



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Estudo da degradação de vitamina C e carotenoides em polpa de acerola durante aquecimento ôhmico e convencional

Autor: Débora Pez Jaeschke

Orientador: Prof. Dra. Ligia Damasceno Ferreira Marczak

Co-orientador: Dra. Giovana Domeneghini Mercali

Porto Alegre, 19 de dezembro de 2013

Sumário

1	Introdução	8
2	Revisão Bibliográfica	10
2.1	Acerola	10
2.2	Vitamina C	10
2.2.1	Fatores que influenciam a degradação de Vitamina C	12
2.3	Carotenoides	13
2.4	Tratamento térmico em alimentos	16
2.5	Aquecimento ôhmico	18
3	Materiais e Métodos	21
3.1	Polpa de acerola	21
3.2	Pasteurização de polpa de acerola via aquecimento ôhmico	21
3.3	Pasteurização de polpa de acerola via aquecimento convencional	23
3.4	Determinação de Vitamina C	23
3.5	Determinação de parâmetros cinéticos e análise estatística	24
3.6	Determinação de Carotenoides	24
3.7	Análise de Cor	25
3.8	Aquecimento ôhmico de polpa de acerola em atmosfera modificada	25
4	Resultados	27
4.1	Estudo de degradação de vitamina C	27
4.2	Avaliação da degradação de vitamina C em atmosfera modificada	30
4.3	Estudo de degradação de carotenoides	31
4.4	Avaliação da degradação de carotenoides em atmosfera modificada	32
4.5	Mudanças de cor na polpa de acerola	33
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	37
6	Referências	39

Agradecimentos

Às orientadoras Ligia e Giovana pelo apoio, dedicação, orientação e paciência na realização da parte experimental e escrita deste trabalho.

Aos meus pais por estarem sempre presentes, mesmo longe. Ao Guilherme, pela paciência e apoio.

À Érita e a Jaqueline pela amizade e ajuda não somente neste trabalho, mas durante todo o período de graduação. Aos colegas pela parceria e amizade.

Resumo

Este trabalho possui como objetivo principal avaliar os efeitos não-térmicos da tecnologia de aquecimento ôhmico na degradação de compostos bioativos em polpa de acerola. Para tanto, comparou-se a degradação de vitamina C, a degradação de carotenoides e, ainda, mudanças de cor na polpa de acerola durante tratamento térmico utilizando aquecimento ôhmico e aquecimento convencional. Os estudos de degradação de vitamina C foram realizados em quatro temperaturas (80, 85, 90 e 95°C) durante 60 minutos de tratamento térmico, sendo coletadas amostras a cada 10 minutos de aquecimento. Os dados de degradação de vitamina C foram ajustados ao modelo cinético de primeira ordem. A degradação de carotenoides foi avaliada em duas temperaturas (95 e 90°C), nos tempos zero e cinquenta minutos de aquecimento. Os resultados demonstram que não há degradação de carotenoides. A degradação de vitamina C variou de 12,3 a 13,0 % utilizando aquecimento ôhmico e de 10,5 a 13,2% quando o aquecimento convencional foi utilizado. Após a realização desses experimentos verificou-se que a temperatura e o tipo de tratamento térmico não exerceram influência significativa na degradação de ácido ascórbico e de carotenoides. Com o intuito de elucidar esse comportamento realizou-se experimentos em atmosfera modificada. Esses experimentos foram realizados a 90°C via aquecimento ôhmico, utilizando atmosfera rica em oxigênio, em um primeiro momento, e de nitrogênio, posteriormente. A degradação de ácido ascórbico e de carotenoides aumentou em atmosfera rica em oxigênio, apresentando valores de 14,8 e 21,4%, respectivamente. A utilização de nitrogênio no *headspace* da célula diminuiu a degradação de ácido ascórbico; os carotenoides continuaram apresentando degradação muito baixa. Esses resultados mostram que possivelmente o oxigênio é o reagente limitante da reação de oxidação desses compostos. Estudos demonstram (ou sugerem) que as antocianinas presentes na polpa de acerola exercem um efeito protetor sob o ácido ascórbico e os carotenoides, pois essas se degradam preferencialmente, consumindo o oxigênio dissolvido no meio. Os resultados da avaliação de mudança de cor confirmaram os resultados obtidos, visto que o composto b^* , que pode estar relacionado com a presença de carotenoides na polpa de acerola, pouco variou durante o tratamento térmico; o parâmetro a^* , relacionado à presença de antocianinas, variou consideravelmente e o parâmetro L^* , relacionado ao escurecimento não enzimático e a consequente degradação de ácido ascórbico, variou consideravelmente. Portanto, para as condições avaliadas, os efeitos não-térmicos do aquecimento ôhmico não exerceram influência na degradação de vitamina C e carotenoides. Deve-se realizar estudos em outras condições de tensão e frequência para uma melhor compreensão desses fenômenos.

Lista de Figuras

Figura 2.1. Mecanismo de degradação aeróbio de ácido L-ascórbico.....	12
Figura 2.2. Molécula de Vitamina A.	14
Figura 2.3. Estrutura dos principais carotenoides encontrados em frutas e vegetais.....	15
Figura 2.4. Esquema dos mecanismos de degradação de carotenoides.....	16
Figura 2.5. Espectro de absorção de carotenoides; (—) licopeno, (----) α -caroteno, (-.-.) β -caroteno e (.....) α -caroteno em éter de petróleo	16
Figura 3.1. Sistema de aquecimento ôhmico utilizado na realização dos experimentos; (a) célula ôhmica, (b) eletrodos e (c) variador de tensão e estabilizador.	21
Figura 3.2. Interface do software utilizado para aquisição de dados.	22
Figura 4.3. Varredura realizada em espectrofotômetro no ultravioleta visível para amostras de polpa de acerola <i>in natura</i> e para amostras coletadas nos tempos 0 e 50 minutos de aquecimento ôhmico a 90°C.	32
Figura 4.4. Variação de a^* com o tempo de aquecimento ôhmico para as temperaturas de 80, 85, 90 e 95°C.....	34
Figura 4.5. Variação de L^* com o tempo de aquecimento convencional para as temperaturas de 80, 85, 90 e 95°C.....	28
Figura 4.6. Variação de ΔE^* com o tempo de aquecimento ôhmico para as temperaturas de 80, 85, 90 e 95°C.....	29

Lista de Tabelas

Tabela 4.1. Valores do parâmetro cinético k , D e $t_{1/2}$ para as diferentes temperaturas e tratamentos térmicos avaliados.....	29
Tabela 4.2. Concentração de O_2 , em mg/L, na polpa de acerola <i>in natura</i> e nas polpas aerada e deaerada antes e após aquecimento ôhmico.	30
Tabela 4.3. Valores do parâmetro cinético k , D e $t_{1/2}$ para os experimentos utilizando aquecimento ôhmico a uma temperatura de 90°C em atmosfera modificada de oxigênio, nitrogênio e atmosfera não modificada.....	31
Tabela 4.4. Porcentagem de degradação e concentração de beta-caroteno, em $\mu\text{g/g}$ de polpa de acerola, no tempo inicial e após 50 min de processamento térmico nas temperaturas de 85, 90 e 95°C utilizando aquecimento ôhmico e convencional.	31
Tabela 4.5. Concentração de betacaroteno no tempo 0 e 50 min e porcentagem de degradação para os experimentos utilizando aquecimento ôhmico a uma temperatura de 90°C em atmosfera controlada de oxigênio, nitrogênio e atmosfera não modificada.....	33
Tabela 4.6. Comparação dos valores de a^* , b^* , L^* e ΔE^* após 60 min de tratamento térmico de polpa de acerola utilizando aquecimento ôhmico e convencional nas temperaturas de 80, 85, 90 e 95°C.....	33

Lista de Símbolos

A	Área da seção transversal da amostra [m ²]
AA	Ácido ascórbico
D	Valor D
DCG	Ácido 2, 3 – dicetogulônico
DHA	Ácido dehidroascórbico
I	Corrente elétrica [A]
L	Espaço entre os eletrodos [m]
mg	Miligrama
min	Minuto
Q	Taxa de calor [J.s ⁻¹]
t _{1/2}	Tempo de meia vida [min]
γ	Constante de proporcionalidade [°C ⁻¹]
λ	Comprimento de onda [nm]
σ	Condutividade elétrica [S.m ⁻¹]
C	Concentração em “t”
C ₀	Concentração inicial de vitamina C em t = 0 s [mg/g de polpa]
E _a	Energia de Ativação [kJ mol ⁻¹]
T	Temperatura [K]
k	Constante de velocidade de reação [min ⁻¹]
k ₀	Constante de Arrhenius [min ⁻¹]
t	Tempo [min]

1 Introdução

A acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) é uma fruta tropical conhecida pelo seu alto teor de vitamina C, além de ser rica em carotenoides, antocianinas, ferro e cálcio. De sabor e aroma agradável e de fácil cultivo, a acerola possui potencial para o desenvolvimento de uma gama de produtos industrializados. Devido à essas características, a acerola é considerada uma fruta de alto valor nutricional e comercial.

Alguns estudos apontam que a presença de compostos antioxidantes presentes em frutas, grãos e vegetais está fortemente ligada à prevenção de doenças cardiovasculares e alguns tipos de câncer. Conseqüentemente, se está percebendo uma tendência dos consumidores a buscar alimentos naturais e mais saudáveis. Esse mercado tem crescido e contribuído para o aumento do consumo de sucos e bebidas a base de frutas. No Brasil, os produtos mais comercializados à base de acerola são a fruta *in natura*, a polpa congelada e o suco pasteurizado. A polpa de fruta é obtida da parte comestível do fruto, após trituração ou despulpamento, e é utilizada na produção de sucos, néctares, geleias e doces.

Como a acerola é um produto perecível, se torna necessário para a indústria fazer uso de técnicas para promover o aumento da vida útil dos alimentos produzidos a partir da fruta. Um dos métodos mais utilizados para promover a inativação de enzimas e micro-organismos deteriorantes dos alimentos é o tratamento térmico. Contudo, estudos indicam que os métodos de tratamento térmico tradicionais podem provocar mudanças nutricionais e sensoriais nos alimentos, tais como, degradação de compostos bioativos e mudanças de cor, sabor, textura e odor.

Como alternativa aos processos tradicionais surgem as chamadas tecnologias emergentes, como o aquecimento ôhmico. Através da utilização dessas tecnologias, busca-se a obtenção de produtos de maior qualidade, com características sensoriais e nutricionais que se aproximam das características dos produtos *in natura* e, ainda, produtos que sejam seguros, livres de patógenos e toxinas.

O aquecimento ôhmico é um processo que consiste na passagem de corrente elétrica através de um alimento, transformando energia elétrica em energia térmica. Recentemente, esse processo tem recebido maior interesse, pois através desse método é possível aquecer um alimento de maneira rápida e uniforme, o que, supostamente, minimiza perdas nutricionais e sensoriais. Além disso, a tecnologia de aquecimento ôhmico é considerada ambientalmente favorável pois não utiliza água ou vapor como meio de aquecimento e possui alto aproveitamento energético, uma vez que há uma conversão superior a 90% da energia elétrica em térmica. No caso de alimentos heterogêneos e particulados, o aquecimento ôhmico também é considerado interessante, uma vez que, através da aplicação dessa tecnologia, é possível que todas as fases possuam a mesma taxa de aquecimento, garantindo, assim, a minimização de sobreaquecimento e a conseqüente perda nutricional.

O principal objetivo desse trabalho foi avaliar os efeitos não-térmicos que possivelmente ocorrem durante o aquecimento ôhmico na degradação de compostos bioativos. A passagem de corrente elétrica alternada faz com que as moléculas eletricamente carregadas se polarizem, havendo um alinhamento das mesmas de acordo com o campo elétrico oscilante. Neste trabalho, deseja-se avaliar se o processo de

polarização apresenta alguma influência sobre as reações de degradação de compostos bioativos. Para tanto, foi estudada a influência da temperatura e do tipo de processamento (métodos de aquecimento convencional e aquecimento ôhmico) na degradação de vitamina C e carotenoides em polpa de acerola durante tratamento térmico. Além disso, objetiva-se ajustar os dados de degradação de vitamina C a um modelo cinético e comparar com os resultados encontrados na literatura. Ainda, esse trabalho visa avaliar possíveis mudanças de cor na polpa de acerola durante o tempo de tratamento térmico e realizar uma comparação e relação com a degradação de compostos bioativos presentes na polpa.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Acerola

A aceroleira é uma planta originária da América Central, tendo sido propagada para a América do Sul devido às boas adaptações ao clima e solo. Durante o ano são observados longos períodos frutíferos, ocorrendo a formação de flores e frutos em diferentes estágios (Vendramini e Trugo, 2000). Como a planta se reproduz através de sementes, no Brasil, existe uma grande variedade de espécies de acerola (De Rosso e Mercadante, 2005).

O amadurecimento da fruta envolve uma série de reações, como a hidrólise de amido, conversão dos cloroplastos em cromoplastos, produção de carotenoides, antocianinas, compostos fenólicos e formação de compostos voláteis. A composição química da acerola é muito variável e depende da espécie, das condições ambientais às quais a planta está exposta e, ainda, do estágio de maturidade no qual a fruta se encontra (Vendramini e Trugo, 2000).

A acerola é uma fruta rica em compostos antioxidantes, como vitaminas, compostos fenólicos e carotenoides. Esses compostos bioativos são considerados de extrema importância em uma dieta, podendo promover a prevenção, proteção e redução de prejuízos causados pela constante exposição à fatores externos como poluição, radiação UV, bem como pelos processos fitopatológicos, como obesidade, envelhecimento e inflamações. Assim, a associação de uma dieta rica em frutas e vegetais e a diminuição do risco de doenças cardiovasculares e alguns tipos de câncer estão fortemente ligadas aos compostos antioxidantes presentes nesses alimentos (Garcı *et al.*, 2004; Pereira *et al.*, 2013).

Nesse contexto, a importância da acerola têm crescido nos últimos anos, principalmente por ser considerada uma das mais importantes fontes de vitamina C, com teores dessa vitamina podendo variar de 800 a 4000 mg por 100g de polpa. Além do alto teor de vitamina C, a acerola apresenta teores consideráveis de compostos fenólicos, como antocianinas e carotenoides (Matta, Moretti e Cabral, 2004; Lima *et al.*, 2005).

2.2 Vitamina C

Vitamina C é o termo genérico utilizado para todos os componentes que exibem atividade biológica do ácido L-ascórbico (AA). No organismo humano, a vitamina C atua na prevenção de escorbuto e na formação do colágeno, promovendo a manutenção da saúde da pele, gengivas e vasos sanguíneos; também atua na absorção de ferro, na redução de colesterol, na inibição da formação de nitrosamina e reage com oxigênio singlete e outros radicais livres. Como é um antioxidante, supostamente reduz o risco de arteriosclerose, doenças cardiovasculares e algumas formas de câncer (Wills, Wimalasiri e Greenfield, 1984; Serpen e Gökmen, 2007).

A quantidade de vitamina C em um determinado produto, além de ser um importante indicador da qualidade nutricional, pode ser utilizada como um indicador de qualidade do processo a qual o alimento foi submetido, sendo possível avaliar as condições de processo e armazenamento a partir da concentração de ácido ascórbico em determinado produto. Quando a vitamina C é retida, há fortes indícios de que o produto foi submetido a condições relativamente brandas de processamento e, portanto, possivelmente, outros

nutrientes também foram retidos (Giannakourou e Taoukis, 2003; Serpen e Gökmen, 2007; Hiwilepo-Van Hal *et al.*, 2012).

O ácido ascórbico é instável e facilmente oxidado à ácido L-dehidroascórbico (DHA) (Vernin *et al.*, 1997). O AA é o principal composto ativo, porém a forma DHA também apresenta atividade biológica. Como o DHA é facilmente convertido em AA no organismo humano é importante conhecer os teores de ambos os compostos em frutas e vegetais que contenham vitamina C. Contudo, nem sempre o teor de DHA é levado em conta na quantificação de vitamina C. Isso se deve pela baixa representatividade de DHA na quantidade total de vitamina C. Em hortaliças, por exemplo, o DHA representa menos de 10% do total de vitamina C (Wills, Wimalasiri e Greenfield, 1984; Lee e Kader, 2000). Apesar da importância do ácido L-dehidroascórbico, muitos trabalhos referem-se ao teor de vitamina C apenas ao teor de AA, o que pode ser explicado pelo fato de que o método mais utilizado para determinação de vitamina C, método titulométrico que utiliza 2,3-dicloroindofenol, apenas determina o teor de AA (Vieira, Teixeira e Silva, 2000).

O teor de vitamina C em determinado produto está relacionado tanto às condições pré-colheita como pós-colheita. Os fatores pré-colheita incluem as condições climáticas a que o cultivar está sendo submetido, às práticas de agricultura utilizadas e o estágio de maturação da fruta. Os fatores pós-colheita incluem as condições de processamento e armazenamento (Lee e Kader, 2000).

Durante o armazenamento e processamento, a degradação de vitamina C pode ocorrer através de dois mecanismos: aeróbio e anaeróbio. As taxas de degradação dependem das condições a que o produto é submetido durante a estocagem, o processamento e acondicionamento (Polydera, Stoforos e Taoukis, 2003). A oxidação de ácido ascórbico ocorre principalmente durante o processamento, enquanto que a degradação anaeróbia ocorre principalmente durante o armazenamento (Burdurlu, Koca e Karadeniz, 2006).

O mecanismo de degradação aeróbio pode ser visualizado na Figura 2.1. Esse mecanismo pode ser catalisado ou não, dependendo do meio que se encontra o AA. Contudo, estudos sugerem que a reação não catalisada apresenta taxas muito lentas e que quantidades traços de íons metálicos já são suficientes para catalisar a reação de degradação, sendo responsáveis pela quase totalidade da degradação oxidativa. A oxidação catalisada por metais ocorre através da formação de um composto ternário, formado por ascorbato, oxigênio e o íon metálico. Esse complexo ternário, é então transformado em DHA. A perda de atividade biológica de vitamina C durante a degradação oxidativa ocorre através da hidrólise de DHA, ocorrendo a formação de ácido 2,3-dicetogulônico (DCG). A taxa de degradação de DHA aumenta com o aumento da temperatura, mas não é afetada pela presença ou ausência de oxigênio (Fennema, 1996).

O mecanismo de degradação anaeróbia não está completamente elucidado. Esse tipo de degradação apresenta taxas mais lentas que a degradação oxidativa e se torna mais significativa em produtos já embalados, após a retirada do oxigênio do meio.

Assim, ambos os mecanismos de degradação possuem formação de produtos intermediários que não podem ser determinados por análise química e levam à formação de ácido L-dehidroascórbico, que através de posterior degradação, leva à formação de ácido 2,3-dicetogulônico.

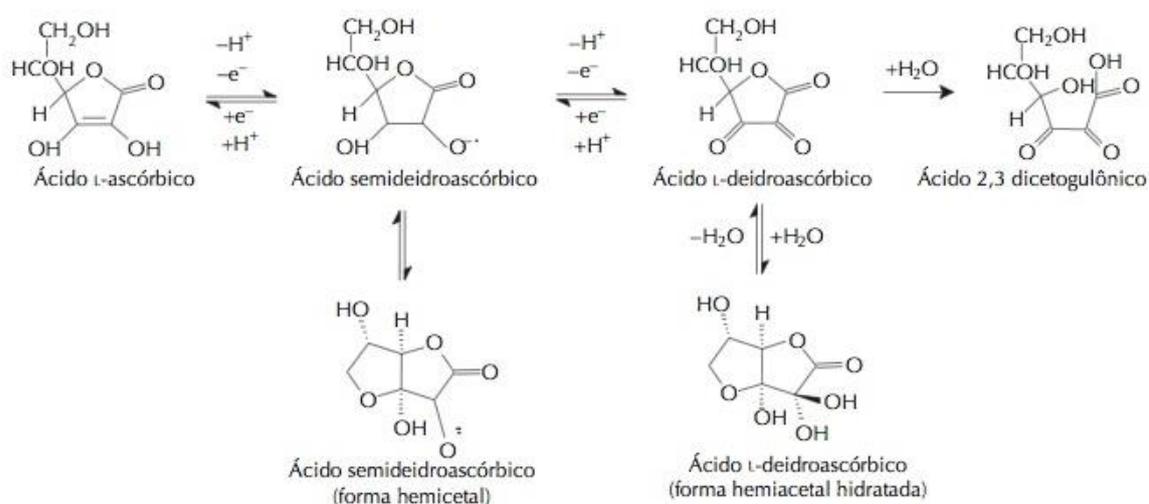


Figura 2.1. Mecanismo de degradação aeróbia de ácido L-ascórbico. Adaptado de Fennema, 1996.

Conforme já descrito, perdas de vitamina C estão relacionadas a vários fatores: tempo de estocagem, altas temperaturas, danos físicos, presença de luz, pH do meio, concentração salina do meio, presença de íons metálicos (Cu^{2+} , Ag^+ , Fe^{3+}), de aminoácidos e açúcares (Kennedy *et al.*, 1992; Azevedo-Meleiro e Rodriguez-Amaya, 2004; Assiry, Sastry e Samaranyake, 2006; Serpen e Gökmen, 2007). No subcapítulo seguinte apresenta-se com maiores detalhes a influência de alguns desses fatores.

Para prever a estabilidade da vitamina C em diferentes alimentos, são realizados estudos de cinética de degradação (Vikram, Ramesh e Prapulla, 2005). Essa cinética é variável de alimento para alimento e depende dos vários fatores acima mencionados. Por isso, é importante a avaliação do efeito de diferentes temperaturas e condições de processamento nas perdas do nutriente (Vikram, Ramesh e Prapulla, 2005). Ajuste dos dados de cinética aos modelos de ordem zero, primeira e segunda ordem tem sido reportados (Al-Zubaidy e Khalil, 2007).

2.2.1 Fatores que influenciam a degradação de Vitamina C

Temperatura

A temperatura tem sido reportada como o fator que mais influencia na degradação de ácido L-ascórbico, sendo esse um composto termolábil (Kennedy *et al.*, 1992). A equação de Arrhenius é frequentemente utilizada para modelar a dependência da temperatura de compostos nutricionais em alimentos (Zheng e Lu, 2011). Muitos autores já estudaram a cinética de degradação de ácido ascórbico em sucos cítricos e polpas de frutas em condições de pasteurização e ajuste dos dados de cinética aos modelos de ordem zero, primeira e segunda ordem tem sido reportados (Al-Zubaidy e Khalil, 2007).

Segundo Zheng e Lu (2011) e Vieira, Teixeira e Silva (2000), a cinética de degradação de ácido ascórbico pode ser descrita adequadamente por um modelo de primeira ordem em suco de abacaxi e em néctar de cupuaçu, respectivamente. Para a acerola, Mercali *et al.* (2014) também relataram um ajuste dos dados cinéticos ao modelo de primeira ordem em condições de pasteurização.

pH

O pH do meio em que se encontra o AA é considerado como sendo um dos mais importantes fatores que influenciam a degradação do composto. O AA é instável em pH neutro e alcalino. Estudos indicam que a degradação anaeróbia ocorre em pH variando de 3 a 4,5 e possui taxa de reação máxima a um pH de 4,1. Já a degradação aeróbia é favorecida em condições de pH alcalino, visto que a estabilidade do DHA é muito baixa em pH maior do que 5,5, o que favorece a formação de DCG. (Fennema, 1996; Assiry, Sastry e Samaranayake, 2006)

Presença de aminoácidos

O ácido ascórbico e os aminoácidos interagem entre si através de reações de Maillard. A reação de Maillard inclui uma série de reações complexas, iniciadas pela reação de condensação entre um açúcar e um aminoácido. Essa reação resulta na formação de vários produtos, que podem alterar o odor e sabor, bem como a coloração do alimento (Adams e Kimpe, 2009).

A formação de pigmentos resulta no chamado escurecimento não-enzimático, e ocorre, preferencialmente, em temperaturas elevadas. Essa reação de escurecimento, também chamada reação de Maillard, pode acontecer em presença de ácido ascórbico e ácido dehidroascórbico e aminoácidos. Como ácido ascórbico e aminoácidos são essenciais para a nutrição humana, as reações de escurecimento irão implicar perdas consideráveis desses nutrientes e, conseqüentemente, perda de valor nutricional (Yu *et al.*, 1974)

Degradação enzimática

O ácido ascórbico é degradado principalmente pela enzima L-ascorbato oxidase. Nas plantas essa enzima é encontrada livremente no císol ou ligada à membrana celular. Contudo, em alimentos processados, normalmente essa degradação é evitada visto que o branqueamento e a pasteurização atuam na destruição da enzima (Leong e Oey, 2014). Outras enzimas que atuam na degradação de AA, porém com menor intensidade, são a fenolase, a citocromo-oxidase e a peroxidase (Lee e Kader, 2000).

Oxigênio

A degradação aeróbia de ácido ascórbico depende da disponibilidade de oxigênio dissolvido no meio. A solubilidade do oxigênio em meios líquidos, por sua vez, depende fortemente da temperatura e da composição da mistura em que se encontra dissolvido o oxigênio (Fennema, 1996).

Atividade de água

Normalmente, quanto maior a atividade de água, maior a degradação de ácido ascórbico. Isso se deve, possivelmente, pelo fato de a água ser solvente para reagentes e catalisadores, favorecendo a reação (Fennema, 1996; Lešková *et al.*, 2006).

2.3 Carotenoides

Carotenoides são os pigmentos mais encontrados na natureza. Possuem importante função na dieta humana pois são compostos precursores da vitamina A e atuam como

antioxidantes (Filho *et al.*, 2008). Assim, contribuem para a diminuição do risco de doenças degenerativas, como câncer, doenças cardiovasculares, catarata, degeneração macular e fortalecimento do sistema imunológico (Rodríguez-Amaya *et al.*, 2008). Embora aproximadamente 700 tipos de carotenoides foram identificados, apenas aqueles que não possuem substituintes no anel β e apresentam uma cadeia poliênica de 11 carbonos com sistema de ligações duplas conjugadas, como apresentado na Figura 2.2, possuem atividade pró-vitáminica A. Esse tipo de estrutura é encontrada em aproximadamente 60 tipos de carotenoides (Rodríguez-Amaya, 2001; Meléndez-Martínez, Vicario e Heredia, 2007). A molécula de vitamina A, ou retinol, é apresentada na Figura 2.2.

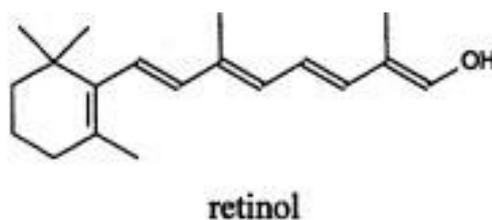


Figura 2.2. Molécula de Vitamina A.
Aptado de Meléndez-Martínez, Vicario e Heredia, 2007.

Carotenoides podem ser compostos por dois grupos estruturais, uma cadeia de hidrocarboneto e uma xantofila oxigenada. Os carotenoides oxigenados (xantofilas) podem conter grupos hidroxilas, epóxi, aldeídos e cetonas. Dentre os vários tipos de carotenoides, os mais encontrados em frutas e vegetais são o β -caroteno, o licopeno, a luteína e a zeaxantina (Fennema, 1996; Filho *et al.*, 2008). Na Figura 2.3 são apresentados alguns desses carotenoides.

A composição de carotenoides nos alimentos é influenciada por uma série de fatores, tais como o estágio de maturação, as condições geográficas e de cultivo da planta, as condições de colheita e pós-colheita, o processamento e o armazenamento, entre outros. Muitos estudos indicam que os carotenoides estão, normalmente, presentes em maior quantidade na casca das frutas do que na polpa. Em frutas e vegetais que contém carotenoides, o amadurecimento é normalmente acompanhado pelo aumento da concentração de carotenoides, ocorrendo um aumento na quantidade de carotenoides bem como no número de tipos, pela decomposição das clorofilas e pela transformação dos cloroplastos em cromoplastos (Rodríguez-Amaya, 2001).

Os carotenoides presentes na acerola normalmente são a luteína, a β -criptoxantina, o α -caroteno e o β -caroteno e a violaxantina, encontrados em concentrações diferentes, dependendo da espécie e da safra, sendo o β -caroteno o carotenoide majoritário (Azevedo-Meleiro e Rodríguez-Amaya, 2004; De Rosso e Mercadante, 2005). Mezadri, Pérez-Gálvez e Hornero-Méndez, (2005) encontraram as seguintes concentrações de carotenoides em polpa de acerola: 536,55 mg/100g de polpa de β -caroteno, 417,46 mg/100g de polpa de β -criptoxantina, 99,21 mg/100g de polpa de luteína e 395,33 mg/100g de polpa de violaxantina.

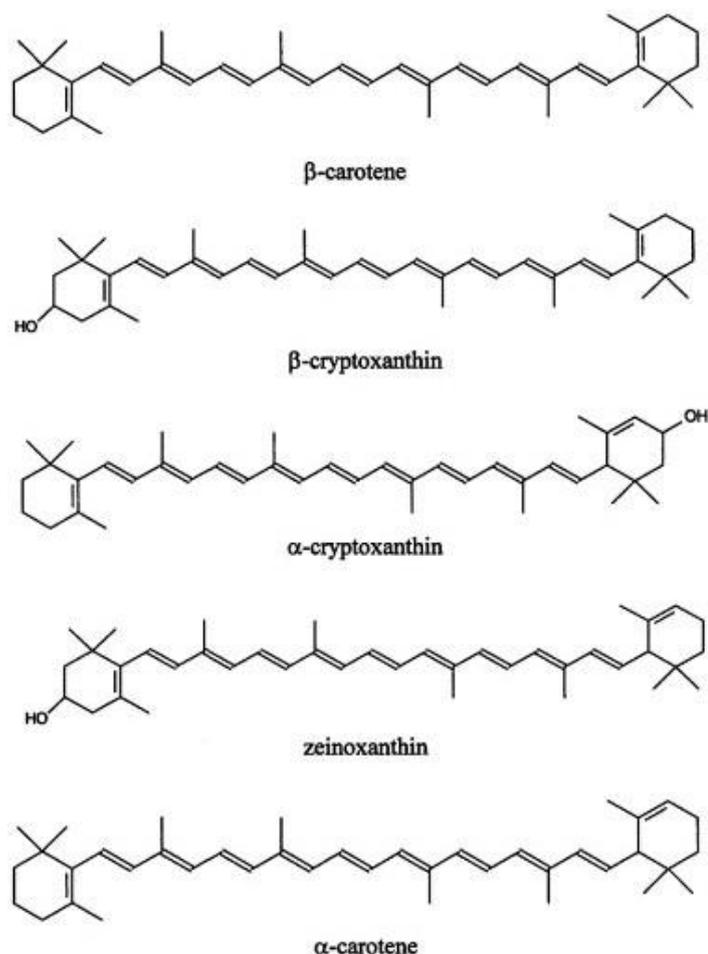


Figura 2.3. Estrutura dos principais carotenoides encontrados em frutas e vegetais.
Adaptado de Rodriguez-Amaya, 2001

Os carotenoides são suscetíveis à isomerização e oxidação durante o processamento e armazenamento. As consequências são perda de cor, redução da atividade biológica e formação de compostos voláteis. Esses compostos voláteis podem ser causadores de sabores agradáveis ou desagradáveis, dependendo do alimento.

A oxidação é a principal forma de degradação de carotenoides e é fortemente dependente do tipo e estrutura dos carotenoides presentes no alimento. Além disso, depende da presença de oxigênio no meio e é catalisada por metais, enzimas, lipídios insaturados, exposição à luz e altas temperaturas. A primeira etapa da oxidação é a formação de epóxidos e apocarotenoides. Posteriormente, ocorre a fragmentação desses compostos em outros de baixa massa molecular, similares aos produzidos na oxidação de ácidos graxos. Nessa última etapa ocorre perda total de cor e atividade biológica.

A isomerização é a mudança da forma *trans* para a *cis*, sendo promovida pela presença de luz, ácidos e calor. Essa mudança promove mudanças de cor e perda de atividade biológica (Rodriguez-Amaya, 2001). A Figura 2.4 apresenta um esquema dos tipos de degradação que podem ocorrer em carotenoides.

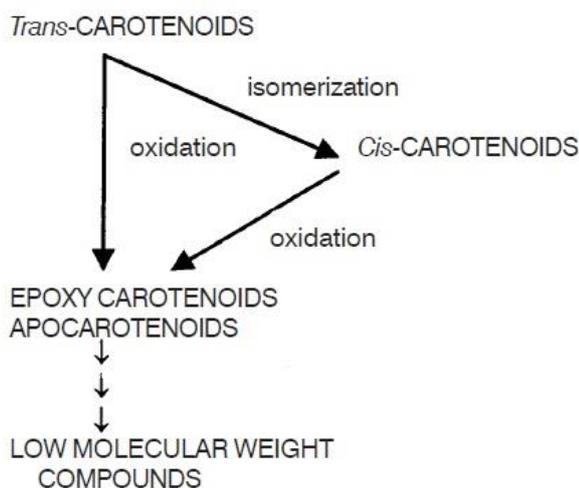


Figura 2.4. Esquema dos mecanismos de degradação de carotenoides.
Adaptado de Rodriguez-Amaya, 2001

Carotenoides são lipofílicos, insolúveis em água e solúveis em solventes orgânicos, como acetona, álcool, éter etílico, clorofórmio e etil acetato. As ligações duplas conjugadas promovem a absorção da luz e são chamadas de cromóforo. A cor permite monitorar a presença em diferentes etapas durante a análise de carotenoides. Perdas ou mudanças de cor dão uma indicação imediata de que está havendo mudança estrutural e degradação de carotenoides. A maioria dos carotenoides apresenta absorvância máxima em três comprimentos de onda, conforme pode ser visualizado na Figura 2.5. Quanto maior o número de ligações duplas conjugadas, maior o comprimento de onda em que ocorrerá a absorção.

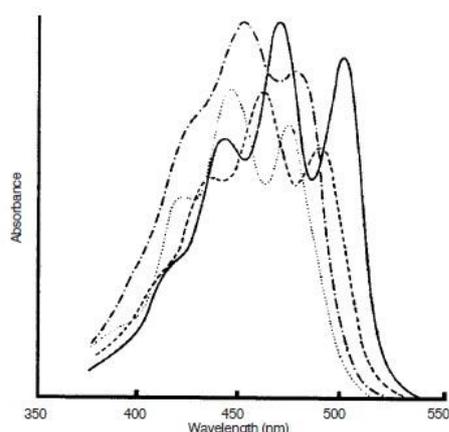


Figura 2.5. Espectro de absorção de carotenoides; (—) lícopeno, (----) α-caroteno, (-.-.-) β-caroteno e (.....) α-caroteno em éter de petróleo.
Adaptado de Rodriguez-Amaya, 2001

2.4 Tratamento térmico em alimentos

O tratamento térmico é o método mais utilizado para preservação e aumento da vida de prateleira dos alimentos (Awuah, Ramaswamy e Economides, 2007); isso se deve aos efeitos benéficos em termos de qualidade sensorial dos alimentos, bem como pelos efeitos preservativos proporcionados por esse tipo de tratamento (Fellows, 2000).

O principal objetivo da utilização de calor em alimentos é a inativação de micro-organismos patogênicos e deteriorantes presentes no alimento. Além disso, através do tratamento térmico é possível inativar enzimas, as quais podem provocar escurecimento e mudanças de sabor no alimento. O aquecimento de um alimento também acarreta mudanças físicas e reações químicas, como a gelatinização, a desnaturação e o escurecimento de proteínas, o que, por sua vez, afetam as características sensoriais do alimento como cor, sabor e textura. Essa mudança nas características do produto podem ser desejáveis ou indesejáveis, dependendo do alimento (Fellows, 2000).

Os processos de tratamento térmico variam em intensidade, podendo ser brandos, como a pasteurização, até muito severos, como a esterilização. A intensidade do processo afeta tanto o tempo de vida útil como as características sensoriais e nutricionais do alimento (Brennan, 2006). Mesmo os processos mais brandos podem causar a destruição de alguns componentes nutricionais, o que indica que os métodos de processamento térmico muitas vezes são vistos como de baixa qualidade e de baixo valor agregado. Tratamentos térmicos utilizando temperaturas abaixo de 100°C são utilizados em sucos e bebidas à base de frutas. Esse tipo de tratamento que utiliza temperaturas amenas durante um determinado período de tempo é denominado pasteurização. As condições de pasteurização são dadas pelo binômio tempo-temperatura necessário para destruir o micro-organismo patógeno ou enzima mais resistente presente no alimento a ser processado e a sensibilidade do alimento ao calor. Como as vitaminas, cor e sabor também dependem das condições de processamento, essas condições devem ser otimizadas para garantir uma maior qualidade nutricional e sensorial do alimento. Para sucos de frutas recomenda-se utilizar binômio tempo-temperatura de 77°C durante 1 minuto ou 88°C por 15 segundos (Fellows, 2000).

Existem basicamente dois tipos de pasteurização: HTST (*high temperature short time*), que utiliza altas temperaturas por curto período de tempo, da ordem de segundos; e LTLT (*low temperature low time*) que utiliza temperaturas relativamente baixas por um período de tempo relativamente alto, normalmente 30 minutos ou mais. A otimização do processo de pasteurização depende do produto a ser processado, porém, normalmente, os processos HTST resultam em produtos de maior qualidade, proporcionando uma maior destruição de enzimas e micro-organismos, mantendo as características sensoriais e nutricionais do produto (Fellows, 2000; Karel e Lund, 2003; Awuah, Ramaswamy e Economides, 2007).

Quando se utiliza processos HTST, geralmente, se faz uso de trocadores de placas, com seções de aquecimento, resfriamento e *holding* para garantir a temperatura de pasteurização durante o tempo requerido para o processo. A taxa de aquecimento nesse tipo de processo é mais alta do que nos processos LTLT e acontece através dos mecanismos de condução e convecção (Smith, 2011).

A pasteurização convencional pode ser não uniforme em alimentos contendo sólidos particulados e alimentos viscosos. O sobreaquecimento dos produtos pode promover reações de degradação, geralmente relacionadas com perda de cor e formação de sabor e aromas desagradáveis, bem como a produção de químicos perigosos, como precursores do furano, incluindo o 5-HMF e o furfural, além de perdas dos nutrientes do alimento. Portanto, devido a não-uniformidade de aquecimento, esse tipo de tratamento térmico é limitado, sendo possível somente em alimentos líquidos e de baixa viscosidade.

Alternativamente, algumas tecnologias emergentes têm sido estudadas com o objetivo de superar essas limitações dos processos térmicos convencionais. Essas tecnologias, como é o caso do aquecimento ôhmico, proporcionam um aquecimento mais uniforme e rápido do alimento, prevenindo ou diminuindo essas alterações indesejáveis que podem ocorrer nos produtos (Louarme e Billaud, 2012).

2.5 Aquecimento ôhmico

Recentemente, tecnologias que utilizam corrente elétrica através de alimentos com a finalidade de aquecimento têm atraído atenção da indústria alimentícia. Algumas dessas tecnologias de aquecimento estão sendo utilizadas em escala comercial para uma grande variedade de produtos. O aquecimento ôhmico vem sendo desenvolvido durante as duas últimas décadas e já se encontra em operação em escala comercial para processamento de alimentos, especialmente aqueles que contêm partículas (Yildiz-Turp *et al.*, 2013). No século dezenove, muitas patentes foram abertas para utilização de geração de calor através de uma resistência para esterilização de alimentos líquidos. Em 1993, com a aprovação do FDA (Food and Drug Administration), o processamento de alimentos ácidos a temperatura ambiente tornou-se legalizado. Desde então, os processos de aquecimento ôhmico têm sido utilizados comercialmente no Japão, Estados Unidos e Europa (Farahnaky, Azizi e Gavahian, 2012).

O aquecimento ôhmico é um processo em que corrente elétrica alternada passa através de um alimento para produzir calor. Como muitos alimentos são constituídos de espécies iônicas, como sais e ácidos, a corrente elétrica é conduzida através do alimento. Nesse processo, o alimento atua como uma resistência à passagem de corrente, ocasionando a geração de energia interna durante o processo (Sarang, Sastry e Knipe, 2008; Moreno *et al.*, 2012). O aquecimento ôhmico é considerado uma tecnologia para processamento HTST de alimentos que contêm partículas, porém sem a limitação da transferência de calor dos processos convencionais (Moreno *et al.*, 2012).

A principal vantagem do aquecimento ôhmico, se comparado aos métodos de aquecimento convencional, é a maior uniformidade de aquecimento. Isso é devido ao fato que nesse tipo de aquecimento a geração e a transferência de calor se dá do centro do alimento para a superfície, diferente do que ocorre nos processos tradicionais, baseados na transferência de calor por condução e convecção de uma superfície quente para o alimento. Outras vantagens incluem a manutenção da cor e valor nutricional do alimento, o curto período de processamento e a alta produtividade (Smith, 2011; Icier, 2012; Moreno *et al.*, 2012). Além disso, o aquecimento ôhmico apresenta uma alta eficiência energética, sendo que 90 a 95% da energia fornecida para o sistema é transformada em calor (Smith, 2011).

Existe um grande número de aplicações para o aquecimento ôhmico, incluindo, branqueamento, pasteurização, esterilização, evaporação, desidratação, fermentação e extração (Sarang, Sastry e Knipe, 2008; Yildiz-Turp *et al.*, 2013).

Além dos efeitos térmicos, recentemente tem-se percebido que os efeitos não-térmicos relacionados à passagem de corrente atuam na destruição de algumas células presentes no alimento, inclusive micro-organismos (Somavat *et al.*, 2012). Como esses efeitos ainda não estão completamente elucidados, o aquecimento ôhmico é classificado como um processo de tratamento térmico (Somavat, Mohamed e Sastry, 2013). Os

efeitos não-térmicos estão relacionados com os fenômenos de eletroporação e permeabilização das células. Somavat, Mohamed e Sastry, (2013) avaliaram a inativação de esporos de *Bacillus coagulans* utilizando aquecimento ôhmico e convencional. O objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos não-térmicos do aquecimento na destruição das células dessas bactérias através do controle de frequência. Esses autores concluíram que utilizando frequência de 10 e 60 Hz a inativação dos esporos acontece mais rapidamente se comparada à inativação via aquecimento convencional.

Além disso, durante a aplicação de campo elétrico, ocorre o fenômeno de polarização das moléculas. A polarização eletrônica é a pequena distorção da nuvem de elétrons sofrida por uma molécula influenciada pela presença de um campo elétrico oscilante. O campo elétrico distorce a nuvem negativa de elétrons em volta do núcleo positivo em direção oposta ao campo. Essa pequena separação de cargas faz com que um lado do átomo se torne positivo e o outro lado negativo (North, 1972; Mercali et al., 2014). Existem poucos estudos na literatura que avaliaram os efeitos não-térmicos do aquecimento ôhmico sobre a degradação de compostos bioativos. Para uma melhor elucidação dos fenômenos envolvidos, mais estudos precisam ser conduzidos (Mercali, 2014).

Durante a aplicação de aquecimento ôhmico, podem ocorrer reações eletroquímicas não desejáveis na interface entre o eletrodo e o líquido. Essas reações podem ser de duas naturezas: a eletrólise da água e a reação de corrosão nos eletrodos. Em sistemas que possuem agitação, os produtos da eletrólise podem ser dispersos por todo meio, não estando localizados apenas na superfície dos eletrodos. A reação de eletrólise da água produz hidrogênio no cátodo e oxigênio no ânodo. Esse oxigênio molecular gerado na reação de eletrólise pode ocasionar oxidação de ácido ascórbico. A reação de corrosão nos eletrodos, tanto por oxidação direta do metal ou pela reação eletroquímica de produtos químicos corrosivos. Os íons metálicos produzidos durante esse tipo de reação podem atuar como catalisadores da reação de oxidação de ácido ascórbico. A natureza desses íons depende do material dos eletrodos. As reações eletroquímicas são minimizadas através da utilização de altas frequências e materiais inertes para a confecção dos eletrodos (platina, titânio ou teflon).

Palaniappan e Sastry, (1991b) descreveram matematicamente o processo de aquecimento ôhmico. Assumindo um processo puramente resistivo, a geração de calor é dada pela Equação 2.1, onde Q é a taxa de calor ou energia gerado [W], I a intensidade da corrente elétrica através da amostra [A] e R a resistência elétrica da amostra [Ω].

$$Q = I^2 R \quad \text{Equação 2.1}$$

A resistência da amostra é inversamente proporcional a sua condutividade elétrica e pode ser expressa através da Equação 2.2, onde L é o espaço entre os eletrodos [m], A é a área dos eletrodos ou da seção transversal da amostra [m²] e σ a condutividade elétrica do produto a ser aquecido [S.m⁻¹].

$$R = \frac{L}{A\sigma} \quad \text{Equação 2.2}$$

Como o fator mais crítico nos processos térmicos é o estabelecimento de zonas frias, a localização desses pontos deve ser estudada no aquecimento ôhmico, visto que os princípios utilizados para o aquecimento convencional nem sempre se aplicam. Em um

alimento heterogêneo, como em sopas por exemplo, a condutividade elétrica das partículas e a sua relação com a condutividade elétrica do fluido é um parâmetro crítico para entender a taxa de aquecimento durante o aquecimento ôhmico (Knirsch *et al.*, 2010).

A taxa de aquecimento está relacionada com a condutividade elétrica do material a ser aquecido e, por isso, essa propriedade é considerada o parâmetro principal do processo. A condutividade elétrica de alimentos normalmente aumenta com a atividade de água e com a temperatura. Esse aumento é devido a alterações de mobilidade iônica a altas temperaturas e é uma função da concentração dos íons individuais representados pelo coeficiente de difusão (Farahnaky, Azizi e Gavahian, 2012). O comportamento da condutividade elétrica com a temperatura normalmente é considerado linear e pode ser representado pela Equação 2.3, onde σ_0 é a condutividade elétrica [$S \cdot m^{-1}$] na temperatura inicial do aquecimento T_0 , e γ é uma constante de proporcionalidade [$^{\circ}C^{-1}$] (Palaniappan e Sastry, 1991).

$$\sigma = \sigma_0 * [1 + \gamma(T - T_0)] \quad \text{Equação 2.3}$$

Como o processo de aquecimento ôhmico aparentemente é uma tecnologia promissora, os efeitos desse tipo de processamento nos alimentos, como inativação de micro-organismos e enzimas, e a degradação de componentes termolábeis ainda devem ser investigados (Farahnaky, Azizi e Gavahian, 2012).

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo é apresentada a metodologia empregada para realização dos experimentos de aquecimento ôhmico e convencional, bem como os métodos analíticos e o modelo matemático utilizado.

O presente trabalho foi desenvolvido no laboratório LATEPA (Laboratório de Tecnologia e Processamento de Alimentos) situado no Departamento de Engenharia Química (DEQUI) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

3.1 Polpa de acerola

Para a realização dos experimentos utilizou-se polpa de acerola processada e comercializada pela empresa *Mais Fruta*. De acordo com informações fornecidas pela empresa, a polpa não sofreu operações de tratamento térmico e nenhum conservante foi adicionado. As polpas foram recebidas e armazenadas congeladas em embalagens de 100 g. Os experimentos foram realizados com amostras do mesmo lote, a fim de assegurar a homogeneidade dos experimentos.

3.2 Pasteurização de polpa de acerola via aquecimento ôhmico

O sistema de aquecimento ôhmico utilizado pode ser visualizado na

Figura 3.1. Esse sistema foi desenvolvido no LATEPA no DEQUI. O aparato experimental consiste em uma célula ôhmica encamisada, cuja tampa possui entradas para medidores de temperatura e uma abertura central, pela qual é possível realizar coletas de amostras durante os experimentos. Além disso, o sistema possui um sistema para fornecimento de energia, um sistema para aquisição de dados, um banho de aquecimento (*Lauda*, modelo T, Alemanha) e um agitador magnético (*Instrulab*, modelo ARE, Porto Alegre, Brasil).

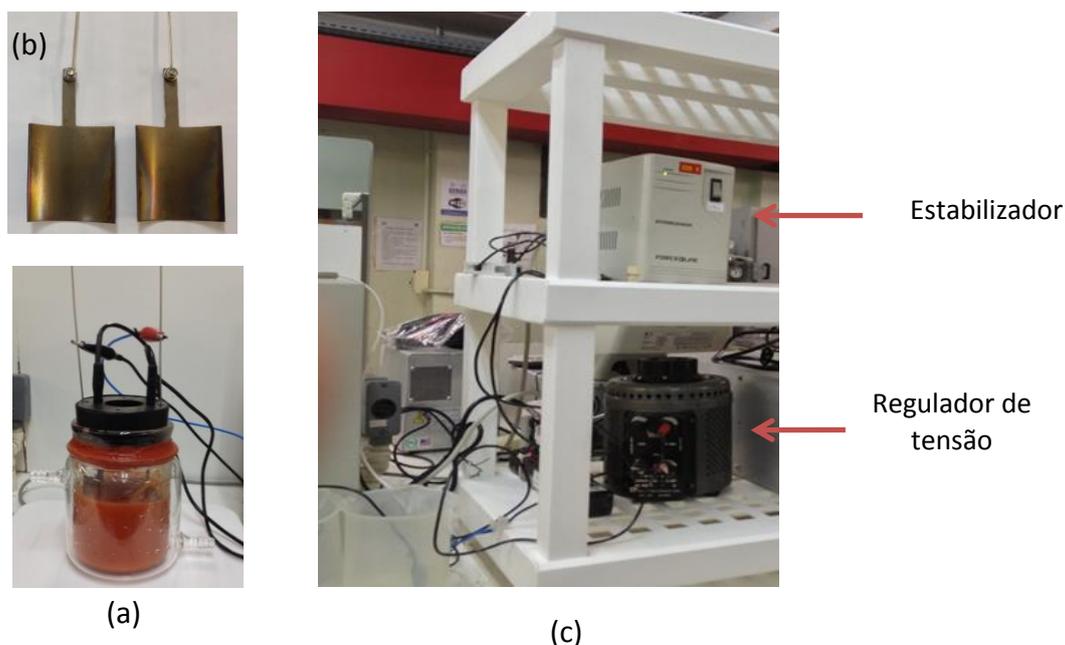


Figura 3.1. Sistema de aquecimento ôhmico utilizado na realização dos experimentos; (a) célula ôhmica, (b) eletrodos e (c) variador de tensão e estabilizador.

O sistema para fornecimento de energia é composto por um regulador de tensão de 0 a 220 V (*Sociedade Técnica Paulista LTDA*, modelo Varivolt, Brasil), um estabilizador (*Forceline*, modelo EV 1000 T/2-2, Brasil) e um disjuntor (*Siemens*, Brasil).

Através do sistema de aquisição de dados é possível monitorar e registrar os dados de corrente elétrica, tensão e temperatura ao longo do tempo. Os dados podem ser coletados em um intervalo de 0,6 s através do módulo de aquisição e registro (*Novus*, modelo Field logger, Brasil). A interface do *software* utilizado para o monitoramento de dados pode ser visualizada na Figura 3.2.

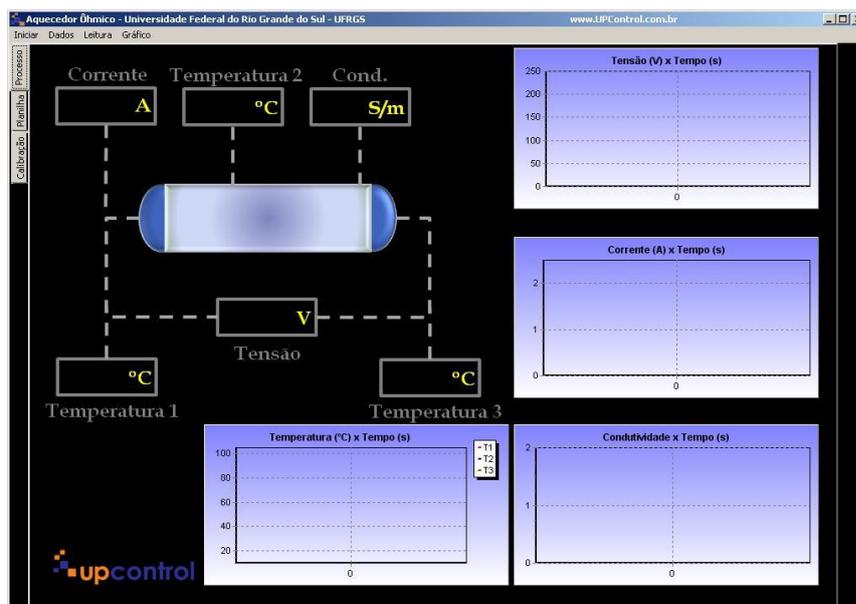


Figura 3.2. Interface do software utilizado para aquisição de dados.

Para o controle e monitoramento de temperatura utilizou-se dois medidores de temperatura do tipo Pt-100 (*Novus*, Brasil), ambos de aço inoxidável. Para o monitoramento da tensão através das amostras, foi utilizado um transdutor de Tensão CA (*Yokogawa*, modelo 2374A-T13-VRX/AN, Taiwan), cujo sinal de entrada varia de 0 a 300 V. A corrente elétrica foi monitorada através de um transdutor de corrente CA, (*Yokogawa*, modelo 2374A-T13-ALS/NA, Taiwan) com sinal de entrada de 0 a 5 A.

Para a realização dos experimentos de pasteurização foram utilizadas aproximadamente 350 g de polpa de acerola, inicialmente a temperaturas inferiores a 10 °C. Esses experimentos foram conduzidos utilizando 30 V de tensão e água circulando na camisa da célula. Esse procedimento foi realizado para igualar as taxas de aquecimento de ambas as metodologias estudadas, permitindo a avaliação dos efeitos não-térmicos possivelmente causados pela passagem de corrente elétrica durante o tratamento térmico.

Os experimentos foram realizados da seguinte forma: polpa de acerola foi inserida na célula ôhmica, o agitador magnético foi ajustado até promover agitação da amostra, o variador de tensão foi regulado de maneira a promover uma tensão de 30V através da amostra, e o banho de aquecimento foi ligado, dando início ao aquecimento da polpa. Quando a polpa atingiu a temperatura do teste (80, 85, 90 ou 95 °C) coletou-se a primeira amostra, considerada como amostra de tempo igual a zero. Coletou-se amostras a cada dez minutos durante um período de uma hora de aquecimento.

3.3 Pasteurização de polpa de acerola via aquecimento convencional

Os experimentos de pasteurização convencional foram realizados utilizando aparato experimental similar ao utilizado para a realização dos experimentos via aquecimento ôhmico, porém sem a utilização de campo elétrico. Utilizou-se um béquer encamisado, mantido sob um agitador magnético (*Instrulab*, modelo ARE, Porto Alegre, Brasil) que foi conectado a um banho de aquecimento (*Lauda*, modelo T, Alemanha). Durante a realização do experimento controlou-se a temperatura através do sistema de aquisição de dados previamente descrito no subcapítulo 3.2 do presente trabalho.

Analogamente aos experimentos de pasteurização via aquecimento ôhmico, utilizou-se 350 g de polpa de acerola. Para a realização dos experimentos inseriu-se a amostra no béquer encamisado, ajustou-se o agitador magnético a fim de promover a agitação da polpa de acerola e ligou-se o banho de aquecimento. Quando a polpa atingiu a temperatura do teste (80, 85, 90 ou 95 °C) coletou-se a amostra de tempo zero. Da mesma maneira realizada para os experimentos de pasteurização via aquecimento ôhmico, coletou-se amostras a cada dez minutos durante uma hora de experimento.

3.4 Determinação de Vitamina C

Com o objetivo de elucidar a cinética de degradação de vitamina C nos processos de pasteurização via aquecimento ôhmico e aquecimento convencional, determinou-se a concentração de vitamina C em cada uma das amostras coletadas durante os experimentos de aquecimento, conforme descrito nos subcapítulos 3.2 e 3.3.

A determinação da concentração de vitamina C foi realizada conforme metodologia oficial da AOAC 967,21 – método titulométrico 2,6-dicloroindofenol, (AOAC, 1990). O método consiste em extrair o ácido ascórbico da amostra através da utilização de uma solução de ácido metafosfórico e, posteriormente, titular o extrato com uma solução do indicador indofenol, de coloração azul escuro. O indofenol, quando em contato com ácido ascórbico, é reduzido, apresentando coloração incolor. Quando o indicador se encontra em excesso na solução ácida, a coloração do meio se torna rosa, o que torna possível a verificação do ponto de viragem.

Na etapa de extração, 5 mL de polpa de acerola foram misturados à 20 mL da solução de ácido metafosfórico e, em seguida, o sistema foi centrifugado por dez minutos à temperatura de 5 °C, para retirada das partículas sólidas. Utilizou-se 1,3 mL do extrato misturados à 5,7 mL da solução de extração para então realizar a titulação.

A concentração de ácido ascórbico foi calculada conforme Equação 3.1, onde: X é o volume médio de indicador consumido na titulação, em mL; B é o volume médio de indicador consumido na titulação do branco, em mL; F é a quantidade de ácido ascórbico equivalente a 1 mL de solução padrão de indofenol, em mg; E é a quantidade de polpa de acerola utilizada, em g; V é o volume inicial da amostra antes da centrifugação, em mL; Y é o volume de solução a ser titulada, em mL.

O cálculo de F é realizado conforme a Equação 3.2, onde A é o volume médio (em mL) de indicador consumido na titulação de solução padrão de ácido ascórbico, de concentração 1 mg/mL e B é o volume médio (em mL) de indicador consumido na titulação dos brancos, compostos de 7 mL de solução de extração mais um volume de água equivalente ao volume de indofenol utilizado nas titulações da solução padrão.

$$\frac{\text{mg de ácido ascórbico}}{\text{g de polpa de acerola}} = (X - B) * \left(\frac{F}{E}\right) * \left(\frac{V}{Y}\right) \quad \text{Equação 3.1}$$

$$F = \frac{2}{A-B} \quad \text{Equação 3.2}$$

3.5 Determinação de parâmetros cinéticos e análise estatística

Os resultados de degradação de ácido ascórbico obtidos foram ajustados ao modelo cinético de primeira ordem, conforme indicado na Equação 3.3, onde t é o tempo em minutos, k é a constante cinética (min^{-1}), C_0 e C são os parâmetros qualitativos no tempo zero e tempo t , respectivamente.

$$C = C_0 * \exp(-k * t) \quad \text{Equação 3.3}$$

O valor D é o tempo necessário para reduzir em um ciclo logarítmico a concentração inicial de determinado composto em uma dada temperatura. O valor de D está relacionado com o valor de k , conforme mostra a Equação 3.4:

$$D = \frac{\ln(10)}{k} \quad \text{Equação 3.4}$$

O tempo de meia-vida é dado pela Equação 3.5:

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k} \quad \text{Equação 3.5}$$

A avaliação estatística foi realizada utilizando o software Excel (MapInfo Corporation, Troy, NY, USA). As amostras foram comparadas utilizando teste ANOVA com nível de significância de 95%.

3.6 Determinação de Carotenoides

A fim de avaliar a degradação de carotenoides durante os experimentos de aquecimento ôhmico e convencional, bem como realizar um comparativo entre os dois métodos de processamento térmico, realizou-se a análise do teor de carotenoides em amostras correspondentes ao tempo de aquecimento zero e cinquenta minutos para os experimentos realizados a temperatura de 85, 90 e 95 °C, conforme descrito nos subcapítulos 3.2 e 3.3. Optou-se por utilizar amostras coletadas no ponto cinquenta minutos devido a não homogeneidade das amostras após esse ponto, em função da quantidade de amostra ser reduzida e a agitação não apresentar-se mais efetiva.

A concentração de carotenoides foi determinada através do método desenvolvido por Rodriguez-Amaya, 2011, com algumas modificações. As principais etapas da análise são a extração, a partição e a determinação da concentração via espectrofotômetro. Na etapa de extração utilizou-se acetona como solvente, realizando-se a extração em três etapas: na primeira etapa utilizou-se 20 mL do solvente e nas duas etapas subsequentes foram utilizados 10 mL. Para realização dessa etapa, inseriu-se 4 g de polpa de acerola em tubo de centrifuga e adicionou-se o solvente de extração. Em seguida, a amostra foi centrifugada por 5 minutos à temperatura de 5°C (*Cientec*, modelo CT 5000R, Brasil), o sobrenadante foi reservado separadamente em um frasco, acondicionado em um banho de gelo, e ao centrifugado adicionou-se solvente de extração novamente, de modo que ao final de três extrações a cor alaranjada do centrifugado não pode mais ser observada.

Juntou-se todos os extratos para realizar a etapa de partição. Nesta etapa, adicionou-se o extrato ao funil de separação juntamente com 20 mL de éter de petróleo. Iniciou-se, então, a etapa de lavagem, que consiste na adição de água destilada às paredes do funil de separação, de modo a eliminar a acetona presente no sistema e garantir que todos os compostos se encontrem na fase éter de petróleo. Após a retirada de toda a acetona, coletou-se a fase éter de petróleo em tudo de centrífuga e a amostra foi centrifugada em centrífuga (*Cientec*, modelo CT 5000R, Brasil) de modo a retirar totalmente a fase aquosa possivelmente presente na amostra. A seguir, ajustou-se o volume da fase éter de petróleo para 50 mL com o auxílio de balão volumétrico e realizou-se leitura em espectrofotômetro (*Pró-Análise*, modelo UV 1600, Brasil) em comprimento de onda de 450 nm. Desse modo, a concentração de carotenoides pôde ser determinada a partir da Equação 3.6, onde: *Abs* é o valor de absorbância, lido em espectrofotômetro; *V* é o volume de extrato, em mL; *M* é a massa de amostra, em g; e *Ac* é o coeficiente de absorção do betacaroteno em éter de petróleo, igual a 2592. Foi utilizado esse valor para o coeficiente de absorção pois o beta-caroteno é o carotenoide majoritário presente na acerola.

$$\frac{\mu\text{g de betacaroteno}}{\text{g de amostra}} = \frac{\text{Abs} \cdot V \cdot 1000}{\text{Ac} \cdot M} \quad \text{Equação 3.6}$$

3.7 Análise de Cor

Com o objetivo de avaliar possíveis mudanças de cor durante o aquecimento, realizou-se análise de cor em todas as amostras coletadas nos experimentos de aquecimento ôhmico e convencional, conforme descrito em detalhes nos subcapítulos 3.2 e 3.3.

A análise de cor foi realizada utilizando-se um colorímetro (*Minolta*, modelo CR 400, Konica Minolta Sensig, Japão). As amostras foram posicionadas sob o equipamento e realizou-se a leitura. Para cada amostra, os parâmetros L^* , a^* e b^* foram analisados. Na realização da análise utilizou-se o modo reflectância, iluminação do tipo D65 e ângulo de observação de 10^0 . O parâmetro L^* indica a luminosidade ($L^*=0$ indica preto e $L^*=100$ indica branco), o parâmetro a^* indica cor variando entre verde e vermelho e o parâmetro b^* indica cor variando do azul ao amarelo.

A diferença total de cor (ΔE^*) foi calculada utilizando o modelo de Hunter-Scottfiels (Hunter, 1975), conforme indica a Equação 3.7, onde $\Delta a^* = a^* - a_0^*$, $\Delta b^* = b^* - b_0^*$ e $\Delta L^* = L^* - L_0^*$.

$$\Delta E^* = (\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} + \Delta L^{*2})^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 3.7}$$

3.8 Aquecimento ôhmico de polpa de acerola em atmosfera modificada

Para elucidar a influência do oxigênio na degradação de vitamina C e carotenoides na polpa de acerola realizaram-se experimentos em atmosfera modificada utilizando aquecimento ôhmico na temperatura de 90°C. Foram realizados experimentos em atmosfera de oxigênio (ar com composição de aproximadamente 21% de O_2) e em atmosfera de nitrogênio (cilindro de nitrogênio). Durante a realização desses experimentos visualizou-se uma maior evaporação de água da polpa de acerola, portanto, foi realizada análise de umidade de todas as amostras coletadas, de acordo com metodologia da AOAC (1990).

Os experimentos em atmosfera de oxigênio foram realizados através de fluxo de ar promovido por uma bomba a vácuo (*Prismatec*, modelo 131, Brasil). Nesses experimentos, uma pedra de aquário conectada à bomba a vácuo foi mergulhada na polpa de acerola, promovendo a injeção de ar no sistema à uma taxa de 3 L/min. A taxa de injeção de ar foi medida através de um rotâmetro. Previamente à realização do experimento, a polpa de acerola sofreu um processo de aeração. Nesse processo, aproximadamente 300 g de polpa de acerola foram colocados em um erlenmeyer sob agitação contínua em uma mesa agitadora (*Biomixer*, modelo TS-2000A, Brasil). Ar foi injetado a uma taxa de 3 L/min no interior da polpa durante 45 min, através de pedra de aquário mergulhada na polpa, conectada à uma bomba a vácuo.

De maneira similar realizou-se os experimentos em atmosfera de nitrogênio. Nesse caso, a mangueira conectada ao cilindro de nitrogênio foi inserida no *headspace* da célula, promovendo injeção de nitrogênio à uma taxa de 3 L/min. Anteriormente à realização desses experimentos a polpa de acerola sofreu um processo de desaeração. O processo de desaeração consistiu em colocar a amostra em um kitassato conectado à uma bomba a vácuo (*Prismatec*, modelo 131, Brasil). O sistema permaneceu sob agitação através da utilização de uma mesa agitadora (*Biomixer*, modelo TS-2000A, Brasil) para facilitar a retirada de ar do sistema. A amostra foi desaerada por um período de 30 minutos.

Após a realização da aeração e desaeração, mediu-se a concentração de oxigênio na polpa de acerola utilizando um medidor de oxigênio (*Lutron*, modelo DO-5510, Taiwan). Após a realização dos tratamentos térmicos a concentração de oxigênio na polpa de acerola também foi medida.

4 Resultados

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados referentes ao estudo da degradação de vitamina C e de carotenoides, bem como, os estudos relacionados à mudança de cor na polpa de acerola submetida a aquecimento pelos métodos de aquecimento ôhmico e convencional.

4.1 Estudo de degradação de vitamina C

A relação entre a concentração de ácido ascórbico com o tempo para as diferentes temperaturas estudadas é apresentada na

Figura 4.1 e na

Figura 4.2, para os experimentos utilizando aquecimento ôhmico e convencional, respectivamente. O erro entre as duplicatas para todas as amostras analisadas foi inferior a 2,6%.

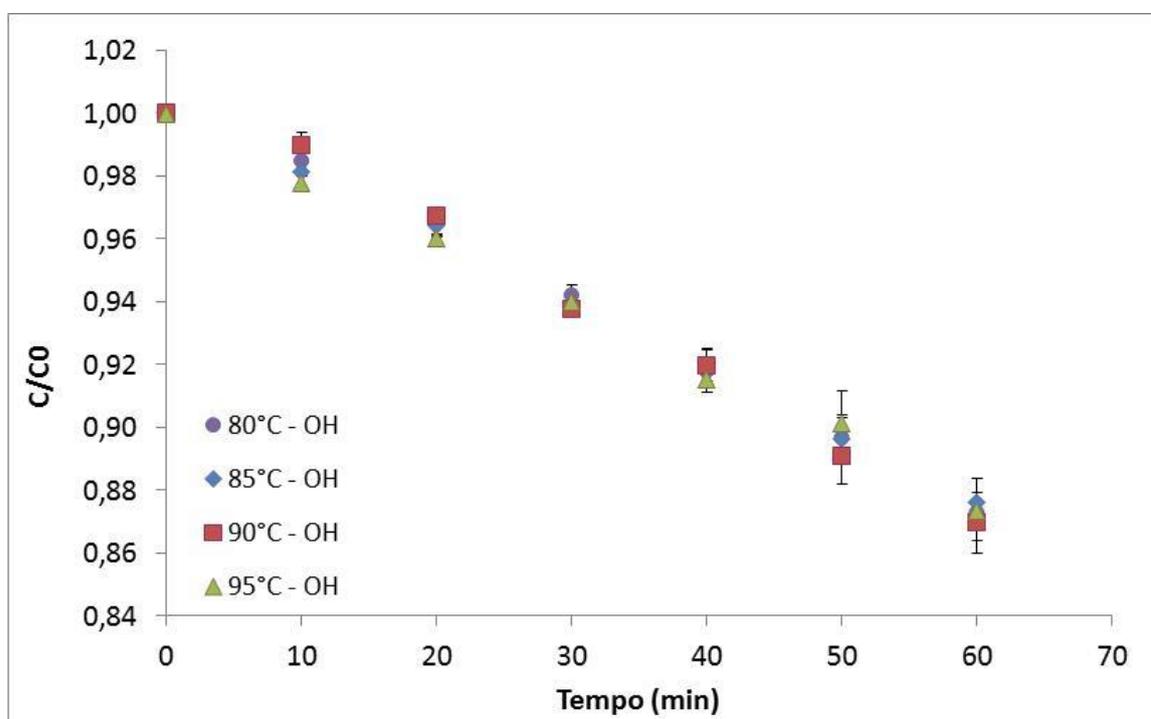


Figura 4.1. Degradação de ácido ascórbico em polpa de acerola durante aquecimento ôhmico.

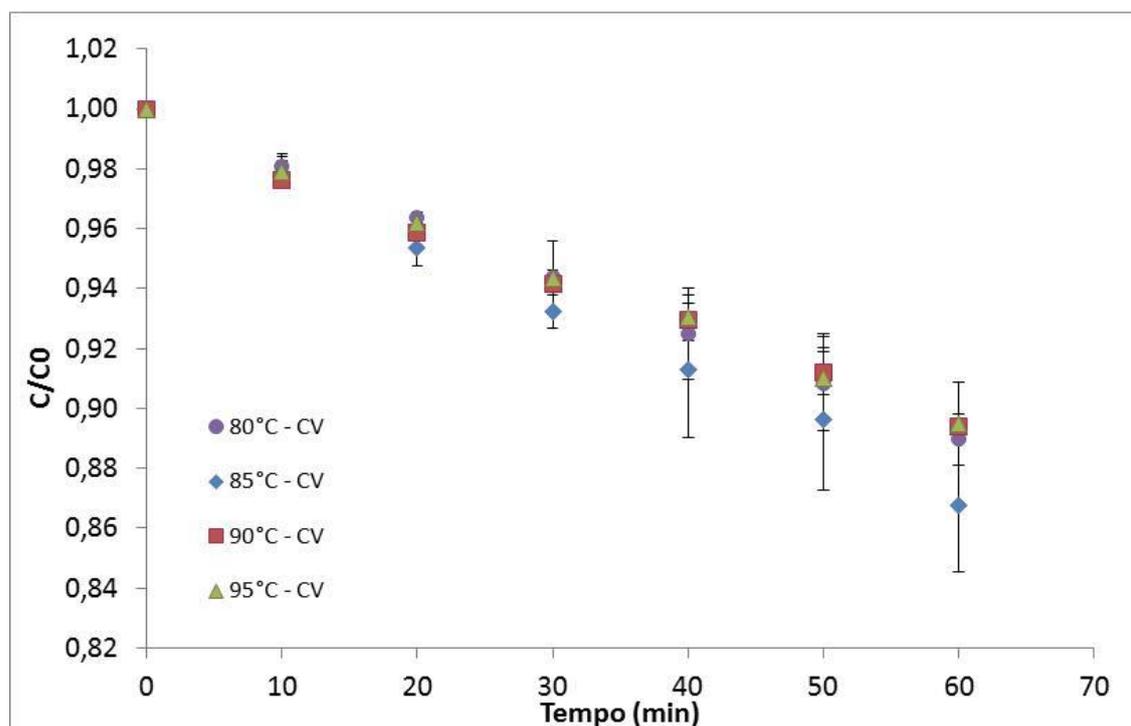


Figura 4.2. Degradação de ácido ascórbico em polpa de acerola durante aquecimento convencional.

Figura 4.1 e 4.2, a temperatura não exerceu influência significativa na degradação de ácido ascórbico durante o tempo de processamento térmico, utilizando tanto aquecimento ôhmico quanto o convencional. Além disso, a degradação de ácido ascórbico após 60 minutos de processamento variou de 12,3 a 13% no método de aquecimento ôhmico e de 10,5 a 13,2% utilizando aquecimento convencional.

Os resultados de degradação de ácido ascórbico foram ajustados ao modelo cinético de primeira ordem. Os coeficientes de determinação (R^2) apresentaram valores maiores do que 0,978, indicando um bom ajuste ao modelo. Os valores de k (min^{-1}), D (min) e $t_{1/2}$ para cada uma das temperaturas nos diferentes tratamentos térmicos são apresentados na Tabela 4.1.

Conforme valores apresentados na Tabela 4.1, na utilização de aquecimento ôhmico não houve diferença significativa entre valores k , D e $t_{1/2}$ com a temperatura. Esse comportamento foi semelhante para os experimentos utilizando aquecimento convencional, visto que os tratamentos não diferiram estatisticamente entre si ($p > 0,05$).

A influência da temperatura e do tempo de aquecimento na degradação de ácido ascórbico na polpa de acerola foram menores do que o esperado. Mercali *et al.* (2014) estudaram o efeito da frequência na degradação de ácido ascórbico em polpa de acerola durante aquecimento ôhmico e convencional e encontraram valores de degradação similares aos encontrados nesse trabalho. Esses autores observaram uma degradação de 17% e 13% após 120 minutos de aquecimento ôhmico quando aplicada uma frequência de 10 e 10^5 Hz, respectivamente. Para o aquecimento convencional observaram uma degradação de 14% após 120 minutos. Lima, Elizondo e Bohuon (2010) estudaram o efeito da temperatura na degradação de ácido ascórbico e na mudança de cor em caju.

Esses autores também observaram uma degradação menor do que a esperada com o aumento da temperatura. Testes realizados a 100°C durante 120 minutos demonstraram uma degradação de ácido ascórbico de 30%.

Tabela 4.1. Valores do parâmetro cinético k , D e $t_{1/2}$ para as diferentes temperaturas e tratamentos térmicos avaliados.

T (°C)	R^2	Aquecimento Ôhmico			Aquecimento Convencional			
		k (min^{-1})	D (min)	$t_{1/2}$ (min)	R^2	k (min^{-1})	D	$t_{1/2}$ (min)
80	0,988	0,0022 ± 0,0001 ^a	1072 ± 35 ^a	323 ± 11 ^a	1,000	0,0019 ± 0,0002 ^a	1188 ± 129 ^a	358 ± 39 ^a
85	0,997	0,0022 ± 0,0002 ^a	1076 ± 106 ^a	324 ± 32 ^a	0,997	0,0023 ± 0,0004 ^a	1019 ± 188 ^a	307 ± 57 ^a
90	0,978	0,0022 ± 0,0001 ^a	1072 ± 35 ^a	323 ± 11 ^a	0,992	0,0019 ± 0,0001 ^a	1246 ± 48 ^a	375 ± 14 ^a
95	0,995	0,0022 ± 0,0001 ^a	1072 ± 35 ^a	323 ± 11 ^a	0,998	0,0019 ± 0,0002 ^a	1253 ± 144 ^a	377 ± 43 ^a

^a Média das duplicatas ± desvio padrão; médias com letra igual (a) não apresentam diferença significativa ($p > 0,05$).

Um possível explicação para os baixos valores de degradação de ácido ascórbico é a baixa concentração inicial de oxigênio dissolvido na polpa de acerola durante os tratamentos térmicos realizados em comparação com a concentração de ácido ascórbico, que é elevada na polpa de acerola. O oxigênio possivelmente é o reagente limitante da reação de degradação. Como já descrito no capítulo de Materiais e Métodos, existem basicamente dois mecanismos de degradação de AA: aeróbio e anaeróbio; quando há oxigênio dissolvido no meio reacional, a degradação é causada principalmente pela oxidação. Quando o oxigênio é completamente consumido, a degradação anaeróbia, mais lenta, passa a ocorrer (Oey *et al.*, 2006).

Além disso, a estabilidade do ácido ascórbico na polpa de acerola pode ser explicada pelo efeito protetor de outros compostos antioxidantes presentes na fruta, como as antocianinas. Possivelmente, as antocianinas são preferencialmente oxidadas, consumindo assim o oxigênio dissolvido no meio e evitando a degradação aeróbia de ácido ascórbico. Mercali *et al.* (2013) avaliaram a degradação de antocianinas na polpa de acerola durante aquecimento ôhmico e convencional em temperaturas variando de 75 a 90°C. Esses autores observaram uma degradação de 46% e 84% a 75 e 90°C, respectivamente, após 90 minutos de tratamento térmico utilizando aquecimento ôhmico. Quando utilizado aquecimento convencional, a porcentagem de degradação encontrada foi bastante similar, atingindo 43% e 80% para as temperaturas de 75 e 90°C, respectivamente. De Rosso e Mercadante (2007) avaliaram a influência da concentração de ácido ascórbico na estabilidade de antocianinas. Esses autores utilizaram polpa de acerola e polpa de açaí modificada através da adição de ácido ascórbico de modo que ambas as polpas permanecessem com a mesma quantidade de vitamina C. Através desse estudo verificou-se que a velocidade de degradação de ácido ascórbico na polpa de acerola foi três vezes maior do que a velocidade de degradação na polpa de açaí modificada. Essa diferença foi atribuída à maior concentração de flavonóides presentes no açaí, principalmente às antocianinas, indicando que quanto maior a concentração de AA, maior a degradação de antocianinas. Assim, acredita-se que durante o tratamento térmico de polpa de acerola ocorra preferencialmente degradação de antocianinas e essas, por sua vez, exercem um efeito protetor sobre os demais nutrientes, incluindo o ácido ascórbico.

Ainda, os resultados obtidos e apresentados na Tabela 4.1 demonstram que não há diferença significativa na degradação de ácido ascórbico quando comparados os dois métodos de processamento térmico. As constantes de velocidade (k) foram estatisticamente semelhantes para ambas as tecnologias de aquecimento. Isso demonstra que, nessas condições de processamento, os efeitos não-térmicos possivelmente gerados pela tecnologia de aquecimento ôhmico não exerceram efeito sobre a degradação de ácido ascórbico na polpa de acerola. Os efeitos de polarização não influenciaram na predisposição da molécula de ácido ascórbico para doar hidrogênio.

4.2 Avaliação da degradação de vitamina C em atmosfera modificada

Conforme descrito no capítulo de Materiais e Métodos, experimentos utilizando oxigênio e nitrogênio no *headspace* da célula foram conduzidos para avaliar a influência da concentração de oxigênio no meio reacional. A polpa de acerola passou por processos de aeração e deaeração anteriormente ao aquecimento com oxigênio e nitrogênio, respectivamente. Os valores de oxigênio dissolvido na polpa de acerola antes e após a realização dos experimentos, bem como a temperatura da amostra no momento da medida, são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Concentração de O₂, em mg/L, na polpa de acerola *in natura* e nas polpas aerada e deaerada antes e após aquecimento ôhmico.

	Antes do aquecimento		Após aquecimento	
	T (°C)	O ₂ (mg/L)	T (°C)	O ₂ (mg/L)
Polpa aerada	15	5,4	19	2,3
Polpa deaerada	15	1,6	20	1,0
Polpa <i>in natura</i>	10	2,8	20	1,8

Os resultados de degradação de ácido ascórbico em atmosfera modificada foram ajustados ao modelo cinético de primeira ordem. Os coeficientes de determinação (R^2) apresentaram valores maiores do que 0,983, indicando um bom ajuste ao modelo. Os valores de k (min^{-1}), D (min) e $t_{1/2}$ (min) para os experimentos realizados estão apresentados na Tabela 4.3. O erro entre as duplicatas apresentou valores inferiores a 1,4% para todas as amostras analisadas.

Conforme pode ser visualizado na Tabela 4.3, os resultados se comportaram de acordo com o esperado. A velocidade de degradação de ácido ascórbico em atmosfera com maior concentração de oxigênio é maior do que em atmosfera não modificada. Por outro lado, a presença de nitrogênio promoveu uma menor degradação se comparado aos experimentos utilizando atmosfera não modificada e atmosfera rica de oxigênio. Esses experimentos demonstram que a concentração de oxigênio dissolvido na polpa de acerola durante a realização do tratamento térmico exerce influência na taxa de degradação desse composto, sendo, portanto, considerado o reagente limitante da reação de degradação de AA.

Tabela 4.3. Valores do parâmetro cinético k , D e $t_{1/2}$ para os experimentos utilizando aquecimento ôhmico a uma temperatura de 90°C em atmosfera modificada de oxigênio, nitrogênio e atmosfera não modificada.

	R^2	k (min^{-1})	D (min)	$t_{1/2}$ (min)
Oxigênio	0,985	0,0027	853	257
Nitrogênio	0,983	0,0014	1645	495
Atmosfera não modificada	0,978	0,0022	1072	323

Van Bree *et al.*, (2012) estudaram o efeito da concentração inicial de oxigênio na cinética de degradação de vitamina C em sucos de frutas. Esses autores também observaram uma taxa de degradação mais acentuada de ácido ascórbico com um aumento na concentração inicial de oxigênio.

4.3 Estudo de degradação de carotenoides

Os resultados encontrados para a degradação de carotenoides na polpa de acerola nas diferentes temperaturas testadas utilizando aquecimento ôhmico e convencional podem ser visualizados na Tabela 4.4. O erro entre as duplicatas de todas as amostras estudadas apresentou valores menores do que 3,9%.

Tabela 4.4. Porcentagem de degradação e concentração de betacaroteno ($\mu\text{g/g}$ de polpa de acerola) no tempo inicial e após 50 minutos de processamento térmico nas temperaturas de 85, 90 e 95°C utilizando aquecimento ôhmico e convencional.

Convencional				Ôhmico			
C (μg betacaroteno/g)				C (μg betacaroteno/g)			
T (°C)	0 min	50 min	Degradação (%)	T (°C)	0 min	50 min	Degradação (%)
90	28,82	28,31	1,8	90	27,93	28,16	0,0
95	29,17	29,28	0,0	95	28,32	28,35	0,0

É possível observar na Tabela 4.4 que os carotenoides não sofreram degradação durante o aquecimento ôhmico e convencional em temperaturas de 90 e 95°C. Uma vez que não foi encontrada degradação nessas temperaturas mais elevadas, as amostras submetidas a temperaturas mais brandas, de 80 e 85°C, não foram analisadas. Vale ressaltar que, para alguns experimentos, o valor da concentração de betacaroteno no tempo 50 min foi um pouco superior ao valor inicial, fornecendo uma degradação negativa; no entanto, esta diferença é inferior ao erro da análise e, portanto, foi considerado que a degradação foi nula.

Não existem estudos na literatura que avaliaram a degradação de carotenoides em polpa de acerola durante tratamento térmico. Porém, acredita-se que a baixa taxa de degradação desses compostos também é explicada pelo efeito protetor provocado pelas antocianinas presentes na polpa, assim como já discutido no subcapítulo 4.1.

Outra possível resposta para a não degradação de betacaroteno via oxidação, seria a isomerização de *trans*- β -caroteno em *cis*- β -caroteno. Essa mudança estrutural levaria à formação de um pico em aproximadamente 320nm. Com a finalidade de elucidar as baixas taxas de degradação de carotenoides realizou-se uma varredura nos diversos comprimentos de onda no ultravioleta visível, apresentada na Figura 4.3. Essa varredura foi realizada para as amostras coletadas nos tempos 0 e 50 minutos de aquecimento ôhmico a 90°C, bem como, para amostra de polpa *in natura*. Como se pode observar na Figura 4.3, não há degradação de carotenoides via isomerização, visto que não se observou formação do pico correspondente à forma *cis*- β -caroteno. Além disso, através da varredura verificou-se que as curvas correspondentes à polpa *in natura* e aos tempos 0 e 50 minutos diferem pouco entre si, o que também comprova a não degradação de carotenoides.

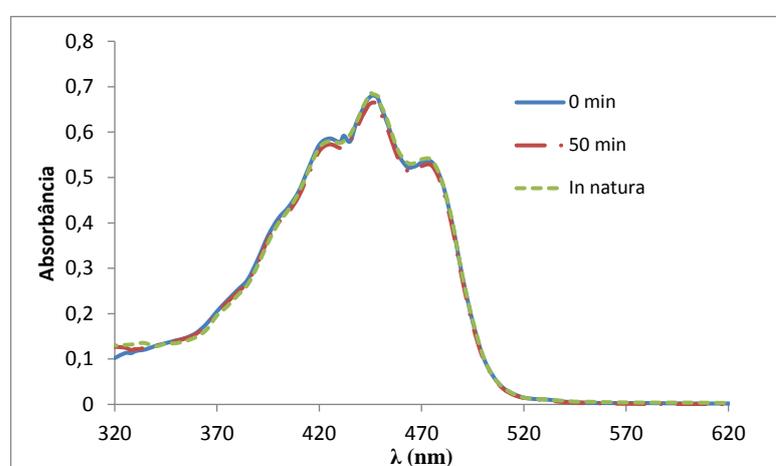


Figura 4.3. Varredura realizada em espectrofotômetro no ultravioleta visível para amostras de polpa de acerola *in natura* e para amostras coletadas nos tempos 0 e 50 minutos de aquecimento ôhmico a 90°C.

4.4 Avaliação da degradação de carotenoides em atmosfera modificada

Os resultados de degradação de carotenoides em atmosfera modificada são apresentados na Tabela 4.5. Os valores de oxigênio dissolvido na polpa de acerola antes e após a realização dos experimentos, bem como a temperatura da amostra no momento da medida são mostrados na Tabela 4.5. O erro entre as duplicatas de todas as amostras estudadas apresentou valores menores do que 2,9%.

Os resultados obtidos para a degradação de carotenoides apresentaram comportamento similar aos encontrados para a degradação de ácido ascórbico em atmosfera modificada. De acordo com a Tabela 4.5, em atmosfera com concentração elevada de oxigênio a degradação de carotenoides foi de 21,4%, valor expressivamente maior do que os valores de degradação encontrados utilizando atmosfera inerte de nitrogênio e atmosfera não modificada. Os experimentos realizados em atmosfera inerte de nitrogênio apresentaram resultados similares aos resultados obtidos em atmosfera não modificada, visto que a diferença encontrada na concentração de betacaroteno para ambos os experimentos está dentro do erro da análise.

Tabela 4.5. Concentração de betacaroteno no tempo 0 e 50 min e porcentagem de degradação para os experimentos utilizando aquecimento ôhmico a uma temperatura de 90°C em atmosfera controlada de oxigênio, nitrogênio e atmosfera não modificada.

	C (μg betacaroteno/100g de polpa, b.s.)		
	0 min	50 min	Degradação (%)
Oxigênio	366,51	287,95	21,4
Nitrogênio	323,09	310,76	3,8
Atmosfera não modificada	341,32	337,02	1,3

Esses experimentos demonstram, mais uma vez, a influência da concentração de oxigênio dissolvido na degradação de compostos bioativos, como os carotenoides. Assim como ocorreu para o ácido ascórbico, possivelmente, durante os tratamentos térmicos realizados, o oxigênio foi o reagente limitante da reação de degradação de carotenoides.

4.5 Mudanças de cor na polpa de acerola

As polpas submetidas a aquecimento ôhmico e convencional também foram avaliadas quanto à sua coloração. A média dos valores do parâmetro L^* no tempo zero de aquecimento (de todos os experimentos) foi igual a $39,91 \pm 0,12$, do parâmetro a^* foi igual a $20,68 \pm 0,21$ e do parâmetro b^* igual a $25,06 \pm 0,05$. Esses valores caracterizam a polpa como de coloração voltada para o vermelho e amarelo. As análises foram realizadas em triplicata para cada ponto experimental. Os erros entre as duplicatas do experimento apresentaram valores menores do que 2,2% para o parâmetro a^* , 0,92% para o parâmetro b^* e 0,38% para os valores de L^* .

Os valores de a^* , b^* , L^* e ΔE^* após 60 minutos de tratamento térmico para as temperaturas de 80, 85, 90 e 95°C são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Comparação dos valores de a^* , b^* , L^* e ΔE^* após 60 minutos de tratamento térmico de polpa de acerola utilizando aquecimento ôhmico e convencional nas temperaturas de 80, 85, 90 e 95°C.

Tempo (min)	T (°C)	Aquecimento ôhmico				Aquecimento convencional			
		a^*	b^*	L^*	ΔE^*	a^*	b^*	L^*	ΔE^*
0	-	$20,93 \pm 0,75$	$24,99 \pm 0,39$	$40,04 \pm 0,09$	0	$20,43 \pm 1,17$	$25,14 \pm 0,29$	$39,78 \pm 0,33$	0
	80	$21,77 \pm 0,04$	$24,84 \pm 0,22$	$38,2 \pm 0,07$	4,82	$16,97 \pm 0,53$	$24,31 \pm 0,83$	$37,37 \pm 0,02$	5,28
60	85	$15,48 \pm 0,28$	$24,27 \pm 0,3$	$37,3 \pm 0,19$	6,59	$15,37 \pm 0,05$	$24,03 \pm 0,42$	$37,11 \pm 0,18$	6,89
	90	$14,07 \pm 0,01$	$24,24 \pm 0,06$	$37,13 \pm 0,02$	7,26	$14,27 \pm 0,11$	$23,72 \pm 0,09$	$36,75 \pm 0,16$	6,77
	95	$13,32 \pm 0,17$	$23,49 \pm 0,05$	$36,4 \pm 0,02$	7,67	$12,94 \pm 0,4$	$22,75 \pm 0,34$	$35,67 \pm 0,13$	7,22

Conforme pode ser visualizado na Tabela 4.6, os valores de b^* pouco variaram após 60 minutos de aquecimento em relação ao tempo zero de aquecimento, tanto quando utilizado aquecimento ôhmico como convencional. Por esse motivo, os gráficos que apresentam a variação de b^* com o tempo de tratamento térmico não serão apresentados.

O parâmetro b^* está relacionado à presença de carotenoides na polpa de acerola; de fato, De Rosso e Mercadante (2005) identificaram 14 tipos de carotenoides em polpa de acerola cultivada no Brasil. Esses autores encontraram como carotenoides majoritários o β -caroteno, luteína, β -criptoxantina e α -caroteno. Desses carotenoides, o β -caroteno e a β -criptoxantina absorvem em comprimentos de onda mais elevados, próximo a 450 nm, o que resulta numa coloração amarelo-alaranjado na polpa de acerola. O α -caroteno e luteína, por sua vez, absorvem em comprimentos de onda menores, tendo como resultado a coloração amarelo claro no produto (Rodriguez-Amaya, 2001). Conforme mencionado, o parâmetro b^* não sofre variações significativas após o tratamento térmico. Esse resultado confirma a baixa degradação de carotenoides encontrada para as temperaturas analisadas durante aquecimento ôhmico e convencional.

A variação dos parâmetros a^* com o tempo de aquecimento ôhmico e convencional é apresentada na Figura 4.4. A variação do parâmetro L^* é apresentada na Figura 4.5, e a variação de ΔE^* com o tempo de aquecimento é apresentada na Figura 4.6.

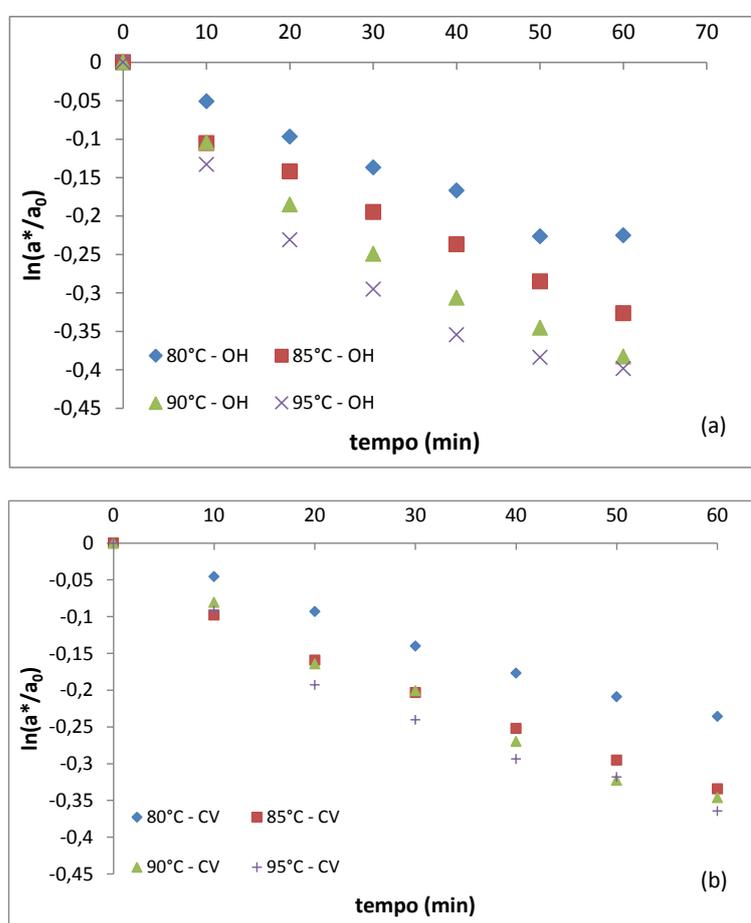


Figura 4.4. Variação de a^* com o tempo de aquecimento para as temperaturas de 80, 85, 90 e 95°C: a) aquecimento ôhmico; b) aquecimento convencional.

De acordo com os resultados apresentados, a cor avermelhada perde intensidade durante o tratamento térmico, tanto utilizando aquecimento ôhmico, como aquecimento convencional. Além disso, é possível observar que os valores do parâmetro a^* são maiores quando utilizou-se temperaturas menores de processamento, indicando a manutenção de coloração vermelha mais intensa.

O parâmetro a^* na polpa de acerola pode estar relacionado com as antocianinas presentes na polpa. A interação entre ácido ascórbico e antocianinas resulta na degradação de ambos os compostos e causa mudanças de cor e de valor nutricional dos produtos, através da formação de peróxido de hidrogênio formado pela oxidação ou condensação direta de AA com antocianinas (Choi, Kim e Lee, 2002). Acredita-se que durante o processamento térmico ocorra considerável degradação de antocianinas, conforme já discutido, e, como consequência, a coloração avermelhada se torna menos intensa.

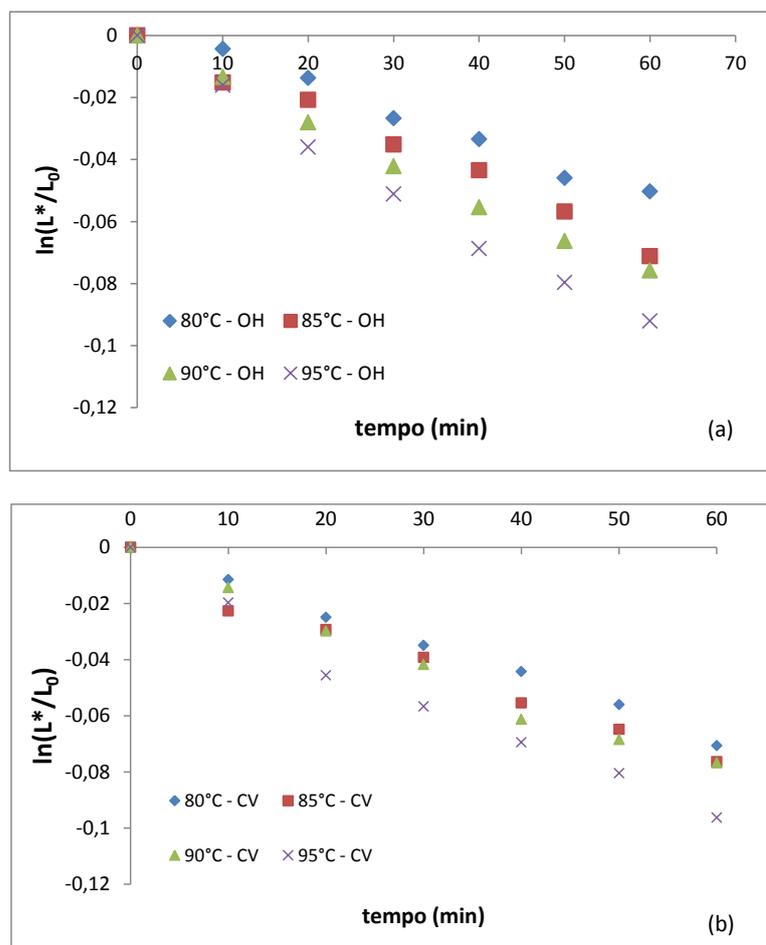


Figura 4.5. Variação de L^* com o tempo de aquecimento para as temperaturas de 80, 85, 90 e 95°C: a) aquecimento ôhmico; b) aquecimento convencional.

Os valores de L^* apresentaram decaimento durante o tempo de aquecimento. Além disso, observaram-se maiores valores de L^* com a utilização de temperaturas mais baixas, tanto utilizando aquecimento ôhmico como convencional.

Portanto, após o tratamento térmico as amostras apresentaram coloração menos avermelhada e levemente menos amarelada, além de apresentarem-se mais escuras. Em sucos cítricos, esse tipo de escurecimento normalmente é resultado de reações envolvendo açúcares, aminoácidos e ácido ascórbico (Valdramidis *et al.*, 2010). Esse escurecimento é denominado escurecimento não enzimático também conhecido como reação de Maillard, reação entre um aminoácido, peptídeos ou proteínas e compostos com o radical carbonila, normalmente presente em açúcares reduzidos. Além de açúcares reduzidos, o AA é um composto que vem chamando atenção como um possível reagente da reação de Maillard, principalmente à temperaturas elevadas (Yu *et al.*, 1974;

Rogacheva *et al.*, 1995; Yu, Tan e Wang, 2013). Assim, na polpa de acerola o parâmetro L^* pode ser associado principalmente ao escurecimento não enzimático, especialmente devido a degradação de AA (Mercali *et al.*, 2014).

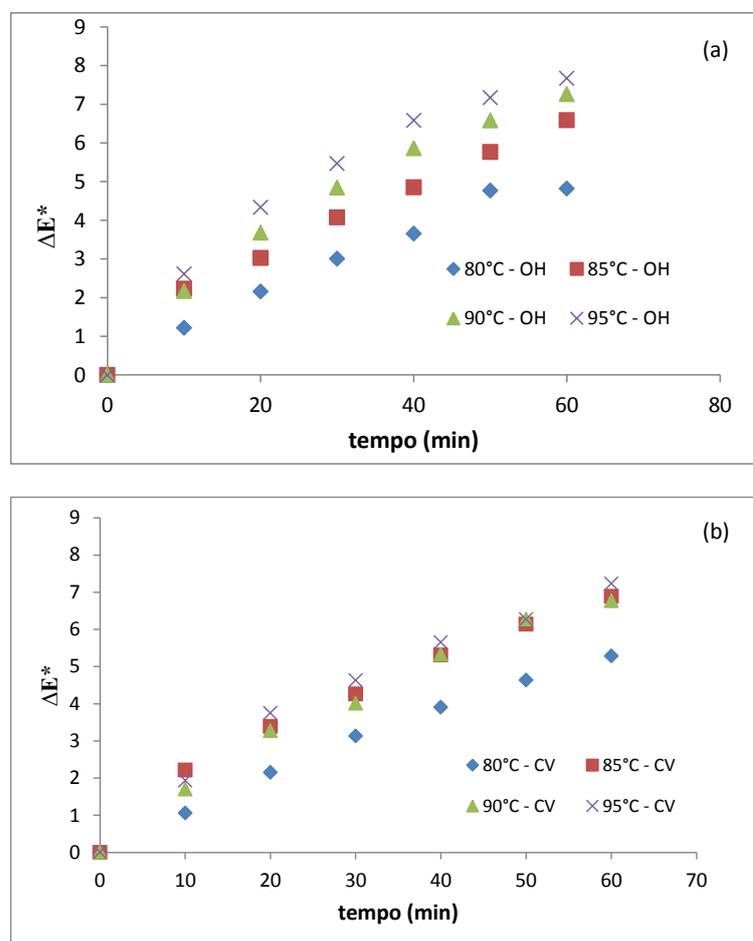


Figura 4.6. Variação de ΔE^* com o tempo de aquecimento para as temperaturas de 80, 85, 90 e 95°C: a) aquecimento ôhmico; b) aquecimento convencional.

Os valores de ΔE^* indicam a diferença total de cor. Valores de ΔE^* iguais a 1 significam diferença de cor detectável pelo olho humano (Gonnet, 1998). De acordo com os resultados obtidos, é possível observar um aumento desse valor tanto para tratamento térmico utilizando aquecimento ôhmico quanto convencional. Observa-se, ainda, que utilizando temperaturas mais elevadas a diferença total de cor aumenta. Esse resultado já era esperado, visto que os valores de a^* , b^* e L^* diminuem com o tempo de processamento. Quando comparado os dois métodos de aquecimento, os valores de ΔE^* apresentam valores similares, corroborando os resultados obtidos para degradação de ácido ascórbico e carotenoides.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O presente trabalho teve como objetivo a avaliação dos efeitos não-térmicos possivelmente promovidos pelo aquecimento ôhmico, através da avaliação da degradação de vitamina C e carotenoides em polpa de acerola durante aquecimento ôhmico e aquecimento convencional. Assim, visou-se comparar ambos os métodos de aquecimento, bem como ajustar a taxa de degradação de vitamina C com um modelo cinético. Também se buscou avaliar possíveis mudanças de coloração da polpa de acerola durante o tratamento térmico e relacionar essas mudanças com a degradação de vitamina C, carotenoides e outros compostos bioativos presentes na polpa.

A degradação de vitamina C, após 60 minutos de tratamento térmico, variou de 12,3 a 13,0% quando utilizado aquecimento ôhmico, e 10,5 a 13,2% utilizando aquecimento convencional. A partir dos resultados encontrados, observou-se que a temperatura não exerceu influência significativa na degradação de AA durante o tratamento térmico utilizando aquecimento ôhmico e aquecimento convencional. Esses resultados podem ser explicados pela baixa concentração de oxigênio dissolvido na polpa de acerola durante o tempo de processamento. O oxigênio atua como reagente limitante na degradação de AA, o que reduz consideravelmente as taxas de degradação desse composto. Essa hipótese foi comprovada através da realização de experimentos utilizando atmosfera modificada. Os experimentos realizados inserindo oxigênio na polpa e na célula ôhmica acarretam uma velocidade maior de degradação de AA. Por outro lado, os experimentos utilizando nitrogênio no *headspace* da célula diminuíram a degradação desse composto.

Além disso, acredita-se que as antocianinas presentes na polpa de acerola exercem um efeito protetor sobre o AA. Especula-se que a reação de degradação das antocianinas acontece preferencialmente à reação de degradação aeróbia de AA. Acredita-se, portanto, que o oxigênio dissolvido no meio, que está presente em quantidade reduzida, seja consumido nessa reação de oxidação das antocianinas, evitando que o AA e outros compostos se oxidem.

Os carotenoides presentes na polpa de acerola não sofreram degradação durante os tratamentos térmicos realizados nas temperaturas de 95 e 90°C. Portanto, assim como para o AA, a temperatura não exerceu efeito na degradação desses compostos. Acredita-se que esse resultado também possa ser explicado pela baixa concentração de oxigênio dissolvido no meio reacional, visto que os experimentos realizados com atmosfera modificada rica em oxigênio demonstraram uma degradação superior de carotenoides do que os experimentos realizados em atmosfera não modificada e atmosfera rica em nitrogênio.

A hipótese de isomerização dos carotenoides também foi verificada através da realização de uma varredura no ultravioleta visível. Através desse experimento, verificou-se que não há formação de *cis*- β -caroteno, visto que o pico para esse composto não foi visualizado. A partir da varredura realizada também foi possível confirmar a não degradação de carotenoides, visto que as curvas para o tempo zero e cinquenta de aquecimento e a curva da polpa *in natura* estão sobrepostas, não indicando diferença de concentração de β -caroteno entre as amostras. Assim como para o ácido ascórbico, acredita-se que uma possível explicação para a baixa degradação de carotenoides seja o efeito protetor das antocianinas presentes na polpa, que são preferencialmente degradadas, consumindo o oxigênio presente no meio.

A avaliação das mudanças de cor na polpa de acerola durante o tratamento térmico demonstraram que o parâmetro b^* pouco varia durante o tempo de aquecimento ôhmico e convencional. Esse resultado comprova a baixa degradação de carotenoides, visto que esse parâmetro está diretamente relacionado com a concentração desses compostos na polpa de acerola. Os valores do parâmetro a^* diminuíram ao longo dos tratamentos térmicos realizados. Esse parâmetro pode estar relacionado à concentração de antocianinas presentes na polpa de acerola, o que demonstra que esses compostos estão sofrendo degradação durante o processamento. O parâmetro L^* também diminuiu ao longo do tempo. Esse parâmetro está relacionado ao escurecimento não enzimático que possivelmente ocorre durante o processamento térmico gerando compostos de pigmentação marrom. Nessa reação o AA está envolvido, o que evidencia a degradação desse composto. A diferença total de cor, ΔE^* , apresenta valores crescentes com o tempo de aquecimento. Isso se deve à parcela dos parâmetros a^* , principalmente, e L^* que variam consideravelmente durante o tratamento térmico. Não há diferença considerável de cor na comparação de ambos os métodos de aquecimento avaliados.

Portanto, os métodos de tratamento térmico estudados, aquecimento ôhmico e convencional, não diferiram significativamente em nenhum dos estudos realizados. Isso demonstra que nessas condições de processamento, utilizando tensão de 30 V e frequência de 60 Hz, os efeitos não-térmicos possivelmente gerados pela tecnologia de aquecimento ôhmico não exerceram efeito sobre a degradação de ácido ascórbico e carotenoides. Contudo, sugere-se avaliar os efeitos não-térmicos na polpa de acerola em diferentes condições de tensão e frequência, para uma melhor compreensão da influência dessas variáveis na degradação de compostos bioativos.

Ainda, como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se aprimorar a análise de determinação da concentração de carotenoides, pois esta se mostrou demorada e trabalhosa, visto que se deve realizar cada etapa da análise cuidadosamente para não haver perdas de amostra, principalmente na etapa de partição (passagem de carotenoides da fase em acetona para a fase éter de petróleo). Sugere-se a utilização do equipamento fluorômetro para determinação da concentração de carotenoides. Com a utilização desse equipamento é possível que o tempo de análise seja reduzido, porém, isso ainda deve ser estudado e avaliado com maiores detalhes.

Além disso, sugere-se a utilização de um sistema com sensores de oxigênio e hidrogênio no interior da célula ôhmica para acompanhar a concentração desses gases na amostra e no headspace da célula. Com isso, acredita-se que será possível uma melhor compreensão dos fenômenos de degradação de compostos bioativos.

6 Referências

ADAMS, A.; KIMPE, N. D. Formation of pyrazines from ascorbic acid and amino acids under dry-roasting conditions. **Food Chemistry**, v. 115, n. 4, p. 1417-1423, 8/15/ 2009. ISSN 0308-8146. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814609001289> >.

AL-ZUBAIDY, M. M. I.; KHALIL, R. A. Kinetic and prediction studies of ascorbic acid degradation in normal and concentrate local lemon juice during storage. **Food Chemistry**, v. 101, n. 1, p. 254-259, // 2007. ISSN 0308-8146. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814606000811> >.

ASSIRY, A. M.; SASTRY, S. K.; SAMARANAYAKE, C. P. Influence of temperature, electrical conductivity, power and pH on ascorbic acid degradation kinetics during ohmic heating using stainless steel electrodes. **Bioelectrochemistry**, v. 68, n. 1, p. 7-13, 1// 2006. ISSN 1567-5394. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1567539405000551> >.

AWUAH, G. B.; RAMASWAMY, H. S.; ECONOMIDES, A. Thermal processing and quality: Principles and overview. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 46, n. 6, p. 584-602, 6// 2007. ISSN 0255-2701. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0255270106001991> >.

AZEVEDO-MELEIRO, C. H.; RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. Confirmation of the identity of the carotenoids of tropical fruits by HPLC-DAD and HPLC-MS. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 17, n. 3-4, p. 385-396, 6// 2004. ISSN 0889-1575. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889157504000298> >. Acesso em: 2004/8//.

BRENNAN, J. G. **Food Processing Handbook**. WILEY-VCH, 2006.

BURDURLU, H. S.; KOCA, N.; KARADENIZ, F. Degradation of vitamin C in citrus juice concentrates during storage. **Journal of Food Engineering**, v. 74, n. 2, p. 211-216, 5// 2006. ISSN 0260-8774. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877405001457> >.

CHOI, M. H.; KIM, G. H.; LEE, H. S. Effects of ascorbic acid retention on juice color and pigment stability in blood orange (*Citrus sinensis*) juice during refrigerated storage. **Food Research International**, v. 35, n. 8, p. 753-759, // 2002. ISSN 0963-

9969. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996902000716>>.

DE ROSSO, V. V.; MERCADANTE, A. Z. Carotenoid composition of two Brazilian genotypes of acerola (*Malpighia puniceifolia* L.) from two harvests. **Food Research International**, v. 38, n. 8–9, p. 1073-1077, 10// 2005. ISSN 0963-9969. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996905001195> >. Acesso em: 2005/11//.

DE ROSSO, V. V.; MERCADANTE, A. Z. The high ascorbic acid content is the main cause of the low stability of anthocyanin extracts from acerola. **Food Chemistry**, v. 103, n. 3, p. 935-943, // 2007. ISSN 0308-8146. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814606007710> >.

FARAHNAKY, A.; AZIZI, R.; GAVAHIAN, M. Accelerated texture softening of some root vegetables by Ohmic heating. **Journal of Food Engineering**, v. 113, n. 2, p. 275-280, 11// 2012. ISSN 0260-8774. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877412002713> >.

FELLOWS, P. **Food Processing Technology**. Woodhead Publishing Limited, 2000. 565.

FENNEMA, O. R. **Food Chemistry**. Terceira. Marcel Dekker, Inc., 1996. ISBN 0-8247-9691-8.

FILHO, G. L. et al. Supercritical CO₂ extraction of carotenoids from pitanga fruits (*Eugenia uniflora* L.). **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 46, n. 1, p. 33-39, 8// 2008. ISSN 0896-8446. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0896844608000715> >.

GARCI et al. Evaluation of the antioxidant properties of fruits. **Food Chemistry**, v. 84, n. 1, p. 13-18, 1// 2004. ISSN 0308-8146. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814603001602> >.

GIANNAKOUROU, M. C.; TAOUKIS, P. S. Kinetic modelling of vitamin C loss in frozen green vegetables under variable storage conditions. **Food Chemistry**, v. 83, n. 1, p. 33-41, 10// 2003. ISSN 0308-8146. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814603000335> >.

GONNET, J. F. Colour effects of co-pigmentation of anthocyanins revisited - 1. A colorimetric definition using the CIELAB scale. **Food Chemistry**, v. 63, n. 3, p. 409-415, // 1998. Disponível em: < <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0032211502&partnerID=40&md5=e29b5f3139d9ea641c5c20daba080ce5> >.

HIWILEPO-VAN HAL, P. et al. Kinetics of thermal degradation of vitamin C in marula fruit (*Sclerocarya birrea* subsp. *caffra*) as compared to other selected tropical fruits. **LWT - Food Science and Technology**, v. 49, n. 2, p. 188-191, 12// 2012. ISSN 0023-6438. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643812000540> >.

HUNTER, R. F. The electrical environment. **N.Z.ENERGY J.**, v. 48, n. 7, p. 133-136, // 1975. Disponível em: < <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0016819556&partnerID=40&md5=11f4e3cbb83bfe875fd0364371f6d79c> >.

ICIER, F. Chapter 11 - Ohmic Heating of Fluid Foods. In: CULLEN, P. J.; BRIJESH K. TIWARI AND VASILIS VALDRAMIDISA2 - P.J. CULLEN, B. K. T., *et al* (Ed.). **Novel Thermal and Non-Thermal Technologies for Fluid Foods**. San Diego: Academic Press, 2012. p.305-367. ISBN 978-0-12-381470-8.

KAREL, M.; LUND, D. B. **Physical Principles of Food Preservation**. Second. Marcel Dekker, Inc., 2003.

KENNEDY, J. F. et al. l-Ascorbic acid stability in aseptically processed orange juice in TetraBrik cartons and the effect of oxygen. **Food Chemistry**, v. 45, n. 5, p. 327-331, // 1992. ISSN 0308-8146. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030881469290032W> >.

KNIRSCH, M. C. et al. Ohmic heating – a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 21, n. 9, p. 436-441, 9// 2010. ISSN 0924-2244. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224410001494> >.

LEE, S. K.; KADER, A. A. Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops. **Postharvest Biology and Technology**, v. 20, n. 3, p. 207-220, 11// 2000. ISSN 0925-5214. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925521400001332> >.

LEONG, S. Y.; OEY, I. Effect of pulsed electric field treatment on enzyme kinetics and thermostability of endogenous ascorbic acid oxidase in carrots (*Daucus carota*

cv. Nantes). **Food Chemistry**, v. 146, n. 0, p. 538-547, 3/1/ 2014. ISSN 0308-8146. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814613013617> >.

LEŠKOVÁ, E. et al. Vitamin losses: Retention during heat treatment and continual changes expressed by mathematical models. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 19, n. 4, p. 252-276, 6// 2006. ISSN 0889-1575. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889157505001067> >.

LIMA, J. R.; ELIZONDO, N. J.; BOHUON, P. Kinetics of ascorbic acid degradation and colour change in ground cashew apples treated at high temperatures (100–180 °C). **International Journal of Food Science & Technology**, v. 45, n. 8, p. 1724-1731, 2010. ISSN 1365-2621. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02327.x> >.

LIMA, V. L. A. G. et al. Total phenolic and carotenoid contents in acerola genotypes harvested at three ripening stages. **Food Chemistry**, v. 90, n. 4, p. 565-568, 5// 2005. ISSN 0308-8146. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814604003632> >.

LOUARME, L.; BILLAUD, C. Evaluation of ascorbic acid and sugar degradation products during fruit dessert processing under conventional or ohmic heating treatment. **LWT - Food Science and Technology**, v. 49, n. 2, p. 184-187, 12// 2012. ISSN 0023-6438. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643812000461> >.

MATTA, V. M.; MORETTI, R. H.; CABRAL, L. M. C. Microfiltration and reverse osmosis for clarification and concentration of acerola juice. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 477-482, 2// 2004. ISSN 0260-8774. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877403001547> >.

MELÉNDEZ-MARTÍNEZ, A. J.; VICARIO, I. M.; HEREDIA, F. J. Provitamin A carotenoids and ascorbic acid contents of the different types of orange juices marketed in Spain. **Food Chemistry**, v. 101, n. 1, p. 177-184, // 2007. ISSN 0308-8146. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814606000719> >.

MERCALI, G. D. et al. Degradation kinetics of anthocyanins in acerola pulp: Comparison between ohmic and conventional heat treatment. **Food Chemistry**, v.

136, n. 2, p. 853-857, 1/15/ 2013. ISSN 0308-8146. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814612013088> >.

MERCALI, G. D. et al. Ascorbic acid degradation and color changes in acerola pulp during ohmic heating: Effect of electric field frequency. **Journal of Food Engineering**, v. 123, n. 0, p. 1-7, 2// 2014. ISSN 0260-8774. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026087741300472X> >.

MORENO, J. et al. Effect of ohmic heating and vacuum impregnation on the osmodehydration kinetics and microstructure of strawberries (cv. Camarosa). **LWT - Food Science and Technology**, v. 45, n. 2, p. 148-154, 3// 2012. ISSN 0023-6438. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643811002994> >.

NORTH, A. M. Dielectric relaxation in polymer solutions. **Chemical Society Reviews**, v. 1, n. 1, p. 49-72, 1972. ISSN 0306-0012. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1039/CS9720100049> >.

OEY, I. et al. Temperature and pressure stability of l-ascorbic acid and/or [6s] 5-methyltetrahydrofolic acid: A kinetic study. **European Food Research and Technology**, v. 223, n. 1, p. 71-77, // 2006. Disponível em: < <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33645963767&partnerID=40&md5=748ee135ae9c9a3f7b328249f3bbba19> >.

PALANIAPPAN, S.; SASTRY, S. K. ELECTRICAL CONDUCTIVITY of SELECTED JUICES: INFLUENCES of TEMPERATURE, SOLIDS CONTENT, APPLIED VOLTAGE, and PARTICLE SIZE¹. **Journal of Food Process Engineering**, v. 14, n. 4, p. 247-260, 1991. ISSN 1745-4530. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4530.1991.tb00135.x> >.

PEREIRA, M. C. et al. Characterization, bioactive compounds and antioxidant potential of three Brazilian fruits. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 29, n. 1, p. 19-24, 2// 2013. ISSN 0889-1575. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889157512001652> >.

POLYDERA, A. C.; STOFOROS, N. G.; TAOUKIS, P. S. Comparative shelf life study and vitamin C loss kinetics in pasteurised and high pressure processed reconstituted orange juice. **Journal of Food Engineering**, v. 60, n. 1, p. 21-29, 11// 2003. ISSN 0260-8774. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877403000062> >.

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. **A guide to carotenoid analysis in foods.** 2001. ISBN 1-57881-072-8.

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. et al. Updated Brazilian database on food carotenoids: Factors affecting carotenoid composition. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 21, n. 6, p. 445-463, 9// 2008. ISSN 0889-1575. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889157508000458> >.

ROGACHEVA, S. et al. L-Ascorbic acid in nonenzymatic reactions. **Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung**, v. 200, n. 1, p. 52-58, 1995/01/01 1995. ISSN 0044-3026. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/BF01192908> >.

SARANG, S.; SASTRY, S. K.; KNIPE, L. Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. **Journal of Food Engineering**, v. 87, n. 3, p. 351-356, 8// 2008. ISSN 0260-8774. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877407006280> >.

SERPEN, A.; GÖKMEN, V. Reversible degradation kinetics of ascorbic acid under reducing and oxidizing conditions. **Food Chemistry**, v. 104, n. 2, p. 721-725, // 2007. ISSN 0308-8146. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814606009964> >.

SMITH, P. G. **Introduction to Food Processing Engineering.** Second. Springer, 2011. ISBN 978-1-4419-7662-8.

SOMAVAT, R. et al. Accelerated inactivation of *Geobacillus stearothermophilus* spores by ohmic heating. **Journal of Food Engineering**, v. 108, n. 1, p. 69-76, 1// 2012. ISSN 0260-8774. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877411004043> >.

SOMAVAT, R.; MOHAMED, H. M. H.; SASTRY, S. K. Inactivation kinetics of *Bacillus coagulans* spores under ohmic and conventional heating. **LWT - Food Science and Technology**, v. 54, n. 1, p. 194-198, 11// 2013. ISSN 0023-6438. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643813001199> >.

VALDRAMIDIS, V. P. et al. Quantitative modelling approaches for ascorbic acid degradation and non-enzymatic browning of orange juice during ultrasound processing. **Journal of Food Engineering**, v. 96, n. 3, p. 449-454, 2// 2010. ISSN

0260-8774. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877409004300>>.

VAN BREE, I. et al. Modelling the degradation kinetics of vitamin C in fruit juice in relation to the initial headspace oxygen concentration. **Food Chemistry**, v. 134, n. 1, p. 207-214, 9/1/ 2012. ISSN 0308-8146. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814612002841>>.

VENDRAMINI, A. L.; TRUGO, L. C. Chemical composition of acerola fruit (*Malpighia puniceifolia* L.) at three stages of maturity. **Food Chemistry**, v. 71, n. 2, p. 195-198, 11// 2000. ISSN 0308-8146. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814600001527>>.

VERNIN, G. et al. Thermal decomposition of ascorbic acid. **Carbohydrate Research**, v. 305, n. 1, p. 1-15, 12// 1997. ISSN 0008-6215. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008621597002346>>.

VIEIRA, M. C.; TEIXEIRA, A. A.; SILVA, C. L. M. Mathematical modeling of the thermal degradation kinetics of vitamin C in cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) nectar. **Journal of Food Engineering**, v. 43, n. 1, p. 1-7, 1// 2000. ISSN 0260-8774. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877499001211>>.

VIKRAM, V. B.; RAMESH, M. N.; PRAPULLA, S. G. Thermal degradation kinetics of nutrients in orange juice heated by electromagnetic and conventional methods. **Journal of Food Engineering**, v. 69, n. 1, p. 31-40, 7// 2005. ISSN 0260-8774. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877404003206>>.

WILLS, R. B. H.; WIMALASIRI, P.; GREENFIELD, H. Dehydroascorbic acid levels in fresh fruit and vegetables in relation to total vitamin C activity. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 32, n. 4, p. 836-838, // 1984. Disponível em: <
<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0000902983&partnerID=40&md5=1654d6624bb4c57e1210de37d95a8509>>.

YILDIZ-TURP, G. et al. Effect of ohmic treatment on quality characteristic of meat: A review. **Meat Science**, v. 93, n. 3, p. 441-448, 3// 2013. ISSN 0309-1740. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309174012003610>>.

YU, A.-N.; TAN, Z.-W.; WANG, F.-S. Mechanistic studies on the formation of pyrazines by Maillard reaction between l-ascorbic acid and l-glutamic acid. **LWT - Food Science and Technology**, v. 50, n. 1, p. 64-71, 1// 2013. ISSN 0023-6438. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643812002848> >.

YU, M. H. et al. Nonenzymatic Browning in Synthetic Systems Containing Ascorbic Acid, Amino Acids, Organic Acids, and Inorganic Salts. **Canadian Institute of Food Science and Technology Journal**, v. 7, n. 4, p. 279-282, 10// 1974. ISSN 0315-5463. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0315546374739281> >.

ZHENG, H.; LU, H. Use of kinetic, Weibull and PLSR models to predict the retention of ascorbic acid, total phenols and antioxidant activity during storage of pasteurized pineapple juice. **LWT - Food Science and Technology**, v. 44, n. 5, p. 1273-1281, 6// 2011. ISSN 0023-6438. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643810004470> >.