



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia de Alimentos

INGRID JOHANA MESA FONSECA

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA DE POLPA DE
TOMATE ASSITIDA POR MICRO-ONDAS**

CAMPINAS

2022

INGRID JOHANA MESA FONSECA

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA DE POLPA DE
TOMATE ASSITIDA POR MICRO-ONDAS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestra em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. VIVALDO SILVEIRA JÚNIOR

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO INGRID JOHANA MESA FONSECA, E ORIENTADA PELO PROF. DR. VIVALDO SILVEIRA JÚNIOR.

CAMPINAS

2022

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Engenharia de Alimentos
Claudia Aparecida Romano - CRB 8/5816

M56a Mesa Fonseca, Ingrid Johana, 1993-
Avaliação do processo de inativação enzimática de polpa de tomate assistida por micro-ondas / Ingrid Johana Mesa Fonseca. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Vivaldo Silveira Júnior.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1. Micro-ondas. 2. Polpa de tomate. 3. Enzimas. 4. Pasteurização. I. Silveira Júnior, Vivaldo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Evaluation of the enzymatic inactivation process of tomato pulp microwave-assisted

Palavras-chave em inglês:

Microwave

Tomato pulp

Enzymes

Pasteurization

Área de concentração: Engenharia de Alimentos

Titulação: Mestra em Engenharia de Alimentos

Banca examinadora:

Vivaldo Silveira Júnior

Flavio Luis Schmidt

Rodrigo Nunes Cavalcanti

Data de defesa: 08-04-2022

Programa de Pós-Graduação: Engenharia de Alimentos

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-9940-731>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/2210773639321493>

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior

Membro Titular – Fac. de Engenharia de Alimentos / UNICAMP

Prof. Dr. Flávio Luís Schmidt

Membro Titular– Fac. de Engenharia de Alimentos / UNICAMP

Dr. Rodrigo Nunes Cavalcanti

Membro Titular– Departamento de Engenharia Química / USP

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas pela oportunidade.

Ao Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos por toda estrutura e assistência necessárias a realização desse trabalho.

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

À empresa de pesquisa e desenvolvimento Innovatus Brasil por toda estrutura e recursos disponibilizados para o desenvolvimento desse trabalho.

Às pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho. Em especial gostaria de agradecer.

Ao Professor e orientador Dr. Vivaldo Silveira Júnior, pela oportunidade concedida e pela orientação dedicada e paciente ao longo deste trabalho.

Ao Marcos Machado, José Lavaquial e Rafael Segantine, sócios da empresa Innovatus Brasil, que tornaram possível a construção do protótipo e realização dos testes.

Aos funcionários da empresa Innovatus Brasil, Júlia Bolvolenta, Davidson Costa, André Gaspar e Barbara Carvalho, pela ajuda durante o desenvolvimento e realização do projeto.

À minha família, pelo apoio, amor, atenção depositada a tudo aquilo que faço.

Ao Ederson pela amizade, auxílio e disposição em colaborar em diversos momentos.

Ao meu noivo Pedro, por estar presente durante o andamento de todo o projeto e sempre demonstrar amor, confiança e incentivo no meu trabalho.

Resumo

O tomate (*Lycopersicon esculentum*) contém duas enzimas principais, pectina metilesterase (PME; EC 3.1.1.11) e a poligalacturonase (PG; EC 1.2.1.15), responsáveis pela degradação da pectina. Tratamentos térmicos de pasteurização são aplicados para inativação de microrganismos e enzimas indesejadas, no entanto, a exposição dos alimentos a altas temperaturas provoca degradação de compostos relacionados à qualidade sensorial e nutricional. A utilização de tecnologias emergentes como a de micro-ondas traz como vantagem o rápido aquecimento, melhor conservação dos atributos sensoriais e nutricionais, além da possibilidade da existência de efeitos não térmicos que estejam potencializando a inativação de microrganismos e enzimas, sendo ainda tema de discussão na literatura científica. Por conseguinte, foi montado um sistema em batelada para inativação da enzima PME em polpa de tomate por irradiação de micro-ondas, a fim de evidenciar a possibilidade da existência dos efeitos não térmicos. As amostras foram submetidas a dois tipos de tratamento por micro-ondas com e sem efeito térmico, implementando um sistema que permitiu o resfriamento simultâneo do aquecimento das micro-ondas. Elaborou-se um planejamento DCCR (delineamento composta central rotacional), onde as condições de ensaio de potência e tempo de processamento foram alteradas. O histórico de processamento pela monitoração da temperatura foi adquirido em tempo real para ambos os processos. As análises de atividade da enzima PME, pH, acidez titulável, sólidos solúveis totais e cor, foram realizadas tanto para a polpa não processada quanto para a polpa processada. Os resultados demonstraram que o processo de aquecimento com efeito térmico não alterou significativamente as propriedades físico-químicas da polpa de tomate e mostrou ser mais efetivo, atingindo uma inativação de 98 % após 270 s de processamento e 2500 W de potência, no entanto, para o tratamento sem efeito térmico, as temperaturas máximas atingidas foram próximas a 40°C, tendo um destaque na inativação enzimática de 56,8 %, podendo atribuí-lo aos efeitos não térmicos das micro-ondas na inativação da PME em polpa de tomate.

Palavras-chave: Micro-ondas; Polpa de tomate; Inativação enzimática; Efeitos não térmicos.

ABSTRACT

Tomato (*Lycopersicon esculentum*) contains two main enzymes, pectin methylesterase (PME; EC 3.1.1.11) and polygalacturonase (PG; EC 1.2.1.15), which are responsible for pectin degradation. In addition, pasteurization heat treatments are applied to inactivate unwanted microorganisms and enzymes; however, food exposure to high temperatures may lead to the degradation of compounds related to sensory and nutritional quality. The use of emerging technologies such as microwaves has the advantage of rapid heating, better conservation of the sensory and nutritional attributes, as well as the existence of non-thermal effects that enhance the inactivation of microorganisms and enzymes, that still are a topic of discussion in the scientific literature. Taking this into account, a batch system for inactivating the PME enzyme in tomato pulp by microwave irradiation was set up in order to highlight the possibility of the existence of non-thermal effects. The samples were submitted to two types of microwave treatment with and without thermal effect, implementing a system that allowed the simultaneous cooling of the microwave heating. A DCCR planning was elaborated, varying the power test and processing time conditions. The processing history by temperature monitoring was acquired in real time for both processes and the analysis of PME enzyme activity, pH, titratable acidity, total soluble solids and color were performed for both unprocessed and processed pulp. Results showed that the heating process with thermal effect did not significantly change the physicochemical properties and proved to be more effective, reaching an inactivation of 98% after 270 s of processing and 2500 W of power. However, for the treatment without thermal effects, the reached temperatures are about 40°C, with an enzymatic inactivation of 56.8%, which can be attributed to the non-thermal effects of microwaves on the inactivation of PME in tomato pulp.

Keywords: Microwave; Tomato pulp; Enzymatic inactivation; Non-thermal effects.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1. ESTRUTURA DO TOMATE: A) CORAÇÃO (FEIXE FIBROVASCULAR), B) PAREDE INTERNA (MESOCARPO), C) PELE (EPICARPO), D) ENDOCARPO, E) SEMENTES, F) SEPTO, G) LÓCULO, H) TECIDO PLACENTÁRIO.....	20
FIGURA 2. FRAGMENTO DE UMA MOLÉCULA DE PECTINA E PONTOS DE ATAQUE DE ENZIMAS PÉCTICAS.....	23
FIGURA 3. ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO COM FAIXAS DE FREQUÊNCIA E COMPRIMENTO DE ONDA.	30
FIGURA 4. REPRESENTAÇÃO DOS MECANISMOS DE AÇÃO DAS MICRO-ONDAS.	32
FIGURA 5. DIAGRAMA GLOBAL DAS ETAPAS DESENVOLVIDAS.	36
FIGURA 6. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS PROCESSOS: 1) CAVIDADE RESSONANTE, 2) PAINEL DE CONTROLE, 3) BOMBA E 4) SISTEMA DE RESFRIAMENTO.....	37
FIGURA 7. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA BANCADA DE ENSAIOS DOS PROCESSOS POR MICRO-ONDAS COM E SEM EFEITOS TÉRMICOS COM O PRODUTO ESTÁTICO.	37
FIGURA 8. PROCESSO DE OBTENÇÃO DA POLPA DE TOMATE. A) SELEÇÃO E LAVAGEM, B) EXTRAÇÃO E C) ACONDICIONAMENTO E ARMAZENAMENTO NO FREEZER.	38
FIGURA 9. FORNO DE MICRO-ONDAS COM PAINEL DE CONTROLE MONTADOS PELA EMPRESA INNOVATUS BRASIL.	39
FIGURA 10. CONDENSADOR ALLIHN DE BOLHAS COMO RECIPIENTE ACONDICIONADOR DA POLPA E CIRCULAÇÃO DE FLUIDO DE ARREFECIMENTO.....	40
FIGURA 11. DISPOSIÇÃO DO CONDENSADOR DE VIDRO NO INTERIOR DO FORNO DE MICRO-ONDAS.	40
FIGURA 12. PROCESSO EM BATELADA NO FORNO DE MICRO-ONDAS COM EFEITO TÉRMICO.	41
FIGURA 13. PROCESSO DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA DE POLPA DE TOMATE EM BATELADA NO FORNO DE MICRO-ONDAS SEM EFEITO TÉRMICO.	42
FIGURA 14. PROCESSO TÉRMICO CONVENCIONAL EM BATELADA COM AQUECIMENTO EM RAMPA.	43
FIGURA 15. AMBIENTE DE MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS DE COR NA POLPA DE TOMATE.....	45
FIGURA 16. DIAGRAMA CIELAB COM OS PARÂMETROS DE COR L*, A* E B*.....	45
FIGURA 17. MONTAGEM EXPERIMENTAL DE TITULAÇÃO PARA DETERMINAR A ATIVIDADE ENZIMÁTICA DA PME EM POLPA.	46
FIGURA 18. PERFIS DA TEMPERATURA NO TEMPO DE PROCESSAMENTO PARA AS DUAS CONDIÇÕES DE TRATAMENTO POR MICRO-ONDAS DE POLPA DE TOMATE: A) PERFIL DE TEMPERATURA COM EFEITO TÉRMICO, B) PERFIL DE TEMPERATURA SEM EFEITO TÉRMICO.....	53
FIGURA 19. PERFIL DA TEMPERATURA NO TEMPO PARA O PROCESSO TÉRMICO CONVENCIONAL DE POLPA DE TOMATE.....	54
FIGURA 20. IMAGENS TÉRMICAS DO PROCESSO PARA POLPA DE TOMATE DEPOIS DO PROCESSAMENTO POR MICRO-ONDAS A DIFERENTES CONDIÇÕES: A) COM EFEITO TÉRMICO E B) SEM EFEITO TÉRMICO PARA OS ENSAIOS 3 (T: 420 s, P: 1250 W) E 10 (T: 270 s, P: 1750 W).	55
FIGURA 21. VALORES MÉDIOS DA PERCENTAGEM DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA EXPERIMENTAL DA PME EM POLPA PROCESSADA POR TRATAMENTO TÉRMICO CONVENCIONAL.	64

FIGURA 22. PERCENTUAIS DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA EXPERIMENTAL DA PME EM POLPA PROCESSADA POR MICRO-ONDAS COM E SEM EFEITOS TÉRMICOS.	66
FIGURA 23. RAZÃO DAS PORCENTAGENS DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA PARA OS PROCESSOS POR MICRO-ONDAS COM EFEITO TÉRMICO E SEM EFEITO TÉRMICO.....	68
FIGURA 24. GRÁFICO DE PARETO PARA O TRATAMENTO <u>COM</u> EFEITO TÉRMICO.	72
FIGURA 25. GRÁFICO DE PARETO PARA O TRATAMENTO SEM EFEITO TÉRMICO.....	73
FIGURA 26. VALOR PREDITO VERSUS VALOR EXPERIMENTAL DO MODELO PREDITIVO PARA A PORCENTAGEM DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA EM RELAÇÃO AO TEMPO DE EXPOSIÇÃO E A POTÊNCIA POR MICRO-ONDAS <u>COM</u> EFEITO TÉRMICO.	76
FIGURA 27. VALOR PREDITO VERSUS VALOR EXPERIMENTAL DO MODELO PREDITIVO PARA A PORCENTAGEM DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA EM RELAÇÃO AO TEMPO DE EXPOSIÇÃO E A POTÊNCIA POR MICRO-ONDAS <u>SEM</u> EFEITO TÉRMICO.	76
FIGURA 28. CURVAS DE CONTORNO E SUPERFÍCIE DE RESPOSTAS PARA % DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA DA PME EM POLPA DE TOMATE NO PROCESSO POR MICRO-ONDAS <u>COM</u> EFEITO TÉRMICO.	77
FIGURA 29. CURVAS DE CONTORNO E SUPERFÍCIE DE RESPOSTAS PARA % DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA DA PME EM POLPA DE TOMATE NO PROCESSO POR MICRO-ONDAS <u>SEM</u> EFEITO TÉRMICO.....	78

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. COMPARATIVO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS POR DIVERSOS AUTORES PARA CARACTERÍSTICAS DE TOMATE.....	19
TABELA 2. VALOR NUTRITIVO DO TOMATE IN NATURA EM 100G.....	19
TABELA 3. MODELOS DE INATIVAÇÃO TÉRMICA ENZIMÁTICA.....	26
TABELA 4. RESUMO DE ESTUDOS REPRESENTATIVOS DO EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NA ATIVIDADE ENZIMÁTICA.....	29
TABELA 5. NÍVEIS REAIS E CODIFICADOS DOS FATORES UTILIZADOS NO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL – DCCR.....	49
TABELA 6. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA POLPA DE TOMATE SEM PROCESSAR.....	50
TABELA 7. POTÊNCIA ÚTIL MÉDIA DE AQUECIMENTO DA POLPA DE TOMATE NA CAVIDADE DO EQUIPAMENTO DE MICRO-ONDAS COM E SEM EFEITOS TÉRMICOS.....	56
TABELA 8. ENERGIA TRANSFERIDA PARA ÁGUA DE RESFRIAMENTO.....	57
TABELA 9. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS (MÉDIA DE 3 REPETIÇÕES ± DESVIO PADRÃO) DA POLPA DE TOMATE SEM OS PROCESSAMENTOS.....	58
TABELA 10. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS (MÉDIA DE 3 REPETIÇÕES ± DESVIO PADRÃO) DA POLPA DE TOMATE PARA O TRATAMENTO TÉRMICO CONVENCIONAL.....	58
TABELA 11. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS (MÉDIA DE 3 REPETIÇÕES ± DESVIO PADRÃO) DA POLPA DE TOMATE APÓS AMBOS OS PROCESSAMENTOS DE MICRO-ONDAS.....	59
TABELA 12. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS (MÉDIA DE 3 REPETIÇÕES ± DESVIO PADRÃO) DA POLPA DE TOMATE APÓS AMBOS OS PROCESSAMENTOS DE MICRO-ONDAS.....	59
TABELA 13. PARÂMETROS DE COR PARA POLPA DE TOMATE TRATADA POR MICRO-ONDAS COM EFEITO TÉRMICO.....	60
TABELA 14. PARÂMETROS DE COR PARA POLPA DE TOMATE TRATADA POR MICRO-ONDAS SEM EFEITO TÉRMICO.....	61
TABELA 15. PARÂMETROS DE COR PARA POLPA DE TOMATE TRATADA DE FORMA CONVENCIONAL.....	61
TABELA 16. GRAUS DE DIFERENÇA PARA AS ESCALAS ΔE (WANG ET AL., 2014).....	63
TABELA 17. VALORES PERCENTUAIS DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA DA PME E A TEMPERATURA MÁXIMA ALCANÇADA EM CADA CONDIÇÃO DE PROCESSO EM BATELADA, QUANDO SUBMETIDO AQUECIMENTO CONVENCIONAL.....	65
TABELA 18. PERCENTUAL DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA DA PME E A TEMPERATURA FINAL ALCANÇADA EM CADA CONDIÇÃO DE PROCESSO DESCONTÍNUO, QUANDO SUBMETIDO À INCIDÊNCIA DAS MICRO-ONDAS COM E SEM EFEITO TÉRMICO.....	69
TABELA 19. EFEITOS PARA OS FATORES CORRESPONDENTES NA PORCENTAGEM DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA DA PME POR MICRO-ONDAS <u>COM</u> EFEITO TÉRMICO.....	70
TABELA 20. EFEITOS PARA OS FATORES CORRESPONDENTES NA PORCENTAGEM DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA DA PME POR MICRO-ONDAS <u>SEM</u> EFEITO TÉRMICO.....	71

TABELA 21. EFEITOS ESTATISTICAMENTE SIGNIFICATIVOS PARA OS FATORES CORRESPONDENTES NA PORCENTAGEM DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA DA PME POR MICRO-ONDAS <u>COM</u> EFEITO TÉRMICO, EXCLUINDO OS FATORES DE INTERAÇÃO E QUADRÁTICOS.	71
TABELA 22. EFEITOS ESTATISTICAMENTE SIGNIFICATIVOS PARA OS FATORES CORRESPONDENTES NA PORCENTAGEM DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA DA PME POR MICRO-ONDAS <u>SEM</u> EFEITO TÉRMICO, EXCLUINDO OS FATORES DE INTERAÇÃO E QUADRÁTICOS.	72
TABELA 23. ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O MODELO LINEAR DO PROCESSO POR MICRO-ONDAS <u>COM</u> EFEITOS TÉRMICOS.....	74
TABELA 24. ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O MODELO LINEAR DO PROCESSO POR MICRO-ONDAS <u>SEM</u> EFEITOS TÉRMICOS.....	74
TABELA 25. MODELOS PREDITIVOS EMPÍRICOS DO PERCENTUAL DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA DA PME POR MICRO-ONDAS EM PROCESSOS DE AQUECIMENTO TRANSIENTE COM E SEM EFEITOS TÉRMICOS. SENDO P: POTÊNCIA DE MICRO-ONDAS (W); T: TEMPO (S) DE PROCESSO.	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 Geral.....	17
2.2 Específicos	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 Matéria prima – Polpa de tomate	18
3.1.1 Composição química comum	18
3.1.2 Estrutura do tomate	19
3.2 Processamento de polpa de tomate.....	21
3.3 Pectina	21
3.4 Enzimas	22
3.4.1 Determinação da atividade da enzima PME em polpa de tomate	24
3.4.2 Modelo cinético de inativação enzimática	24
3.4.3 Inativação enzimática de polpa de tomate por processo térmico convencional	26
3.5 Inativação enzimática de polpa de tomate por micro-ondas	28
3.6 Tecnologia de micro-ondas	30
3.6.1 Características das micro-ondas	30
3.6.2 Propriedades dielétricas	31
3.6.3 Efeitos não térmicos das micro-ondas	33
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	35
4.1 Matéria prima.....	38
4.2 Métodos e equipamentos de tratamentos utilizados	39
4.2.1 Forno de micro-ondas	39
4.2.2 Condensador Allihn	40
4.2.3 Protótipo de inativação por micro-ondas com efeito térmico	41
4.2.4 Processo de inativação por micro-ondas sem efeito térmico.....	41
4.2.5 Tratamento térmico convencional	43
4.3 Análises físico-químicas	43
4.3.1 Determinação do valor de pH.....	44
4.3.2 Acidez titulável.....	44
4.3.3 Teor de sólidos solúveis	44
4.3.4 Parâmetros de Cor	44
4.3.5 Determinação da atividade da enzima PME	46
4.4 Avaliação energética	47

4.5	Planejamento experimental de ensaios	48
4.6	Análise estatística.....	49
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	50
5.1	Propriedades físico-químicas da polpa de tomate não processada ..	50
5.2	Perfil da temperatura nos tratamentos por micro-ondas (com / sem efeitos térmicos) e tratamento térmico convencional	51
5.3	Análise energética dos processos	55
5.4	Impacto das micro-ondas nas propriedades físico-químicas da polpa de tomate	57
5.5	Efeitos dos tratamentos sobre a cor.....	60
5.6	Inativação enzimática da PME por tratamento convencional e de micro-ondas (com e sem efeitos térmicos)	63
5.7	Planejamentos experimentais para a inativação enzimática da PME em polpa de tomate.....	69
6	CONCLUSÕES.....	80
7	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	82
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
9	APÊNDICES	92

1 INTRODUÇÃO

O tomate (*Lycopersicon esculentum*) é um vegetal altamente consumido no mundo tanto *in natura* como em produtos derivados, e ocupa lugar de destaque na dieta humana, devido ao alto conteúdo de fibras, sais minerais e agentes antioxidantes como vitamina C, carotenoides e flavonoides (ABUSHITA et al., 1997; SAHLIN et al., 2004). Nele também existem duas enzimas importantes que são a pectina metilesterase (PME; EC 3.1.1.11) e a poligalacturonase (PG; EC 1.2.1.15), (Makroo, 2016), responsáveis pela degradação da pectina, a qual desempenha um papel fundamental na textura e consistência tanto no tomate como nos produtos derivados. A mais importante destas enzimas é a PME, devido a sua maior resistência térmica, do que a maioria das bactérias e fungos encontrados neste produto (TAJCHAKAVIT & RAMASWAMY, 1997), tornando-se um índice importante na determinação das variáveis tempo-temperatura durante o tratamento de pasteurização, o qual visa a eliminação de micro-organismos patogênicos e inativação enzimática.

Embora a pasteurização convencional seja o tratamento térmico mais utilizado para a destruição de micro-organismos patogênicos e inativação enzimática, possui como principal desvantagem a degradação térmica da qualidade nutricional e sensorial dos alimentos devido a exposição a altas temperaturas e durante tempos prolongados (IQBAL et al., 2019).

Em busca da melhoria da qualidade dos produtos alimentares, várias tecnologias emergentes de processos não térmicos e térmicos estão sendo utilizadas para a redução das atividades enzimáticas e microbianas, e superar as desvantagens dos métodos convencionais em relação à custos, eficácia e qualidade do produto final. Os tratamentos não térmicos, por enquanto estudados são: raios x, ultrassom (RAVIYAN et al., 2005), campo elétrico pulsado de alta intensidade (TEIXEIRA et al., 2008), dióxido de carbono de alta pressão (HPCD) e alta pressão hidrostática (HHP) (IQBAL et al, 2019). Entre os tratamentos térmicos estão: aquecimento ôhmico, aquecimento por rádio frequência e aquecimento por micro-ondas (HUANG et al., 2007; DA SILVA et al., 2007; LE BAIL et al., 2000; MATSUI et al., 2007; GUO et al., 2017).

A utilização de micro-ondas é proposta como uma boa alternativa para solucionar alguns dos problemas enfrentados no processo de aquecimento convencional, pois as micro-ondas podem transferir energia por todo o volume do material, devido a que possuem uma habilidade de penetração muito alta e geram calor através da massa de materiais eletricamente não condutores, diminuindo assim, o gradiente de temperatura no material e o tempo de processamento (BENLLOCH-TINOCO et al., 2013). Existem outras vantagens que a energia das micro-ondas pode oferecer, tais como: penetração da energia de forma rápida, controle instantâneo da temperatura, ser facilmente adaptável aos sistemas automatizados, dimensões reduzidas da câmara de aplicação para uma capacidade produtiva equivalente, alta eficiência na conversão de energia elétrica em calor, gradiente de temperatura desnecessário para efetivar o transporte da energia das micro-ondas, ausência de efeitos térmicos residuais no ambiente e facilmente adaptável à quantidade e tipo de produto a tratar. Por conseguinte, esta tecnologia tem sido apontada como um método potencial, na pasteurização, para a obtenção de produtos de alta qualidade incluindo frutos, vegetais e grãos (CUI et al., 2008).

As primeiras pesquisas sobre tratamentos de micro-ondas em líquidos foram relatadas por Prosetya e Datta (1991). Posteriormente, resultados satisfatórios foram obtidos com tratamentos de micro-ondas para pasteurizar diversos produtos alimentícios, como água de coco (MITSUI et al., 2007 e MITSUI et al., 2008), purê de manga (RODRÍGUEZ-SALINAS et al., 2011), e purê de tomate (PÉREZ-TEJADA et al., 2016), mostrando resultados mais eficazes comparado ao processo térmico convencional. Além destes estudos, empresas como a Sairem desenvolve tecnologias baseadas nas micro-ondas para processamento de alimentos como compotas, marmeladas e alimentos em pó.

Além destas boas características para o processo de pasteurização por micro-ondas, a possibilidade da existência de **efeitos não térmicos das micro-ondas** vem sendo discutida por vários autores há bastante tempo, e ainda não foram distinguidos com precisão (SHAMIS et al., 2012; KUBO et al., 2020; MATSUI et al., 2008). Segundo Anantheswaran & Ramaswamy (2001), os tempos para redução em 90 % da atividade enzimática foram de 7- a 12 s e de 154 s, com 60°C para os dois tratamentos, por micro-ondas e tratamento convencional, respectivamente, mostram a possibilidade de contribuição de efeitos não térmicos das micro-ondas na inativação

enzimática, devido a esta diferença significativa de tempo de tratamento, o que nos leva a propor o estudo dos efeitos “*não térmicos*” pelas ações das micro-ondas.

Assim, reitera-se a possibilidade de obtenção de alimentos processados, conforme os padrões estabelecidos pelas legislações vigentes do Ministro de Estado da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), combinando sabor e nutrientes preservados que satisfaçam as expectativas do consumidor e da indústria de alimentos, reforçando a importância de estudar a aplicação das micro-ondas (SALAZAR-GONZALES et al., 2012; GENTRY & ROBERTS, 2005).

Portanto, a proposta deste trabalho foi desenvolver um sistema de pasteurização por micro-ondas em escala piloto, visando a inativação enzimática da PME para polpa de tomate, analisando os efeitos térmicos e não térmicos, e avaliando os parâmetros de processo para obter um produto com indicadores de qualidade superiores quando comparados ao processo térmico convencional. Foram avaliados os seguintes parâmetros: temperatura de saída, inativação enzimática e características físico-químicas das amostras como, pH, acidez titulável, cor e teor de sólidos solúveis. A inativação enzimática foi avaliada por meio do acompanhamento das atividades da enzima PME por ser a enzima pectinolítica mais termo-resistente.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Investigar os efeitos térmico e não térmicos das micro-ondas na inativação enzimática da pectina metilesterase (PME) em polpa de tomate, estabelecendo as melhores condições de processamento em relação ao tempo de processamento, temperatura, potência.

2.2 Específicos

- ✓ Montar dentro da cavidade do micro-ondas uma unidade de resfriamento simultâneo que permite trocar o calor gerado pela aplicação das micro-ondas.
- ✓ Realizar os ensaios experimentais em diferentes condições operacionais para o processo térmico convencional, o processo térmico assistido por micro-ondas e o processo não térmico por micro-ondas.
- ✓ Avaliar os efeitos térmicos e não térmicos das condições operacionais do micro-ondas sobre a atividade enzimática, determinando as variáveis independentes significativas.
- ✓ Comparar a efetividade dos métodos de tratamento aplicados na polpa de tomate.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Matéria prima – Polpa de tomate

O tomate (*Lycopersicon esculentum*) pertence a mesma família da batata, berinjela e pimentão, as *Solanaceae* (DALKE, 2019), e é da família de vegetais frescos mais comum usado pelas indústrias de processamento de alimentos. O tomateiro se desenvolve em condições de clima variado como clima tropical, subtropical e temperado, o que facilita ser cultivado em diferentes regiões (SILVA et al., 2007).

No mercado existem diversos grupos de tomate destinados ao consumo *in natura*, como a Santa Cruz (oblongo), caqui ou salada (redondo), italiano e cereja (RUBIN et al., 2019).

Dependendo do destino a ser dada à matéria prima, alguns parâmetros devem ser considerados. Assim, as características fundamentais do tomate destinado ao processamento industrial, são o teor de sólidos solúveis, cor e pH, sendo que, para tomates despelados, o mais importante é a facilidade de retirada da pele com a manutenção da textura do fruto durante o processo. Como as características dos tomates estudados serão relevantes, existem estudos reportados (Tabela 1) por vários autores que determinam algumas dessas características.

3.1.1 Composição química comum

A composição dos frutos é uma característica da cultivar, mas também pode ser influenciada pelas condições edafoclimáticas da região produtora.

O tomate apresenta, em sua composição, um elevado teor de água (95,1%) (SANTOS, 2014) e baixo teor de matéria seca, também se encontram compostos inorgânicos, ácidos orgânicos, açúcares, sólidos insolúveis e outros compostos (Tabela 1).

Tabela 1. Comparativo entre resultados obtidos por diversos autores para características de tomate.

	Muraru et al. (2004)	Arias et al. (2000)	Borguini (2006)	Ferreira et al. (2010)	Rosa et al. (2011)
Cor:					
L*	41,74- 43,98	40,1 –			
a*	33,29- 36,45	41,0 22,0 – 23,3			
Firmeza (N/mm)	7,21 – 10,94	1,99 – 2,30			
Ph	4,21- 4,32	4,23 – 4,29	4,16	4,31	4,50
Sólidos totais (%)	5,76 – 6,88	5,46 – 5,88			
Sólidos solúveis (°Brix)	4,77 – 5,73	5,00 – 5,50	4,0-4,17	4,80	5,23
Acidez (g ácido cítrico/kg tomate)	3,28 – 3,91	6,4		3,46	2,70
Teor de licopeno (mg/kg)	77 – 150	50 - 60	15,4-20,9		
Teor de ácido ascórbico (mg/kg)	44 -115	200	195,7-250,8	82,70	
Pectina(g/kg)	2,16 – 10,42				

Tabela 2. Valor nutritivo do tomate *in natura* em 100g.

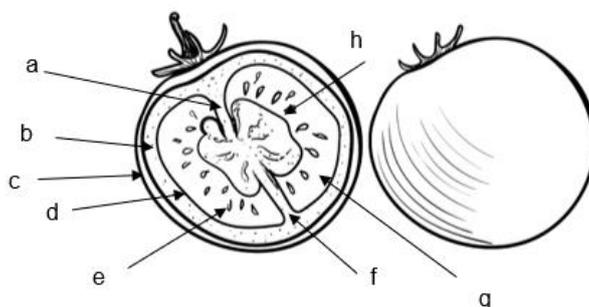
Composição	Tomate <i>in natura</i>
Energia (kcal)	15
Teor de água (g)	95.1
Proteínas (g)	1.1
Lipídios (g)	0.2
Carboidratos (g)	3.1
Fibra alimentar (g)	1.2
Cinzas (g)	0.5

Fonte: Adotado de Santos (2014)

3.1.2 Estrutura do tomate

Os frutos constituem-se em bagas carnosas, com aspecto, tamanho e peso variados. Sua estrutura é composta por pele (epicarpo delgado), polpa (mesocarpo carnoso), endocarpo, placenta e sementes como se apresenta na Figura 1.

Figura 1. Estrutura do tomate: a) Coração (feixe fibrovascular), b) Parede interna (mesocarpo), c) Pele (epicarpo), d) Endocarpo, e) Sementes, f) Septo, g) Lóculo, h) Tecido placentário.



Fonte: Elaborado pela autora

Os lóculos estão no interior dos frutos e as sementes imersas no tecido placentário. Nas indústrias a pele e as sementes são consideradas subprodutos e removidas durante o processamento e destinadas à alimentação animal (FERRARI, 2008).

Produção de tomate

O setor do tomate e seus produtos processados apresenta grande relevância econômica mundial. Segundo dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura, a produção mundial de tomates em 2020 foi de aproximadamente 186 milhões de toneladas por ano, das quais cerca de 88 milhões de toneladas foram destinadas ao consumo do fruto *in natura* e as restantes foram destinadas a indústria de processamento de alimentos (FAO, 2022).

Na América do Sul, o Brasil lidera a produção de tomate para processamento industrial, sendo o maior mercado consumidor de seus derivados industrializados, e encontra-se na nona posição com 2,5% da produção mundial, onde são plantados aproximadamente 54,2 mil hectares de tomateiros no ano 2021, (IBGE, 2021).

No Brasil, os principais estados produtores de tomate para consumo *in natura*, são: São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Bahia, Paraná e Santa Catarina (RUBIN et al., 2019), e entre 1990 e 2016, os estados de São Paulo e Goiás foram os estados de maior área cultivada (LANDAU & SILVA, 2020), sendo plantados anualmente aproximadamente 64.4 mil hectares de tomateiro (DAHLKE et al., 2019).

3.2 Processamento de polpa de tomate

O processamento industrial do tomate permite a obtenção de produtos atomatados como ketchup, tomate despelado, tomate seco, suco, polpa, extrato, diversos molhos e inclusive tomate em pó (SANTOS, 2014), que podem ser conservados por mais tempo, se comparados ao fruto *in natura*.

Os derivados industriais, com maior demanda de mercado são o extrato, a polpa, o molho e o ketchup (TEIXEIRA et al., 2017).

O produto polpa de tomate ou também conhecido como purê de tomate é produzido a partir de tomates sem sementes e sem pele (SANTOS, 2014). Segundo a Instrução Normativa Nº 49, de 26 de setembro de 2018, define-se polpa de fruta ao produto obtido por esmagamento das partes comestíveis de frutas carnosas por processos tecnológicos adequados.

A polpa pode ser estocada em várias concentrações (de 18 até 33 °Brix), porém a mais comum é 22-26 °Brix. O valor de sólidos solúveis depende da decisão de cada indústria, pois é função da linha de produtos da mesma (SANTOS, 2014).

O processamento industrial de polpa compreende diversas etapas como recebimento, lavagem, seleção, trituração, tratamento térmico, envasamento e resfriamento, tendo como etapa mais importante o tratamento térmico que visa à inativação enzimática e destruição de microrganismos patogênicos e deteriorantes, sendo esta etapa foco do projeto.

Deve-se destacar que a qualidade do produto depende em primeira instância, da qualidade da matéria prima. Assim uma etapa inicial e de importância primordial é a seleção dos tomates, que devem apresentar cor, textura e teor de sólidos mais adequados para obtenção do produto a que se destina.

3.3 Pectina

A pectina consiste em um heteropolisacarídeo presente nas lamelas média e primária das paredes celulares da maioria das plantas, constituindo o principal componente responsável pela adesão entre as células vegetais contribuindo para a firmeza, elasticidade e resistência mecânica do tecido vegetal não amadeirados das plantas (PAIVA, 2009), e sua quantidade varia conforme a espécie e o estado de maturação das frutas.

Quimicamente a molécula de pectina consiste em uma estrutura em cadeia, que contém principalmente unidades de ácido galacturônico e poligalacturônico, na qual dois terços dos grupos carboxílicos estão esterificados com metanol (BRUGOS, 2018).

As mudanças de textura dos frutos e hortaliças durante o crescimento, amadurecimento e estocagem, é fortemente influenciada pela natureza e quantidade da pectina presente. Em frutas imaturas as substâncias pécticas aparecem principalmente como protopectina ou pectato de cálcio, que é insolúvel pelo fato de grupos carboxílicos ácidos encontrassem ligados ao cálcio. Durante o amadurecimento e armazenamento ocorre a solubilização da pectina levando ao amolecimento da fruta (ANTUNES et al., 2006).

A degradação ou despolimerização da pectina durante o amadurecimento e estocagem de frutos pode ocorrer pela ação de enzimas produzidas por microorganismos (exógenas) ou enzimas produzidas naturalmente (endógenas) (CAVALCANTE et al., 2021). Esta degradação pode seguir dois mecanismos principais: por desmetilação preliminar pela pectina metilesterase, seguida da hidrólise ácida das ligações α (1 \rightarrow 4) pelas poligalacturonases; despolimerização direta das pectinas por reações também de β -eliminação sob ação das pectinas liases e pectato liases de origem microbiana (CANTERI et al., 2011).

3.4 Enzimas

Enzimas são grupos de substâncias orgânicas de natureza normalmente proteica, que catalisam uma reação com um certo grau de especificidade. Nas plantas as enzimas que estão principalmente presentes são as pécticas ou pectinases (BRUGOS, 2018), um grupo heterogêneo de enzimas que hidrolisam as substâncias pécticas.

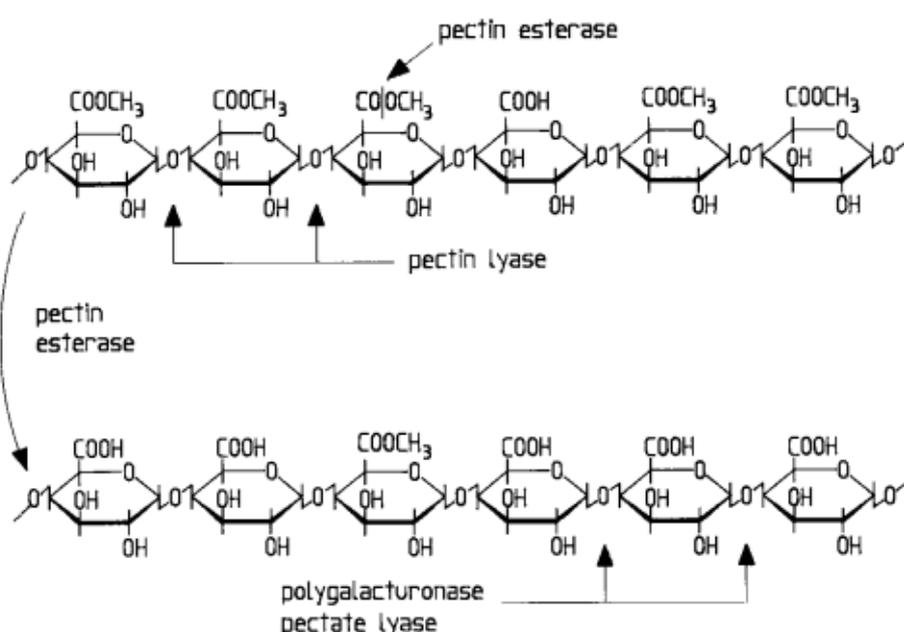
No tomate as enzimas presentes são as enzimas poligalacturonase (PG, EC 3.2.1.15) e pectina metilesterase (PME, EC 3.2.2.22), vários estudos evidenciam sua participação nas mudanças da textura durante os estádios finais do amolecimento causadas pela degradação da pectina (ANTUNES et al., 2006; BRUGOS, 2018; SAMARANAYAKE et al., 2016).

O mecanismo de ação da PME é atuar sobre a desesterificação de grupos metoxílicos, hidrolisando somente os grupos adjacentes a grupamentos carboxílicos livres, e a presença desses blocos de ácido desmetilados possibilita a degradação da pectina pela enzima PG que catalisa a clivagem hidrolítica das ligações glicosídicas α -D (1-4) na molécula de pectina (Figura 2), levando ao amaciamento de frutos, porém, o aumento em sua atividade só ocorre durante o amadurecimento (FACHIN et al., 2002).

A PME é mais resistente termicamente do que a maioria dos micro-organismos de deterioração vegetativos encontrados em sucos cítricos, razão pela qual a inativação desta enzima tem sido considerada como indicador de eficácia do processo de pasteurização de polpa de tomate (BRUGOS, 2018).

A inativação da PME realizada por tratamento térmico é umas das soluções adotadas pelas indústrias alimentares, tendo como desvantagem o uso de altas temperaturas que leva a uma série de problemas de qualidade conhecidos, como mudanças de cor, sabor e teor de vitaminas do material processado (CAVALCANTI et al., 2021; FACHIN et al., 2002).

Figura 2. Fragmento de uma molécula de pectina e pontos de ataque de enzimas pécticas.



Fonte: Pilnik & Voragen (1993).

3.4.1 Determinação da atividade da enzima PME em polpa de tomate

Geralmente, as enzimas são quantificadas pela atividade enzimática, a qual determina a capacidade da enzima de converter um substrato em produto (CAVALCANTI et al., 2021). A unidade internacional (U) é definida como a conversão de 1.0 μmol de substrato por minuto, sob condições padronizadas.

Para determinar a atividade enzimática da PME, diferentes métodos são utilizados, sendo a análise titrimétrica um dos métodos preferidos na pesquisa, devido a sua simplicidade. Esta análise está baseada na medição dos grupos carbóxilos livres formados como resultado da ação da PME sobre a pectina, mantido nas condições ótimas de atuação da enzima, que são pH 7.5 e 30 °C. Foi descrito inicialmente por Kertesz em 1937, e desde então vem sendo modificado, e é bem descrito por Kertesz em 1955 (SALAS-TOVAR et al., 2017). A unidade de atividade da PME (unit) é definida como a quantidade de enzima que libera 1.0 μmol de grupos carbóxilo por minuto nas condições de ensaio mencionadas. A atividade da enzima PME foi calculada usando a equação 1.

$$PEU(\text{unit/mL}) = \frac{(V_s) \cdot (C) \cdot (1000)}{(t) \cdot (V_p)} \quad (1)$$

onde: PEU é a atividade enzimática; V_s volume de NaOH gasto na titulação (mL); C é a molaridade da Solução NaOH; V_p é o volume da amostra (mL); t é o tempo de reação (min).

A inativação enzimática pode ser dada em porcentual em função da atividade enzimática inicial, de acordo com a equação 2:

$$\text{Intivação} = \left[1 - \frac{PEU}{PEU_0} \right] \cdot 100 \quad (2)$$

3.4.2 Modelo cinético de inativação enzimática

A cinética de inativação térmica usualmente é descrita por uma reação de primeira ordem (MAKROO et al., 2017, ANANTHESWARAN & RAMASWAMY, 2001). De acordo com este modelo, a enzima passa por uma etapa de conversão de sua

forma ativa para a forma desnaturada (inativa) por uma reação irreversível de primeira ordem descrita na equação 3.

$$\ln\left(\frac{PEU}{PEU_0}\right) = -k \cdot t \quad (3)$$

onde: PEU_0 é a atividade inicial da enzima no tempo $t = 0$ e PEU é a atividade da enzima após o tratamento térmico durante um período t e o coeficiente " k " representa a constante de taxa de primeira ordem.

Os parâmetros cinéticos para uma cinética de primeira ordem comumente utilizados são D e Z , sendo o valor D o tempo de redução decimal (D_{90}), ou seja, o tempo de inativação térmica necessário para causar 90% de inativação da atividade enzimática em uma determinada temperatura e é análogo ao valor k , e pode ser obtido pela Equação 4:

$$D_{90} = \frac{2.303}{k} \quad (4)$$

O valor de Z , por sua vez, representa a variação de temperatura que provoca uma mudança decimal em D .

Outros modelos são aplicados na literatura quando se reportam desvios de linearidade para o modelo de primeira ordem, que evidenciam a presença de isoenzimas com maior resistência térmica. Estas isoformas são comuns vê-las classificadas em dois grupos principais: as frações termolábeis e as termorresistentes (BRUGOS, 2018), pelo que se há proposto outros modelos cinéticos baseados em diferentes mecanismos: primeira ordem, reações em série e paralelas, descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Modelos de inativação térmica enzimática.

Modelo	Equação
Primeira ordem	$\ln(A/A_0) = -k.t$
Isoenzimas distintas	$A/A_0 = A_L.exp(-k_L.t) + A_R.exp(-k_R.t)$
Duas frações	$A/A_0 = a.exp(-k_L.t) + (1-a).exp(-k_R.t)$
Multicomponente de 1ª ordem	$A/A_0 = \frac{[exp(-k_1.t) + r.exp(-k_2.t)]}{(1+r)}$
Conversão fracionária	$A/A_0 = A_r + (A_0 - A_r).exp(-k.t)$
Distribuição de Weibull	$A/A_0 = exp(-b.t^n)$
nésima ordem	$A/A_0 = [A_0^{1-n} + (n-1).k.t]^{1/(n-1)}$
Séries	$A/A_0 = \alpha_2 + [1 + (\alpha_1 k_1/k_2 - k_1) - (\alpha_2 k_2/k_2 - k_1)]exp(-k_1.t) - [(\alpha_1 k_1/k_2 - k_1) - (\alpha_2 k_1/k_2 - k_1)]exp(-k_2.t)$
Etapas consecutivas	$A/A_0 = [A_1 - A_2(k_1/k_1 - k_2)]exp(-k_1.t) + A_2(k_1/k_1 - k_2)exp(-k_2.t)$

Fonte: Brochier, 2018.

3.4.3 Inativação enzimática de polpa de tomate por processo térmico convencional

O controle destas enzimas no processo industrial é importante, principalmente durante o processamento de frutas e vegetais de acordo com os atributos de qualidade específicos do produto. Em alguns casos, como nos sucos de frutas, a ação da PME é desejável para promover a clarificação (VOVK et al., 2005).

Para assegurar a qualidade dos produtos à base de tomate, é realizada a inativação parcial ou total das enzimas e microrganismos indesejados. Como a hidrólise da pectina causada pela PG depende da ação da PME, e esta por sua vez apresenta uma resistência térmica maior que os micro-organismos presentes na polpa, o acompanhamento de sua atividade durante o processo tem sido utilizado como indicador de eficácia do tratamento.

A inativação enzimática é um processo químico complexo com sete fenômenos principais, incluindo agregação, dissociação e desnaturação ou mudanças na conformação, provocando a perda da forma tridimensional ao destruir as estruturas secundária, terciária e/ou quaternária da enzima. (POLAKOVIC, 1996). Pode ocorrer sob condições operacionais independentes ou associadas, tais como pressão, temperatura, acidez, composição e agentes aceleradores que contribuem para esse processo, dependentes do tempo de exposição.

O processamento térmico é um dos métodos mais utilizados na indústria alimentar na conservação de produtos, e têm por objetivo reduzir a flora presente de micro-organismos deterioradores, bem como inativar enzimas que causam alterações nas características sensoriais como na cor, sabor e textura dos alimentos e podem destruir os nutrientes como vitaminas que são sensíveis ao calor, podendo ocorrer estas alterações durante o processamento e armazenamento (IQBAL et al., 2019; BRUGOS, 2018).

Neste método de pasteurização convencional, os produtos são expostos a altas temperaturas e mantidos por um tempo específico, baseado na resistência térmica do micro-organismo ou enzima alvo (AGHAJANZADEH & ZIAIIFAR, 2017), no caso da polpa de tomate umas das principais razões do tratamento térmico é a inativação da enzima PME, além da destruição de micro-organismos.

A inativação térmica de PME começa acima de 40 °C, apresentando mudanças conformacionais como a quebra das ligações de hidrogênio, desdobramento da estrutura da proteína terciária, desamidação térmica de aminoácidos (TANAKA & HOSHINO, 2003) e consequente perda de atividade.

Na polpa de tomate comercial dois tratamentos térmicos são utilizados, denominados *hot break* e *cold break*, em condições adequadas de tempo e temperatura.

No tratamento *cold break* para a polpa de tomate a inativação enzimática é parcial e produz uma polpa de boa cor, sabor e qualidade (KREBBERS et al., 2003). No entanto, os principais problemas neste tratamento é viscosidade instável e a consistência relativamente baixa observada durante o armazenamento (WU et al., 2007). Em tratamentos *hot break*, os produtos são aquecidos rapidamente para inativar completamente as enzimas obtendo um produto mais viscoso, mas simultaneamente leva à perda de sabor, cor marrom e degradação nutricional.

Algumas condições de tempo temperatura reportadas na literatura para polpa de tomate no processo de quebra a quente, a polpa de tomate é rapidamente aquecida a 90 °C para inativar termicamente as enzimas, particularmente as enzimas que degradam a pectina, pectina metilesterase (PME) e poligalacturonase (PG). No processo de quebra a frio, a polpa de tomate é aquecida aproximadamente a 65 °C (ANTHON et al., 2008).

Goodman et al., (2002) relatam que as condições de tratamento térmico utilizadas para pasteurização de suco de tomate são temperaturas entre 85 e 90 °C para o *hot break*. Já no processo *cold break* o produto é submetido a uma temperatura abaixo de 70 °C.

No entanto, o processamento térmico causa impactos negativos como a deterioração da qualidade e das propriedades sensoriais dos alimentos na cor, sabor e componentes de carboidratos, além de destruir os nutrientes termo sensíveis, como vitaminas (IQBAL et al., 2019).

Atualmente, várias técnicas inovadoras de processamento térmico alternativos têm sido propostas, sendo uma delas radiação por micro-ondas.

3.5 Inativação enzimática de polpa de tomate por micro-ondas

Um das alternativas propostas para minimizar ou prevenir os efeitos indesejáveis, apresentados anteriormente durante o processo de pasteurização de alimentos, é a utilização da energia de micro-ondas.

A energia de micro-ondas já vem sendo utilizada na indústria de alimentos como no processamento de bacon, frango e batata frita, secagem de massas e biscoitos, descongelamento, esterilização e pasteurização de leite, sucos, chás, sopas e grãos (BRUGOS, 2018).

As micro-ondas oferecem uma alternativa viável para o aquecimento térmico ao atingir aquecimento de forma mais rápida, eliminação de incrustações, emissão zero de gases de escape ou resíduos tóxicos ao meio ambiente, alta eficiência energética o que por sua vez se traduz a economia de energia, capacidade de destruição de micro-organismos, inativação de enzimas e diminuição de tempo de processo que promovem a retenção de compostos termo sensíveis e propriedades sensoriais como sabor e cor (EDGARD & OSEPCHUK, 2001; STRATAKOS et al., 2016; CHEN et al., 2016; ARJMANDI et al., 2016; GONZÁLES-MONROY, 2018).

As desvantagens que as micro-ondas apresentam são: a não uniformidade na distribuição da energia, chegando a apresentar pontos quentes e frios no produto principalmente em alimentos sólidos, é um processo de difícil predição e modelagem, exige maior grau de precisão durante o controle do processo, pois parâmetros como potência, frequência, temperatura inicial, geometria, volume do alimento, tem grande

impacto no processamento do alimento, e o uso de energia elétrica que é considerada a energia mais cara do ponto de vista comercial (BRUGOS, 2018; SALAZAR-GONZALES, 2011).

Especificamente na inativação enzimática por efeito térmico, diversos pesquisadores têm desenvolvido trabalhos para investigar os parâmetros e fatores que podem influenciar no processo. Na Tabela 5, são apresentados alguns desses trabalhos com dados e conclusões mais relevantes, os resultados obtidos para inativação de PME por micro-ondas comprovaram sua alta efetividade quando comparado ao tratamento térmico convencional.

Tabela 4. Resumo de estudos representativos do efeito do tratamento térmico na atividade enzimática.

Enzima / alimento	Temper. / tempo	Condições do processo	Conclusão	Referência
Pectinesterase em suco de laranja	60 °C / 22 s	Escoamento contínuo 2450MHz 700W	Taxas de inativação 7,5 e 3,5 vezes mais rápida que nos processos térmicos convencionais sob batelada e contínuo	Tajchakavit & Ramaswamy, 1995
Peroxidase e Polifenoloxidase em água coco	60-100 °C / 0-400 s	Batelada 2450 MHz	Para T>90°C o efeito combinado de sais e energia de micro-ondas reduziram atividade a níveis indetectáveis	Matsui et al., 2007 Matsui et al., 2008
Pectinesterase em Suco de laranja	60–85°C / 2 a 5 min.	Batelada com agitação	Enzima inativada a 70°C por 1 min Retenção de ácido ascórbico superior ao aquecimento ôhmico e infravermelho	Cinquanta et al., 2010
Ácido ascórbico oxidase em Suco de Manga	70 °C / 8 min 90 °C / 3 min		O tratamento com micro-ondas apresenta maior grau de inativação da AAO	Xanthakis, 2018
Suco de maçã	70-90°C / 22,3 s		O aquecimento por micro-ondas focado atingiu muito mais rápido a temperatura do que o trocador de calor, estando mais próximo do caso ideal de aquecimento instantâneo.	Sigumoto et al., 2018

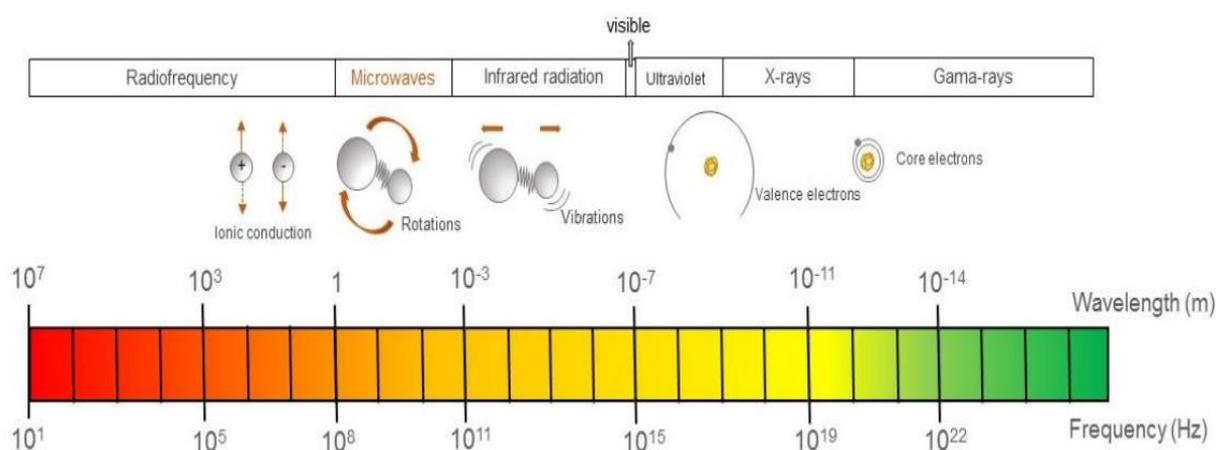
Fonte: Elaborado pela autora.

3.6 Tecnologia de micro-ondas

3.6.1 Características das micro-ondas

Micro-ondas são ondas eletromagnéticas não ionizantes (Figura 3) de alta frequência geradas por magnetrons, que ocupam a fração do espectro eletromagnético entre 300 MHz e 300 GHz, com comprimento de onda de 1 até 1000 mm no espaço livre (DATTA ANANTHESWARAN, 2000). No entanto, para aplicações industriais de acordo com a União Internacional de Telecomunicações as frequências de micro-ondas permitidas são 915 e 2450 MHz, correspondendo a um comprimento de onda de 328 mm e 122,5 mm, respectivamente (DIBBEN, 2001).

Figura 3. Espectro eletromagnético com faixas de Frequência e comprimento de onda.



Fonte: Siguemoto (2018)

O forno de micro-ondas é composto por três partes importantes, a fonte, linha de transmissão e por último o aplicador das micro-ondas:

- **Fonte de micro-ondas:** As micro-ondas são geradas por um magnetron que é o coração do forno de micro-ondas. Utiliza um tubo de elétrons ou tubo de vácuo - um cátodo e um ânodo - cada um dos quais tem uma forma circular com cavidades ressonantes do ânodo que são capazes de converter energia elétrica em energia eletromagnética de micro-ondas.

- **Linha de transmissão:** A linha de transmissão transmite a potência do magnetron, onde as ondas são originadas, para a cavidade ressonante, sua função é guiar a direção e sentido de ondas eletromagnéticas que propagam em seu interior.

São estruturas metálicas que podem ser circulares ou retangulares restringindo a expansão das ondas em apenas uma ou duas dimensões, com a finalidade de minimizar as perdas de energia durante a propagação das ondas.

- **Aplicadores de micro-ondas:** Geralmente denominada cavidade ressonante, trata-se de um volume delimitado por paredes metálicas, onde no seu interior materiais são irradiados por energia de micro-ondas.

De uma forma geral, equipamento de micro-ondas consiste basicamente em um magnetron, responsável por converter a energia elétrica em um campo eletromagnético oscilante, e condutores de ondas que refletem o campo elétrico internamente (guias de ondas), transferindo-o para a câmara de aquecimento, a qual pode ser projetada para operações em lote ou fluxo contínuo e ter mecanismos apropriados para prevenir o vazamento de micro-ondas.

3.6.2 Propriedades dielétricas

De acordo com a interação das micro-ondas com os materiais, ou seja, de acordo com as propriedades dielétricas, os materiais podem ser divididos em três grupos: materiais que refletem toda a energia incidente sobre sua superfície (condutores elétricos), materiais que não interagem com a energia de micro-ondas e materiais que absorvem um certo grau a energia de micro-ondas, e a transformam em calor (ZHU et al., 2007). Existem fatores que afetam a absorção e transmissão de energia sendo a principal as propriedades elétricas.

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (5)$$

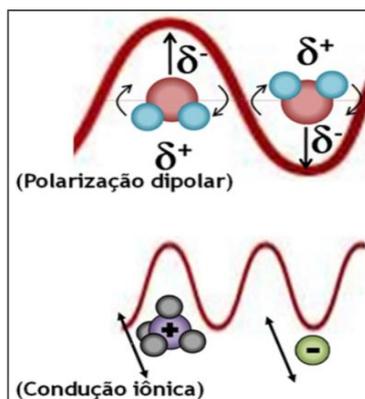
Onde ε' , é a emissividade relativa (parte real) que representa a capacidade do material de armazenar energia elétrica de forma reversível, e ε'' , o fator de perda relativa (parte imaginária) que é o parâmetro que caracteriza a dissipação de energia elétrica acumulada pelo material na forma de calor de maneira irreversível (ZHU et al., 2007).

A razão entre a perda dielétrica e a constante dielétrica é dada pela tangente de perda e é expressa como:

$$\tan(\delta) = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (6)$$

O aquecimento dos materiais dielétricos expostos às micro-ondas acontece por dois principais mecanismos, condução iônica e rotação dipolar pelos quais a energia é gerada e propagada (Figura 4), devido a alternância do campo elétrico das micro-ondas (MAGALHÃES et al., 2003; AGHAJANZADEH et al., 2017; SILVA et al., 2003).

Figura 4. Representação dos mecanismos de ação das micro-ondas.



Fonte: Sousa Filho & Serra (2015).

Durante a pasteurização por micro-ondas, quando os alimentos são colocados dentro da cavidade do forno, o campo elétrico oscilante incide sobre moléculas polares como a água e assim são realinhadas com a polaridade do campo elétrico. Devido à alta frequência de oscilação do campo, cuja alternância ocorre milhares de vezes por segundo, então gera aquecimento do material por atrito entre as moléculas. Quando o campo elétrico é removido, as moléculas retornam à sua orientação aleatória (SOUSA FILHO & SERRA 2015).

O mecanismo de condução iônica ocorre, devido à migração oscilatória dos íons, em resposta ao campo elétrico oscilante. As colisões entre os íons e moléculas vizinhas resultam na dissipação de energia na forma de calor, resultando em um aquecimento volumétrico com tempos de processamento mais curtos e, usualmente, em uma qualidade sensorial e nutricional superior do produto, quando comparado ao obtido com técnicas convencionais de processamento (RAFAEL, 2020; AHMED et al. 2007; DATTA & ANANTHESWARAN, 2001).

O aquecimento por micro-ondas não depende apenas dos mecanismos mencionados anteriormente, mas, principalmente como estes componentes estão

interagindo com os demais constituintes do alimento, e qual o estado físico em que se encontram. Por exemplo, alimentos congelados têm menor absorção de energia das micro-ondas, devido à menor mobilidade das moléculas de água (TELEKEN et al., 2017).

3.6.3 Efeitos não térmicos das micro-ondas

De acordo com a literatura, dois tipos de efeitos podem ser atribuídos às micro-ondas, os térmicos e os não térmicos (PORCELLI, 1996).

Segundo Zieliński (2007), os efeitos não térmicos também são chamados de “efeitos atérmicos” ou “efeitos específicos da irradiação eletromagnética”, e tratam dos efeitos causados pelas micro-ondas, não relacionados ao aumento de temperatura.

Alguns estudos foram desenvolvidos com o objetivo específico de investigar os efeitos não térmicos relacionados a materiais biológicos como proteínas, enzimas e microrganismos na área de alimentos (DATA & ANANTHESWARAN, 2001; HERRERO et al., 2008; CHEN et al., 2017; SIGUEMOTO et al., 2018; KUBO et al., 2020; CAVALCANTE et al., 2021). Especificamente para sistemas enzimáticos, identificaram a possibilidade de potencializar a inativação enzimática com os efeitos não térmicos, dessa maneira diversas teorias foram propostas com o intuito de explicar os mecanismos envolvidos nesses processos, sem embargo, estes estudos realizados avaliaram os efeitos não térmicos conjuntamente como efeitos térmicos, sem isolar, isto é o produto foi aquecido durante o tratamento por micro-ondas.

Diversos autores argumentam que os campos elétricos oscilantes ao interagirem com grupos polares de uma proteína podem alterar a conformação enzimática, provocando assim, a perda de sua funcionalidade devido a alterações que ocorrem em suas estruturas, secundária e terciária (PORCELLI et al., 1997; ZHANG et al., 2011).

Matsui et al. (2008) relatam que a penetração de micro-ondas promove uma taxa de aquecimento rápida além de ter um efeito não térmico na inativação enzimática que reduz o impacto da temperatura e melhora a retenção de constituintes termolábeis e características sensoriais.

Segundo Belloch-Tinoco et al. (2014), foram realizados processamentos térmicos no purê de kiwi, tanto com tratamento convencional como por micro-ondas.

Foi identificado uma redução na atividade enzimática da pectina metilesterase e polifenoloxidase, mais significativa a partir do tratamento por micro-ondas em relação ao convencional. Além disso, eles observaram que as amostras tratadas por micro-ondas mantiveram os compostos antioxidantes naturais do purê de kiwi. A partir da comparação dos dois tipos de tratamento, os autores sinalizam a possibilidade de efeitos não térmicos pois o campo elétrico das micro-ondas pode afetar as unidades polares e carregadas das proteínas.

Manguang Lin e Hosahalli S. Ramaswamy (2011) avaliaram as atividades residuais da fosfatase alcalina do leite cru, o qual foi submetido a aquecimento por micro-ondas e aquecimento térmico convencional em fluxo contínuo no intervalo de temperatura de pasteurização (60-75 °C). A existência do aumento de efeitos térmicos por micro-ondas foi confirmada a partir dos resultados que demonstraram que a inativação de ALP ocorreu mais rapidamente sob a condição de aquecimento por micro-ondas em comparação ao aquecimento convencional.

Porcelli et al. (1997) trataram, com e sem a radiação de micro-ondas, dois tipos de enzimas em uma faixa de temperatura de 70 a 90 °C. Mediante a técnica de fluorescência, foram detectadas mudança de conformação nas estruturas das enzimas, indicando a existência de efeitos não térmicos das micro-ondas na inativação enzimática.

Tajchakavit & Ramaswamy (1997) estudaram a cinética de inativação térmica e por micro-ondas da pectina metilesterase (PME) em suco de laranja e reportam que a inativação foi significativamente mais rápida no aquecimento por micro-ondas do que no aquecimento térmico convencional, indicando alguns efeitos não térmicos contributivos sob as condições de aquecimento por micro-ondas.

Kermasha et al. (1993) estudaram a inativação da lipoxigenase comercial de soja por aquecimento convencional e por micro-ondas, as altas taxas de inativação por micro-ondas foram atribuídas a possíveis efeitos não térmicos, eles propõem que estes efeitos não térmicos são resultado dos efeitos de campos de micro-ondas nas partes polares da enzima.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Contextualizando, o presente trabalho foi desenvolvido em três diferentes processos de aquecimento, utilizando mesma polpa de tomate como matéria prima e iniciando em condições de temperatura iguais.

No primeiro processo, a polpa a 20 °C foi submetida ao processamento por micro-ondas em variadas condições de potência e tempo, resultando em diferentes cinéticas de aquecimentos, para a avaliação do efeito térmico na inativação enzimática e das possíveis alterações de propriedades físico-químicas no produto.

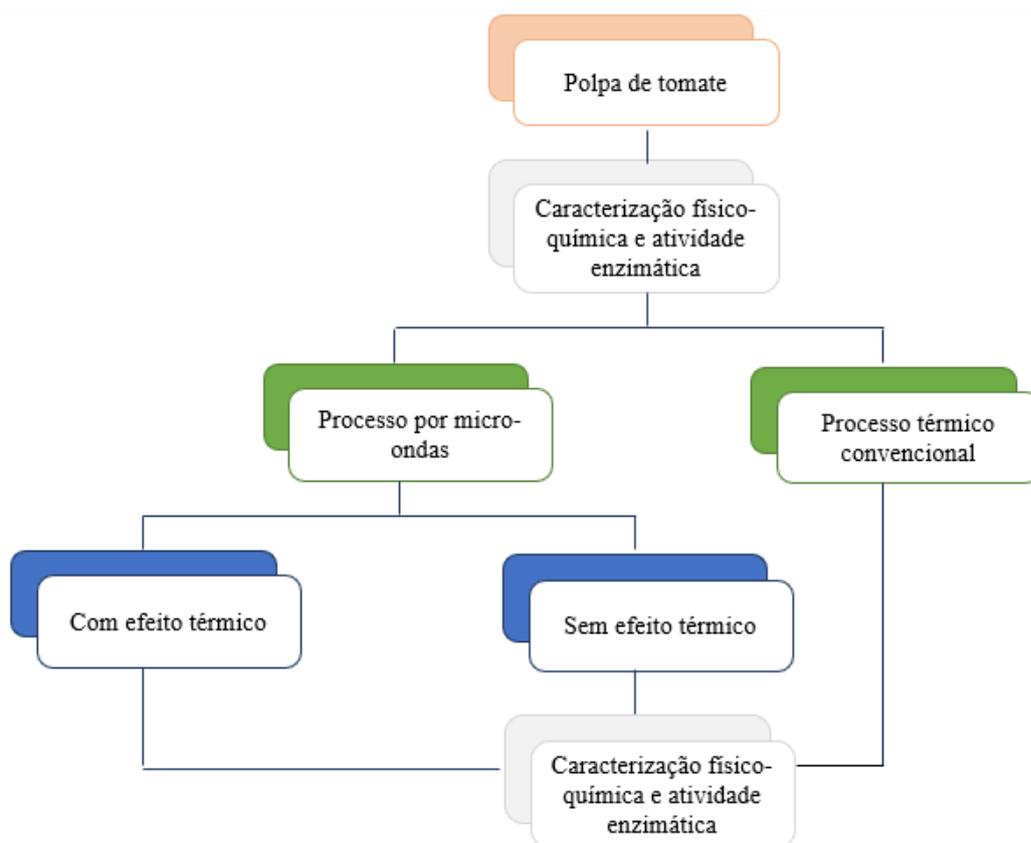
No segundo processo, para avaliação dos efeitos não térmicos, a polpa foi processada num equipamento com micro-ondas, acoplado a um sistema de resfriamento simultâneo, para remover o efeito térmico produzido pelas micro-ondas, nas mesmas condições dos processamentos do primeiro processo, com apenas a ação das micro-ondas, para avaliação dos efeitos nos mesmos parâmetros.

No terceiro processo, a polpa foi processada por tratamento térmico convencional em diferentes condições de tempo e temperatura para a avaliação dos efeitos na inativação enzimática e nas mesmas propriedades físico-químicas.

Com os processos realizados, as condições experimentais dos processamentos por micro-ondas com efeito térmico e sem efeito térmico, juntamente com as variáveis de resposta, foram utilizadas para desenvolver um modelo empírico matemático de correlação. Esquemáticamente, as etapas realizadas são apresentadas na Figura 5.

Os experimentos foram analisados realizados no Laboratório de Micro-ondas, da empresa Innovatus Brasil - Micro-ondas Desenvolvimentos e Tecnologias LTDA. E foram caracterizados em 3 repetições, para obtenção de resultados mais significativos.

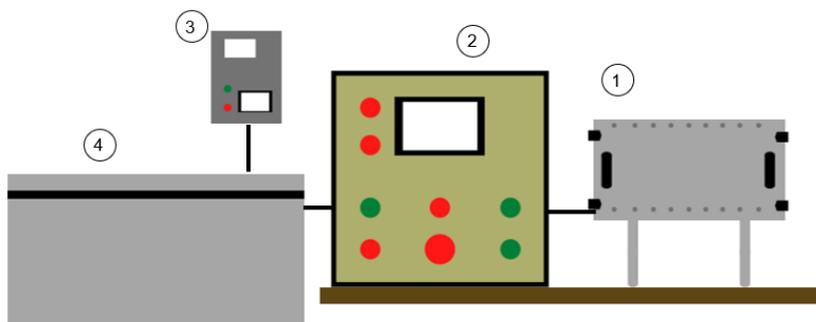
Figura 5. Diagrama global das etapas desenvolvidas.



Fonte: Elaborado pela autora

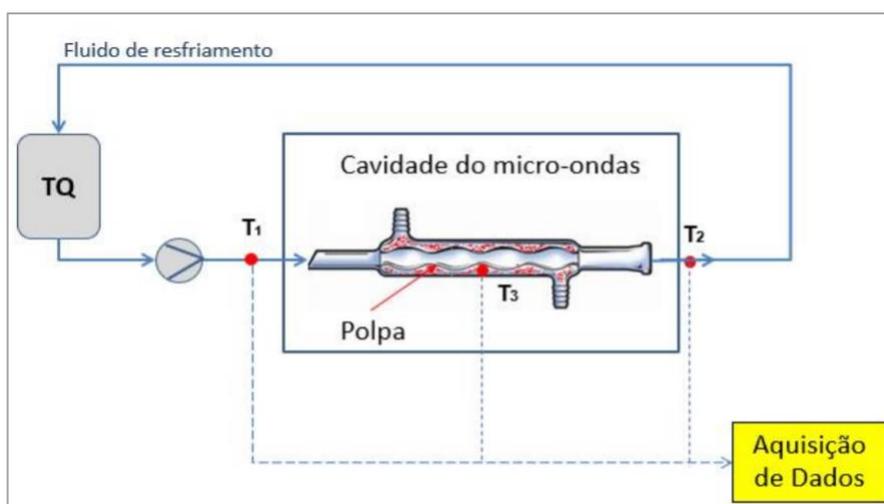
Os equipamentos e a bancada estruturada utilizados no estudo de inativação enzimática da polpa de tomate são apresentados nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

Figura 6. Equipamentos utilizados nos processos: 1) cavidade ressonante, 2) painel de controle, 3) bomba e 4) sistema de resfriamento.



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 7. Representação esquemática da bancada de ensaios dos processos por micro-ondas com e sem efeitos térmicos com o produto estático.



Fonte: Elaborado pela autora

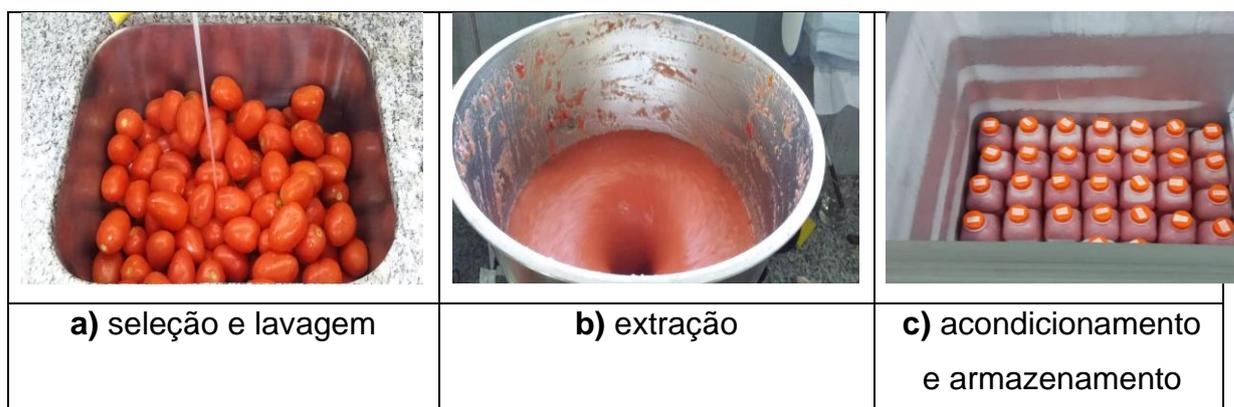
4.1 Matéria prima

Foram adquiridos, no mercado comercial de Campinas/SP, 30 kg de tomate da variedade Debora totalmente maduro, com o objetivo de padronizar a matéria prima em um único lote, extraindo polpa suficiente para todo o estudo, evitando variações de propriedades por safra.

A quantidade total de tomate foi selecionada e lavada para posterior extração da polpa realizada com liquidificador industrial (Skymesen) e peneirada para remover as sementes e pele. A polpa foi acondicionada em garrafas PET de 1 L e armazenadas imediatamente em freezer horizontal a uma temperatura média de -10 °C até a execução dos ensaios, conforme etapas mostradas na Figura 8.

Antes da caracterização e da realização dos processamentos, as amostras de polpa de tomate foram descongeladas em banho de água a temperatura ambiente.

Figura 8. Processo de obtenção da polpa de tomate. a) seleção e lavagem, b) extração e c) acondicionamento e armazenamento no freezer.



Fonte: Elaborado pela autora

Após os processamentos térmicos as amostras foram rapidamente resfriadas e mantidas em banho de gelo até a determinação da atividade enzimática da PME.

4.2 Métodos e equipamentos de tratamentos utilizados

Para a montagem da bancada de testes e caracterização da polpa de tomate foram utilizados os seguintes equipamentos:

4.2.1 Forno de micro-ondas

O forno de micro-ondas foi construído pela empresa Innovatus Brasil em escala laboratorial, contendo uma cavidade ressonante com dimensões de 50 cm de comprimento, 30 cm de altura e 36 cm de largura, para introduzir as amostras contidas em um condensador de vidro com bolhas, um painel para o controle da potência dos magnetrons na cavidade ressonante, e um sensor infravermelho (Omega OSAT Series) para a leitura da temperatura, como se apresenta na Figura 9. O equipamento apresenta um requerimento de energia de 220 VAC a 13,3 A e possui potência nominal de 2500 W.

Figura 9. Forno de micro-ondas com painel de controle montados pela empresa Innovatus Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora

O forno de micro-ondas da empresa Innovatus Brasil caracteriza-se por conter aplicadores multimodos que distribuem as micro-ondas em todas as direções de forma definida, diferente dos fornos de micro-ondas convencionais, onde as emissões de micro-ondas são desordenadas ou direções aleatórias no interior da cavidade.

4.2.2 Condensador Allihn

O condensador Allihn (bolhas) de vidro, apresentado na Figura 10, foi utilizado como recipiente para o acondicionamento da polpa de tomate na região anular, a fim de não interferir nas recepções das micro-ondas, devido a sua transparência à energia das micro-ondas e possibilitar a circulação de fluido de arrefecimento pelo lado interno.

Figura 10. Condensador Allihn de bolhas como recipiente acondicionador da polpa e circulação de fluido de arrefecimento.



Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 11, é apresentada a disposição do condensador, instalado internamente na cavidade do forno de micro-ondas, no qual a polpa foi acondicionada na região anular do condensador para o recebimento direto das emissões das micro-ondas, bem como a circulação de fluidos térmicos (água de resfriamento) na região interna (dentro das bolhas do condensador) para o caso dos experimentos de estudo dos efeitos não térmico, com o objetivo de trocar calor simultaneamente, reduzindo e neutralizando parcialmente o aquecimento da polpa pela aplicação da energia de micro-ondas.

Figura 11. Disposição do condensador de vidro no interior do forno de micro-ondas.



Fonte: Elaborado pela autora

4.2.3 Protótipo de inativação por micro-ondas com efeito térmico

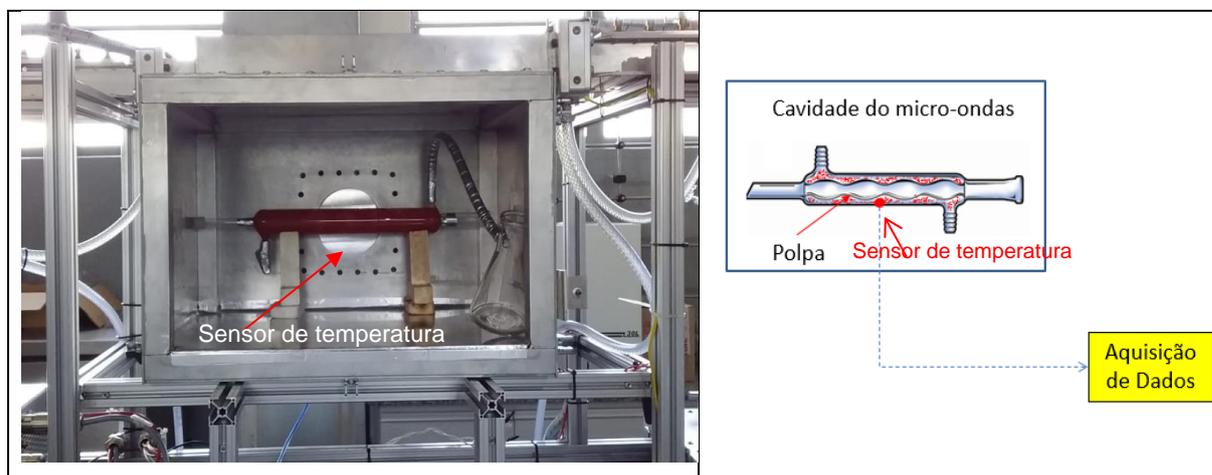
Inicialmente foi montado o protótipo de bancada e realizados testes preliminares para estabelecer as condições iniciais de operação.

O processo em batelada utilizou um trocador de calor (condensador de vidro transparente às micro-ondas) de bolhas dentro de uma cavidade ressonante construída pela empresa Innovatus Brasil. O forno emite energia das micro-ondas na faixa ajustável de 1042 – 2500 W de potência, o que pode ser absorvida pela polpa de tomate no espaço anular como é ilustrado na Figura 12.

O condensador foi preenchido com 200 mL de polpa e submetido a incidência da energia das micro-ondas, de acordo com o planejamento experimental. As temperaturas das amostras foram registradas continuamente, por meio do sensor infravermelho (Omega OSAT Series) acoplado na cavidade do equipamento de micro-ondas.

Após cada tratamento, a amostra foi retirada da cavidade de micro-ondas e imersa imediatamente em água com gelo, a fim de reduzir a temperatura e interromper os tratamentos térmicos e, em seguida, caracterizadas em 3 repetições.

Figura 12. Processo em batelada no forno de micro-ondas com efeito térmico.



Fonte: Elaborado pela autora

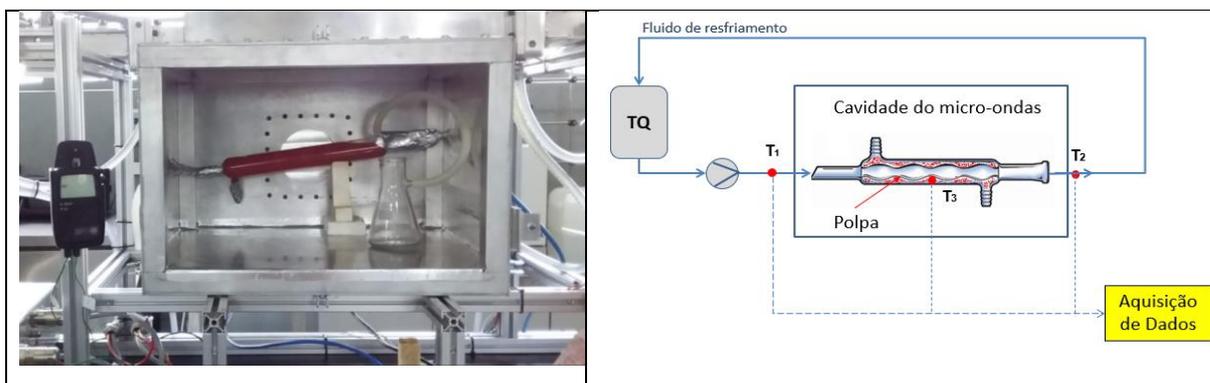
4.2.4 Processo de inativação por micro-ondas sem efeito térmico

Atribuiu-se, nominalmente, o termo de tratamento “*sem*” efeito térmico, para o processo que foi submetido às micro-ondas, porém com a redução parcial do

aquecimento resultante, devido ao resfriamento simultâneo, até a temperatura inferior aos 45 °C.

Para avaliar os efeitos não térmicos no sistema de inativação por micro-ondas, utilizou-se a bancada descrita anteriormente e inclui-se um resfriamento simultâneo (Figura 13). O fluido de resfriamento (água) circulou pelo tubo interno do condensador de vidro numa vazão de 40 mL/s a uma temperatura de 20 °C para remover parcialmente a energia absorvida pelo produto e emitida, inevitavelmente, pelas micro-ondas, a fim manter a temperatura igual ou inferior a 45 °C, considerando que a polpa de tomate ficou estática no espaço anular do condensador para maximizar a absorção da energia de micro-ondas recebida. As temperaturas das amostras foram registradas continuamente, utilizando sensor infravermelho acoplado na cavidade do forno de micro-ondas e dirigida para a superfície do condensador com a polpa acondicionada. O histórico de temperatura do fluido de resfriamento também foi registrado por meio de um termopar colocado na saída da corrente de água e outro no tanque de alimentação para representar a condição de temperatura do fluido de entrada.

Figura 13. Processo de inativação enzimática de polpa de tomate em batelada no forno de micro-ondas sem efeito térmico.



Fonte: Elaborado pela autora

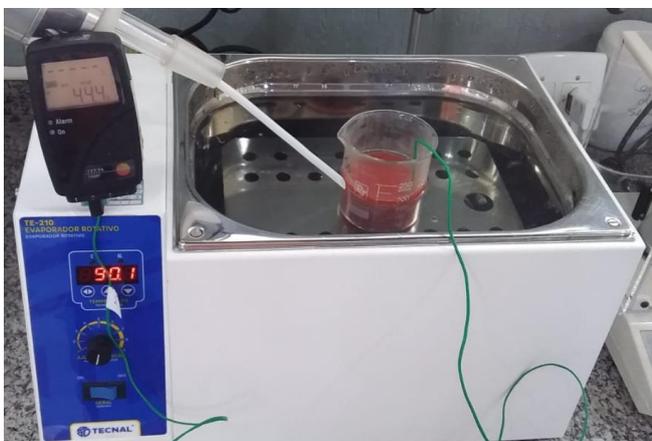
O condensador foi carregado com 200 mL de polpa e submetido a incidência da energia das micro-ondas e circulação de água para resfriamento simultaneamente, nos mesmos tempos e potências empregados nos ensaios com efeito térmico.

Assim como no processo anterior, após o tratamento a amostra foi imersa em água com gelo para reduzir e interromper a exposição a temperatura final do tratamento térmico e, posteriormente, ser caracterizada em 3 repetições.

4.2.5 Tratamento térmico convencional

Para a inativação térmica convencional, as amostras foram colocadas em beckers em volume aproximado de 200 mL. Os beckers foram submetidos a tratamento térmico imersos em banho-maria da marca Tecnal para aquecer as amostras num aquecimento em rampa até as temperaturas finais de estudo de 40, 50, 60, 70 e 80 °C. A temperatura foi medida com auxílio de termopar tipo T, diretamente imerso na polpa, como se apresenta na Figura 14. Depois de cada tratamento as amostras foram transferidas para um recipiente com água e gelo, a fim de reduzir e interromper a exposição a temperatura final do tratamento térmico, e em seguida caracterizadas em 3 repetições.

Figura 14. Processo térmico convencional em batelada com aquecimento em rampa.



Fonte: Elaborado pela autora

4.3 Análises físico-químicas

Foram analisadas as características físico-químicas como pH, acidez titulável, teor de sólidos solúveis e parâmetros de cor da polpa de tomate antes e depois dos processos de inativação enzimática (térmico e por micro-ondas), de acordo

com as metodologias de determinações de cada propriedade físico-química, descritas a seguir:

4.3.1 Determinação do valor de pH

O pH foi determinado diretamente por um medidor de pH (Starter) a temperatura ambiente, segundo a AOAC, 2000, calibrado com soluções tampão de pH 4, 7 e 10, conforme manual do equipamento.

4.3.2 Acidez titulável

Realizada por titulação, diluindo a amostra de peso conhecido com água neutralizada e titulando até o ponto final pH 8,2 (pH de mudança de cor do indicador fenolftaleína) com 0,1 M de solução alcalina, e 0,3 mL de fenolftaleína para cada 100 mL de solução sendo titulada conforme AOAC 945.15, o resultado foi expresso em percentagem de ácido cítrico, assumindo ser o ácido orgânico presente em maior quantidade nos frutos de tomate.

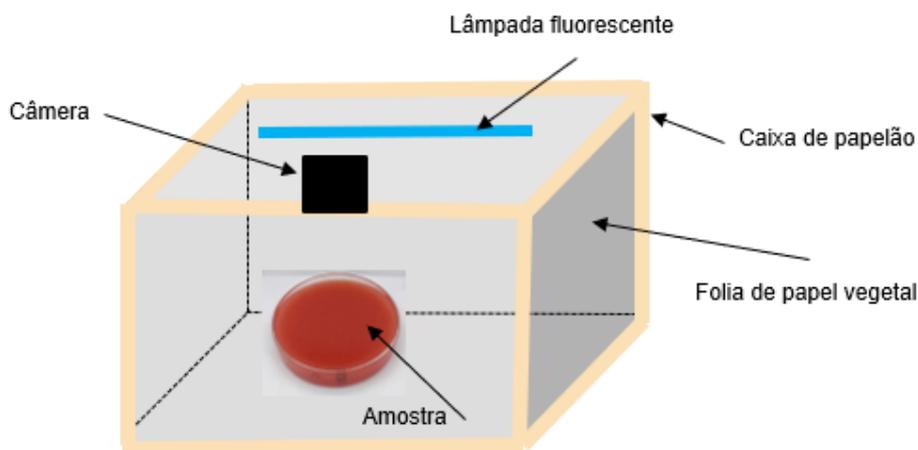
4.3.3 Teor de sólidos solúveis

O teor de sólidos solúveis foi medido em °Brix diretamente por um refratômetro à temperatura ambiente, segundo a metodologia do manual *Fruit and Vegetable Products Determination of Soluble Solid Sontente – Refractometer method*.

4.3.4 Parâmetros de Cor

Para medição da cor da polpa de tomate, as imagens foram obtidas com um sistema de aquisição de imagens (Vásquez, 2015), construído no laboratório da empresa Innovatus Brasil (Figura 15). As amostras foram situadas em uma placa de Petri, sobre a superfície branca no centro dentro de um estúdio de iluminação, e se adquiriram imagens empregando a câmera (termovisor profissional - FLIR série T450sc). Estes parâmetros foram medidos em 3 repetições de cada ensaio. Embora o ambiente de captura de imagem não tenha sido padronizado, as análises foram comparativas e referenciadas ao produto inicial.

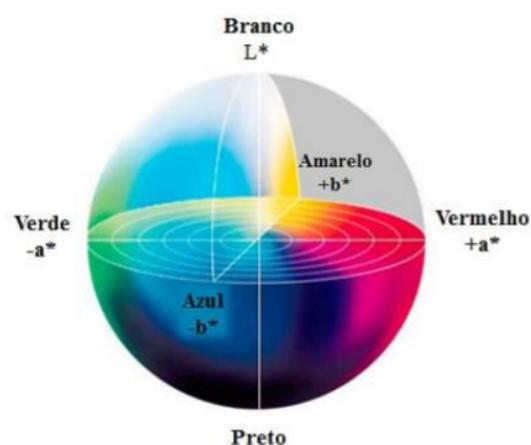
Figura 15. Ambiente de medição dos parâmetros de cor na polpa de tomate.



Fonte: Elaborado pela autora

Posteriormente, as fotografias foram processadas por meio do software MATLAB para transformar a cor do espaço RGB em coordenadas na escala CIEL*a*b*, sendo que o parâmetro L^* representa o índice de luminosidade, os parâmetros a^* o teor de vermelho e b^* o teor de amarelo (Figura 16).

Figura 16. Diagrama CIELab com os parâmetros de cor L^* , a^* e b^* .



Fonte: Silva et al., 2007

Estes parâmetros foram calculados pelo ângulo de hue ($^{\circ}h$), diferença total de cor (ΔE) e cromaticidade (c^*) que indica a intensidade de cor, mediante as seguintes equações:

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_1^*)^2 + (a_0^* - a_1^*)^2 + (b_0^* - b_1^*)^2} \quad (7)$$

$$c^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (8)$$

$$h = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (9)$$

sendo o subscrito “1” a polpa processada e o subscrito “0” a polpa não processada ou de referência.

4.3.5 Determinação da atividade da enzima PME

A atividade da PME foi determinada por titulação. Titulou-se os grupos carbóxis liberados a pH 7,0, e a uma temperatura de 30 °C, de acordo com a metodologia descrita por Anthon et al., (2002). Adicionou-se 25 mL de solução de pectina cítrica (Dinâmica, química contemporânea Ltda.) na concentração de 1 % em solução de NaCl 0,2 M, e foi equilibrada a 30 °C e ajustado para um pH 7,0. Após a adição de 1 mL da amostra de polpa, o pH da solução foi ajustado para 7,0 pela adição de NaOH 0,1 N, e mantido neste pH por 10 min por adição de NaOH 0,02 N.

Figura 17. Montagem experimental de titulação para determinar a atividade enzimática da PME em polpa.



Fonte: Elaborado pela autora

A taxa foi calculada como μmol de NaOH consumidos durante o período de 10 min. A atividade foi expressa em unidades de PEU/ mL, de acordo com a equação 10, onde PEU representa os $\mu\text{equivalentes}$ de ácido liberado por minuto por mL de amostra. A leitura para cada amostra foi feita em 3 repetições.

$$PEU = \frac{V_{NaOH} \cdot C_{NaOH}}{V_{amostra} \cdot t} \cdot 1000 \quad (10)$$

onde:

V_{NaOH} = Volume de NaOH (mL);

C_{NaOH} = Concentração da solução de NaOH;

$V_{amostra}$ = Volume de polpa utilizado na análise (mL);

t = Tempo (min).

A inativação é dada em porcentual, sendo PEU a atividade enzimática após os processos convencional e por micro-ondas e PEU_0 a atividade enzimática inicial da matéria prima.

$$\% \text{ Inativação} = \left[1 - \frac{PEU}{PEU_0} \right] \cdot 100 \quad (11)$$

4.4 Avaliação energética

A média da absorção de energia de micro-ondas pela amostra durante a rampa de aquecimento, foi calculada por meio da equação (12), utilizando medições das temperaturas inicial (T_1) e final (T_2) do conjunto da amostra e condensador de vidro. Embora o vidro não tenha aquecimento direto das micro-ondas, considerou-se o aquecimento indireto pelo contato com a polpa.

Assim o processo ocorreu com 200 mL de polpa de tomate introduzido no condensador de bolas e posicionados no interior do micro-ondas por um período e potência definidos, de acordo com o planejamento experimental. Com o auxílio dos sensores de temperatura aferiu-se a temperatura inicial da polpa (T_1) com um termopar e, durante o processo, com um sensor de infravermelho.

Assim, conforme o planejamento dos ensaios, programou-se o equipamento de micro-ondas para iniciar o aquecimento a uma potência fixa e definida por um determinado tempo. Após o aquecimento, mediu-se a temperatura final da amostra (T_2).

$$P = \frac{(m_p \cdot cp_p + m_c \cdot cp_c) \cdot (T_2 - T_1)}{t} \quad (12)$$

onde:

m_p = Massa de polpa (kg);

m_c = Massa do condensador (kg);

C_{pp} = calor específico da polpa (J/kg °C);

C_{pc} = calor específico do vidro do condensador (J/kg °C);

T_2, T_1 = temperaturas final e inicial, respectivamente (°C);

P = Potência (W);

t = Tempo de processamento (s).

A variação de energia calculada dividida pelo tempo de aquecimento foi considerada a potência de micro-ondas efetivamente absorvida (P) para poder ser comparada com a potência nominal emitida pelo forno de micro-ondas.

4.5 Planejamento experimental de ensaios

Após a análise das condições experimentais do processo de inativação enzimática, utilizou-se uma metodologia experimental DCCR (Delineamento Composto Central Rotacional), com a finalidade de estudar o efeito das interações das variáveis envolvidas no processo.

O DCCR inclui 4 pontos axiais e 4 repetições no ponto central, totalizando 12 ensaios. Os parâmetros utilizados para este estudo foram escolhidos para avaliar a interação nas variáveis dependentes, por exemplo o grau de inativação enzimática, com a potência de emissão e o tempo de aplicação da energia das micro-ondas (variáveis independentes).

Os valores das faixas dos níveis foram determinados tendo como referência ensaios preliminares e foram definidos com a finalidade de quantificar e analisar as tendências das variáveis dependentes após os processos realizados, assim como avaliar as interações entre as variáveis independentes.

Na Tabela 5, são apresentados os níveis reais dos fatores utilizados no planejamento experimental, sendo o parâmetro X_1 , a potência do forno de micro-ondas em Watt, e o parâmetro X_2 , o tempo de processamento previsto em segundos.

Tabela 5. Níveis reais e codificados dos fatores utilizados no planejamento experimental – DCCR.

Ensaio	X ₁	X ₂	Tempo (s)	Potência (w)
1	-1	-1	120,0	1250,0
2	1	-1	120,0	2250,0
3	-1	1	420,0	1250,0
4	1	1	420,0	2250,0
5	-1.41	0	57,9	1750,0
6	+1.41	0	482,0	1750,0
7	0	-1.41	270,0	1042,9
8	0	+1.41	270,0	2457,0
9	0	0	270,0	1750,0
10	0	0	270,00	1750,0
11	0	0	270,00	1750,0
12	0	0	270,0	1750,0

A execução do planejamento consistiu em realizar os ensaios e registrar as repostas, para depois, mediante o programa Protimiza Experimental Design, obter as correlações com os parâmetros estatístico e a elaboração das superfícies de resposta a partir dos resultados obtidos, a fim de avaliar os efeitos na inativação enzimática quantificada nas amostras processadas.

4.6 Análise estatística

Os resultados obtidos na análise físico-química foram expressos como média dos resultados \pm desvio padrão. Todas as análises estatísticas para a inativação enzimática da PME na polpa de tomate pelos processos por micro-ondas com e sem efeito térmico, foram realizadas utilizando-se o programa Protimiza Experimental Design, e adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0.05$).

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Propriedades físico-químicas da polpa de tomate não processada

Foram adquiridos no mercado 30 kg de tomate da variedade Débora e após a seleção e lavagem foram submetidos à extração, obtendo um rendimento de 0,918 kg de polpa/kg de tomate.

Analisou-se algumas propriedades físico-químicas como, o teor de sólidos solúveis, em °Brix, pH, acidez titulável e cor na polpa de tomate, a fim de ter uma caracterização da amostra utilizada como matéria prima para os diferentes processos por micro-ondas e convencional.

Os valores obtidos das propriedades físico-químicas são reportados na Tabela 6. Estes resultados foram próximos aos relatados por outros autores (NASCIMENTO et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2015; BORGUINI et al., 2005).

Tabela 6. Características físico-químicas da polpa de tomate sem processar.

Propriedades	Autor	Nascimento et al. (2013)	Borguini e Silva (2005)	Oliveira et al. (2015)
pH	4,79 ± 0,01	4,28	4,30±0,00	4,42
Sólidos solúveis ¹	4,50 ± 0,04	5,00	4,90±0,10	3,68
Acidez ²	0,37 ± 0,04	0,59	0,33±0,03	0,22

¹ expresso em °Brix.

² expresso em (g ac. cítrico/100 g de tomate).

As características físico-químicas dos frutos são importantes, pois elas definem sua qualidade, como por exemplo, os sólidos solúveis, que influenciam no rendimento industrial, e a acidez total titulável, que influencia no sabor dos frutos.

O valor de pH reportado no presente estudo para a cultivar Débora, foi maior que os valores reportados por Borguini e Silva (2005), Nascimento et al. (2013) e Oliveira et al. (2015), cultivados em sistemas convencionais. Uma faixa normal de pH no tomate é de 4,0 a 4,5. Produtos com valores superiores ao pH 4,5, requerem

tempos mais longos de processamento térmico, resultando em maior consumo de energia e, portanto, maior custo de processamento.

Acidez no tomate indica a qualidade de ácidos orgânicos presentes, e junto com o pH são os principais fatores que influenciam no sabor dos frutos. A acidez obtida foi de 0,37 g ácido cítrico / 100 g de tomate, valor intermediário aos valores reportados por outros autores, mostrados na Tabela 8.

O valor de sólidos solúveis foi de 4,5 °Brix, similar ao reportado na literatura, cuja faixa variou entre 4,5 e 6,0. O valor médio de SST para frutos de tomate destinado para o processamento industrial deve ser 4,50 °Brix (HAUTH et al., 2017). Este parâmetro é importante, pois representa o rendimento na indústria, uma vez que quanto maior a concentração, maior é o rendimento.

Os resultados obtidos para os parâmetros de cor L^* , a^* , b^* na polpa de tomate foi de 39,83, 46,83 e 33,02, respectivamente, indicando que a polpa tem uma cromaticidade, C^* , de 57,3 e tonalidade, $^{\circ}h$, de 35,18, o que significa que esta amostra possui uma maior tonalidade de vermelho, uma vez que um ângulo de 180° representa o verde puro e um ângulo 0° o vermelho puro.

5.2 Perfil da temperatura nos tratamentos por micro-ondas (com / sem efeitos térmicos) e tratamento térmico convencional

Nas Figuras 18 e 19, os históricos de temperatura estão apresentados, durante os tratamentos com incidência das micro-ondas (com / sem efeitos térmicos) e aquecimento convencional da polpa de tomate em sistema por batelada, ambos em condições não isotérmicas.

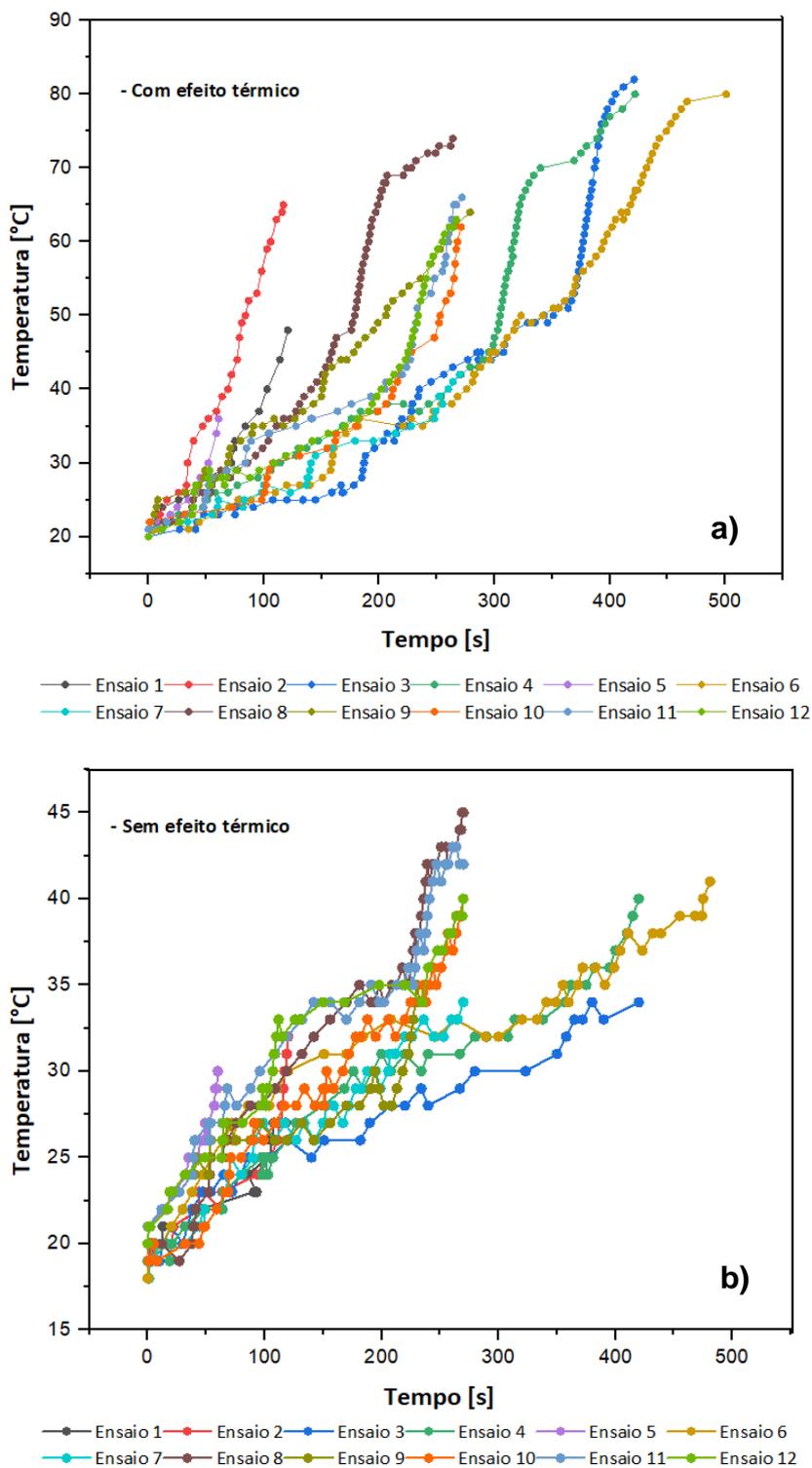
Os experimentos de processamento por micro-ondas (com e sem efeitos térmicos) foram realizados com potência e tempo de processamento pré-definidos, totalizando 24 tratamentos, conforme a Tabela 6.

Para o processo térmico convencional, as amostras foram submetidas a diferentes tempos de processamento, num banho-maria com fluido de aquecimento a uma temperatura de 98°C , aproximadamente.

Os perfis de temperatura entre os dois tratamentos testados por micro-ondas (com e sem efeitos térmicos), diferem devido às variações nas configurações do processo. No tratamento por micro-ondas com efeito térmico, a temperatura

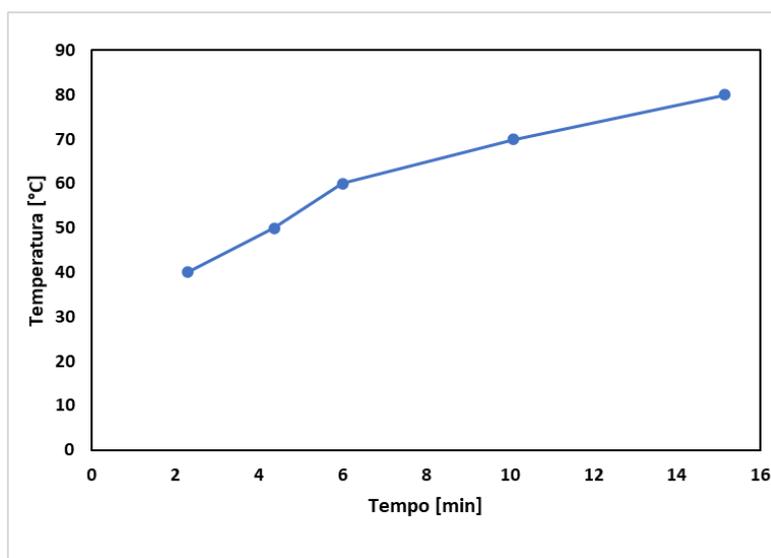
máxima atingida pela polpa de tomate foi de 82 °C durante 15 min de tratamento, no entanto no processo sem efeito térmico a temperatura máxima atingida pela amostra foi de 45 °C nas mesmas condições de tempo e potência. Sendo assim, os perfis, apresentados na Figura 18, descrevem as cinéticas de aquecimento, podendo-se observar que são quase lineares e com inclinações diferentes, que dependem da potência aplicada em ambos os processos. Observa-se que a vazão do fluido de arrefecimento utilizado em todos os ensaios com resfriamento simultâneo foi mantida constante a 40 mL/s.

Figura 18. Perfis da temperatura no tempo de processamento para as duas condições de tratamento por micro-ondas de polpa de tomate: A) perfil de temperatura com efeito térmico, b) perfil de temperatura sem efeito térmico.



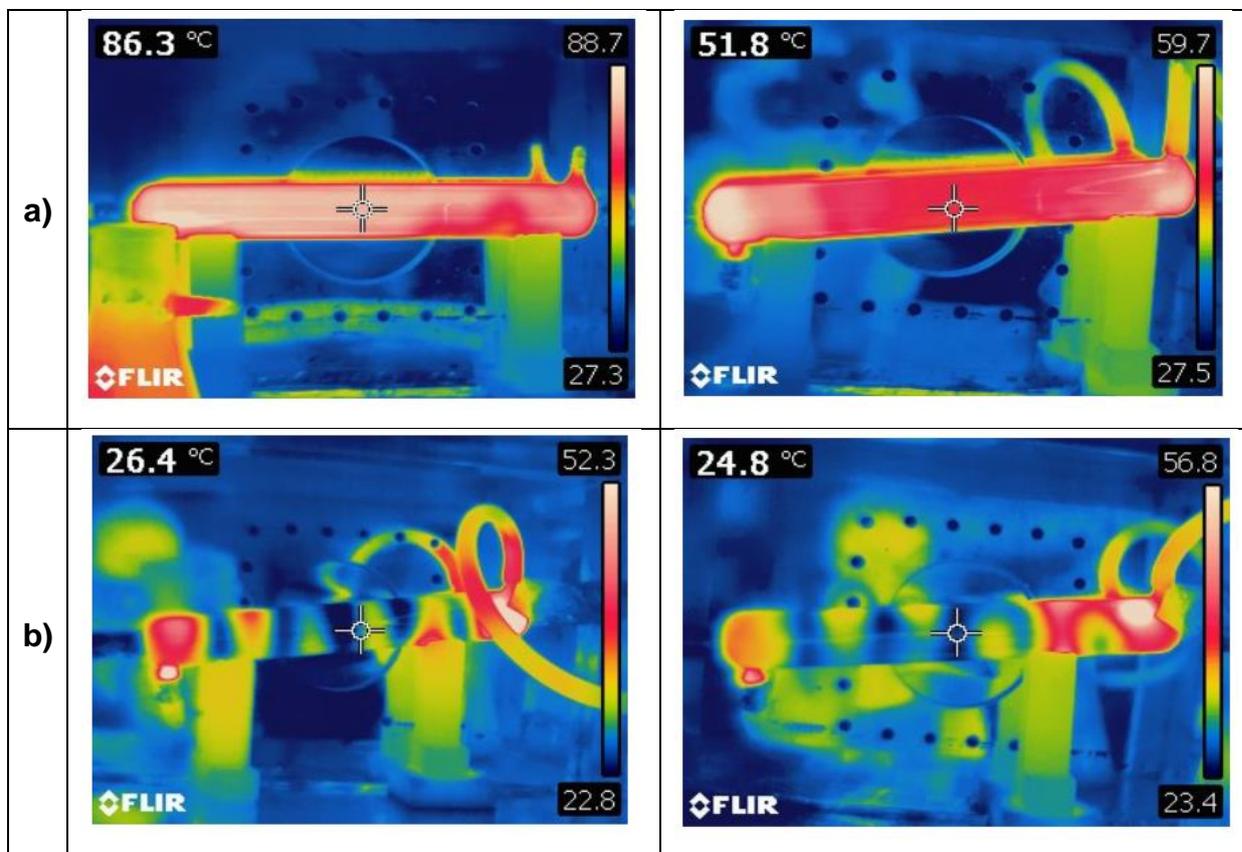
Na Figura 19, os perfis de tempo-temperatura são apresentados durante os tratamentos térmicos convencionais da polpa de tomate. Verifica-se que estas taxas de aquecimento não foram semelhantes com as obtidas por tratamento com micro-ondas, pois as curvas de temperatura de micro-ondas de potência constante apresentam um aumento linear, enquanto no convencional o perfil de temperatura das amostras aumenta rapidamente no início do processo de aquecimento e diminui quando se aproxima do limite predefinido, como foi descrito por Xu et al. (2016). Estes autores analisaram a cinética de inativação térmica versus micro-ondas das enzimas lipase e lipoxigenase de germe de trigo, e evidenciaram que as curvas de temperatura das amostras tratadas por micro-ondas e tratamento térmico convencional não correspondem perfeitamente quando foram usadas potências constante.

Figura 19. Perfil da temperatura no tempo para o processo térmico convencional de polpa de tomate.



Na Figura 20, são apresentadas as imagens térmicas para os dois processos por emissão de micro-ondas, estas foram obtidas após finalizado o processamento no micro-ondas, podendo-se evidenciar que, para o tratamento com efeito térmico foi alcançada uma homogeneidade de temperatura na polpa dentro do condensador, enquanto no tratamento sem efeito térmico obteve-se pontos quentes, devido a desuniformidade do condensador de bolhas.

Figura 20. Imagens térmicas do processo para polpa de tomate depois do processamento por micro-ondas a diferentes condições: a) com efeito térmico e b) sem efeito térmico para os ensaios 3 (t: 420 s, P: 1250 W) e 10 (t: 270 s, P: 1750 W).



5.3 Análise energética dos processos

Foi calculada a quantidade média de energia absorvida por tempo, nos processos por micro-ondas, contabilizando a potência útil de aquecimento da polpa de tomate nas diferentes configurações de ensaios, e as condições finais de operação dos sistemas. Na Tabela 7, estão representados os resultados de cada ensaio proposto no DCCR da Tabela 5.

Tabela 7. Potência útil média de aquecimento da polpa de tomate na cavidade do equipamento de micro-ondas com e sem efeitos térmicos.

Ensaio	Com efeito térmico			Sem efeito térmico	
	Tempo [s] / Potência [W]	Temperatura final da amostra [°C]	Potência útil média [W]	Temperatura final da amostra [°C]	Potência útil média [W]
1	120 / 1250	48	223,70	27	55,89
2	120 / 2250	65	359,31	32	95,81
3	420 / 1250	82	141,60	34	31,93
4	420 / 2250	80	136,88	40	45,62
5	60 / 1750	36	255,50	30	159,69
6	482 / 1750	80	119,27	41	41,74
7	270 / 1043	42	78,07	34	49,68
8	270 / 2500	74	191,63	45	88,72
9	270 / 1750	64	156,14	40	70,97
10	270 / 1750	62	149,05	42	78,07
11	270 / 1750	66	163,24	42	78,07
12	270 / 1750	63	160,10	40	78,00

Observação: Temperatura inicial da amostra foi de 20 °C.

A potência útil média de aquecimento ou absorção de energia das micro-ondas pela polpa de tomate no tempo, foi calculada a partir da Equação 12, considerando o equilíbrio térmico do condensador de vidro com a amostra, ambos à mesma temperatura final.

Baseado nos dados apresentados, na Tabela 9, obtém-se que as quantidades de energia absorvida pela polpa de tomate foram baixas, podendo-se dizer que parte da energia foi perdida ou refletida dentro da cavidade, devido a configuração multimodo da cavidade.

Na configuração com resfriamento simultâneo ou processo sem efeito térmico, ainda se tem outro destino de energia, dada pela transferência de energia da polpa de tomate para a água de resfriamento simultâneo.

Ao comparar os dois processos por micro-ondas, pode-se observar que o ensaio 7 do processo com efeito térmico e o ensaio 10 sem efeito térmico, nas mesmas condições de tempo de exposição, a temperatura final (42 °C) e potência absorvida (78,07 W), alcançaram uma inativação de 32,9% e 36,9%, respectivamente,

o que pode ser atribuído aos efeitos não térmicos, uma vez que a potência absorvida foi baixa respeito à potência incidida, e ao se comparar com o aquecimento térmico convencional a temperaturas próxima aos 40 °C, a inativação enzimática não superou os 20%, permitindo ratificar também a eficiência do sistema por micro-ondas.

Considerando a vazão da água e o diferencial de temperatura de entrada e saída do condensador, pode-se obter a quantidade de energia transferida para a água de resfriamento como se apresenta na Tabela 8.

Tabela 8. Energia transferida para água de resfriamento

Ensaio	Tempo [s]	Potência [W]	Temperatura inicial [°C]	Temperatura final [°C]	Energia transferida [kJ]
1	120	1250	18	20,1	42,13
2	120	2250	16	18,6	52,16
3	420	1250	17	19,8	196,61
4	420	2250	17	20,5	245,76
5	60	1750	18	19,0	10,03
6	482	1750	17	20,8	306,22
7	270	1043	17	19,0	90,28
8	270	2500	18	21,7	167,02
9	270	1750	17	19,6	117,36
10	270	1750	18	20,9	130,91
11	270	1750	18	20,7	121,88
12	270	1750	18	20,5	112,85

5.4 Impacto das micro-ondas nas propriedades físico-químicas da polpa de tomate

Os resultados das propriedades físico-químicas avaliadas após os processamentos por micro-ondas (com e sem efeitos térmicos) são apresentados nas Tabela 9, 10, 11 e 12 (valores médios de 3 repetições).

Estes resultados não tiveram diferenças significativas no pH, °Brix e na acidez titulável após o tratamento por micro-ondas na polpa de tomate para os dois sistemas, com e sem efeitos térmicos, em relação a referência (polpa sem tratamento, Tabela 9). No entanto, o processo térmico convencional apresentou uma variação em todos os parâmetros ao se comparar com os dados de referência.

A estabilidade que apresentam os três parâmetros físico-químicos obtidos após o processamento na polpa de tomate foi semelhante à reportada por Pérez-Tejeda et al. (2016) e Arjmandi et al. (2017), assim como em diferentes fluidos alimentícios tratados com micro-ondas, tais como purê de manga (RODRÍGUEZ SALINAS et al., 2011), néctar de goiaba (SALAZAR-GONZÁLEZ et al., 2012) e suco de maçã (CAÑUMIR et al., 2002).

Tabela 9. Propriedades físico-químicas (média de 3 repetições \pm desvio padrão) da polpa de tomate sem os processamentos.

Amostra sem processar		
pH	°Brix	Acidez
4,79 \pm 0,01	4,50 \pm 0,04	0,37 \pm 0,04

Tabela 10. Propriedades físico-químicas (média de 3 repetições \pm desvio padrão) da polpa de tomate para o tratamento térmico convencional.

	Tratamento térmico convencional		
	pH	°Brix	Acidez
1	4,74 \pm 0,004	4,53 \pm 0,02	0,41 \pm 0,003
2	4,75 \pm 0,003	4,53 \pm 0,04	0,41 \pm 0,01
3	4,75 \pm 0,001	4,62 \pm 0,03	0,41 \pm 0,002
4	4,74 \pm 0,003	4,66 \pm 0,04	0,41 \pm 0,03
5	4,75 \pm 0,003	4,63 \pm 0,01	0,41 \pm 0,04

Tabela 11. Propriedades físico-químicas (média de 3 repetições \pm desvio padrão) da polpa de tomate após ambos os processamentos de micro-ondas.

Ensaio	Por micro-ondas com efeito térmico		
	pH	°Brix	Acidez
1	4,76 \pm 0,02	4,53 \pm 0,04	0,38 \pm 0,04
2	4,74 \pm 0,01	4,53 \pm 0,01	0,39 \pm 0,04
3	4,80 \pm 0,01	4,71 \pm 0,05	0,39 \pm 0,01
4	4,80 \pm 0,00	4,50 \pm 0,08	0,38 \pm 0,03
5	4,80 \pm 0,02	4,50 \pm 0,01	0,39 \pm 0,01
6	4,80 \pm 0,01	4,60 \pm 0,03	0,38 \pm 0,02
7	4,79 \pm 0,01	4,50 \pm 0,01	0,39 \pm 0,03
8	4,80 \pm 0,01	4,60 \pm 0,03	0,37 \pm 0,01
9	4,77 \pm 0,01	4,60 \pm 0,01	0,39 \pm 0,04
10	4,77 \pm 0,01	4,50 \pm 0,04	0,39 \pm 0,02
11	4,77 \pm 0,01	4,60 \pm 0,02	0,40 \pm 0,04
12	4,77 \pm 0,01	4,60 \pm 0,04	0,39 \pm 0,02

Tabela 12. Propriedades físico-químicas (média de 3 repetições \pm desvio padrão) da polpa de tomate após ambos os processamentos de micro-ondas.

	Por micro-ondas sem efeito térmico		
	pH	°Brix	Acidez
1	4,75 \pm 0,01	4,60 \pm 0,01	0,38 \pm 0,01
2	4,71 \pm 0,02	4,60 \pm 0,01	0,38 \pm 0,01
3	4,76 \pm 0,01	4,60 \pm 0,01	0,39 \pm 0,02
4	4,79 \pm 0,01	4,50 \pm 0,04	0,39 \pm 0,03
5	4,79 \pm 0,01	4,50 \pm 0,01	0,38 \pm 0,04
6	4,77 \pm 0,01	4,50 \pm 0,01	0,38 \pm 0,04
7	4,75 \pm 0,01	4,60 \pm 0,01	0,36 \pm 0,03
8	4,74 \pm 0,01	4,60 \pm 0,01	0,37 \pm 0,02
9	4,75 \pm 0,01	4,50 \pm 0,01	0,38 \pm 0,01
10	4,73 \pm 0,01	4,60 \pm 0,04	0,39 \pm 0,02
11	4,73 \pm 0,01	4,60 \pm 0,01	0,39 \pm 0,03
12	4,75 \pm 0,01	4,60 \pm 0,04	0,38 \pm 0,04

5.5 Efeitos dos tratamentos sobre a cor

A influência dos tratamentos aplicados na polpa de tomate sobre a cor foi verificada. Para isto, foram registrados os valores L^* , a^* e b^* , e determinados os valores de cromaticidade (c) e a diferença total de cor (ΔE), conforme apresentados nas Tabelas 13, 14 e 15. Estes dados foram usados para descrever a mudança de cor durante cada processo aplicado.

Tabela 13. Parâmetros de cor para polpa de tomate tratada por micro-ondas com efeito térmico.

Ensaio	Temperatura Final (°C)	Tratamento com efeito térmico				
		L^*	a^*	b^*	C^*	ΔE
Referência	20	39,83 ± 0,17	46,83 ± 0,17	33,02 ± 0,05	57,30±0,06	0,00±0,00
1	48	40,08 ± 0,13	46,51 ± 0,04	34,35 ± 0,09	57,81±0,04	1,31±0,08
2	65	41,66 ± 0,41	46,20 ± 0,16	34,97 ± 0,21	57,94±0,22	2,59±0,15
3	82	41,34 ± 0,40	45,26 ± 0,21	34,96 ± 0,16	57,18±0,14	1,89±0,25
4	80	41,94 ± 0,32	45,85 ± 0,12	34,34 ± 0,44	57,28±0,23	2,28±0,29
5	36	40,23 ± 0,14	46,87 ± 0,16	33,57 ± 0,15	57,65±0,15	0,67±0,15
6	80	42,84 ± 0,82	44,48 ± 0,52	34,96 ± 0,83	56,57±0,22	2,70±0,71
7	42	40,72 ± 0,45	46,4 ± 0,28	33,36 ± 0,62	57,14±0,45	0,85±0,54
8	74	41,15 ± 0,03	46,32 ± 0,69	34,25 ± 0,40	57,60±0,36	1,73±0,38
9	64	39,83 ± 0,22	46,86 ± 0,17	34,32 ± 0,13	58,08±0,19	1,18±0,19
10	62	39,92 ± 0,36	46,52 ± 0,15	33,98 ± 0,11	57,60±0,25	1,01±0,27
11	66	40,22 ± 0,22	46,64 ± 0,19	33,81 ± 0,013	57,15±0,20	0,90±0,13
12	63	40,03 ± 0,60	46,51 ± 0,16	33,87 ± 0,54	57,53±0,38	0,93±0,43

Tabela 14. Parâmetros de cor para polpa de tomate tratada por micro-ondas sem efeito térmico.

Ensaio	Temperatura Final (°C)	Tratamento sem efeito térmico				
		L*	a*	b*	C*	ΔE
Referência	20	39,83 ± 0,17	46,83 ± 0,17	33,02 ± 0,05	57,30±0,09	0,00±0,00
1	27	40,04 ± 0,24	46,63 ± 0,13	33,31 ± 0,34	57,30±0,05	0,94±0,15
2	32	40,57 ± 0,09	46,57 ± 0,05	33,81 ± 0,27	57,54±0,07	0,88±0,03
3	34	41,84 ± 0,79	45,31 ± 0,21	34,03 ± 0,09	56,66±0,34	2,52±0,25
4	40	41,51 ± 0,66	45,0 ± 0,39	34,07 ± 0,13	56,44±0,18	2,48±0,19
5	30	39,82 ± 0,80	46,37 ± 0,51	33,02 ± 0,06	56,92±0,28	1,29±0,23
6	41	41,33 ± 0,29	46,58 ± 0,02	34,94 ± 0,16	58,22±0,15	1,67±0,09
7	34	40,37 ± 0,20	45,91 ± 0,35	33,77 ± 0,03	56,99±0,21	1,16±0,11
8	45	40,09 ± 0,74	46,27 ± 0,69	34,42 ± 0,44	57,66±0,14	0,65±0,18
9	40	40,73 ± 0,29	46,25 ± 0,18	33,51 ± 0,10	57,11±0,10	1,29±0,21
10	42	39,82 ± 0,07	46,46 ± 0,4	33,43 ± 0,04	57,23±0,09	0,88±0,35
11	42	39,71 ± 0,33	46,58 ± 0,46	33,03 ± 0,49	57,10±0,28	1,23±0,29
12	40	39,11 ± 0,20	46,46 ± 0,43	33,89 ± 0,49	57,50±0,33	0,87±0,32

Tabela 15. Parâmetros de cor para polpa de tomate tratada de forma convencional.

Ensaio	Temperatura °C	Tratamento convencional				
		L*	a*	b*	C*	ΔE
Referência	20	39,83 ± 0,17	46,83 ± 0,17	33,02 ± 0,05	57,3±0,11	0,00±0,0
1	40	39,65 ± 0,15	46,95 ± 0,07	36,84 ± 0,07	59,67±0,07	3,82±0,19
2	50	39,83 ± 0,17	45,67 ± 0,23	36,38 ± 0,07	59,96±0,18	3,55±0,16
3	60	40,43 ± 0,46	45,45 ± 0,16	37,64 ± 0,06	60,56±0,23	4,85±0,29
4	70	40,65 ± 0,34	45,61 ± 0,56	37,20 ± 0,43	60,42±0,28	4,43±0,32
5	80	41,00 ± 0,03	45,95 ± 0,12	38,16 ± 0,43	61,28±0,12	5,34±0,11

A polpa não processada apresentou o parâmetro a^* positivo, mostrando claramente uma tendência ao vermelho ($46,83 \pm 0,17$); o parâmetro b^* também foi positivo, expressando uma tendência ao amarelo ($33,02 \pm 0,05$); e o parâmetro L^* , que representa a luminosidade, teve um valor de ($39,83 \pm 0,17$). Estes resultados foram similares aos relatados na literatura para tomate sem processamento térmico, cujos valores variam: de 29,68 a 38,49 para o parâmetro a^* ; de 26,61 a 54,85 para o parâmetro b^* e de 32,54 a 48,35 para o parâmetro L^* , (BORGUINI & SILVIA, 2005; LUIZ, 2005; FABBRI, 2009; ROSA, 2011), as alterações nos parâmetros podem estar relacionadas à porção de carotenoides presentes na polpa de tomate.

Para os produtos à base de tomate, os parâmetros mais importantes na análise de cor são L^* , a^* e ΔE . Neste estudo, se observou uma mudança no parâmetro de cor (ΔE), quando foi aplicado as micro-ondas por mais tempo de processamento e maior potência.

Dos resultados reportados nas Tabelas 13 e 14, foi observado que, a variação no brilho de amostras determinado pelo parâmetro L^* , tratadas por micro-ondas com efeito térmico, teve um aumento quando foi exposta a amostra a tempo e potências altas, como no caso dos ensaios 2, 3, 4, 6, e 8. Para as amostras tratadas por micro-ondas sem efeito térmico, apenas os ensaios 3, 4 e 6 mostraram uma diferença significativa ao ser comparada com a amostra de referência é dizer, sem ser processada.

O parâmetro a^* teve uma leve diminuição no quadrante positivo para a maioria dos processamentos, indicando um aumento na concentração de β -caroteno, pois, segundo Borguini (2005), observou-se que para temperaturas acima de 30°C são inibidoras para as sínteses de licopeno, embora favoreçam a sínteses de β -caroteno, dando uma aparência mais alaranjada.

Segundo Anese (2002), o principal pigmento vermelho do tomate é o licopeno trans e em menores quantidades o licopeno cis, que dá uma cor mais amarelada. Mediante o processamento térmico ocorre a isomerização do licopeno da forma trans para a forma cis e com isso a maior intensidade da cor vermelha do tomate diminui se aplicado um tratamento térmico severo.

Em relação a diferença total de cor " ΔE ", para o processo por micro-ondas com efeito térmico, observou-se uma variação mais significativa nos ensaios 2, 3, 4, 6, e 8, onde a variação foi entre $1,73 < \Delta E < 2,70$, de acordo com a Tabela 16 descrita

por Wang et al. (2014), sendo que, esta diferença é classificada como uma “*diferença razoavelmente perceptível*”, enquanto os outros ensaios, obteve-se uma “*pequena diferença*”, variando de $0,67 < \Delta E < 1,31$.

No processamento por micro-ondas sem efeito térmico, todas as amostras, após os tratamentos, apresentaram uma variação nos valores de diferença total de cor $0,65 < \Delta E < 1,67$ classificada “*pequena diferença*” na maioria dos tratamentos, só dois ensaios apresentaram uma diferença de cor $\Delta E < 2,52$, classificando como uma “*diferença razoavelmente perceptível*”.

Para o processamento convencional da polpa de tomate, as variações foram mais significativas para todos os casos com variações de cor entre $3,55 < \Delta E < 5,34$, classificando como uma “*diferença perceptível*”.

A partir destas constatações, pode-se afirmar que os tratamentos com micro-ondas influenciam menos na cor da polpa de tomate em relação ao tratamento térmico convencional.

Tabela 16. Graus de diferença para as escalas ΔE (WANG et al., 2014).

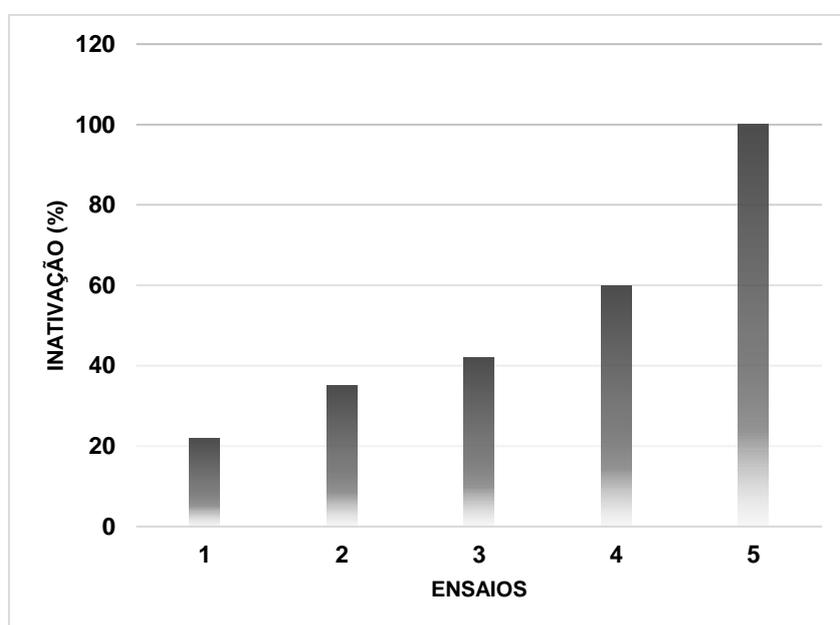
Scale	Degrees of difference
$\Delta E < 0.2$	No perceptible difference
$0.2 < \Delta E < 0.5$	Very small difference
$0.5 < \Delta E < 2$	Small difference
$2 < \Delta E < 3$	Fairly perceptible difference
$3 < \Delta E < 6$	Perceptible difference
$6 < \Delta E < 12$	Strong difference
$\Delta E < 12$	Different colors

5.6 Inativação enzimática da PME por tratamento convencional e de micro-ondas (com e sem efeitos térmicos)

A porcentagem de inativação da enzima PME em polpa de tomate tratada pelos processos descritos na metodologia, foi calculada com a finalidade de avaliar os efeitos não térmicos das micro-ondas durante a rampa de aquecimento, ou seja, em condições não isotérmicas.

A atividade da PME obtida na polpa de tomate não processada foi em média $12 \pm 0,4$ PEU/mL, a unidade adotada para representar a atividade da PME é geralmente expressada na literatura em função do volume (PEU/mL), embora diversos autores prefiram apresentá-la em função do teor de sólidos solúveis do suco (PEU/mL °Brix). Este valor de atividade enzimática obtido tem a mesma ordem de grandeza aos reportados na literatura (BOAS et al., 2000).

Figura 21. Valores médios da porcentagem de inativação enzimática experimental da PME em polpa processada por tratamento térmico convencional.



Nas Figura 21 e Tabela 17, são apresentados os valores percentuais de inativação da PME medidos após o tratamento térmico de cada amostra em suas determinadas condições, em função da temperatura e do tempo de imersão, conforme descrito no item 4.5. Observou-se uma tendência crescente de inativação, conforme aumenta-se o tempo de retenção do processo e consequentemente o aumento da temperatura alcançada na rampa de aquecimento.

Tabela 17. Valores percentuais de inativação enzimática da PME e a temperatura máxima alcançada em cada condição de processo em batelada, quando submetido aquecimento convencional.

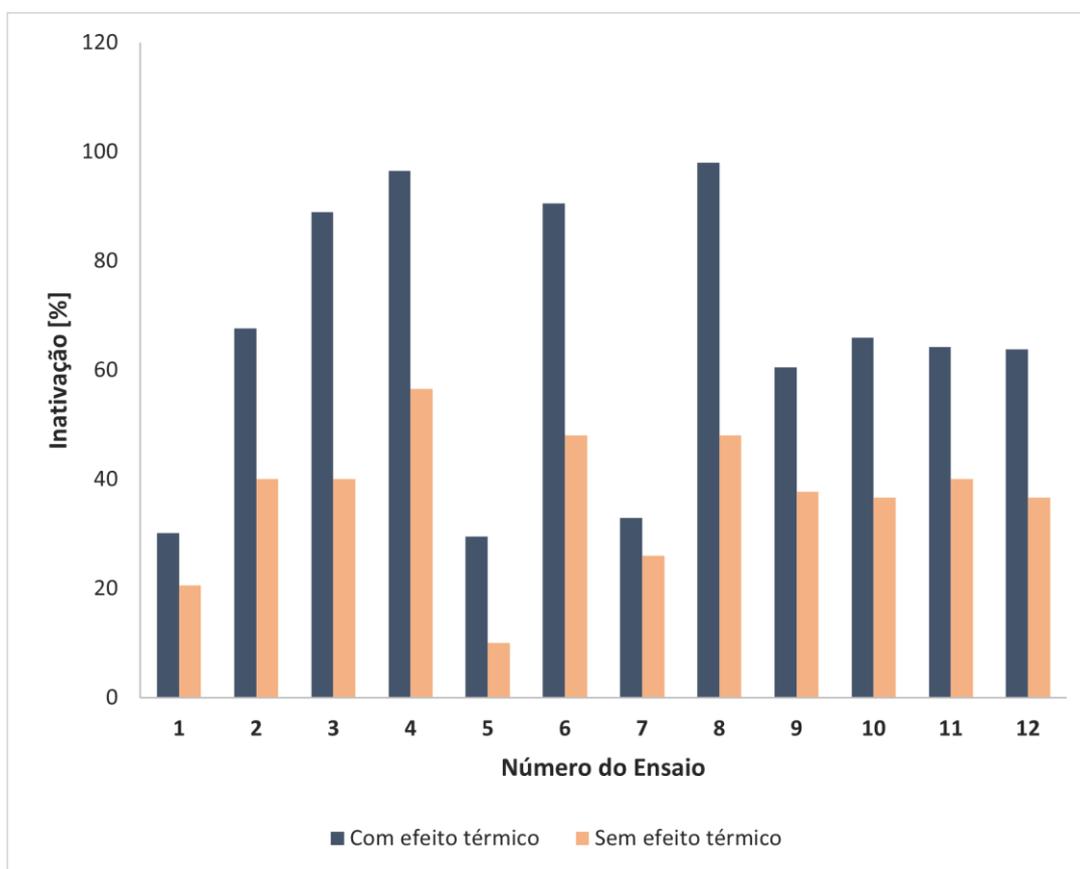
Ensaio	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Inativação (%)
1	2,29	40	22,78 ± 0,17
2	4,37	50	35,83 ± 0,06
3	6,00	60	42,77 ± 0,09
4	10,10	70	60,00 ± 0,00
5	15,16	80	100,00 ± 0,00

De acordo com os dados apresentados, no ensaio 5, foi obtida uma inativação total da enzima PME, sendo o melhor resultado após aquecimento a 80 °C por 15,16 min.

Na Figura 22, são apresentadas as porcentagens de inativação enzimática da PME na polpa de tomate submetidas a radiação das micro-ondas com e sem efeitos térmicos.

De acordos com estes resultados, realizou-se uma comparação dos tratamentos, a fim de observar a possível existência dos efeitos não térmicos das micro-ondas, tendo como ponto de referência a temperatura próxima de 40 °C.

Figura 22. Percentuais de inativação enzimática experimental da PME em polpa processada por micro-ondas com e sem efeitos térmicos.



No tratamento por micro-ondas com efeito térmico, foi observado que, nos ensaios 1, 5 e 7, os quais atingiram temperaturas próximas de 40 °C, apresentaram um grau de inativação baixo, com valores entre 29,5 e 32,9 %, em comparação aos outros ensaios que atingiram uma temperatura superior, com uma inativação entre 60,5 e 98 %, evidenciando uma letalidade próxima ao 100 % em alguns ensaios.

Para tratamentos por micro-ondas sem efeito térmico, a letalidade máxima alcançada na temperatura próxima de 40 °C, foi de 56,8 % de inativação, este destaque indica a possibilidade de efeitos não térmicos, visto que, se a inativação ocorresse só por temperatura, segundo os dados obtidos no tratamento com efeito térmico, atingiria no máximo uma inativação de 32,9 %, a uma temperatura perto dos 40 °C.

Havendo efeitos não térmicos na inativação da enzima PME, observa-se que a potência das micro-ondas seja um parâmetro importante do processo a ser

controlado, além da temperatura. Assim como foi observado no presente trabalho, tem-se confirmada a correlação de que, em potências maiores atingiu-se maiores porcentagens de inativação, o que pode atribuir aos efeitos não térmicos.

Um comportamento similar foi obtido por Cavalcante et al., (2021), estudando os efeitos não térmico das micro-ondas sobre a inativação enzimática da PPO e POD, afirmando que, para a enzima PPO a temperaturas acima de 70 °C, são observados efeitos não térmicos, uma vez que fora identificado uma maior inativação enzimática no tratamento por micro-ondas em comparação ao térmico convencional.

Numerosos estudos têm sido publicados sobre os efeitos das micro-ondas no processamento de alimentos, que tratam de efeitos térmicos das micro-ondas em comparação com o aquecimento convencional sobre inativação de microrganismos e enzimas, a maioria dos estudos concorda com possível existência de efeitos não térmicos, sendo utilizadas diferentes abordagens (KERMASHA et al., 1993; TAJCHAKAVIT & RAMASWAMY, 1995 e 1997; LOPES et al., 2015; XU et al., 2016; CAVALCANTE et al., 2021).

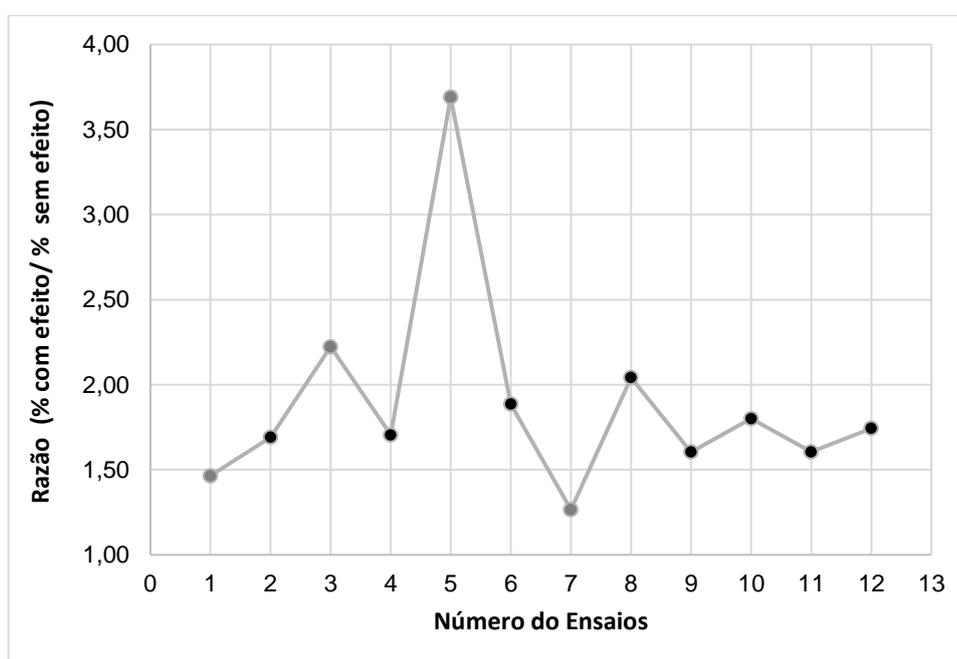
Efeitos não térmicos das micro-ondas foram observados em outros estudos, assim como mudanças na conformação estrutural de enzimas por aquecimento de micro-ondas em temperaturas entre 70 e 90 °C (GEORGE et al., 2008; PORCELLI et al., 1997).

No entanto, distinguir com precisão os efeitos não térmicos dos campos elétricos é complexo, mas, como foi observado, a maioria dos experimentos foi realizada mediante comparação do tratamento térmico por micro-ondas com tratamento térmico convencional. Neste trabalho, foi proposta uma alternativa de comparação, dado que se evidenciou a dificuldade em ajustar as curvas de aquecimento no micro-ondas de tal forma, que coincidissem com as curvas de aquecimento convencional para a realização de uma comparação mais precisa.

Neste contexto, o aquecimento por micro-ondas interfere com possíveis efeitos não térmicos, mas estes não podem ser facilmente separados dos efeitos provenientes do aquecimento, como observado no tratamento não térmico descrito anteriormente, constatando-se que não houve o isolamento total da temperatura, mas que a faixa de temperatura alcançada durante os experimentos foi inferior às referenciadas na literatura (>70°C).

Observa-se que a razão entre as porcentagens de inativação com efeito térmico e sem efeito térmico permite evidenciar a existência de uma possível relação entre estes processos, como é apresentada na Figura 23. Pode-se observar valores da razão (% com efeito térmico / % sem efeito térmico) em média de 1,89 o que indica que para estas condições testadas de tempo e potência, a porcentagem de inativação enzimática considerando o efeito térmico é, aproximadamente, o dobro da porcentagem de inativação sem efeito térmico.

Figura 23. Razão das porcentagens de inativação enzimática para os processos por micro-ondas com efeito térmico e sem efeito térmico.



5.7 Planejamento experimental para a inativação enzimática da PME em polpa de tomate.

Doze experimentos de inativação para cada processo (por micro-ondas com e sem efeitos térmicos) foram realizados para estabelecer a relação entre as variáveis dependentes (porcentagem de inativação enzimática) e as variáveis independentes (potência das micro-ondas e tempo de exposição ou de processo). A matriz do planejamento DDCR com os correspondentes fatores de inativação para os dois processos é apresentada na Tabela 18. Os desvios padrão dos resultados dos ensaios foram calculados realizando quatro experimentos no nível central das variáveis independentes.

Tabela 18. Percentual de inativação enzimática da PME e a temperatura final alcançada em cada condição de processo descontínuo, quando submetido à incidência das micro-ondas com e sem efeito térmico.

Ensaio	Tempo (s)	Potência (W)	Micro-ondas com efeito térmico		Micro-ondas sem efeito térmico	
			Inativação (%)	Temperatura Final (°C)	Inativação (%)	Temperatura Final (°C)
1	120	1250	30,16	48	20,70	27
2	120	2250	67,61	65	40,00	32
3	420	1250	88,90	82	40,00	34
4	420	2250	96,50	80	56,80	40
5	60	1750	29,50	36	10,00	30
6	482	1750	90,50	80	48,00	41
7	270	1043	32,90	42	26,00	34
8	270	2500	98,00	74	48,00	45
9	270	1750	60,50	64	37,70	40
10	270	1750	60,90	62	36,90	42
11	270	1750	64,20	66	40,00	42
12	270	1750	63,80	63	36,90	40

Nesta Tabela 18, são apresentados os valores de porcentagem de inativação da PME e a temperatura máxima alcançada em cada processo, quando irradiada por micro-ondas com efeito térmico e sem efeito térmico, em função do tempo de tratamento e potência aplicada.

A partir dos dados da Tabela 18, se construiu uma relação para a porcentagem de inativação enzimática em função da potência e o tempo de exposição, verificando-se a influência dos fatores sobre o resultado e gerando um polinômio, que correlaciona a inativação enzimática assistida por micro-ondas com e sem efeito térmico.

Os efeitos são definidos como a mudança ocorrida na resposta quando se altera do nível baixo (-) para o nível alto (+) e pode ser classificada em duas categorias: efeitos principais e efeitos de interação (RODRIGUES & LEMMA, 2005).

A análise de variação (ANOVA) aplicada aos resultados de inativação enzimática para os dois tratamentos por micro-ondas da Tabela 17, respectivamente com e sem efeitos térmicos, estão apresentados nas Tabelas 19 e 20, correspondente aos efeitos principais, suas interações e erro padrão para os processos em função da porcentagem de inativação enzimática da PME para um $\alpha = 5\%$ (nível de significância).

Tabela 19. Efeitos para os fatores correspondentes na porcentagem de inativação enzimática da PME por micro-ondas com efeito térmico.

Fatores	Coefficiente	Erro Padrão	t cal*	p-valor*
Média	63,60	3,67	17,33	0,0000
X_1 : Potência (Linear)	13,16	2,60	5,07	0,0023
X_1^2 : Potência (Quadrático)	0,99	2,90	0,34	0,7442
X_2 : Tempo (Linear)	22,19	2,60	8,55	0,0001
X_2^2 : Tempo (Quadrático)	0,42	2,90	0,14	0,8905
$X_1 \cdot X_2$	-8,36	3,67	-2,28	0,0630

t_{cal}*: valor da influência no processo (estatística do teste)

p*: probabilidade de significância

Tabela 20. Efeitos para os fatores correspondentes na porcentagem de inativação enzimática da PME por micro-ondas sem efeito térmico.

Fatores	Coefficiente	Erro Padrão	t cal*	p-valor*
Média	37,73	2,25	16,75	0,0000
X_1 : Potência (Linear)	11,22	1,59	7,04	0,0004
X_1^2 : Potência (Quadrático)	-2,91	1,78	-1,64	0,1530
X_2 : Tempo (Linear)	8,04	1,59	5,05	0,0023
X_2^2 : Tempo (Quadrático)	1,59	1,78	0,89	0,4070
$X_1 \cdot X_2$	-0,70	2,25	-0,31	0,7665

t_{cal}*: valor da influência no processo (estatística do teste)

p*: probabilidade de significância

Pode-se observar que, para o tratamento com efeito térmico, o p-valor é maior que 0,05, para os parâmetros quadráticos, X_1^2 e X_2^2 , e para o tratamento sem térmico o p-valor é maior que 0,05, para os parâmetros quadráticos e interativos, X_1^2 , X_2^2 e $X_1 \cdot X_2$ o que significa que não são estatisticamente significativos, sendo necessária uma reparametrização, conforme mostrado nas Tabelas 21 e 22, que consistem na eliminação dos coeficientes que não são estatisticamente significativos para obter um modelo linear com o nível de significância desejado.

Tabela 21. Efeitos estatisticamente significativos para os fatores correspondentes na porcentagem de inativação enzimática da PME por micro-ondas com efeito térmico, excluindo os fatores de interação e quadráticos.

Fatores	Coefficiente	Erro Padrão	t cal*	p-valor*
Média	64,54	1,85	34,81	0,0000
X_1 : Potência (Linear)	13,16	2,27	5,79	0,0004
X_2 : Tempo (Linear)	22,19	2,27	9,77	0,0000
$X_1 \cdot X_2$	-8,36	3,21	-2,60	0,0314

Tabela 22. Efeitos estatisticamente significativos para os fatores correspondentes na porcentagem de inativação enzimática da PME por micro-ondas sem efeito térmico, excluindo os fatores de interação e quadráticos.

Fatores	Coefficiente	Erro Padrão	t cal*	p-valor*
Média	36,75	1,37	26,81	0,0000
X_1 : Potência (Linear)	11,23	1,65	6,69	0,0001
X_2 : Tempo (Linear)	8,40	1,68	5,00	0,0007

Para que os valores dos fatores sejam estatisticamente significativos, o p-valor deve ser menor do que **0,05**, ao nível de significância de 95 %. Assim, os valores destacados, nas Tabelas 20 e 21, indicam que os fatores X_1 , X_2 e $X_1 \cdot X_2$ são estatisticamente significativos a 95 % de confiança, uma vez que os outros valores maiores a 0,05 foram desconsiderados em ordem decrescente. Assim, os modelos que representaram os processos por micro-ondas com efeito térmico foi do tipo linear com interação, e sem efeito térmico foi do tipo linear os quais não consideram as influências quadráticas dos parâmetros.

Para confirmar esses resultados, se apresenta o diagrama de Pareto, para ambos os processos por micro-ondas com e sem efeitos térmicos, respectivamente, nas Figuras 24 e 25.

Figura 24. Gráfico de Pareto para o tratamento com efeito térmico.

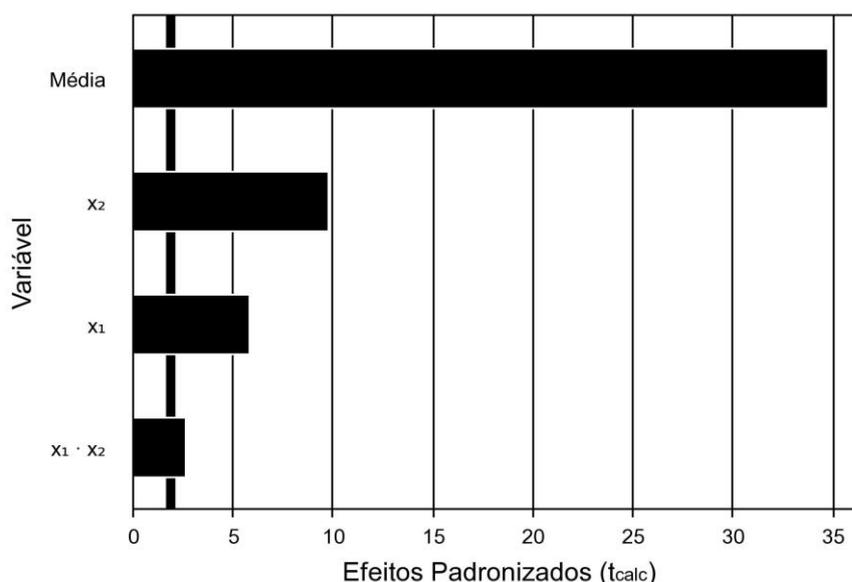
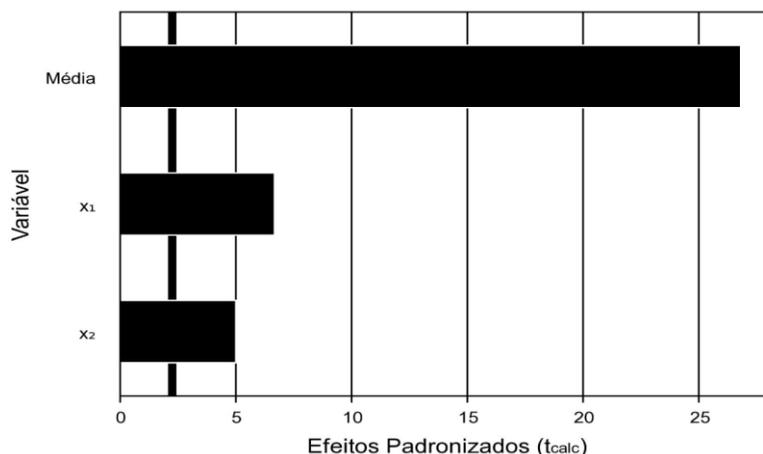


Figura 25. Gráfico de Pareto para o tratamento sem efeito térmico.



Nas Figuras 24 e 25, são apresentados os gráficos de Pareto, com um nível de confiança de 95 % para os efeitos dos fatores para valores absolutos. As barras representam a magnitude de cada efeito e a linha perpendicular corresponde ao valor de $p = 0,05$, a qual indica o quanto deve ser grande o efeito para ter significado estatístico, confirmando assim que as variáveis X_1 , X_2 e $X_1 \cdot X_2$ dos modelos são significativas, pois ultrapassam a linha correspondente ao valor $p = 0,05$.

Para o processo com efeito térmico, o cálculo dos efeitos mostrou que o parâmetro X_2 , para o modelo linear, apresenta maior influência na variável dependente, portanto à medida que o tempo de tratamento (X_2) aumenta, o resultado esperado na inativação enzimática aumenta.

Já para o processo sem efeito térmico, o teste de significância mostrou que o parâmetro X_1 apresenta maior influência na variável dependente, significando que ao aumentar a potência aplicada maior é a inativação enzimática.

A partir das variáveis significativas, se avaliou numericamente a qualidade do ajuste do modelo empírico mediante uma análise de variância, ANOVA (um acrônimo de *Analysis of variance*). A análise de variância é uma técnica estatística baseada na análise do desvio das respostas observadas do resultado médio global, da comparação de três ou mais grupos em amostras independentes. Em outras palavras a análise de variância é uma forma de avaliar a qualidade dos ajustes do modelo.

Assim, para avaliar a qualidade do ajuste dos modelos, utilizou-se os dados das Tabelas 23 e 24, que são baseados na análise de variância, apresentando alguns

parâmetros estatísticos como as somas e médias quadráticas, respectivamente, para os processos com e sem efeitos térmicos.

Tabela 23. Análise de variância para o modelo linear do processo por micro-ondas com efeitos térmicos.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	f_{cal}	p-valor
Regressão	5603,2	3	1867,7	45,3	0,00002
Resíduos	330,0	8	41,3		
Falta de ajuste	314,7	5	62,9	12,3	0,03249
Erro puro	15,3	3	5,1		
Total	5933,2	11			
R^2	0,9444				

Tabela 24. Análise de variância para o modelo linear do processo por micro-ondas sem efeitos térmicos.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	f_{cal}	p-valor
Regressão	1573,6	2	786,8	34,9	0,00006
Resíduos	202,9	9	22,5		
Falta de ajuste	196,4	6	32,7	15,2	0,02385
Erro puro	6,4	3	2,1		
Total	1776,5	11			
R^2	0,8858				

Ao efetuar a ANOVA, as somas quadráticas residual (SQ_r) dos modelos, a partir dos dados das Tabelas 23 e 24, foram de 330,0 e 202,9 para o processo com e sem efeito térmico, respectivamente. Foram obtidas, somando-se a falta de ajuste e o erro puro, e representam a soma das diferenças entre os valores observados e os valores previstos.

Uma vez que a falta de ajuste do modelo foi a menos significativa, pode se dizer que os modelos obtidos a partir desta análise, juntamente com os valores de R^2 ajustados correspondentes, resumidos na Tabela 25, descrevem os fenômenos envolvidos nos experimentos de inativação enzimática por irradiação de micro-ondas com e sem efeitos térmicos.

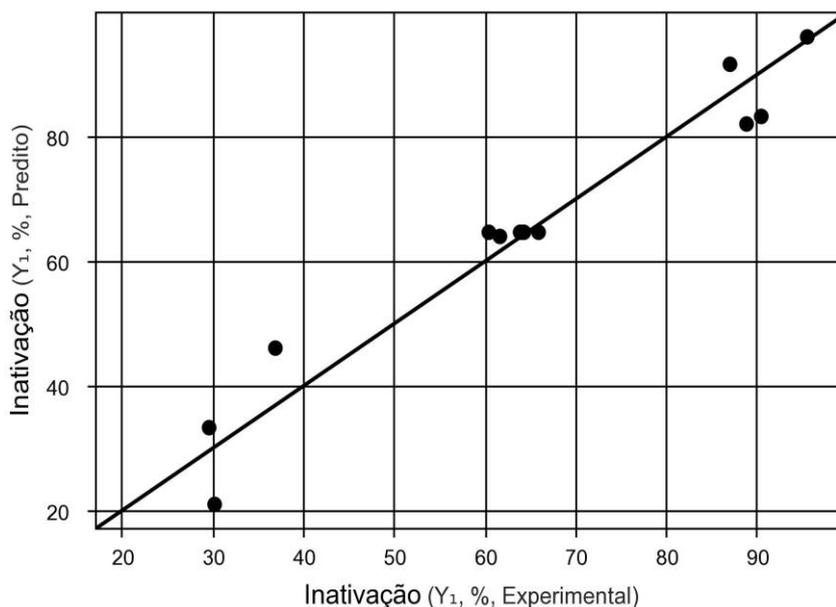
Tabela 25. Modelos preditivos empíricos do percentual de inativação enzimática da PME por micro-ondas em processos de aquecimento transiente com e sem efeito térmico. sendo P: Potência de micro-ondas (W); t: tempo (s) de processo.

Variável dependente	Equação	R ²
Inativação PME <u>com</u> efeito térmico [%]	$\% \text{ Inativação} = 64,54 + 13,16 * P + 22,19 * t - 8,36 * P * t$	0,9444
Inativação PME <u>sem</u> efeito térmico [%]	$\% \text{ Inativação} = 36,75 + 11,23 * P + 8,40 * t$	0,8858

Os ajustes dos modelos foram expressos pelos coeficientes de determinação (R²), os quais foram de 0,9444 e 0,8858, para os processos com e sem efeito térmico, respectivamente, e indicam o percentual de variação na inativação enzimática, resultante da potência das micro-ondas e o tempo de processamento que é aplicado em cada ensaio. Segundo outros autores quando os valores de R² variam entre 70 e 92%, pode-se considerar que os modelos preditivos representam satisfatoriamente os resultados no domínio experimental, e se R² for maior que 90 % podem ser considerados excelentes (GRANATO et al., 2010; BENLLOCH-TINOCO et al., 2013). Desta forma podem ser considerados os modelos obtidos preditores válidos para a inativação enzimática da PME em polpa de tomate, em função da potência do micro-ondas e do tempo de exposição, na faixa considerada neste estudo.

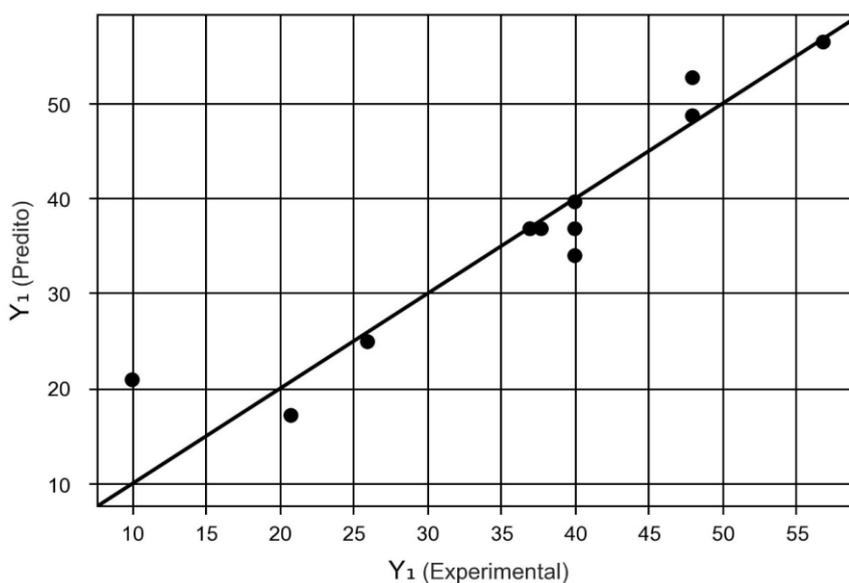
Os ajustes dos modelos podem ser observados graficamente nas Figuras 26 e 27.

Figura 26. Valor predito versus valor experimental do modelo preditivo para a porcentagem de inativação enzimática em relação ao tempo de exposição e a potência por micro-ondas com efeito térmico.



Nas Figuras 26 e 27, observa-se que os valores experimentais estão próximos aos valores preditos, mas no caso do processo por micro-ondas sem efeito térmico a qualidade do ajuste foi maior que do processo com efeito térmico.

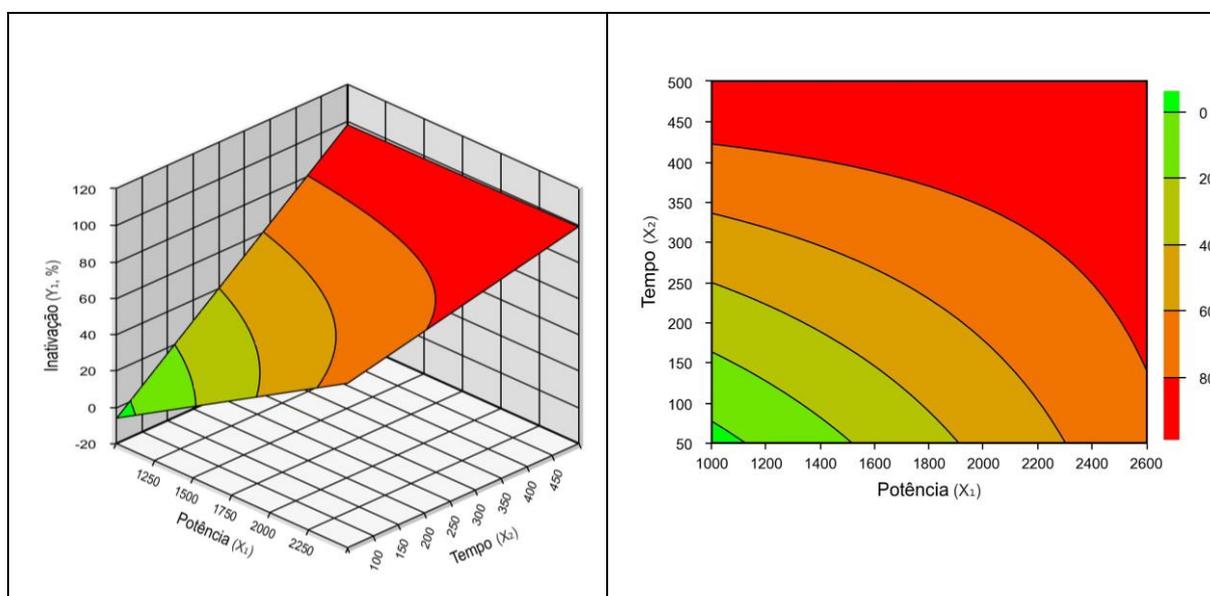
Figura 27. Valor predito versus valor experimental do modelo preditivo para a porcentagem de inativação enzimática em relação ao tempo de exposição e a potência por micro-ondas sem efeito térmico.



Após a obtenção dos modelos, apresentados na Tabela 23, foram geradas superfícies de resposta que descrevem as dependências do percentual de inativação enzimática em cada processo, com e sem efeito térmico, ilustradas nas Figuras 28 e 29.

As superfícies de respostas foram utilizadas, para apresentar as melhores faixas operacionais para o processo de inativação da enzima PME em polpa de tomate por irradiação de micro-ondas com e sem efeito térmico.

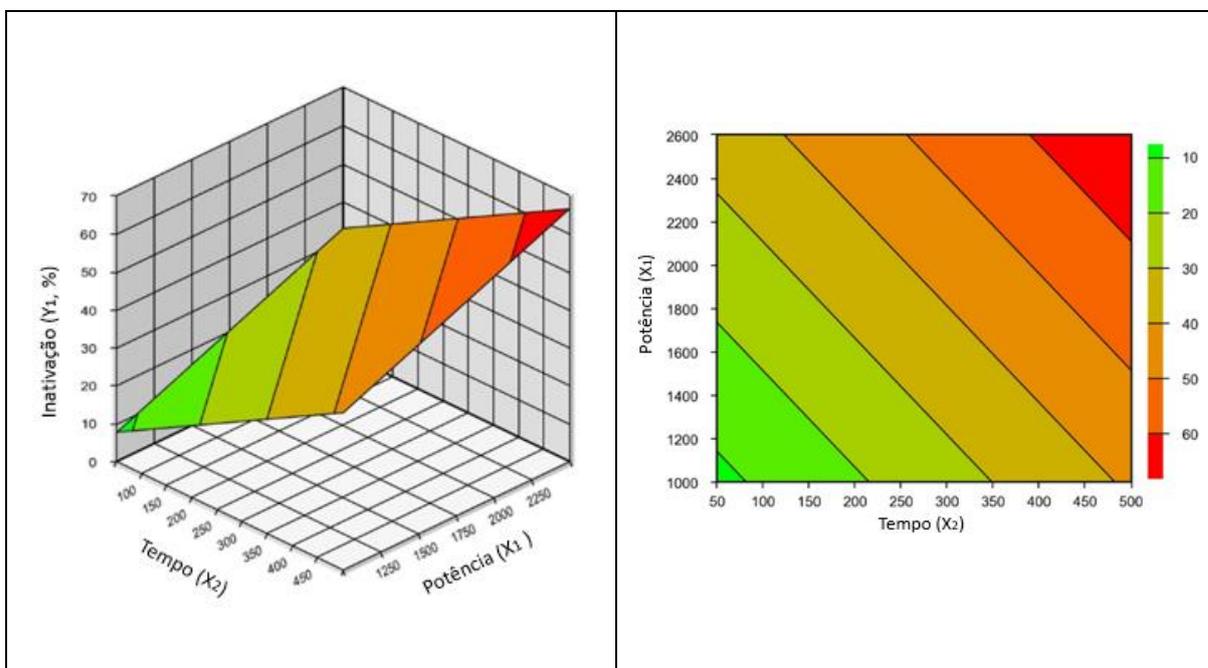
Figura 28. Curvas de contorno e superfície de respostas para % de inativação enzimática da PME em polpa de tomate no processo por micro-ondas com efeito térmico.



A Figura 28, mostra o comportamento de inativação da PME em relação à potência do micro-ondas e tempo de exposição, com base no modelo obtido. Observa-se que o nível de inativação da PME aumentou à medida que a potência e o tempo de processamento aumentaram, o que teve efeitos lineares.

Além disso, foi observado um efeito de interação entre as duas variáveis independentes (potência e tempo) na inativação da PME. Como esperado, nas amostras submetidas a tempo de exposição mais longos e à medida que foi aplicada uma potência maior, o nível de inativação enzimática aumento mais rapidamente, isto devido ao aumento de temperatura que estas duas variáveis promoveram.

Figura 29. Curvas de contorno e superfície de respostas para % de inativação enzimática da PME em polpa de tomate no processo por micro-ondas sem efeito térmico.



A partir da Figura 29, observa-se um aumento significativo na inativação da PME, conforme a intensidade de potência das micro-ondas foi aumentada e o tempo de processamento ficou mais longo. Para as duas variáveis independentes, apenas um efeito linear foi encontrado na inativação da PME em polpa de tomate. Do mesmo modo, Benlloch-Tinoco (2013) relatam um efeito linear para inativação da PME em purê de kiwi por micro-ondas, Tajchakavit e Ramaswamy (1997) também reportaram o mesmo efeito na inativação da PME em suco de laranja por micro-ondas.

Através dos modelos obtidos em cada processo, foi possível prever quais condições de tratamento (combinação potência e tempo) são favoráveis para alcançar a maior porcentagem de inativação da enzima PME sem alterar drasticamente as propriedades nutricionais e sensoriais da polpa de tomate dentro da faixa estudada.

Dessa forma o maior percentual de inativação de PME para o processo por micro-ondas com efeito térmico, é alcançado 98% de inativação da enzima PME na condição de 2500 W de potência durante um tempo de 250 s, e para o processo por micro-ondas sem efeito térmico, é alcançado 65 % de inativação da enzima PME aplicando 2500 W de potência por 500 s.

No processamento de polpa de tomate em batelada o processo por micro-ondas com efeito térmico pode ser considerado adequado, pois cerca de 100 % da atividade da PME foi reduzida. Considerando os efeitos não térmicos e combinados com uma taxa de aquecimento volumétrica mais rápida, há potencial para reduzir os tempos de processamento e melhorar assim a qualidade da polpa de tomate.

Não obstante, o processo por micro-ondas sem efeito térmico, não atingiu a exigência da inativação mínima de 80 % da enzima PME, nas condições testadas, o que se deve estimar outras condições de tempo e potência para que a norma seja atendida. Entretanto, as propriedades físico-químicas da polpa de tomate, especialmente a cor, não foi influenciada pelos tratamentos por micro-ondas, uma vez que foi capaz de preservar a vermelhidão da polpa de tomate, um dos principais indicadores de qualidade melhor do que o tratamento convencional.

Sendo assim, a comprovação dos efeitos não térmicos ainda é tema de controverso na literatura científica. Especificamente, nas condições presentes neste trabalho, o tratamento por irradiação de micro-ondas pode indicar sim possíveis efeitos não térmicos para a inativação da enzima PME em polpa de tomate.

6 CONCLUSÕES

Considerando as diferentes etapas realizadas, tem-se as seguintes conclusões:

- Para os diferentes processos (micro-ondas com e sem efeitos térmicos e convencional) da polpa de tomate, não houve diferenças significativas nas propriedades físico-químicas avaliadas (pH, acidez titulável e sólidos solúveis).
- No análises de cor após o processamento da polpa de tomate por micro-ondas, foi identificada uma diferença entre $1,73 < \Delta E < 2,70$ classificada como “*razoavelmente perceptível*”, para o tratamento com efeito térmico, e para o tratamento sem efeito térmico foi identificada uma diferença entre $0,65 < \Delta E < 1,67$ classificada como “*pouca diferença*”, e para o tratamento convencional foi classificado como $3,55 < \Delta E < 3,34$ classificado como uma “*diferença perceptível*”
- Nos tratamentos por micro-ondas, observou-se um destaque na inativação enzimática da PME de 56,8% no tratamento sem efeito térmico, sendo que para o tratamento por micro-ondas com efeito térmico se obteve uma inativação de 32,9%, na condição de temperatura próxima de 40 °C para os dois tratamentos com uma potência de 2250 e 1043 W respectivamente, o qual indica a possibilidade da existência dos efeitos não térmicos para a enzima PME em polpa de tomate.
- A inativação enzimática por micro-ondas apresenta algumas vantagens em relação ao processo convencional, tanto na rapidez, homogeneidade do aquecimento e na conservação dos componentes que definem a cor. Ainda, o processo por micro-ondas sem efeito térmico é mais vantajoso, pois a cor é mais bem preservada, devido ao uso de baixas temperaturas, por tanto este método apresentou para todas as condições operacionais valores de inativação enzimática inferiores 60% sendo inviável o seu uso comercial.
- Os ajustes dos modelos lineares de inativação enzimática da PME em função da potência aplicada e tempo de tratamento representaram satisfatoriamente os resultados no domínio experimental.
- Através deste trabalho também, foi apresentada uma nova alternativa para avaliar os efeitos não térmicos das micro-ondas, devido à dificuldade de igualar os perfis de temperatura entre os métodos de aquecimento convencional (convectivo ou condutivo) e de irradiação de micro-ondas (geração volumétrica de calor). Acredita-

se então, que essa nova proposta de comparação poderá ser aplicada e aprimorada isolando totalmente o efeito térmico.

7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Em vista dos resultados obtidos, para melhor compreensão dos efeitos não térmicos das micro-ondas sobre a inativação enzimática, fica como sugestão a realização das seguintes atividades:

- Isolar completamente o efeito térmico, incluir no sistema agitação constante, controle de temperatura com sensor de fibra ótica, sistema de troca de calor em serpentina, testar nas condições para condições de mais baixa temperatura e realizar a curva de inativação para esta condição em especial.
- Realizar experimentos sem efeito térmico variando a potência aplicada e mantendo os tempos de processamento iguais, para avaliar a intensidade do campo na inativação enzimática da PME.
- Determinar o teor de carotenoides nas amostras antes e após os processamentos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUSHITA AA, HEBISHI EA, DAOOD HG, BIACS PA. **Determination of antioxidant vitamins in tomatoes.** Food chem. 1997; 60(2): 207-12.

AGHAJANZADEH S, ZIAIIFAR AM. **A review of pectin methylesterase inactivation in citrus juice during pasteurization.** Trends in Food Science & Technology. 2017; 71:1-12.

AHMED J, RAMASWAMY HS, RAGHAVAN VG. **Dielectric properties of butter in the MW frequency range as affected by salt and temperature.** Journal of Food Engineering. 2007; 82(3): 351-358.

ANANTHESWARAN CR, RAMASWAMY HS. **Bacterial destruction and enzyme inactivation during microwave heating.** Handbook of Microwave Technology for Food Applications. New York. 2001; 191-213.

ANESE M, FALCONE P, FOGLIANO V, NICOLI MC, MASSINI R. **Effect of equivalent thermal treatments on the color and antioxidant activity of tomato purees.** Journal of Food Science. 2002; 67: 3442-46.

ANTHON GE, SEKINE Y, WATANABE N, BARRETT DM. **Thermal inactivation of pectin methylesterase, polygalacturonase, and peroxidase in tomato juice.** Journal of agricultural and food Chemistry. 2002; 50(21): 6153-6159.

ANTUNES LE, GONÇALVES ED, TREVISAN R. **Alterações de compostos fenólicos e pectina em pós-colheita de frutos de amora-preta.** R. Bras. Agrociência, Pelotas. 2006; 12 (1): 57-61.

ARIAS R, LEE TC, SPECCA D, JANES H. **Quality comparison of hydroponic tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) ripened on and off vine.** Journal of Food Science. 2000; 3: 545-48.

ARJMANDI M, OTÓN M, ARTÉS F, ARTÉS-HERNÁNDEZ F, GÓMEZ PA, AGUAYO E. **Microwave flow and conventional heating effects on the physicochemical properties, bioactive compounds and enzymatic activity of tomato puree.** Journal of the Science of Food and Agriculture. 2017; 97(3): 984-990.

BENLLOCH-TINOCO M, IGUAL M, RODRIGO D, MARTÍNEZ-NAVARRETE N. **Comparison of microwaves and conventional thermal treatment on enzymes activity and antioxidant capacity of kiwifruit puree.** Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2013; 19: 166-72.

BENLLOCH-TINOCO M, MARTÍNEZ-NAVARRETE N, RODRIGO D. **Impact of temperature on lethality of kiwifruit puree pasteurization by thermal and microwave processing.** Food Control. 2014; 35(1): 22-25.

BOAS V, DE BARROS EV, CHITARRA AB, MALUF WR, CHITARRA MIF. **Modificações texturais de tomates heterozigotos no loco alcobaça**. Pesquisa Agropecuária Brasileira. 2000; 35: 1447-53.

BORGUINI R. **Avaliação do potencial antioxidante e de algumas características físico-químicas do tomate (*Lycopersicon esculentum*) orgânico em comparação ao convencional**. Dissertação (Doutora em Saúde pública), Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, SP. 2006.

BORGUINI RG, SILVA MV. **Características físico-químicas e sensoriais do tomate (*Lycopersicon esculentum*) produzido por cultivo orgânico em comparação ao convencional**. Alimentos e Nutrição. 2005; 16: 355-61.

BRUGOS AF. **Inativação da pectinametilsterase na pausterização assistida por micro-ondas de suco de laranja pera *Citrus sinensis* L. Osbeck**. Dissertação (Doutor em Ciências), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP. 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Gabinete do Ministro. **INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 33, DE 18 DE JULHO DE 2018(*)** Regulamento Técnico MERCOSUL de Identidade e Qualidade de Tomate", aprovado pela Resolução GMC - MERCOSUL nº 26/17, na forma do Anexo a esta Instrução Normativa. Diário Oficial [da] União, Brasília, DF, 25 jul. 2018. Seção 1, p. 3.

CANTERI, MHG, WOSIACKI G, MORENO L, SCHEER AP. **Pectina: da matéria-prima ao produto final**. 2011.

CAVALCANTE TA, FUNCIA ES, GUT JAW **Inactivation of polyphenol oxidase by microwave and conventional heating: Investigation of thermal and non-thermal effects of focused microwaves**. Food Chemistry. 2021; 340.

CHEN Z, LI Y, WANG L, LIU S, WANG K, SUN J, XU B. Evaluation of the possible non-thermal effect of microwave radiation on the inactivation of wheat germ lipase. Journal of Food Process Engineering. 2017; 40(4): e12506.

CINQUANTA L, ALBANESE D, CUCCURULLO G, DI MATTEO M. **Effect on orange juice of batch pasteurization in an improved pilot-scale microwave oven**. Journal of Food Science. 2010; 75(1): 46-50.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – Conab. **Análise dos Indicadores da Produção e Comercialização no Mercado Mundial, Brasileiro e Catarinense**. Brasília, outubro de 2019. Disponível em: www.conab.gov.br. acesso em: 08 de Mar; 2020.

CUI ZW, SUN LJ, CHEN W, SUN DW. **Preparation of dry honey by microwave-vacuum drying**. Journal of Food Engineering. 2008; 84(4): 582-90.

CAÑUMIR JA, CELIS JE, DE BRUIJN J, VIDAL LV. **Pasteurisation of apple juice by using microwaves**. LWT-Food Science and Technology. 2002; 35(5): 389-92.

DAHLKE I, GUERRA D, DE SOUZA E, LANZANOVA M, BOHRER R, RAMIRES M. **Desempenho produtivo do tomateiro sob cultivo protegido utilizando caldas agroecológicas**. Cultura agrônômica. 2019; 28(2): 204-14.

DATTA AK & ANANTHESWARAN RC. **Handbook of microwave technology for food applications**. New York: Marcel Dekker Inc. 2000.

DIBBEN D. **Electromagnetics: Fundamental Aspects and Numerical Modeling**. In DATTA, K. A. e ANANTHESWARAN, C.R. Handbook of microwave technology for food applications. New York. 2001; 1-28.

EDGAR R & OSEPCHUK J. **Consumer, commercial, and industrial microwave ovens and heating systems**. IN DATTA. Handbook of microwave technology for food applications. New York. 2001; 215-40.

FABBRI ADT. **Estudo da radiação ionizante em tomates in natura (*lycopersicon esculentum* Mill) e no teor de licopeno do molho**. Dissertação (mestre de Ciências), Faculdade de Tecnologia Nuclear-Aplicações, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, SP. 2009.

FACHIN D, LOEY AMV, NGUYEN BL, VERLENT I, INDRAWATI, HENDRICKX ME. **Comparative Study of the Inactivation Kinetics of Pectinmethylesterase in Tomato Juice and Purified Form**. Biotechnol. 2002; 18: 739-44.

FERREIRA S, FREITAS R, KARKLE E, QUADROS D, TULLIO L, LIMA J. **Qualidade do tomate de mesa cultivado nos sistemas convencional e orgânico**. Ciência e Tecnologia de Alimentos. 2010; 30(1): 224-30.

FERRARI AA. **Caracterização química de tomates (*Lycopersicon esculentum* Mill.) empregando análise por ativação neutrônica instrumental**. Dissertação (Mestre em Ciências), Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2008.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION - FAO. FAO Statistical Yearbook. New York, 2022. Disponível em: www.fao.com. acesso em: 25 de Abril; 2022.

GENTRY TS & ROBERTS JS. **Design and evaluation of a continuous flow microwave pasteurization system for apple cider**. LWT-Food Science and Technology. 2005; 38(3): 227-38.

GEORGE DF, BILEK, MM, MCKENZIE DR. **Non-Thermal effects in the microwave induced unfolding of proteins observed by chaperone binding**. Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society

for **Physical Regulation in Biology and Medicine**, The European Bioelectromagnetics Association. 2008; 29(4): 324-30.

GONZÁLEZ-MONROY AD, RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ G, OZUNA C, SOSA-MORALES ME. **Microwave-assisted pasteurization of beverages (tamarind and green) and their quality during refrigerated storage**. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2018; 49: 51-7.

GOODMAN CL, FAWCETT S, BARRINGER SA. **Flavor, viscosity, and color analyses of hot and cold break tomato juices**. Journal of Food Science. 2002; 67(1): 404–408.

GRANATO D, DE CASTRO IA, ELLENDERSEN LSN, MASSON ML. **Physical stability assessment and sensory optimization of a dairy-free emulsion using response surface methodology**. Journal of food science. 2010; 75(3): 149-55.

GUO W, LLAVE Y, JIN Y, FUKUOKA M & SAKA, N. **Mathematical modeling of ohmic heating of two-component foods with non-uniform electric properties at high frequencies**. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2017; 39: 63–78.

HERRERO MA, KREMSNER JM, KAPPE CO. **Nonthermal microwave effects revisited: on the importance of internal temperature monitoring and agitation in microwave chemistry**. The Journal of organic Chemistry. 2008; 73 (1): 36-47.

HUANG Y, SHENG J, YANG F, HU Q. **Effect of enzyme inactivation by microwave and oven heating on preservation quality of green tea**. Journal of Food Engineering. 2007; 78: 687-692.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Estatística da produção agropecuária**. Brasília, DF, 2021. Disponível em: www.ibge.gov.br. acesso em: 25 de Abril; 2022.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas analíticas**: métodos físicos y químicos para análise de alimentos. São Paulo. 1985.

IQBAL A, MURTAZA A, HU W, AHMAD I, AHMAD A & XU X. **Activation and inactivation mechanisms of polyphenol oxidase during thermal and non-thermal methods of food processing**. Food and Bioproducts Processing. 2019; 117: 170-82.

KERMASHA S, BISAKOWSKI B, RAMASWAMY H, VAN DE VOORT FR. **Thermal and Microwave Inactivation of Soybean Lipoxygenase**. LWT-Food Science and Technology. 1993; 26(3): 215–9.

KERTESZ ZI. **Pectic enzymes: I. the determination of pectin-methoxylase activity**. Journal of Biological Chemistry. 1937; 121(2): 589-598.

KREBBERS B, MASTER AM, HOOGERWERF SW, MOEZELAAR R, TOMASSEN MMM, VEN DBRW. **Combined high-pressure and thermal treatments for processing of tomato puree: Evaluation of microbial inactivation and quality parameters.** Innovation Food Science and Emerging Technologies. 2003; 4: 377–385.

KUBO MT, SIGUEMOTO ÉS, FUNCIA ES, AUGUSTO PE, CURETS, BOILLEREAUX L, GUT JA. **Non-thermal effects of microwave and ohmic processing on microbial and enzyme inactivation: a critical review.** Current Opinion in Food Science. 2020; 35: 36-48

LANDAU EC, SILVA GA, MOURA L, HIRSCH A, GUIMARAES DP. **Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas: produtos de origem vegetal.** Brasília, DF: Embrapa. 2020; 2(40): 1303-27.

Le BAIL A, KOUTCHMA T, RAMASWAMY HS. **Modeling of temperature profiles under continuous tube-flow microwave and steam heating conditions.** Journal of Food Process Engineering. 2000; 23: 1-24.

LIN M, RAMASWAMY HS. **Evaluation of phosphatase inactivation kinetics in milk under continuous flow microwave and conventional heating conditions.** Int J Food Prop. 2011; 14: 110-23.

LOPES LC, BARRETO MT, GONCALVES KM, ALVAREZ HM, HEREDIA MF, DE SOUZA ROM, FRICKS AT. **Stability and structural changes of horseradish peroxidase: Microwave versus conventional heating treatment.** Enzyme and microbial technology. 2015; 69: 10-18.

LUIZ KMB. **Avaliação das características físico-químicas e sensoriais de tomates (*Lycopersicon esculentum* Mill) armazenados em refrigeradores domésticos.** Dissertação (mestre em Engenharia de Alimento), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, SC. 2005.

NASCIMENTO AR, SOARES JÚNIOR MS, CALIARI M, FERNANDES PM, RODRIGUES JPM, CARVALHO WT. **Qualidade de tomates de mesa cultivados em sistema orgânico e convencional no estado de Goiás.** Horticultura Brasileira. 2013; 31: 628-35.

MAGALHÃES RS, LIMA RMF, SOUZA HAD. **O uso de micro-ondas para determinação de umidade de bauxita.** Rem: Revista Escola de Minas. 2003; 56: 255-59.

MAKROO HA, RASTOGINK, SRIVASTAVA B. **Enzyme inactivation of tomato juice by ohmic heating and its effects on physical-chemical characteristics of concentrated tomato paste.** Journal of Food Process Engineering. 2017; 40(3): e12464.

MATSUI KN, GRANADO L.M, DE OLIVEIRA PV, TADINI CC. **Peroxidase and polyphenol oxidase thermal inactivation by microwaves in green coconut water simulated solutions.** LWT-Food science and Technology. 2007; 40(5): 852-9.

MATSUI KN, GUT JAW, DE OLIVEIRA PV, TADINI CC. **Inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in green coconut water by microwave processing.** Journal of Food Engineering. 2008; 88(2): 169–76.

MURARU C, LOGENDRA L, LEE TC, HARRY, J. **Characteristics of 10 processing tomato cultivars grown hydroponically for the NASA Advanced Life Support (ALS) Program.** Journal of Food composition and Analysis. 2004; 17: 141-54.

OLIVEIRA PR, Tomé PHF, Fragiorge EJ, Lopes MA, Jesus EJ. **Análises de variedades de tomates (*Lycopersicon esculentum* MILL) CV. Débora e saladete na elaboração de catchup.** 2015; 1(69): 14.

PAIVA EP, LIMA MS, PAIXÃO JA. **Pectina: propriedades químicas e importância sobre a estrutura da parede celular de frutos durante o processo de maturação.** Revista iberoamericana de polimeros. 2009; 10(4):196-211.

PÉREZ-TEJEDA G, VERGARA-BALDERAS FT, LÓPEZ-MALO A, ROJAS-LAGUNA R, ABRAHAM-JUÁREZ MDR, SOSA-MORALES ME. **Pasteurization treatments for tomato puree using conventional or microwave processes.** Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. 2016; 50 (1): 35–42.

PILNIK W & VORAGEN AGJ. **Pectic Enzymes in Fruit and Vegetable Juice Manufacture.** Enzymes in Food Processing. 1993; 3: 363–99.

POLAKOVIC M, VRÁBEL P. **analysis of the mechanism and kinetics of thermal inactivation of enzymes: critical assessment of isothermal inactivation experiments.** Process Biochemistry. 1996; 31 (8): 787-800.

PORCELLI M, CACCIAPUOTI G, FUSCO S, MASSA R, D'AMBROSIO G, BERTOLDO C, ZAPPIA V. **Non-thermal effects of microwaves on proteins: thermophilic enzymes as model system.** FEBS letters. 1997; 402 (2-3): 102-06.

RAVIYAN P, ZHANG Z, FENG H. **Ultrasonication for tomato pectinmethylesterase inactivation: effect of cavitation intensity and temperature on inactivation.** Journal of Food Engineering. 2005; 70(2): 189-96.

RODRIGUES MI, IEMMA AF. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**, 1 ed. Campinas, São Paulo: Casa do Pão. 2005; 321.

RODRÍGUEZ-SALINAS C, SALAZAR-GONZÁLEZ C, LÓPEZ-MALO A, SOSA-MORALES ME. **Pasteurization of mango puree using microwaves.** In: Proceedings of the 45th IMPI Microwave Power Symposium International Microwave Power Institute; 2011.

ROSA CLS, SOARES AG, FREITAS DGC, ROCHA MC, FERREIRA JCS, GODOY RLO. **Caracterização físico-química, nutricional e instrumental de quatro acessos de tomate italiano (*Lycopersicum esculentum* Mill) do tipo 'Heirloom' produzido sob manejo orgânico para elaboração de polpa concentrada.** Alimentos e Nutrição Araraquara. 2011; 22(4): 649-56.

RUBIN CA, SCHNEIDER L, CAMPOS MS, DE OLIVEIRA RC. **Compêndio de estudos CONAB. Tomate: Análise dos indicadores da produção e comercialização no mercado mundial, Brasileiro e Catarinense.** 2019; 21.

SAHLIN E, SAVAGE GP, LISTER CE. **Investigation of the antioxidant properties of tomatoes after processing.** Journal of Food Composition and Analysis. 2004; 17(5): 635–47.

SALAS-TOVAR JA, FLORES-GALLEGOS AC, CONTRERAS-ESQUIVEL JC, ESCOBEDO-GARCÍA, MORLETT-CHÁVEZ JA, RODRÍGUEZ-HERRERA R. **Analytical Methods for Pectin Methyltransferase Activity Determination: a Review.** Food Anal. Methods. 2017; 10: 3634–46.

SALAZAR-GONZÁLEZ C, SAN MARTÍN-GONZÁLEZ MF, LÓPEZ-MALO A, SOSA-MORALES ME. **Recent Studies Related to Microwave Processing of Fluid Foods.** Food Bioprocess Technology. 2012; 5(1): 31–46.

SANTOS GGS. **Qualidade físico-química, microbiológica e ocorrência de micotoxinas de alternaria alternata em derivados de tomate.** Dissertação (Doutor em Nutrição Humana), Faculdade de Ciências da Saúde, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

SAMARANAYAKE CP, SASTRY SK. **Effects of controlled-frequency moderate electric fields on pectin methyltransferase and polygalacturonase activities in tomato homogenate.** Food Chemistry. 2016; 199: 265–72.

SEGANTINE NF. **A Influência das Micro-ondas no Abatimento de Gases de Efeito Estufa.** Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, SP. 2020.

SHAMIS Y, CROFT R, TAUBE A, CRAWFORD R J, IVANOVA E P. **Review of the specific effects of microwave radiation on bacterial cells.** Applied Microbiology and Biotechnology. 2012; 96(2): 319–25.

SIGUEMOTO ÉS, FUNCIA EDS, PIRES MN, GUT JAW. **Modeling of time-temperature history and enzymatic inactivation of cloudy apple juice in continuous flow microwave assisted pasteurization.** Food and Bioprocess Processing. 2018; 111: 45–53.

SIGUEMOTO ÉS, PEREIRA LJ, GUT JAW. **Inactivation kinetics of pectin methyltransferase, polyphenol oxidase, and peroxidase in cloudy apple juice under**

microwave and conventional heating to evaluate non-thermal microwave effects. Food and bioprocess technology. 2018; 11(7): 1359-69.

SILVA FAD, MÁXIMO GJ, MARSAIOLI JA, DA SILVA MAAP. **Impacto da secagem com micro-ondas sobre o perfil sensorial de amêndoas de noz macadâmia.** Food Science and Technology. 2007; 27: 553-61.

SILVA JBC. GIORDANO LB, FURUMOTO O, BOITEUX SL, et al. **Cultivo de tomate para industrialização.** Embrapa Hortaliças, Brasília, DF: 2006. Disponível em: https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Tomate/TomateIndustriaI_2ed/index.htm#topo, acesso em: 11 de Fev; 2020.

SILVA RDA, PETTER CO & SCHNEIDER IAH. **Avaliação da perda da coloração artificial de ágatas.** Rem: Revista Escola de Minas. 2007; 60: 477-82.

SOUSA PCD, SERRA OA. **Metodologias de síntese em fase líquida para a obtenção de nanomateriais inorgânicos à base de terras raras.** Química Nova. 2015; 38: 679-96.

STRATAKOS AC, DELGADO-PANDO G, LINTON M, PATTERSON MF, KOIDIS A. **Industrial scale microwave processing of tomato juice using a novel continuous microwave system.** Food Chemistry. 2016; 190: 622-28.

TAJCHAKAVIT S & RAMASWAMY HS. **Microwave Inactivation Kinetics of Pectin Methyl esterase in Orange Juice Under Batch Mode Heating Conditions.** Thermalvs. 1997; 30(1): 85-93.

TAJCHAKAVIT S & RAMASWAMY HS. **Continuous-flow microwave inactivation kinetics of pectin methyl esterase in orange juice.** Journal of Food Process and Preservation. 1997; 21: 365-78.

TAJCHAKAVIT S & RAMASWAMY HS. **Continuous-flow microwave heating of orange juice: Evidence of nonthermal effects.** Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. 1995; 30(3):141-48.

TANAKA A & HOSHINO E. **Similarities between the thermal inactivation kinetics of Bacillus amyloliquefaciens α -amylase in an aqueous solution of sodium dodecyl sulphate and the kinetics in the solution of anionic-phospholipid vesicles.** Biotechnology and applied biochemistry. 2003; 38: 175-81.

TEIXEIRA QLJ, AGUAYO AI, RAMOS AM, BELLOSO MO. **Inactivation of Oxidative Enzymes by High-Intensity Pulsed Electric Field for Retention of Color in Carrot Juice.** Food Bioprocess Technol. 2008, 1: 364.

TEREFE SN, GAMAGE, M.; VILKHU, K.; SIMONS, L. **The kinetics of inactivation of pectin methyl esterase and poligalacturonase in tomato juice by thermosonication.** Food Chemistry. 2009; 117(1): 20-7.

VÁSQUEZ RH. **Comparação da medida de cor de pescado entre sistema de visão computacional e colorímetro convencional no frescor do pescado.** Dissertação (Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos). Escola de Química e Alimentos, Universidade federal do Rio Grande, Rio Grande, RS; 2015.

VOVKI, SIMONOVSKA B, BENCINA M. **Separation of pectin methylesterase isoenzymes from tomato fruits using short monolithic columns.** Journal of Chromatography A. 2005; 1065(1): 121-28.

WU J, GAMAGE TV, VILKHU KS, SIMONS LK, MAWSON R. **Effect of thermosonication on quality improvement of tomato juice.** Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2008; 9(2) 186–95.

WANG S, LIN T, MAN G, LI H, ZHAO L. **Effects of Anti-browning Combinations of Ascorbic Acid, Citric Acid, Nitrogen and Carbon Dioxide on the Quality of Banana Smoothies.** Food Bioprocess Technol. 2014; 7(1): 161–73.

XANTHAKIS E, GOGOU E, TAOUKIS P, AHRNÉ L. **Effect of microwave assisted blanching on the ascorbic acid oxidase inactivation and vitamin C degradation in frozen mangoes.** Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2018; 48: 248-257.

XU B, WANG LK, MIAO WJ, WU QF, LIU YX, SUN Y, GAO C. **Thermal versus microwave inactivation kinetics of lipase and lipoxigenase from wheat germ.** Journal of Food Process Engineering, 2016; 39(3): 247-55.

ZHANG S, YANG R, ZHAO W, LIANG Q, ZHANG Z. **The first ESR observation of radical species generated under pulsed electric fields processing.** LWT-Food Science and Technology, 2011; 44: 1233–35.

ZHU J, KUZNETSOV AV, SANDEEP KP. **Mathematical modeling of continuous flow microwave heating of liquids (effects of dielectric properties and design parameters).** International Journal of Thermal Sciences, 2007; 46(4), 328-341.

ZIELIŃSKI M, CIESIELSKI S, CYDZIK-KWIATKOWSKA A, TUREK J, DĘBOWSKI M. **Influence of microwave radiation on bacterial community structure in biofilm.** Process Biochemistry. 2007; 42 (8): 1250-53.

9 APÊNDICES

APÊNDICE A. Códigos Análise de Imagem no Matlab

- Corte para visualização da área a ser estudada e copiada sua posição:

%Para copiar as coordenadas e definir a posição da área selecionada, basta acionar o botão direito do mouse e clicar em copy position.

```
imag=imread('C:\Users\yohai\OneDrive\Escritorio\PROJETO TOMATE\PROJETO POLPA DE TOMATE copia\Com efeito termico\Teste 1-G1AT3.JPG');
```

```
filgau=fspecial('gaussian', 3,0.5);
imafilt=imfilter(imag,filgau);
imagcrop=imcrop(imafilt);
```

- Selecionadas as 3 posições de corte na amostra, parte-se para a conversão de unidades RGB em La^*b^* das 3 áreas obtidas de acordo com o procedimento anterior:

```
imag=imread('C:\Users\yohai\OneDrive\Escritorio\PROJETO TOMATE\PROJETO POLPA DE TOMATE copia\Com efeito termico\Teste 1-G1AT3.JPG');
filgau=fspecial ('gaussian', 3,0.5);
imafilt=imfilter(imag,filgau);
im1=imcrop(imafilt,[1572.5 2404.5 384 376]);
im2=imcrop(imafilt,[2604.5 2644.5 264 264]);
im3=imcrop(imafilt,[3260.5 2516.5 384 376]);
im4=imcrop(imafilt,[3252.5 1708.5 448 304]);
```

%Cálculos valores médios de RGB

```
R1=mean2(im1(:,:,1))
```

```
R2=mean2(im2(:,:,1))
```

```
R3=mean2(im3(:,:,1))
```

```
G1=mean2(im1(:,:,2))
```

```
G2=mean2(im2(:,:,2))
```

```
G3=mean2(im3(:,:,2))
```

```
B1=mean2(im1(:,:,3))
```

```
B2=mean2(im2(:,:,3))
```

```
B3=mean2(im3(:,:,3))
```

%Conversão de RGB para-Lab

```
lab1=rgb2lab(im1);
```

```
lab2=rgb2lab(im2);
```

```
lab3=rgb2lab(im3);
```

%Cálculo da média dos valores de Lab

```
L1=mean2(lab1(:,:,1))
```

```
L2=mean2(lab2(:,:,1))
```

```
L3=mean2(lab3(:,:,1))
```

```
a1=mean2(lab1(:,:,2))
```

```
a2=mean2(lab2(:,:,2))
```

```
a3=mean2(lab3(:,:,2))
```

```
b1=mean2(lab1(:,:,3))
```

```
b2=mean2(lab2(:,:,3))
```

```
b3=mean2(lab3(:,:,3))
```