ±0,00
3	Newtoniano	$y = 0,0009x + 0,0095$	0,9784	0,0009 ^e ±0,00
4	Newtoniano	$y = 0,0049x + 0,0475$	0,9993	0,0040 ^b ±0,00
5	Newtoniano	$y = 0,0057x + 0,0697$	0,9985	0,0063 ^a ±0,00
6	Newtoniano	$y = 0,0028x + 0,0398$	0,9989	0,0028 ^g ±0,00
7	Newtoniano	$y = 0,0029x - 0,0067$	0,9976	0,0028 ^g ±0,00
8	Newtoniano	$y = 0,0041x - 0,0591$	0,9993	0,0042 ^c ±0,00
9	Newtoniano	$y = 0,0033x + 0,0237$	0,9996	0,0013 ^h ±0,00
10	Newtoniano	$y = 0,0018x - 0,0742$	0,9976	0,0012 ^h ±0,00
11	Newtoniano	$y = 0,0011x - 0,0184$	0,9931	0,0013 ^h ±0,00

Fonte: Autora (2025)

y = tensão (Pa); x = deformação (1/s). Coeficiente angular = viscosidade (Pa.s).

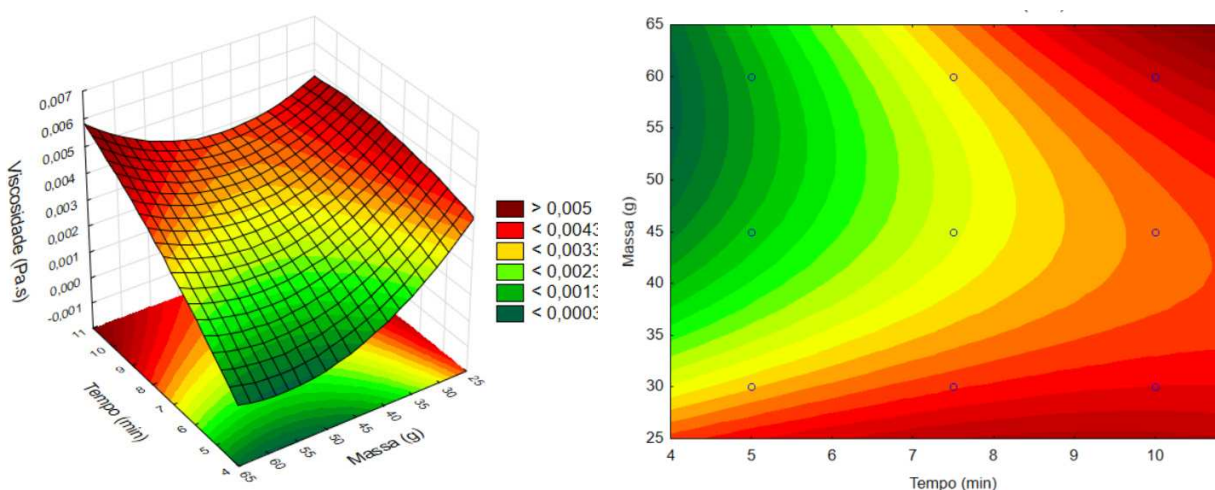
Amostras: 1(30g/5min); 2(30g/10min); 3(60g/5min); 4(60g/10min); 5(30g/7,5min); 6(60g/7,5min); 7(45g/5min); 8(4g/10min); 9(45g/7,5min); 10(45g/7,5min); 11(45g/7,5min).

Cada valor de viscosidade representa a média e o desvio controle das repetições.

Valores com letras minúsculas diferentes em cada coluna representam diferença significativa ($p < 0,05$).

Ao analisarmos a influência do ozônio na viscosidade (Figura 40), podemos perceber que onde o ozônio mais influenciou foi na amostra 3 (60g/5 min), onde o valor de viscosidade foi menor ($> 0,0003$), pois ao compararmos com o amido controle, esta foi a que mais se distanciou. O que corroborou com o que foi dito por He *et al.* (2023), onde foi concluído que a exposição ao ozônio reduziu a natureza sólida das pastas, tornando-as mais líquidas. É possível perceber também que quanto menor a quantidade de amido no reator e maior o tempo, mais alta a viscosidade se apresenta.

Figura 40 – Influência da ozonização na viscosidade dos amidos de araruta.



Fonte: Autora (2025).

Chan *et al.* (2011) observaram que amidos de tapioca, milho e sagu ozonizados por 1, 3, 5, 7 e 10 min apresentaram valores de índice de comportamento de fluxo (n) mais elevados em comparação aos amidos não ozonizados. Todos demonstraram comportamento não newtoniano, com redução da viscosidade à medida que a taxa de cisalhamento aumentava. A oxidação ocorreu predominantemente nas lamelas amorfas, resultando em maior despolimerização de amilose nas bordas dos grânulos de amido de milho comum.

Çatal e İbanoglu (2014) investigaram o fluxo e a consistência de amidos não tratados e ozonizados a 60 °C, constatando que todos apresentaram comportamento não newtoniano, com índices de comportamento (n) inferiores a 1,00. Os amidos ozonizados

exibiram afinamento por cisalhamento mais acentuado, refletido em valores de n ainda menores, indicando um desvio maior do comportamento newtoniano. Esse efeito foi atribuído à degradação parcial das moléculas de amido causada pela ozonização, conforme sugerido por Chan *et al.* (2011).

Além disso, Çatal e İbanoglu (2014) relataram que a viscosidade das amostras de amido de trigo, tanto controle quanto ozonizado, foi semelhante até a aplicação de uma tensão de cisalhamento de 30 Pa. A partir desse ponto, as curvas de viscosidade começaram a divergir, indicando que o comportamento sob cisalhamento era comparável apenas abaixo desse limite.

No amido de trigo nativo, os coeficientes de consistência aumentaram após a ozonização, com diferenças mínimas entre os tratamentos de 30 e 60 min. Esse aumento foi associado à melhoria das propriedades viscosas do amido, possivelmente devido à tendência de agregação das moléculas de amido encurtadas pela ozonização, formando redes que elevam a viscosidade, conforme observado por Chan *et al.* (2011).

No estudo de He *et al.* (2023), todas as pastas de amido apresentaram comportamento pseudoplástico (índice de comportamento de fluxo $n < 1,0$), independentemente do tempo de exposição ao ozônio. Especificamente, a pasta de amido nativo apresentou o menor valor de n , enquanto o valor de n da pasta de amido modificada aumentou com o tempo de exposição ao ozônio. Os coeficientes de consistência (k) das pastas de amido, por sua vez, diminuíram significativamente com a ozonização. Esses resultados indicam que a ozonização foi um método eficaz para reduzir a viscosidade das pastas de amido (Ye, Li e Zhao *et al.*, 2020).

É possível observar que a ozonização age de diferentes maneiras dependendo da matriz em que é aplicada, o tempo de exposição ao gás e a maneira como é feita esta aplicação.

4.3.2.6 Estabilidade a ciclos de congelamento e descongelamento

Os valores de sinérese dos três ciclos de congelamento e descongelamento dos amidos de araruta estão na Tabela 13.

Sinérese é o fenômeno de liberação de água que ocorre devido à forte interação entre as cadeias de amido, principalmente após o processo de resfriamento ou congelamento, seguido de descongelamento. Este efeito está relacionado à retrogradação do amido, onde as

moléculas reorganizam sua estrutura, levando à expulsão de água para a superfície do alimento (Zainab *et al.*, 2025).

Podemos notar da Tabela 13 que todas as amostras tiveram uma sinérese maior no primeiro ciclo de congelamento. Sendo a amostra que apresentou uma sinérese maior, a amostra controle ($92,40\% \pm 0,82$) e uma sinérese menor, a amostra 1 ($26,68\% \pm 0,64$), com o passar dos ciclos, a sinérese foi diminuindo, sendo provável que a amostra já tivesse liberado boa parte da água no primeiro ciclo. Os valores variaram de $26,68\% \pm 0,64$ a $92,40\% \pm 0,82$ no primeiro ciclo, de $7,58\% \pm 0,55$ a $23,34\% \pm 0,94$ no segundo ciclo e $3,62\% \pm 0,01$ a $13,37\% \pm 0,09$ no terceiro ciclo.

Tabela 13 - Sinérese (%) dos amidos de araruta durante ciclos de congelamento/descongelamento e viscosidade.

Amostras	Ciclo 01	Ciclo 02	Ciclo 03
Controle	$92,40^f \pm 0,82$	$14,12^f \pm 0,32$	$9,84^h \pm 0,12$
1	$26,60^d \pm 0,64$	$9,71^{bd} \pm 0,39$	$4,35^c \pm 0,05$
2	$31,58^d \pm 0,50$	$8,52^c \pm 0,28$	$3,93^d \pm 0,02$
3	$49,79^b \pm 1,26$	$7,58^c \pm 0,55$	$3,62^e \pm 0,01$
4	$40,24^c \pm 0,90$	$23,09^c \pm 0,67$	$13,15^g \pm 0,03$
5	$42,35^c \pm 1,97$	$16,22^{de} \pm 1,01$	$10,12^b \pm 0,04$
6	$58,41^a \pm 1,02$	$23,34^c \pm 0,94$	$13,19^{fg} \pm 0,12$
7	$62,58^a \pm 2,12$	$21,00^{ac} \pm 2,64$	$13,37^f \pm 0,09$
8	$50,40^b \pm 1,39$	$17,21^{ae} \pm 1,80$	$11,13^a \pm 0,01$
9	$82,12^e \pm 0,98$	$13,66^{de} \pm 0,67$	$8,15^g \pm 0,03$
10	$82,33^e \pm 1,05$	$13,76^d \pm 0,40$	$8,16^g \pm 0,04$
11	$82,55^e \pm 0,68$	$13,25^{bf} \pm 1,04$	$8,11^g \pm 0,01$

Fonte: Autora

Amostras: 1(30g/5min); 2(30g/10min); 3(60g/5min); 4(60g/10min); 5(30g/7,5min); 6(60g/7,5min); 7(45g/5min); 8(45g/10min); 9(45g/7,5min); 10(45g/7,5min); 11(45g/7,5min).

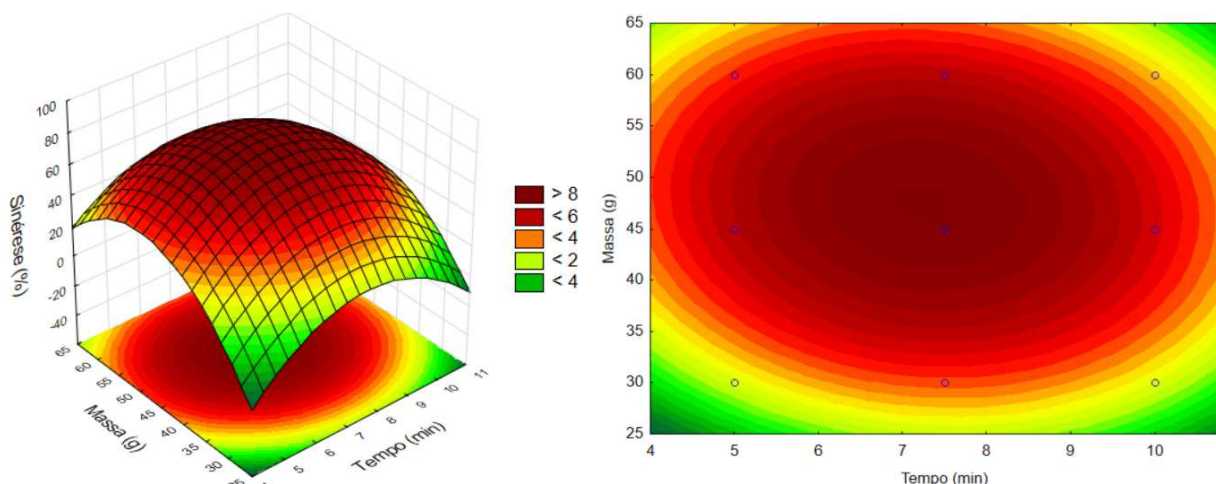
Cada valor representa a média e o desvio controle das repetições.

Valores com letras minúsculas diferentes em cada coluna representam diferença significativa ($p < 0,05$).

A amostra controle diferiu de todas as outras amostras em todos os ciclos. Com exceção da amostra 11 no ciclo dois, nos demais ciclos, as amostras 9, 10 e 11 não diferiram significativamente ($p < 0,05$). No ciclo um, as amostras 1 e 2, 3 e 8, 4 e 5, e 6 e 7 não diferiram significativamente ($p < 0,05$), estando cada par desses, diferindo entre eles. No ciclo dois, a amostra 1 não diferiu das amostras 5, 9, 10 e 11, já a amostra 2 foi estatisticamente igual à amostra 3, 4, 6 e 7. A amostra 5 também foi estatisticamente igual à 8, a amostra 7 também não apresentou diferença significativa ($p < 0,05$) da amostra 8. No ciclo três, a amostra 8 se diferenciou de todas as outras, bem como a amostra 5, 1, 2 e 3. A amostra 6 não apresentou diferença significativa da amostra 7 ($p < 0,05$), e também foi igual estatisticamente às amostras 9, 10 e 11. Logo, pode-se perceber que as amostras não se comportam linearmente em relação à sinérese quando comparados os ciclos. Sendo a perda de água diferente em cada ciclo. Isto pode se dar devido ao comportamento do amido frente a cada tratamento, pois as amostras que receberam o mesmo tratamento se comportam basicamente da mesma maneira.

Estudando o gráfico de superfície de resposta e as curvas de contorno (Figura 41), podemos observar que o ponto máximo ($> 80\%$) da sinérese aconteceu no ponto central do delineamento. Logo, quando o tempo foi de 5 min com quantidades de 30 e 60g, a sinérese foi respectivamente de $> 24\%$ e $> 44\%$, quando o tempo foi de 10 min com massa de 30 g no reator, a sinérese foi $< 24\%$ e quando foi com 60 g no reator aumentou para $< 44\%$.

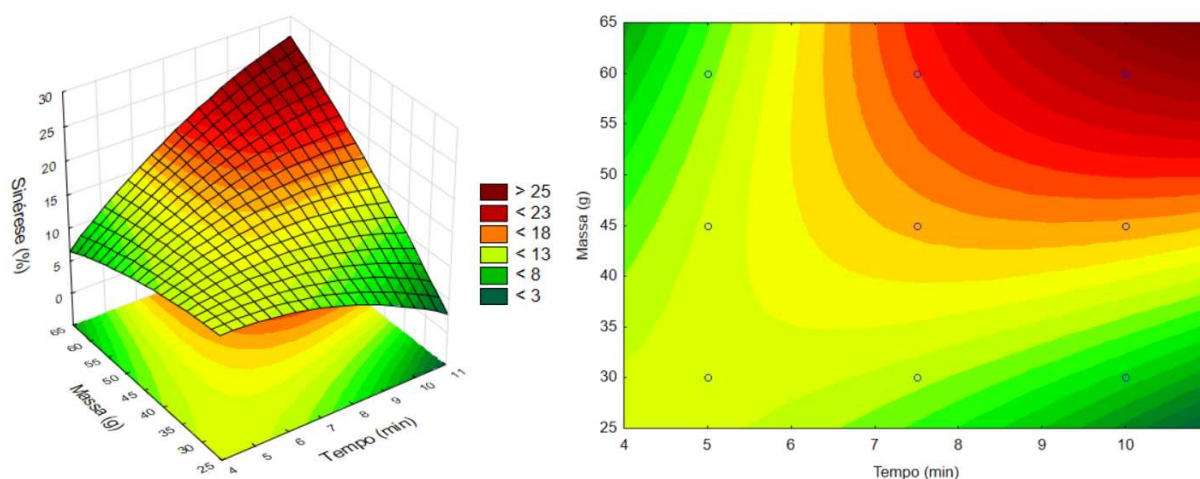
Figura 41 – Influência da ozonização na sinérese dos amidos de araruta (Ciclo 1).



Fonte: Autora (2025).

Ao analisarmos os gráficos do ciclo 2 (Figura 42), podemos aferir que a sinérese foi maior ($> 23\%$) quando o tempo de tratamento foi de 10 min e a massa no reator foi de 60 g. Já no menor tempo com maior massa e maior tempo e menor massa, as respostas foram semelhantes, estando $> 8\%$. Os valores nos tempos médio e alto foram aumentando, principalmente quando a massa também foi maior.

Figura 42 – Influência da ozonização na sinérese dos amidos de araruta (Ciclo 2)



Fonte: Autora (2025).

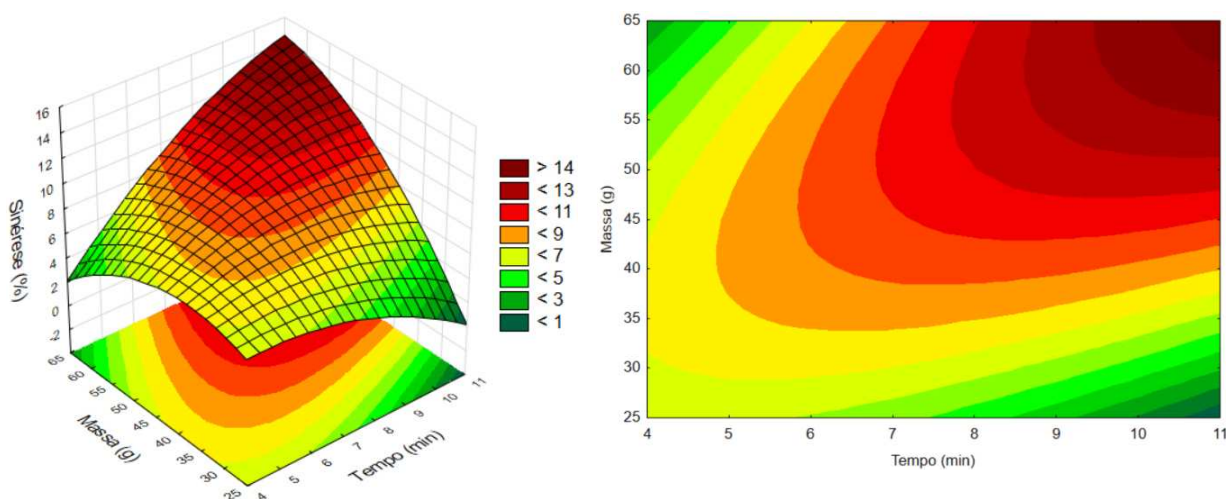
No ciclo 3 (Figura 43), a sinérese se comportou de maneira semelhante ao ciclo 2, em relação à quantidade de amido no reator e ao tempo de tratamento, entretanto, apresentando menores valores. No ciclo 3, a diferença também foi menos gradativa, mas o ponto máximo ($< 13\%$) continuou sendo onde teve o tratamento por mais tempo com maior quantidade de massa no reator, o ponto central apresentou sinérese $< 11\%$. No menor tempo, com massa de 30 e 45 g, a sinérese foi de $< 7\%$ e com massa de 60 g foi de $> 5\%$. Quando o tempo foi de 7,5 min e a massa de 30 g, a sinérese foi $> 5\%$, sendo que para as massas de 45 e 60 g, o valor da sinérese foi inferior a 11 %, já quando o tempo ozonização foi de 10 min e massa de 30 g, a sinérese foi inferior a 5%, o que demonstra que quanto maior o tempo e massa no reator, maior a sinérese dos amidos.

Nestes resultados foi observado que mesmo acontecendo a sinérese, quando se compara à amostra controle com as amostras que receberam tratamento, aquela apresenta uma porcentagem de sinérese muito maior. Estas porcentagens menores de liberação de água nas pastas de amidos modificados, principalmente nos ciclos iniciais, indicam que a modificação aumentou a estabilidade dos amidos, logo, estes possuem uma menor tendência a

retrogradação em armazenamento sob refrigeração por poucos dias.

A sinérese dos amidos de araruta foi significativamente influenciada tanto pelo tempo de ozonização quanto pela quantidade de amido utilizada no processo. Esse comportamento pode ser atribuído às alterações estruturais induzidas pelo tratamento com ozônio, que promove a oxidação de grupos funcionais do amido, levando a alterações na capacidade de retenção de água e na estabilidade da matriz gel formada. Além disso, a degradação parcial das cadeias poliméricas durante a ozonização pode diminuir a coesividade do gel, favorecendo a liberação de água (sinérese) (Du *et al.*, 2024).

Figura 43 – Influência da ozonização na sinérese dos amidos de araruta (Ciclo 3).



Fonte: Autora (2025).

A ozonização pode desencadear reações químicas que levam tanto à ligação cruzada entre as cadeias de amido quanto à degradação oxidativa. A reticulação pode aumentar a rigidez do gel, limitando a sua capacidade de reter água. A degradação oxidativa, por outro lado, reduz o peso molecular das cadeias, enfraquecendo a matriz do gel e tornando-a mais propensa à expulsão de água (Manaila e Maria, 2018). Outro fator relevante é a alteração do equilíbrio funcional entre amilose e amilopectina. O ozônio pode modificar a disponibilidade ou funcionalidade destes componentes, reduzindo a capacidade de formar uma rede coesa e estável no gel. Esse desequilíbrio afeta diretamente a estabilidade do sistema, favorecendo a separação de fases e o aumento da sinérese (Alcázar-Alay e Meireles, 2015).

Este aumento da estabilidade dos amidos por meio da modificação é satisfatório

para aplicações em alimentos que podem passar por congelamento, como massas congeladas, pães e sobremesas que o amido é utilizado como espessante. É possível que a modificação tenha causado uma diminuição nas reassociações moleculares entre as cadeias de amilose e amilopectina no estágio inicial do armazenamento, resultando em uma menor porcentagem de água exsudada. A modificação também pode ter provocado uma diminuição na quantidade de amilose lixiviada, ocasionando uma redução na tendência à retrogradação dos amidos, tornando-os mais estáveis (Silva, 2019).

4.3.2.7 Viscoamilografia

A viscosidade da pasta de amido, analisada por meio de viscoamilografia, parece ser influenciada por dois fatores principais: o grau de intumescimento dos grânulos e a resistência desses grânulos à dissolução térmica ou à fragmentação causada pela agitação mecânica (Franco *et al.*, 2001). Segundo Tester e Morrison (1990), as características de pasta dos amidos são impactadas pelos níveis de amilose, lipídios e fósforo, bem como pela distribuição do comprimento das cadeias ramificadas da amilopectina. A amilopectina contribui para o intumescimento dos grânulos e o processo de empastamento, enquanto a presença de amilose e lipídios atua como inibidora desses fenômenos.

Os valores de viscoamilografia dos amidos de araruta podem ser visualizados na Tabela 14, estes valores são obtidos através da curva gerada por um viscoamilógrafo (Apêndice B) que reflete o processo que ocorre durante a gelatinização do amido. Os dados demonstram que as modificações aplicadas ao amido de araruta afetaram significativamente suas propriedades de pasta, como viscosidade e temperatura de gelatinização. A amostra de amido de araruta nativo apresenta viscosidade máxima de 2873 cP e temperatura de gelatinização de 90,25°C. As amostras modificadas apresentam variação considerável na viscosidade máxima, com valores variando de 2373 cP (Amostra 8) a 3020 cP (Amostra 11). Esta variação sugere que algumas modificações aumentam a capacidade de espessamento do amido, enquanto outras a reduzem, indicando que o comportamento do amido durante o processamento pode ser ajustado conforme necessário.

A viscosidade mínima, que reflete a estabilidade do amido sob condições de aquecimento e agitação, também variou entre as amostras. Enquanto a amostra nativa tem uma viscosidade mínima de 2630 cP, as amostras modificadas variam de 1740 cP (Amostra 2) a 2719 cP (Amostra 11). A Amostra 2, com viscosidade mínima significativamente menor, pode indicar maior suscetibilidade à quebra nas condições de processamento. A viscosidade

de ruptura, que mede a queda da viscosidade após o pico de gelatinização, também apresenta variações significativas. A amostra nativa tem uma viscosidade de decomposição de 243 cP, enquanto as amostras modificadas variam de 57 cP (Amostra 6) a 739 cP (Amostra 2). A Amostra 2, com uma viscosidade de ruptura muito mais elevada, sugere maior susceptibilidade à fragmentação, enquanto a Amostra 6, com uma viscosidade de ruptura muito mais baixa, indica maior resistência à degradação.

A viscosidade final, que reflete a capacidade do amido de formar géis estáveis após o resfriamento, também varia entre as amostras. A amostra nativa possui viscosidade final de 4274 cP, enquanto as amostras modificadas variam de 2365 cP (Amostra 2) a 3925 cP (Amostra 7). A Amostra 2, com viscosidade final muito inferior, indica uma capacidade reduzida de formar géis estáveis, enquanto a Amostra 7 mantém uma viscosidade final próxima à da amostra nativa, sugerindo que esta modificação preserva a capacidade de formação de gel.

A temperatura de gelatinização, que indica quando o amido começa a gelatinizar, também varia entre as amostras. A amostra nativa gelatiniza a 90,25°C, enquanto as amostras modificadas variam de 82,33°C (Amostra 1) a 90,66°C (Amostra 10). Uma temperatura de gelatinização mais baixa, como na Amostra 1, pode indicar que o amido gelatiniza mais facilmente, o que pode ser vantajoso em determinadas aplicações, enquanto outras amostras, como a Amostra 10, mantêm uma temperatura próxima à da amostra nativa. Estas variações sugerem que as modificações podem ser adaptadas para otimizar o amido para aplicações específicas, como em alimentos que requerem diferentes texturas e estabilidades.

Tabela 14 - Propriedades de pasta dos amidos de araruta.

Amostras	Viscosidad e Máxima (cP)	Viscosidade Mínima (cP)	Viscosidade de Ruptura (cP)	Viscosidade Final (cP)	Temperatura de Gelatinização (°C)
Controle	2873 ^{cd} ± 29,03	2630 ^{df} ±30,51	243 ^{fg} ±31,52	4274 ^a ±20,18	90,25 ^g ±0,11
1	2560 ^{de} ± 52,36	2162 ^{ce} ±45,79	454 ^b ±48,60	3051 ^d ±33,50	82,33 ^a ±0,06
2	2458 ^{be} ±	1740 ^a ±51,97	739 ^a ±48,21	2365 ^e ±30,26	86,57 ^f ±0,29

	35,51				
3	2547 ^{de} ± 48,49	2253 ^e ±30,08	330 ^{df} ±27,05	3153 ^c ±48,74	87,37 ^{de} ±0,13
4	2960 ^c ± 33,65	2541 ^{bd} ±50,85	428 ^{bc} ±16,01	3348 ^b ±39,05	89,54 ^b ±0,14
5	2660 ^d ± 49,16	2267 ^e ±37,28	373 ^{cd} ±13,79	2836 ^g ±28,91	88,06 ^c ±0,05
6	2763 ^a ± 38,73	2676 ^f ±19,65	57 ^e ±8,50	3562 ^f ±25,70	89,49 ^b ±0,14
7	2554 ^{de} ± 47,69	2451 ^b ±45,36	84 ^e ±10,58	3925 ^{ab} ±21,59	87,70 ^{cd} ±0,14
8	2373 ^b ± 32,18	2050 ^c ±48,50	288 ^{fg} ±10,58	2854 ^g ±12,05	86,84 ^{ef} ±0,15
9	2967 ^c ± 31,50	2647 ^{df} ±45,09	245 ^{fg} ±20,01	3468 ^h ±30,51	90,53 ^g ±0,25
10	2959 ^c ± 35,15	2663 ^{df} ±33,70	258 ^{fg} ±31,56	3448 ^h ±17,95	90,66 ^g ±0,32
11	3020 ^c ± 49,00	2719 ^f ±38,22	292 ^{fg} ±17,47	3518 ^h ±20,94	90,31 ^g ±0,27

Fonte: Autora (2025)

Amostras:1(30g/5min);2(30g/10min);3(60g/5min);4(60g/10min);5(30g/7,5min);6(60g/7,5min);7(45g/5min);8(45g/10min);9(45g/7,5min);10(45g/7,5min);11(45g/7,5min).

Cada valor representa a média e o desvio controle das repetições.

Valores com letras minúsculas diferentes em cada coluna representam diferença significativa ($p < 0,05$).

É possível perceber que em todos os parâmetros a maioria das amostras ozonizadas apresentou diminuição dos valores. Com exceção da viscosidade de ruptura, os valores que apresentaram aumento nos demais parâmetros, não apresentaram diferenças

significativas ($p < 0,05$). A redução na viscosidade de pico após a oxidação está associada ao enfraquecimento estrutural e à desintegração dos grânulos de amido. Esse fenômeno ocorre porque a oxidação introduz alterações químicas, como a quebra de ligações glicosídicas e a formação de grupos carboxila e carbonila, que comprometem a integridade da estrutura do grânulo. Como resultado, os grânulos tornam-se mais suscetíveis à quebra sob estresse térmico e mecânico, levando a uma diminuição na sua capacidade de inchar e reter água. Esta degradação estrutural não só reduz o pico de viscosidade, mas também impacta outras propriedades funcionais, como resistência e estabilidade do gel (Chan *et al.*, 2012).

Estudos mostram uma diminuição significativa na viscosidade de pico em amidos oxidados, como relatado por Sandhu *et al.* (2008) para amidos de milho normais e por Adebawale, Afolabi e Lawal (2002) para amido de feijão mucuna. Valores maiores e menores são determinantes para aplicações do amido, como por exemplo, uma baixa viscosidade de ruptura é melhor para estabilidade a longo prazo e condições severas, já uma alta viscosidade de ruptura é melhor para aplicações que precisam de alta viscosidade inicial e menos resistência a condições extremas.

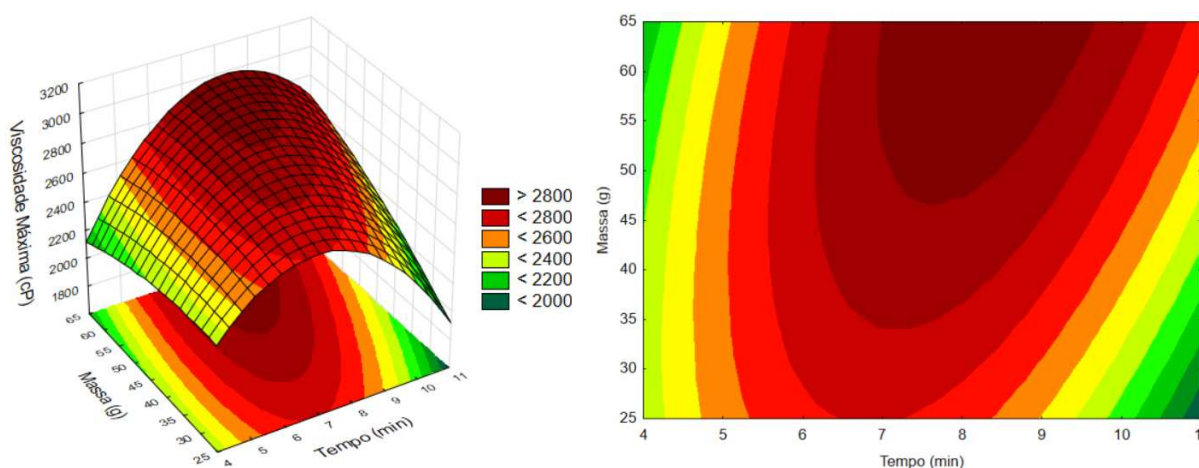
Este estudo corroborou com o trabalho conduzido por Almeida *et al.*, (2024), que analisou o efeito sinérgico do tratamento com ozônio com *alfa*-amilase na modificação da microestrutura e propriedades da pasta do amido de arroz japonica, e foi constatado que o processo de ozonização alterou significativamente as propriedades da pasta do amido. As amostras tratadas com ozônio apresentaram uma redução progressiva e expressiva no pico de viscosidade aparente em comparação ao amido nativo, indicando um enfraquecimento dos grânulos e uma menor capacidade de manter sua integridade estrutural (Lima *et al.*, 2020). Além disso, a ozonização reduziu os valores de viscosidade mínima, *breakdown*, viscosidade final e *setback*. Observou-se também que a temperatura na qual a viscosidade aparente atingiu seu pico diminuiu proporcionalmente ao aumento do tempo de exposição ao ozônio.

Ao analisarmos a Figura 44 podemos inferir que a viscosidade máxima atingiu seu pico (> 2800 cP) no tempo médio de tratamento (7,5 min) e maior quantidade de amido no reator (60 g), logo, este foi o ponto mais alto em que as moléculas de amido absorveram a máxima quantidade de água, inchando, e formando uma rede que retém água, resultando em um aumento substancial da viscosidade. É possível perceber também que nos tempos extremos (maior e menor) houve uma diminuição desta viscosidade, bem como aconteceu gradativamente com a diminuição da massa no reator, estando estas amostras com valores mais distantes da amostra controle.

Em relação à viscosidade mínima (Figura 45), o pico (> 2600) também ocorreu

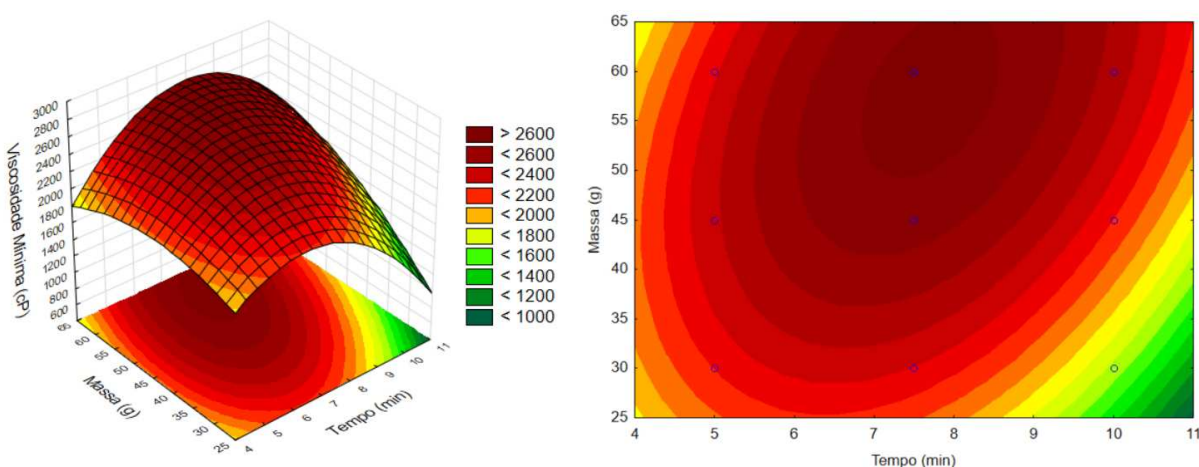
onde o tempo de tratamento foi médio e a quantidade de amido no reator foi máxima, no entanto, ao analisarmos a correlação de tempo e quantidade de amido no reator, temos que com menos tempo de tratamento e maior quantidade de massa, os valores equiparam-se a um maior tempo de tratamento e maior quantidade de massa, porém, quando a quantidade de massa é menor, com maior tempo de tratamento, a viscosidade mínima diminui, ficando mais distante dos valores da amostra controle, portanto, sendo mais influenciada pela ozonização. Esta viscosidade reflete a estabilidade da pasta de amido durante o aquecimento contínuo e a agitação.

Figura 44 - Influência da ozonização na viscosidade máxima dos amidos de araruta



Fonte: Autora (2025).

Figura 45 - Influência da ozonização na viscosidade mínima dos amidos de araruta

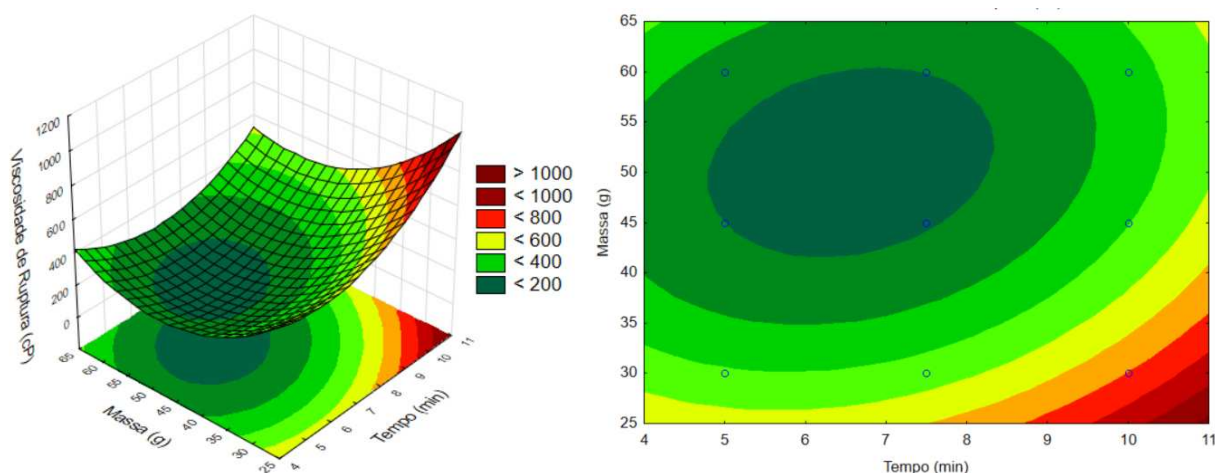


Fonte: Autora (2025).

Na viscosidade de ruptura (Figura 46), o comportamento foi inverso, este

parâmetro representa a queda de viscosidade da pasta de amido após atingir o pico de viscosidade, devido ao calor e à força de cisalhamento aplicados. Indica a fragilidade dos grânulos de amido e sua capacidade de manter a estrutura sob condições de estresse. Onde as amostras apresentaram o menor valor de viscosidade de ruptura foi no tempo médio correlacionado com a quantidade média e máxima no reator. É possível verificar que quanto maior o tempo de tratamento e quanto menos massa no reator, maior a viscosidade de ruptura.

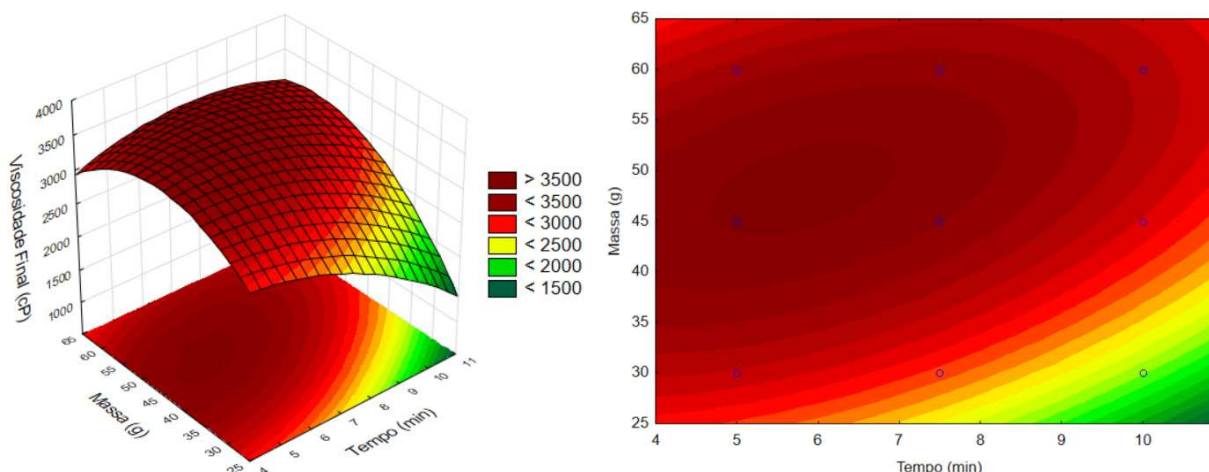
Figura 46 - Influência da ozonização na viscosidade de ruptura dos amidos de araruta



Fonte: Autora (2025).

A maior influência da ozonização na viscosidade final (Figura 47) aconteceu no maior tempo e menor quantidade de amido no reator, pois foi onde a amostra mais se distanciou da amostra controle, apresentando um menor valor. As amostras que apresentaram maior viscosidade final foram as que ficaram abaixo de 7,5 min e acima de 45 g. Essa diminuição na viscosidade pode ser atribuída ao enfraquecimento das ligações de hidrogênio entre as moléculas de amido e à despolimerização parcial provocada pela ozonização (Çatal e İbanoğlu, 2014).

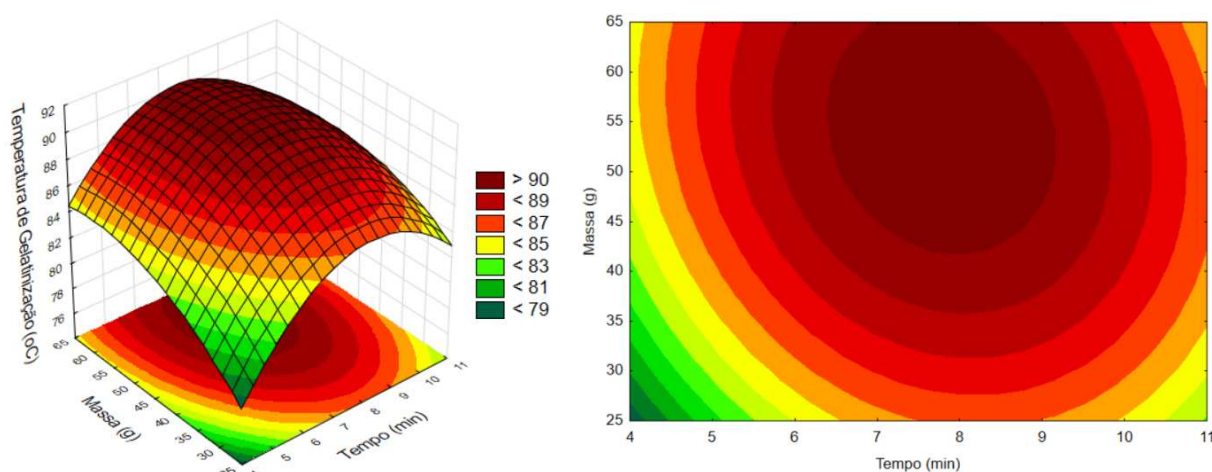
Figura 47 - Influência da ozonização na viscosidade final dos amidos de araruta.



Fonte: Autora (2025).

O ozônio mais influenciou em relação à temperatura de gelatinização (Figura 48) na amostra que teve o menor tempo de tratamento e menor quantidade dentro do reator, sendo esta a que mais se distanciou dos valores da amostra controle. O tempo mínimo e o máximo foram os que mais influenciaram neste parâmetro, havendo baixa interferência da massa. A temperatura de gelatinização é a temperatura mínima necessária para que os grânulos de amido comecem a gelatinizar.

Figura 48 - Influência da ozonização na temperatura de gelatinização dos amidos de araruta.



Fonte: Autora (2025).

Em um estudo realizado por Teixeira (2023), as propriedades de pasta do amido de batata modificado por ozônio apresentaram viscosidade inferior à do amido nativo. Os valores de viscosidade (viscosidade de pico, mínima e final) indicaram baixa resistência à colagem. Chan *et al.* (2009) já haviam observado uma redução significativa na viscosidade

intrínseca de amidos oxidados, destacando que o grau de oxidação pelo ozônio variava conforme o tipo de amido analisado. Resultados semelhantes foram relatados por Klein *et al.* (2014), que constataram que a oxidação do amido de mandioca com ozônio em solução aquosa reduziu a cristalinidade, promovendo alterações significativas nas propriedades de pasta.

No trabalho de Amorim (2011), onde o ozônio foi utilizado para tratar o amido de mandioca, o pico de viscosidade da amostra tratada apresentou diferenças significativas em relação à amostra controle nos tempos iniciais e aos 15 e 30 dias de armazenamento. Entretanto, aos 45 e 60 dias, não foram observadas diferenças significativas entre as amostras. Os valores de viscosidade máxima da amostra ozonizada foram superiores aos da amostra controle, indicando que o tratamento com ozônio contribuiu para o aumento do pico de viscosidade da pasta de amido de mandioca. Contudo, é relevante destacar os desvios mais elevados observados na análise da amostra ozonizada, especialmente nos tempos de 45 e 60 dias, o que pode ter influenciado na redução das diferenças entre as amostras. Apesar disso, a viscosidade máxima de ambas as amostras manteve-se estável ao longo do período analisado.

Du *et al.*, (2024) observaram que a oxidação com ozônio por 0,5 hora resultou em um aumento na viscosidade de pico, atribuído à clivagem parcial das ligações glicosídicas (Okekunle, Adebawale, Olu-Owolabi e Lamprecht, 2020). No entanto, quando o tempo de tratamento ultrapassou 0,5 hora, a viscosidade de pico diminuiu com o prolongamento do tempo de exposição. Os valores de *breakdown*, *setback* e viscosidade final do amido seguiram uma tendência semelhante à observada para a viscosidade de pico.

A ozonização sob condições suaves pode ser uma alternativa eficaz para produzir amidos capazes de formar pastas viscosas em temperaturas moderadas (65–70 °C). (Castanha *et al.*, 2019).

No estudo realizado por Çatal e Ibanoglu (2014), observou-se uma redução significativa nos parâmetros de pasta com o aumento do tempo de ozonização ($p < 0,05$). A diminuição das temperaturas de pasta foi atribuída ao enfraquecimento estrutural e à desintegração dos grânulos durante o processo de ozonização. A redução na viscosidade máxima das amostras tratadas com ozônio pode ser explicada pela clivagem parcial das ligações glicosídicas, resultando em frações moleculares menores de amido e grânulos (Sandhu *et al.*, 2008). Os autores perceberam que essa degradação compromete a resistência dos grânulos ao cisalhamento, reduzindo sua capacidade de manter a integridade e levando a uma viscosidade inferior.

No amido de batata doce, He *et al.*, (2023) constataram que a exposição ao ozônio

não alterou significativamente a temperatura de pasta deste amido. No entanto, a viscosidade máxima dos amidos ozonizados foi significativamente menor do que a do amido nativo, e a magnitude decrescente aumentou quando o tempo de exposição ao ozônio foi estendido.

Logo, no presente estudo e na grande maioria dos trabalhos estudados, houve diminuição dos parâmetros das propriedades de pasta devido a ozonização de diferentes amidos, com diferentes tempos de tratamento. Esses resultados sugerem que um tempo moderado de tratamento com ozônio desempenha um papel crucial no enfraquecimento das interações moleculares, como as ligações de hidrogênio, permitindo um maior intumescimento dos grânulos (Du *et al.*, 2024).

Do ponto de vista prático, este perfil reológico torna o amido ozonizado particularmente interessante para aplicações que demandam menor espessamento, maior fluidez e estabilidade térmica controlada, como na formulação de molhos, caldas e produtos de panificação. Além disso, a menor tendência à retrogradação sugere benefícios na estabilidade durante o armazenamento, especialmente em produtos refrigerados ou congelados, o que pode ser confirmado na análise de estabilidade a ciclos de congelamento e descongelamento.

4.3.2.8 Análise térmica (DSC)

As propriedades térmicas dos amidos de araruta estão expressas na Tabela 15. O comportamento térmico dos amidos é significativamente mais complexo do que a termoplasticidade convencional, devido às mudanças físico-químicas que ocorrem durante o aquecimento de amidos ou produtos amiláceos, as quais envolvem transições de fase (fusão, ebulição, sublimação, congelamento, inversões de estruturas cristalinas) gelificação, transição vítrea, cristalização, expansão do volume, degradação molecular e movimentação da água ou reações de desidratação, dissociação, decomposição, oxirredução, entre outros, capazes de provocar variações de calor. De modo geral, transições de fase, desidratações, reduções e certas reações de decomposição geram efeitos endotérmicos, enquanto cristalizações, oxidações e algumas reações de decomposição resultam em efeitos exotérmicos (Ionashiro, 2005; Yu; Christie, 2001).

As temperaturas de gelatinização são afetadas por fatores como o comprimento das cadeias da amilopectina, polimorfismo cristalino, teores de amilose e fósforo, além das condições de extração e processamento (Singh *et al.*, 2003; Jane *et al.*, 1999).

T_0 representa o ponto em que os grânulos de amido começam a inchar e perder

sua estrutura cristalina, variando de 84,96°C (Amostra 3) a 90,19°C (Amostra 11). A T_C , que indica o término da gelatinização, variou de 87,90°C (Amostra 3) a 95,44°C (Amostra 6), mostrando que algumas amostras necessitam de temperaturas mais elevadas para gelatinizar completamente. A T_p , correspondente à temperatura na qual a gelatinização ocorre mais rapidamente, variou de 94,45°C (Amostra 3) a 102,18°C (Amostra 10). A variação de entalpia, que mede a energia necessária para a gelatinização, reflete a quantidade de ordem cristalina presente nos grânulos e variou de 5,46 J/g (Amostra 6) a 12,18 J/g (Amido de araruta nativa), indicando maior necessidade de energia para gelatinização, o que está associado a uma estrutura cristalina mais ordenada. Estes valores são obtidos através do gráfico do DSC (Apêndice C). Pode-se observar que o processo de ozonização contribuiu para o rompimento da estrutura cristalina dos amidos de araruta (Subroto *et al.*, 2022).

Isto indica que o ozônio pode atuar quebrando as ligações intermoleculares dentro do amido, tornando-o mais suscetível à ação térmica (Du *et al.*, 2024). Este efeito pode ser benéfico para aplicações industriais, principalmente em produtos que necessitam de temperaturas de gelatinização mais baixas, levando à economia de energia no processamento.

Podemos também aferir que o ozônio influenciou em algumas amostras, tratando-se dos parâmetros do DSC. Na T_0 a amostra controle só não diferiu significativamente ($p < 0,05$) da amostra 2, todas as outras amostras diferiram entre si, e apenas as amostras 3 e 4 apresentaram valor inferior quando comparadas com a controle. Na T_p já houve uma maior homogeneidade das amostras, a amostra controle foi estatisticamente igual às amostras 1 e a 7. Já as amostras 5, 6, 9, 10 e 11 diferiram entre si e das demais amostras, e apenas as amostras 2 e 3 apresentaram-se com valores inferiores à controle. Na T_C a amostra controle também foi estatisticamente igual às amostras 1 e 7, as amostras 2 e 3 foram estatisticamente iguais, também apresentando-se menores que a controle, e as demais amostras diferiram entre si. Na diferença de entalpia, a amostra controle foi estatisticamente igual à amostra 3 que apresentou-se estatisticamente igual à amostra 2. As amostras 1 e 8, 7 e 10, 4 e 11 também não apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$), todos os valores foram menores que da amostra controle. Estes valores menores podem implicar que a capacidade de gelatinização do amido foi afetada pelo tratamento com ozônio.

Tabela 15 - Propriedades térmicas dos amidos de araruta.

Amostras	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	ΔH (J/g)
Controle	85,59 ^k ±0,04	88,84 ^g ±0,04	95,05 ^{fg} ±0,03	12,18 ^a ±0,05
1	87,74 ⁱ ±0,04	88,95 ^g ±0,03	96,11 ^g ±0,01	9,37 ^f ±0,07
2	85,55 ^k ±0,03	87,97 ^h ±0,04	94,50 ⁱ ±0,05	9,87 ^b ±0,05
3	84,96 ^j ±0,03	87,90 ^h ±0,02	94,45 ⁱ ±0,08	11,47 ^{ab} ±0,08
4	85,15 ^f ±0,02	93,38 ^e ±0,05	101,23 ^c ±0,04	7,82 ^h ±0,16
5	87,67 ^g ±0,03	91,27 ^f ±0,04	101,90 ^a ±0,09	8,87 ^c ±0,07
6	89,76 ^c ±0,04	95,44 ^a ±0,05	102,14 ^h ±0,04	5,46 ^e ±0,08
7	86,43 ^h ±0,03	89,31 ^{ge} ±0,04	96,72 ^f ±0,07	8,35 ^g ±0,08
8	88,53 ^e ±0,03	91,60 ^e ±0,01	99,75 ^e ±0,07	9,37 ^f ±0,13
9	89,40 ^d ±0,04	93,69 ^d ±0,07	100,79 ^d ±0,06	6,95 ^d ±0,05
10	89,94 ^b ±0,04	95,08 ^b ±0,04	102,18 ^h ±0,01	8,25 ^g ±0,09
11	90,19 ^a ±0,02	94,58 ^c ±0,01	101,55 ^b ±0,04	7,71 ^h ±0,27

Fonte: Autora (2025)

Amostras: 1(30g/5min); 2(30g/10min); 3(60g/5min); 4(60g/10min); 5(30g/7,5min); 6(60g/7,5min); 7(45g/5min); 8(45g/10min); 9(45g/7,5min); 10(45g/7,5min); 11(45g/7,5min).

To= Temperatura inicial; Tp= Temperatura de pico; Tc= Temperatura final; ΔH= Variação de entalpia.

Cada valor representa a média e o desvio controle das repetições.

Valores com letras minúsculas diferentes em cada coluna representam diferença significativa (p<0,05).

A redução das temperaturas de gelatinização indica que o processo de oxidação pode facilitar a entrada de água nos grânulos de amido durante o aquecimento (Chapagai *et al.*, 2021). No entanto, o aumento dessas temperaturas pode ser causado devido ao poder do ozônio de reduzir a proporção de moléculas de baixo peso molecular, como cadeias curtas de amilose, que gelatinizam mais facilmente.

A diminuição nos valores de ΔH observados pode ser explicada pelo enfraquecimento da estrutura do amido, o que aumenta sua sensibilidade térmica e torna o processo de gelatinização mais rápido e menos exigente (Subroto *et al.*, 2022). Isso também se traduz em custos de produção mais baixos.

Uma entalpia de gelatinização mais baixa reflete a menor energia necessária para

romper as ligações e permitir a transição para o estado gelatinizado (Oladebeye *et al.*, 2013; Maniglia *et al.*, 2019), destacando sua eficiência. Além disso, esse comportamento traz vantagens potenciais para o processamento de alimentos, como a redução no consumo de energia durante o cozimento e melhorias na qualidade do produto final. Portanto, os resultados reforçam a viabilidade de incluir o pré-tratamento com ozônio em processos industriais de produção alimentícia.

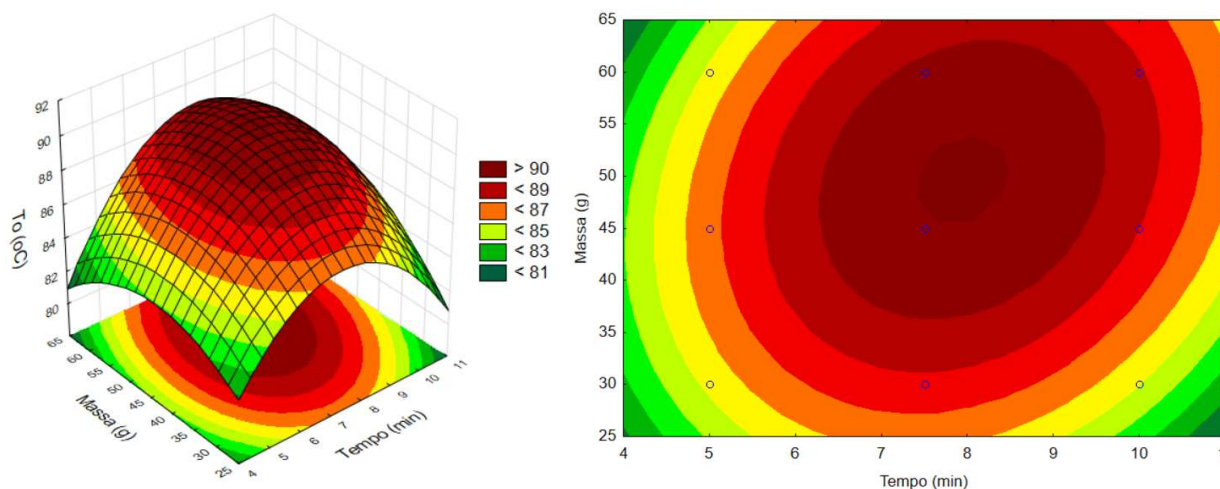
Ding *et al.* (2015) relataram o impacto do tratamento com ozônio no amido de arroz ceroso. As propriedades térmicas mostram que o amido ainda continha zonas de cristalização. Apresentaram ainda temperatura de pico (T_p) e entalpia substancialmente mais baixas do que os amidos de arroz não tratados.

No trabalho de Hu *et al.* (2022), os autores observaram que o ozônio gasoso não alterou significativamente o T_o e o T_p , mas todos os amido de trigo sarraceno *Tartary* tratados com ozônio apresentaram T_c e $T_c - T_o$ mais altos do que os não tratados. Dado que o aumento da cristalinidade acompanhado pela formação de ligações cruzadas mais homogêneas induzidas pela ozonização apropriada, sugere uma relação entre as características estruturais e as propriedades térmicas dos grânulos de amido oxidado. O ΔH do amido tratado mostrou uma tendência de aumento primeiro e depois diminuição. Os autores atribuíram essa descoberta com as mudanças nas estruturas ordenadas de curto e longo alcance dos grânulos de amido.

Na Figura 49 podemos observar que as temperaturas mais altas estão na faixa entre 35g e 60 g e 6 min e 10 min. Quando o tempo de tratamento é menor (5 min), as temperaturas também decrescem, o mesmo acontece quando a quantidade de amido no reator é de 30 g. No tempo de 7,5 min e massa de 45 g e 60 g acontece o pico da temperatura inicial, onde mais se distancia do valor da temperatura inicial da amostra controle.

Figura 49 – Influência da ozonização na temperatura inicial de gelatinização dos amidos de

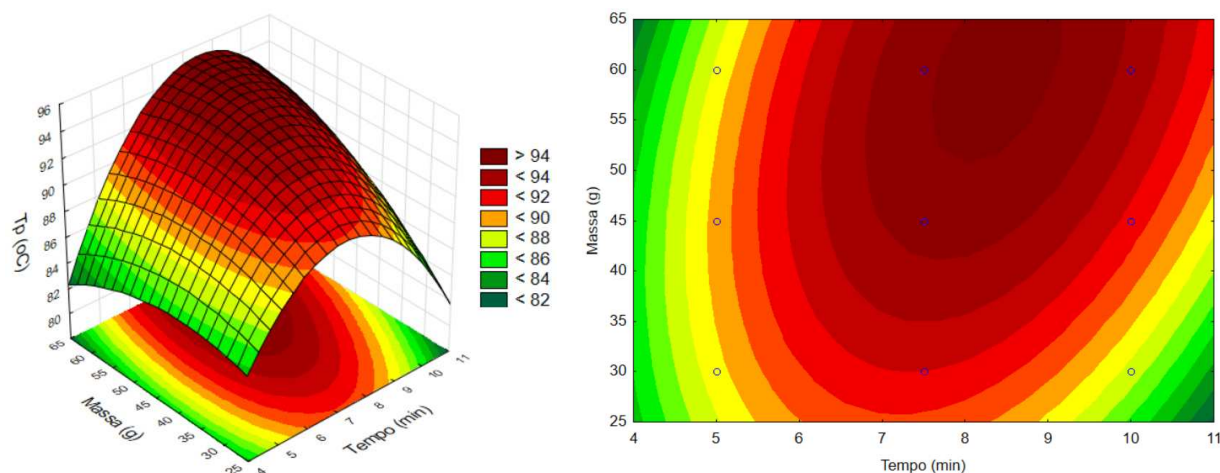
araruta.



Fonte: Autora (2025).

A T_p indica a qualidade cristalina do amido (Singh *et al.*, 2003), em relação à influência da ozonização na temperatura de pico (Figura 50), temos basicamente o mesmo comportamento, as maiores temperaturas se concentraram nas amostras tratadas na faixa de 7,5 min a 10 min, quando a quantidade de amido no reator foi de 45 g e 60 g. Quando o tempo de tratamento foi 5 min, os valores da temperatura de pico foram baixos, independente da quantidade de amido no reator, já quando o tempo foi de 10 min, os valores só foram baixos na amostra em menor quantidade no reator (30 g).

Figura 50 – Influência da ozonização na temperatura de pico de gelatinização dos amidos de araruta

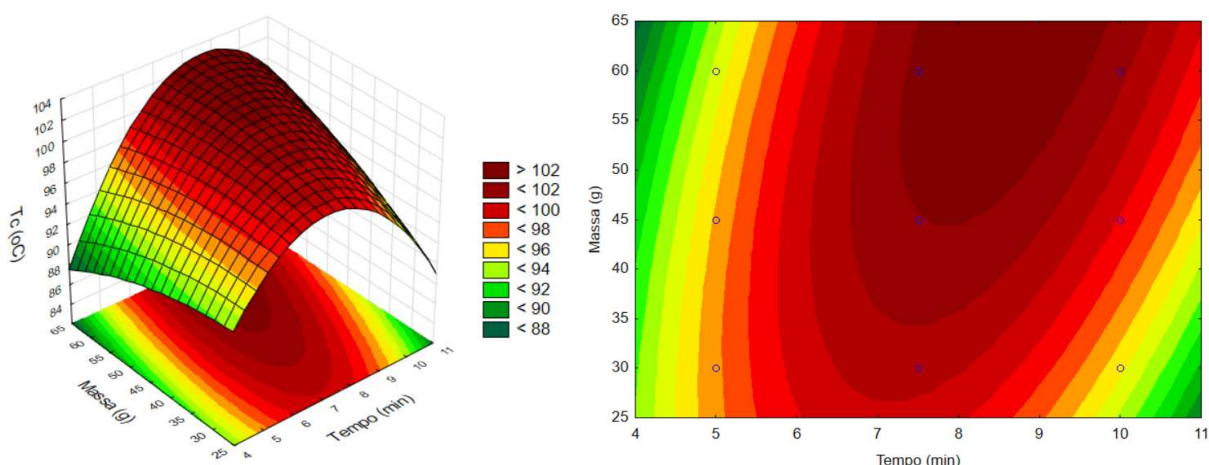


Fonte: Autora (2025).

Bem como ocorreu com a temperatura de pico e com a temperatura inicial, na

temperatura final (Figura 51), podemos observar o comportamento de que os maiores tempos de tratamento (7,5 min e 10 min) e quantidades médias e altas (45 g e 60 g) de massa no reator corroboraram para maiores valores de temperatura final (<102 e >102 °C).

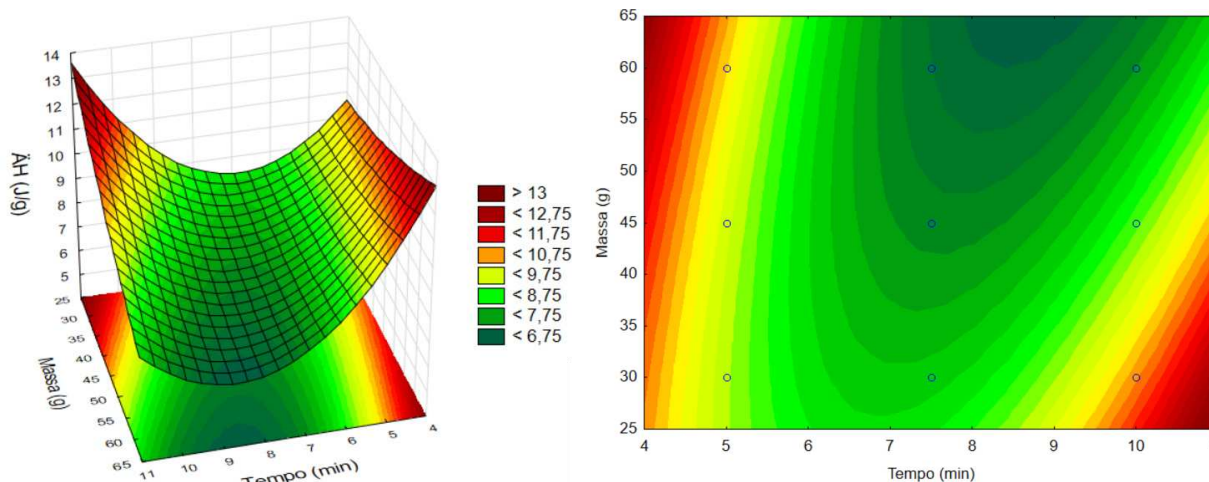
Figura 51 – Influência da ozonização na temperatura final de gelatinização dos amidos de araruta



Fonte: Autora (2025).

A variação de entalpia representada reflete a quantidade e qualidade da cristalinidade, além da perda de ordem molecular no grânulo. No amido retrogradado, a entalpia mede a energia envolvida na fusão da amilopectina recristalizada e as temperaturas de transição associadas (Singh *et al.*, 2003). A variação de entalpia (Figura 52) se comportou de maneira oposta aos valores das temperaturas, estando os valores menores ($<7,75$ °C) na zona 5,5 min a 10 min de tratamento e 45 g a 60 g de amido no reator, sendo estas amostras com valores mais distantes da amostra controle. Diferenças de entalpia maiores ($<9,75$ °C) são observadas quando o tempo de tratamento foi de 5 min, independente da quantidade de amido no reator, entretanto, no tempo de 10 min e massa de 30 g, foi onde se observou maior valor de diferença de entalpia ($<10,75$ °C).

Figura 52 – Influência da ozonização na variação de entalpia dos amidos de araruta



Fonte: Autora (2025).

Gozé *et al.* (2016), estudaram amido de trigo oxidado, e Maniglia *et al.* (2019), investigaram amido de mandioca oxidado. Nos dois estudos, foi observada uma diminuição marginal no ΔH dos amidos oxidados. Já no estudo de Li *et al.* (2023) o amido de arroz ceroso nativo e oxidado não apresentaram diferenças significativas em relação aos parâmetros do DSC.

No estudo de Boas (2014) o amido de araruta apresentou um único pico endotérmico bem definido, o que já era esperado, pois amidos de raízes e tubérculos não apresentam quantidades suficientes de lipídeos que permitam a formação de complexos. O amido de araruta apresentou temperatura inicial de 71,8 °C, temperatura de pico de 75,27 °C e temperatura final de 79,5 °C. Altas temperaturas de gelatinização estão relacionadas a estruturas cristalinas mais fortes e maior ordem molecular (Srichwong *et al.*, 2005). Apresentou ainda entalpia de 13,7 J/g. Já no trabalho de Peroni (2003), o amido de araruta apresentou $T_o = 62,59$ °C, $T_p = 69,79$ °C, $T_c = 77,33$ °C e $\Delta H = 21,12$ J/g.

Ramos *et al.* (2024) observaram que a temperatura de pico de gelatinização não foi alterada com a ozonização do amido de quinoa. No entanto, a entalpia de gelatinização diminuiu com o aumento do tempo de tratamento com ozônio, mostrando uma diferença significativa entre o amido nativo e as amostras ozonizadas.

A diferença nos resultados pode ser devido às diferentes fontes de amido e à oxidação mais intensiva em seus estudos. Além disso, é uma razão convincente para o ΔH diferente seja devido à diferença de desenrolamento e fusão das cadeias externas de amilopectina durante a gelatinização (Vamadevan, Bertoft e Seetharaman, 2013).

Contudo, estes resultados sugerem que, apesar da sua elevada cristalinidade, o amido não necessita de grandes quantidades de energia para a gelatinização. Essa

característica pode ser atribuída à presença de regiões amorfas ou à facilidade com que as ligações intermoleculares são quebradas em condições específicas, como a aplicação de ozônio, o que aumenta a acessibilidade das moléculas de água às áreas cristalinas (Liu *et al.*, 2020).

Corroborando os dados do RVA, a análise de DSC demonstrou que o aumento dos parâmetros T_o , T_p e T_c indica que o amido ozonizado possui uma estrutura que requer maior aporte térmico para iniciar e completar o processo de gelatinização, possivelmente devido à introdução de grupos oxidantes (carbonila e carboxila) que promovem maior estabilidade nas regiões cristalinas e amorfas. Por outro lado, a redução da entalpia de gelatinização (ΔH) em todas as amostras tratadas sugere que, apesar da maior estabilidade térmica inicial, exige menos energia total para romper as interações moleculares durante a transição térmica.

Portanto, integrando as análises de viscoamilografia e DSC, observa-se que o amido tratado com ozônio apresenta um perfil funcional caracterizado por uma maior estabilidade térmica no início do processamento, exigindo temperaturas mais altas para iniciar a gelatinização. Contudo, após atingir o pico de viscosidade, ocorre uma redução acentuada da viscosidade, resultando em sistemas com baixa viscosidade final, menor tendência à retrogradação e comportamento mais estável durante o processamento térmico, especialmente sob condições de agitação e aquecimento prolongado.

4.3.2.9 Distribuição granulométrica das partículas

O tamanho e a morfologia dos grânulos de amido são influenciadas por fatores como propriedades físico-químicas, teores de amilose e amilopectina, organização das ramificações da amilopectina e grau de cristalinidade, entre outros (Singh *et al.*, 2003).

Na Tabela 16 tem-se os valores de D10, D50, D90, D4,3 e largura da distribuição (Span) dos amidos de araruta. Os valores de D10 variaram de $19,24 \mu\text{m} \pm 0,07$ (amostra 3) a $46,74 \mu\text{m} \pm 0,28$ (amostra 9), D50 variou de $33,53 \mu\text{m} \pm 0,12$ (amostra 3) a $309,63 \mu\text{m} \pm 0,89$ (amostra 9), D90 apresentou variação de $209,95 \mu\text{m} \pm 2,21$ (amostra 3) a $838,63 \mu\text{m} \pm 9,72$ (amostra 5), D4,3 variou de $74,48 \mu\text{m} \pm 2,07$ (amostra 3) a $380,48 \mu\text{m} \pm 4,17$ (amostra 10) e largura de distribuição variou de $2,3 \pm 0,03$ (amostra 9) a $13,64 \pm 0,44$ (amostra 1).

Nas amostras 1 e 2 é possível perceber que o span é alto, isto implica que há uma distribuição ampla de tamanhos, ou seja, há uma grande variação no tamanho das partículas, já nas demais amostras, há um número de span baixo, indicando uma distribuição estreita de partículas, ou seja, com tamanhos mais uniformes. No D4,3 não há uma distribuição

uniforme. É possível observar também que há uma grande variação, que pode ter sido causada pela ozonização ou pelo fato de alguns grânulos serem provenientes das demais lavagens dos bagaços de araruta, e isto ter influenciado no tamanho das partículas.

Tabela 16 - Características da distribuição do tamanho de partícula dos amidos de araruta.

Amostras	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)	D4,3 (µm)	Largura da distribuição
Controle	25,10 ^{cd} ±0,09	303,47 ^{hi} ±2,70	821,38 ^f ±6,90	371,28 ^e ±3,27	2,62 ^f ±0,04
1	20,20 ^{fg} ±0,03	43,77 ^g ±0,19	598,93 ^c ±5,06	216,86 ^{ab} ±5,78	13,64 ^a ±0,44
2	21,34 ^{ef} ±0,14	64,56 ^f ±0,46	637,24 ^c ±3,37	234,70 ^b ±5,25	9,64 ^b ±0,35
3	19,24 ^g ±0,07	33,53 ^h ±0,12	209,95 ^a ±2,21	74,48 ^a ±2,07	5,62 ^c ±0,08
4	33,76 ^b ±0,11	235,61 ^c ±1,75	686,22 ^b ±8,53	310,38±8,47	2,86 ^{df} ±0,08
5	22,13 ^e ±0,33	258,13 ^b ±0,66	838,63 ^d ±9,72	351,37 ^d ±7,38	3,16 ^{de} ±0,03
6	35,73 ^a ±1,25	271,07 ^a ±0,95	704,67 ^b ±3,92	335,85 ^{cd} ±2,47	2,48 ^f ±0,03
7	20,00 ^g ±0,20	218,54 ^e ±0,68	782,40 ^e ±2,79	317,02 ^c ±3,12	3,54 ^e ±0,05
8	20,41 ^{fg} ±0,19	230,51 ^d ±0,48	831,01 ^d ±3,58	332,65 ^{cd} ±3,55	3,61 ^e ±0,09
9	46,74 ^c ±0,28	309,63 ⁱ ±0,89	775,87 ^e ±8,38	379,07 ^f ±5,34	2,35 ^f ±0,03
10	45,37 ^c ±0,18	307,75 ⁱ ±1,61	828,73 ^d ±2,97	380,48 ^f ±4,17	2,52 ^f ±0,04
11	45,35 ^c ±0,57	308,23 ⁱ ±1,89	775,63 ^e ±9,55	378,27 ^f ±4,52	2,44 ^f ±0,03

Fonte: Autora (2025).

Amostras: 1(30g/5min); 2(30g/10min); 3(60g/5min); 4(60g/10min); 5(30g/7,5min); 6(60g/7,5min); 7(45g/5min); 8(4

5g/10min);9(45g/7,5min);10(45g/7,5min);11(45g/7,5min).

Cada valor representa a média e o desvio controle das repetições.

Valores com letras minúsculas diferentes em cada coluna representam diferença significativa ($p < 0,05$).

Ding *et al.* (2015) investigaram o efeito do tratamento com ozônio na distribuição do tamanho das partículas. Nos amidos de arroz ceroso, que possuem alto peso molecular, houve um aumento moderado após 0,5 h de exposição ao ozônio. Em contraste, o componente de peso molecular intermediário apresentou redução, como observado por Yan *et al.* (2012), sugerindo que a reticulação das moléculas de amido ocorreu devido ao processo de ozonização.

A análise da distribuição do tamanho das partículas em amidos de arracacha ozonizados e naturais mostrou que as amostras tratadas apresentaram uma faixa ligeiramente mais ampla de tamanhos de grânulos (Lima *et al.*, 2020). Castanha *et al.* (2019) sugerem que esse leve aumento pode estar relacionado à agregação parcial dos grânulos. Contudo, Lima *et al.* (2020), utilizando um sistema dinâmico com agitação contínua para avaliar a distribuição do tamanho de partículas, consideraram essa hipótese pouco plausível. Outra explicação para o leve aumento seria a expansão parcial dos grânulos de amido provocada pelo tratamento com ozônio em meio aquoso, o que pode afetar o arranjo estrutural de amilose e amilopectina. De modo geral, as mudanças observadas no tamanho dos grânulos foram mínimas.

No estudo de Lima *et al.* (2020), o tratamento com ozônio não alterou a distribuição do tamanho dos grânulos de amido de quinoa, que se manteve monomodal em todas as amostras analisadas. Os diâmetros médios dos grânulos variaram entre 1,28 e 1,52 μm , com diferença significativa observada apenas entre o amido nativo e o tratado com ozônio por 30 min. O amido de quinoa apresenta uma tendência à aglomeração das partículas, e a formação de grupos carboxila resultante da oxidação pode levar ao aumento do tamanho desses aglomerados. Isso ocorre devido à repulsão entre as cadeias, causada pela carga negativa desses grupos, resultando em partículas com diâmetros maiores (Xie; Liu; Cui, 2005).

Lima *et al.* (2021) relataram uma leve redução nos tamanhos dos grânulos de amido de mandioca, atribuindo essa variação à presença de formatos irregulares dos grânulos. Por outro lado, Castanha *et al.* (2019), ao submeterem amido de milho à ozonização por 15 min, não identificaram mudanças no tamanho ou no formato dos grânulos. Dessa forma, as características estruturais dos grânulos influenciaram a interação do ozônio com o amido, resultando em variações distintas nos tamanhos observados para os amidos modificados.

No estudo de Ramos (2019), a distribuição granulométrica dos amidos de mandioquinha-salsa, tanto nativos quanto ozonizados, mostrou que os amidos de diâmetros maiores são influenciados pelas partículas de maior tamanho, enquanto os de diâmetro menores são mais afetados pelas partículas menores (Lopez-Sanchez *et al.*, 2011). Os resultados indicaram um discreto aumento no tamanho das partículas maiores. Assim, os autores constataram que os tratamentos com ozônio por 15 e 30 min provocam apenas pequenas modificações na morfologia dos grânulos de amido de mandioquinha-salsa.

No estudo de Castanha *et al.* (2019), com amido de batata, os resultados mostram que o processo de ozonização resultou em uma redução no diâmetro dos grânulos maiores de amido, enquanto o impacto sobre os grânulos menores foi menos significativo. Esse comportamento pode ser atribuído à maior exposição e acessibilidade do ozônio aos grânulos de maior tamanho durante o tratamento. Em contrapartida, as amostras submetidas à ozonização apresentaram tamanhos médios de partículas bastante semelhantes entre si.

Como no presente estudo não houve uma variação linear, não há como estudar a influência direta da ozonização neste parâmetro.

4.3.2.10 Difração de raio-x

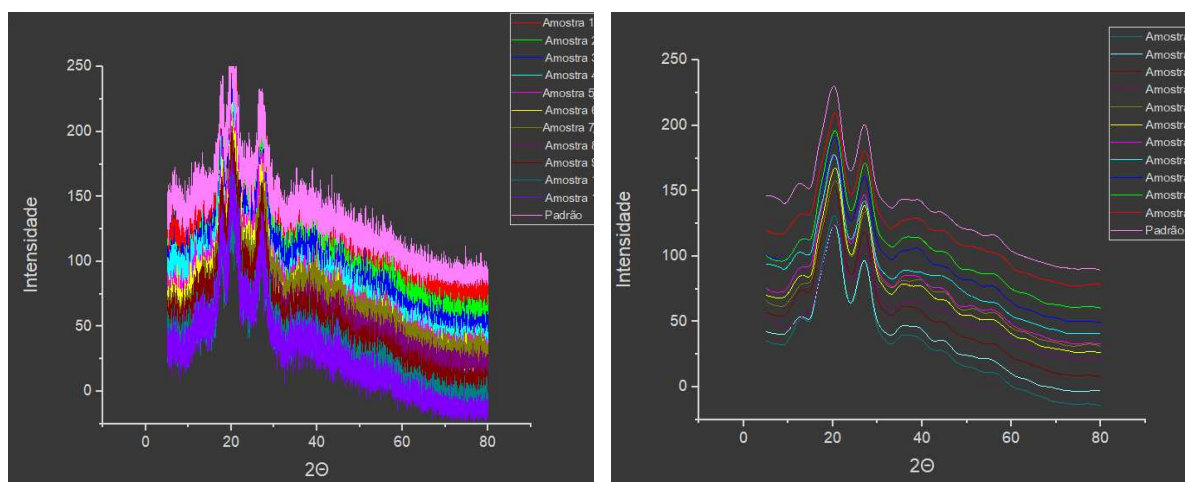
A difração de raio-x é uma técnica que pode ser usada para classificar amidos, pois os padrões de difração mudam de acordo com a fonte vegetal do qual o amido é obtido. Os perfis de difração de raio-x das amostras de amido de araruta são mostrados na Figura 53. Os difratogramas de raios-x da amostra controle e modificadas correspondem a um material semicristalino que consiste de uma estrutura aberta e altamente hidratada, com hélices de conformação v.

Tanto o amido de araruta controle, quanto os amidos modificados apresentaram picos de difração mais intensos localizados na faixa de 2θ entre 15° e 25° , com os máximos mais evidentes por volta de 17° , 20° e 23° , sendo caracterizado como amido do “tipo B”. Os polimorfos do tipo B têm estruturas mais abertas com um núcleo helicoidal hidratado, tornando o grânulo mais resistente à alteração (Colussi *et al.*, 2018). Esta característica é coerente com a origem do amido (Srichwong *et al.*, 2005). Logo, a forma do amido não apresentou mudança após a ozonização. Uma observação semelhante também foi relatada por Huang, Chen e Liu (2024).

É possível perceber que a amostra controle apresenta picos mais intensos, especialmente em 17° , 20° e 23° 2θ , mostrando uma menor contribuição amorfa, logo, uma

base mais estável, apresentando uma estrutura cristalina mais organizada em relação às amostras 1 e 8 e menos estável em relação às demais amostras.

Figura 53 - Padrões de difração de raios x com e sem ruído dos amidos de araruta.



Fonte: Autora (2025).

As regiões cristalinas do amido conferem estabilidade estrutural aos grânulos, restringindo o inchamento, a solubilização em meio aquoso e a ação de agentes enzimáticos e químicos, além de preservar a birrefringência óptica. Por sua vez, as regiões amorfas, menos densas e mais frágeis, são mais suscetíveis a modificações e apresentam maior capacidade de absorção de água antes da temperatura de gelatinização (Biliaderis, 1991).

A cristalinidade do amido está relacionada à estrutura da amilopectina, composta por longas cadeias de polissacarídeos que se organizam por meio de ligações de hidrogênio dentro do grânulo (Cheetham e Tao, 1998). Conforme apresentado na Tabela 17, o amido controle apresentou cristalinidade relativa de 46,47%, enquanto os amidos modificados variaram entre 35,13% e 55,78%. Observou-se que a amostra 3 apresentou redução na cristalinidade relativa, indicando alterações em sua estrutura cristalina. As demais amostras demonstraram aumento da cristalinidade, exceto a amostra 8, que não diferiu estatisticamente ($p < 0,05$) do controle. De modo geral, verificou-se que tratamentos com menor tempo de exposição ao ozônio (5 min) e menor massa de amido no reator (30 e 45 g) resultaram em redução da cristalinidade relativa, ao passo que tempos de exposição mais prolongados favoreceram seu aumento.

O ozônio, por ser um agente oxidante altamente reativo, atua preferencialmente sobre as regiões menos organizadas e mais acessíveis dos grânulos de amido, como as zonas

amorfos. Essa ação seletiva promove a degradação dessas regiões, reduzindo proporcionalmente a fração amorfa em relação à cristalina, o que pode levar ao aumento da cristalinidade relativa.

Tabela 17 - Índice de cristalinidade relativa dos amidos de araruta.

Amostras	Cristalinidade relativa (%)
Controle	46,47 ^d
1	35,13 ^e
2	54,99 ^b
3	55,78 ^a
4	50,96 ^g
5	52,98 ^c
6	52,44 ^f
7	51,65 ^h
8	45,98 ^d
9	51,85 ^h
10	50,47 ^g
11	51,99 ^{fh}

Fonte: Autora (2025).

Amostras: 1(30g/5min); 2(30g/10min); 3(60g/5min); 4(60g/10min); 5(30g/7,5min); 6(60g/7,5min); 7(45g/5min); 8(45g/10min); 9(45g/7,5min); 10(45g/7,5min); 11(45g/7,5min).

Cada valor representa a média e o desvio controle das repetições.

Valores com letras minúsculas diferentes em cada coluna representam diferença significativa ($p < 0,05$).

Em um estudo conduzido com amido de arroz ceroso, Li *et al.* (2023) observaram uma tendência inversa à do presente trabalho, na qual a cristalinidade relativa diminuiu com o aumento do tempo de ozonização. No entanto, é importante destacar que, naquele estudo, foram empregados tempos de exposição mais prolongados (até 4 h) em comparação aos utilizados neste trabalho. Nos intervalos de até 2 h, observou-se um aumento na cristalinidade

relativa, sendo que o amido submetido à ozonização por 2 h apresentou índice de cristalinidade de 48,39%, valor superior ao da amostra controle (44,90%).

No trabalho de La Fuente *et al.* (2019), onde foi estudado o amido de mandioca, um aumento na Cristalinidade Relativa também foi observado devido ao processo de ozonização. E na pesquisa de Hu *et al.*, (2022), onde estudaram o trigo sarraceno, a cristalinidade relativa aumentou de 35,15% (amostra controle) para 47,94% em 7,5 min de tratamento com ozônio, depois desceu para 39,11% conforme o tempo de processamento aumentou para 20 min.

Possivelmente, a razão destas diferenças estavam relacionadas à extensão ozonizada e à fonte de amido. É possível que o tempo utilizado no presente trabalho em conjunto com a quantidade de amido no reator, não tenham sido suficientes para que ocorresse a degradação da área cristalina do amido.

De acordo com Klein *et al.* (2014), diversos fatores estruturais influenciam a cristalinidade relativa do amido, incluindo o tamanho dos cristais, a quantidade e o conteúdo das regiões cristalinas, o comprimento das cadeias poliméricas e o grau de interação e orientação das duplas hélices nas zonas cristalinas. Estruturalmente, os grânulos de amido são constituídos por camadas alternadas de regiões cristalinas e amorfas. Durante a oxidação por ozônio, a ação do agente oxidante ocorre preferencialmente sobre as regiões amorfas, mais suscetíveis devido à sua menor organização, e também sobre as áreas semicristalinas adjacentes.

A redução da cristalinidade em amidos modificados pode estar associada à diminuição das interações intermoleculares, como a ruptura de ligações de hidrogênio e a menor organização das cadeias de amilopectina. Essas alterações estruturais impactam diretamente propriedades funcionais do amido, como sua capacidade de hidratação, comportamento térmico e características texturais (Silva, 2019). Por outro lado, o aumento da cristalinidade relativa observado após a ozonização pode ser explicado pela degradação seletiva das regiões amorfas, menos organizadas e mais suscetíveis à ação oxidante do ozônio (Li *et al.*, 2023).

Adicionalmente, a oxidação pode induzir a reorganização de cadeias lineares remanescentes, como as de amilose, favorecendo a formação de estruturas mais ordenadas. A ozonização também provoca a clivagem das cadeias polissacarídicas, originando moléculas de menor peso molecular e menor comprimento, o que pode facilitar o rearranjo e a recristalização, contribuindo para o aumento da cristalinidade relativa (La Fuente *et al.*, 2019).

4.4 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados observados neste trabalho é possível concluir que o ozônio influencia de diferentes maneiras nas características do amido de araruta. O amido de araruta apresentou um rendimento médio de 15%, que pode ser otimizado reduzindo o tempo de armazenamento dos rizomas pós-colheita.

Na análise de FTIR, as amostras apresentaram presença de grupamentos carboxílicos e de ligações hidrogênio de grupos -OH. Presença de grupos hidroxila da D-glicose, grupos metil e metileno na cadeia carbônica da amilose e amilopectina. Estiramento de ligações C-O, C-C e C-O-C, características da estrutura glicosídica do amido. No entanto, não foi possível observar grandes diferenças entre as amostras nas bandas de absorção, havendo apenas pequenas mudanças em suas absorbâncias.

Na análise de Microscopia Eletrônica de Varredura não foi possível verificar modificações na morfologia dos amidos de araruta tratados em relação à amostra controle. Os grânulos apresentaram tamanho de aproximadamente 17 μm , com superfícies lisas e homogêneas, livres de rugosidades ou trincas aparentes.

Já as amostras de amido de araruta apresentaram uma diminuição no Índice de Absorção quando submetidas ao calor e um aumento no Poder de Inchamento, tanto sob ação do calor, quanto à temperatura ambiente.

Em menores quantidades de amido no reator, o tempo influenciou para a diminuição de absorção de água, já o maior Índice de Absorção de Água ocorreu com 60 g de amido e 5 min de tratamento. Os valores mais altos de IAA se aproximam do amido não tratado, indicando que o tratamento com ozônio reduziu o IA, quanto maior o tempo, menor o IAA. O poder de inchamento à temperatura ambiente apresentou o seu ponto máximo quando a quantidade de amido no reator foi maior e o tempo foi menor. Conforme a quantidade de amido no reator foi diminuindo e o tempo aumentando, o poder de inchamento decresceu. Sob a ação do calor, os resultados de IAA e de poder de inchamento foram bem maiores que à temperatura ambiente, pois o calor promove a quebra das ligações intermoleculares e o inchaço das cadeias poliméricas. À medida que a quantidade de amido no reator aumentou, o poder de inchamento sob ação do calor apresentou uma tendência crescente, sugerindo que maiores quantidades de amido podem diluir o efeito oxidativo do ozônio, preservando a funcionalidade do amido. A utilização do ozônio como modificador vai depender da finalidade deste amido, pois maiores valores de IAA e poder de inchamento em amidos

indicam maior capacidade do amido de reter água e formar geis, o que é desejável em produtos que precisam de maior viscosidade, estabilidade e textura, como molhos, sopas e produtos panificados. Por outro lado, menores valores desses índices indicam menor interação com a água, o que é interessante em formulações que exigem menor viscosidade, maior crocância ou menos retenção de umidade, como biscoitos e produtos extrusados.

Em relação à cor, os amidos ozonizados apresentaram luminosidade maior que a controle, mas apenas a amostra 2 mostrou-se significativamente ($p < 0,05$) maior. Os amidos mais claros são preferidos pelos consumidores.

Se tratando do comportamento reológico dos amidos, todas as amostras apresentaram comportamento Newtoniano e foi possível perceber que o ozônio reduziu a natureza sólida dos amidos, quanto maior o tempo de tratamento e menor a quantidade de amido no reator, mais viscoso ele se apresentou.

Na análise de estabilidade a ciclos de congelamento e descongelamento, todas as amostras tiveram uma sinérese maior no primeiro ciclo de congelamento. A amostra padrão foi a que apresentou maior valor ($92,40 \% \pm 0,82$) e a amostra 1 (30 g/5 min) um menor valor ($26,68 \% \pm 0,64$). Com o passar dos ciclos, a sinérese foi diminuindo. As amostras não se comportam linearmente em relação à sinérese quando comparados os ciclos, sendo a perda de água diferente em cada ciclo, isto pode se dar devido ao comportamento do amido frente a cada tratamento, pois as amostras que receberam o mesmo tratamento se comportam basicamente da mesma maneira. Estas porcentagens menores de liberação de água nas pastas de amidos modificados, principalmente nos ciclos iniciais, indicam que a modificação aumentou a estabilidade dos amidos, logo, estes possuem uma menor tendência a retrogradação em armazenamento sob refrigeração por poucos dias.

A maioria das amostras ozonizadas apresentou redução nos valores dos parâmetros de viscoamilografia analisados, com exceção da viscosidade de ruptura, que aumentou significativamente ($p < 0,05$). O maior valor de viscosidade máxima foi observada no tempo médio de tratamento com maior quantidade de amido no reator, nos tempos extremos e com menor massa, a viscosidade diminuiu gradativamente, afastando-se dos valores da amostra controle. A viscosidade mínima também atingiu seu pico com tempo médio de tratamento e maior quantidade de amido. Com menor tempo e maior massa, os valores se aproximaram dos obtidos com maior tempo e maior massa. Porém, com menor quantidade de amido e maior tempo de tratamento, a viscosidade mínima caiu, distanciando-se da amostra controle, o que indica maior influência da ozonização. Foi possível verificar que quanto maior o tempo de tratamento e quanto menos massa no reator,

maior a viscosidade de ruptura. A maior influência da ozonização na viscosidade final aconteceu no maior tempo e menor quantidade de amido no reator, apresentando um menor valor. A maior influência do ozônio na temperatura de gelatinização ocorreu na amostra com menor tempo de tratamento e menor quantidade no reator. Os tempos mínimo e máximo foram os que mais impactaram esse parâmetro, com pouca interferência da quantidade de massa. O amido tratado com ozônio, com menor viscosidade final e máxima, mas maior ruptura, é útil em formulações que exigem boa fluidez, baixo espessamento, fácil processamento térmico e menor retrogradação, sendo perfeito para molhos fluidos.

Em relação ao DSC, as maiores temperaturas iniciais foram registradas com 35 g a 60 g de amido e tempos de 6 a 10 minutos. Tempos menores em 30 g de amido resultaram em temperaturas mais baixas. O pico ocorreu com 45 g a 60 g de amido e 7,5 minutos, apresentando maior diferença em relação à amostra padrão. A ozonização influenciou a temperatura de pico de forma semelhante à temperatura inicial: os maiores valores ocorreram com 45 g e 60 g de amido e tempos entre 7,5 e 10 minutos. Com 5 minutos de tratamento, a temperatura de pico foi baixa para todas as quantidades, e com 10 minutos, só foi baixa na menor quantidade de amido. Assim como nas temperaturas inicial e de pico, a temperatura final também foi mais alta com tempos de tratamento mais longos e quantidades médias a altas de amido no reator. A entalpia variou de forma inversa às temperaturas, com os menores valores entre 5 e 10 minutos de tratamento e 45 g a 60 g de amido — as amostras mais distintas da padrão. As maiores diferenças de entalpia ocorreram com 5 minutos de tratamento, independentemente da massa, e também com 10 minutos e 30 g de amido. Na T_o , T_p e T_c , a maioria das amostras tratadas apresentaram valores maiores que na amostra controle. A diferença de entalpia foi menor em todas as amostras tratadas, em comparação com a controle. Então, apesar de gelatinizar a temperaturas mais altas, a quantidade de energia envolvida nesse processo é menor, favorecendo produtos que precisam de estabilidade térmica inicial, mas que depois formam pastas mais fluidas e menos viscosas.

De forma integrada, os resultados de DSC e viscoamilografia indicam que o amido tratado com ozônio apresenta um perfil funcional caracterizado por maior resistência térmica no início do processamento, seguido por uma rápida perda de viscosidade após atingir o pico, gerando sistemas com baixa viscosidade final, menor tendência à retrogradação e boa estabilidade durante o processamento térmico. Estas características ampliam significativamente seu potencial de aplicação em sistemas alimentícios.

A distribuição de tamanho da partícula não apresentou homogeneidade nos resultados, estando aproximadamente metade maior que a controle e metade menor, estando

relacionado com a forma de obtenção do amido e não com o tratamento em si.

A difração por raio-x mostrou que as amostras se apresentaram com uma estrutura aberta e altamente hidratada, com hélices de conformação v , com picos 2θ entre 15° e 25° , com os máximos mais evidentes por volta de 17° , 20° e 23° a amostra controle mostrou uma menor contribuição amorfa em relação às amostras 1 e 8 e menos estável em relação às demais amostras. A cristalinidade relativa das amostras ozonizadas, em sua grande maioria, se mostrou maior em comparação com a amostra sem tratamento, este aumento pode favorecer o aumento do amido resistente. Logo, conclui-se que o ozônio pode ser utilizado com agente oxidante em amido de araruta, visando modificações nas suas características físicas, reológicas e térmicas.

REFERÊNCIAS

ABITRIGO. **Associação Brasileira de Trigo**. [S. l.: s. n], 2018.

ABITRIGO. **Associação Brasileira de Trigo**. [S. l.: s. n], 2020.

ABRÃO, Marianne Sales. **Crescimento, produtividade e rentabilidade de araruta 'comum' em resposta a formas de adição ao solo de cama de frango, espaçamentos entre plantas e de tipos e tamanhos de propágulos**. 2019. Tese (Doutorado em Agronomia–Produção Vegetal). Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS, 2019.

ADEBOWALE, Kayode *et al.*, Isolamento, modificação química e caracterização físico-química de amido e farinha de amendoim Bambarra (Voandzeia subterrânea). **Química dos Alimentos**, v. 78, n. 3, p. 305-311, 2002.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Nota técnica nº 108/2020/SEI/COSAN/GHCOS/DIRE3/ANVISA. **O uso do ozônio como produto desinfetante durante a pandemia causada pelo novo coronavírus (Sars-CoV-2)**. Brasília, 2020.

ALCÁZAR-ALAY, Sylvia Carolina; MEIRELES, Maria Angela Almeida. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. **Food Science and Technology**, v. 35, p. 215-236, 2015.

ALMEIDA, E. L.; CHANG, Y. K. Influence of different enzymes during the frozen storage of pre-baked French bread elaborated with whole-wheat flour. **J. Food Process. Preserv.**, v. 67, n. 2, p. 38-45, 2012.

ALVES, Hanna *et al.* Aspectos microbiológicos e físico-químicos de morango exposto ao gás ozônio em diferentes concentrações durante o armazenamento. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 22, p. e2018002, 2019.

AMANTE, E. R. **Caracterização de amidos de variedades de mandioca (Manihot esculenta, Crantz) e de batata-doce (Ipomoea batatas)**. 1986. (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 1986.

AMERICAN ASSOCIATION OF CEREAL CHEMISTS. **Approved Methods American Association of Cereal Chemists**. 10th ed. Saint Paul: AACC, 2000. v. 2.

AMERICAN ASSOCIATION OF CEREAL CHEMISTS. **International Method 38-12.02: Wet Gluten, Dry Gluten, Water-Binding Capacity, and Gluten Index** - First approval November 8, 2000.

AMERICAN ASSOCIATION OF CEREAL CHEMISTS. **Método 76–21. Método geral de colagem para farinha de trigo ou centeio usando o Rapid Visco Analyser**. 2000.

AMORIM, Emanuele Oliveira Cerqueira. **Avaliação da eficiência da descontaminação de amido de mandioca com ozônio**. 2011. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos). Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2011.

AZZEH, F.S.; AMR, A.S. Effect of gamma irradiation on physical characteristics of Jordanian durum wheat and quality of semolina and lasagna products. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 78, p. 818-822, 2009.

BALHMANN, C. L.; LANZARINI, D. P. **Estudo reológico e físico-químico das farinhas de trigo destinadas a panificação produzidas em moinhos da região de Francisco Beltrão**. 32 f. Trabalho de conclusão do Curso (Graduação em Tecnologia em Alimentos). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Francisco Beltrão-PR, 2013.

BARAK, S.; MUDGIL, D.; KHAKTAR, B. S. Relationship of gliadin and glutenin proteins with dough rheology, flour pasting and bread making performance of wheat varieties. **LTW – Food Science and Technology**, v. 51, n. 1, p. 211-217, 2013.

BENATO, E. A.; SIGRIST, J. M. M.; ROCHA, P. Manuseio, aspectos fitossanitários e logística de caqui pós-colheita. (Boletim técnico científico). **Toda Fruta**, São Paulo, 2005.

BEZERRA, J.R.M.V *et al.* Elaboração de pães com farinha de pinhão. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v. 8, n. 1. p. 69-81, 2006.

BHATTACHARYYA, Debarati; BAHETI, Vijay. Ozone assisted modification and pulverization of plant fibres. **Industrial Crops and Products**, v. 199, p. 116711, 2023.

BILIADERIS, Costas G. The structure and interactions of starch with food constituents. **Canadian Journal of Physiology and Pharmacology**, v. 69, n. 1, p. 60–78, jan. 1991.

BOAS, Flávia Villas. **Efeito da β -amilase e α -amilase fúngica seguido de desramificação na formação e características estruturais de amido resistente tipo 3 de batata e araruta**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos). Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto-SP. 2014.

BORTOLOTTTO, Geovana Dagostim Savi *et al.* **Estratégias de controle e descontaminação do trigo em grãos (*Triticum aestivum* L.) com relação a fungos, micotoxinas e agrotóxicos utilizando compostos químicos e ozônio gasoso**. 2014. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos). Universidade de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2014.

BORUCH, M. **Transformations of potato starch during oxidation with hypochlorite**. [SI.: s.n], 1985.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Hortaliças não-convencionais**: (tradicionalis). Brasília : MAPA/ ACS, 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº8, de 02 de junho de 2005**. Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade de farinha de trigo. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 2, de 3 de janeiro de 2008**. Normas de trabalho da aviação agrícola. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº18, de 28 de maio de 2009**. Regulamento Técnico para o processamento, armazenamento e transporte de produtos orgânicos. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução RDC nº 90, 18 out. 2000**. Aprova o regulamento técnico para fixação de identidade e qualidade de pão. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, out. 2000.

BRASIL. Ministério da Saúde, Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução RDC nº 263, de 22 set. 2005**. Aprova o regulamento técnico para produtos de cereais, amidos, farinhas e farelos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, set. 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº, de 888 de 4 de maio de 2021**. Procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu controle de potabilidade. Diário Oficial da União. Brasília, DF.

BRASIL. Ministério do Trabalho e do Emprego. **Portaria GM nº 3.214, de 08 de junho de 1978**. Atividades e Operações Insalubres. Diário Oficial da União. Brasília, DF.

BRASIL, D. L. *et al.* **Desenvolvimento de pães tipo forma adicionado de farinha de berinjela**. Trabalho apresentado no XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014, na cidade de Florianópolis.

BUSHUK, W. Flour proteins: structure and functionality in dough and bread. **Cereal Foods World**, vol. 30, n. 7, p. 447-451, 1985.

CAEL, S. J.; KOENIG, J. L.; BLACKWELL, J. Infrared and raman spectroscopy of carbohydrates: Part III: raman spectra of the polymorphic forms of amylose. **Carbohydrate research, Barking**, v. 29, p. 123-134, 1973.

CAEL, S. J.; KOENIG, J. L.; BLACKWELL, J. Infrared and Raman spectroscopy of carbohydrates. Part VI: Normal coordinate analysis of V-amylose. *Biopolymers*, **Weinheim**, m. 14, p. 1885-1903, 1975

CALDEIRA, M. T. M. *et al.* Diversidade de trigos, tipificação de farinhas e genotipagem. **Revista Biotecnologia, Ciência e Desenvolvimento**. v.16, n.1, p. 44-48. 2003.

CANALIS, Soledad María Blanco. **Mejoramiento del perfil nutricional y saludable de productos de panificación**. Tese (Doutorado). Escola de Química e Alimentos. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 2017.

CAPRILES, V. D.; AREAS, J. A. G. Avanços na produção de pães sem glúten: aspectos tecnológicos e nutricionais. **Boletim CEPPA**, v. 29, n. 1, p. 15-21, 2011.

CARDOSO, C. C. *et al.* Avaliação microbiológica de um processo de sanificação de galões de água com a utilização do ozônio. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.23, n.1, p. 59-61, 2003.

CASTANHA, Nanci; DA MATTA JUNIOR, Manoel Divino; AUGUSTO, Pedro Esteves Duarte. Potato starch modification using the ozone technology. **Food Hydrocolloids**, v. 66, p. 343-356, 2017.

CASTANHA, Nanci et al. Combining ozone and ultrasound technologies to modify maize starch. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 139, p. 63-74, 2019.

CASTANHA, Nanci et al. Properties and possible applications of ozone-modified potato starch. **Food Research International**, v. 116, p. 1192-1201, 2019.

CASTANHA, Nanci *et al.* Starch modification by ozone: Correlating molecular structure and gel properties in different starch sources. **Food Hydrocolloids**, v. 108, p. 106027, 2020.

CATALDO, F. On the action of ozone on proteins. **Polymer Degradation and Stability**, v. 82, p. 105-114, 2003.

CAUVAIN, S. P.; YOUNG, L. S. Tecnologia da Panificação. Barueri, São Paulo: Ed. Manole, 2009. 418 p.

CAVALCANTE, D. A. *et al.* Shelf life evaluation of the iceberg lettuce sanitized with ozone water. **Ciência Rural**, v. 45, n. 11, p. 2089-2096, 2015.

CAZÓN, P. *et al.* Filmes e revestimentos à base de polissacarídeos para embalagens de alimentos: Uma revisão. **Food Hydrocolloids**, 68, 136-148. 2017.

CHAN, Hui T.; KARIM, Alias. A. Propriedades físico-químicas e funcionais do amido oxidado por ozônio. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 57, n. 13, p. 5965-5970, 2009.

CHAN, H. T. *et al.* Molecular structure, rheological and thermal characteristics of ozone-oxidized starch. **Food Chemistry**, v. 126, n. 3, p. 1019-1024, 2011.

CHAN, Hui-Tin et al. Effect of deproteinization on degree of oxidation of ozonated starch. **Food Hydrocolloids**, v. 26, n. 2, p. 339-343, 2012.

CHANDRAVARNAN, P.; AGYEI, D.; ALI, A. Green and sustainable technologies for the decontamination of fungi and mycotoxins in rice: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 124, p. 278-295, 2022.

CHAPAGAI, Madan Kumar et al. Multiple length scale structure-property relationships of wheat starch oxidized by sodium hypochlorite or hydrogen peroxide. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 2, p. 100147, 2021.

CHEETHAM, Norman W. H.; TAO, Leping. Variation in crystalline type with amylose content in maize starch granules: an X-ray powder diffraction study. **Carbohydrate polymers**, v. 36, n. 4, p. 277-284, 1998.

CHITTRAKORN, Sasivimon; EARLS, Dru; MACRITCHIE, Finlay. Ozonation as an alternative to chlorination for soft wheat flours. **Journal of Cereal Science**, v. 60, n. 1, p. 217-221, 2014.

COELHO, I. D. S. *et al.* Como plantar e usar a araruta. **Embrapa Informação Tecnológica**. Seropédica, RJ: Embrapa Agrobiologia, 2005.

COLUSSI, Rosana *et al.* Processamento de alta pressão e retrogradação de amido de batata: Influência nas propriedades funcionais e na digestão gastro-intestinal in vitro. **Food Hydrocolloids**, v. 75, p. 131-137, 2018.

COUTO, E. P., *et al.* Efeito da ozonização sobre a contagem da Staphylococcus Aureus inoculado em leite. Semina: **Ciências Agrárias**, v. 37, n. 4, p. 1911-1918, 2016.

COSTA, Rafaela *et al.* Avaliação do teor de glúten úmido e glúten seco em farinhas de trigo comercializadas em Vitória da Conquista - BA. **Anais da 4ª Semana de Engenharia de Alimentos e I Simpósio da Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos da UESB**. Anais. Itapetinga - BA, 2018.

COSTA, S. T. A., *et al.* Yield and postharvest quality of ‘common’ arrowroot plants subjected to biofertilization. **Comunicata Scientiae**, v.13: e3735, 2022.

CUNHA, A. L. **Caracterização do amido da araruta tipos seta e redonda, visando utilização na indústria de alimentos**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2016.

ÇATAL, Hatice; İBANOĞLU, Şenol. Effect of aqueous ozonation on the pasting, flow and gelatinization properties of wheat starch. **LWT-Food Science and Technology**, v. 59, n. 1, p. 577-582, 2014.

DANTAS, R. L. *et al.* **Extração e caracterização de amido de inhame**. Trabalho apresentado na Reunião anual da sociedade brasileira para o progresso da ciência, 65., 2013, Recife. Anais. Recife-PE, 2013.

DAR, M. Zuhair *et al.* Modification of structure and physicochemical properties of buckwheat and oat starch by γ -irradiation. **International journal of biological macromolecules**, v. 108, p. 1348-1356, 2018.

DELVAL, F, *et al.* Characterization of crosslinked starch materials with spectroscopic techniques. **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v. 93, p. 2650-2663, 2004.

DEMIATE, I. M., *et al.* Relationship between baking behavior of modified cassava starches and starch chemical structure determined by FTIR spectroscopy. **Carbohydrate Polymers**, Barking, v. 42, p. 149- 158, 2000.

DESVIGNES, C. *et al.* Changes in common wheat grain milling behavior and tissue mechanical properties following ozone treatment. **Journal of Cereal Science**, London, v.47, n.2, p. 245-251, 2008.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. São Carlos: Rima. v. 2, 784 p. 2005.

DIAO, E.; HOU, H.; DONG, H. Ozonolysis mechanism and influencing factors of aflatoxin B1: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 33, n.1, p. 21-26, 2013.

DING, Wenping *et al.* Effect of ozone treatment on physicochemical properties of waxy rice flour and waxy rice starch. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 50, n. 3, p. 744-749, 2015.

DU, Mengyao *et al.* Effect of heat-moisture treatment on physicochemical properties of chickpea starch. **Food Science and Technology**, v. 43, p. e108822, 2023.

DU, Meng *et al.* Ozone induced structural variation in OSA waxy rice starch: Effects on the thermal behavior of starch and its stabilized pickering emulsion. **Food Chemistry: X**, v. 23, p. 101701, 2024.

EMBRAPA. Descrição dos métodos usados para avaliar a qualidade de trigo. Passo Fundo: RS, 2009.

EPA (Estados Unidos). **Health effects of ozone in the general population**. 2016. Disponível em: <https://www.epa.gov/ozone-pollution-and-your-patients-health/health-effects-ozonegeneral-population>. Acesso em: 20 de junho de 2024.

FAKHOURY, F. M. *et al.* Edible films made from blends of manioc starch and gelatin—influence of different types of plasticizer and different levels of macromolecules on their properties. **LWT Food Sci. Technol.** 2012. 49, 149–154. doi: 10.1016/j.lwt. 2012.04. 017.

FELIZIANI, E.; ROMANAZZI, G.; SMILANICK, J. L. Application of low concentrations of ozone during the cold storage of table grapes. **Postharvest Biology and Technology**, v.93, p.38–48, 2014.

FERNANDES, L. E. S., & NASCIMENTO, C. F. Araruta: uma espécie quase esquecida, da produção a alimentação: conservação da agrobiodiversidade nativa. **Cadernos de Agroecologia**, 15(2), 2020.

FERRARI, B.T.; LEONEL, M.; SARMENTO, S.B.S. Characteristics of the rhizomes and starch of arrowroot (*Maranta arundinacea* harvested at different stages of development. **Brazilian Journal of Food Technology**. v.8, n.2, p.93-98, 2005.

FERREIRA, Clara Maria *et al.* Efeito da farinha mista de subprodutos vegetais em pães tipo forma. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 2, p. 8710-8724, 2020.

FERREIRA, S. M. R.; OLIVEIRA, P. V.; PRETTO, D. Parâmetros de qualidade do pão francês. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 19, n 2, 2001.

FERREIRA, Wallas Felipe de Souza. **Eficácia do ozônio no controle de fungos potencialmente aflatoxigênicos em amendoim (*Arachis hypogaea* L.)**. 2014. Monografia (Graduação em Agronomia). Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

FOOD AND DRUG ADMINISTRATION. **Secondary Direct Food Additives Permitted in Food for Human Consumption**. Federal Register, v.66, n.123, p.33829-33830, 2001.

FOOD AND DRUG ADMINISTRATION. **Guidance to Industry. Recommendations to Processors of Apple Juice or Cider on the Use of Ozone for Pathogen Reduction Purposes**. [S. l.: s. n], 2004.

FIGONI, P. Wheat Flour. In: **FIGONI, P.** How baking works: Exploring the fundamentals of baking science, 2nd ed. Chapter 5, p. 63-86. 2008. Published by, John Wiley & Sons Inc. Hoboken, NJ. 2008.

FRANCO, C. M. L. *et al.* **Propriedades gerais do amido**. São Paulo: Fundação Cargill, v. 1, 224p. 2001.

FREO, J. D. *et al.* Propriedades físicas e tecnológicas de farinha de trigo tratada com terra diatomácea. **Ciencia Rural**, v. 41, n. 6. p. 1076-1081, 2011.

FURTADO, Bianca. *et al.* **Eficiência do gás ozônio na redução de fungos toxigênicos em grãos de arroz com casca**. Trabalho apresentado no 6º SICT-Sul-Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense. Santa Catarina, 2017.

GABRIC, D. *et al.* Impact of process conditions on the structure of pre-fermented frozen dough. **Journal of Food Engineering**. n.105, p.361–366, 2011.

GONÇALVES, G. G. **Etnobotânica de plantas alimentícias em comunidades indígenas multiétnicas do baixo rio Uaupés – Amazonas**. Tese (Doutorado em Horticultura). Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP, 2017.

GONG, Yongqiang *et al.* Factors and modification techniques enhancing starch gel structure and their applications in foods: A review. **Food Chemistry: X**, p. 102045, 2024.

GONZÁLEZ-ARIAS, A; HORTA-RANGEL, F. A. Ozono, contaminación ambiental y la medicina basada en evidencias. **Revista Cubana de Física**, v. 34, n. 1, p. 70-79, 2017.

GORDILLO, Carlos Andres Sandoval *et al.* Physicochemical characterization of arrowroot starch (*Maranta arundinacea* linn) and glycerol/arrowroot starch membranes. **International Journal of Food Engineering**, v. 10, n. 4, p. 727-735, 2014.

GOZÉ, Perrine *et al.* Starch characterization after ozone treatment of wheat grains. **Journal of Cereal Science**, v. 70, p. 207-213, 2016.

GRAGNANI, M. A. L. **Produção e avaliação de pão de forma com triticale e enzima transglutaminase microbiana**. 180 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos), Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2010.

GRAY, J. A.; BEMILLER, J. N. Bread staling: molecular basis and control. **Comp. Rev. Food Science and Food Safety**, v. 2, n. 1, p. 1-21, 2003.

GUTIÉRREZ, T. J. *et al.* Structural properties and in vitro digestibility of edible and pH-sensitive films made from guinea arrowroot starch and wastes from wine manufacture. **Carbohydrate Polymers**, v. 184, n. September 2017, p. 135–143, 2018.

GUZEL-SEYDIM, Z. B.; GREENE, A. K.; SEYDIM, A. C. Use of ozone in the food industry. **LWT - Food Science and Technology**, London, v.37, n.4, p. 453-460, 2004.

GRAHAM, D. M. Use of ozone for food processing. **Food Technology**, Chicago, v.51, n.6, p. 72-75, 1997.

HALLEN, E.; IBANOGLU, S.; AINSWORTH, P. Effect of fermented/germinated cowpea flour addition on the rheological and baking properties of wheat flour. **Journal of Food Engineering**, v. 63, p. 177-184, 2004.

HÄNNINEN, Kari. Contribution of excited ozone and oxygen molecules to the formation of the stratospheric ozone layer. **Environment and Ecology Research**, v. 7, n. 3, p. 121-134, 2019.

HARMAYANI, E.; KUMALASARI, I. D.; MARSONO, Y. Effect of arrowroot (*Maranta arundinacea* L.) diet on the selected bacterial population and chemical properties of caecal digesta of Sprague Dawley rats. **International Research Journal of Microbiology**, 2(8), 278-284. 2011.

HE, Yonglin *et al.* Ozone exposure tunes the physicochemical properties of sweet potato starch by modifying its molecular structure. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 236, p. 124002, 2023.

HELENO, Fernanda Fernandes. **Ozonização: uma estratégia para remoção de resíduos de agrotóxicos em alimentos**. 2013. Tese (Doutorado em Agroquímica). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2013.

HOOVER, Kevin D. **Causality in macroeconomics**. Cambridge University Press, 2001.

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

HOSENEY, R. C. **Principles of cereal science and technology**. 2 ed. St. Paul, Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists, 1994, p 378.

HRUSKOVA, M.; SVEC, I.; JIRSA, O. Correlation between milling and baking parameters of wheat varieties. **Journal of Food Engineering**, v. 77, p. 439-444, 2006.

HU, Jingwei *et al.* Effect of gaseous ozone treatment on the microbial and physicochemical properties of buckwheat-based composite flour and shelf-life extension of fresh noodles, **Journal of Cereal Science**, v 95. 2020.

HU, Jingwei *et al.* Modified Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.) starch by gaseous ozone: Structural, physicochemical and in vitro digestible properties. **Food Hydrocolloids**, v. 125, p. 107365, 2022.

HUANG, Xuemei; CHEN, Longwei; LIU, Yaochi. Effects of ultrasonic and ozone modification on the morphology, mechanical, thermal and barrier properties of corn starch films. **Food Hydrocolloids**, v. 147, p. 109376, 2024.

IBANOGLU, S. Influence of tempering with ozonated water on the selected properties of wheat flour. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v.48, n.4, p. 345- 350, 2001.

İBANOĞLU, Ş.; ÖZASLAN, Z. T.; İBANOĞLU, E. Combined effect ozonation and ultrasonication on rheological and thermal properties of rice starch in aqueous phase. **Quality Assurance and Safety of Crops & Foods**, v. 10, n. 1, p. 69-74, 2018.

INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECOLOGIA DE ALIMENTOS. **Avaliação da qualidade tecnológica/industrial da farinha de trigo**. Disponível em:<http://thor.sead.ufrgs.br/objetos/avaliacao-farinha-trigo/index.php>. Acesso em: 15 de março de 2024.

INTERNATIONAL, A. A. C. C. **Approved methods of analysis**. [S. l.: s. n], 2010.

IONASHIRO, Massao; CAIRES, Flávio J.; GOMES, Danilo JC. **Giolito**: fundamentos da termogravimetria e análise térmica diferencial/calorimetria exploratória diferencial. São Paulo: Giz, v. 1, p. 80, 2005.

INOKUMA, Takayuki *et al.* Utilizar a natureza hexaplóide do trigo para criar variabilidade nas características do amido. **Revista de química agrícola e alimentar** , v. 64, n. 4, pág. 941-947, 2016.

JACQUES, Andressa Carolina *et al.* Sanitização com produto à Base de Cloro e com Ozônio: Efeito Sobre Compostos Bioativos de Amora-preta (*rubus fruticosus*) cv. Tupy. **Revista Ceres**, v. 62, p. 507-515, 2015.

JAFARI, Seid Mahdi; THERDTHAI, Nantawan (Ed.). Non-thermal Food Processing Operations: Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry. **Woodhead Publishing**, 2022.

JANE, J. McPHERSON, A. E. Comparison of waxy potato with other root and tuber starches. **Carbohydrate Polymers**, v.40, n.1, p.57-70, 1999.

JYOTHI A. N; SAJEEV, M. S.; SREEKUMAR J. N. Hydrothermal modifications of tropical tuber starches. 1. Effect of heat3moisture treatment on the physicochemical, rheological and gelatinization characteristics. **Starch, Weinheim**, v. 62, n. 1, p. 28340, 2010.

KELLS, S. A.; MASON, L. J., MAIER, D. E.; WOLOSOSHUK, C. P. Efficacy and fumigation characteristics of ozone in stored maize. **Journal of Stored Products Research**, vol. 37, n. 4, p.371-383, 2001.

KENT, N. L. Technology of cereals. An introduction for students of food science and agriculture. **Pergamon Press Ltd.** Oxford, England. 1987.

KHADRE, M. A.; YOUSEF, A. E.; KIM, J.-G. Microbiological aspects of ozone applications in food: a review. **Journal of Food Science**, Chicago, v.66, n.9, p. 1242-1252, 2001.

KIM, J.-G.; YOUSEF, A. E.; DAVE, S. Application of ozone for enhancing the microbiological safety and quality of foods: a review. **Journal of Food Protection**, Des Moines, v.62, n.9, p. 1071-1087, 1999.

KINUPP, V. F.; LORENZI, H. **Plantas Alimentícias não convencionais (PANC) no Brasil: guia de identificação, aspectos nutricionais e receitas ilustradas.** Instituto Plantarum de Estudos da Flora, São Paulo, 2014.

KLEIN, B. et al. Ozone oxidation of cassava starch in aqueous solution at different pH. **Food Chemistry**, V. 155, p. 167-173, 2014.

KONTOGIORGOS, Vassilis. **Microestrutura da rede de glúten hidratada.** Pesquisa alimentar internacional , v. 9, pág. 2582-2586, 2011.

KUAKPETOON, Daris; WANG, Ya-Jane. Characterization of different starches oxidized by hypochlorite. **Starch-Stärke**, v. 53, n. 5, p. 211-218, 2001.

LA FUENTE, Carla IA et al. Ozonização de amido de mandioca para produção de filmes biodegradáveis. **International Journal of Biological Macromolecules** , v. 141, p. 713-720, 2019.

LABUSCHAGNE, M. T.; CLAASSEN, A.; DEVENTER, C. S. Biscuit-making quality of backcross derivatives of wheat differing in kernel hardness. **Euphytica**, v. 96, n. 1, p. 263-266, 1997.

LANZARINI, Daiane Precila *et al.* Controle de qualidade aplicado a farinha de trigo panificável produzida em moinhos do estado do Paraná. **Brazilian Journal of Development**. v. 6, n. 4, p. 16919-16929. 2020.

LAPOLLI, Flávio Rubens *et al.* Desinfecção de efluentes sanitários por meio da ozonização. **Desinfecção de Enfluentes Sanitários**, 2003.

LARSSON, H. *et al.* Influência do amido adicionado na mistura de massas elaboradas com três farinhas de trigo diferenciadas na composição de subunidades de alto peso molecular: comportamento reológico. **Química dos cereais** , v. 77, n. 5, pág. 633-639, 2000.

LAWAL, O.S.; ADEBOWALE, K.O. An assessment of changes in termal and physicochemical parameters of jack bean (*Canavalia ensiformis*) starch following hydrothermal modifications. **European Food Research Technology**, 221, 631–638, 2005.

LEONEL, M.; CEREDA, M. P.; SARMENTO, Silene B. Processamento de araruta (*Maranta arundinacea*) para extração e caracterização da fração amilácea. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.5, p.151- 155, 2002.

- LESTARI, L. A.; HURIYATI, E.; MARSONO, Y. The development of low glycemic index cookie bars from foxtail millet (*Setaria italica*), arrowroot (*Maranta arundinacea*) flour, and kidney beans (*Phaseolus vulgaris*). **Journal of Food Science and Technology**, Maiçor, v. 54, n. 6, p. 1406-1413, 2017.
- LI, Jing *et al.* Multi-scale structure characterization of ozone oxidized waxy rice starch. **Carbohydrate Polymers**, v. 307, p. 120624, 2023.
- LI, M. *et al.* Evaluation the quality characteristics of wheat flour and shelf-life of fresh noodles as affected by ozone treatment. **Food Chemistry**, v. 135, n. 4, p. 2163–2169, dez. 2012.
- LI, Man *et al.* Delineating the microbial and physical–chemical changes during storage of ozone treated wheat flour. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 20, p. 223-229, 2013.
- LI, M. M.; GUAN, E. Q.; BIAN, K. Effect of ozone treatment on deoxynivalenol and quality evaluation of ozonised wheat. **Food Additives & Contaminants: Part A**, v. 32, n. 4, p. 544-553, 2015.
- LIMA, Dâmaris Carvalho *et al.* Ozone modification of arracacha starch: Effect on structure and functional properties. **Food Hydrocolloids**, v. 108, p. 106066, 2020.
- LIMA, Dâmaris Carvalho *et al.* Ozone processing of cassava starch. **Ozone: Science & Engineering**, v. 43, n. 1, p. 60-77, 2021.
- LIMA, Nayara Bonpan Ferreira *et al.* Caracterização do amido de araruta orgânica e potencial para aplicação tecnológica em alimentos. **Revista Interdisciplinar Da Universidade Federal Do Tocantins**, v. 6, n. Especial, p. 118-126, 2019.
- LINS, Érica Gabrielle Capistrano. **Influência da etapa de purificação das sêmolas nas características físico-químicas e reológicas de farinhas de trigo**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza- CE, 2021.
- LIU, Zhen-Dong *et al.* Mechanistic insights into the role of starch multi-level structures in functional properties of high-amylose rice cultivars. **Food Hydrocolloids**, v. 113, p. 106441, 2020.
- LOPES, A. S. *et al.* Influência do uso simultâneo de ácido ascórbico e azodicarbonamida na qualidade do pão francês. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 27, n. 2, p. 307-312, 2007.
- LOPEZ-SANCHEZ, Patricia *et al.* Effect of mechanical and thermal treatments on the microstructure and rheological properties of carrot, broccoli and tomato dispersions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 91, n. 2, p. 207-217, 2011.
- LOZOWICKA, B; JANKOWSKA, M; HRYNKO, I; KACZYNSKI, P. Removal of 16 pesticide residues from strawberries by washing with tap and ozone water, ultrasonic cleaning and boiling. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 188, n. 51, p. 1-19, 2016.

LUO, F. X. et al. Properties and cross linking mechanism of starches oxidized by sodium hypochlorite at low level. **Nat. Sci**, v. 34, p. 79-83, 2006.

LUO, X. *et al.* Analyses by UPLC Q-TOF MS of products of aflatoxin B1 after ozone treatment. **Food Additives and Contaminants**, v.31, p.105–110, 2014.

MACIEL, Júlia Barreto Hoffmann. **Controle de fungos e micotoxinas em trigo por meio de ozonização**. 2022 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2022.

MAGNUSSEN, A. Aflatoxins, hepatocellular carcinoma and public health. **World Journal of Gastroenterology**, v.19, p.1508-1511, 2013.

MANAILA, Elena; STELESCU, Maria Daniela; CRACIUN, Gabriela. Degradation studies realized on natural rubber and plasticized potato starch based eco-composites obtained by peroxide cross-linking. **International journal of molecular sciences**, v. 19, n. 10, p. 2862, 2018.

MANIGLIA, Bianca C. et al. Hydrogels based on ozonated cassava starch: Effect of ozone processing and gelatinization conditions on enhancing 3D-printing applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 138, p. 1087-1097, 2019.

MANSAS, Clémentine *et al.* Coupling catalytic ozonation and membrane separation: A review. **Separation and Purification Technology**, v. 236, p. 116221, 2020.

MATTA JUNIOR, Manoel Divino da. **Características estruturais, físico-químicas e funcionais dos amidos de mandioca e de milho com diferentes teores de amilose oxidados por ozônio**. 2015. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2015.

MAXCONSULTING. **Exemplos e artigos de aplicações de ozônio em forma de gás, água ozonizada e névoa ozonizada**. 2021. Disponível em: <https://www.maxconsulting.com.br/exemplos-aplicacoes-com-ozonio>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

MENDES, M. L. M. **Caracterização para fins industrial dos amidos nativo e modificados extraídos de amêndoas de sementes de manga, variedade “Tommy Atkins”**. 2011. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, 2011.

MENDEZ, F.; MAIER, D.E., MASON, L.: WOLOSHUK, C.P. Penetration of* ozone into columns of stored grains and effects on chemical composition and performance. **Journal of Stored Products Research**, v. 39, n. 1, p. 33-44, 2003.

MINOLTA. **Precise color communication**. Manual. Osaka: Minolta, 1994.

MKS Instruments. **Ozone data & conversion tables**. 2004. Disponível em: https://www.mksinst.com/mam/celum/celum_assets/resources/astexozonedata.pdf. 2024. Acesso em: 8 de agosto de 2024.

- MONTENEGRO, José Lucas Pereira Souto. **O uso e aplicação do ozônio em atividade residenciais: uma revisão de literatura**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Gestão Ambiental). Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia, João Pessoa-PB, 2021.
- MOORTHY, Subramony Narayana. Propriedades físico-químicas e funcionais de amidos de tubérculos tropicais: uma revisão. **Starch-Stärke**, v. 12, pág. 559-592, 2002.
- MORENO, Leandro Bassi et al. Densidade de plantas e amontoas influenciando a produtividade e rentabilidade de araruta. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, p. 465-471, 2017.
- MORITA, N., MAEDA, T., MIYAZAKI, M., YAMAMORI, M., MIURA, H., OHTSUKA, I. Effect of substitution of waxy-wheat flour for common flour on dough and baking properties. **Food Science and Technology Research**, v. 8, n. 2, p. 119-124, 2002.
- MOSTAFIDI, Mahdieh *et al.* A review of recent trends in the development of the microbial safety of fruits and vegetables. **Trends in Food Science & Technology**, v. 103, p. 321-332, 2020.
- NASCIMENTO, Nataly Miranda do *et al.* **Desenvolvimento e caracterização de filmes biodegradáveis de araruta com própolis vermelha de Alagoas**. Tese (Doutorado em Materiais). Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, 2021.
- NOGUEIRA, G. F. *et al.* Extraction and characterization of arrowroot (*Maranta arundinacea* L.) starch and its application in edible films. **Carbohydrate Polymers**, v. 186, p.64-72, 2018.
- OBADI, Mohammed *et al.* Effects of ozone treatment on the physicochemical and functional properties of whole grain flour. **Journal of Cereal Science**, v. 81, p. 127-132, 2018.
- O'DONNELL, C. *et al.* Ozone in Food Processing. **Wiley-Blackwell**, Oxford, UK, 2012.
- OKEKUNLE, Mary Oluwaseun *et al.* Physicochemical, morphological and thermal properties of oxidized starches from Lima bean (*Phaseolus lunatus*). **Scientific African**, v. 8, p. e00432, 2020.
- OLADEBEYE, Abraham Olasupo *et al.* Functional, thermal and molecular behaviours of ozone-oxidised cocoyam and yam starches. **Food Chemistry**, v. 141, n. 2, p. 1416-1423, 2013.
- ORTOLAN, F.; HECKTHEUER, L. H.; MIRANDA, M. Z. Efeito do armazenamento à baixa temperatura (-4 °C) na cor e no teor de acidez da farinha de trigo. **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 30, n.1, p. 55 - 59, 2010.
- ÖZASLAN, Zeynep Tuğba; İBANOĞLU, Şenol. Ozonation of corn starch in the presence of guar gum: Rheological, thermal and antioxidant properties. **Food Hydrocolloids**, v. 124, p. 107299, 2022.
- PAFO, Fáusia da Verónica Eduardo. **Araruta ‘comum’ como fonte alternativa na segurança alimentar**: análise pós-colheita em função de condições e tempos de

armazenamento. 2023. Dissertação (Mestrado em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis). Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção-CE, 2023.

PAES, Juliana Lobo. **Ozonização da farinha de trigo**: cinética de reação e efeito nas características tecnológicas. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2011.

PAIXÃO, Bárbara Louise Abreu. **Controle de qualidade aplicado em farinhas de trigo produzidas no Estado do Maranhão**: ênfase nas análises físico-químicas e reológicas. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal do Maranhão, São Luís-MA. 2022.

PARASKEVOPOULOU, A.; PROVATIDOU, E.; TSOTSIU, D.; KIOSSEOGLOU, V. Dough rheology and baking performance of wheat flour-lupin protein isolate blends. **Food Research International**, v. 43, p. 1009-1016, 2010.

PARIZA, M.W., JOHNSON, E.A. Evaluating the safety of microbial enzyme preparations used in food processing: update for a new century. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v. 33, p. 173-186, 2001.

PEPE, L. S. *et al.* Effect of heat-moisture treatment on the structural, physicochemical, and rheological characteristics of arrowroot starch. **Food Science and Technology International**, v. 22, n. 3, p. 256-265, 2016.

PEREIRA, Joelma *et al.* Féculas fermentadas na fabricação de biscoitos: estudo de fontes alternativas. **Food Science and Technology**, v. 19, p. 287-293, 1999.

PEREIRA, J. M. **Oxidação do amido de milho com hipoclorito de sódio e peróxido de hidrogênio**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão-PR, 2014.

PERONI, Fernanda Helena Gonçalves. **Características estruturais e físico-químicas de amidos obtidos de diferentes fontes botânicas**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos). Universidade Estadual de São Paulo, São José do Rio Preto-SP. 2003.

PIECHOWIAK, Tomasz; JÓZEFczyk, Radosław; BALAJEJDER, Maciej. Impacto do processo de ozonização da farinha de trigo na atividade de enzimas selecionadas. **Journal of Cereal Science**, v. 30-37, 2018.

PIZZINATTO, A. **Qualidade da farinha de trigo**: conceito, fatores determinantes e parâmetros de avaliação e controle. Campinas: Instituto de Tecnologia de Alimentos, 1999. 72 p.

PRABHA, VITHU *et al.* Ozone technology in food processing: A review. **Indian Journals**. 2015.

QUEROZ, Rafaella Souza de *et al.* Plasma frio e ozônio na indústria de alimentos como prevenção de doenças infecciosas. **Fórum Rondoniense de Pesquisa**, v. 1, n. 6, 2020.

RAMOS, Giselle Vallim Corrêa *et al.* Structural and functional properties of ozone-treated quinoa starch. **Polymer**, v. 308, p. 127314, 2024.

RAMOS, Giselle Vallim Corrêa. **Efeito do tratamento com ozônio sobre as propriedades estruturais, térmicas, reológicas e funcionais do amido de quinoa**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo, Pirassununga-SP. 2019.

RANIERI, R. G.; ZANIRATO, S. H. Comidas da horta e do mato: plantas alimentícias em quintais urbanos no Vale do Paraíba. **Agricultura urbana**. Estud. Av., v. 35, n. 101, p. 269-285, 2021.

RAO G.V.; RAO P. H. Methods for determining rheological characteristics of doughs: a critical evaluation. **Journal of Food Science Technology**, v.30, n.2, p.77-87, 1993.

RASHWAN, Ahmed K. *et al.* Plant starch extraction, modification, and green applications: a review. **Environmental Chemistry Letters**, p. 1-48, 2024.

RASIAH, I. A.; SUTTON, K. H.; LOW, F. L.; LIN, H. M.; GERRAD, LIN, J. A. Crosslinking of wheat dough proteins by glucose oxidase and the resulting effects on bread and croissants. **Food Chemistry**, Oxon, v. 89, n. 3, p. 325-332, 2005

RIBEIRO, Jéssica Souza *et al.* Propriedades de pasta e morfologia do amido de araruta do Vale do Jiquiriçá-BA. **Hig. aliment**, p. 1503-1507, 2019.

ROCHA, E. B. *et al.* Mycotoxins and their effects on human and animal health. **Food Control**, v.36, p.159–165, 2014.

RUTENBERG, Morton W.; SOLAREK, Daniel. Starch: Chemistry and technology. **R. Whistler, Chemistry and Technology**, p. 311, 1984.

SAIKIA, J. P.; KONWAR, B. K. Physicochemical properties of starch from aroids of North East India. **International Journal of Food Properties**, Philadelphia, v. 15, n. 6, p. 1247-1261, 2012.

SANDHU, H.P.S. *et al.* Comparison between potassium bromate and ozone as flour oxidants in breadmaking. **Cereal Chemistry**, v. 88, n. 1, p. 103-108, 2011.

SANDHU, H. P. S. S.; MANTHEY, F. A.; SIMSEK, S. Ozone gas affects physical and chemical properties of wheat (*Triticum aestivum* L.) starch. **Carbohydrate Polymers**, v.87, p.1261–1268, 2012.

SANDHU, Kawaljit Singh *et al.* A comparison of native and oxidized normal and waxy corn starches: Physicochemical, thermal, morphological and pasting properties. **LWT-Food Science and Technology**, v. 41, n. 6, p. 1000-1010, 2008.

SANTIAGO, Anna Dayse Estevam. *et al.* **O Uso da Ozonioterapia no Tratamento de Feridas: Uma Revisão de Literatura**. [S. l.]: Grupo Tiradentes, 2016.

SANTOS, Millena Cristina Barros et al. Foodômica em farinha de trigo revela perfil fenólico de diferentes genótipos e qualidades tecnológicas. **LWT** , v. 112519, 2022.

SARTORI, Tanara; MENEGALLI, Florencia Cecília. Desenvolvimento e caracterização de filmes de amido de banana verde incorporados com micropartículas lipídicas sólidas contendo ácido ascórbico. **Hidrocolóides Alimentares** , v. 55, p. 210-219, 2016.

SRICHUWONG, S., *et al.* Starches from different botanical sources I: Contribution of amylopectin fine structure to thermal properties and enzyme digestibility. **Carbohydrate Polymers**, v. 60, n. 4, p. 529–538, 20 jun. 2005.

SILVA, Amanda Graziely da *et al.* **Estudo reológico de solução filmogênica utilizando fécula de araruta (Marantha Arudinacea)**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB. 2023.

SILVA, Ana Caroline da. **Estudo do gengibre em pó e ácido láctico como agentes modificadores do amido de milho**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de alimentos). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2019.

SILVA, M. R.; GARCIA, G. K. S.; FERREIRA, H. F. Caracterização química, física e avaliação da aceitação de pão de queijo com baixo teor energético. **Alimentos e Nutrição**, v. 14, n. 1, p. 69-75, 2003.

SILVA, Suse Botelho da *et al.* Potencialidades do uso do ozônio no processamento de alimentos. **Semina: Ciências Agrárias**. v. 2, 659-682. 2011.

SILVA, Tales Afonso da. **Processo de ozonização dos grãos de trigo: cinética de reação e efeito na qualidade destes e da farinha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. 2011.

SILVA, M, L. **Avaliação de propriedades tecnológicas da farinha e fécula de rizomas de araruta comum (Maranta arundinacea L.) e araruta ‘Ovo-de-pata’ (Myrosma cannifolia L.f.)**. 2022. 62 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Farmácia). Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2022.

SILVEIRA, J. F. S. **Elaboração e caracterização morfológica, propriedades mecânicas e de barreira de blendas de amido granular, modificado e poli (ácido láctico)**. 2016. 92p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2016.

SILVEIRA, J.R.S.; TAVARES, C.M.M.T.S.; SILVA, A.J.; *et al.* Resgate da cultura da araruta junto aos agricultores familiares no Território do Recôncavo da Bahia. **Cadernos de Agroecologia**, v. 8, n. 2, p.1-5, 2013.

SINGH, H.; MACRITCHIE, Finlay. Aplicação da ciência dos polímeros às propriedades do glúten. **Revista de Ciência dos Cereais**. v. 3, pág. 231-243. 2001.

SINGH, N.; SINGH, J.; KAUR, L.; SINGH, N. S.; GILL, B.S. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. **Food Chemistry**, London, v. 81, n. 2, p. 219-231, 2003.

SOEST, Jeroen JG Van et al. Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy. **Carbohydrate research**, v. 279, p. 201-214, 1995.

SOUZA, A. T. R. *et al.* Análise nutricional e teste de aceitação sensorial da beldroega (Portulaca Oleracea). **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 10, p. 17670- 17680, 2019.

SOUZA, D. C. *et al.* Conservação pós-colheita de araruta em função da temperatura de armazenamento. **Revista Magistra**, v. 28, n.3/4, p.403-410, 2016.

SOUZA, Stefania Marcia de Oliveira. Estudo da interferência de substratos orgânicos na ação do ozônio sobre microrganismos deteriorantes, benéficos e patogênicos. 2016.

STOEV, S. D. Foodborne mycotoxicoses, risk assessment and underestimated hazard of masked mycotoxins and joint mycotoxin effects or interaction. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v.39, p.794–809, 2015^a.

SUBROTO, Edy *et al.* Physicochemical and functional properties of modified adlay starch (Coix lacryma-jobi) by microwave and ozonation. **International Journal of Food Properties**, v. 25, n. 1, p. 1622-1634, 2022.

SURENDRAN, Nishaa *et al.* Physicochemical characterization of starch from Maranta arundinacea L. (arrowroot) rhizomes and its inhibition of cox-2: in vivo validation. N. **Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre**, p. 100465, 2025.

TEIXEIRA, Ana Karine Mendes *et al.* Pão integral conservado com suco de limão: um estudo comparativo. **Revista Brasileira de Desenvolvimento**, v. 5, n. 12, p. 33381-33391, 2019.

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

TILLEY, K. A. *et al.* Tyrosine crosslinks: molecular basis of gluten structure and function. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 49, n. 5, p. 2627-2632, 2001

TIWARI, B. K. *et al.* Effect of ozonization on the rheological and colour characteristics of hydrocolloid dispersions. **Food Research International**, Amsterdam, v.41, n.10, p. 1035-1043, 2008a.

TIWARI, B. K. *et al.* Modelling colour degradation of orange juice by ozone treatment using response surface methodology. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v.88, n.4, p. 553-560, 2008b.

TROMBETE, Felipe Machado. **Micotoxinas em grãos de trigo: ocorrência, efeitos da ozonização e determinação de uma forma modificada do desoxinivalenol**. 2016. Tese (Doutorado em Ciência de Alimentos). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, 2016.

USDA-Dietary Guidelines for Americans. Department of Health and Human Services. U.S. Department of Agriculture. 2020.

VAMADEVAN, Varatharajan; BERTOFT, Eric; SEETHARAMAN, Koushik. On the importance of organization of glucan chains on thermal properties of starch. **Carbohydrate polymers**, v. 92, n. 2, p. 1653-1659, 2013.

VANIER, Nathan Levien *et al.* Molecular structure, functionality and applications of oxidized starches: A review. **Food chemistry**, v. 221, p. 1546-1559, 2017.

VERDÚ, Samuel *et al.* Controle de imagem hiperespectral do processo de tratamento térmico de farinha de aveia para modelar propriedades compostas de pão. **Revista de engenharia de alimentos**, v. 192, p. 45-52, 2017.

VIDAL, F. J. R. **Proceso de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización**. Madrid : Ediciones Díaz de Santos, , 253 p. 2003

VIEIRA, J. C. B. *et al.* Desempenho da araruta ‘Viçosa’ consorciada com crotalária. **Agrária**, v.10, n.4, p.518-524, 2015.

WANG, N. *et al.* Effect of citric acid and processing on the performance of thermoplastic starch/montmorillonite composites. **Carbohydrate Polymers**, Barking, v. 76, n. 1, p. 68-73, Mar. 2009.

WANG, Y.; WANG, L. Physicochemical properties of common and waxy corn starches oxidized by different levels of sodium hypochlorite. **Carbohydrate Polymers**, v. 52, p. 207–217, 2003.

WEEGELS, P.L.; HAMER, R.J.; SCHOFIELD, J.D. Critical review. Functional properties of wheat glutenin. **Journal of Cereal Science**, v.23, p. 1-18, 1996...

WHITE, P. J.; ABBAS, I. R.; JOHNSON, L. A. Freeze-Thaw Stability and Refrigerated-Storage Retrogradation of Starches. **Starch-Stärke**, v. 41, n. 5, p. 176-180, 1989.

XIE, S. X.; LIU, Q.; CUI, S. W. Starch Modifications and Applications. In: CUI, S. W. (Ed.). **Food Carbohydrates: Chemistry, Physical Properties, and Applications**. 1 st ed. London, New York, Singapore: Boca Raton, p. 357-406. 2005.

YAN, Shuping *et al.* Ethanol-production performance of ozone-treated tannin grain sorghum flour. **Cereal chemistry**, v. 89, n. 1, p. 30-37, 2012.

YAN, Y. *et al.* Simultaneous electrochemical ozone production and hydrogen evolution by using tantalum-based nanorods electrocatalysts. **Applied Catalysis B Environment**. 2020.

YANG, Bingjin *et al.* Ozone modification of waxy rice starch nanocrystals: Effects on the multi-scale structural and surface properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 278, p. 134500, 2024.

YE, Fayin; LI, Jinfeng; ZHAO, Guohua. Physicochemical properties of different-sized fractions of sweet potato starch and their contributions to the quality of sweet potato starch. **Food Hydrocolloids**, v. 108, p. 106023, 2020.

YOSHIDA, C.; KIRIMURA, M.; DANNO, G. Change in the amount of SDS-Insoluble gluten by oxidants during breadmaking. **Food Science and Technology Research**, v. 7, n. 2, p. 99-103, 2001.

YU, Long; CHRISTIE, Gregore. Measurement of starch thermal transitions using differential scanning calorimetry. **Carbohydrate polymers**, v. 46, n. 2, p. 179-184, 2001.

ZAINAB, Saadia *et al.* Adaptação do amido de arroz para aplicação no setor alimentício por diferentes processos. **Food Physics**, p. 100044, 2024.

ZAMBELLI, R. A. **Desenvolvimento de massas congeladas para a produção de pães contendo ingredientes funcionais**. 203 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2014.

ZAMBELLI, Rafael Audino. **Desenvolvimento de uma Metodologia de Glazeamento para Massa Congeladas Tipo Forma**. 2015. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2015.

ZANZARINI, T.J. Efeito do gás ozônio na descontaminação de canetas de bisturi elétrico. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, 2019.

ZHANG, Min et al. Progresso da aplicação da ultrassônica no processamento de produtos de farinha: uma revisão. **Sonoquímica Ultrassônica**, p. 106538, 2023.

ZHANG, Wei *et al.* Properties of flour from pearled wheat kernels as affected by ozone treatment. **Food Chemistry**, v. 341, p. 128203, 2021.

ZHANG, Y. R.; WANG, X. L.; ZHAO, Z. M.; WANG, Y. Z. Preparation and properties of oxidized starch with high degree of oxidation. **Carbohydrate Polymers**, Barking, v. 87, p. 2554-2562, 2012.

ZHANGGUI, Q. *et al.* **Investigation of the use of ozone fumigation to control several species of stored grain insects**. In: International Working Conference on Stored-Product Protection, 8, 2002, York, Advances in stored product protection, York, p.846-851, 2003.

ZHU, Fan. Effect of ozone treatment on the quality of grain products. **Food chemistry**, v. 264, p. 358-366, 2018.

APÊNDICE A – GRÁFICOS REFERENTES À ANÁLISE DE FARINOGRAFIA

Gráfico farinograma – Amostra 1

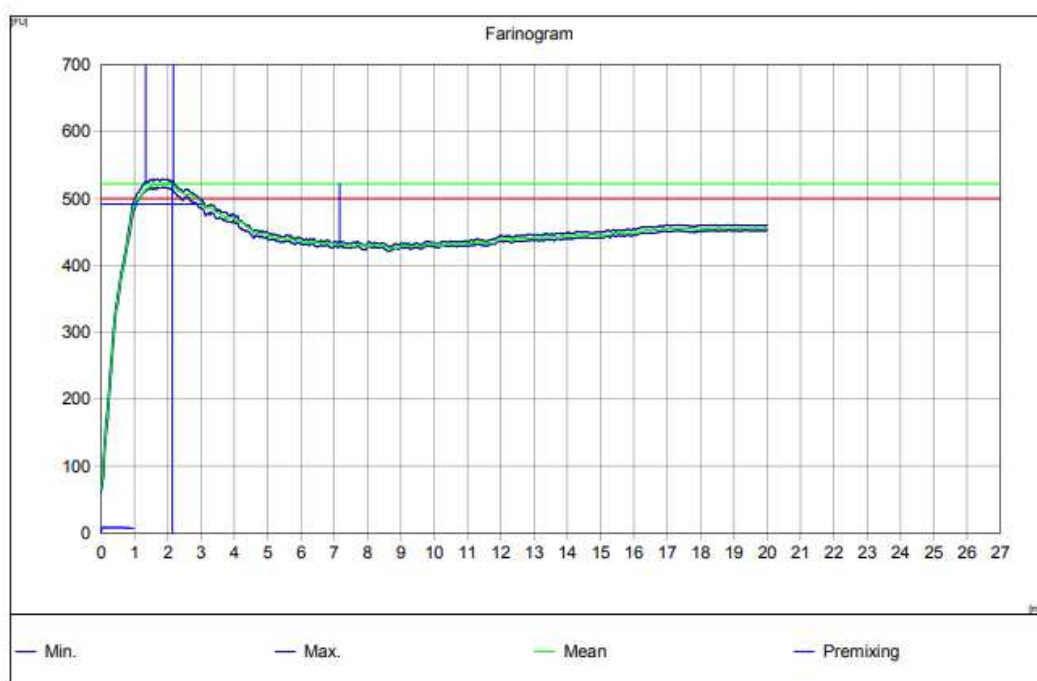
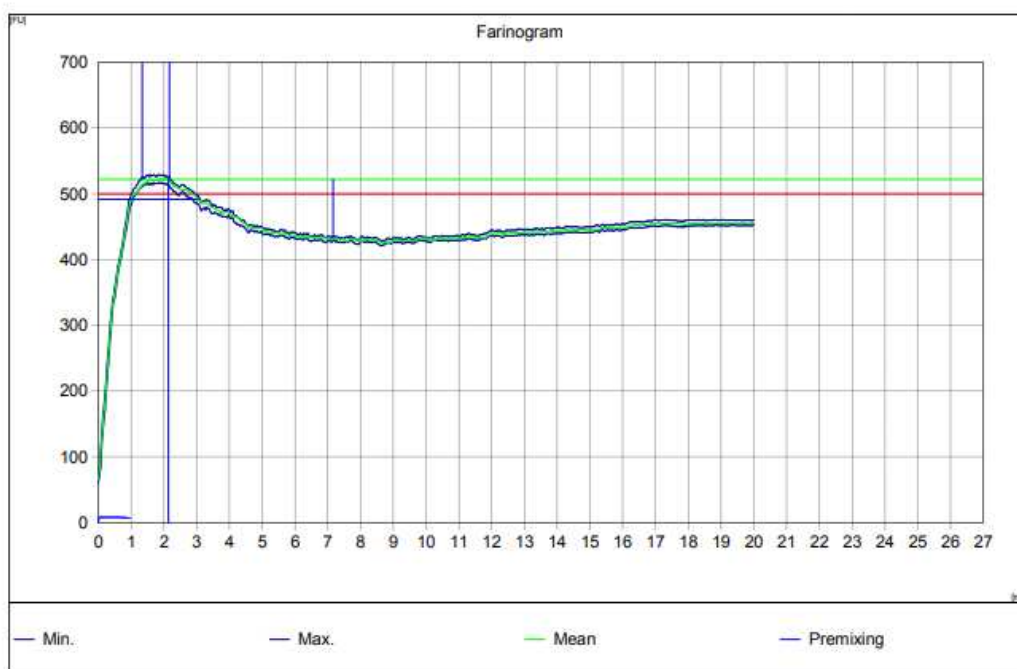


Gráfico farinograma – Amostra 2

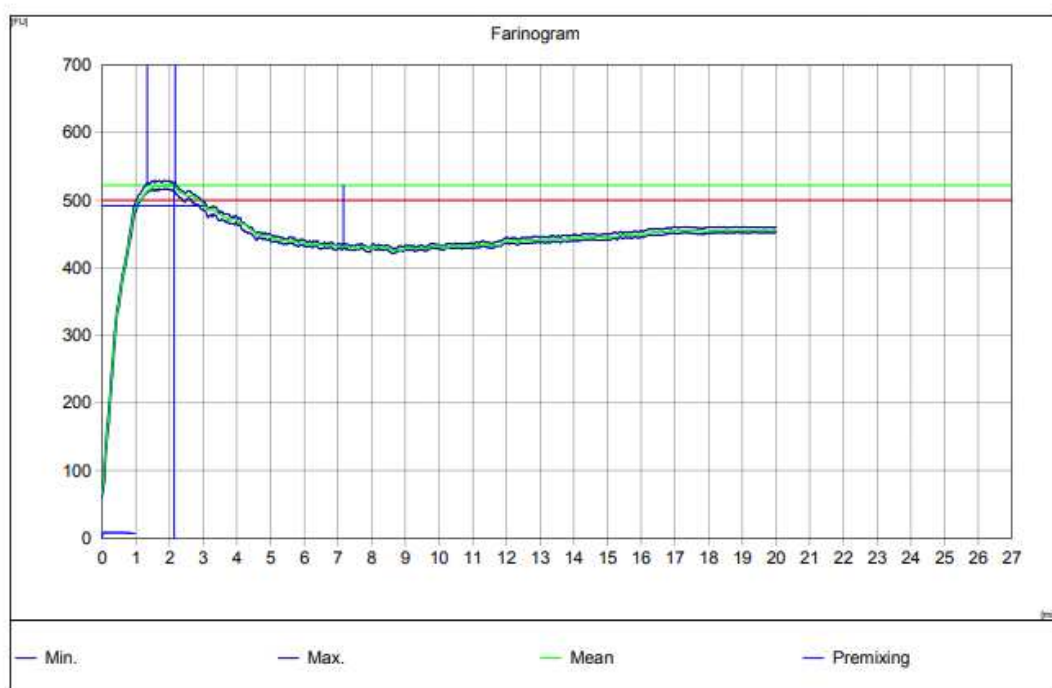
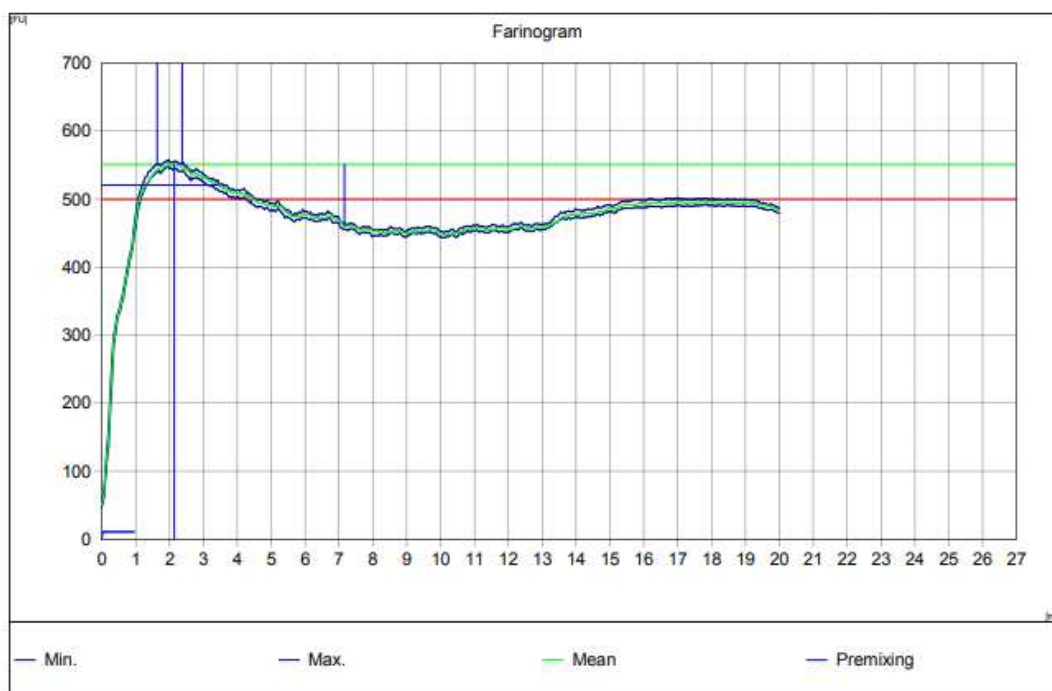


Gráfico farinograma – Amostra 3

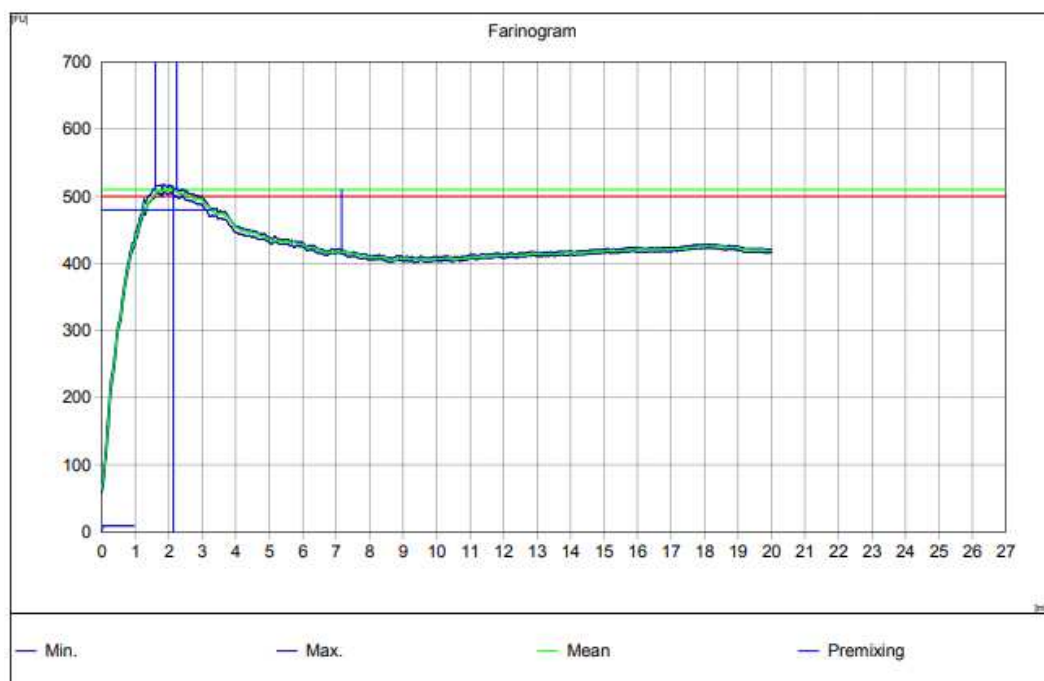
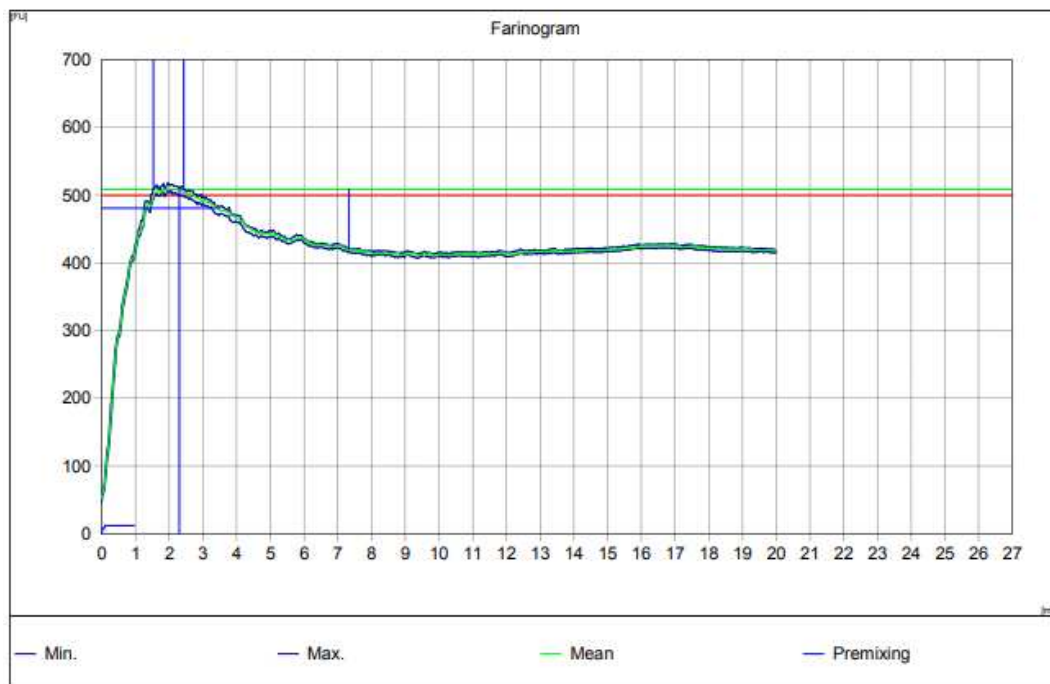


Gráfico Farinógrafo – Amostra 4

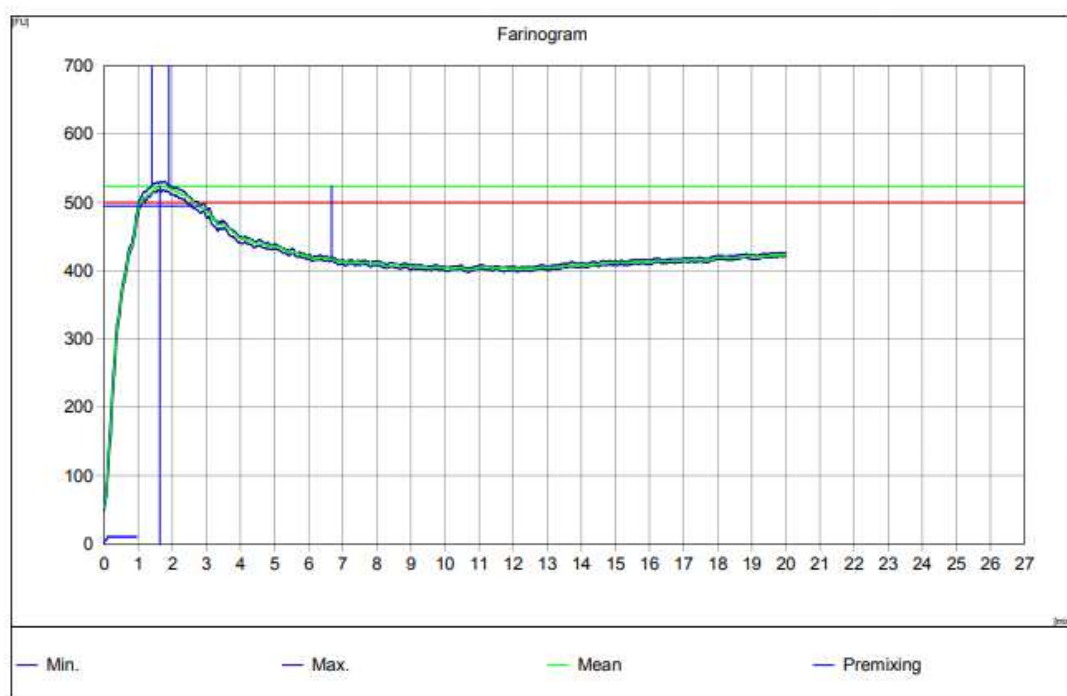
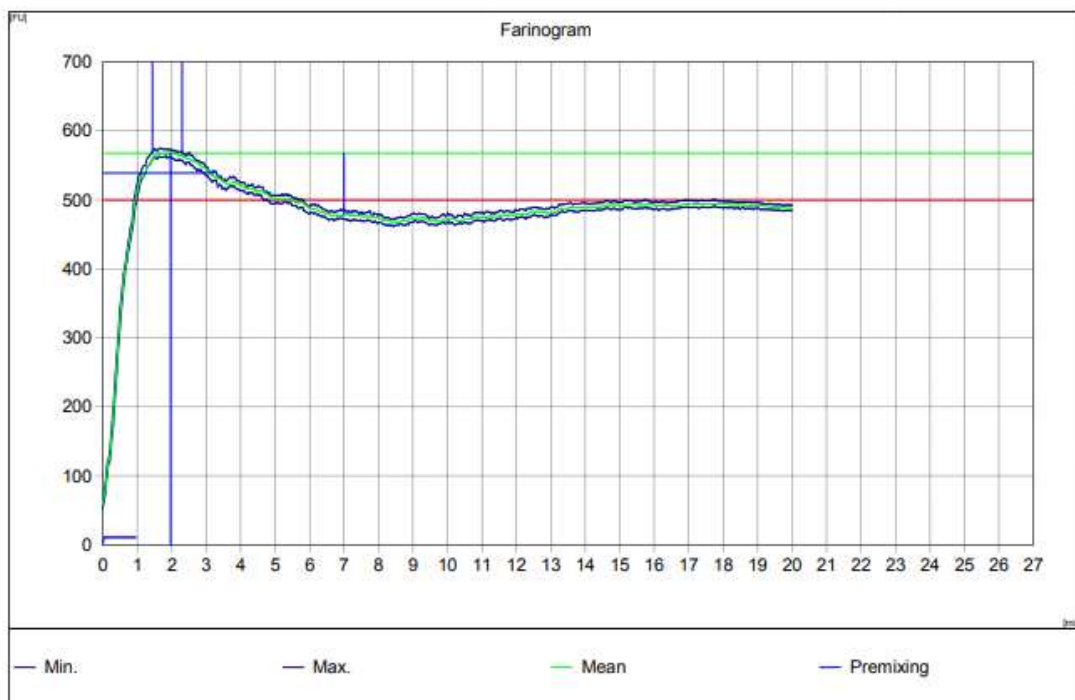


Gráfico farinógrafo – Amostra 5

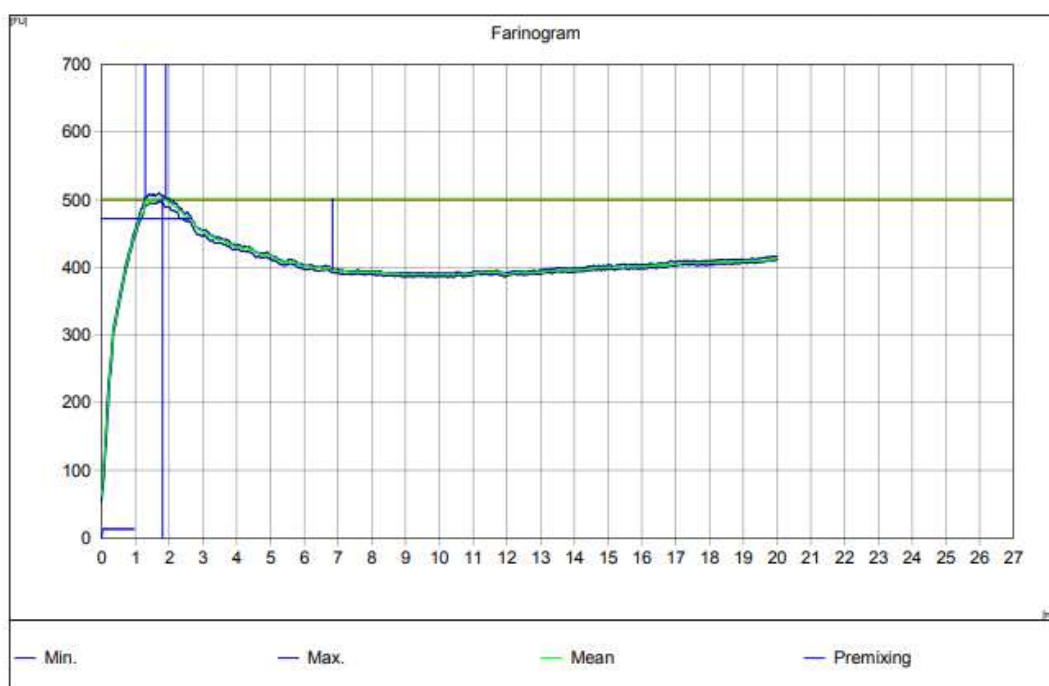
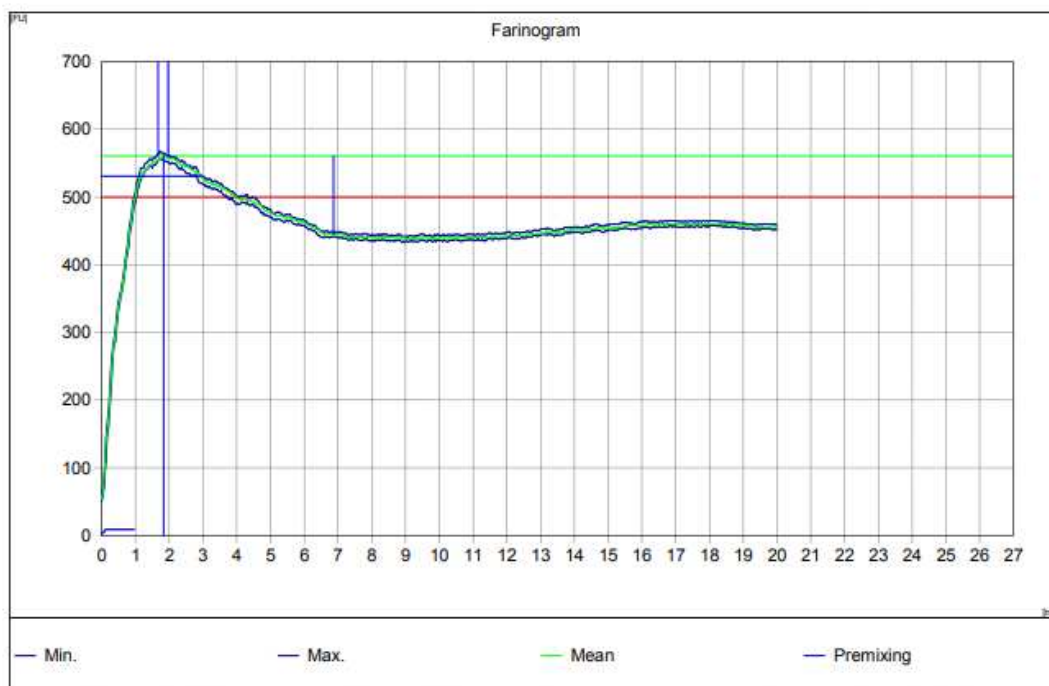


Gráfico farinógrafo – Amostra 6

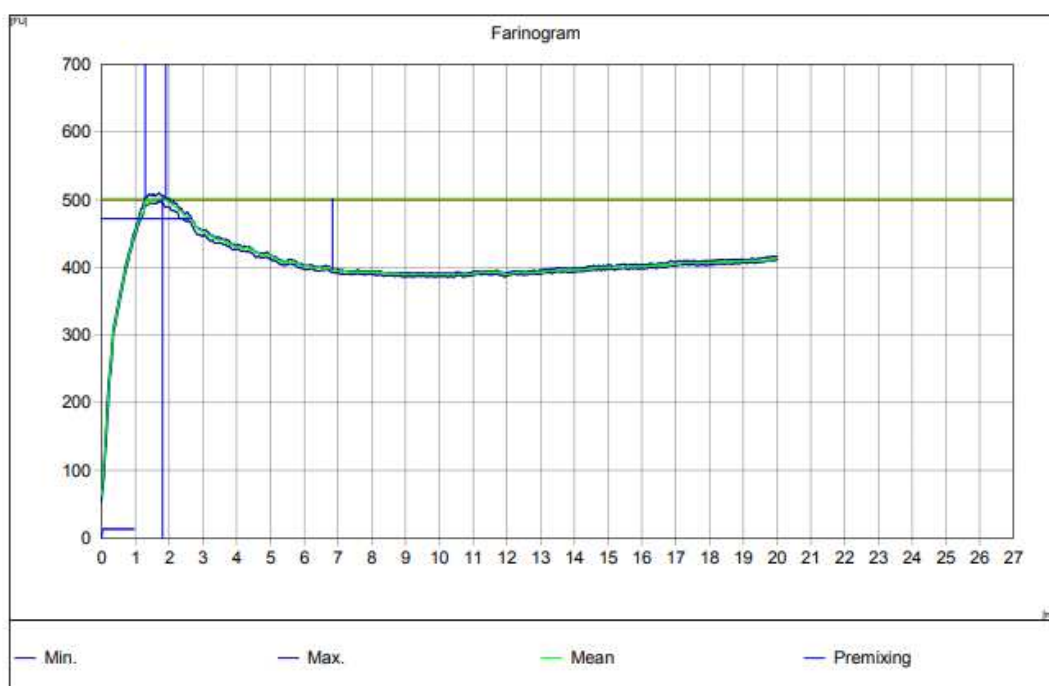
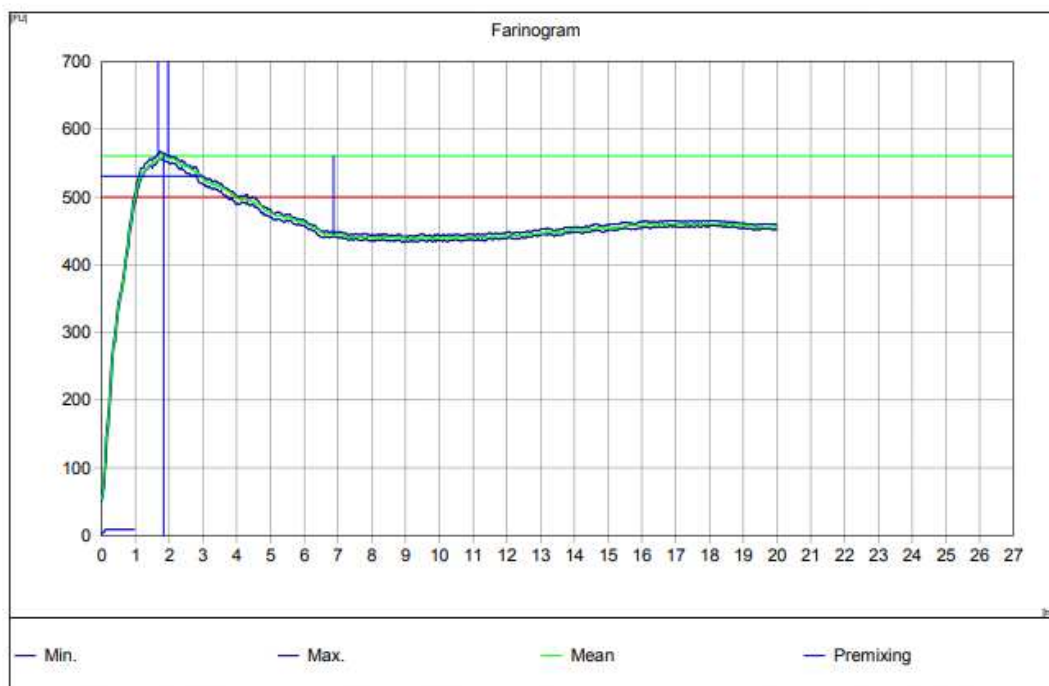


Gráfico farinógrafo – Amostra 7

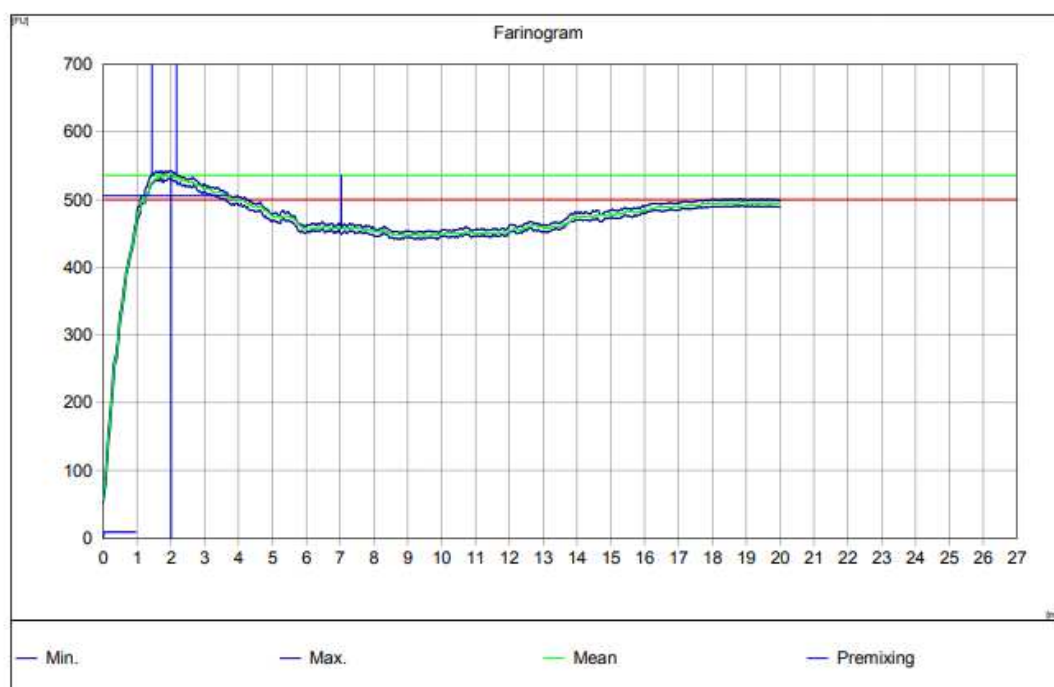
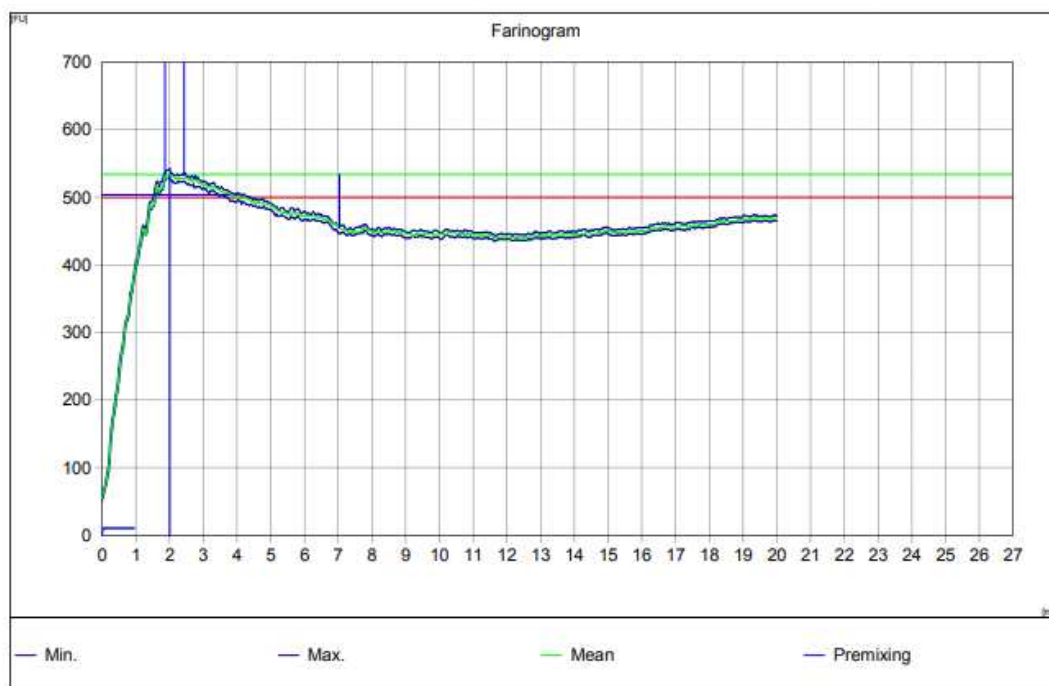


Gráfico farinógrafo – Amostra 8

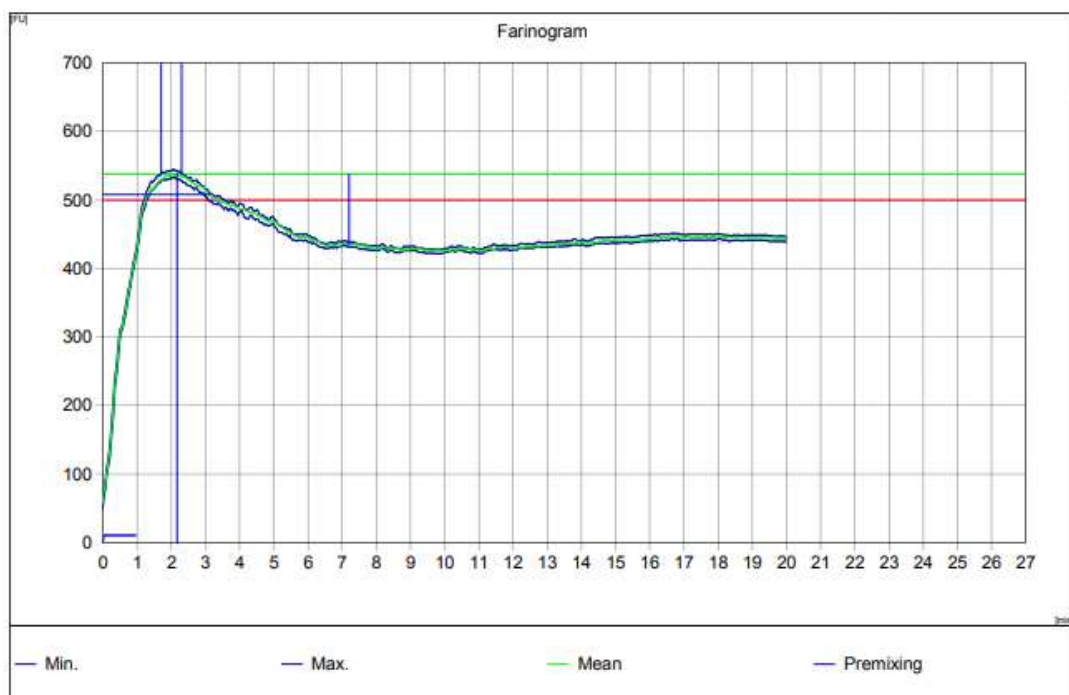
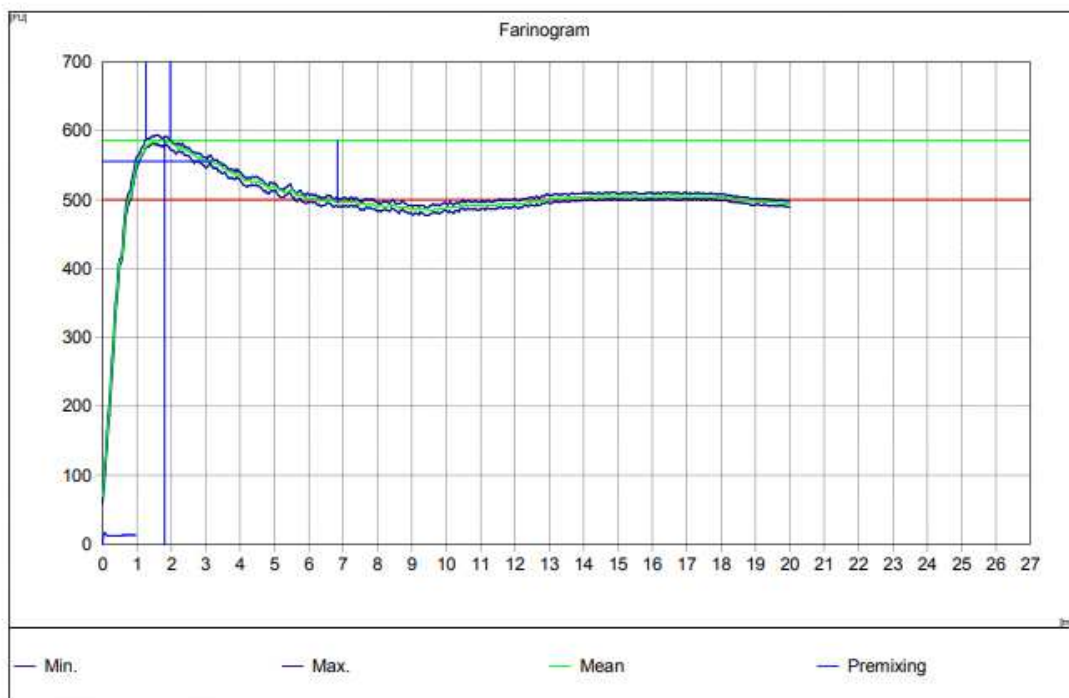


Gráfico farinógrafo – Amostra 9

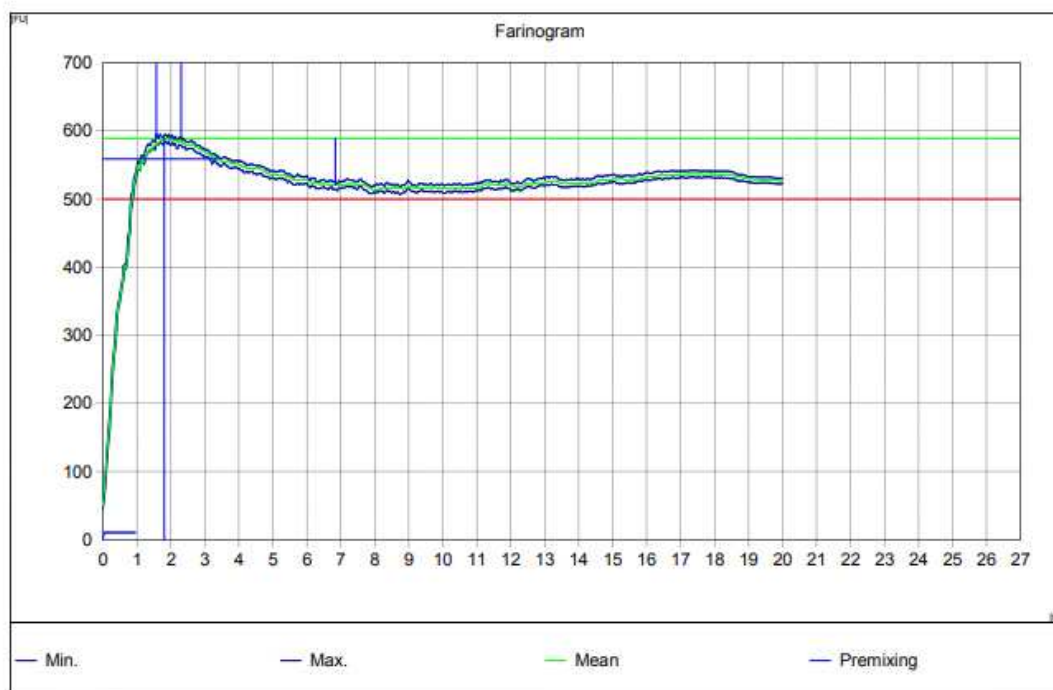
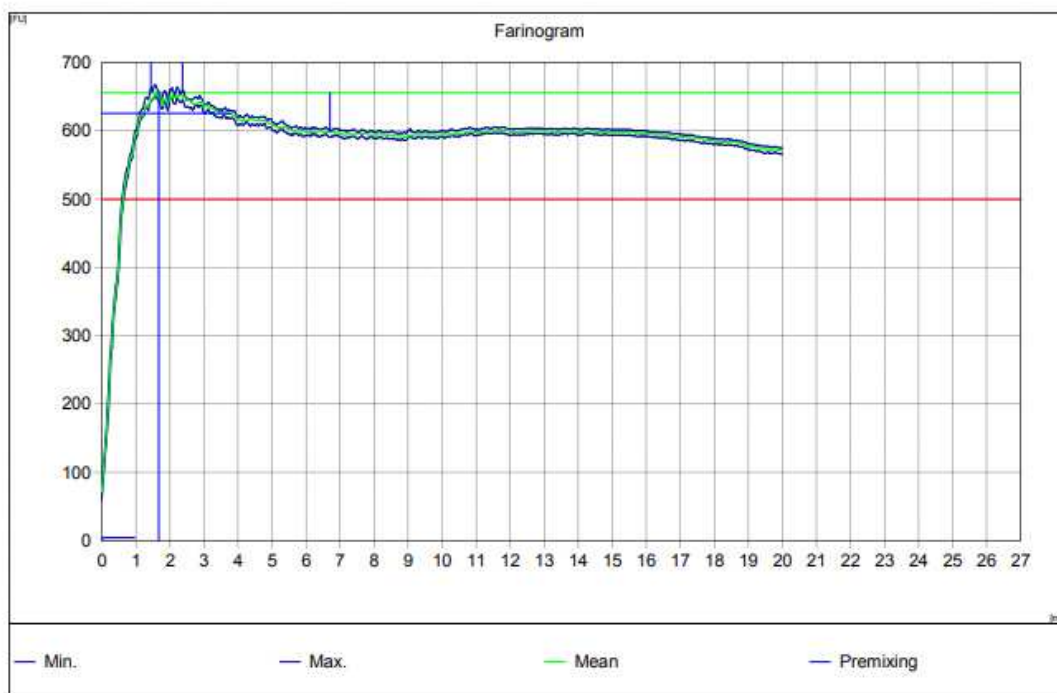


Gráfico farinógrafo – Amostra 10

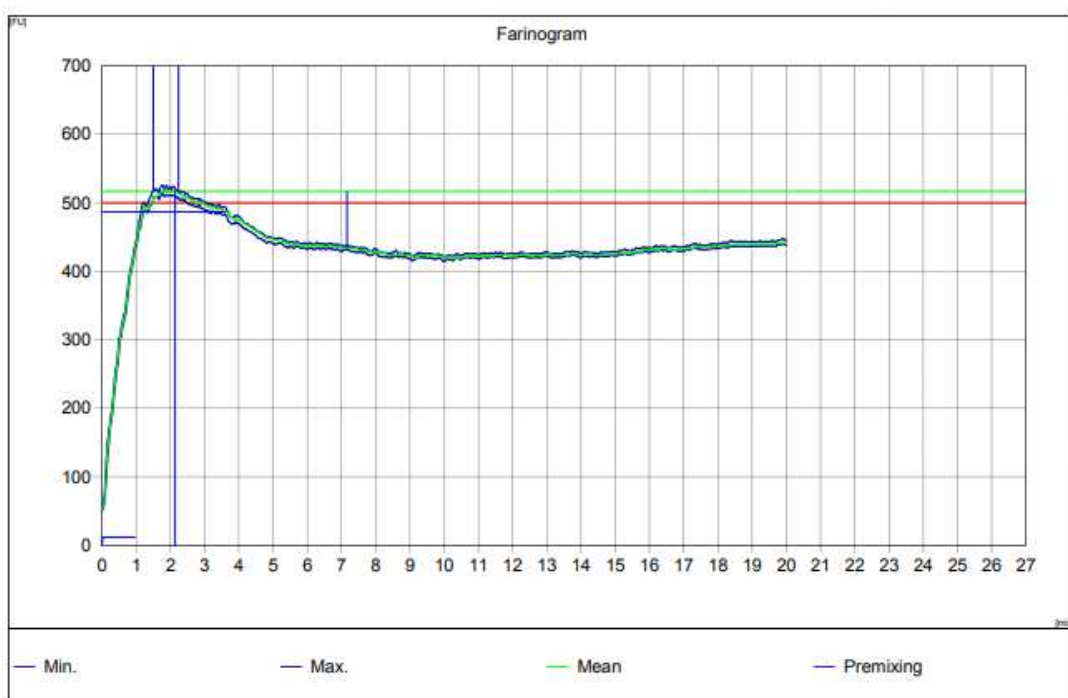
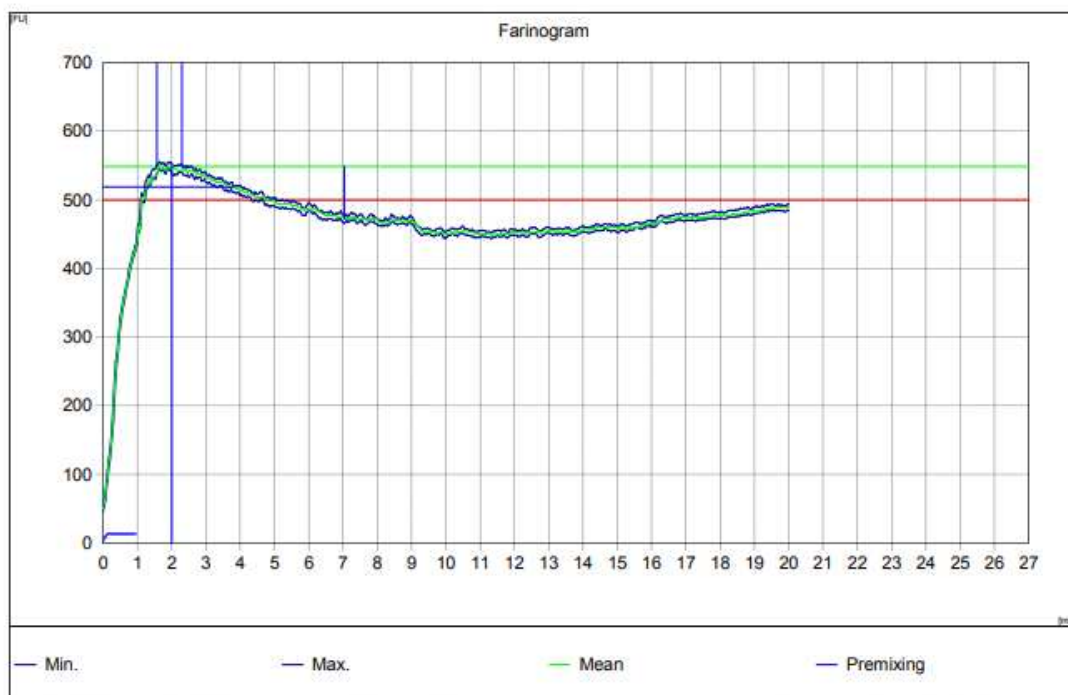


Gráfico farinógrafo – Amostra 11

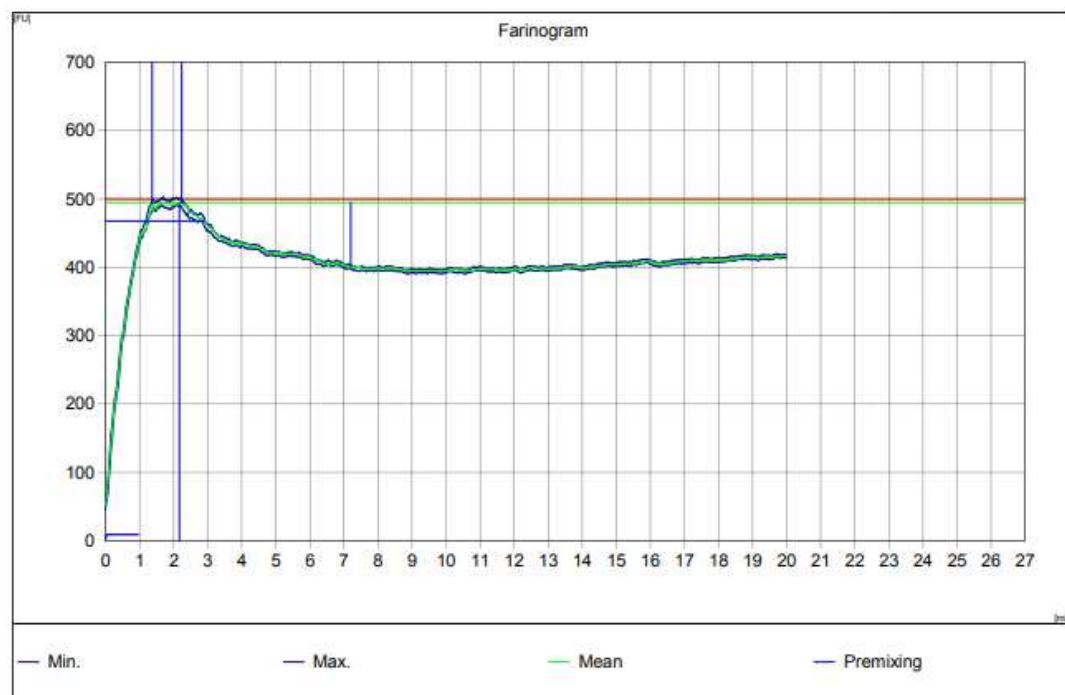
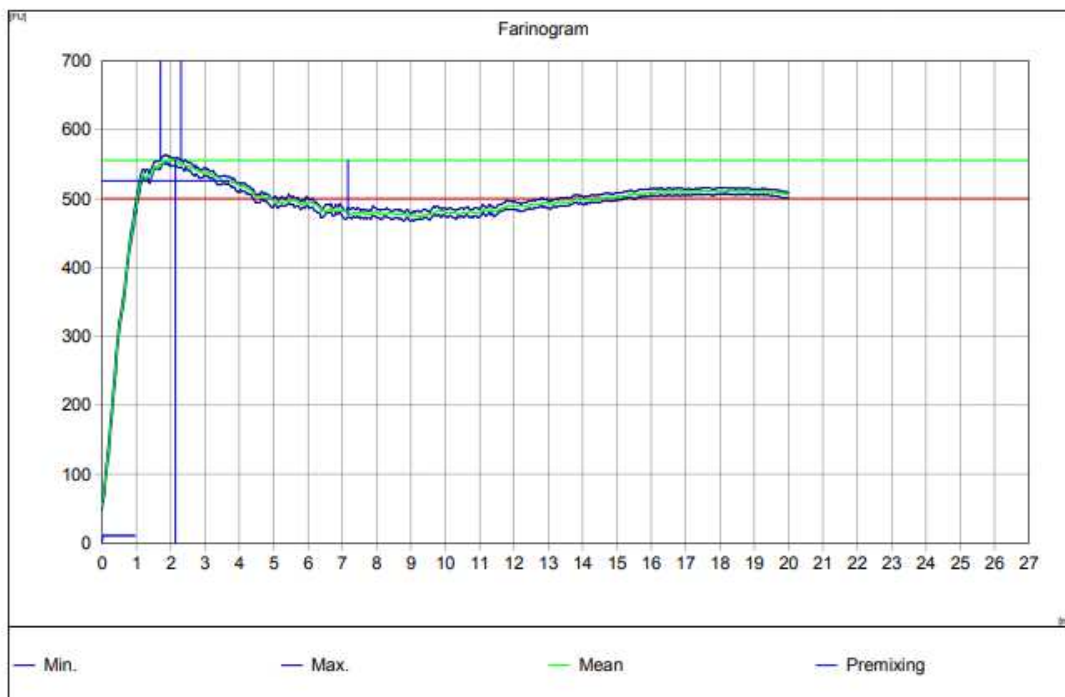
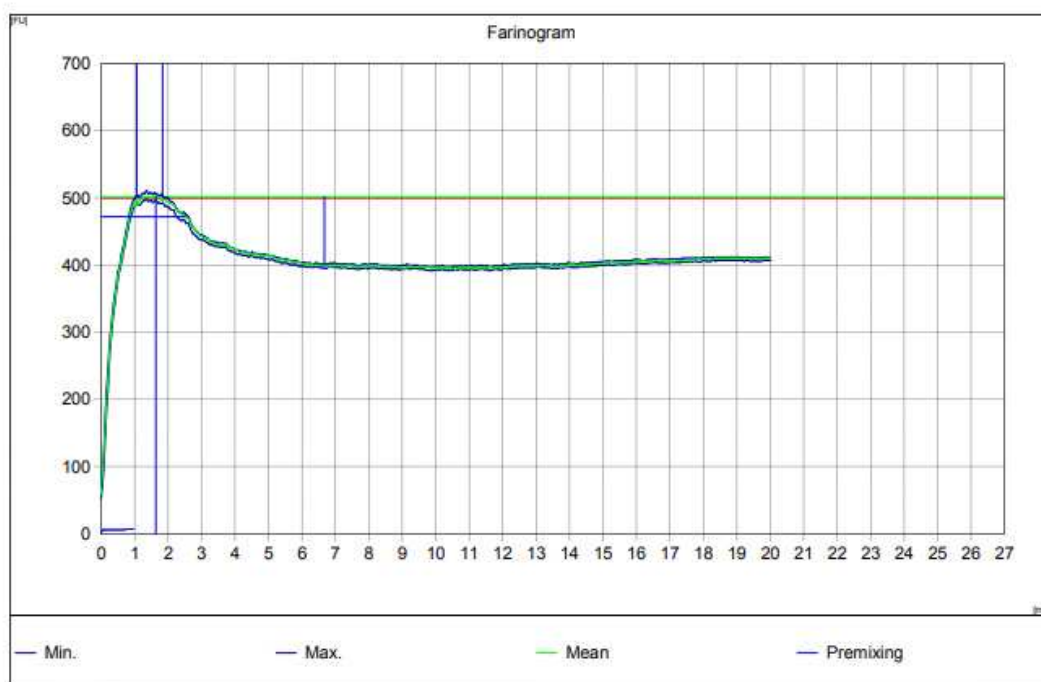
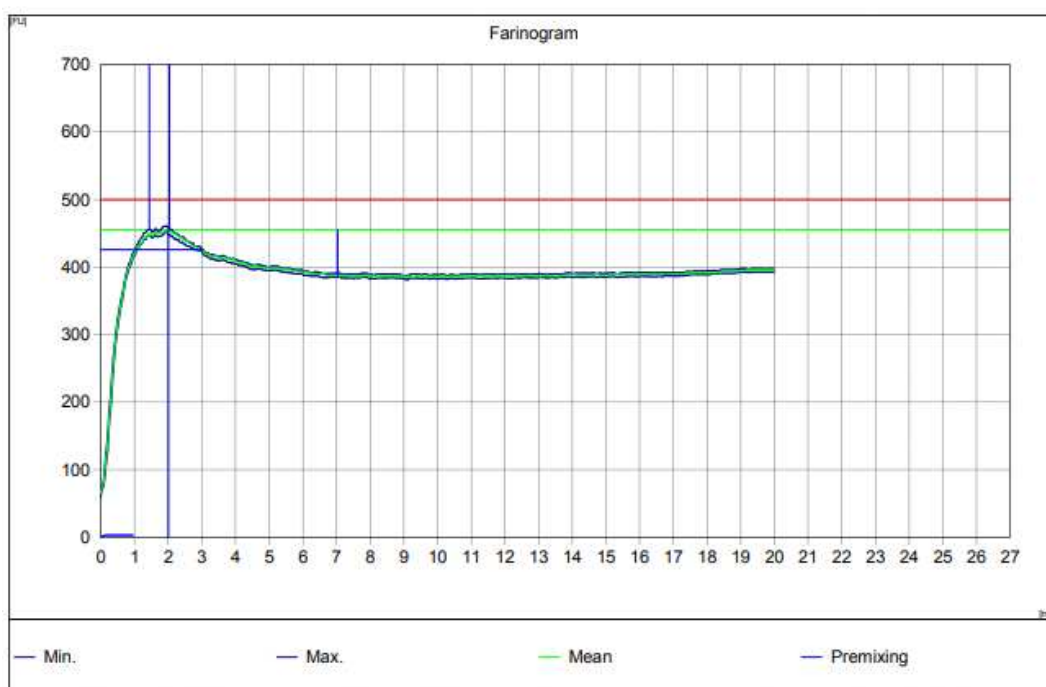
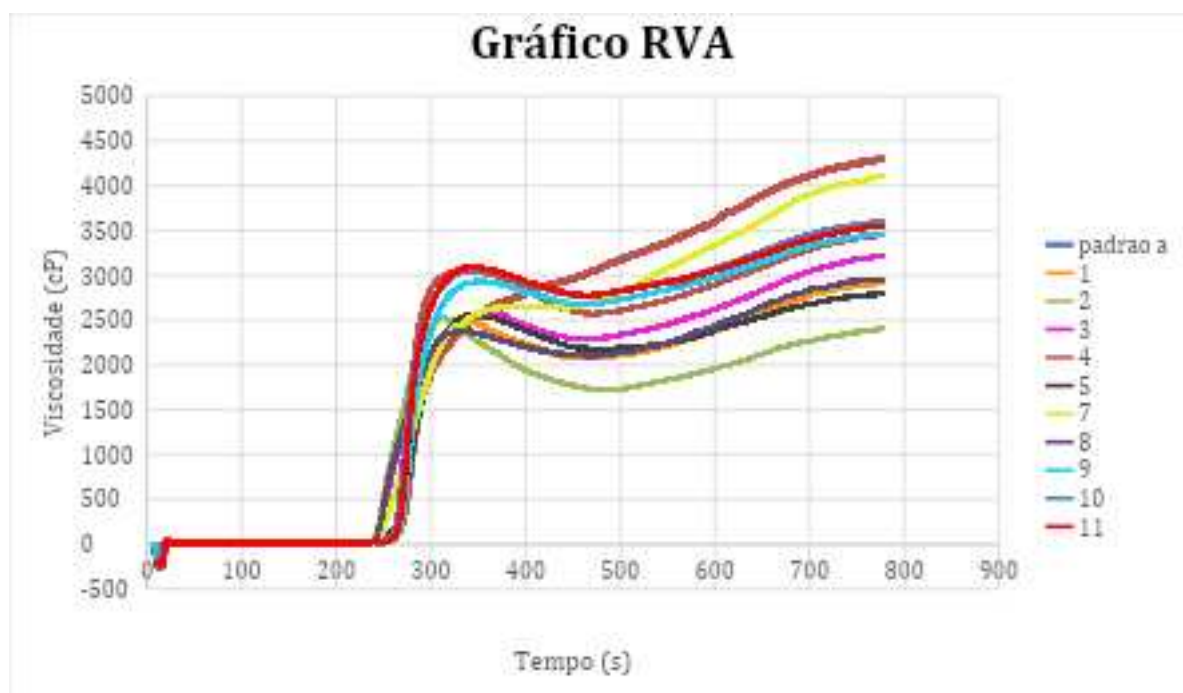


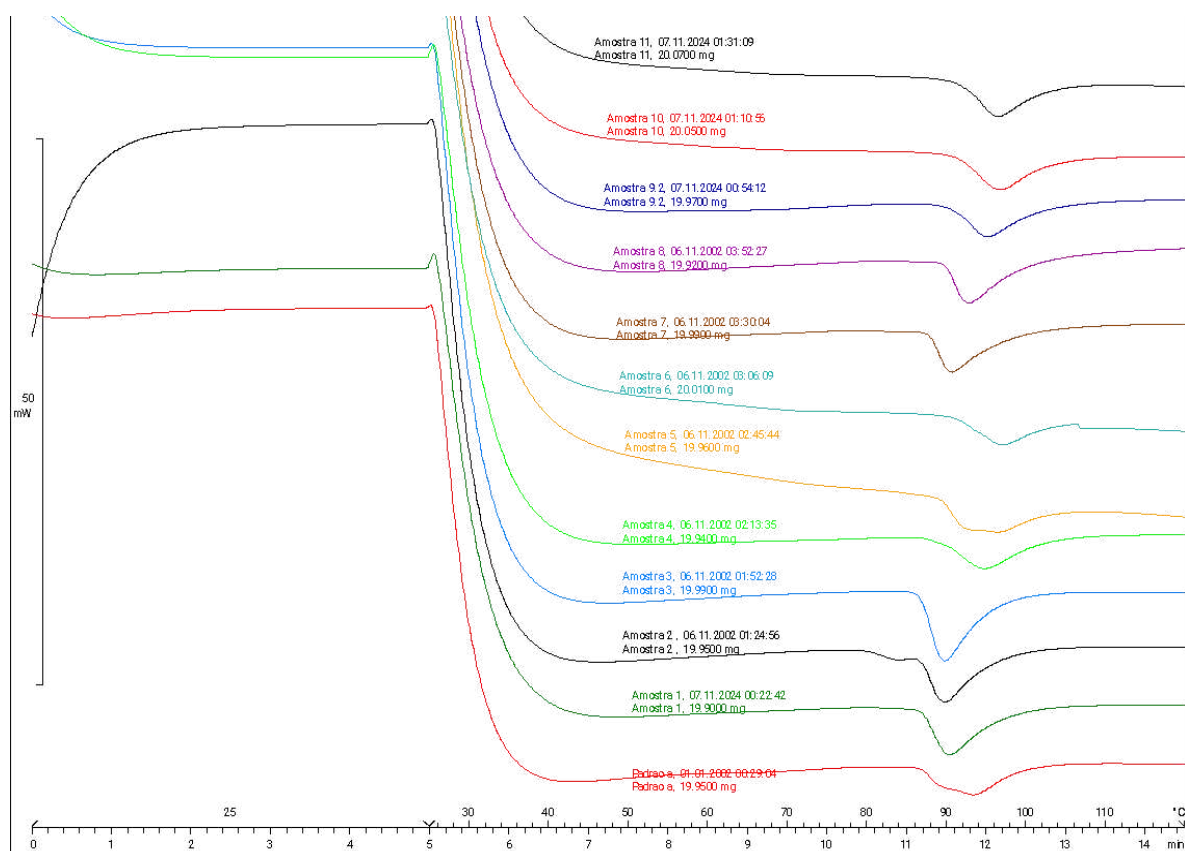
Gráfico farinógrafo – Amostra controle



APÊNDICE B – GRÁFICO REFERENTE À ANÁLISE NO RVA



APÊNDICE C – GRÁFICO REFERENTE À ANÁLISE DE DSC



Lab: METTLER

S