

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**MARIA JOSÉ ARAÚJO VIEIRA**

**FILMES ANTIOXIDANTES PRODUZIDOS COM EXTRATO DE ANTOCIANINA DE  
REPOLHO ROXO E ACETATO DE CELULOSE PARA INIBIÇÃO DA OXIDAÇÃO  
DA MAÇÃ MINIMAMENTE PROCESSADA**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2023**

**MARIA JOSÉ ARAÚJO VIEIRA**

**FILMES ANTIOXIDANTES PRODUZIDOS COM EXTRATO DE ANTOCIANINA DE  
REPOLHO ROXO E ACETATO DE CELULOSE PARA INIBIÇÃO DA OXIDAÇÃO  
DA MAÇÃ MINIMAMENTE PROCESSADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia dos Alimentos, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Nilda de Fátima Ferreira Soares

Coorientadores: Paulo César Stringheta  
Taila Veloso de Oliveira

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

V658a  
2023  
Vieira, Maria José Araújo, 1984-  
Filmes antioxidantes produzidos com extrato de antocianina  
de repolho roxo e acetato de celulose para inibição da oxidação  
da maçã minimamente processada / Maria José Araújo Vieira. –  
Viçosa, MG, 2023.  
1 dissertação eletrônica (61 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Nilda de Fátima Ferreira Soares.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Tecnologia de Alimentos, 2023.

Referências bibliográficas: f. 54-61.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.132>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Acetato de celulose - Embalagens. 2. Antocianinas.  
3. Maçã - Conservação. I. Soares, Nilda de Fátima Ferreira,  
1960-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Tecnologia de Alimentos. Programa de Pós-Graduação em  
Ciência e Tecnologia de Alimentos. III. Título.

CDD 22. ed. 688.8


**MARIA JOSÉ ARAÚJO VIEIRA**

**FILMES ANTIOXIDANTES PRODUZIDOS COM EXTRATO DE ANTOCIANINA DE  
REPOLHO ROXO E ACETATO DE CELULOSE PARA INIBIÇÃO DA OXIDAÇÃO  
DA MAÇÃ MINIMAMENTE PROCESSADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia dos Alimentos, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.


APROVADA: 10 de fevereiro de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente  
 MARIA JOSE ARAUJO VIEIRA  
Data: 05/05/2023 14:15:41-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Maria José Araújo Vieira**  
Autora

Documento assinado digitalmente  
 NILDA DE FATIMA FERREIRA SOARES  
Data: 08/05/2023 08:18:15-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Nilda de Fátima Ferreira Soares**  
Orientadora

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pelo sustento, durante o desenvolvimento deste projeto de pesquisa me dando saúde, força e me surpreendendo com o seu amor e cuidado!

À minha família, pelo apoio incondicional, durante toda a minha vida e agora nesta desafiadora jornada acadêmica, apoiando e me sustentando em oração. Essa vitória é nossa!

À Professora Nilda, por ter acreditado no meu projeto e pela oportunidade de desenvolver a pesquisa, sua trajetória profissional é uma inspiração.

Aos coordenadores, Professor Paulo Stringheta, pela disponibilidade, palavras de incentivo e por ceder o laboratório e o corpo técnico, para apoio durante a pesquisa e a Professora Taila, pelo incentivo, cuidado e dedicação do seu tempo ao meu projeto de pesquisa, obrigada por tudo!

Agradeço também aos professores do curso, pela elevada qualidade do ensino oferecido, que experiência!

Aos amigos do laboratório, que foram essenciais para a conclusão da pesquisa, por deixar os dias mais leves, por me ensinarem tanto, em especial a Amanda e a Márcia, que me acolheram e me apoiaram, muito além do ambiente acadêmico.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Muito obrigada!

## **BIOGRAFIA**

**MARIA JOSÉ ARAÚJO VIEIRA**, filha de Selmo Beraldo Vieira e Labibe Araújo Vieira, natural de Belo Horizonte, Minas Gerais, nasceu em 12 de novembro de 1984.

Bacharel em Nutrição, pelo Centro Universitário de Belo Horizonte, UniBH, Especialista em Segurança dos Alimentos, MBA em Gestão Empresarial, atua na área de alimentos e bebidas, desde 2005. Responsável pela implantação de programas de certificação de Qualidade e de Boas Práticas em indústrias alimentícias, restaurantes comerciais, rede de franquias e hotelaria.

Em março de 2021, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, na Universidade Federal de Viçosa (UFV), concluindo-o em fevereiro de 2023.

## RESUMO

VIEIRA, M.J.A., M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2023. **Filmes antioxidantes produzido com extrato de antocianina de repolho roxo e acetato de celulose para inibição da oxidação da maçã minimamente processada.** Orientadora: Nilda de Fátima Ferreira Soares. Coorientadores: Paulo César Stringheta e Taila Veloso de Oliveira.

As embalagens ativas à base de biopolímeros, como os polissacarídeos e as antocianinas, tem recebido cada vez mais atenção. As antocianinas possuem excelentes propriedades antioxidantes e antimicrobianas e, assim, filmes ricos em antocianinas podem ser usados para manter a qualidade e prolongar a vida útil dos produtos alimentícios. Neste contexto, o estudo teve como objetivo produzir um filme a partir do acetato de celulose, incorporado de extrato de antocianina do repolho roxo, visando avaliar o efeito antioxidante das antocianinas na inibição ou redução da oxidação de maçãs minimamente processadas. A concentração ótima do extrato de antocianina incorporada nos filmes de acetato de celulose (0,14 mL de extrato de antocianina para 3 g de acetato de celulose) foi definida através de um delineamento experimental rotacional. A otimização da composição do filme ativo foi feita pelo emprego da função desejabilidade, os requisitos considerados como determinantes foram a textura e a cor da maçã minimamente processada em função do tempo. Seguiu-se com o processo de validação do filme ativo otimizado, aplicado nas maçãs minimamente processadas, embalada com papel laminado e polietileno, seladas e refrigeradas  $4 \pm 2$  °C, por sete dias. As maçãs foram caracterizadas quanto às coordenadas de cor, parâmetros físico-químicos e firmeza e os resultados foram comparados com maçãs embaladas em duas condições, sendo estas: filme controle (filme de acetato de celulose, sem a incorporação do extrato) e filme referência (polietileno, usualmente utilizados nas indústrias). Os filmes foram caracterizados quanto à resistência térmica, permeabilidade ao vapor d'água, resistência mecânica, cor, e capacidade antioxidante. As maçãs minimamente processadas embaladas no filme ativo apresentaram maior luminosidade, menor saturação e menor índice de escurecimento, quando comparado às maçãs minimamente processadas embaladas nos filmes controle e referência, indicando que as antocianinas incorporadas no filme, podem retardar o escurecimento oxidativo, quanto ao pH, acidez titulável e textura, as maçãs embaladas no filme ativo, comparativamente aos demais filmes, aumentaram

o valor do pH, reduziram a acidez titulável e aumentaram o valor da firmeza indicando que a antocianina desacelerou o processo de maturação da fruta. No filme ativo foi analisada a atividade antioxidante (o consumo de radicais livres DPPH foi de 29,07 % e os radicais ABTS foi de 41,00 %), que indicou que as antocianinas incorporadas na dispersão filmogênica mantiveram a atividade antioxidante. A espessura do filme ativo foi aumentada decorrente da incorporação do extrato de antocianina, quanto a resistência mecânica, a resistência térmica e a permeabilidade ao vapor de água, houve uma redução dos valores quando comparado aos filmes controle e referência, embora os valores do filme ativo tenham sido menores, o emprego dos filmes ativos como embalagens complementares é capaz de proteger as maçãs minimamente processadas. Portanto, pode-se concluir que foi produzido um filme ativo com atividade antioxidante, podendo ser utilizada em embalagens alimentícias. Como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se a aplicação do filme em outros vegetais processados.

**Palavras-chave:** Filmes ativos biodegradáveis. Antocianina do repolho roxo. Antioxidante. Maçãs minimamente processadas.

## ABSTRACT

VIEIRA, M.J.A., M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2023. **Antioxidant films produced with red cabbage anthocyanin extract and cellulose acetate to inhibit the oxidation of minimally processed apples.** Advisor: Nilda de Fátima Ferreira Soares. Co-advisers: Paulo César Stringheta and Taila Veloso de Oliveira.

Active packaging based on biopolymers such as polysaccharides and anthocyanins has received increasing attention. Anthocyanins have excellent antioxidant and antimicrobial properties, thus anthocyanin-rich-films can be used to maintain the quality and extend the shelf life of food products. In this context, this study aimed to produce a film from cellulose acetate incorporated into anthocyanin extract from red cabbage to evaluate the antioxidant effect of anthocyanins in inhibiting or reducing the oxidation of minimally processed apples. The optimal concentration of anthocyanin extract incorporated into cellulose acetate films (0.14 mL of anthocyanin extract for 3g of cellulose acetate) was defined using a rotational experimental design. The optimization of the composition of the active film was carried out using the desirability function. The requirements considered as determinants were the texture and color of the minimally processed apple as a function of time. This was followed by the validation process of the optimized active film applied to the minimally processed apples packed with laminated paper and polyethylene, sealed and refrigerated at  $4 \pm 2$  °C for seven days. The apples were characterized in terms of color coordinates, physical-chemical parameters, and firmness, and the results were compared with apples packaged under two conditions, namely: control film (cellulose acetate film without incorporating the extract) and reference film (polyethylene usually used in industries). The films were characterized for thermal resistance, water vapor permeability, mechanical strength, color, and antioxidant capacity. The minimally processed apples packed in the active film showed higher luminosity, lower saturation, and lower browning index when compared to minimally processed apples packed in the control and reference films, indicating that the anthocyanins incorporated in the film can delay oxidative browning in terms of pH, titratable acidity and texture. The apples packed in the active film, compared to the other films, increased the pH value, reduced the titratable acidity, and increased the firmness value indicating that anthocyanin delayed the fruit maturation process. In the active film, the antioxidant activity was analyzed (consumption of DPPH free radicals was 29.07% and ABTS radicals were 41.00%), which indicated that the

anthocyanins incorporated in the filmogenic dispersion maintained the antioxidant activity. The thickness of the active film was increased due to the incorporation of the anthocyanin extract regarding mechanical resistance, thermal resistance, and permeability to water vapor, there was a reduction in values when compared to the control and reference films, although the values of the active film were smaller the use of active films as complementary packaging can protect minimally processed apples. Therefore, it can be concluded that an active film with antioxidant activity was produced, which can be used in food packaging. As a suggestion for future work, the application of the film to other processed vegetables is proposed.

**Keywords:** Biodegradable active films. Red cabbage anthocyanin. Shelf life. Minimally processed apples.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABTS - 2,2'-azinobis-3-etil-benzotiazolína-6-sulfonado

AC – Acetato de celulose

ANOVA – Análise de variação

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

AR – Alongamento na ruptura

AT – Acidez titulável

CIE – Comissão internacional de iluminação

DPPH - 2,2-difenil-1-picrilhidrazil

EARR – Extrato de antocianina de repolho roxo

EP – Espessura

F – Filme

HCL - Ácido clorídrico

IE – Índice de escurecimento

L\* - Luminosidade

LiCi - Coreto de lítio

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

NaCl - Cloreto de sódio

NaOH - Hidróxido de sódio

O - Opacidade

PE – Polietileno

POD - Enzima peroxidase

PPO - Enzima polifenoloxidase

PVA – Permeabilidade ao vapor d'água

RT – Resistência máxima a tração

SST – Teor de sólidos solúveis

TEC – Trietil citrato

TGA – Análise termogravimétrica

TVPA – Taxa de permeabilidade ao vapor d'água

UFV – Universidade Federal de Viçosa

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
2.1	Maçã minimamente processada: vantagens e desafios.....	15
2.2	Embalagens biodegradáveis – acetato de celulose .....	17
2.3	Embalagens ativas antioxidantes - antocianinas.....	20
3	OBJETIVOS.....	24
3.1	Objetivo geral .....	24
3.2	Objetivos específicos .....	24
4	MATERIAL E MÉTODOS .....	25
4.1	Material .....	25
4.2	Elaboração do Extrato de antocianina do repolho roxo (EARR) .....	25
4.3	Caracterização do extrato de antocianina do repolho roxo (EARR).....	26
4.3.1	Conteúdo de antocianinas totais (AT).....	26
4.3.2	Atividade antioxidante pelo método do radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH) .....	26
4.3.3	Atividade de eliminação do radical 2,2'-azinobis-3-etil-benzotiazolina-6-sulfonado (ABTS) .....	27
4.4	Preparo dos filmes de acetato de celulose por <i>casting</i> .....	27
4.5	Delineamento experimental.....	28
4.6	Produção da maçã minimamente processada embalada .....	29
4.7	Avaliação do efeito dos filmes na maçã .....	30
4.7.1	Análise cromática .....	30
4.7.2	Teor de sólidos solúveis (SST).....	30
4.7.3	pH.....	30

4.7.4	Determinação de acidez titulável em ácido orgânico (AT).....	31
4.7.5	Firmeza.....	31
4.8	Caracterização dos filmes ativo e controle.....	31
4.8.1	Análise termogravimétrica (TGA) .....	31
4.8.2	Espessura e propriedades mecânicas.....	32
4.8.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	32
4.8.4	Permeabilidade ao vapor d'água (PVA).....	32
4.8.5	Análise Cromática.....	33
4.9	Análise da capacidade antioxidante do extrato concentrado incorporado nos filmes.....	34
4.9.1	Atividade de eliminação do radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH) .	34
4.9.2	Atividade de eliminação do radical 2,2'-azinobis-3-etil-benzotiazolina-6-sulfonado (ABTS) .....	34
4.10	Análise estatística dos resultados .....	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	36
5.1	Caracterização do extrato de antocianina do repolho roxo (EARR).....	36
5.2	Otimização dos filmes ativos incorporados com extrato concentrado de antocianina do repolho roxo .....	36
5.3	Caracterização dos filmes .....	38
5.3.1	Atividade antioxidante.....	38
5.3.2	Espessura e propriedades mecânicas dos filmes.....	38
5.3.3	Análise termogravimétrica (TGA) .....	40
5.3.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	42
5.3.5	Permeabilidade ao vapor de água (PVA) .....	43
5.3.6	Análise cromática (L*, a*, b*) e Opacidade.....	44

5.4	Validação do efeito antioxidante do filme ativo otimizado em maçãs minimamente processadas .....	46
5.4.1	Análise cromática - luminosidade, saturação e índice de escurecimento .....	46
5.4.2	Propriedades físico-químicas e de textura de maçãs minimamente processadas .....	49
6	CONCLUSÃO .....	53
	REFERÊNCIAS.....	54

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o desenvolvimento de embalagens ativas à base de biopolímeros, como os polissacarídeos e as antocianinas, tem recebido cada vez mais atenção. As antocianinas possuem excelentes propriedades antioxidantes e antimicrobianas e, assim, filmes ricos em antocianinas podem ser usados para manter a qualidade e prolongar a vida útil dos produtos alimentícios (Yong *et al.*, 2022a).

A crescente demanda por frutas e hortaliças minimamente processadas segue uma tendência mundial de aumentar a ingestão de alimentos frescos e prontos para o consumo, além da praticidade e segurança, os alimentos processados promovem maior acessibilidade e autonomia às pessoas com dificuldades motoras (R. F. Teixeira *et al.*, 2022).

A maçã (*Malus domestica* L. Borkh) é uma das frutas mais consumidas e cultivadas em todo o mundo e muito apreciadas pelos consumidores. As maçãs minimamente processadas representam uma parcela significativa dos mercados internacionais, com a participação de bilhões de dólares em vendas (Putnik, Bursac Kovačević, *et al.*, 2017).

No entanto, a aparência, as propriedades nutricionais e sensoriais da maçã podem ser alteradas durante o processamento mínimo, decorrente dos danos causados pelo descascamento, fatiamento, trituração. Essas etapas podem ocasionar no aumento da atividade de algumas enzimas do metabolismo vegetal, como a polifenoloxidase, que causam, além da perda de elementos nutritivos essenciais, o escurecimento enzimático e a produção de sabores estranhos (Zhao *et al.*, 2021; da Silva *et al.*, 2009).

Tradicionalmente, a embalagem desempenha um papel importante na preservação dos alimentos por funcionar como barreira à luz, à umidade, ao oxigênio, e aos contaminantes, além de proporcionar suporte contra estresse mecânico, que podem ocorrer ao longo da cadeia de suprimentos. Devido às crescentes demandas dos consumidores por alimentos frescos e seguros, associado às preocupações sobre sustentabilidade e o impacto ambiental, o setor alimentício acelera o desenvolvimento de novas tecnologias de embalagem (Alizadeh Sani *et al.*, 2022; Yong & Liu, 2020).

Dentre as fontes de antocianinas, destaca-se o repolho roxo (*Brassica oleracea* var. *capitata rubra*), por suas funções fisiológicas e aplicações. As

antocianinas do repolho roxo consistem principalmente de cianidina 3-sophoroside-5-glucoside e cianidina 3-sophoroside 5-glucoside acilado com ácidos sinápico, ferúlico, p-cumárico e malônico, estas são quase inteiramente aciladas, que conferem mais estabilidade (Ghareaghajlou *et al.*, 2021).

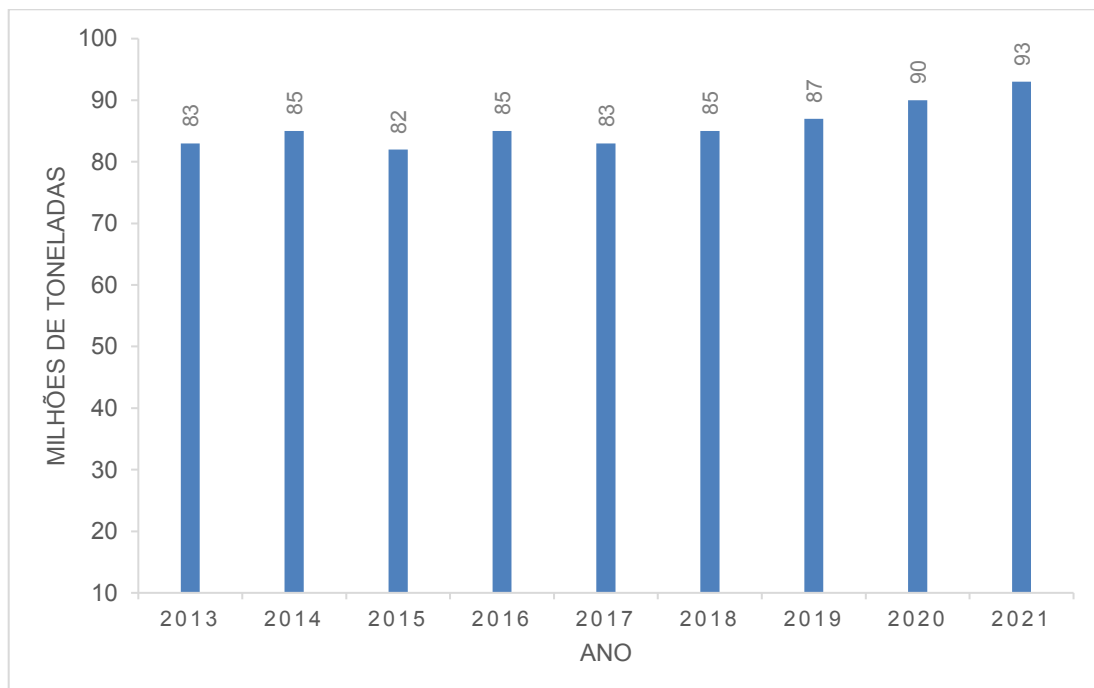
Apesar do grande potencial de aplicação da antocianina do repolho roxo, como antioxidante, na conservação de hortaliças minimamente processadas, poucos estudos têm sido realizados nesta área, justificando a realização deste trabalho para desenvolver filmes ativo, controle e referência e aplica-los em maçãs minimamente processadas avaliando ação antioxidante das antocianinas na inibição da oxidação enzimática de maçãs minimamente processadas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Maçã minimamente processada: vantagens e desafios

A maçã (*Malus domestica* L. Borkh) pertence ao grupo dos frutos climatéricos, ou seja, apresenta uma pronunciada elevação na taxa respiratória durante o amadurecimento a qual é estimulada pelo etileno, que é considerado um fitohormônio em função de sua síntese e inúmeros efeitos sobre vários processos fisiológicos nas plantas (Saquet & Streif, 2002). É uma das frutas mais produzidas e consumidas no mundo, em 2021, a produção mundial foi de 93 milhões de toneladas (FAOSTAT, 2023) (Figura 1). Além do fruto in natura, vendido no mercado de hortifrutigranjeiros, mais da metade de todas as maçãs são processadas em sucos, cidras, molhos, enlatados, e produtos minimamente processados. A fruta é composta predominantemente de água (85%) e carboidratos (14%), incluindo fibras e açúcar (principalmente frutose), e também contêm vitaminas C e E, potássio e polifenóis (Bondonno *et al.*, 2017).

**Figura 1.** Produção mundial de maçãs.



Fonte: Elaborado pela autora, com base nos dados da FAOSTAT (2023).

As maçãs minimamente processadas são muito valorizadas devido propriedades funcionais da fruta e por oferecer praticidade durante o consumo, uma vez que são higienizadas e fatiadas. Porém, tem como o principal desafio uma curta vida útil (Putnik, Roohinejad, *et al.*, 2017). A qualidade da maçã, tanto in natura, quanto minimamente processada, está relacionada às suas características físico-químicas, microbiológicas e sensoriais. Quanto aos parâmetros físico-químicos, o teor de sólidos solúveis (engloba os açúcares e os ácidos orgânicos, que são os componentes de maior concentração na fruta) e a acidez, estão associados diretamente ao grau de maturação, ou seja, conforme o avanço do amadurecimento da maçã, maior o teor de sólidos solúveis e menor o conteúdo do grau de acidez. Sobre os atributos sensoriais, a cor e a textura influenciam na decisão de compra da fruta pelo consumidor. Alterações na coloração e a perda da firmeza da polpa são os principais motivos de perdas pós-colheita e pós-processamentos da maçã, uma vez que pode causar rejeição do consumidor (Bondonno *et al.*, 2017).

As maçãs minimamente processadas são extremamente propensas ao escurecimento enzimático, decorrentes do impacto mecânico as quais são submetidas durante o processamento, resultando no aumento da atividade metabólica das células, no aumento da respiração, e no aumento da atividade de enzimas, desencadeados pelos mecanismos de autodefesa do vegetal (da Silva *et al.*, 2009).

A principal enzima responsável pelo escurecimento enzimático nos frutos e vegetais é a polifenoloxidase (1,2 benzenodiol: oxigênio óxido-redutase), esta enzima pertence à classe das oxirredutases, as quais catalisam reações de oxido-redução, onde o substrato oxidado é o doador de hidrogênio ou elétron. O principal substrato da maçã é o ácido 5-cafeoilquínico. A polifenoloxidase na presença do oxigênio molecular catalisa três reações: a hidroxilação de monofenóis a o-difenóis, a oxidação de o-difenóis a o-quinonas, e a oxidação de p-difenóis a p-quinonas. As quinonas, são compostos amarelados, instáveis e reativos, que reagem entre si, formando as melaninas, polímeros com alta massa molecular de cor escura. As melaninas são os pigmentos responsáveis pela cor marrom e preta de maçãs minimamente processadas (da Silva *et al.*, 2009).

A suscetibilidade ao escurecimento é dependente da variedade das maçãs, o que pode ser reduzido por vários inibidores químicos, antimicrobianos, compostos antioxidantes e a utilização de embalagens adequadas que, além de proteger, podem

preservar a vida útil de produtos. Porém, o uso extensivo de embalagens plásticas levanta sérias preocupações ambientais. Dessa forma, o mercado, principalmente de frutas e hortaliças, tem buscado substituir filmes poliméricos de base petroquímica por materiais biodegradáveis e compostáveis, compatíveis com a ideologia de produtos naturais e sustentáveis (Ierna *et al.*, 2017).

## **2.2 Embalagens biodegradáveis – acetato de celulose**

A embalagem é um elemento fundamental para a aceitação dos alimentos no mercado. Mais do que um invólucro, a embalagem desempenha um papel importante na proteção e na conservação dos alimentos e de seus nutrientes, protegendo contra adversidades e efeitos dos fatores climáticos, que reduzem a vida útil dos mesmos, além de ser uma das responsáveis pela comunicação entre a marca e o consumidor (Karaski *et al.*, 2016).

O aumento da demanda por alimentos minimamente processados e o uso extensivo de embalagens plásticas, obtidas de fontes não renováveis, podem contribuir para o acúmulo e, muitas vezes, para o descarte inadequado desses materiais que possuem alta durabilidade, causando danos ao meio ambiente (Assis *et al.*, 2017). Mais de 340 milhões de toneladas de resíduos plásticos foram gerados globalmente, sendo cerca de 46% deles provenientes do setor de embalagens (Wu *et al.*, 2021). As preocupações ambientais decorrentes da poluição têm atraído atenção global.

Os biopolímeros (proteínas, lipídios, e polissacarídeos, ou suas combinações) têm a capacidade de substituir os plásticos convencionais na aplicação em embalagens de alimentos, e apresentam as vantagens de disponibilidade de recursos renováveis, biodegradabilidade, e biocompatibilidade, atributos que favorecem a segurança ecológica (Mara *et al.*, 2006).

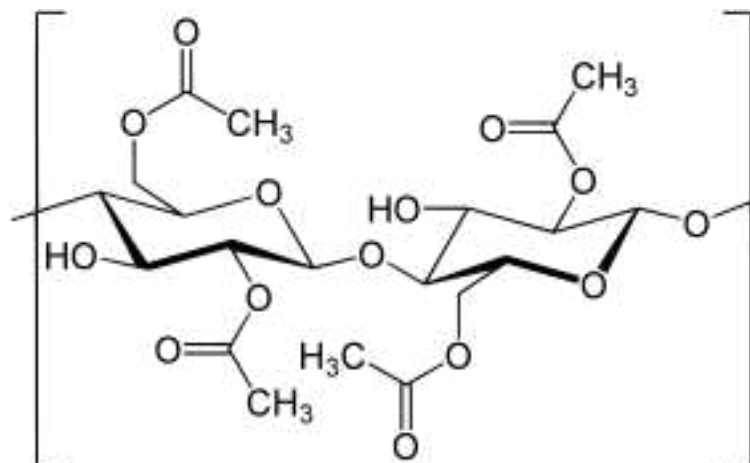
Dentre os polissacarídeos, a celulose se destaca pois é o polímero de ocorrência natural, mais abundante conhecido pela humanidade. É composto de unidades de monômero de glicose, unidas por meio de ligações  $\beta$ -1,4 glicosídicas (Mara *et al.*, 2006).

A celulose é o polissacarídeo estrutural das plantas, e existente no algodão, na madeira, na palha de cereais, e ocorre naturalmente em um estado parcialmente cristalino (S. & R., 2022). A celulose pode ser isolada em microfibrilas por extração química das paredes celulares. As microfibrilas de celulose, são conhecidas por serem altamente cristalina, possuírem alto peso molecular, serem insolúveis e infusíveis no estado natural na maioria dos solventes, com exceção dos mais agressivos, que quebram ligações de hidrogênio, como a N-metilmorfolina- N-óxido. Com base na insolubilidade e infusibilidade, para tornar a celulose mais processável, é convertida em seus derivados (Madeira, 2013).

Dentre os derivados de celulose, o acetato de celulose vem ganhando maior interesse, devido às características de biodegradabilidade, por possuir excelente propriedade ótica, alta tenacidade, e capacidade de produzir filmes, tanto por fusão quanto por técnicas de fundição por solvente (Rajeswari *et al.*, 2020).

O acetato de celulose (AC) (Figura 2), é um polímero natural quimicamente modificado, amplamente utilizado, obtido por esterificação do ácido acético com celulose, cuja reação substitui os grupos hidroxilas por grupos acetil. Suas aplicações variam da indústria têxtil a filmes plásticos, embalagens e rebocadores de filtros de cigarro (de Oliveira Alves Sena *et al.*, 2019). É considerado como uma matéria-prima renovável, não tóxica, altamente resistente, inodora, e compatível com diversos solventes como a acetona (Khoshnevisan *et al.*, 2018; Milovanovic *et al.*, 2016; Watabe *et al.*, 2018).

**Figura 2.** Estrutura química do monômero de acetato de celulose.



No tocante sustentabilidade, estudos tem focado no desenvolvimento e produção de materiais à base de celulose a partir de resíduos agrícolas, com o intuito de aproveitar matéria-prima que hoje é desperdiçada, transformando em coproduto, agregando valor ao material, reduzindo os descartes, e contribuindo, em aspecto global, com processos e produtos mais sustentáveis.

Contudo, as principais barreiras para a produção de produtos à base de celulose, a partir de resíduos agrícolas, são a heterogeneidade da matéria-prima, a dificuldade de reprodutibilidade das condições experimentais, a fase heterogênea da reação de síntese, a dificuldade de purificação, o descarte de efluentes e o controle da qualidade do produto (Ek *et al.*, 2009). O AC possui uma alta temperatura de transição vítrea, na qual se decompõe antes de atingir seu ponto de fusão, o que dificulta a otimização dos processos industriais. Também é muito rígido, devido aos anéis de  $\beta$ -d-glicose em sua cadeia principal, e as fortes ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxila (Phuong *et al.*, 2018), sendo necessário adicionar plastificantes para a produção de embalagem de alimentos.

Os plastificantes são moléculas que possuem baixo peso molecular, e se intercalam entre as cadeias poliméricas, quebram as ligações de hidrogênio, reduzem as forças intermoleculares, aumentam a mobilidade da rede polimérica, a flexibilidade, a temperatura de transição vítrea, a permeabilidade ao vapor de água e aos gases e facilitam seu processamento (Pang *et al.*, 2023; Sanyang *et al.*, 2015).

Os ésteres de ácido cítrico são substâncias não tóxicas, que são utilizados historicamente como plastificantes para uma variedade de polímeros. O trietil citrato é um éster de ácido cítrico, pertencente à classe dos citratos, e por ser derivado de compostos naturais e ambientalmente amigável (Son *et al.*, 2004), foi escolhido para ser utilizado como plastificante neste trabalho, uma vez que apresenta boa compatibilidade e forte capacidade de dissolução de resinas.

Numerosas investigações, têm sido destinadas a melhorar os biopolímeros para aplicação em sistemas de embalagem de alimentos, devido às vantagens oferecidas, juntamente com a segurança ecológica e sustentabilidade (Pang *et al.*, 2023).

O desenvolvimento de sistemas de embalagens ativas de alimentos, em matrizes biodegradáveis e de fontes renováveis, pode fornecer maior eficiência do sistema e melhor segurança dos alimentos, uma vez que atuam como transportador

de compostos bioativos que mantêm os produtos, e ainda contribuir com a sustentabilidade do planeta (Pang *et al.*, 2023).

### 2.3 Embalagens ativas antioxidantes - antocianinas

Tradicionalmente, as embalagens para alimentos são desenvolvidas com o objetivo de proteger o produto do ambiente externo. Para (Bhargava *et al.*, 2020) as funções básicas das embalagens convencionais continuam essenciais, tais como proteção contra agentes externos, dentre outras, mas são agora complementadas por outras funções também importantes. Dessa forma surgiu o conceito de embalagem ativa, que é uma estratégia que visa, por meio da interação intencional da embalagem com o alimento, inibir ou retardar o desenvolvimento de microrganismos patogênicos, aumentar a vida útil do produto, melhorar as características sensoriais, evitar deteriorações químicas e microbiológicas e garantir a segurança dos alimentos (Fang *et al.*, 2017).

Sobre as embalagens ativas, podemos destacar os absorvedores de oxigênio, de etileno e de odores, os liberadores de CO<sub>2</sub>, os aromáticos, os reguladores de umidade, os polímeros incorporados com enzimas ou antimicrobianos, e os antioxidantes (Tabela 1) (Fialho E Moraes *et al.*, 2007).

**Tabela 1.** Embalagens biodegradáveis ativas antioxidantes.

Antioxidante	Matriz Polimérica	Resultados	Referência
Catequina	Poli (éster-uretano)	A catequina foi efetivamente liberada da matriz de PU e sua atividade antioxidante inerente foi mantida no simulador alimentar, enquanto resultou proporcional ao antioxidante liberado.	(Arrieta et al., 2017)
Sementes de urucum (bixina)	Polilactídeo (PLA)	A análise do desempenho dos filmes de PLA/bixina com um teor inicial de bixina tão baixo quanto 1 g/kg para proteger alimentos sensíveis ao oxigênio da degradação mostrou sua capacidade de	(Stoll et al., 2023)

Licopeno, Norbixina	Acetato de celulose	retardar a degradação da riboflavina e diminuir o nível de peróxidos no óleo de girassol Os filmes de acetato de celulose com adição de norbixina ou licopeno podem apresentar aplicações potenciais como embalagens ativas para alimentos com alto teor lipídico.	(Assis et al., 2020)
Betacaroteno	Metilcelulose	Em conclusão, filmes de metilcelulose funcionalizados com nanocápsulas de poli- $\epsilon$ -caprolactona aprisionadas em $\beta$ -caroteno podem ser uma nova embalagem bioativa e biodegradável de alimentos para conservação de alimentos, liberando $\beta$ -caroteno em simulante oleoso.	(Lino et al., 2022)

---

Fonte: Elaborado pela autora

Os antioxidantes são substâncias sintéticas ou naturais utilizadas para retardar a deterioração, ranço e descoloração resultantes da oxidação e que podem ser utilizadas para estender a vida útil dos alimentos (Souza et al., 2017). Os antioxidantes podem ser incorporados na matriz polimérica da embalagem de alimentos e liberados por um mecanismo de difusão controlada (Khan *et al.*, 2021).

Os antioxidantes sintéticos são os mais utilizados pela indústria de alimentos e tiveram seu uso aprovado, após investigações que comprovaram sua segurança, dentro de um limite de ingestão diária, estando sujeitos às legislações específicas de cada país ou normas internacionais. Dentre esses, os mais utilizados são o butilhidroxianisol (BHA), o butilhidroxitolueno (BHT) e o terc-butilhidroquinona (TBHQ). Apesar de serem muito efetivos e estáveis, o uso destes compostos em alimentos está restrito em muitos países, devido à possibilidade de causarem efeitos indesejáveis, e serem prejudiciais à saúde (Tiveron, 2010). Dessa forma, há um grande interesse em encontrar novos antioxidantes que sejam seguros e obtidos de fontes naturais.

Os antioxidantes naturais podem ser encontrados em quase todas as frutas e vegetais. A Tabela 2 fornece dados sobre os antioxidantes naturais mais comuns e suas fontes típicas na natureza, reduzindo o risco de estresse oxidativo e preservando sua qualidade nutricional de frutas e vegetais.

**Tabela 2.** Compostos antioxidantes naturais e suas fontes.

Composto	Natureza baseada na solubilidade	Fontes
Licopeno	Hidrofóbico	Mamão, goiaba, casca de uva vermelha, tomate, melancia e toranja rosa
Antocianinas	Hidrofílico	Cerejas, repolho roxo, frutas vermelhas, uvas e bebidas derivadas de frutas
Ácido ascórbico	Hidrofílico	Frutas cítricas, tomates e alguns vegetais
Betacaroteno	Hidrofóbico	Mamão, espinafre, damasco, salsa, couve, tomate, batata, cenoura e pimentão vermelho
Tocoferóis	Hidrofóbico	Óleos de cozinha (óleos de girassol, azeite e cártamo), brócolis, grãos de cereais, avelãs, amêndoas e couve-flor
Co Q10 (ubiquinona)	Hidrofóbico	Nozes, frutas, alguns vegetais, peixes, carnes e alguns óleos
Polifenóis	Hidrofílico/hidrofóbico	Frutas e vegetais em tons de roxo/vermelho, como amoras, mirtilos, uvas, chá verde, café, vinho, nozes e azeite

Fonte: Khan *et al.*, 2021

Dentre os antioxidantes naturais, destacam-se as antocianinas, que são compostos fenólicos pertencentes ao grupo dos flavonoides e são também as responsáveis por proporcionar as várias cores (vermelho, laranja, azul e roxo) em flores, frutas e vegetais (Yousuf *et al.*, 2015). São pigmentos solúveis em água, que possuem a capacidade de mudar de cor com a mudança de pH, além de conter propriedades antimicrobianas e antioxidantes, tornando dessa forma, um agente interessante tanto para produzir embalagem inteligente, quanto para produzir embalagem ativa (Kurek *et al.*, 2018; (Yao *et al.*, 2019).

As maçãs minimamente processadas são muito susceptíveis ao escurecimento enzimático. Esse processo é resultante da oxidação de compostos fenólicos pela ação das enzimas polifenoloxidase (PPO), causando alterações sensoriais e perda das características nutricionais dessa fruta. Por essa razão que indústrias de alimentos minimamente processados adicionam compostos, para atuarem como inibidores redutores da reação de oxidação.

No âmbito legal, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), regulamenta o uso de aditivos em alimentos, desde que, nas quantidades determinadas, uma vez que o consumo dessas substâncias, acima do recomendado podem ser nocivos à saúde. Diante do exposto, considerando as propriedades antioxidantes e atóxicas dos compostos fenólicos, e a simplicidade da extração, a antocianina pode ser uma alternativa para a substituição dos inibidores redutores artificiais (Yong *et al.*, 2022c).

Apesar do grande potencial que as antocianinas possuem, a aplicabilidade do seu uso pode ser limitada devido ao seu caráter hidrofílico e também por serem sensíveis e afetada por fatores ambientais, tais como pH, sulfito, calor e luz, porém, estudos recentes que desenvolveram filmes com dispositivos inteligentes e ativos, incorporando os extratos de antocianina em matrizes poliméricas, evidenciaram maior estabilidade das antocianinas nesses sistemas (Freitas *et al.*, 2020).

Dentre as fontes de antocianinas, o repolho roxo (*Brassica oleracea var. capitata rubra*) se destaca. O repolho roxo é uma rica fonte de antocianinas, contendo principalmente derivados de cianidina-3-diglicosídeo-5-glicosídeo, em formas não aciladas ou aciladas (Ahmadiani *et al.*, 2016). As antocianinas aciladas possuem maior estabilidade térmica e são foto-estáveis. Também possuem maior capacidade antioxidante e um amplo espectro de cores em comparação com as não aciladas (Castañeda-Ovando *et al.*, 2009).

O repolho roxo é considerado uma fonte barata de antocianinas, cuja produção mundial é elevada, com aproximadamente 68 milhões de toneladas, além de um grande volume de resíduos gerados pela indústria, devido à produção em larga escala (Lei *et al.*, 2023). Dessa forma, considerando o alto teor de antioxidante e a sua abundância, o extrato de antocianina de repolho roxo tem um bom potencial para fabricação de embalagens ativas.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

Desenvolver e caracterizar filmes de acetato de celulose, incorporados com extrato de antocianina do repolho roxo e avaliar sua aplicação na conservação de maçãs minimamente processadas.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Produzir o extrato de antocianina a partir de repolho roxo e caracterizá-los quanto ao teor de antioxidantes.
- Desenvolver filmes ativos de acetato de celulose, incorporados com diferentes concentrações de extrato de antocianina do repolho roxo (0 a 0,7 mL).
- Avaliar as características de textura e de cor das maçãs minimamente processadas e embaladas com os filmes ativos (0 a 0,7 mL de extrato).
- Otimizar, quanto à função desejabilidade, a concentração de extrato de antocianina do repolho roxo, incorporado à matriz do acetato de celulose em função da textura e da cor das maçãs minimamente processadas e embaladas.
- Produzir filmes de acetato de celulose incorporado com extrato de antocianina na concentração ótima (filme otimizado) e filmes de acetato de celulose, sem incorporação do extrato (filme controle).
- Caracterizar o filme otimizado e o filme controle quanto às propriedades térmicas, mecânicas, coloração, permeabilidade ao vapor de água, microscópicas e antioxidantes.
- Validar o filme otimizado por meio da avaliação das características de textura e de cor das maçãs minimamente processadas e embaladas com o filme otimizado.
- Avaliar os resultados sensoriais, físico-químicos e mecânicos da maçã embalada com o filme otimizado, e as embaladas em filme controle e filme referência, armazenadas a  $(4 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C})$ , por 7 dias.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Material

Repolho roxo (*Brassica oleraceae L. var. Capitata f. rubra*) e maçã (*Malus domestica L. Borkh*) foram obtidos no comércio local, da cidade de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. Acetato de celulose, AC, (GS = 2,5; MM= 2.024.000 g.mol<sup>-1</sup>) foi disponibilizado pela Rhodia Solvay Group (Santo André, SP, Brasil). Ácido clorídrico (HCl) e ácido cítrico foram obtidos de SPLabor (São Paulo, Brasil). Hidróxido de sódio (NaOH) foi obtido de Synth (São Paulo, Brasil). Álcool etílico, cloreto de lítio (LiCl), ácido acético glacial, trietil citrato (TEC), cloreto de potássio (KCl), e cloreto de sódio (NaCl) foram obtidos da Merck (Darmstadt, Alemanha).

### 4.2 Elaboração do Extrato de antocianina do repolho roxo (EARR)

Para a produção do extrato de antocianina do repolho roxo, foi utilizada a metodologia descrita por Pereira *et al.* (2015) com modificações. Uma quantidade de 750 g de repolho roxo, foi triturada, até obter uma mistura homogênea, com auxílio de um mixer (Turbo Max M13, Mondial, Brasil), em 1000 mL de solução aquosa de etanol 80% (v/v), acidificado com ácido clorídrico (HCl) até pH 2,0. Posteriormente, essa mistura foi homogeneizada em ultrassom (Elmasonic TI-H10, Elma, Alemanha) a 40 kHz, na temperatura de  $40 \pm 2$  °C, por 50 min. A solução foi então filtrada em papel de filtro quantitativo (Whatman paper nº1) e concentrada, em um evaporador rotativo (IKA RV 10 digital, Staufen, Alemanha) a  $50 \pm 2$  °C, até à obtenção de teor de sólidos solúveis (SST) de 12 ° Brix (aproximadamente 20% do volume inicial). O extrato concentrado foi congelado e armazenado a  $-20 \pm 2$  °C, protegido da luz, até o momento das análises.

### 4.3 Caracterização do extrato de antocianina do repolho roxo (EARR)

#### 4.3.1 Conteúdo de antocianinas totais (AT)

Uma alíquota do extrato foi diluída em solução tampão pH 1,0 (KCl 0,2 N e HCl 0,2 N, proporção 25:67 v/v) e pH 4,5 (CH<sub>3</sub>COONa 1 N, HCl, proporção 25:67 v/v). A absorbância foi medida em espectrofotômetro (Shimadzu UV-Vis 1601PC, Quioto, Japão), em comprimento de onda de 535 nm, visando a obtenção de um valor entre 0,200 e 0,800.

O cálculo do teor de antocianinas totais (AntT) foi baseado na Lei de Lambert-Beer (Equação 1) e calculado por meio da equação 2, utilizando-se o coeficiente de absorvidade molar da cianidina-3-glicosídeo (26900 L/mol.cm). Os resultados finais foram expressos em mg de antocianinas totais (AntT) por L de extrato. O conteúdo de antocianinas totais foi determinado de acordo com método descrito por Fuleki & Francis (1968).

$$A = \epsilon \cdot b \cdot C \quad (\text{Equação 1})$$

$$\text{AntT (mg Ant/L de extrato)} = \frac{A \cdot FD \cdot MM}{\epsilon \cdot b} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que A é a absorbância,  $\epsilon$  é o coeficiente de absorvidade molar, b é o caminho ótico (1 cm), C é a concentração da amostra, FD é o fator de diluição e MM é a massa molar da cianidina-3-glicosídeo.

#### 4.3.2 Atividade antioxidante pelo método do radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH)

Para a determinação da atividade antioxidante pelo método do radical DPPH, 0,5 mL de extrato (4 diluições diferentes) foram adicionados a 3,5 mL de solução de radical DPPH (0,1 mmol/L em etanol 80%). Após 60 min de reação no escuro (temperatura ambiente), a absorbância foi medida em espectrofotômetro (Shimadzu UV-Vis 1601PC, Quioto, Japão) em comprimento de onda de 517 nm, os resultados foram expressos em  $\mu\text{mol}$  equivalente de Trolox (ET)/L de extrato. A metodologia foi realizada de acordo com método descrito por Kim *et al.* (2002).

#### 4.3.3 Atividade de eliminação do radical 2,2'-azinobis-3-etil-benzotiazolina-6-sulfonado (ABTS)

Para o ensaio com o radical ABTS, 0,5 mL de extrato (4 diluições diferentes) foram adicionados a 3,5 mL de solução de radical ABTS (diluído em etanol 80 % até a absorbância de  $0,700 \pm 0,05$  a 734 nm), depois de 6 min de reação no escuro (temperatura ambiente) a absorbância foi medida em espectrofotômetro (Shimadzu UV-Vis 1601PC, Quioto, Japão) em comprimento de onda de 734 nm. Os resultados foram expressos em  $\mu\text{mol}$  equivalente de Trolox (ET)/L de extrato. Realizado de acordo com método descrito por Re *et al.*, (1999).

#### 4.4 Preparo dos filmes de acetato de celulose por *casting*

Os filmes de acetato de celulose (AC) foram produzidos pela técnica de *casting*, com base na metodologia descrita por Freitas *et al.* (2020), com modificações de Teixeira *et al.* (2021). A técnica consiste em produzir uma dispersão, na proporção de AC e acetona de 1:10 (m/v), adicionada de 15% (m/m) de plastificante TEC, vedada, e mantida em repouso por 24 h. Nos filmes ativos, após o repouso, o extrato de antocianina de repolho roxo (EARR), na concentração de  $2,75 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$  de antocianina por extrato, foram adicionados na dispersão filmogênica, conforme as concentrações estabelecidas no DCCR (Tabelas 2 e 3) e na etapa de validação dos filmes otimizados (0,14 mL). Dispersões filmogênicas foram produzidas sem adição de extrato para a produção do filme controle. Seguiu-se com a homogeneização manual das dispersões filmogênicas, e repouso de 10 min. Após o repouso, as dispersões poliméricas de acetato de celulose (controle) e de acetato de celulose contendo extrato de antocianina de repolho roxo, foram vertidas em placas de vidro ( $25 \times 10 \text{ cm}^2$ ) e a evaporação do solvente foi realizada em temperatura ambiente, durante 30 min. Os filmes foram envolvidos com papel laminado e armazenados sob vácuo em embalagens de polietileno até sua utilização.

#### 4.5 Delineamento experimental

A pesquisa foi dividida em duas etapas, a otimização e a validação dos resultados. Para a etapa de otimização, as maçãs foram minimamente processada e higienizadas. As concentrações de extrato de antocianina de repolho roxo adicionadas na base de acetato de celulose variou de 0 a 0,7 mL e o tempo de armazenamento das maçãs variou de 1 a 7 dias sob refrigeração, conforme pré-testes realizados em laboratório (0-2 mL de extrato, 0-12 dias de armazenamento sob refrigeração  $4 \pm 2$  °C). Os efeitos do tempo de armazenamento e da concentração de extrato de repolho roxo foram estudados através de um planejamento composto central rotacional (DCCR), contendo 3 pontos centrais, 4 fatoriais 4 axiais, totalizando 14 pontos experimentais.

As Tabelas 3 e 4 representam os níveis de cada variável e o delineamento adotado, respectivamente.

**Tabela 3.** Níveis codificados e reais das variáveis independentes.

Variáveis Independentes	Níveis codificados e reais das variáveis independentes				
	$-\alpha$	-1	0	1	$\alpha$
X <sub>1</sub> (Concentração)	0	0,10	0,35	0,6	0,7
X <sub>2</sub> Tempo (dias)	1	2	4	6	7

O valor de  $\alpha$  foi calculado em função do número de variáveis independentes (concentração e tempo), através da equação 3.

$$\alpha = (2^n)^{1/4} = 1,41 \quad (\text{Equação 3})$$

As faixas de variação, entre o limite inferior e o superior da variável independente tempo, foram estabelecidas com os dados mais comumente utilizados nas indústrias de hortaliças minimamente processadas.

**Tabela 3.** Quadro de ensaios do planejamento composto central rotacional

X <sup>1</sup> Concentração (mL)		X <sup>2</sup> Tempo – dias	
( 0 )	0,35	( 0 )	4
(-1 )	0,70	(-1 )	4
(-1 )	0,35	(-1 )	1
(-1 )	0,35	(-1 )	7
( 0 )	0,35	( 0 )	4
(-1 )	0,00	(-1 )	4
( 0 )	0,35	( 0 )	4
(+1 )	0,60	(+1 )	2
(+1 )	0,10	(+1 )	2
(+1 )	0,10	(+1 )	6
( 0 )	0,35	( 0 )	4
(+1 )	0,60	(+1 )	6
( 0 )	0,35	( 0 )	4
( 0 )	0,35	( 0 )	4

Para a determinação da concentração ótima do extrato de antocianina do repolho roxo, foi considerando a função desejabilidade, sendo os fatores luminosidade e firmeza os mais significativos e os que foram maximizados.

#### 4.6 Produção da maçã minimamente processada embalada

As maçãs foram previamente selecionadas, de acordo com a homogeneidade da cor e da ausência de defeitos, e resfriadas a  $4 \pm 2$  °C, por 24h. Após este período, parte das frutas foram higienizadas com água potável e solução de hipoclorito de sódio ( $200 \text{ mg.L}^{-1}$ ), por 10 min, enxaguadas em água corrente, e secas com auxílio de papel absorvente. As maçãs foram fatiadas com casca, com fatiador manual de inox, fatias com cerca de 7 mm de espessura, em ambiente climatizado, a  $17 \pm 2$  °C (Figura 5). Dessa forma, aproximadamente 50 g de maçãs foram embaladas em diferentes filmes ativos, produzidos de acordo com o DCCR (Item 4.5), e posteriormente em filme otimizado (0,14 mL de extrato antocianina). Filme controle (acetato de celulose, sem extrato) foi produzido e o filme referência (polietileno, adquirido comercialmente) foram

utilizados na etapa de validação. As fatias foram adicionadas de forma que ambas as superfícies das maçãs mantiveram o contato direto com os filmes, foram recobertas com papel laminado e novamente embaladas em sacos de polietileno, seladas e armazenadas sob refrigeração a  $4 \pm 2$  °C , por sete dias.

## 4.7 Avaliação do efeito dos filmes na maçã

### 4.7.1 Análise cromática

As propriedades cromáticas das maçãs minimamente processadas foram avaliadas pela mensuração das coordenadas de cor  $L^*$  (luminosidade, que varia do preto ao branco),  $a^*$  (coordenada cromática que varia do verde ao vermelho) e  $b^*$  (coordenada cromática que varia do azul ao amarelo) em colorímetro (Colorquest® XE, HunterLab, USA). O índice de saturação  $C^*$  foi determinado conforme Equação 4 e o índice de escurecimento (IE) foi determinado pela Equação 5.

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (\text{Equação 4})$$

$$IE = \frac{[100(X-0,31)]}{0,172} \quad (\text{Equação 5})$$

$$\text{onde } X = \frac{(a^* + 1,75L^*)}{(5,645L^* + a^* - 3,03b^*)}$$

### 4.7.2 Teor de sólidos solúveis (SST)

O teor de sólidos solúveis (SST) foi determinado a partir da extração do sumo da maçã, por maceração manual, e medidos diretamente, utilizando o refratômetro digital (Pocket Refractometer, ATAGO), com escala de 0 a 95 °Brix.

### 4.7.3 pH

O pH da maçã minimamente processada, triturada com auxílio do ultra turrax (T25, IKA. Brasil), 1 min, a 7.000 rpm em água destilada 1:10 (m/v), foi determinada

através da utilização de medidor de potencial hidrogeniônico (PG2000, GEHAKA), previamente calibrado em soluções tampão, pH 7 e 4 (Kwon *et al.*, 2008).

#### 4.7.4 Determinação de acidez titulável em ácido orgânico (AT)

A acidez titulável, foi determinada seguindo a metodologia descrita por Zenebon, Pascuet e Tinglea (2008). 10 g de amostra da maçã em 100 mL de água MiliQ foram trituradas com auxílio do ultra turrax (T25, IKA. Brasil), por 1 min, a 7.000 rpm. Posteriormente, à amostra foi adicionada de 3 gotas do indicador fenolftaleína e titulada com NaOH 0,1 mol/L<sup>-1</sup>. Os resultados foram expressos em % de ácido málico.

#### 4.7.5 Firmeza

A firmeza das fatias de maçãs foram determinadas utilizando a Máquina Universal de Testes Mecânicos (3367, Instron Corporation, USA), utilizando a metodologia descrita por Luna-guzmán & Barrett (2023), com modificações. As maçãs foram cortadas em fatias de 7mm de espessura, o equipamento foi operado em uma velocidade 1 mm s<sup>-1</sup>, sendo utilizada uma carga de 1kN e uma sonda para perfuração cilíndrica, de ponta plana, com 5 mm de diâmetro. Os valores de força máxima foram expressos em Newton (N).

### 4.8 Caracterização dos filmes ativo e controle

#### 4.8.1 Análise termogravimétrica (TGA)

A TGA dos filmes foi realizada em analisador termogravimétrico (DTG-60H, Shimadzu, Japão). Aproximadamente 3 mg de cada filme foram aquecidos, em temperaturas de 25 °C a 600 °C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup>, em atmosfera de nitrogênio, com fluxo de 50 mL min<sup>-1</sup>. O gráfico foi plotado considerando a perda de massa por temperatura.

#### 4.8.2 Espessura e propriedades mecânicas

Para a análise da espessura dos filmes foram realizadas mensurações, com o auxílio de um micrômetro digital (547-401, Mitutoyo, Japão), com resolução de 0,001 mm, em 10 pontos aleatórios dos corpos de prova dos diferentes filmes. Os resultados foram expressos em média  $\pm$  desvio padrão.

O alongamento na ruptura (mm) e a resistência máxima à tração (MPa) dos filmes, foram determinados de acordo com a norma ASTM D882 (2018), com modificações. Amostras (17,5 x 2,0 cm<sup>2</sup>) foram fixadas por duas garras, com distância inicial de 125 mm e velocidade de separação de 12,5 mm.min<sup>-1</sup> utilizando a Máquina Universal de Testes Mecânicos (3367, Instron Corporation, USA).

#### 4.8.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As micrografias dos filmes foram obtidas por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (TM3000, Hitachi, Japão). Amostras, com dimensões de (0,5 x 0,5 cm<sup>2</sup>), foram fixadas em stubs, com auxílio de uma fita de carbono dupla face (Camilloto *et al.*, 2009). A tensão de aceleração de elétrons foi usada no modo automático. A magnificação das imagens obtidas foi de 100x, 500x e 1000x.

#### 4.8.4 Permeabilidade ao vapor d'água (PVA)

A PVA dos filmes foi determinada gravimetricamente, de acordo com o descrito por Olivato *et al* (2012) com modificação. Previamente à análise, as amostras foram condicionadas à 25  $\pm$  2 °C e 53  $\pm$  2% de umidade relativa (UR), por 12 h.

Os diferentes filmes foram cortados nos diâmetros de cápsulas circulares de parafina ( $\emptyset$  = 80 mm). O interior das cápsulas foi preenchido com solução saturada de cloreto de lítio (LiCl 12% de UR) e vedados com parafina líquida na junção filme/cápsula. Este sistema foi armazenado a 25  $\pm$  2 °C em dessecador contendo solução supersaturada de cloreto de sódio (NaCl 75% de UR), o que promoveu um gradiente de UR constante através do filme de 63%.

As amostras foram pesadas a cada 1 h, por 12 h de teste. O ganho de massa (m) foi plotado em função do tempo (t) e a inclinação da curva determinada pelo ajuste da equação da reta.

A taxa de permeabilidade ao vapor d'água (TPVA) foi calculada pela Equação 6.

$$TPVA (g \cdot m^{-2}h^{-1}) = \left(\frac{m}{t}\right) \cdot \left(\frac{1}{A}\right) \quad (\text{Equação 6})$$

Em que m/t corresponde ao coeficiente angular da curva e A (m<sup>2</sup>) corresponde à área de permeação da amostra de filme. Os valores da permeabilidade ao vapor d'água (PVA) dos filmes foram calculados de acordo com a Equação 6.

$$PVA (g \cdot Pa^{-1}s^{-1}m^{-1}) = \frac{TPVA \cdot st}{sp \cdot (RH_1 - RH_2)} \quad (\text{Equação 7})$$

Em que st é a média da espessura da amostra (m), sp é a pressão de saturação do vapor da água a 25 °C (Pa), RH<sub>1</sub> é a UR do dessecador e RH<sub>2</sub> é a UR do interior da cápsula.

#### 4.8.5 Análise Cromática

As análises cromáticas dos filmes foram realizadas através da mensuração das coordenadas de cor L\* (luminosidade, que varia do preto ao branco), a\* (coordenada cromática que varia do verde ao vermelho) e b\* (coordenada cromática que varia do azul ao amarelo) em colorímetro (Colorquest® XE, HunterLab, USA). A opacidade das amostras foi calculada em função da opacidade da amostra no padrão preto e a opacidade da amostra no padrão branco. O cálculo foi feito automaticamente pelo *software* Universal V4.01.

## **4.9 Análise da capacidade antioxidante do extrato concentrado incorporado nos filmes**

### **4.9.1 Atividade de eliminação do radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH)**

A atividade antioxidante do extrato concentrado nos filmes foi determinada pelo método radical DPPH, realizada de acordo com a metodologia descrita por KIM *et al.* (2002). 0,5 mL de extrato, foram adicionados a 3,5 mL de solução de radical DPPH (0,1 mmol/L em etanol 80%). A absorbância a 517 nm (Shimadzu UV-Vis 1601PC, Quioto, Japão) foi medida após 60 min de reação no escuro (temperatura ambiente) e os resultados foram expressos em  $\mu\text{mol}$  equivalente de Trolox/L de extrato.

### **4.9.2 Atividade de eliminação do radical 2,2'-azinobis-3-etil-benzotiazolina-6-sulfonado (ABTS)**

A atividade antioxidante foi determinada pelo método ABTS, conforme descrito por (RE *et al.*, 1999): 0,5 mL de filme foram adicionados a 3,5 mL de solução de radical ABTS (diluído em etanol 80% até a absorbância de  $0,700 \pm 0,05$  a 734 nm). Depois de 6 min de reação no escuro (temperatura ambiente) a absorbância foi medida em 734 nm (Shimadzu UV-Vis 1601PC, Quioto, Japão) e os resultados foram expressos em  $\mu\text{mol}$  equivalente de Trolox/L de filme.

## **4.10 Análise estatística dos resultados**

Os efeitos dos fatores em estudo, nas variáveis respostas, foram obtidos pela análise da superfície de resposta. As variáveis independentes foram a concentração do extrato de antocianina incorporados nos filmes de acetato de celulose e o tempo. As variáveis resposta foram às coordenadas de cor ( $L^*$ ,  $a^*$ , e  $b^*$ ) e a firmeza da polpa da maçã minimamente processada.

Os modelos estatísticos foram ajustados para cada variável resposta, em função do extrato de antocianina do repolho roxo nos filmes e tempo de estocagem das maçãs minimamente processadas. A análise de variância (ANOVA), com

significância de 5% e teste Tukey (5%) foram utilizadas na etapa de validação para avaliar diferença significativa entre os tratamentos (Filme ativo otimizado, filme controle - AC, e filme referência - PE) em função da caracterização dos filmes. As análises foram realizadas com o programa estatístico Minitab, versão 17.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Caracterização do extrato de antocianina do repolho roxo (EARR)**

Os teores de antocianina do extrato concentrado de repolho roxo foram determinados pelos métodos Fuleki & Francis, pH diferenciado e pH único, cujo resultados foram 2550,75 e 4274,91 mg Ant/L de extrato), respectivamente. Os resultados aqui observados foram semelhantes ao identificado por Chandrasekhar *et al.* (2012) e Musso *et al.* (2023), que constataram a eficiência extrativa do etanol.

Também foi determinado a capacidade antioxidante do extrato de antocianina do repolho roxo, por meio das metodologias ABTS e DPPH, que obteve os resultados 20507,46 e 18538,52  $\mu\text{mol}$  de Trolox/L de extrato, respectivamente. Esses resultados foram muito superiores aos apontados por (Porfírio *et al.*, 2014), ao analisar a atividade antioxidante da jabuticaba (ABTS  $12530,30 \pm 3,85$  e DPPH  $1306,57 \pm 3,61$   $\mu\text{mol}$  de Trolox/L de extrato) e por (Wiczowski & Topolska, 2023), indicando que o repolho roxo é uma rica fonte de antocianinas e que possui forte atividade antioxidante.

### **5.2 Otimização dos filmes ativos incorporados com extrato concentrado de antocianina do repolho roxo**

As concentrações de extrato nos filmes ativos foram otimizadas em função das características de firmeza e cor das maçãs minimamente processadas e embaladas nesses materiais ativos, revestidas com papel laminado, e em condição de vácuo em sacos de polietileno, armazenadas sob refrigeração,  $4 \pm 2$  °C, por 7 dias. Os resultados podem ser observados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Luminosidade ( $L^*$ ) e firmeza (N) das maçãs minimamente processadas, embaladas em filmes ativos incorporados com diferentes concentrações de EARR, armazenado à  $4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , nos respectivos tempos de estocagem (T).

Ensaio	Dias	[ ] mL EARR	$L^*$	Firmeza (N)
1	1	0,35	68,58	9,04
2	7	0,35	62,80	6,00
3	4	0,70	72,13	4,63
4	4	0,35	68,04	6,42
5	4	0,35	71,62	5,24
6	4	0,00	72,95	4,34
7	4	0,35	69,19	6,83
8	4	0,35	70,92	4,60
9	6	0,60	69,54	1,32
10	6	0,10	74,10	8,37
11	2	0,60	64,91	9,04
12	4	0,35	69,49	4,63
13	2	0,10	65,10	12,78
14	4	0,35	70,92	6,39

As coordenadas de cor  $a^*$  e  $b^*$ , e o fator C não foram influenciados pela adição do extrato de antocianina de repolho roxo, por outro lado, a coordenada colorimétrica  $L^*$  e a firmeza da maçã minimamente processada, foram influenciadas pela adição do extrato de antocianina de repolho roxo, ao longo do tempo de armazenamento ( $p < 0,05$ ). Foi observado que as maçãs embaladas com filmes ativos contendo extrato em concentração igual ou superior a 0,35 mL, apresentaram com o passar do tempo, diminuição da coordenada colorimétrica  $L^*$ , indicando um escurecimento.

Quanto ao atributo firmeza, menores valores foram observados quando os filmes foram preparados com concentração de extrato superior a 0,1 mL. Esse efeito deve-se, provavelmente, à característica hidrofílica da antocianina. Infere-se uma alteração da matriz polimérica do filme, aumentando a permeabilidade de água, favorecendo as alterações no fruto.

Para a determinação da concentração ótima do extrato de antocianina do repolho roxo, foi considerando a função desejabilidade, sendo os fatores luminosidade e firmeza os mais significativos e os que foram maximizados. Com base nos resultados, determinou-se uma concentração ótima de 0,14 mL de extrato de antocianina por filme.

### 5.3 Caracterização dos filmes

O filme ativo (AC+EARR), o filme controle (AC) e o filme referência foram caracterizados e os resultados estão descritos a seguir.

#### 5.3.1 Atividade antioxidante

A atividade antioxidante dos filmes ativos incorporados com extrato de antocianina do repolho roxo (EARR) foram determinados pelo método do radical DPPH e pelo método ABTS. O consumo de radicais livres DPPH foi de 29,07 %, enquanto o de radicais ABTS foi de 41,00 %. De acordo com os resultados, as antocianinas incorporadas nas dispersões filmogênicas mantiveram sua atividade antioxidante mesmo após o processamento do filme, o que é de grande importância para a utilização comercial, como embalagem ativa. Achados semelhantes foram relatados por Musso *et al.*(2023) e Lei *et al.*(2023). Uranga *et al.*(2018) e Freitas *et al.* (2020), reportaram nos seus respectivos trabalhos de pesquisa que a liberação de antioxidantes, presentes no extrato de antocianina do repolho roxo, incorporado nos filmes, pode ser mais eficaz na inibição da oxidação do que a adição direta nos alimentos, indicando que a incorporação do extrato na matriz polimérica protege, contra a degradação.

#### 5.3.2 Espessura e propriedades mecânicas dos filmes

A resistência máxima à tração (RT) e o alongamento na ruptura (AR) são fatores importante para determinar as propriedades mecânicas de novos materiais plásticos, uma vez que avaliam a capacidade da embalagem de suportar tensões externas e manter a integridade dos alimentos ao longo da cadeia (Souza *et al.*, 2017).

Os resultados da espessura (EP) e das propriedades mecânicas, como a resistência máxima à tração (RT) e o alongamento à ruptura (AR) dos filmes referência (PE), controle (AC), e dos filmes ativos (AC+EARR) foram expressos em valores médio  $\pm$  desvio padrão (Tabela 5).

**Tabela 5.** Média  $\pm$  Desvio Padrão das propriedades: espessura, resistência máxima à tração e alongamento na ruptura dos filmes PE, AC e AC + EARR.

Resposta	PE	AC	AC + EARR
Espessura (mm)	0,0914 $\pm$ 0,001 <sup>a</sup>	0,0276 $\pm$ 0,001 <sup>b</sup>	0,0316 $\pm$ 0,002 <sup>c</sup>
RT (MPa)	24 - 31 <sup>a</sup>	64,58 $\pm$ 13,57 <sup>b</sup>	55,65 $\pm$ 13,57 <sup>c</sup>
AR (mm)	400 - 800 <sup>a</sup>	22,55 $\pm$ 9,18 <sup>b</sup>	20,77 $\pm$ 4,77 <sup>b</sup>

<sup>a b c</sup> Médias com expoentes diferentes, na mesma coluna, indicam diferença estatística ( $p < 0,05$ )  
RT – resistência máxima a tração; AR – Alongamento na ruptura.

Os filmes referência (PE) e controle (AC) apresentaram baixa variação da espessura (EP) entre os corpos de prova, indicando uma homogeneidade dos filmes desenvolvidos. A espessura do filme ativo (AC+AERR), teve maior variação entre os corpos de prova, comparativamente aos filmes referência (PE) e controle (AC).

O filme ativo (AC+EARR) apresentou aumento significativo na espessura quando comparado ao filme AC ( $p < 0,05$ ), decorrente da incorporação do extrato do repolho roxo à matriz polimérica. Musso *et al.* (2023), Uranga *et al.* (2018), Yong *et al.* (2022), também reportaram o aumento da espessura com a incorporação de extrato de antocianina de repolho roxo em matrizes poliméricas.

Com relação às propriedades mecânicas dos filmes, observou-se que a adição do extrato de antocianina na matriz polimérica do filme de acetato de celulose reduziu significativamente a resistência máxima à tração (RT) ( $p < 0,05$ ). A RT do filme ativo (AC+EARR) cujo o valor determinado foi de 55,65 MPa, foi menor do que a do filme controle (AC), com valor de 64,68 MPa. O alongamento na ruptura dos filmes a base de acetato de celulose, não alterou com a adição do extrato de repolho roxo ( $p > 0,05$ ). Embora a incorporação de compostos ativos, não tenha alterado o AR, a resistência foi alterada ( $p < 0,05$ ). Situação similar foi evidenciada por MA *et al.* (2018) e Freitas *et al.*, (2020), cujos estudos indicaram que as interações intermoleculares das cadeias poliméricas foram enfraquecidas devido à presença de diversos tipos de polissacarídeos presentes nos extratos de antocianina.

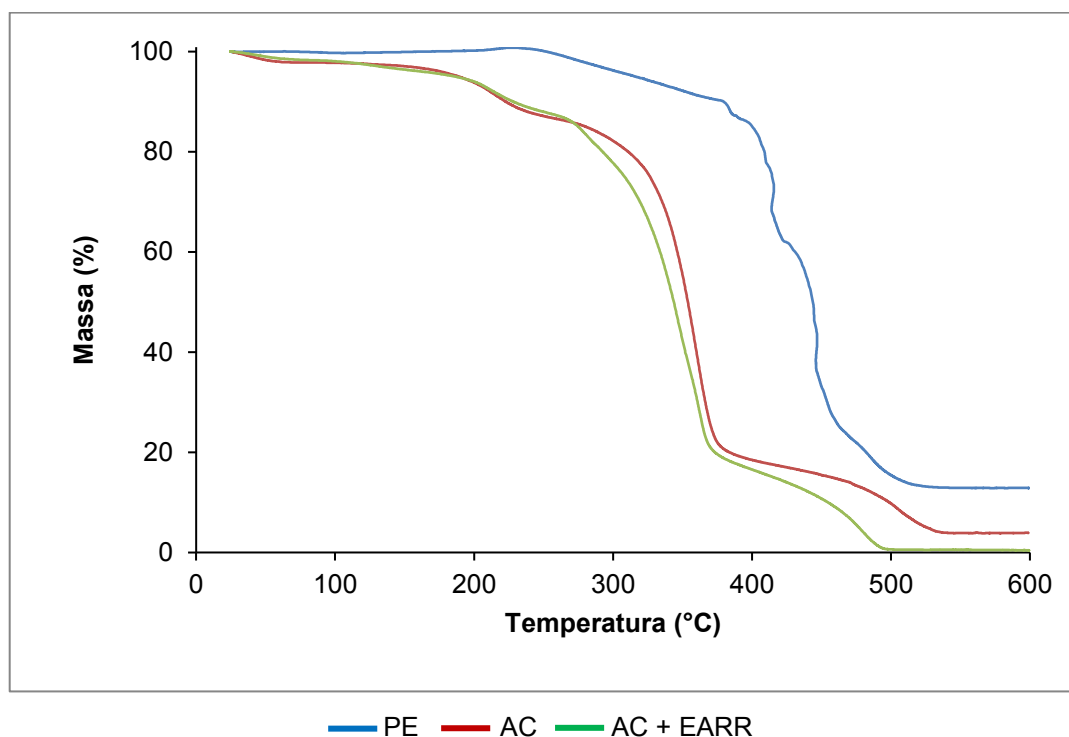
Embora os valores médios referentes à resistência máxima à tração (RT) e ao alongamento na ruptura (AR), tenham sido menores do que os valores do filme do filme referência (PE), o emprego dos filmes ativos e de acetato de celulose como embalagens complementares é suficientemente capaz de proteger as maçãs minimamente processadas e por isso recomenda-se o uso para essa aplicação.

### 5.3.3 Análise termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica é usada para caracterizar as propriedades físicas e químicas dos materiais de embalagens de alimentos, como uma função da temperatura, em atmosfera controlada pois determina a variação da massa do material.

As curvas termogravimétricas (TGA) dos filmes referência (PE), controle (AC), e ativo (AC+EARR) são apresentadas na figura 3, na qual as perdas de massa (%) das amostras foram plotadas em função da temperatura, que variou de 25 °C a 600 °C, a uma taxa de aquecimento constante.

**Figura 3.** Curvas termogravimétricas (TGA), dos filmes referência (PE), controle (AC), e filme ativo (AC+EARR).



O filme controle (AC) e o filme ativo (AC+EARR) apresentaram comportamento similar até 280 °C. Foi observado um primeiro evento, que ocorreu entre 25 °C e 120 °C, com perda de 2 – 3% de massa (m/m), relacionada à evaporação da água livre, decorrente da ação do plastificante TEC, que aumenta a distância entre as cadeias poliméricas, aumentando a mobilidade da água.

No filme controle (AC), o segundo evento foi observado entre 120 °C e 280 °C, este evento, pode ser atribuído à volatilização do TEC e à evaporação da água ligada residual, uma perda de 20% de massa (m/m). O terceiro evento ocorreu entre 280 °C e 400 °C, quando o filme controle (AC) foi analisado, com aproximadamente 85% (m/m) de perda massa, essa etapa está associada principalmente à decomposição do polímero de AC. O quarto evento ocorreu entre 400 °C e 570 °C, decorrentes das degradações secundárias dos produtos formados na primeira degradação da cadeia. Efeitos similares de degradação térmica do acetato de celulose com o plastificante TEC foram identificados por Teixeira *et al.* (2021).

Para o filme ativo (AC+EARR), observou-se um segundo evento entre 120 °C e 270 °C, com 15% (m/m) de perda de massa, assim como no filme controle, atribuídos à volatilização do TEC e à evaporação da água ligada residual. O terceiro evento ocorreu entre 270 °C e 370 °C, com aproximadamente 80% (m/m) de perda de massa. O quarto evento, relativo às degradações secundárias dos produtos formados na primeira degradação da cadeia, que ocorreu entre 370 °C e 500 °C.

A temperatura inicial de decomposição e a temperatura de máxima degradação do ativo (AC+EARR) foi menor em comparação ao filme controle (AC). Esse comportamento já era esperado, uma vez que o extrato de antocianina de repolho roxo possui compostos mais voláteis e mais sensíveis termicamente, degradando em temperaturas menores. Além disso, outra explicação para este comportamento seria que, a interação entre as cadeias poliméricas do filme pode ter sido reduzida pela presença do extrato de antocianina do repolho roxo, dessa forma facilitando a sua decomposição térmica em temperaturas mais baixas, quando comparadas com a temperatura de decomposição do filme controle. Tal comportamento está associado à carbonização dos produtos oriundos da fragmentação de estruturas orgânicas Teixeira *et al.* (2021) e Freitas *et al.* (2020).

No filme PE foi verificado uma situação anormal entre as temperaturas 218 °C e 226 °C, houve um aumento da massa de 0,05 - 0,1%, não identificada em demais literaturas, podendo indicar uma falha na leitura do filme. Dois eventos foram identificados, no primeiro houve a perda de massa entre a temperatura 200 °C e 380 °C, que está relacionada à remoção de água livre e no segundo, ocorreu a decomposição térmica associada a temperaturas na faixa 300 °C e 600 °C (com perda de massa superior a 90%), resultados similares foram identificados Coutinho *et al.*

(2003) e segundo o estudo esta perda de massa foi atribuída à decomposição pirolítica do filme referência (PE).

Os filmes à base de acetato de celulose, apresentaram uma menor estabilidade térmica, quando comparado ao filme referência (PE), a incorporação do extrato de antocianina do repolho roxo, devido à presença de compostos mais voláteis e sensíveis, apresentou temperatura máxima de degradação ainda menor, do que o filme controle (CA). Contudo, a estabilidade térmica está acima das temperaturas utilizadas nos processos industriais para processamento de frutas minimamente processadas, viabilizando o potencial uso do filme ativo (AC+EARR).

#### 5.3.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

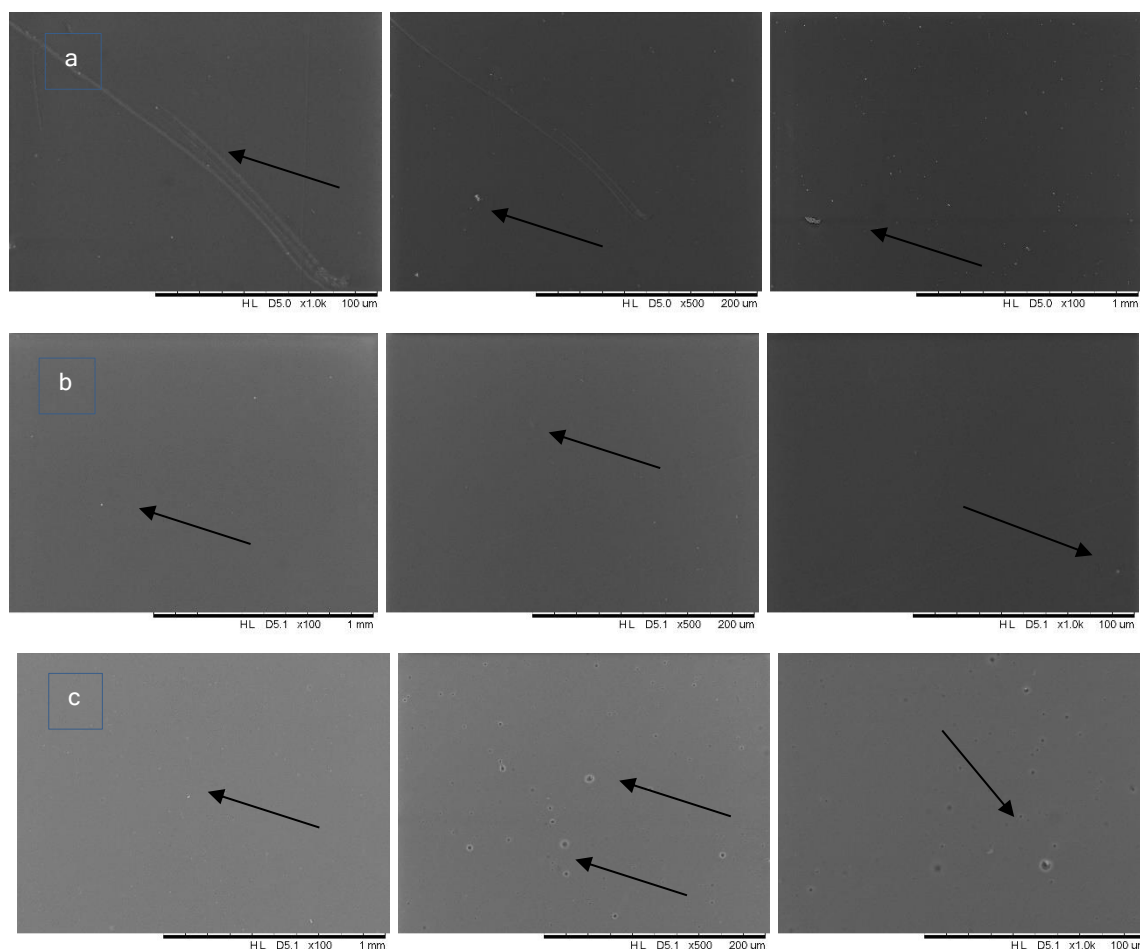
Os filmes ativos (AC+EARR), controle (AC), foram comparados pela análise MEV, com a finalidade de identificar a influência da adição de antocianinas, na estrutura dos filmes, os filmes ativo e controle foram também comparados com o filme referência (PE) (Figura 4).

A partir das micrografias do filme referência (PE), Figura 4a, é possível perceber que a superfície apresenta homogênea, não porosa, e as falhas presentes, na forma de risco, podem ser atribuídas ao molde de prensagem, durante o processo de fabricação.

O filme controle (AC), Figura 4b, possui na sua superfície a presença de microbolhas de evaporação do solvente, mas no geral, apresentou-se homogênea, compacta, e sem aglomerados, indicando uma dispersão completa e compatibilidade da estrutura do AC com o plastificante TEC, situação similar relatada por Teixeira *et al.* (2021).

O filme ativo, incorporado com extrato de antocianinas do repolho roxo (AC+EARR), Figura 4c, apresentou uma superfície microscopicamente heterogênea, com micropartículas, de aparência e distribuição de tamanho uniformes. A formação dessas micropartículas pode estar atribuída à baixa interação dos componentes, predominantemente hidrofílicos presentes no extrato de antocianina de repolho roxo, polímero e o plastificante TEC.

**Figura 4.** Micrografias MEV dos filmes referência (PE) (a), controle (AC) (a) e ativo (AC+EARR) (c) – Ampliações 100x, 500x e 1000x, da esquerda para a direita, respectivamente.



Situação similar foi reportada por Machado (2017) e Freitas *et al.* (2020) que desenvolveram filmes inteligentes, à base de acetato, incorporado com extrato de antocianina, os autores evidenciaram que os resultados da microscopia eletrônica de varredura (MEV), estavam de acordo com os obtidos por espectroscopia na região do infravermelho (FT-IR), aumento na heterogeneidade na superfície dos filmes, devido à baixa interação de seus componentes.

### 5.3.5 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)

Foi investigada a permeabilidade ao vapor d'água dos filmes ativo (AC+EARR), e dos filmes controle (AC), o ganho de massa, em função do tempo foi plotado. A permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos diferentes filmes foram calculadas, os

resultados foram apresentados como média  $\pm$  desvio padrão e comparados ao filme referência (PE) (Tabela 6).

**Tabela 6.** Média  $\pm$  desvio padrão para PVA ( $\times 10^{-11} \text{g} \cdot \text{pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ), dos filmes PE, AC e AC+EARR.

Parâmetros	PE	AC	AC + EARR
PVA	$0,4 \pm 0,01^a$	$3,5 \pm 0,30^b$	$4,2 \pm 0,40^c$

<sup>a b c</sup> Médias com expoentes diferentes, na mesma linha, indicam diferença estatística ( $p < 0,05$ ).

O extrato de antocianina aumentou significativamente a permeabilidade do filme de acetato de celulose, o que está de acordo com as pesquisas de Hernandez (1994), que afirmou que a permeação ao vapor de água através das cadeias poliméricas, está relacionada com a hidrofobicidade dos filmes. O extrato de antocianina do repolho roxo tem caráter mais hidrofílico e ao ser incorporado na matriz polimérica do filme de acetato de celulose que é hidrofóbico, alterou a superfície e promoveu maior desorganização das cadeias, favorecendo a permeação ao vapor d'água. Esta alteração na superfície pode ser identificada na Figura 4.

### 5.3.6 Análise cromática ( $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ ) e Opacidade

A opacidade e a cor dos filmes, são fatores importantes para a aceitação do consumidor do produto, segundo pesquisa realizada por Peng & Li (2023), uma vez que são utilizados como materiais de embalagem para os alimentos, portanto, é desejável que os compostos ativos incorporados, não altere ou altere minimamente a sua transparência (Souza *et al.*, 2017).

As coordenadas de cor  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  e a opacidade dos filmes ativos (AC+EARR), controle (AC) e referência (PE) foram determinadas e estão apresentadas como média  $\pm$  desvio padrão (Tabela 7).

**Tabela 7.** Média  $\pm$  desvio padrão para as coordenadas L\*, a\*, b\* e opacidade, dos filmes PE, AC e AC+EARR.

Parâmetros	PE	AC	AC + EARR
L*	89,73 $\pm$ 0,96 <sup>a</sup>	90,67 $\pm$ 0,47 <sup>a</sup>	89,48 $\pm$ 0,60 <sup>a</sup>
a*	-1,04 $\pm$ 0,06 <sup>a</sup>	-0,99 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup>	-0,78 $\pm$ 0,01 <sup>b</sup>
b*	1,19 $\pm$ 0,11 <sup>a</sup>	1,78 $\pm$ 0,09 <sup>b</sup>	1,66 $\pm$ 0,07 <sup>b</sup>
O*	9,59 $\pm$ 0,28 <sup>a</sup>	6,31 $\pm$ 0,48 <sup>b</sup>	9,69 $\pm$ 0,33 <sup>a</sup>

<sup>a b</sup> Médias com expoentes diferentes, na mesma linha, indicam diferença estatística ( $p < 0,05$ ).

A coordenada colorimétrica L\*, não foi influenciada ( $p > 0,05$ ) com a incorporação do extrato de antocianina do repolho roxo (EARR), que manteve a luminosidade similar à dos filmes controle (AC) e referência (PE).

Quanto à coordenada colorimétrica a\* (eixo verde-vermelho) diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) foram observadas no filme ativo (AC+EARR), que apresentou, cor rosa claro, devido aos pigmentos solúveis presentes no extrato de antocianina de repolho roxo, de Moura *et al.* (2018) e Yong *et al.* (2022) relataram na sua pesquisa, resultados similares.

Em relação à coordenada colorimétrica b\* (eixo azul-amarelo), os filmes à base de acetato de celulose, apresentaram valores significativamente diferentes, indicando uma coloração mais amarelada, quando comparado com o filme referência (PE).

O extrato de antocianina interferiu na opacidade do filme ativo (AC+EARR), apresentando valor significativamente maior do que o controle (AC) ( $p < 0,05$ ), o que é considerado um fator positivo, a capacidade de bloquear a luz, é uma característica desejável para os materiais de embalagem, confere uma barreira de proteção extra, contra o processo de oxidação, visto que a luz, desempenha um papel importante no processo de oxidação, catalisando as reações químicas, acelerando o processo de deterioração, o que corrobora com os resultados da análise da coordenada colorimétrica L\*, da maçã minimamente processada embalada com o filme ativo, a maçã apresentou valor de L\* significativamente maior do que as embaladas nos filmes controle e referência. Uranga *et al.*, (2018), na sua pesquisa, também identificou que o brilho diminuiu com a adição do extrato de antocianina, indicando superfícies mais ásperas.

## **5.4 Validação do efeito antioxidante do filme ativo otimizado em maçãs minimamente processadas**

Para a validação do efeito antioxidante do filme ativo otimizado, foram realizadas análises nas maçãs minimamente processadas, entre os dias zero e sete, sob vácuo e refrigeração ( $4 \pm 2$  °C). Os resultados foram comparados às maçãs minimamente processadas embaladas nos filmes controle (sem adição de extrato do repolho roxo) e nos filmes referência (PE).

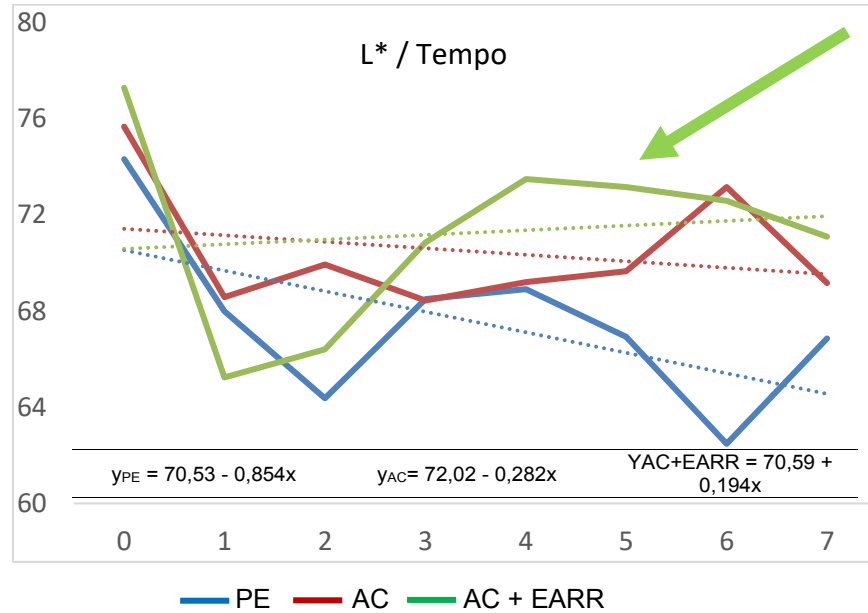
Os parâmetros analisados nas maçãs minimamente processadas foram as coordenadas de cor, parâmetros físico-químicos e firmeza. Conforme discutido a seguir.

### **5.4.1 Análise cromática - luminosidade, saturação e índice de escurecimento**

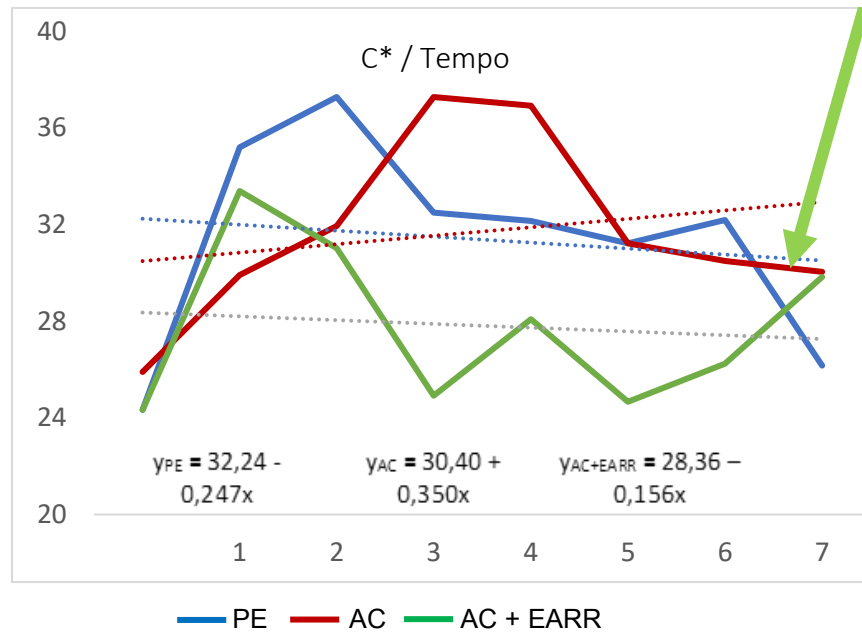
A cor é um dos principais atributos associados à qualidade da maçã. O escurecimento enzimático é o maior desafio das indústrias de maçãs minimamente processadas, uma vez que ocasiona perda das características sensoriais e redução da vida útil.

A avaliação do escurecimento enzimático foi baseada na medição das coordenadas colorimétricas ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) da superfície da maçã minimamente processada, embalada no filme ativo (AC+EARR), filme controle (AC) e filme referência (PE), posteriormente envolvidas com papel laminado e embaladas à vácuo em sacos de polietileno, armazenadas sob refrigeração ( $4 \pm 2$  °C), por sete dias. Os valores registrados ao longo do tempo e as respectivas equações estão apresentados nas figuras 5 e a variação visual das maçãs, estão apresentadas na figura 6.

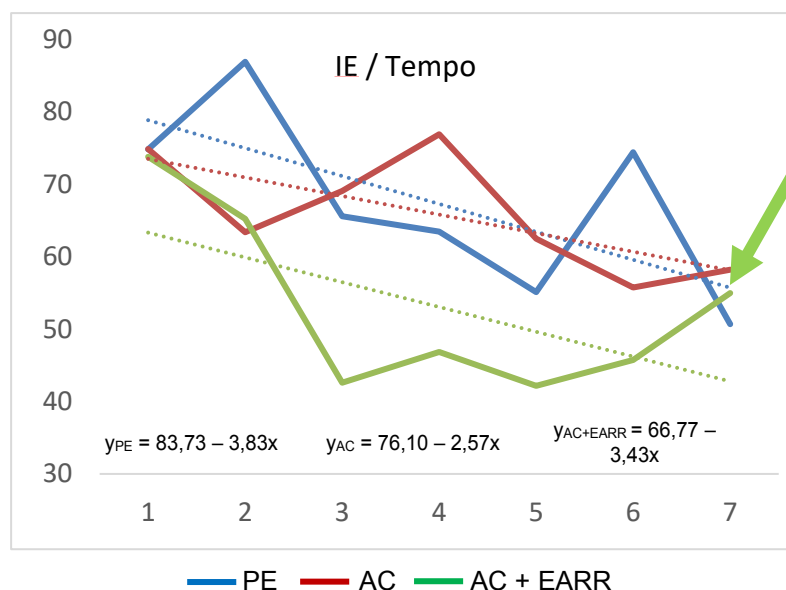
**Figura 5a.** Coordenada colorimétrica luminosidade ( $L^*$ ) das maçãs minimamente processadas durante o tempo de armazenamento.



**Figura 5b.** Saturação  $C^*$  das maçãs minimamente processadas durante o tempo de armazenamento.



**Figura 5c.** Índice de escurecimento das maçãs minimamente processadas durante o tempo de armazenamento.

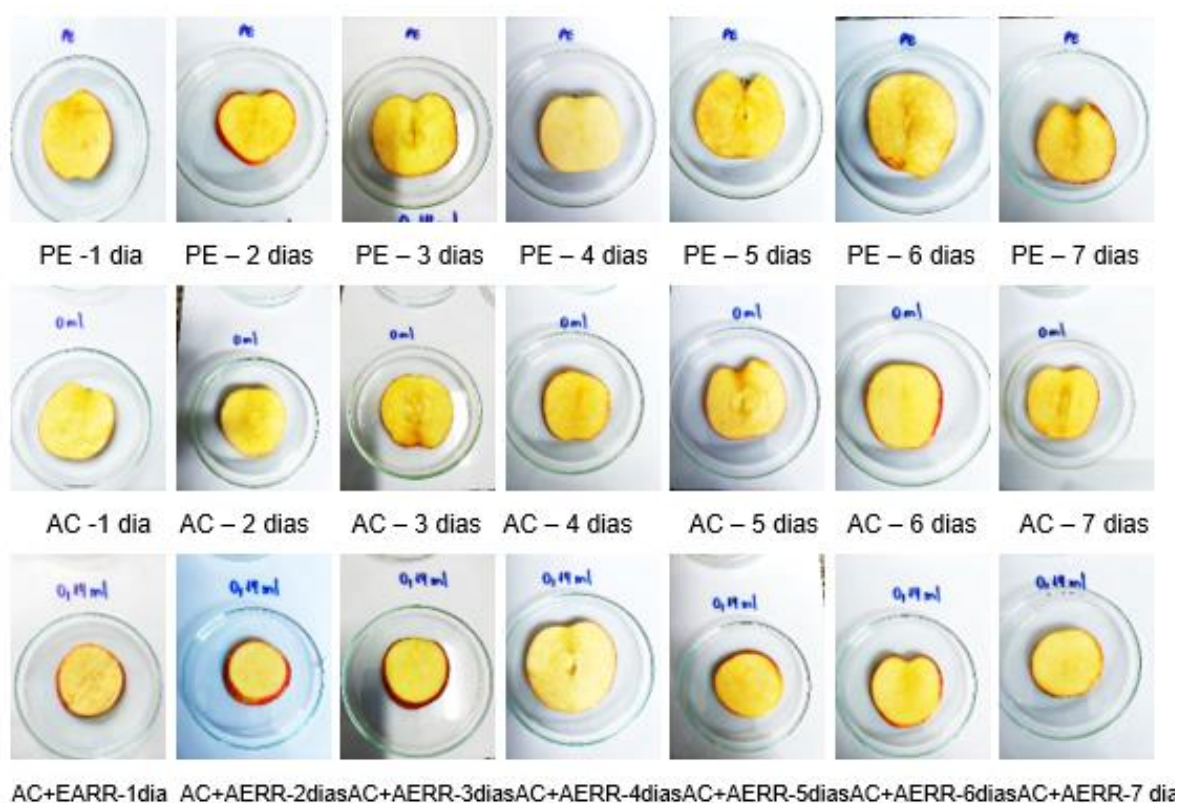


As embalagens utilizadas para revestir as maçãs minimamente processadas diferiram quanto ao atributo luminosidade ( $L^*$ ), ao nível de 5% de significância. As maçãs embaladas no filme referência (PE) apresentaram redução no valor  $L^*$  já nos primeiros dias de armazenamento, indicando a ocorrência de escurecimento enzimático. As maçãs embaladas no filme controle (AC), também apresentaram uma redução nos primeiros dias de armazenamento, contudo mantiveram uma estabilidade do valor de  $L^*$  ao longo do tempo de armazenamento. As maçãs embaladas no filme ativo (AC+EARR) tiveram uma redução do valor nos primeiros dias, porém, diferente dos filmes controle (AC) e referência (PE), aumentaram o valor da coordenada colorimétrica  $L^*$ , entre os dias 3 e 5, e posterior estabilização dos valores. Este resultado está de acordo com o valor de opacidade do filme ativo, a opacidade é uma barreira extra contra o processo de oxidação.

A saturação ( $C^*$ ) é uma medida de pureza da cor, foi reduzida significativamente ( $p < 0,05$ ) nas maçãs embaladas com filme ativo (AC+EARR), indicando uma menor intensidade da coloração marrom, corroborando com os resultados anteriores, podendo inferir uma liberação controlada dos antioxidantes, migrando do filme para o alimento. Uranga *et al.* (2018), aplicou filmes de gelatina de peixe, incorporados com extrato de antocianina do repolho roxo, em simuladores alimentares e obtiveram resultados similares.

O índice de escurecimento (IE) retrata o aspecto visual da polpa de maçã, também foi reduzida significativamente ( $p < 0,05$ ) nas maçãs embaladas com filme ativo (AC+EARR). Esses resultados, demonstram que o filme ativo (AC+EARR), pode potencialmente eliminar radicais livres, através da provável doação de átomos de hidrogênio fenólico e dessa forma, prolongar a vida útil na maçã minimamente processada, retardando ou minimizando o escurecimento oxidativo.

**Figura 6.** Registro fotográfico das maçãs minimamente processadas, maçã referência, embaladas em diferentes materiais, nos dias 1 a 7 de armazenamento.

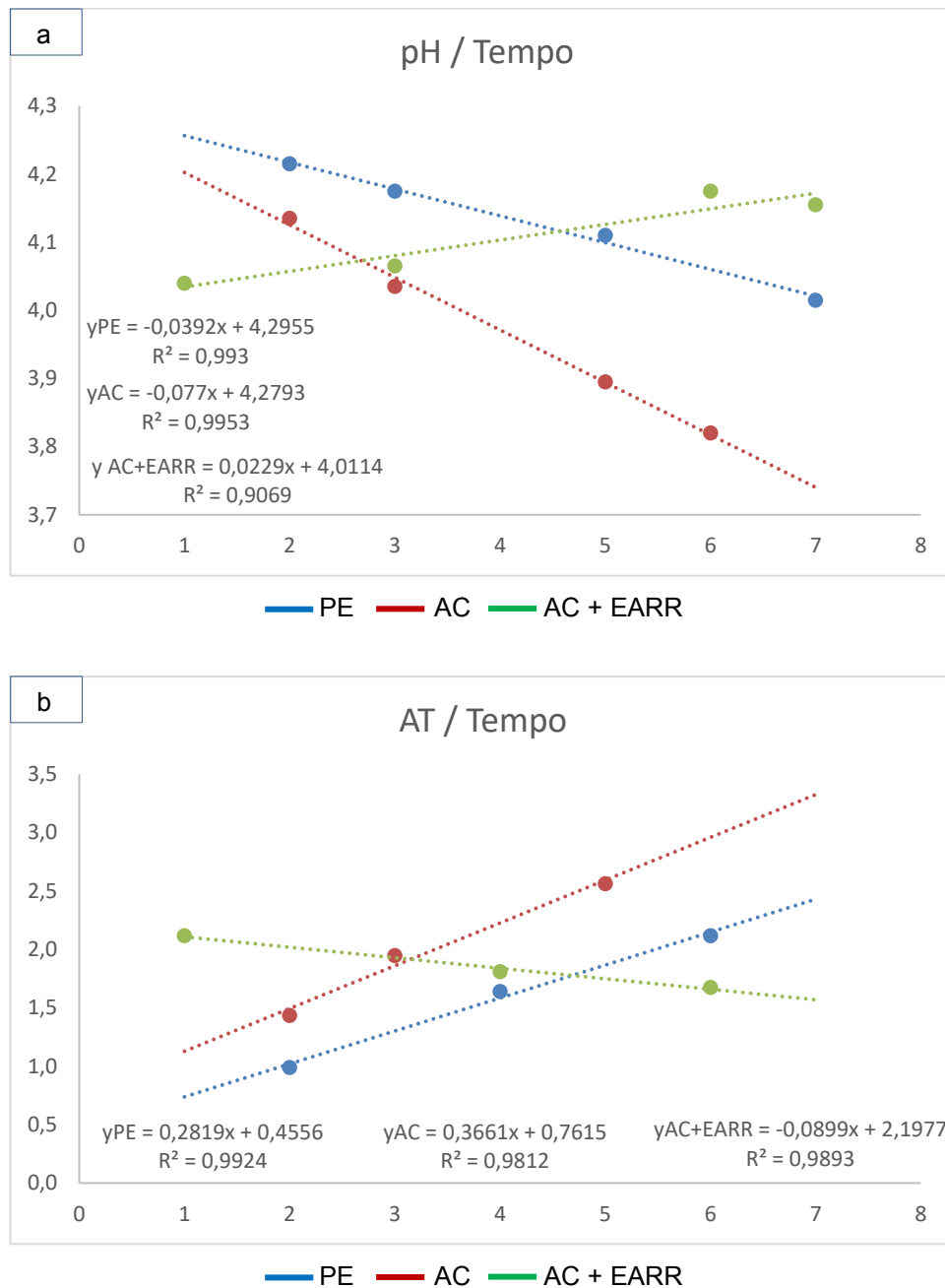


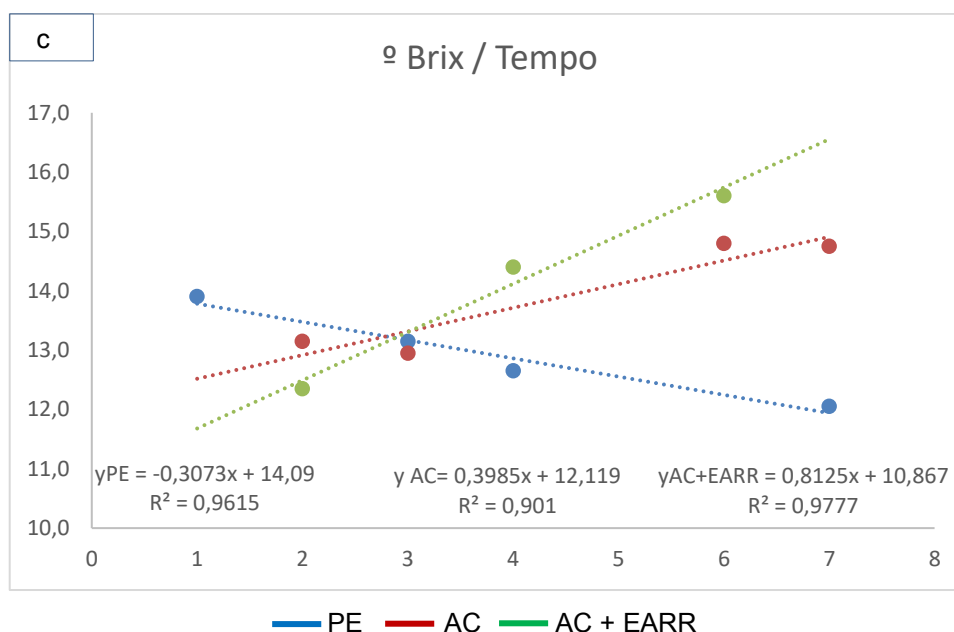
#### 5.4.2 Propriedades físico-químicas e de textura de maçãs minimamente processadas

A qualidade pode ser descrita como um conjunto de muitas propriedades ou características peculiares de cada produto hortícola. Importantes fatores nessa qualidade são o pH, juntamente com os teores de acidez titulável (AT) e de sólidos solúveis (SST), sendo responsáveis pelo sabor desses produtos através da sua acidez e doçura (CHITARRA & CHITARRA, 2005).

A firmeza, a acidez titulável (AT), o teor de sólidos solúveis (SST) e o pH são atributos importantes que conferem qualidade e sabor às maçãs. Os resultados das análises das maçãs minimamente processadas armazenadas nos diferentes filmes, referentes à estes parâmetros e as respectivas equações estão descritos na Figura 7.

**Figura 7a.** Parâmetros físico-químicos das maçãs minimamente processadas ao longo período de armazenamento.





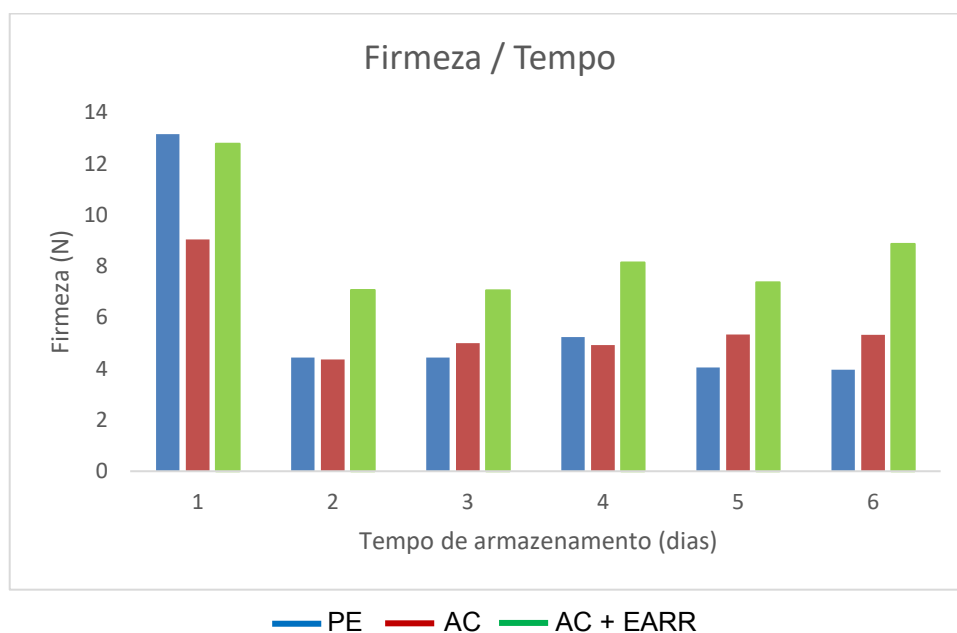
O pH das maçãs minimamente processadas embaladas nos filmes ativo (AC+EARR) apresentaram aumento, com tendência de estabilização, diferente do observado nas maçãs embaladas nos filmes controle (AC) e referência (PE), que apresentaram redução, podendo inferir que a incorporação do extrato de antocianina do repolho roxo, alterou a permeabilidade do filme de modo a permitir o processo respiratório. O aumento do pH da maçã é decorrente da redução do ácido orgânico (ácido málico), que é consumido durante a respiração da fruta (Figura 7a).

No parâmetro acidez titulável (AT) observou-se redução nas maçãs embaladas nos filmes ativo (AC+EARR) e aumento nas maçãs embaladas nos filmes controle (AC) e referência (PE) indicando que a incorporação do extrato de antocianina do repolho roxo desacelerou o processo de maturação da fruta. Com a maturidade da fruta há o aumento do teor de açúcar, a diluição da concentração do ácido e a transformação desse ácido em açúcar orgânico (Figura 7b).

O teor de sólidos solúveis (SST) aumentou nas maçãs embaladas nos filmes à base de acetato de celulose (ativo e controle). A concentração do teor de sólidos solúveis aumenta a com a maturidade da fruta, o que pode ser atribuído a hidrólise da protopectina em pectina solúvel e a hidrólise do amido em glicose e frutose (Figura 7c).

Quanto ao atributo firmeza, todas as maçãs minimamente processadas, apresentaram redução do valor, independente do material de embalagem, sendo que a principal razão para o amolecimento dos frutos é a degradação da parede celular, decorrente da perda de água, respiração e dano do tecido. (Figura 8).

**Figura 8.** Parâmetro firmeza das maçãs minimamente processadas ao longo período de armazenamento.



As maçãs minimamente processadas, embaladas com o filme ativo (AC+EARR), mantiveram valores de firmeza, significativamente maiores comparativamente aos demais filmes, mediana das maçãs embaladas no filme ativo 7,76, mediana dos filmes controle e referência 5,16 e 4,43, respectivamente, sendo uma característica desejável.

## 6 CONCLUSÃO

Os filmes ativos, desenvolvidos com acetato de celulose, incorporados com extrato de antocianina do repolho roxo, podem ser uma alternativa aos plásticos de base petroquímica e aos antioxidantes sintéticos, principalmente na indústria de frutas e vegetais minimamente processados. Neste estudo, o extrato alcoólico do repolho roxo, mostrou-se rico em antocianina e manteve as atividades antioxidantes após incorporação na matriz polimérica dos filmes de acetato de celulose.

Os resultados mostraram que os filmes ativos possuem atributos excelentes, tais como a atividade antioxidante e a opacidade. As maçãs minimamente processadas, embaladas com o filme ativo, apresentaram menor índice de escurecimento, maior firmeza, maior valor de pH e menor acidez ao longo do tempo de armazenamento, comparativamente às embaladas nos filmes controle (AC) e referência (PE), o que demonstra o potencial do extrato de antocianina do repolho roxo incorporado nos filmes de acetato como agente antioxidante. No filme, houve redução da resistência à tração e a elevadas temperaturas, além de uma maior permeabilidade ao vapor de água, contudo, o emprego do filme ativo como embalagens complementares é capaz de retardar o processo de amadurecimento e oxidação das maçãs minimamente processadas, podendo ser utilizada em embalagens alimentícias.

## REFERÊNCIAS

- AHMADIANI, N., ROBBINS, R. J., COLLINS, T. M., & GIUSTI, M. M. (2016). Molar absorptivity ( $\epsilon$ ) and spectral characteristics of cyanidin-based anthocyanins from red cabbage. In *Food Chemistry* (Vol. 197, p. 900–906). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.032>
- ALIZADEH SANI, M., TAVASSOLI, M., SALIM, S. A., AZIZI-LALABADI, M., & MCCLEMENTS, D. J. (2022). Development of green halochromic smart and active packaging materials: TiO<sub>2</sub> nanoparticle- and anthocyanin-loaded gelatin/k-carrageenan films. *Food Hydrocolloids*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107324>
- ALMEIDA, G. W. R. Desenvolvimento e caracterização de filme nanocompósito de base celulósica e sua avaliação como embalagem ativa antimicrobiana. 2010. 95f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2010.
- ARRIETA, M. P., SESSINI, V., & PEPONI, L. (2017). Biodegradable poly(ester-urethane) incorporated with catechin with shape memory and antioxidant activity for food packaging. *European Polymer Journal*, 94(April), 111–124. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.06.047>
- ASSIS, R. Q., LOPES, S. M., COSTA, T. M. H., FLÔRES, S. H., & RIOS, A. DE O. (2017). Active biodegradable cassava starch films incorporated lycopene nanocapsules. *Industrial Crops and Products*, 109(March), 818–827. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.043>
- ASSIS, R. Q., RIOS, P. D. A., RIOS, A. DE O., & OLIVERA, F. C. (2020). Biodegradable packaging of cellulose acetate incorporated with norbixin, lycopene or zeaxanthin. *Industrial Crops and Products*, 147(January), 112212. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112212>
- ASTM - American Society Standard Testing and Materials. Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting. D882-12, p. 12, 2018.
- ASTM - American Society Standard Testing and Materials. Standard Test Method for Determining Gas Permeability Characteristics of Plastic Film and Sheeting. D1434-82
- AZEREDO, H. M. C. DE; FARIA, J. DE A. F.; AZEREDO, A. M. C. DE. Embalagens ativas para alimentos. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 20, n. 3, p. 337-341, Dec. 2000.
- BHARGAVA, N., SHARANAGAT, V. S., MOR, R. S., & KUMAR, K. (2020). Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived bioactive compounds: A review. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 105, p. 385–401). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.015>

BONDONNO, N. P., BONDONNO, C. P., WARD, N. C., HODGSON, J. M., & CROFT, K. D. (2017). The cardiovascular health benefits of apples: Whole fruit vs. isolated compounds. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 69, p. 243–256). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.04.012>

CASTAÑEDA-OVANDO, A., PACHECO-HERNÁNDEZ, M. DE L., PÁEZ-HERNÁNDEZ, M. E., RODRÍGUEZ, J. A., & GALÁN-VIDAL, C. A. (2009). Chemical studies of anthocyanins: A review. *Food Chemistry*, 113(4), 859–871. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.001>

CHANDRASEKHAR, J., MADHUSUDHAN, M. C., & RAGHAVARAO, K. S. M. S. (2012). Extraction of anthocyanins from red cabbage and purification using adsorption. *Food and Bioprocess Technology*, 90(4), 615–623. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.07.004>

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. Pós-colheita de frutas e hortaliças: fisiologia e manuseio. 2. ed. rev. e ampl. Lavras: UFLA, 2005. 785 p.

CHEN, C., JIANG, A., LIU, C., WAGSTAFF, C., ZHAO, Q., ZHANG, Y., & HU, W. (2021). Hydrogen sulfide inhibits the browning of fresh-cut apple by regulating the antioxidant, energy and lipid metabolism. In *Postharvest Biology and Technology* (Vol. 175). <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111487>

COUTINHO, F. M. B., MELLO, I. L., & SANTA MARIA, L. C. DE. (2003). Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. *Polímeros*, 13(1), 01–13. <https://doi.org/10.1590/s0104-14282003000100005>

DA SILVA, M. V., ROSA, C. I. L. F., & BOAS, E. V. DE B. V. (2009). Conceitos e métodos de controle do escurecimento enzimático no processamento mínimo de frutas e hortaliças. *Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos*, 27(1), 83–96. <https://doi.org/10.5380/cep.v27i1.14955>

DA SILVA, M. V., ROSA, C. I. L. F., & BOAS, E. V. DE B. V. (2009). Conceitos e Métodos de controle do escurecimento enzimático no processamento mínimo de frutas e hortaliças. *Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos*, 27(1), 8396. <https://doi.org/10.5380/cep.v27i1.14955>

DE MOURA, S. C. S. R., BERLING, C. L., GERMER, S. P. M., ALVIM, I. D., & HUBINGER, M. D. (2018). Encapsulating anthocyanins from *Hibiscus sabdariffa* L. calyces by ionic gelation: Pigment stability during storage of microparticles. *Food Chemistry*, 241(May 2017), 317–327. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.095>

DE OLIVEIRA ALVES SENA, E., OLIVEIRA DA SILVA, P. S., DE ARAGÃO BATISTA, M. C., ALONZO SARGENT, S., GANASSALI DE OLIVEIRA JUNIOR, L. F., ALMEIDA CASTRO PAGANI, A., & GUTIERREZ CARNELOSSI, M. A. (2019). Calcium application via hydrocooling and edible coating for the conservation and quality of cashew apples. *Scientia Horticulturae*, 256(November 2018), 108531. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.058>

EDGAR BUCHANAN, C.M., DEBENHAM, J.S., RUNDQUIST, P.A., SEILER, B.D., SHELTON, M.C., TINDALL, D., K. J. (2001). Advances in cellulose ether performance and application. *Prog. Polym. Sci.*, 26, 1605–1688

EK, MONICA, GÖRAN GELLERSTEDT E GUNNAR HENRIKSSON, eds. *Química e tecnologia da polpação*. Vol. 2. Walter de Gruyter, 2009.

FANG, Z., ZHAO, Y., WARNER, R. D., & JOHNSON, S. K. (2017). Active and intelligent packaging in meat industry. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 61, p. 60–71). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.002>

FAO/STAT. Food agriculture organization of the United Nations. Statistical database. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/>

FIALHO E MORAES, A. R., GOUVEIA, L. E. R., SOARES, N. D. F. F., SANTOS, M. M. D. S., & GONÇALVES, J. C. M. P. (2007). Development and evaluation of antimicrobial film on butter conservation. *Ciencia e Tecnologia de Alimentos*, 27(SUPPL.1), 33–36. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612007000500006>

FISCHER, S., THÜMMLER, K., VOLKERT, B., HETTRICH, K., SCHMIDT, I., & FISCHER, K. (2008). Properties and applications of cellulose acetate. *Macromolecular Symposia*, 262(1), 89–96. <https://doi.org/10.1002/masy.200850210>

FREITAS, P. A. V., SILVA, R. R. A., DE OLIVEIRA, T. V., SOARES, R. R. A., JUNIOR, N. S., MORAES, A. R. F., PIRES, A. C. DOS S., & SOARES, N. F. F. (2020). Development and characterization of intelligent cellulose acetate-based films using red cabbage extract for visual detection of volatile bases. In *Lwt* (Vol. 132). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109780>

GHAREAGHAJLOU, N., HALLAJ-NEZHADI, S., & GHASEMPOUR, Z. (2021). Red cabbage anthocyanins: Stability, extraction, biological activities and applications in food systems. In *Food Chemistry* (Vol. 365). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130482>

GIADA, MARIA DE LOURDES REIS. Avaliação da capacidade antioxidante dos compostos fenólicos do cotilédone da semente de girassol (*Helianthus annuus* L.) rajada. 2006. 233 f. Tese de doutorado (Faculdade de Ciências Farmacêuticas - Nutrição Experimental) - Universidade do Estado de São Paulo, São Paulo, 2006. DOI 10.11606/T.9.2017.tde-22082017-093259. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/9/9132/tde-22082017-093259/pt-br.php>.

GOUVEIA, L. E. R.; MORAES, A. R. F.; SOARES, N. F. F.; PEREIRA, J. M. A. T. K.; GONÇALVES, M. P. J. C.; MINIM, V. P. Desenvolvimento e avaliação de filme ativo aromatizado na incorporação de sabor em ricota. *Revista do Instituto Cândido Tostes*, v. 61, p.138-141, 2006

HARTMANN, R. E MEISEL, H. Food-derived peptides with biological activity: from research to food applications. *Current Opinion in Biotechnology*, v. 18, p. 163-169, 2007.

IAL - Instituto Adolfo Lutz. Métodos físicos e químicos para análise de alimentos. In: IAL. Normas Analíticas, Instituto Adolfo Lutz (Ed) SP Brazil, 2008.

IERNA, A., RIZZARELLI, P., MALVUCCIO, A., & RAPISARDA, M. (2017). Effect of different anti-browning agents on quality of minimally processed early potatoes packaged on a compostable film. In *Lwt* (Vol. 85, p. 434–439). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.03.043>

ISEPPI, R.; PILATI, F.; MARINI, M.; TOSELLI, M.; NIEDERHAUSERN, S.; GUERRIERI, E.; MESSI, P.; SABIA, C.; MANICARDI, M.; ANACARSO, I.; BONDI, M. Anti-listerial activity of a polymeric film coated with hybrid coatings doped with Enterocin 416K1 for use as bioactive food packaging. *International Journal of Food Microbiology*, v. 123, p. 281-287, 2008

J. LIANG, F. LI, Y. FANG, W.J. YANG, X.X. AN, L.Y. ZHAO. Response surface methodology in the optimization of tea polyphenols-loaded chitosan nanoclusters formulations *European Food Research and Technology*, 231 (6) (2010), pp. 917-924

JAFARZADEH, S., JAFARI, S. M., SALEHABADI, A., NAFCHI, A. M., UTHAYA KUMAR, U. S., & KHALIL, H. P. S. A. (2020). Biodegradable green packaging with antimicrobial functions based on the bioactive compounds from tropical plants and their by-products. *Trends in Food Science and Technology*, 100(February), 262–277.

KARASKI, T. U., RIBEIRO, F. DE M., PEREIRA, B. R., & ARTEAGA, L. P. S. de. (2016). *Embalagem e Sustentabilidade Desafios e orientações no contexto da Economia Circular*.

KIM, D. O. et al. Vitamin C equivalent antioxidant capacity (VCEAC) of phenolic phytochemicals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 50, n. 13, p. 3713–3717, 2002.

KHAN, M. R., DI GIUSEPPE, F. A., TORRIERI, E., & SADIQ, M. B. (2021). Recent advances In biopolymeric antioxidant films and coatings for preservation of nutritional quality of minimally processed fruits and vegetables. *Food Packaging and Shelf Life*, 30(July), 100752.

KHOSHNEVISAN, K., MALEKI, H., SAMADIAN, H., SHAHSAVARI, S., SARRAFZADEH, M. H., LARIJANI, B., DORKOOSH, F. A., HAGHPANAH, V., & KHORRAMIZADEH, M. R. (2018). Cellulose acetate electrospun nanofibers for drug delivery systems: Applications and recent advances. In *Carbohydrate Polymers* (Vol. 198, p. 131–141). <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.072>

KUREK, M., GAROFULIĆ, I. E., BAKIĆ, M. T., ŠČETAR, M., UZELAC, V. D., & GALIĆ, K. (2018). Development and evaluation of a novel antioxidant and pH indicator film based on chitosan and food waste sources of antioxidants. In *Food Hydrocolloids* (Vol. 84, p. 238–246). <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.05.050>

LANDIM, A. P. M., Bernardo, C. O., MARTINS, I. B. A., Francisco, M. R., SANTOS, M. B., & DE MELO, N. R. (2016). Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. *Polimeros*, 26, 82–92. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1897>

LAYCOCK, B.; NIKOLIĆ, M.; COLWELL, J. M.; GAUTHIER, E.; HALLEY, P.; BOTTLE, S.; GEORGE, G. Lifetime prediction of biodegradable polymers. *Progress in Polymer Science*, v. 71, p. 144–189, 2017.

LEI, Y., YAO, Q., JIN, Z., & WANG, Y. (2023). *Filmes inteligentes à base de pectina , alginato de sódio , nanocristais de celulose e antocianinas para monitorar o frescor dos alimentos* (Vol. 404).

LIMBO, S., & PIERGIOVANNI, L. (2007). Minimally processed potatoes. Part 2. Effects of High oxygen partial pressures in combination with ascorbic and citric acid on loss of some quality traits. *Postharvest Biology and Technology*, 43(2), 221–229.

LINO, R. C., DE CARVALHO, S. M., NORONHA, C. M., SGANZERLA, W. G., DA ROSA, C. G., NUNES, M. R., D'AVILA, R. F., ZAMBIAZI, R. C., & BARRETO, P. L. M. (2022). Production of methylcellulose films functionalized with poly- $\epsilon$ -caprolactone nanocapsules entrapped  $\beta$ -carotene for food packaging application. *Food Research International*, 160(April), 111750. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111750>

LUNA-GUZMÁN, I., & BARRETT, D. M. (2023). *Biologia e Tecnologia Pós-Colheita Comparação da eficácia do cloreto de cálcio e do lactato de cálcio na manutenção da estabilidade de prateleira e qualidade de melão minimamente processado* *Palavras-chave*. 19, 1–26.

M. L. SANYANG, S. M. SAPUAN, M. JAWAID, M. R. ISHAK & J. SAHARI (2015) Effect of Plasticizer Type and Concentration on Dynamic Mechanical Properties of Sugar Palm Starch–Based Films, *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 20:7, 627-636, DOI: 10.1080/1023666X.2015.1054107

M. RANGARAJ, V., RAMBABU, K., BANAT, F., & MITTAL, V. (2021). Natural antioxidants Based edible active food packaging: An overview of current advancements. *Food Bioscience*, 43(March), 101251

MACHADO, M. H. (2017). *Desenvolvimento e caracterização de filme indicador de pH com extrato de repolho roxo para monitoramento da qualidade de alimentos*.

MADEIRA, A. F. D. A. (2013). *Química da madeira a formação da madeira*. 1–4.

M. L. SANYANG, S. M. SAPUAN, M. JAWAID, M. R. ISHAK & J. SAHARI (2015) Effect of Plasticizer Type and Concentration on Dynamic Mechanical Properties of Sugar Palm Starch–Based Films, *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 20:7, 627-636, DOI: 10.1080/1023666X.2015.1054107

M. RANGARAJ, V., RAMBABU, K., BANAT, F., & MITTAL, V. (2021). Natural antioxidants Based edible active food packaging: An overview of current advancements. *Food Bioscience*, 43(March), 101251

MARA, S., FRANCHETTI, M., & MARCONATO, C. (2006). *Divulgação*. 29(4), 811–816.

MERRIFIELD, R. B. Solid phase peptide synthesis I. The synthesis of a tetrapeptide. *J. Am. Chem. Soc.*, v. 85, 2149-2154, 1963.

MILOVANOVIC, S., MARKOVIC, D., AKSENTIJEVIC, K., STOJANOVIC, D. B., IVANOVIC, J., & ZIZOVIC, I. (2016). Application of cellulose acetate for controlled release of thymol. *Carbohydrate Polymers*, 147, 344–353. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.03.093>

MORAES, A. R. F. E.; GOUVEIA, L. E. R.; SOARES, N. F. F.; SANTOS, M. M. S.; GONÇALVES, M. P. J. C. Desenvolvimento e avaliação de filme antimicrobiano na conservação de manteiga. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 27(supl.), p. 33-36, 2007.

MUSSO, Y. S., MORE, S., SALGADO, P. R., & MAURI, A. N. (2023). *Filmes de gelatina inteligente preparados com extratos de repolho roxo ( Brassica oleracea L .) como solvente*. 89, 1–33.

PANG, S., WANG, Y., JIA, H., HAO, R., JAN, M., LI, S., PU, Y., DONG, X., & PAN, J. (2023). *As propriedades do filme inteligente à base de gelatina sensível ao pH afetadas pelo poder do ultrassom e pela dose de antocianina do repolho roxo*. 230.

PENG, Y., & LI, Y. (2023). *Efeitos combinados de dois tipos de óleos essenciais nas propriedades físicas , mecânicas e estruturais de filmes de quitosana*. 36, 1–24.

PEREIRA, V. A., DE ARRUDA, I. N. Q., & STEFANI, R. (2015). Active chitosan/PVA films with anthocyanins from *Brassica oleraceae* (Red Cabbage) as Time-Temperature Indicators for application in intelligent food packaging. *Food Hydrocolloids*, 43, 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.05.014>

PHUONG, N. N., POIRIER, L., PHAM, Q. T., LAGARDE, F., & ZALOUK-VERGNOUX, A. (2018). Factors influencing the microplastic contamination of bivalves from the French Atlantic coast: Location, season and/or mode of life? In *Marine Pollution Bulletin* (Vol. 129, Número 2, p. 664–674). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.10.054>

PUTNIK, P., BURSAĆ KOVAČEVIĆ, D., HERCEG, K., ROOHINEJAD, S., GREINER, R., BEKHIT, A. E. D. A., & LEVAJ, B. (2017). Modelling the shelf-life of minimally-processed fresh-cut apples packaged in a modified atmosphere using food quality parameters. *Food Control*, 81, 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.05.026>

PUTNIK, P., ROOHINEJAD, S., GREINER, R., GRANATO, D., BEKHIT, A. E. D. A., & BURSAĆ KOVAČEVIĆ, D. (2017). Prediction and modeling of microbial growth in minimally processed fresh-cut apples packaged in a modified atmosphere: A review. In *Food Control* (Vol. 80, p. 411–419). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.05.018>

RE, R. et al. Antioxidant activity applying an improved abts radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology & Medicine*, v. 26, p. 1231–1237, 1999.

RAJESWARI, A., CHRISTY, E. J. S., SWATHI, E., & PIUS, A. (2020). Fabrication of improved cellulose acetate-based biodegradable films for food packaging applications. In *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* (Vol. 2, p. 107–114). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2020.07.003>

S., K., & R., N. (2022). *Green House Gases*. 65–74. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-5269-1.ch005>

SAQUET, A. A., & STREIF, J. (2002). Respiration and Ethylene Production By Apples Stored in Different Oxygen. *Revista brasileira de Agrociência*, 8, 71–75.

SON, W. K., YOUK, J. H., LEE, T. S., & PARK, W. H. (2004). The effects of solution properties and polyelectrolyte on electrospinning of ultrafine poly(ethylene oxide) fibers. *Polymer*, 45(9), 2959–2966. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.03.006>

SOUZA, V. G. L., FERNANDO, A. L., PIRES, J. R. A., RODRIGUES, P. F., LOPES, A. A. S., & FERNANDES, F. M. B. (2017). Physical properties of chitosan films incorporated with natural antioxidants. *Industrial Crops and Products*, 107(April), 565–572. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.056>

STOLL, L., MAILLARD, M. N., LE ROUX, E., HICKMANN FLÔRES, S., NACHTIGALL, S. M. B., RIOS, A., & DOMENEK, S. (2023). Bixin, a performing natural antioxidant in active food packaging for the protection of oxidation sensitive food. *Lwt*, 180(September 2022). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114730>

TEIXEIRA, R. F., BALBINOT FILHO, C. A., & BORGES, C. D. (2022). Essential oils as natural antimicrobials for application in edible coatings for minimally processed apple and melon: A review on antimicrobial activity and characteristics of food models. In *Food Packaging and Shelf Life* (Vol. 31). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100781>

TEIXEIRA, S. C., SILVA, R. R. A., DE OLIVEIRA, T. V., STRINGHETA, P. C., PINTO, M. R. M. R., & SOARES, N. DE F. F. (2021A). Glycerol and triethyl citrate plasticizer effects on molecular, thermal, mechanical, and barrier properties of cellulose acetate films. *Food Bioscience*, 42(April). <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101202>

TIVERON, A. P. Atividade antioxidante e composição fenólica de legumes e verduras consumidos no Brasil. Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos Piracicaba: Universidade de São Paulo, 13 out. 2010.

URANGA, J., ETXABIDE, A., GUERRERO, P., & DE LA CABA, K. (2018). Development of active fish gelatin films with anthocyanins by compression molding. *Food Hydrocolloids*, 84(June), 313–320. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.06.018>

WATABE, Y., SUZUKI, Y., KOIKE, S., SHIMAMOTO, S., & KOBAYASHI, Y. (2018). Cellulose acetate, a new candidate feed supplement for ruminant animals: In vitro evaluations. In *Journal of Dairy Science* (Vol. 101, Número 12, p. 10929–10938). <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14969>

WICZKOWSKI, W., & TOPOLSKA, J. (2023). *Antocianinas do repolho roxo : perfil , isolamento , identificação e atividade antioxidante* Palavras-chave. 51(1), 1–24.

WU, F., MISRA, M., & MOHANTY, A. K. (2021). Challenges and new opportunities on barrier performance of biodegradable polymers for sustainable packaging. *Progress in Polymer Science*, 117, 101395. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101395>

YAO, T., XUE, Y., CHEN, D., CHEN, F., THOMPSON, L., CUI, P., KOIKE, T., LAU, W. K. M., LETTENMAIER, D., MOSBRUGGER, V., ZHANG, R., XU, B., DOZIER, J., GILLESPIE, T., GU, Y., KANG, S., PIAO, S., SUGIMOTO, S., UENO, K., ... LI, Q. (2019). Recent third pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: Multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(3), 423–444. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0057.1>

YONG, H., & LIU, J. (2020). Recent advances in the preparation, physical and functional properties, and applications of anthocyanins-based active and intelligent packaging films. In *Food Packaging and Shelf Life* (Vol. 26). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100550>

YONG, H., LIU, J., KAN, J., & LIU, J. (2022a). Active/intelligent packaging films developed by immobilizing anthocyanins from purple sweetpotato and purple cabbage in locust bean gum, chitosan and κ-carrageenan-based matrices. *International Journal of Biological Macromolecules*, 211(April), 238–248. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.046>

YOUSUF, B.; GUL, K.; WANI, A. A.; & SINGH, P. Health benefits of anthocyanins and their encapsulation for potential use in food systems: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 56, n. 13, p. 2223 – 2230, 2015

ZHAO, H., FAN, Z., WU, J., & ZHU, S. (2021). Effects of pre-treatment with S-nitrosoglutathione-chitosan nanoparticles on quality and antioxidant systems of fresh-cut apple slices. *LWT*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110565>