

Desenvolvimento e caracterização de filmes poliméricos de amido extraído do caroço da jaca (*Artocarpus Heterophilus*) e polivinilpirrolidona para utilização como curativo

Development and characterization of polymer films of starch extracted from the jackfruit seed (*Artocarpus Heterophilus*) and polyvinylpyrrolidone for dressing

Desarrollo y caracterización de películas poliméricas de almidón extraído de semilla de yaca (*Artocarpus Heterophilus*) y polivinilpirrolidona para uso como aderezo

Recebido: 17/08/2022 | Revisado: 29/08/2022 | Aceito: 30/08/2022 | Publicado: 07/09/2022

Germana Joyce Bezerra Leôncio

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9199-1158>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: germanaleoncio@outlook.com

Maurício Tavares Barbosa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7423-5625>
Instituto Federal do Rio Grande do Norte, Brasil
E-mail: mauricio_mat1202@hotmail.com

Maria Roberta de Oliveira Pinto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2151-3564>
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil
E-mail: roberta1_oliveira@hotmail.com

Taynah Pereira Galdino

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4177-6430>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: taynahgaldino01@gmail.com

Pedro Queiroz Guimarães

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0585-5756>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: pedro.queiroz@certbio.ufcg.edu.br

Wladimir Jefferson Bacalhau de Sousa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3931-8265>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: wladimirjrb@gmail.com

Marcus Vinícius Lia Fook

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8566-920X>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: viniciusliafook@yahoo.com.br

Resumo

As queimaduras representam um agravo significativo à saúde pública, pois, ocorrem dentre os mais variados graus, muitas vezes com extrema gravidade e risco de morte, necessitando de um dispositivo que auxilie no tratamento das regiões danificadas. Diversos biomateriais são avaliados quanto à eficácia no tratamento dessas lesões, sendo aplicados como filmes curativos. Assim, mediante os benefícios do amido e do Polivinilpirrolidona (PVP), este trabalho tem como objetivo desenvolver filmes poliméricos à base de amido extraído do caroço de jaca com PVP, utilizando a técnica de casting. Os resultados obtidos para os filmes demonstraram a interação entre o amido e o PVP, apresentando boa resistência e elasticidade, além de estar dentro dos limites de espessura de utilização como curativo. A adição do PVP aumentou consideravelmente o percentual de intumescimento dos filmes, porém, reduziu a resistência térmica do material. Deste modo, os filmes produzidos à base de amido de jaca com PVP apresentaram propriedades físicas e funcionais que os tornam favoráveis para serem empregados em possíveis aplicações, como curativo, para liberação controlada de fármacos antimicrobianos, expondo uma alternativa de renovação de baixo custo, uma vez que os curativos atualmente encontrados no mercado são demasiadamente caros.

Palavras-chave: Biomateriais; Biopolímeros; Tratamento de queimaduras; Curativo.

Abstract

Burns represent a significant harm to public health, as they occur among the most varied degrees, often with extreme severity and risk of death, requiring a device that helps in the treatment of the damaged regions. Several biomaterials

are evaluated for their effectiveness in the treatment of these lesions, being applied as curative films. Therefore, through the benefits of starch and Polyvinylpyrrolidone (PVP), this work aims to develop polymeric films based on starch extracted from jackfruit kernels with PVP, using the casting technique. The results obtained for the films showed the interaction between starch and PVP, showing good strength and elasticity, in addition to being within the thickness limits for use as a dressing. The addition of PVP considerably increased the percentage of swelling of the films, however, it reduced the thermal resistance of the material. Thus, films produced based on jackfruit starch with PVP presented physical and functional properties that make them favorable to be used in possible applications, such as dressings, for controlled release of drugs antimicrobials, exposing a low-cost renovation alternative, a since the dressings currently available on the market are too expensive.

Keywords: Biomaterials; Biopolymers; Burn treatment; Band aid.

Resumen

Las quemaduras representan un daño significativo para la salud pública, ya que ocurren en los más variados grados, a menudo con extrema gravedad y riesgo de muerte, lo que requiere un dispositivo para ayudar en el tratamiento de las regiones dañadas. Se evalúa la eficacia de varios biomateriales en el tratamiento de estas lesiones, aplicándose como películas de vendaje. Así, a través de los beneficios del almidón y la Polivinilpirrolidona (PVP), este trabajo tiene como objetivo desarrollar películas poliméricas a base de almidón extraído de semillas de jackfruit con PVP, utilizando la técnica de casting. Los resultados obtenidos para las películas demostraron la interacción entre el almidón y la PVP, mostrando buena resistencia y elasticidad, además de estar dentro de los límites de espesor para uso como apósito. La adición de PVP aumentó considerablemente el porcentaje de hinchamiento de las películas, sin embargo, redujo la resistencia térmica del material. Así, las películas elaboradas a partir de almidón de yaca con PVP presentaron propiedades físicas y funcionales que las hacen favorables para ser utilizadas en posibles aplicaciones, como apósitos, para liberación controlada de fármacos antimicrobianos, exponiendo una alternativa de renovación de bajo costo, ya que los apósitos actualmente encontrados en el mercado son demasiado caros.

Palabras clave: Biomateriales; Biopolímeros; Tratamiento de quemaduras; Apósito adhesivo.

1. Introdução

As queimaduras, juntamente com os traumas por choque, estão entre as maiores causas de danificação cutânea, ocorrendo a partir de agentes térmicos, químicos, elétricos, biológicos ou radioativos que agem no tecido de revestimento do corpo humano, destruindo parcial ou totalmente a pele e seus anexos, fazendo necessário a realização de tratamento das regiões feridas (Moncelin, 2018).

Dessa forma, há dois métodos possíveis para se utilizar no tratamento de feridas, os métodos clínicos e cirúrgicos. Onde, o curativo é o tratamento clínico mais frequentemente utilizado no auxílio da reparação tecidual, sendo um meio terapêutico que consiste na limpeza e aplicação de material sobre uma ferida para sua proteção, absorção e drenagem, com o objetivo de melhorar as condições do leito da ferida e auxiliar em sua resolução, tornando-se o método clínico mais utilizado no tratamento de queimaduras e feridas para auxiliar a reparação do tecido lesionado (Farias et al. 2019; Smaniotta, et al., 2012)

Um curativo ideal deve proteger a ferida, prevenir a infecção, promover a cicatrização, agir como uma barreira para os microrganismos, remover o excesso de exsudato, devendo ser não tóxico, não alergênico e propiciar um microambiente ótimo para a cura. Para isso, são empregados diversos biomateriais na formulação dos curativos (Barbo et al., 2018; Matos & César, 2020).

De acordo com Queiroz e Tomaz (2020), nos últimos anos o mercado dos biomateriais tem crescido significativamente, tanto do ponto de vista do número de unidades comercializadas anualmente quanto da movimentação financeira. Esses materiais apresentam potencialidade de aplicação na engenharia de tecidos devido a suas propriedades, como a biocompatibilidade, atoxicidade, alergenicidade, estimulação de adesão e proliferação celular (Carneiro, et al., 2018).

Os biomateriais são classificados em metálicos, cerâmicos, compósitos ou poliméricos, sendo este último o mais utilizado como curativo ou substituto cutâneo em casos de traumas provocados por queimaduras (Bernardo et al., 2021). Dentre as várias possibilidades de aplicações, os biomateriais poliméricos estão sendo cada vez mais utilizados na ginecologia, na oftalmologia, na odontologia, no carreamento de drogas e na engenharia de tecidos, buscando substituir os tecidos vivos e

restaurar ou melhorar tecidos lesionados (Cintra et al., 2022).

No tratamento de queimaduras, vem sendo estudado a utilização dos filmes biodegradáveis, que atuam na reparação do tecido lesionado, além de realizar a liberação controlada de fármacos. A utilização dessa técnica está sendo aprimorada ao longo dos anos e vem obtendo resultados promissores, devido sua atividade local e sua habilidade em manter a constância nos perfis de liberação controlada de fármacos. Esta técnica, utiliza os polímeros naturais como o alginato, a gelatina, o colágeno, a quitosana, o amido, entre outros, e alguns polímeros sintéticos, como o Polivinilpirrolidona (PVP) (Fernandes et al., 2019; Melo, 2019).

O amido é um polímero semicristalino de elevado peso molecular formado por dois polímeros de glicose: a amilose (20 a 30%) e amilopectina (70 a 80% restantes do amido) e é o polissacarídeo de armazenamento mais importante nas células vegetais, podendo ser obtido a partir de fontes naturais, como grãos de cereais, leguminosas, tubérculos, frutas imaturas ou verdes, e sementes, a exemplo das sementes de jaca (Azevedo, et al., 2018; Caresani, 2020).

As sementes frescas são consideradas ricas em amido, por isso, apresentam grande potencial para uso como matéria-prima amilácea, além de boas fontes de vitaminas do complexo B principalmente tiamina e riboflavina (Oliveira & Santos, 2016). A utilização do amido extraído da semente da jaca reaproveita os resíduos agroindustriais, resultando em grande atrativo científico na área dos biomateriais, pois, mantém as propriedades do amido, como a biodegradabilidade, quando hidratado forma géis, e desidratados formam um filme transparente e similar a película de celulose, porém, esses filmes ficam quebradiços devido às extensivas forças intermoleculares (Dias, 2008; Freire da Costa, 2020; Randolpho, et al., 2020).

A incorporação de um agente plastificante é necessária para superar a fragilidade dos filmes poliméricos à base de amido, pois, reduzem as forças intermoleculares dos polímeros, reduzindo a atração intermolecular e por consequência aumentando a flexibilidade da cadeia polimérica, com diminuição de possíveis descontinuidades e zonas quebradiças, provocando interferências nas condições de processamento e propriedades do produto final (Nascimento, 2021). Uma das opções de utilização de plastificante, que é comumente utilizado na produção de filmes produzidos com amido, é a glicerina, devido seu bom desempenho como aditivo em filmes.

De forma a melhorar significativamente as propriedades biofuncionais do filme de amido de jaca, torna-se relevante associá-lo a outros polímeros, como o PVP, que apresenta boa adesão, baixa toxicidade química e alta higroscopicidade. Sua estrutura possibilita a formação de complexos macromoleculares com uma variedade de compostos, através de ligação de hidrogênio, e em certos casos, outras forças como as forças polares e interações hidrofóbicas podem ser responsáveis pela forte habilidade de complexação (Barbosa, 2019).

Mediante o exposto, o presente trabalho objetivou desenvolver filmes poliméricos à base de amido de jaca, com e sem adição do Polivinilpirrolidona, utilizando a técnica de *casting*, para aplicação na área biomédica, a fim de expor uma alternativa de renovação de curativo de baixo custo.

2. Metodologia

2.1 Local de estudo

Esta pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste – CERTBIO, situado na Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, Paraíba, Brasil.

2.2 Extração do amido da semente de jaca (*Artocarpus heterophilus*)

As sementes de jaca foram lavadas, descascadas e trituradas em um liquidificador industrial até a obtenção de uma massa densa e uniforme, acrescentando-se água destilada. A massa obtida foi filtrada em sacos confeccionados com organza (abertura da malha próxima a 100 mesh). A suspensão de amido filtrada foi decantada, em ambiente refrigerado, e o

sobrenadante foi descartado. Em seguida, hidratou-se novamente, repetindo o processo. Após esta etapa o amido foi levado ao liofilizador, para a obtenção do amido desidratado. Por fim, o amido obtido foi passado em peneira 200 mesh.

2.3 Estudo da influência do percentual de amido e do teor de plastificante na confecção dos filmes

Para a confecção dos filmes foram testadas três concentrações de amido 3%, 4% e 5%, e duas concentrações de plastificante (glicerina) (30% e 40%), calculadas sobre a massa do amido utilizado. As soluções filmogênicas foram elaboradas adicionando o amido de jaca em água destilada e a glicerina. Essa mistura foi levada ao aquecedor elétrico por 30 minutos sob agitação constante. A solução filmogênica foi transferida para placas de acrílico de 15 cm de diâmetro e levadas a secagem em temperatura ambiente, seguindo a técnica de *casting*.

Para avaliar a influência do percentual de amido e plastificante, realizou-se a análise das propriedades mecânicas dos filmes poliméricos em quintuplicata, seguindo a metodologia adaptada da ASTM D882 (2010). Os resultados foram analisados utilizando o tratamento estatístico por meio da aplicação do Teste de Grubbs nos resultados de tensão de ruptura, alongamento e módulo de Young para avaliar a existência de valores anômalos (outliers) que pudessem comprometer o resultado final. Em seguida, foram calculados a média e o desvio padrão dos resultados apresentados. Após a aplicação do Teste de Grubbs, realizou-se o estudo de comparação do percentual de amido e do percentual do plastificante por meio da adaptação da ferramenta (Comparação % amido-% plastificante-Erros Normalizados) do Action Stat.

2.4 Preparação dos filmes com adição do Polivinilpirrolidona (PVP)

Após a aplicação do tratamento estatístico foi escolhida a melhor formulação para a confecção dos filmes com adição de PVP. Foram preparados filmes com 10 e 15% de PVP. Para os filmes com 10% de PVP foi utilizada a metodologia anteriormente descrita. A mistura de amido, água e glicerina, foi adicionada 10% de Polivinilpirrolidona em relação à massa de amido. Enquanto que, para os filmes com 15% PVP utilizou-se a mesma quantidade de amido, água destilada e glicerina, e a essa mistura foi adicionado 15% de PVP em relação à massa de amido. As duas misturas foram homogeneizadas utilizando a mesma metodologia de preparação dos filmes.

2.5 Caracterização dos filmes

Os filmes foram caracterizados quanto à espessura e por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier – FTIR, Ensaio Mecânicos, Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC) e Intumescimento.

2.5.1 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier – FTIR

A análises de FTIR dos filmes foram realizadas em um equipamento Spectrum 400 da Perkin Elmer. A técnica de FTIR foi utilizada na faixa de varredura de 4000 a 650 cm^{-1} a fim de identificar as bandas características dos grupos funcionais presentes nos filmes poliméricos.

2.5.2 Ensaio Mecânicos

As propriedades mecânicas dos filmes poliméricos foram avaliadas por teste de tração em uma máquina universal de ensaios Instron (Série 3366), com célula de carga 25 Kg, segundo metodologia descrita pela ASTM D882-10, com modificações.

2.5.3 Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)

A análises por DSC foi realizada a fim de identificar as fases de transição térmica dos filmes. Para isso, foi utilizado um equipamento DSC TA modelo Q20, com uma faixa de temperatura de 30 a 400 °C com razão de aquecimento de 10°C/min, em atmosfera de nitrogênio, com fluxo de 50 mL/min.

2.5.4 Intumescimento

Para o ensaio de Intumescimento os filmes foram cortados em pedaços de 2 x 2 cm e pesados, para a obtenção do peso seco (Ps). Em seguida, os filmes foram imersos em 30 mL de solução tampão fosfato-salino (pH 7,4), água destilada, solução levemente ácida (pH 6,4), alcalina (pH 9,0) e em soro fisiológico, em intervalos variados até a saturação, com o objetivo de avaliar a capacidade de absorção dos filmes em diferentes meios. Após cada intervalo, os filmes foram secos em papel absorvente e pesados, obtendo-se o peso úmido (Pu). O cálculo de intumescimento foi feito em triplicata através da Equação 1.

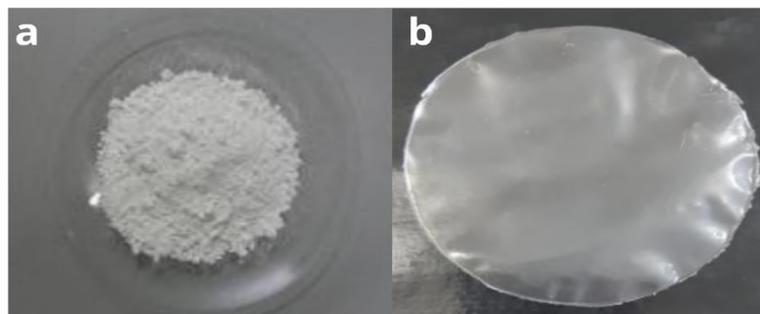
$$I_{(\%)} = \frac{Pu - Ps}{Ps} \times 100 \quad \text{Equação (1).}$$

3. Resultados e Discussão

3.1 Análise visual

O amido extraído do caroço de jaca apresentou coloração branca de textura típica de amidos comerciais. A partir do amido extraído do caroço da jaca foram confeccionados filmes poliméricos variando o teor de amido e de plastificante. Os filmes produzidos, independentemente da formulação utilizada, apresentaram transparência, uniformidade e fácil manuseabilidade, não sendo observada a formação de bolhas, rachaduras e presença de material insolúvel na sua superfície, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 – (a) Amido extraído da semente de jaca e (b) filme polimérico.



Fonte: Autores (2022).

No trabalho realizado por Henrique, et al. (2008), também foi verificado uma superfície contínua, sem a presença de bolhas em filmes de amidos modificados de mandioca.

3.2 Estudo estatístico da influência do percentual de amido e do teor de plastificante na confecção dos filmes

A sistemática de tratamento dos dados foi iniciada por meio da aplicação do Teste de Grubbs nas cinco repetições da tensão máxima de ruptura, do alongamento e do Módulo de Young (Módulo de Elasticidade) para avaliar a existência de valores anômalos (outliers) que pudessem comprometer o resultado final. Após a aplicação do referido teste, não foi evidenciada a presença de nenhum outlier. Em seguida, foram calculados a média e o desvio padrão de cada ensaio dos filmes, sendo estes resultados ilustrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados do ensaio de Tração dos filmes de amido com glicerina.

Filmes com 3% de amido e 30% de glicerina			
Resumo do Teste de Outlier	Tensão de Ruptura (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Young (MPa)
Média sem outliers	4,44	24,68	142,65
Desvio padrão sem outliers	1,04	5,24	41,30
Média	4,44	24,68	142,65
Desvio padrão	1,04	5,24	41,30
Valor Crítico	1,72	1,72	1,72
Filmes com 3% de amido e 40% de glicerina			
Média sem outliers	2,15	28,25	53,44
Desvio padrão sem outliers	1,19	5,59	33,67
Média	2,15	28,25	53,44
Desvio padrão	1,19	5,59	33,67
Valor Crítico	1,89	1,89	1,89
Filmes com 4% de amido e 30% de glicerina			
Média sem outliers	3,18	153,16	13,94
Desvio padrão sem outliers	2,47	57,46	5,47
Média	3,18	153,16	13,94
Desvio padrão	2,47	57,46	5,47
Valor Crítico	1,89	1,89	1,89
Filmes com 4% de amido e 40% de glicerina			
Média sem outliers	5,09	32,38	104,36
Desvio padrão sem outliers	0,89	2,07	34,56
Média	5,09	32,38	104,36
Desvio padrão	0,89	2,07	34,56
Valor Crítico	1,89	1,89	1,89
Filmes com 5% de amido e 30% de glicerina			
Média sem outliers	6,98	24,98	225,66
Desvio padrão sem outliers	1,02	2,54	67,55
Média	6,98	24,98	225,66
Desvio padrão	1,02	2,54	67,55
Valor Crítico	1,89	1,89	1,89
Filmes com 5% de amido e 40% de glicerina			
Média sem outliers	5,83	38,02	154,62
Desvio padrão sem outliers	0,96	9,01	50,77
Média	5,83	38,02	154,62
Desvio padrão	0,96	9,01	50,77
Valor Crítico	1,89	1,89	1,89

Fonte: Autores (2022).

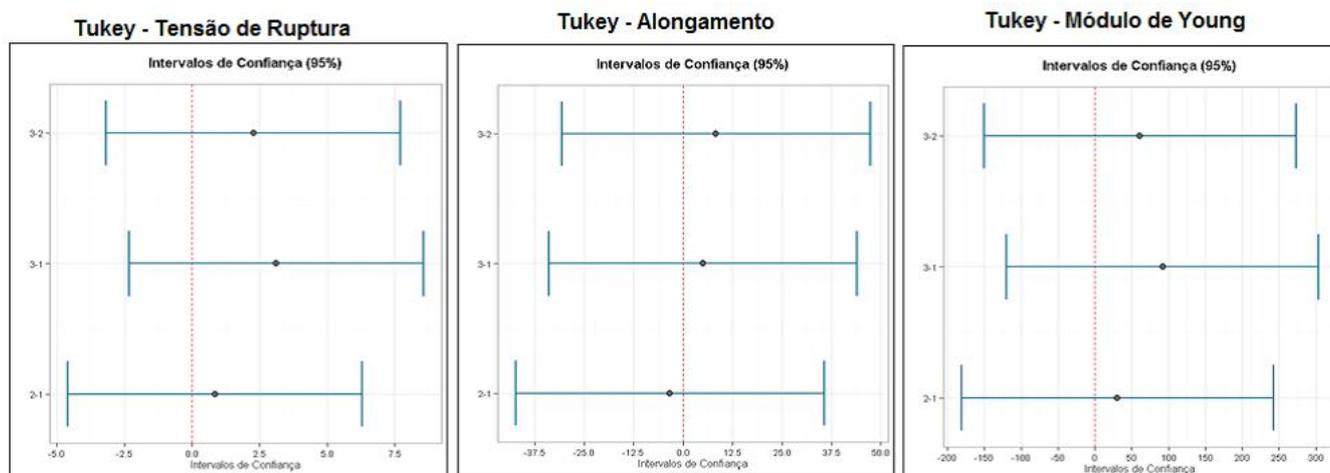
Em seguida, realizou-se o estudo de comparação entre o teor de amido e o teor do plastificante por meio da adaptação da ferramenta (Comparação %amido- %plastificante-Erros Normalizados) do Action Stat. Os resultados desse estudo estão apresentados na Tabelas 2 e Figuras 2, respectivamente.

Tabela 2– Estudo de comparação do teor de amido com o teor de plastificante.

Comparações Múltiplas				
Tensão de Ruptura (Mpa)				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
2-1	0,843	-4,606	6,292	0,807
3-1	3,116	-2,333	8,565	0,184
3-2	2,273	-3,176	7,722	0,326
Alongamento (%)				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
2-1	-3,303	-42,321	35,715	0,935
3-1	5,036	-33,982	44,054	0,859
3-2	8,339	-30,679	47,357	0,681
Módulo de Young (Mpa)				
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
2-1	30,712	-180,888	242,313	0,827
3-1	92,091	-119,511	303,692	0,304
3-2	61,378	-150,223	272,979	0,524

Fonte: Autores (2022).

Figura 2 - Erro normalizado e tendência.



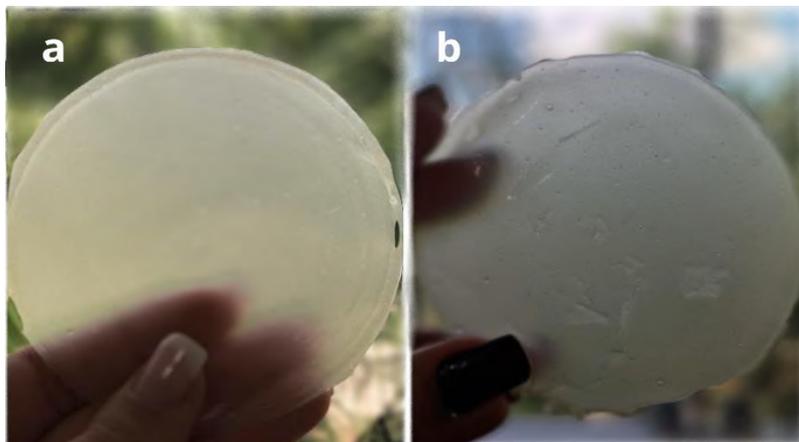
Fonte: Autores (2022).

Apesar de todos os resultados do teste de Tukey se apresentarem como viáveis (médias estatisticamente iguais), foi escolhido à formulação de 4% de amido com 40% de glicerina por apresentar melhor elasticidade, manuseabilidade e aspecto, comparado as demais 38 formulações. Logo, esta foi a formulação mais adequada para a confecção de filmes para curativo.

3.3 Filmes com adição do PVP

A esta formulação escolhida foi adicionada 10 e 15% de Polivinilpirrolidona e a Figura 3 ilustra os dois tipos de filmes obtidos após a adição do PVP.

Figura 3 – (a) Filme com 10 e (b) 15% de PVP.



Fonte: Autores (2022).

Conforme observado, o filme com adição de 10% de PVP apresentou um aspecto e um toque melhor comparado ao filme com 15% de PVP. Entretanto, ambos apresentaram bolhas em sua superfície inferior e o filme com adição de 15% de PVP apresentou uma não uniformidade ao longo de sua extensão.

3.4 Espessura

A Tabela 3 ilustra os resultados obtidos da espessura dos filmes de amido sem PVP, e com adição de 10 e 15% de PVP.

Tabela 3 – Média das espessuras dos filmes de amido puro, com 10 e 15% de PVP.

Amostra	Espessura (mm)
Filme de amido sem PVP	0,132 ± 0,012
Filme de amido com 10% de PVP	0,162 ± 0,007
Filme de amido com 15% de PVP	0,129 ± 0,014

Fonte: Autores (2022).

Os filmes confeccionados apresentaram homogeneidade ao longo de sua extensão, uma vez que a diferença das espessuras entre os três tipos de filmes foram mínimas. Os filmes formados apresentaram espessuras bem baixas (abaixo de 1,5 mm), estando na faixa para serem usados como curativos, uma vez que filmes poliméricos com espessuras superiores a 1,5 mm podem afetar a transparência dos mesmos não sendo adequado para aplicações biomédicas (Fernandes et al., 2019).

Ma, et al., (2001) ressaltam que os substitutos poliméricos da derme devem ser idealmente mais finos que a pele humana normal, cuja espessura varia entre 0,5 e 2 mm, dependendo da idade, sexo e região do corpo.

Nascimento (2021) e Fonseca (2015) ao avaliarem filmes poliméricos de araruta com própolis e de amido de batata, respectivamente, revelaram valores de espessura dos filmes ainda menores. Ambos autores relataram que os filmes obtidos,

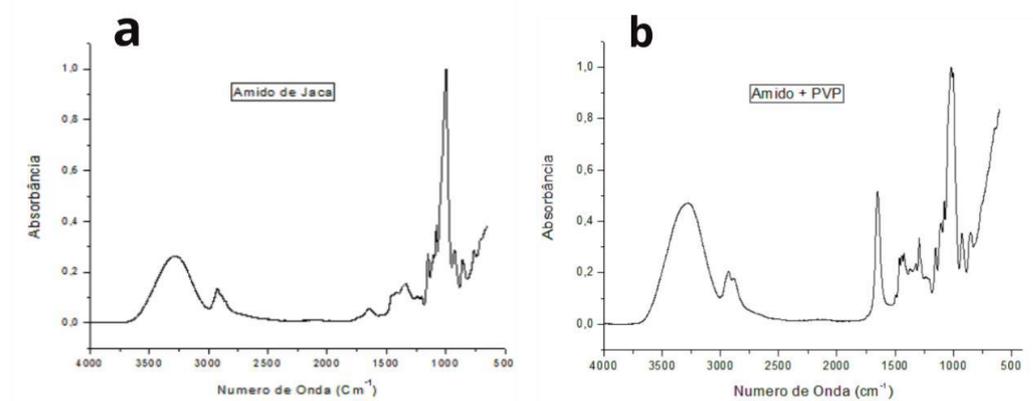
dos que foram plastificados com glicerina, apresentaram espessuras variando entre 0,28 e 0,46 mm e 0,054 e 0,058 mm, respectivamente. Ainda que estas espessuras sejam bem inferiores aos valores apresentados na Tabela 3, todos os filmes apresentaram uma espessura fina, estando dentro da faixa adequada para a finalidade desejada.

A espessura do filme com adição de 10% de PVP embora tenha apresentado um aumento discreto, comparado aos filmes com adição de 15% de PVP e sem adição do PVP, ainda assim permaneceu fina. Os filmes sem PVP e com 15% de PVP apresentaram espessuras estatisticamente iguais, indicando que a adição do PVP não afetou significativamente esta propriedade.

3.5 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier – FTIR

A Figura 4 ilustra os gráficos de FTIR do filme de amido e do filme de amido com adição de PVP, no qual, foi possível identificar as bandas de absorção característica dos grupos funcionais presentes nos filmes.

Figura 4 – (a) Espectro de FTIR do filme de amido e (b) amido com PVP.



Fonte: Autores (2022).

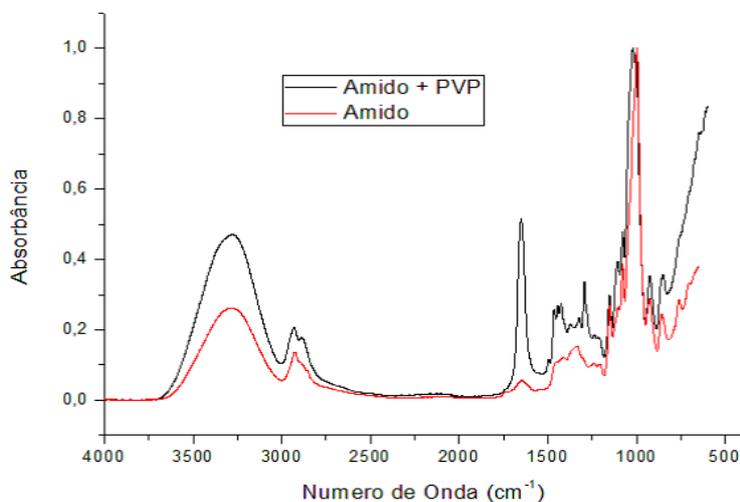
Ao observar o espectrograma do filme de amido, nota-se as bandas referentes a deformações moleculares existentes nas moléculas de amido a 3300 e 1650 cm^{-1} , atribuídas ao estiramento e a deformação angular de ligações – OH. Além dessas bandas o FTIR representou bandas de absorção a aproximadamente 2931 cm^{-1} que indica estiramento C-H. As Bandas de absorção em 1645 cm^{-1} e 1430 cm^{-1} correspondem à água ligada e C-C e C-O-H, respectivamente. A posição da banda relativa à água é dependente da cristalinidade do polissacarídeo. A absorção em 1083 cm^{-1} tem sido relacionada a deformações de grupos C-OH. Os modos relacionados a deformações CCH foram identificados em torno de 1080 cm^{-1} , enquanto que estiramentos C-O e C-C correspondem a bandas em 1147 cm^{-1} , 998 cm^{-1} e 928 cm^{-1} .

No espectro do filme de amido com PVP, foi possível estabelecer os grupos químicos que caracterizam o aditivo polimérico poli (vinil pirrolidona) - PVP: o grupo carbonila (C=O) ligado à amida na cadeia cíclica de carbonos e o grupo nitrila C-N situado entre a cadeia cíclica e a cadeia linear de carbonos. O grupo carbonila foi identificado por meio da banda 1664 cm^{-1} , associada ao estiramento desse grupo. E o grupo nitrila foi identificado por meio da banda 1293 cm^{-1} associada ao estiramento da ligação desse grupo. A larga banda em torno de 3429 cm^{-1} expressa a vibração do estiramento O-H no PVP devido à presença de água neste polímero por ser altamente higroscópico. A banda em 2954 cm^{-1} surge a partir do estiramento do -CH₂. Observa-se também as frequências vibracionais das bandas em 1497 cm^{-1} , associada à deformação do -CH₂ da cadeia linear do polímero poli (vinil pirrolidona), e em 1439 cm^{-1} , associada à deformação assimétrica do CH₂ da cadeia cíclica do PVP.

A fim de comparação, plotou-se os gráficos sobrepostos dos espectros do filme de amido e do filme de amido com

PVP, como exibido na Figura 5.

Figura 5 – Sobreposição dos espectros dos filmes de amido e amido + PVP.



Fonte: Autores (2022).

Observa-se que houve um aumento significativo na intensidade da banda a 3300 cm^{-1} do filme de amido, a qual é atribuída ao estiramento e a deformação angular de ligações – OH. Comparando essa banda de 3300 cm^{-1} do filme de amido com a banda a 3429 cm^{-1} do amido com adição de PVP, pode-se observar que o aumento na intensidade foi praticamente o dobro, sugerindo que a interação entre o amido e o PVP realmente aconteceu, isto é, o amido e o PVP reagiram de forma que os resultados dessa interação puderam ser notados através da melhoria nas propriedades do filme de amido de jaca que recebeu adição do PVP.

3.6 Ensaios mecânicos

O resultado dos ensaios mecânicos sob tração dos filmes estão reportados na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas dos filmes de amido puro e com PVP.

Amostra	Tensão de Ruptura (Mpa)	Alongamento (%)	Módulo de Young (Mpa)
Filme de amido	5,09 ± 0,89	32,38 ± 2,07	104,36 ± 34,56
Filme de amido com adição de 10% de PVP	5,47 ± 0,49	51,98 ± 5,82	118,56 ± 24,59
Filme de amido com adição de 15% de PVP	7,80 ± 0,51	30,94 ± 11,57	290,98 ± 33,02

Fonte: Autores (2022).

Por intermédio da tabela 4, pode-se observar que houve uma melhora significativa nas propriedades mecânicas dos filmes que tiveram a adição de PVP. A Tensão de Ruptura do amido com 15% de PVP, por exemplo, aumentou cerca de 53% em relação ao amido sem adição de PVP. Quanto ao alongamento (capacidade que o filme estica sem se romper) e ao Módulo de Young (módulo de elasticidade), os resultados mostram que, para os filmes que tiveram adição de PVP, estas propriedades

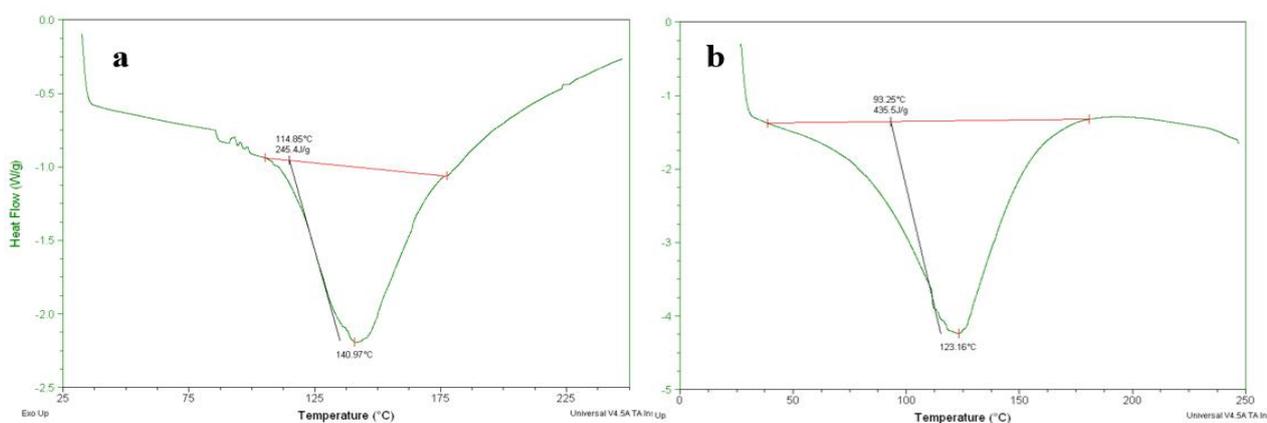
também apresentaram melhora, se comparados ao filme de amido sem adição de PVP.

A melhoria destas propriedades é de suma importância, pois, de acordo com Murakami et al. (2010) e Singh e Pal (2012) é indispensável que os curativos apresentem boa resistência mecânica, facilidade de aplicação e remoção, além de manter boa flexibilidade durante o processo de cicatrização. De um modo geral, os resultados de Tensão de Ruptura e Alongamento estão corroborando com Costa (2017) que analisou essas mesmas propriedades ao elaborar filmes à base de amido de semente de jaca incorporados com antocianinas e obteve resultados estatisticamente iguais aos que foram reportados na Tabela 4.

3.7 Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)

As curvas de DSC para os filmes de amido de jaca sem adição de PVP e com adição de PVP podem ser observadas na Figura 6.

Figura 6 – Termograma de DSC do (a) filme de amido sem PVP e (b) com PVP.



Fonte: Autores (2022).

Observando os termogramas, nota-se que a temperatura de fusão do filme de amido puro (140,97 °C) foi maior do que a temperatura de fusão apresentada pelo filme com PVP (123,16 °C). Esperava-se que o filme com adição de PVP apresentasse uma maior temperatura de fusão, pois, como relatado por Oliveira (2019) em seu estudo, a temperatura de degradação do Polivinilpirrolidona (10%) é de 387,65 °C. Logo, o esperado seria que, com a adição do PVP, os filmes apresentassem uma maior estabilidade térmica, e o que aconteceu foi exatamente o oposto. Tal fato necessita ser investigado em estudos posteriores.

Sendo assim, em se tratando de um biomaterial destinado a área médica, os filmes sem PVP, por apresentarem uma estabilidade térmica maior do que a apresentada pelo filme com PVP, seriam mais adequados para essa finalidade, tendo em vista que esse filme suportaria, por exemplo, passar por processos que utilizam temperaturas mais elevadas, como a esterilização por aquecimento. Nesse caso, haveria de ser respeitada a temperatura de até 140 °C, como uma forma de garantir a não degradação deste material durante o processo.

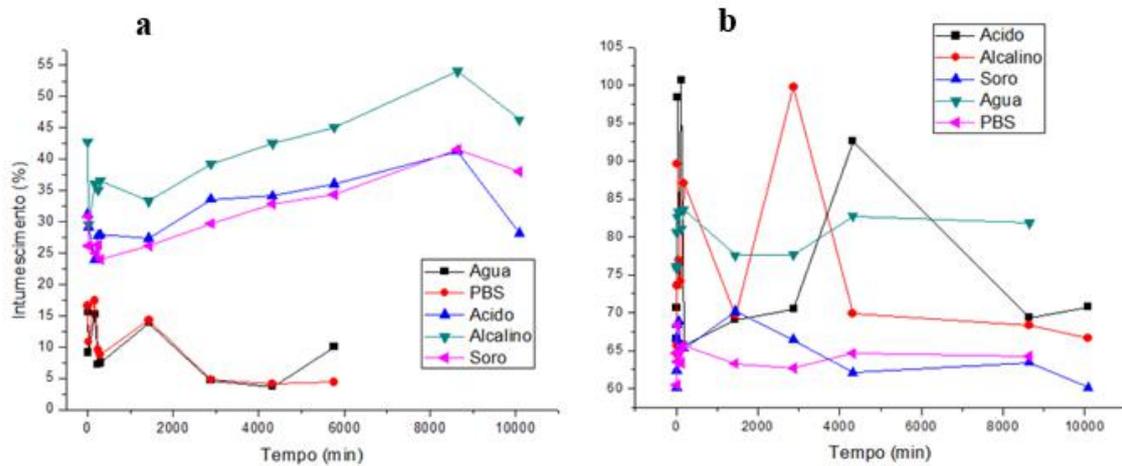
3.8 Intumescimento

A análise de intumescimento dos filmes sem adição de PVP em meio levemente ácido (pH 6,4), meio alcalino (pH 9,0) e soro fisiológico, demonstrou um aumento gradativo do inchamento até um limite máximo, com posterior diminuição decorrente da saturação e liberação de componentes hidrossolúveis dos filmes para o meio, sugerindo que os filmes

intumesceram até cerca de 150 horas, o equivalente a aproximadamente 6 dias, atingindo a máxima absorção, de 53%, no meio alcalino, não apresentando degradação, ou perda de massa para a solução, até o final do ensaio. Outro fato observado é que os filmes sem PVP apresentaram comportamento semelhante em água e tampão fosfato, e que nestes meios os filmes intumesceram bem menos, só até aproximadamente 24 horas.

Os comportamentos acima descrito pode ser verificado na Figura 7, a qual está ilustrado o comportamento dos filmes em contato com água destilada, tampão fosfato-salino (PBS), soro fisiológico, meio levemente ácido e meio alcalino.

Figura 7 – (a) Intumescimento dos filmes de amido sem PVP e (b) com PVP.



Fonte: Autores (2022).

Analisando o filme com PVP, foi notado o maior intumescimento dos filmes com PVP em meio ácido, durante os primeiros minutos, chegando a intumescer até mais de 100%. Esse comportamento é de suma importância, pois, segundo Campos, et al., (2008) o pH de um tecido lesionado é ligeiramente ácido (5,8-6,6), o que levaria o filme a absorver uma grande quantidade de líquido (exsudato) da região lesionada, deixando aquele local livre de umidade para uma melhor cicatrização. O autor ainda ressalta que o pH da ferida pode ser afetado, caso esta entre em contato com urina infeccionada, por exemplo, podendo elevar o pH do tecido lesionado, deixando-o alcalino. Nesse caso, em meio alcalino, o filme também apresentou um elevado intumescimento, chegando a atingir 100%.

Na água e em tampão fosfato, os filmes com PVP não apresentaram comportamento similar, como havia acontecido nos filmes sem PVP. Contudo, nota-se que em água os filmes intumesceram mais do que em PBS. Já em soro fisiológico os filmes intumesceram até cerca de 24 horas, com seguida diminuição.

De um modo geral, nota-se que os filmes com PVP, em todos os meios estudados, apresentou um aumento significativo no percentual de intumescimento, chegando a intumescer praticamente o dobro em meio ácido e meio alcalino, sendo esse um comportamento benéfico. Conforme Fernandes et al. (2019), um maior índice de intumescimento sugere uma maior absorção de líquidos provenientes de ferimentos ou excreções cutâneas. Este aumento do intumescimento nos filmes com PVP já era previsto, dado que, o Polivinilpirrolidona é altamente higroscópico.

Ao término da análise, depois de 168 horas intumescendo, os filmes de amido sem e com PVP, permaneceram intactos, não apresentando nenhum indício de degradação aparente, como mostra a Figura 8.

Figura 8 – (a) Filme de amido sem PVP e (b) com PVP.



Fonte: Autores (2022).

Outro fato observado nessa imagem foi a coloração e a adesão à pele destes filmes. Os filmes de amido sem adição de PVP apresentaram uma maior transparência do que o filme de amido com PVP, que apresentou pouca transparência após o intumescimento, exibindo uma coloração mais branca. Em contrapartida, o filme de amido com PVP apresentou uma maior adesão à pele, o que já era esperado devido o Polivinilpirrolidona ser um polímero que apresenta qualidades de adesão (Oliveira, 2019).

4. Considerações Finais

Os filmes produzidos a partir do amido extraído do caroço da jaca apresentaram transparência, uniformidade, manuseabilidade e espessura dentro do ideal para serem utilizados como curativo.

O espectro de FTIR do filme de amido apresentou picos característicos do amido de jaca, enquanto que no filme de jaca com adição do PVP houve um aumento significativo na intensidade da banda atribuída as ligações de OH, sugerindo que houve uma interação entre o amido e o PVP. Os resultados obtidos das propriedades analisadas nos ensaios mecânicos mostram que, ambos os filmes que tiveram adição de PVP, apresentaram boa resistência mecânica e uma boa elasticidade, sendo estas características indispensáveis para um curativo.

Os filmes sem PVP apresentaram resistência térmica maior do que os filmes com PVP, e em caso de esterilização por aquecimento, a temperatura de fusão dos filmes deve ser respeitada, não ultrapassando a temperatura referente a estabilidade térmica identificada para os dois tipos de filme. O PVP aumentou consideravelmente o intumescimento do filme de amido, em todos os meios analisados. Tal característica é muito importante para a finalidade que se deseja, isto é, a utilização do filme como curativo.

De acordo com os resultados obtidos, os filmes produzidos à base de amido de jaca com PVP apresentaram propriedades físicas e funcionais adequadas para serem utilizados em aplicações, na área biomédica, como curativo para liberação controlada de fármacos antimicrobianos, expondo uma alternativa de renovação de baixo custo.

No entanto, mais estudos deverão ser realizados, como ensaios de citotoxicidade, teste *in-vitro* e *in-vivo* e validações clínicas adicionais, para se ter um controle microbiológico efetivo durante a aplicação.

Referências

ASTM International: D882 (2010). Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. <https://www.instron.com/en/testing-solutions/astm-standards/astm-d882>.

Azevedo, L. C. D., de SA, A. S., Rovani, S., & Fungaro, D. A (2018). Propriedades do amido e suas aplicações em biopolímeros. *Cadernos de prospecção*, 11, 351-358.

- Barbo, M. L. P., de Rezende Duek, E. A., Hausen, M., Ambrósio, V. G., de Queiroz Fonseca, M. L. B., & Boas, H. M. Q. V. (2018). Estudo in vivo do reparo tecidual de poli (álcool vinílico)/quitosana/colágeno como curativo dérmico para aplicações em queimaduras de segundo grau. *Revista da Faculdade de Ciências Médicas de Sorocaba*, 20, 1-16.
- Barbosa, I. T. F. (2019). *Liberação controlada de bioativos suportados por nanopartículas de pseudoboemita obtidas pelo processo sol-gel* (Tese de Doutorado). Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brasil.
- Bernardo, M. P., Paschoalin, R. T., Santos, D. M. D., Bilatto, S., Farinas, C. S., Correa, D. S., & Mattoso, L. H. C. (2021). Processamento e Aplicação de Biomateriais Poliméricos: Avanços Recentes e Perspectivas. *Química Nova*, 44, 1311-1327.
- Campos, A. A. G., More, F., & De Arruda, S. S. (2008). *Protocolo de cuidados de feridas. Secretaria Municipal de Saúde. Vigilância em Saúde. Florianópolis, Brasil.*
- Caresani, J. R. F. (2020). *Amilases encapsuladas em sílicas híbridas: avaliação em testes de sacarificação de amido* (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Carneiro, M. L. B., Carvalho, L. A. N., & Sampaio, W. C. Avanços do Desenvolvimento de Biomateriais visando tratamento de feridas crônicas. *Revista Eletrônica do Programa de Mestrado em Direitos Humanos, Cidadania e Violência*, 25, 70-105.
- Cintra, C. C., Ferreira-Ermita, D. A., Loures, F. H., Araújo, P. M., Ribeiro, I. M., Araújo, F. R., & Borges, A. P. (2022). In vitro characterization of hydroxyapatite and cobalt ferrite nanoparticles compounds and their biocompatibility in vivo. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 33(2), 1-13.
- Costa, L. A. (2017). *Elaboração e caracterização de filmes biodegradáveis à base de amido de semente de jaca incorporados com antocianinas* (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil.
- Dias, A. B. (2008). *Desenvolvimento e caracterização de filmes biodegradáveis obtidos de amido e de farinha de arroz* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- Farias, R. C., de Santana Moreira, L. C., Da Silva Pereira, A., Do Carmo Carvalho, S. C., Soares, A. S., Dos Santos, B. R F., & Barbosa, F. K. M. (2019). Sistematização de curativos no tratamento clínico de feridas: criação de tecnologia educacional na atenção básica de saúde. *International Journal of Development Research*, 9(11), 31194-31198.
- Fernandes, I. M. C. (2019). Desenvolvimento de biofilmes de amido de caroço de Pitomba (*Talisia Esculenta*) e avaliação da viabilidade para aplicação como curativo. In De Oliveira Pinto, M. R., Leôncio, G. J. B., Amorim, W. L. N., Dos Santos, G. M., & Silva, O. O. A (Org.), *Processos Químicos e Biotecnológicos em Foco* (Vol. 3, 1ª. Ed., Cap. 14, pp. 100-107). Belo Horizonte, MG: Poisson.
- Fonseca, L. M. (2015). *Produção e caracterização de filmes biodegradáveis de amido de batata (Solanum tuberosum L.) para aplicação em embalagens de alimentos* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Pampa, Bagé, Brasil.
- Freire da Costa, G. (2020). *Desenvolvimento de filmes biodegradáveis antioxidantes e antimicrobianos para preservação de carne bovina refrigerada* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal da Paraíba, Bananeiras, Brasil.
- Henrique, C. M., Cereda, M. P., & Sarmiento, S. B. S. (2008). Características físicas de filmes biodegradáveis produzidos a partir de amidos modificados de mandioca. *Rev. Ciência e Tecnologia dos Alimentos*, 28, 231-240.
- Ma, J., Wang, H., He, B., & Chen, J. (2001). A preliminar in vitro study on the fabrication na tissue engineering Applications of a novel Chitosan bilayer material as a scaffold of human neonatal dermal fibroblasts. *Biomaterials*, 22, 331-336.
- Matos, A. G. S., & César, L. F. Protocolos de Enfermagem: prevenção e tratamento de lesão por pressão. HEMORIO. (3ª Ed.) 2020.
- Melo, M. T. D. (2019). *Preparo, caracterização e aplicação em engenharia de tecidos de suportes de alginato/quitosana, associados a processos fotodinâmicos para fotobioestimulação* (Tese de Doutorado). Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, Brasil.
- Mocelin, P. R. (2018). *Acidentes por queimadura grave em usuários de hospitais municipais de urgência do município de São Luís MA: Análise quantitativa e quantitativa* (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Brasil.
- Murakami, K., Aoki, H., Nakamura, S., Takikawa, M., Hanzawa, M., Kishimoto, S., & Ishihara, M. (2010). Hydrogel blends of chitin/chitosan, fucoidan and alginate as healing-impaired wound dressings. *Biomaterials*, 31, 83-90.
- Nascimento, N. M. D. (2021). *Desenvolvimento e caracterização de filmes biodegradáveis de araruta com própolis vermelha de Alagoas* (Tese de Doutorado). Universidade Federal, Maceió, Brasil.
- Oliveira, C. R., & Santos, M. B. (2016). O potencial funcional da biomassa de banana verde (*musa spp.*) na simbiose intestinal. *Revista ciência e sociedade*, 1(1).