



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA



# **Revisão Sistemática Relacionada com a Utilização de Biopolímeros no Setor de Espumas Visando Aplicações como Embalagens para Alimentos e Sorventes**

*Autor: Henrique da Soler*

*Orientadoras: Claudia Leites Luchese*

*Isabel Cristina Tessaro*

Porto Alegre, novembro de 2021



Autor: Henrique da Soler

# Revisão Sistemática Relacionada com a Utilização de Biopolímeros no Setor de Espumas Visando Aplicações como Embalagens para Alimentos e Sorventes

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química*

Orientadoras: Claudia Leites Luchese  
Isabel Cristina Tessaro

Banca Examinadora:

Prof.<sup>a</sup> Dra. Débora Jung Luvizetto Faccin, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Mestre Juliana Both Engel, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre

2021

## AGRADECIMENTOS

Às minhas orientadoras Claudia e Isabel, pelas instruções e suporte durante a realização deste trabalho. Desde o primeiro contato para a realização do trabalho até a conclusão foram diversas adaptações, sugestões e dicas, sempre sendo muito solícitas e pacientes diante todos os problemas.

À minha mãe, Francisca, pois sem ela eu nunca poderia ter passado por toda a experiência da universidade, deixando um filho nos seus 18 anos sair de uma cidade de 15 mil habitantes para outra de cerca de 1,5 milhão, sempre me apoiando e me dando forças, nos momentos bons e ruins, sempre dizendo que independente da dificuldade que fosse para me manter longe, era para eu apenas focar em estudar que ela “daria um jeito”, sem ela nenhum passo da minha caminhada teria sido possível. Agradeço também ao meu irmão, Ramon, que também sempre me apoiou e foi uma ótima companhia em jogos on-line durante momentos de solidão. Agradeço a minha cunhada, Amanda, por também sempre ter me apoiado. E a meu pai, Osni, que sei que estivesse conosco hoje, estaria muito orgulhoso de seu filho, mas sei que ele está orgulhoso de mim lá no céu.

Agradeço também aos meus amigos Liane, Robert, Saccon, Taynara e Camila, que me apoiaram nessa decisão, e mesmo anos após o final do ensino médio, com cada um seguindo seu caminho da vida, nossa amizade continua forte, continuamos com um grande carinho, e espero que possamos manter essa amizade pelo resto dos anos. Agradeço especialmente a amiga Rafaella, minha colega de ensino médio, mas principalmente minha veterana do curso de engenharia química na UFRGS, que sempre me apoiou, me ajudou a passar das cadeiras mais difíceis, e quando estive perto de desistir, ela fez de tudo para me manter cursando, pois sabia que eu iria me arrepender se desistisse tão cedo, meu sincero agradecimento por me convencer e ajudar a chegar até o final do curso.

Deixo também o agradecimento a todos os amigos feitos durante a graduação, Jean, Caio, Daniel Baldin, Daniel Sousa, e todos os outros que fizeram parte, de maneira maior ou menor, da minha vida acadêmica, pois foram ótimos amigos e colegas de curso, espero que mesmo após o fim do curso e todos seguindo suas carreiras, possamos ainda nos ajudar e celebrar nossa amizade.

E, por fim, agradeço a todos os professores que passaram pela minha história dentro da universidade, todos os ensinamentos que me passaram, seja ensinamentos para a carreira ou para a vida, todos deixaram uma marca e uma lembrança, posso dizer que levarei os ensinamentos para toda a minha vida.

## RESUMO

Pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de espumas biopoliméricas, como alternativa ao uso de espumas poliméricas sintéticas não biodegradáveis, vêm crescendo atualmente devido ao crescimento da preocupação ambiental. Espumas sintéticas podem levar centenas de anos para serem degradadas, e, muitas vezes, o processo de reciclagem é dificultado ou inviável economicamente, sendo as espumas biopoliméricas uma alternativa biodegradável e biocompostável, além de poderem ser produzidas a partir de fontes renováveis. Espumas biopoliméricas para embalagens de alimentos e para sorção de poluentes são duas áreas que podem ser exploradas por estas novas pesquisas. Neste trabalho foram pesquisados e selecionados artigos para análise focados nestas duas áreas. Além disto, foram pesquisadas empresas que trabalham com espumas biopoliméricas para embalagens de alimentos e sorção, obtidas a partir de fontes renováveis, com o intuito de mapear o mercado e comparar o seu custo com o de espumas sintéticas, para as mesmas aplicações. Após a seleção, os artigos foram inicialmente separados de acordo com o tipo de aplicação, como embalagens para alimentos e sorção de poluentes. Em seguida, foram separados em grupos conforme o tipo de matéria-prima usada e sua fonte, o método de produção e o emprego de aditivos, tais como agentes plastificantes. Também foi realizada uma análise estatística de componentes principais para comparação dos dados. Para os artigos de espumas fabricadas a partir de biopolímeros como embalagens para alimentos foram analisadas as propriedades mecânicas, a capacidade de absorção de água e a densidade aparente, sendo considerada uma alternativa promissora, visto que resultados satisfatórios foram obtidos pelos autores. Para os artigos relacionados com a sorção, foram analisados os resultados obtidos para a sorção de poluentes, não sendo possível extrair um conjunto de dados satisfatório para a realização da análise de componentes principais. Contudo, observando os resultados de cada trabalho nota-se que estas espumas podem ser uma solução para este uso. Tanto para as espumas utilizadas para alimentos com as espumas utilizadas para sorção de poluentes, os custos quando comparados com os produtos convencionais representam o maior obstáculo comercial para o uso das espumas biodegradáveis. Por fim, conclui-se que as espumas de materiais biopoliméricos renováveis podem ser uma alternativa sustentável às espumas convencionais sintéticas, tendo apenas o custo de comercialização como barreira para uma aplicação em larga escala.

**Palavras-chave:** *Biopolímero, Espuma, Embalagens para Alimentos, sorção de contaminantes*

## ABSTRACT

Research related to the development of foams biodegradable and biocompostable produced from renewable sources, as an alternative to the use of non-biodegradable synthetic polymeric foams, is currently growing due to growing environmental concerns. Synthetic foams can take hundreds of years to be degraded, and often the recycling process is difficult or economically unfeasible. Biopolymeric foams for use as food packaging and pollutant sorption were explored in the present work. Articles focused on these two areas were researched and selected for a systematic review. In addition, companies working with biopolymeric foams obtained from renewable sources, for food packaging and sorption, were researched, to map the market, comparing the costs of the different products with synthetic foams. After selection, the articles were separated by different applications like food packaging and pollutant sorption. Then, they were separated into groups according to the type of raw material used and its source, the production method, and the use of additives, such as plasticizers. A statistical principal component analysis was also performed to compare the data. Mechanical properties, water absorption capacity, and bulk density for application as food packaging were analyzed, being considered a promising alternative once satisfactory results were obtained. For the articles related to the sorption of pollutants, it was not possible to extract a satisfactory data set to carry out the analysis of the principal components. However, observing the results of each work it is possible to note that these foams can be an eco-friendly solution for this application. Regardless of the application, food packaging or sorption of pollutants, the costs when compared to conventional products represent the biggest commercial obstacle for the use of biodegradable foams. Thus, can be concluded that foams made of biopolymeric and renewable materials represent a sustainable alternative to conventional synthetic foams, having only the commercialization cost as a barrier to a large-scale application.

**Keywords:** *Biopolymer, Foams, Food Packaging, Pollutant sorption*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama esquemático da formação de espuma pelo processo mecânico.....	7
Figura 2: Diagrama esquemático da formação de espuma via processo físico .....	7
Figura 3: Diagrama esquemático da formação de espuma via química. (a) método de incorporação do agente de expansão ao polímero e (b) método em que ocorrem reações químicas entre dois polímeros. ....	8
Figura 4: Resultados da análise estatística de componentes principais para as espumas biopoliméricas à base de amido de mandioca com resíduos como aditivo. ....	29
Figura 5: Resultados da análise estatística de componentes principais para as espumas biopoliméricas produzidas a partir de diferentes fontes de amido a fim de avaliar a influência da utilização de revestimento. ....	30
Figura 6: Resultados da análise estatística de componentes principais para os resultados comparativos entre espumas biopoliméricas de diversas fontes. ....	31

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Poluentes aquáticos e seus efeitos no ambiente analisado. ....	5
<b>Tabela 2:</b> Artigos selecionados para o tópico espumas biopoliméricas para alimentos.....	19
<b>Tabela 3:</b> Artigos selecionados para o tópico espumas biopoliméricas para sorção.....	21
<b>Tabela 4:</b> Divisão dos artigos de espumas de embalagens de alimentos em relação à matéria-prima utilizada, a fonte de amido, e o percentual relativo de utilização de cada tipo de biopolímero.....	23
<b>Tabela 5:</b> Divisão dos artigos de espumas biopoliméricas para o setor de embalagens em relação ao método de produção e seu percentual relativo de ocorrência. ....	25
<b>Tabela 6:</b> Divisão dos artigos sobre espumas para sorção de poluentes da aquicultura em relação à matéria-prima utilizada e o percentual relativo de ocorrência de cada tipo de biopolímero.....	26
<b>Tabela 7:</b> Divisão dos artigos de sorção em relação ao método de produção da espuma e a porcentagem de ocorrência do método.....	27
<b>Tabela 8:</b> Divisão dos artigos de espumas biopoliméricas para sorção em relação ao contaminante testado e a porcentagem em relação ao contaminante sorvido.....	27
<b>Tabela 9:</b> Empresas que trabalham com espumas biopoliméricas para embalagens de alimentos.....	32
<b>Tabela 10:</b> Comparação entre o preço unitário de espumas biopoliméricas comercializadas como diferentes tipos de produto (copos, marmitas, <i>bowls</i> , bandejas, entre outros) em relação ao custo do produto convencional à base de poliestireno.....	33
<b>Tabela 11:</b> Empresas que usam espumas de polipropileno para adsorção de óleo e derivados.....	34

## SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica e Fundamentação Teórica	2
2.1	Embalagens para alimentos	2
2.2	Sorção	2
2.2.1	Isotermas	3
2.2.2	Adsorventes	4
2.2.3	Contaminantes em meios aquosos	4
2.2.4	Contaminantes do solo	5
2.3	Espumas	5
2.3.1	O processo de formação de espumas	6
2.3.2	Métodos de obtenção de espuma	6
2.3.3	Principais técnicas de processamento	8
2.4	Polímeros sintéticos usados para fabricação de espumas	9
2.4.1	Poliestireno	9
2.4.2	Poliuretano	11
2.4.3	Polipropileno	12
2.4.4	Polibutileno succinato	12
2.5	Biopolímeros	13
2.5.1	Amido	13
2.5.2	Quitosana	14
2.5.3	Celulose	15
2.5.4	Poli(ácido lático)	15
2.6	Espumas biopoliméricas para embalagens de alimentos	16
2.6.1	Caracterização das espumas biopoliméricas: avaliação das propriedades mecânicas, capacidade de absorção de água e densidade aparente	16
3	Materiais e Métodos	18
3.1	Seleção de artigos sobre espumas biopoliméricas para aplicação no setor de embalagem para alimentos	18
3.2	Seleção de artigos sobre espumas biopoliméricas para aplicação como sorvente de poluentes aquáticos	20
3.3	Análise de componentes principais	22
3.4	Pesquisa de mercado: empresas do setor de embalagens e de materiais sorventes	22
3.4.1	Empresas brasileiras que comercializam espumas biopoliméricas para a indústria de embalagens de alimentos	22
3.4.2	Espumas biopoliméricas comerciais para sorção de poluentes	22
4	Resultados e Discussão	23
4.1	Resultados de artigos de espumas biopoliméricas para embalagens de alimentos	23

4.1.1	Discussão dos resultados relacionados ao biopolímero utilizado	23
4.1.2	Divisão dos artigos em relação à realização de teste de aplicação da embalagem	24
4.1.3	Divisão dos artigos em relação ao uso de plastificante	24
4.1.4	Divisão dos artigos em relação ao método de fabricação das embalagens	25
4.2	Resultados dos artigos de espumas biopoliméricas para sorção	25
4.2.1	Discussão dos resultados relacionados ao biopolímero utilizado	25
4.2.2	Discussão dos resultados relacionados ao uso de plastificante	26
4.2.3	Discussão dos resultados em relação ao método de produção da espuma	26
4.2.4	Discussão dos resultados em relação ao contaminante testado	27
4.2.5	Discussão dos artigos em relação ao ambiente recuperado	27
4.3	Comparações entre artigos de espumas biopoliméricas para embalagens de alimentos e sorção	28
4.3.1	Comparação entre matéria-prima utilizada	28
4.3.2	Comparação entre o uso de plastificante	28
4.3.3	Comparação entre o método de fabricação das espumas	28
4.4	Resultados da análise de componentes principais	28
4.4.1	Análise de componentes principais das espumas biopoliméricas para aplicação como embalagem para alimentos	28
4.5	Empresas que utilizam espumas biopoliméricas para embalagens de alimentos	31
4.6	Empresas de espumas para sorção	34
5	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	35
	REFERÊNCIAS	36

## 1 Introdução

As espumas poliméricas têm desempenhado um papel importante na vida cotidiana, devido às suas características especiais, tornando-se atraentes para muitas aplicações domésticas e industriais. Os atributos mais importantes das espumas poliméricas são sua baixa densidade e custo, elevada resistência ao impacto, alto isolamento térmico e propriedades de amortecimento. Por estas características, as espumas são amplamente utilizadas em diversas aplicações, como na indústria de embalagens, automotiva, eletrônica, aeroespacial, construção civil, médica, entre outras.

Para embalagens de alimentos, as espumas são amplamente utilizadas para diversos tipos de produtos alimentícios, devido ao seu baixo custo e suas propriedades mecânicas e de condicionamento. São utilizadas principalmente espumas fabricadas a partir de poliestireno, poliuretano, polipropileno, polibutileno succinato, entre outros materiais. Espumas de diversas fontes também podem ser utilizadas para a sorção de poluentes, com destaque para as espumas de polipropileno, que são largamente utilizadas para essa aplicação. Porém, há uma crescente preocupação ambiental relacionada com o descarte destas espumas, devido à natureza da sua fonte, que normalmente é fóssil, e, principalmente, devido ao fato de as espumas não serem facilmente degradadas, até mesmo em ambientes controlados. Além disso, esses materiais não são considerados economicamente viáveis para reciclagem, pois devido a sua baixa densidade, é necessário um grande volume de material coletado para realizar uma reciclagem significativa.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica de artigos publicados na literatura sobre espumas produzidas a partir de biopolímeros provenientes de fontes renováveis, biodegradáveis e/ou biocompostáveis, focando no seu uso para aplicações nos setores de embalagens de alimentos e para sorção de poluentes aquáticos ou do solo. Além disso, foram pesquisadas empresas que trabalham com espumas biopoliméricas para embalagens de alimentos e sorção de poluentes da água, obtidas a partir de fontes renováveis, com o intuito de mapear o mercado e comparar o seu custo com o de espumas sintéticas, considerando as mesmas aplicações. As espumas produzidas a partir de fontes renováveis e biodegradáveis podem se tornar uma opção viável técnica e economicamente a fim de minimizar o uso de produtos de origem fóssil e não-biodegradáveis, minimizando os problemas ambientais gerados pelo descarte dessas espumas.

Neste trabalho foi realizada uma revisão sistemática de artigos que foram publicados em revistas científicas de alto fator de impacto nos últimos 5 anos, relacionados com a utilização de espumas biopoliméricas no setor de embalagens para alimentos como uma alternativa *ecofriendly* ao uso de espumas convencionais, com foco em aplicações de uso único e rápido. Para isto, foram analisados aspectos intrínsecos de cada artigo relacionando as principais similaridades, obtendo dados estatísticos para discussão. Também foi realizada uma análise de componentes principais propondo uma avaliação comparativa dos resultados de propriedades mecânicas, capacidade de absorção de água e densidade dos materiais de embalagem. Similarmente, também foram analisados artigos, selecionados de acordo com as diretrizes de interesse, relacionados com o desenvolvimento de espumas biopoliméricas para aplicação como sorventes de poluentes. Foram analisados os resultados obtidos para a sorção de poluentes.

## 2 Revisão Bibliográfica e Fundamentação Teórica

Neste capítulo estão reunidos fundamentos teóricos e os principais conceitos para uma melhor compreensão e embasamento do trabalho. Serão abordados tópicos relacionados com o uso de diferentes materiais biopoliméricos no setor de embalagens para alimentos, assim como na sorção de poluentes aquáticos, elencando os principais materiais usados como sorventes. Vale ressaltar que, neste estudo em particular, o uso da expressão “materiais biopoliméricos” refere-se a materiais biodegradáveis obtidos a partir de fontes renováveis.

### 2.1 Embalagens para alimentos

Existem várias maneiras de se definir embalagens, segundo Payne & Payne (2012) embalagens podem ser definidas de três maneiras: (1°) um sistema coordenado de preparo de bens para transporte, distribuição, armazenamento, varejo e uso final; (2°) um meio de garantir uma entrega segura para o consumidor final em boas condições com mínimo custo geral; (3°) uma função tecno-econômica direcionada à minimização dos custos, maximizando as vendas e, assim, os lucros. Segundo Abbas & Brockgreitens (2015), embalagens para alimentos foram desenvolvidas para conter produtos alimentícios, manter a qualidade dos alimentos e informar os consumidores sobre as características do produto embalado. Essas funções primárias são frequentemente indicadas como contenção, proteção e comunicação.

Para entender a dimensão desse setor industrial e ressaltar sua importância, segundo dados divulgados pela Associação Brasileira de Embalagens (ABRE), em 2019 foi obtido um valor bruto de produção 75,9 bilhões de reais no Brasil, com um crescimento de aproximadamente 6,5 % em relação a 2018, impulsionado, principalmente, pelos setores de alimentos e bebidas, principais consumidores do setor.

A maioria dos materiais usados para embalar alimentos pertence às seguintes classes: metais, vidro, papel e polímeros. Algumas mídias de embalagem consistem em uma combinação de dois ou mais materiais das classes listadas acima. Metal esmaltado (envernizado) e laminados formados pela união de camadas de polímero, papel e folha de alumínio são exemplos comuns de tais materiais compósitos (BERK, 2013).

Um recipiente de espuma para alimentos é uma forma de embalagem descartável de alimentos para vários alimentos e bebidas. A espuma é um bom isolante térmico, facilitando o transporte do recipiente, além de manter os alimentos na temperatura que tinha ao colocar no recipiente, seja quente ou fria.

### 2.2 Sorção

O processo de sorção é caracterizado como sendo o fenômeno decorrente da interação de substâncias no interior ou na superfície de outras. Sorção refere-se à ação de dois processos de absorção e adsorção ocorrendo simultaneamente. Neste trabalho, será utilizado o termo sorção, pois o foco do trabalho não é analisar qual processo está ocorrendo; objetiva-se avaliar a eficiência que os materiais biopoliméricos possuem na sorção de poluentes. A absorção é a incorporação de uma substância em um estado para outro de um estado diferente (por exemplo, substâncias líquidas sendo absorvidas por um sólido ou uma substância líquida absorvendo gases). Adsorção é a adesão física ou ligação de íons e moléculas na superfície de outra molécula.

Adsorção é a adesão de átomos, íons ou moléculas de um gás, líquido ou sólido dissolvido em uma superfície. Este processo cria uma película do adsorbato na superfície do adsorvente.

Este processo difere da absorção. A adsorção é um fenômeno de superfície, enquanto a absorção envolve todo o volume do material, embora a adsorção geralmente preceda a absorção (ATKINS et al., 2018), o termo sorção abrange ambos processos. O processo inverso da sorção é a dessorção.

A adsorção está presente em muitos sistemas naturais, físicos, biológicos e químicos e é amplamente utilizada em aplicações industriais, como catalisadores heterogêneos (CZELEJ et al., 2016), carvão ativado, resinas sintéticas, purificação de água, entre outros.

### 2.2.1 Isotermas

A adsorção de gases e solutos é geralmente descrita por meio de isotermas, ou seja, curvas que relacionam a quantidade de adsorbato no adsorvente em função da pressão (componentes gasosos) ou concentração (para solutos da fase líquida) em temperatura constante. Caso a quantidade adsorvida seja normalizada pela massa do adsorvente é possível realizar comparações de eficiência de remoção para diferentes materiais.

#### Freundlich

O primeiro ajuste matemático para uma isoterma foi publicado por Freundlich & Kuster (1906), propondo uma fórmula (Equação 1) puramente empírica para adsorbatos gasosos.

$$q = K_f C_{eq}^{1/n} \quad \text{Equação 1}$$

Fonte: Igwe e Abia, 2007

Sendo  $C_{eq}$  a concentração de equilíbrio ( $\text{g L}^{-1}$ ),  $q$  é a quantidade adsorvida ( $\text{g g}^{-1}$ ) e  $K_f$  e  $n$  são constantes que incorporam todos os parâmetros que afetam o processo de adsorção, como capacidade e intensidade de adsorção, respectivamente.

#### Langmuir

Irving Langmuir foi o primeiro a derivar uma isoterma de adsorção com base científica em 1918 (CZEPIRSKI). O modelo proposto, Equação 2, pode ser aplicado para gases adsorvidos em superfícies sólidas. É uma isoterma semiempírica com base cinética e foi derivada com base na termodinâmica estatística. Baseia-se em quatro suposições, conforme descrito a seguir: (1) todos os locais de adsorção são equivalentes e cada local pode acomodar apenas uma molécula; (2) a superfície é energeticamente homogênea e as moléculas adsorvidas não interagem; (3) não há transições de fase; (4) na adsorção máxima, apenas uma monocamada é formada. A adsorção ocorre apenas na região superficial, não com outros adsorbatos.

$$\theta_a = \frac{V}{V_m} = \frac{K_{eq}^A p_a}{1 + K_{eq}^A p_a} \quad \text{Equação 2}$$

Fonte: Adaptado de Langmuir (1917)

Sendo  $\theta_a$  a ocupação dos sítios de adsorção, ou seja, a fração de  $V$  ( $\text{m}^3$ ), o volume de gás absorvido no sólido, por  $V_m$  ( $\text{m}^3$ ), o volume de moléculas da monocamada de gás cobrindo a superfície do sólido.  $K_{eq}^A$  é a constante no equilíbrio e  $p_a$  é a pressão do gás (Pa).

## BET

Em 1938, Stephen Brunauer, Paul Emmett e Edward Teller desenvolveram um modelo BET de isoterma que possibilita considerar a existência de multicamadas (Equação 3). A principal suposição usada para derivar a equação BET é que os sucessivos calores de adsorção para todas as camadas, exceto a primeira, são iguais ao calor de condensação do adsorbato.

$$\theta = \frac{cp}{(P_0 - P) \left( 1 + (c-1) \left( \frac{P}{P_0} \right) \right)} \quad \text{Equação 3}$$

*Fonte: Brunauer et al., 1938*

Sendo  $c$  a constante de BET,  $P_0$  a pressão de vapor da fase líquida adsorbente que estaria na temperatura do adsorbato ( $P_a$ ),  $P$  a pressão ( $P_a$ ) e  $\theta$  a “cobertura da superfície”.

### 2.2.2 Adsorventes

Um adsorbente é uma superfície sólida insolúvel, geralmente porosa e com alta área de superfície, capaz de efetuar em sua superfície a adesão de moléculas insolúveis dispersas em meios líquidos ou gasosos (o adsorbido). A interação entre adsorbente e adsorbido pode ser de natureza química ou física. Em geral, os adsorventes possuem formatos esféricos, hastes, molduras ou monólitos com um raio hidrodinâmico variando entre 0,25 e 5 mm. Eles devem ter alta resistência à abrasão, alta estabilidade térmica e pequenos diâmetros de poros, o que resulta em maior área de superfície exposta e, portanto, alta capacidade de adsorção. Os adsorventes também devem ter uma estrutura de poros distinta que permita o transporte rápido dos vapores gasosos. No Brasil, mantas à base de polipropileno são os principais adsorventes comerciais usados para absorção de contaminantes. As mantas podem ser utilizadas para a remoção de óleos, produtos perigosos ou líquidos em geral.

### 2.2.3 Contaminantes em meios aquosos

A poluição da água consiste na adição de substâncias ou formas de energia que alteram direta ou indiretamente a natureza do corpo hídrico de tal forma que afetam negativamente seu uso legítimo (SPERLING, 2007). Os principais tipos de poluentes, os parâmetros analíticos usados para avaliação da qualidade da água e seus efeitos no meio ambiente estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1:** Poluentes aquáticos e seus efeitos no ambiente analisado.

Poluente	Principal parâmetro Analisado	Possível efeito do poluente
Sólidos em suspensão	Total de sólidos em suspensão	Problemas de aparência, depósitos de lama, adsorção de poluentes, proteção dos patógenos.
Matéria orgânica biodegradável	Demanda bioquímica de oxigênio	Consumo de oxigênio, morte de peixes, condições sépticas.
Nutrientes	Nitrogênio, fosforo	Crescimento excessivo de algas, toxicidade para peixes, doenças em recém-nascidos, poluição de lençóis freáticos.
Patógenos	Coliformes, ovos de helmintos	Doenças transmitidas pela água.
Matéria orgânica não-biodegradável	Pesticidas, alguns detergentes, outros	Toxicidade, espuma, redução da transferência de oxigênio, não-biodegradabilidade, fortes odores.
Sólidos inorgânicos dissolvidos	Total de sólidos dissolvidos, condutividade elétrica	Salinidade excessiva, toxicidade para plantas, problemas com permeabilidade do solo.

Fonte: Adaptado de Sperling (2007)

#### 2.2.4 Contaminantes do solo

Segundo George et al. (2014), a contaminação do solo ou a poluição do solo é causada pela incorporação de produtos químicos xenobióticos (fabricados pelo homem) nesse ambiente ou por qualquer outro tipo de alteração no ambiente natural do solo. Esse tipo de contaminação, geralmente é causado por atividade industrial, utilização de produtos químicos agrícolas (defensivos, fertilizantes, entre outros), acidentes envolvendo cargas químicas (gasolina, óleos, entre outros) ou então, pelo descarte impróprio de resíduos não tratados ou tratados ineficientemente.

O trabalho agora irá apresentar sobre o conceito de espumas poliméricas, suas características, métodos de produção e obtenção, além dos principais polímeros utilizados para este fim.

### 2.3 Espumas

As espumas são microestruturas porosas feitas a partir de materiais poliméricos, sendo largamente usadas em nossa vida diária para diversas aplicações, incluindo o uso como embalagem para alimentos (CHIDAMBARAM et al., 2019). O processo de fabricação das espumas envolve a dispersão de um gás em uma matriz polimérica. Em geral, espumas são produzidas pela ação de um agente de expansão, capaz de gerar espaços vazios na matriz do polímero.

As espumas poliméricas podem ser divididas em termoplásticas e termofixas, de acordo com o tipo de polímero usado na sua fabricação. Os polímeros termoplásticos são constituídos por cadeias moleculares lineares que amolecem com o aquecimento e endurecem com o resfriamento repetidas vezes, sendo, portanto, mecanicamente recicláveis. Polímeros termofixos referem-se aos materiais cujo processo de polimerização é irreversível, ou seja, este tipo de polímero sofre um processo de cura por reações químicas ou pela aplicação conjunta de calor e pressão, e torna-se um material infusível e insolúvel.

Outra possível aplicação das espumas biopoliméricas com relevante preocupação ambiental é a sorção de poluentes, seja de corpos hídricos ou do solo.

### 2.3.1 *O processo de formação de espumas*

O processo de formação de espumas poliméricas pode ser dividido em três estágios: formação celular, crescimento celular e estabilização celular (JIN et al., 2019). Um agente de expansão (geralmente um gás) é adicionado a um polímero fundido sob condições adequadas e, então, uma grande quantidade de gás é produzida por meio de uma série de reações químicas (ou adição de gás), formando uma dispersão polímero/gás. Quando a quantidade de gás aumenta gradualmente, a solução torna-se supersaturada e o gás escapa da solução. O gás que escapa forma o núcleo da célula por nucleação (KAKUMANU & SUNDARRAM, 2018; LIU et al., 2018).

Após a etapa de formação das células, a pressão do gás dentro da célula é inversamente proporcional ao raio da célula. Assim, quanto menor for a célula, maior será a pressão dentro dela (KUSKA et al., 2019). Quando duas células de tamanhos diferentes estão próximas uma da outra, o gás se espalha de uma célula pequena para uma célula grande, e as duas células se fundem. Como resultado da nucleação, o número de células aumenta e o diâmetro do orifício da célula se expande; desta forma, poderá ocorrer o crescimento celular (WANG, S. et al., 2018).

Devido à formação e crescimento de um grande número de células, a área de superfície e o volume do sistema aumentam continuamente e a parede celular da espuma torna-se mais fina (BARMOUZ & BEHRAVESH, 2019). Assim, o sistema de espuma se torna instável, ou seja, podem continuar se expandindo, combinando-se, entrando, assim, em colapso e romper. As células são geralmente estabilizadas por resfriamento ou pela adição de surfactantes (HEIMANN et al., 2018).

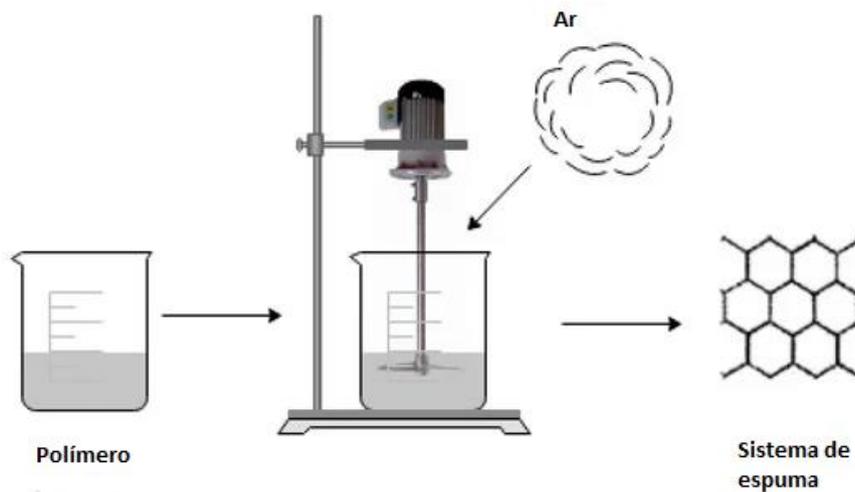
### 2.3.2 *Métodos de obtenção de espuma*

Existem várias metodologias de produção de espumas. Neste trabalho serão apresentados os processos de formação de espumas por via mecânica, física e química.

Na Figura 1 está apresentado um esquema ilustrativo da formação de espumas poliméricas por via mecânica. O ar é adicionado às resinas poliméricas por agitação mecânica, seguida pela formação da espuma (JIN et al., 2019).

Segundo Jin et al. (2019), as principais vantagens da formação de espumas por via mecânica são: (a) não há necessidade de utilizar agentes de formação de espuma adicionais, (b) uso de equipamento simples e de fácil operação, (c) processamento sustentável, não tóxico e seguro, (d) baixo custo e alta eficiência.

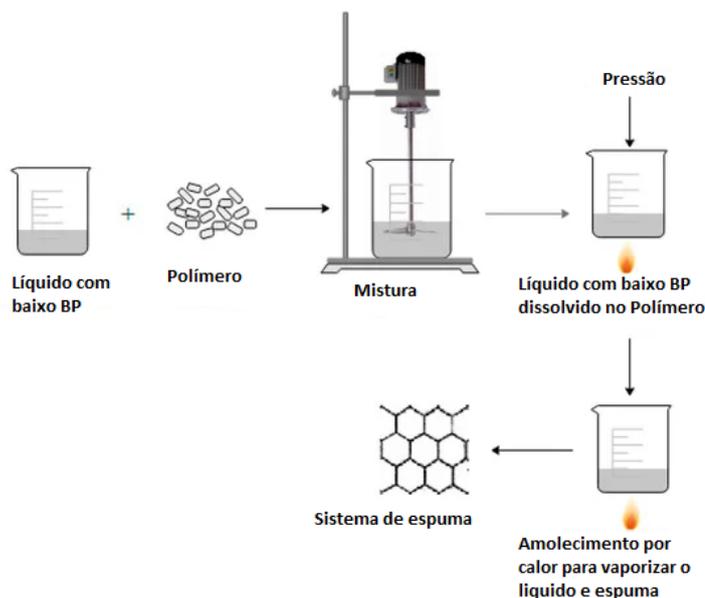
Figura 1: Diagrama esquemático da formação de espuma pelo processo mecânico



Fonte: Adaptado de Jin et al., 2019.

No processo de formação de espumas por via física, um líquido de baixo ponto de ebulição (BP) e um polímero são misturados e, em seguida, a formação da estrutura ocorre em virtude da aplicação de pressão e aquecimento (CHEN et al., 2018), conforme Figura 2.

Figura 2: Diagrama esquemático da formação de espuma via processo físico

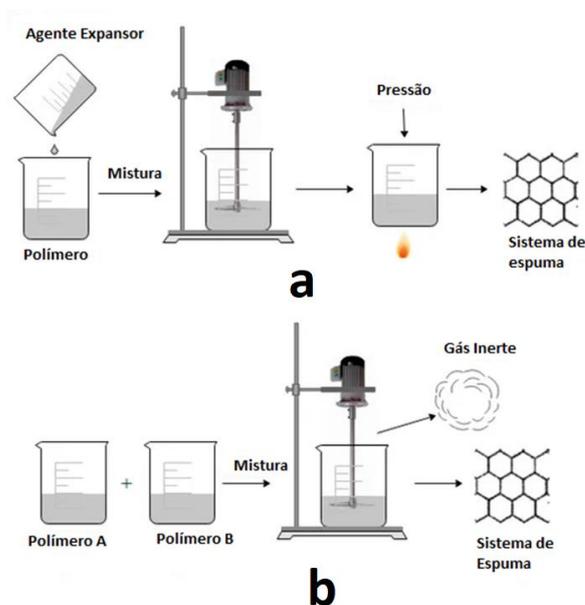


Fonte: Adaptado de Jin et al., 2019.

As vantagens da utilização do método de formação de espumas por via física envolvem diferentes fatores, a seguir relacionados. (a) O custo do agente de formação de espumas por via física é relativamente baixo, especialmente se forem usados dióxido de carbono e nitrogênio; (b) o método de formação de espumas pode ser considerado não poluente, tendo, portanto, elevado potencial de aplicação; (c) este método não gera material residual após a formação das espumas; e, (d) possui baixa influência nas propriedades dos plásticos espumantes formados. A necessidade de utilização de uma máquina de moldagem por injeção especial, elevados requisitos técnicos e equipamentos auxiliares podem ser descritos como sendo as principais desvantagens da formação da espuma via física (JIN et al., 2019).

Na Figura 3 está apresentado o esquema representativo da formação de espumas por via química. O processo de formação de espumas por via química pode ser realizado por dois métodos. O primeiro método consiste na incorporação de um agente de expansão a um polímero previamente fundido, sendo que este é decomposto, favorecendo a liberação de gás. Em seguida, o polímero é transformado em espuma pela aplicação de pressão e calor, conforme Figura 3a. No segundo método (Figura 3b) ocorrem reações químicas entre dois polímeros (A e B) para produzir gases inertes e, em seguida, os polímeros são espumados.

Figura 3: Diagrama esquemático da formação de espuma via química. (a) método de incorporação do agente de expansão ao polímero e (b) método em que ocorrem reações químicas entre dois polímeros.



Fonte: Adaptado de Jin et al., 2019.

As principais vantagens da formação de espumas por via química são: (a) o agente formador de espuma química pode ser decomposto termicamente em uma faixa de temperatura específica e liberado um ou mais gases, portanto, pode ser adequado para resinas poliméricas que fundem em uma faixa de temperatura específica; (b) a formação de espumas por via química pode ser obtida utilizando uma máquina de moldagem por injeção comum (JIN et al., 2019). No entanto, a necessidade de alta precisão na fabricação do molde, o elevado custo do molde, e o requerimento de um segundo dispositivo de fixação durante o processo de formação da espuma de alta pressão podem ser descritos como sendo as desvantagens do uso do processo de formação de espumas por via química (JIN et al., 2019).

### 2.3.3 Principais técnicas de processamento

#### Moldagem por extrusão para obtenção de espumas

A extrusora de parafuso duplo co-rotacional será usada como referencial para explicar a moldagem por extrusão para obtenção de espumas. Um polímero (ou mistura de polímeros) é adicionado na extrusora nas condições de processamento adequadas, sendo aquecido, homogeneizado e sofrendo tensões de cisalhamento geradas pela aplicação de pressão, sendo, portanto, extrusado. Usado como agente de expansão, o fluido supercrítico, introduzido em uma zona do cilindro, é dissolvido na fusão do material, reduzindo a

viscosidade do polímero. Ao reduzir a temperatura de formação de espuma, a densidade celular e a resistência à fusão aumentam, possibilitando a obtenção de espumas microcelulares (WANG, G. et al., 2018; KESHTKAR et al., 2014; ELLINGHAM et al., 2017).

#### Processo de injeção para fabricação de espumas

Um polímero (ou mistura de polímeros) é plastificado (aquecimento e homogeneização) sob condições adequadas de processamento em um equipamento clássico de moldagem por injeção. O fluido supercrítico é rapidamente dissolvido no polímero fundido para formar uma solução homogênea de gás/polímero. A solução é injetada na cavidade do molde sofrendo uma rápida queda de pressão e temperatura, podendo simultaneamente produzir nucleação celular homogênea e/ou heterogênea e crescimento celular até a formação de espuma. O aspecto visual e as propriedades das espumas obtidas por injeção são altamente dependentes da matéria-prima selecionada, do projeto do molde e das condições de processamento (WANG et al., 2017; BARBOSA et al., 2018).

#### Processo de liofilização para obtenção de espumas

A liofilização, também conhecida como criodessecação, é um processo de desidratação a baixa temperatura que envolve o congelamento do produto (temperaturas entre -45 °C a -35 °C), a diminuição a pressão (até cerca de 0,06 atm) e, em seguida, a remoção da água na forma de gelo por sublimação. Em virtude da utilização de baixas temperaturas no processamento, a qualidade do produto reidratado é excelente e a forma original do produto pode ser mantida (RATTI, 2001). Entretanto, é considerado um processo com elevado custo em relação a outros métodos de obtenção de espumas devido à necessidade de aplicação de vácuo e utilização de baixas temperaturas.

### **2.4 Polímeros sintéticos usados para fabricação de espumas**

Diferentes materiais poliméricos podem ser usados para a fabricação de espumas. A seguir serão apresentadas as principais informações dos materiais poliméricos comumente utilizados para a comercialização de espumas para aplicação em diversos setores industriais: poliestireno, poliuretano, polipropileno e polibutileno succinato.

#### *2.4.1 Poliestireno*

Poliestireno (PS) é um polímero sintético de hidrocarbonetos aromáticos produzido a partir do monômero estireno (etenilbenzeno) via polimerização por adição. A fórmula química do poliestireno é  $(C_8H_8)_n$ . O poliestireno pode dar origem a materiais sólidos ou espumas. O poliestireno de uso geral é duro e quebradiço, sendo naturalmente transparente. No entanto, pode ser colorido com a adição de corantes. É um material com baixa barreira ao oxigênio e ao vapor de água e tem um ponto de fusão relativamente baixo. O poliestireno é um dos plásticos mais amplamente utilizados (MAUL et al., 2007). Os principais usos desse polímero incluem embalagens de proteção, recipientes, tampas, garrafas, bandejas, copos, talheres descartáveis, entre outros.

Como um polímero termoplástico, o PS encontra-se em um estado sólido (vítreo) à temperatura ambiente, mas flui se aquecido acima de cerca de 200 °C, sua temperatura de processamento. Torna-se rígido novamente quando resfriado. Este comportamento de temperatura é explorado para o processamento via extrusão (para obtenção do poliestireno

expandido) e também para moldagem e conformação a vácuo, uma vez que pode ser fundido em moldes com elevado detalhamento.

De acordo com as normas ASTM (*American Society for Testing and Materials*), o poliestireno é considerado um material não biodegradável. Desta forma, caso ele seja descartado incorretamente poderá causar danos irreversíveis ao ecossistema, visto que pode se acumular no ambiente externo, particularmente ao longo das margens e cursos d'água, corpos hídricos e oceanos, especialmente na sua forma de espuma (KWON et al., 2014). No entanto, é importante comentar que certos organismos são capazes de degradar esse polímero, embora muito lentamente (HO, 2017). As larvas de *Tenebrio molitor* podem se alimentar de poliestireno (YANG et al., 2015). A bactéria *Pseudomonas putida* pode converter o óleo de estireno em polihidroxialcanoatos (PHAs) biodegradáveis (WARD et al., 2006).

O poliestireno é considerado um material relativamente inerte quimicamente. Embora seja um material com elevada hidrofobicidade e resistente à degradação em presença de diferentes ácidos e bases, é facilmente atacado por muitos solventes orgânicos, solventes clorados e solventes de hidrocarbonetos aromáticos. Se o poliestireno for devidamente incinerado em altas temperaturas (até 1000 °C) e com quantidade de ar suficiente, os produtos químicos gerados são água, dióxido de carbono e, possivelmente, pequenas quantidades de compostos de halogênio residuais de retardadores de chama. Se apenas a incineração incompleta for feita, também haverá restos de fuligem de carbono e uma mistura complexa de compostos voláteis.

### Poliestireno expandido

O poliestireno expandido (EPS) é uma espuma rígida e resistente de células fechadas com uma faixa de densidade normal de 11 a 32 kg/m<sup>3</sup>. Geralmente é branco, sendo feito de esferas de poliestireno pré-expandidas. As espumas de poliestireno são produzidas com agentes de expansão que formam bolhas, promovendo a expansão da espuma. No caso do poliestireno expandido, geralmente são usados hidrocarbonetos como o gás pentano, que pode apresentar riscos de inflamabilidade durante a fabricação ou armazenamento do material recém-fabricado. Condições controladas de processamento devem ser asseguradas para evitar acidentes.

O EPS é usado para recipientes de alimentos, folhas moldadas para isolamento de edifícios e material de embalagem. EPS também tem sido amplamente utilizado em aplicações automotivas e de segurança rodoviária, como capacetes para motociclistas e barreiras rodoviárias em pistas de corrida de automóveis. (FALLER et al., 2006; BIELENBERG et al., 2008; MILLS et al., 2009). Segundo o Allied Market Research, em 2018, o mercado global de poliestireno expandido foi avaliado em \$15,3 bilhões de dólares. Estimativas projetam alcance de aproximadamente \$22,8 bilhões de dólares em 2026. Já no Brasil, segundo a EPS Brasil, em 2019, o Consumo Aparente Nacional e a produção de EPS bateram recorde de volumes, alcançando os patamares de 107 mil e 68,8 mil toneladas, respectivamente.

Resíduos de poliestireno podem levar centenas de anos para degradar tanto em ambientes aquáticos quanto enterrados no solo, sendo também resistentes à foto-oxidação (BANDYOPADHYAY & BASAK, 2013). Os animais não reconhecem a espuma de poliestireno como um material sintético e artificial e podem até mesmo acreditar que é um alimento. A espuma de poliestireno flutua na água sendo facilmente carregada pelo vento, devido à sua baixa densidade específica. Pode ter efeitos graves na cadeia alimentar como um todo, visto

que influenciam no organismo de animais marinhos que ingerem quantidades significativas desse material.

Atualmente, a maioria dos produtos de poliestireno não é reciclada devido à falta de incentivo fiscal para investir em equipamentos compactadores e sistemas logísticos necessários para esse processamento. No Brasil, segundo uma pesquisa encomendada pela Plastivida Instituto Socioambiental dos Plásticos à Maxiquim demonstrou que, em 2012, cerca de 34,5 % do poliestireno expandido produzido no Brasil foi reciclado. Devido à baixa densidade da espuma de poliestireno, sua coleta não é considerada viável economicamente. No entanto, se o material residual passar por um processo de compactação inicial, sua densidade do material pode ser alterada de aproximadamente 30 kg/m<sup>3</sup> para 330 kg/m<sup>3</sup>, tornando-se uma mercadoria reciclável de alto valor agregado para produtores de pellets reciclado.

#### 2.4.2 *Poliuretano*

O poliuretano (PU) é um polímero composto de unidades orgânicas unidas por ligações de carbamato (uretano). Em geral, os poliuretanos são polímeros termoendurecíveis e não fundem com o reaquecimento, embora alguns poliuretanos termoplásticos possam ser produzidos. Segundo Garside (2021), a produção global de PU em 2020 foi de cerca de 24 milhões de toneladas métricas. No Brasil, de acordo com o relatório apresentado pela Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM), a produção anual estimada do poliuretano no país é de cerca de 620 mil toneladas.

O polímero de poliuretano com reação total é quimicamente inerte. Os poliuretanos podem ser usados como combustíveis. A decomposição por incineração de PU pode produzir quantidades significativas de monóxido de carbono e cianeto de hidrogênio, além de óxidos de nitrogênio, isocianatos e outros produtos tóxicos (MCKENNA & HULL, 2016).

Os poliuretanos podem ser quimicamente desintegrados devido ao processo de hidrólise. Acredita-se que a degradação microbiana do poliuretano seja devida à ação das enzimas esterase, uretanase, hidrolase e protease (HOWARD, 2002). O processo de degradação é lento, pois a maioria dos microrganismos tem dificuldade de se mover além da superfície do polímero. A suscetibilidade ao ataque de fungos é maior devido à liberação de enzimas extracelulares, que são mais capazes de permear através da matriz polimérica. Os poliuretanos do tipo poliéster são mais facilmente biodegradados por fungos do que os PU do tipo poliéter (TOKIWA et al., 2009).

Em contraste com outros polímeros comuns, como polietileno e poliestireno, o PU pode ser produzido a partir de uma ampla gama de monômeros. Os polímeros de poliuretano são comumente formados pela reação de um di ou triisocianato com um polióis, na presença de um catalisador ou na exposição à luz ultravioleta (SOTO et al., 2014). Tanto os isocianatos quanto os polióis usados para fazer poliuretanos contêm, em média, dois ou mais grupos funcionais por molécula. Essa variedade química permite a obtenção de poliuretanos com diferentes propriedades físicas, levando a uma gama igualmente ampla de aplicações, tais como: esponjas para limpeza; móveis; assento de automóveis; construção civil; selantes de construção e contenção de fogo; botes infláveis; pranchas de surfe; barcos de casco rígido; tanques de água; punhos de raquete; pulseira de relógios; vernizes; peças automotivas; componentes eletrônicos; adesivos; protetores contra abrasão; aplicações têxteis, entre outras.

### Espumas de poliuretano

As espumas destacam-se como a maior aplicação individual, respondendo por 67 % de todo o poliuretano produzido em 2016 (GAMA et al., 2018). Ou seja, mais de três quartos do consumo global de produtos de poliuretano é na forma de espumas, com os tipos flexíveis e rígidos sendo aproximadamente iguais em tamanho de mercado. Conforme comentado anteriormente, as propriedades de um poliuretano são muito influenciadas pelos tipos de isocianatos e polióis usados no processamento. Segmentos longos e flexíveis, fornecidos pelo polioliol, conferem polímeros macios e flexíveis. Altos graus de reticulação geram polímeros mais resistentes ou rígidos. As cadeias longas e um baixo grau de reticulação permitem a obtenção de um polímero muito elástico; as cadeias curtas com muitas reticulações produzem um polímero rígido, enquanto as cadeias longas e com reticulação intermediária fornecem um polímero útil para fazer espuma.

Segundo Markets & Markets, em 2020, o mercado de espumas de poliuretano comercializou cerca de \$37,8 bilhões de dólares, com uma previsão de crescimento para \$54,3 bilhões até 2025. As principais razões para o crescimento do mercado de espumas de poliuretano incluem o crescimento das indústrias de uso final, como cama e móveis, eletrônicos, setor automotivo e construção civil, em economias emergentes como Índia, Tailândia, entre outras. O aumento do uso de espumas de poliuretano na construção de isolamentos térmicos para conservação de energia é decorrente das propriedades físicas únicas das espumas de poliuretano, como flexibilidade; resistência a impacto e abrasão; capacidade de carga elevada; resistência a óleo; água e graxas; dentre outras, e, também são fatores que impulsionam o crescimento desse mercado.

#### *2.4.3 Polipropileno*

O polipropileno (PP), também conhecido como polipropeno, é um polímero termoplástico parcialmente cristalino e apolar, pertencente ao grupo das poliolefinas. Suas propriedades são semelhantes às do polietileno, mas é um pouco mais duro e mais resistente ao calor. É um material branco, mecanicamente robusto e possui alta resistência química (GAHLEITNER & PAULIK, 2014). É produzido por polimerização em cadeia a partir do monômero propileno.

Esse polímero é usado em uma ampla variedade de aplicações, desde produtos obtidos por injeção de moldes, moldação por sopro, fibras e filamentos até filmes e revestimentos produzidos por extrusão. Outras aplicações do polipropileno são rótulos, fibras têxteis como roupa térmica, recipientes reutilizáveis de diversos tipos, equipamentos de laboratório e cartões bancários (PLASTICS EUROPE, 2021).

Uma das particularidades mais importantes do PP é a sua elevada resistência quando submetido à forças de flexão, mesmo em peças finas. Esse polímero pode ser usado nos sistemas de tubulação de processos de manufatura, principalmente quando há necessidade de alta pureza, resistência e rigidez, como no caso de tubulações destinadas ao uso de sistemas de encanamento de água potável, aquecimento e resfriamento hidrônico e água recuperada.

#### *2.4.4 Polibutileno succinato*

O polibutileno succinato (PBS) é uma resina termoplástica de polímero da família dos poliésteres. O PBS é um poliéster alifático biodegradável com propriedades comparáveis ao

polipropileno. O PBS é um polímero originado pela policondensação do ácido succínico (BBSA) e do 1,4-butanodiol (BDO). Este polímero pode ser utilizado até temperaturas de 200 °C, sendo, portanto, importante para aplicações que exigem temperaturas elevadas. Segundo Tokiwa et al. (2009), *Amycolatopsis sp.* HT-6 e a cepa 14-3 de *Penicillium sp.* podem degradar o PBS; *Microbispora rosea*, *Excelsopora japonica* e *E. viridilutea* podem consumir amostras de PBS emulsionado.

Segundo Xu & Guo (2010), como o PBS se decompõe naturalmente em água e CO<sub>2</sub>, sua utilização pode ser uma alternativa biodegradável ao uso de alguns plásticos sintéticos convencionais. No setor de embalagens, o PBS pode ser processado em filmes, sacolas ou caixas, tanto para embalagens alimentícias quanto cosméticas. Outras aplicações do PBS podem ser encontradas como produtos descartáveis, como talheres ou artigos médicos. Na agricultura, o uso do PBS encontra interesse na fabricação de filmes usados como cobertura ou materiais de liberação controlada para pesticidas e fertilizantes. Na área médica, o PBS pode ser usado como sistemas biodegradáveis de encapsulação de fármacos, devido a sua biocompatibilidade (BRUNNER et al., 2011; FONSECA, 2014).

Tendo em vista o que foi comentado até aqui, o trabalho agora irá apresentar o conceito de biopolímeros, os principais utilizados e as características dessas matérias-primas, com ênfase na sua utilização no setor de fabricação de espumas.

## 2.5 Biopolímeros

Os biopolímeros também compreendem polímeros ou copolímeros biodegradáveis produzidos a partir de matérias-primas de fontes renováveis, como: milho, cana-de-açúcar, celulose, quitina, entre outros (BRITO et al., 2011). Os grandes impactos ambientais causados pelos processos de extração e refino utilizados para produção dos polímeros provenientes do petróleo, os baixos índices de reciclagem, a escassez de matéria-prima fóssil e o consequente aumento do seu preço são alguns fatores que estão relacionados ao crescente interesse pela utilização de biopolímeros. Outro fator preponderante é a não biodegradabilidade da grande maioria dos polímeros produzidos a partir do petróleo, contribuindo para o acúmulo de resíduo sólido plástico que pode levar dezenas, centenas ou milhares de anos para serem novamente assimilados pela natureza se descartados incorretamente.

### 2.5.1 Amido

O amido é um carboidrato polimérico que consiste em numerosas unidades de glicose unidas por ligações glicosídicas. Este polissacarídeo é produzido pela maioria das plantas verdes para armazenamento de energia. Mundialmente, o amido é o carboidrato mais comum na dieta humana e está contido em grandes quantidades em alimentos básicos. As principais fontes de ingestão de amido são os cereais (arroz, trigo e milho) e raízes (batata e mandioca) (ELIASSON, 2004). O amido é uma fonte de matéria-prima barato, abundante e renovável (AVÉROUS & POLLET, 2014). O amido é o carboidrato mais comum na dieta humana e está contido em muitos alimentos básicos.

O amido puro é um pó branco, insípido e inodoro, insolúvel em água fria ou álcool. É constituído por dois tipos de moléculas: a amilose linear e helicoidal e a amilopectina ramificada. Dependendo da planta, o amido geralmente contém 20 a 25 % de amilose e 75 a 80 % de amilopectina em massa (BROWN & POON, 2005). No Brasil, segundo a Associação Brasileira dos Produtores de Amido (ABAM), foram produzidos, em 2015, cerca de 750 mil toneladas de amido.

Industrialmente o amido pode ser convertido em açúcares, por exemplo, pela maltagem, e fermentado para a produção de etanol na fabricação de cerveja, uísque e biocombustíveis. Pode ser processado para produzir diversos açúcares usados em alimentos processados. Como aditivo para o processamento de alimentos, os amidos são normalmente usados como espessantes e estabilizantes de emulsão em alimentos como pudins, cremes, sopas, molhos, molhos, recheios de tortas e molhos para salada, e para fazer macarrão e massas. O maior uso industrial não alimentar do amido é como adesivo no processo de fabricação de papel. A solução de amido pode ser aplicada a certos produtos têxteis para endurecê-los. Os adesivos de papelão ondulado são a segunda maior aplicação de amidos não alimentícios em todo o mundo.

### **Uso do amido como bioplástico**

Devido às suas características promissoras, o amido continua sendo um dos polissacarídeos mais estudado no desenvolvimento de embalagens e o grande desafio é adaptar o processo de produção às suas limitações. Em geral, a natureza hidrofílica e semicristalina do amido dificulta o seu processamento via extrusão, ou seja, é um material muito mais susceptível a alterações de umidade e temperatura, e com maior rigidez estrutural que um polímero sintético convencional. (VILPOUX & AVÉROUS, 2003). Plastificantes, como glicerol, glicol e sorbitol, podem ser adicionados nas formulações para facilitar o processamento do amido (LIU et al., 2009). As características do bioplástico resultante (amido termoplástico) podem ser adaptadas às necessidades específicas, ajustando as quantidades dos aditivos. Técnicas convencionais de processamento de polímero podem ser usadas para processar amido em bioplásticos (LIU et al., 2009).

As propriedades estruturais finais dos filmes à base de amido dependem de vários fatores, tais como: a fonte de amido; a proporção de amilose/amilopectina; o grau de cristalinidade; as interações entre o amido e os plastificantes utilizados; o método de processamento utilizado para o desenvolvimento dos filmes, entre outros. Nanocompósitos à base de amido têm sido amplamente estudados, mostrando propriedades mecânicas aprimoradas, estabilidade térmica, resistência à umidade e baixa permeabilidade gasosa.

O amido é uma das matérias-primas renováveis com elevado potencial para produzir espumas biodegradáveis alternativas ao poliestireno sintético usado para fabricação do EPS. As embalagens flexíveis de amido são responsáveis por cerca de metade do mercado de plásticos deste material. As principais vantagens do uso de amido são a biodegradabilidade, ampla disponibilidade, além de ser um recurso natural renovável e não tóxico. Entretanto, as espumas à base de amido possuem maior fragilidade e menor flexibilidade do que as de EPS, porém, segundo Machado (2016), aditivos de diversas fontes, como resíduos agroindustriais, estão sendo estudados e já demonstram que podem ser utilizados para melhorar as características das espumas biopoliméricas de amido, podendo, assim, este material ser uma alternativa as espumas convencionais sintéticas.

#### **2.5.2 Quitosana**

Quitosana é um polissacarídeo linear solúvel em meios aquosos levemente ácidos composto de D-glucosamina  $\beta$ -ligada distribuída aleatoriamente (unidade desacetilada) e N-acetil-D-glucosamina (unidade acetilada), sendo biocompatível e biodegradável. A quitosana é produzida comercialmente pela desacetilação da quitina, que é o elemento estrutural do exoesqueleto de crustáceos e das paredes celulares dos fungos (LEE et al., 2013; LIM et al.,

2015). Os grupos amina livres nas cadeias de quitosana podem formar redes poliméricas reticuladas com ácidos dicarboxílicos para melhorar as propriedades mecânicas de materiais à base de quitosana (MOGHADAS et al., 2020).

A contaminação microbiana de produtos alimentícios acelera o processo de deterioração e aumenta o risco de doenças transmitidas por alimentos causadas por patógenos potencialmente fatais. Desta forma, filmes biodegradáveis à base de quitosana têm potencial para preservar vários produtos alimentícios, visto que possui propriedades antimicrobianas, preservando a firmeza e restringindo a perda de massa devido à desidratação. Além disso, filmes compostos biodegradáveis contendo quitosana e outros agentes antimicrobianos estão em desenvolvimento sendo considerados como materiais alternativos seguros para preservar diversos produtos alimentícios (AL-TAYYAR et al., 2020).

### 2.5.3 Celulose

A celulose é um composto orgânico com a fórmula  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , um polissacarídeo que consiste em uma cadeia linear de várias centenas a muitos milhares de unidades  $\beta$  ligadas de D-glicose (UPDEGRAFF, 1969). A celulose é um importante componente estrutural da parede celular primária de plantas verdes e muitas formas de algas (Romeo, 2008). A celulose é o polímero orgânico mais abundante na Terra (KLEMM et al., 2005).

Segundo Tajeddin (2014), a celulose é resistente a bases fortes (17,5 % em massa), mas é facilmente hidrolisada por ácidos em açúcares solúveis em água. A celulose é relativamente resistente aos agentes oxigenantes. Ainda segundo Tajeddin (2014), a hemicelulose é muito hidrofílica e solúvel em álcali e facilmente hidrolisada em ácidos. A lignina não é hidrolisada por ácidos, mas solúvel em álcali quente, facilmente oxidada e facilmente condensável com fenol.

Tajeddin (2014) ainda complementa que a celulose não é plástica em sua forma nativa, mas pode ser convertida em material plástico por meio de várias abordagens. A celulose de árvores e plantas é um substituto dos estoques de petróleo para a fabricação de plásticos celulósicos. Como os filmes de celulose não revestidos são altamente permeáveis ao vapor de água, eles são usados para embalar alimentos que não requerem uma barreira completa de umidade ou gás. Todos os filmes de celulose são resistentes ao calor, passíveis de deslignificação por calor, usáveis e permitem a impressão de rótulos e outras marcações.

### 2.5.4 Poli(ácido láctico)

O poli(ácido láctico), também conhecido como ácido polilático ou PLA é um poliéster termoplástico com fórmula de base  $(C_3H_4O_2)_n$  normalmente obtido por condensação do ácido láctico  $-C(CH_3)(OH)HCOOH$  com perda de moléculas de água. Também pode ser preparado por polimerização de abertura de anel de lactídeo  $-[C(CH_3)HC(=O)O-]$ , o dímero cíclico da unidade básica de repetição.

O PLA tem ganhado popularidade devido ao fato de ser produzido a partir de recursos renováveis. Segundo Lucintel (2020), o mercado mundial de PLA foi de 1,7 bilhão de dólares em 2019, com previsão de crescimento para 5,4 bilhões até 2025. Sua ampla aplicação tem sido prejudicada por inúmeras deficiências físicas e de processamento (NAGARAJAN et al., 2016).

Os polímeros de PLA variam de polímero vítreo amorfo a polímero semicristalino e altamente cristalino com uma transição vítrea de 60-65 °C, uma temperatura de fusão de 130-

180 °C e um módulo de Young de 2,7-16 GPa (SODERGARD E STOLT, 2002). O PLA resistente ao calor pode suportar temperaturas de 110 °C (FIORE et al., 2010).

Segundo Auras et al. (2004), o PLA está sendo usado como um polímero de embalagem de alimentos para produtos de curta duração com aplicações comuns, como recipientes, copos, filmes de invólucro e laminação e embalagens blister. Além disso, novas aplicações incluem recipientes de PLA termoformados sendo usado em mercados de varejo para frutas e vegetais frescos.

## **2.6 Espumas biopoliméricas para embalagens de alimentos**

Segundo Mali (2018), citado por Pachori et al. (2019), devido ao grande número de efeitos negativos das espumas à base de petróleo no meio ambiente, tentativas estão sendo feitas no desenvolvimento de espumas biodegradáveis. Essas espumas de fontes renováveis oferecem soluções para diversos problemas ecológicos, como a quantidade de resíduos e o descarte de resíduos. Os atributos de biodegradabilidade e compostabilidade são preferidos devido aos elevados custos associados à reciclagem. As fontes agrícolas podem ser usadas como matérias-primas alternativas. Os compostos também podem servir como fertilizantes e condicionadores de solo.

### *2.6.1 Caracterização das espumas biopoliméricas: avaliação das propriedades mecânicas, capacidade de absorção de água e densidade aparente*

A partir da análise das propriedades mecânicas de tração, compressão ou flexão podem ser obtidos valores de tensão na ruptura, alongação, e módulo de Young para cada amostra analisada. Esses parâmetros relacionam as propriedades mecânicas dos materiais com as suas estruturas químicas e dependem fortemente da composição do filme.

Tensão de ruptura ou resistência à tração é definida como a "resistência à tensão longitudinal, medida pela maior carga em massa por unidade de área puxando na direção do comprimento que uma determinada substância pode suportar sem se rasgar" (adaptado de KIRKHAM, 2014). Esta propriedade é definida como uma tensão, que é medida como força por unidade de área. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade é o Pascal (Pa)

O módulo de Young é uma propriedade mecânica que mede a rigidez à tração ou à compressão de um material sólido quando a força é aplicada longitudinalmente. Ele quantifica a relação entre tensão de tração/compressão (força por unidade de área) e deformação axial (deformação proporcional) na região elástica linear de um material. Um material sólido sofrerá deformação elástica quando uma pequena carga for aplicada a ele em compressão ou extensão. A deformação elástica é reversível, o que significa que o material retorna à sua forma original após a remoção da carga, sendo caracterizada pela região linear da curva de tensão-deformação. A relação de proporcionalidade entre a tensão e a deformação dos materiais pode ser descrita pela lei de Hooke. O coeficiente de proporcionalidade é o módulo de Young, também denominado módulo de elasticidade. Quanto maior o valor do módulo de Young, maior é a tensão necessária para atingir o mesmo percentual de deformação.

O percentual de alongamento na ruptura, também conhecido como tensão de fratura, é a razão entre o comprimento alterado e o comprimento inicial após a quebra do corpo de prova. Expressa a capacidade do material de resistir às mudanças de forma sem que ocorra o aparecimento de rachaduras (adaptado de PETROUDY, 2017).

A densidade aparente é um dos principais parâmetros que afeta o comportamento das espumas. Geralmente, a dependência é avaliada em termos do valor relativo de um parâmetro específico, por exemplo, o módulo de elasticidade ou a resistência ao escoamento, em relação à densidade relativa, razão entre a densidade da espuma e a densidade do material sólido (adaptado de AVALLE & SCATTINA, 2014). A densidade aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ) pode ser determinada a partir da relação entre a massa (g) e o volume ( $\text{cm}^3$ ) das amostras. É um parâmetro diretamente proporcional a quantidade de espaços vazios no interior das espumas, intrinsecamente relacionado com a porosidade das amostras.

Segundo Li & Ren (2011), a absorção de água refere-se à capacidade do material de absorver água quando imerso nela e é representada pela capacidade de absorção de água. A capacidade de absorção de água é definida como a relação entre a massa de água absorvida por um material no estado saturado e a massa do material seco. Em geral, materiais com menores índices de densidade aparente apresentam propriedades higroscópicas mais fortes. Os autores complementam que a capacidade de absorção de água está relacionada às propriedades do material, principalmente à sua porosidade e às características dos poros.

Para caracterização das propriedades das espumas biopoliméricas, tais características fazem-se importantes, especialmente para determinação do tipo de aplicação do material desenvolvido. Visto que, dependendo do objetivo, algumas características são mais relevantes em relação à outras. Analisar e comparar estas propriedades para os materiais fabricados é essencial para a consolidação de tecnologias de produção de espumas biopoliméricas e produtos biodegradáveis para aplicação em diferentes áreas.

### 3 Materiais e Métodos

Neste capítulo será descrita a metodologia de busca e seleção dos artigos que foram usados como objeto de estudo, além da busca de empresas brasileiras que fabricam e/ou comercializam espumas biopoliméricas para aplicação no setor de embalagens para alimentos e sorção de poluentes.

O trabalho consistiu, primeiramente, em pesquisar e selecionar artigos de espumas biopoliméricas para utilização nos setores de embalagens para alimentos e sorção de poluentes. Em seguida, a partir dos artigos selecionados, foi realizada uma avaliação de parâmetros de interesse (biopolímero utilizado, técnica de processamento, entre outros), assim como dos resultados apresentados (análise de propriedades mecânicas, capacidade de absorção de água, dentre outros). Neste trabalho também foi realizada uma análise estatística para comparação dos resultados dos artigos selecionados, quando possível.

Apesar dos artigos selecionados representarem um resultado do trabalho, optou-se por apresentá-los na seção de Materiais e Métodos, uma vez que representam o objeto da análise.

#### 3.1 Seleção de artigos sobre espumas biopoliméricas para aplicação no setor de embalagem para alimentos

A pesquisa de artigos sobre espumas biopoliméricas para embalagens foi limitada aos termos "*Biopolymer foam packaging food*" nos reconhecidos websites científicos Science Direct, Google Scholar e Scopus, focando em artigos científicos publicados entre os anos de 2015 e 2021. As pesquisas foram realizadas por ordem de relevância no dia 12 de agosto de 2021. Foram encontrados 733 artigos publicados no Science Direct, 7180 no Google Scholar e 5 no Scopus.

A partir desses resultados, foram selecionados os artigos que melhor representam o objetivo do trabalho no Science Direct e Google Scholar. Após análise minuciosa foram escolhidos 15 trabalhos para realizar a revisão sistemática. A seleção dos artigos levou em consideração a apresentação de dados e análises desejadas para a realização do presente trabalho. Os artigos selecionados, título, país de origem da publicação, periódico e seu código de identificação estão descritos na Tabela 2.

Nota-se que do total de 15 trabalhos, 3 são artigos de revisão (AL-2, AL-5 e AL-14), utilizados para fundamentação teórica e embasamento. Os artigos foram divididos em grupos conforme o biopolímero utilizado; a fonte do biopolímero; se os autores testaram alguma aplicação ou apenas sugeriram; quanto ao uso ou não de plastificante e quanto ao método de produção das espumas. As propriedades mecânicas apresentadas para as espumas foram avaliadas por análise de componentes principais, considerando a adição de resíduos, a aplicação de revestimentos e outras comparações.

**Tabela 2:** Artigos selecionados para o tópico espumas biopoliméricas para alimentos

<b>Código</b>	<b>Título</b>	<b>País de Origem</b>	<b>Periódico</b>	<b>Referência</b>
AL-1	How are the properties of biocomposite foams influenced by the substitution of cassava starch for its residual sources?	Brasil	Food Hydrocolloids	Engel et al., 2021
Al-2	Formulation of secondary compounds as additives of biopolymer-based food packaging: A review	Alemanha-Itália	Trends in Food Science & Technology	Moeini et al., 2021
Al-3	Development of biodegradable starch-based foams incorporated with grapestalks for food packaging	Brasil	Carbohydrate Polymers	Engel et al., 2019
Al-4	Gelatin-TiO <sub>2</sub> -coated expanded polyethylene foam nets as ethylene scavengers for fruit postharvest application	Brasil	Postharvest Biology and Technology	Fonseca et al., 2021
Al-5	Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry	China-Estados Unidos da América	Food Packaging and Shelf Life	Cheng et al., 2021
Al-6	Preparation and foaming behavior of poly (lactic acid)/poly (butylene succinate)/cellulose fiber composite for hot cups packaging application	Tailândia	International Journal of Biological Macromolecules	Vorawongsagul et al., 2021
Al-7	Study of interactions between cassava starch and peanut skin on biodegradable foams	Brasil	Industrial Crops and Products	Machado et al., 2020
Al-8	Sesame cake incorporation on cassava starch foams for packaging use	Brasil	Food Packaging and Shelf Life	Machado et al., 2017
Al-9	Carvacrol activated biopolymeric foam: An effective packaging system to control the development of spoilage and pathogenic bacteria on sliced pumpkin and melon	Itália	International Journal of Biological Macromolecules	Gaglio et al., 2021
Al-10	Novel composite foam made from starch and water hyacinth with beeswax coating for food packaging applications	Tailândia	International Journal of Biological Macromolecules	Chaireh et al., 2020
Al-11	Thermal, mechanical and viscoelastic properties of citric acid-crosslinked starch/cellulose composite foams	Nova Zelândia	Carbohydrate Polymers	Hassan et al., 2020
Al-12	Bioactive Andean sweet potato starch-based foam incorporated with oregano or thyme essential oil	Brasil-Peru	Food Packaging and Shelf Life	Tirado et al., 2020
Al-13	Comparative study of the influence of chitosan as coating of thermoplastic starch foam from potato, cassava and corn starch	Brasil	Progress in Organic Coatings	Bergel et al., 2017
Al-14	Synthesis Methods of Starch-Based Polymer Foams and Its Comparison With Conventional Polymer Foams for Food Packaging Applications	India	Polymers for Agri-Food Applications	Pachori et al., 2019
Al-15	Effect of poly(lactic acid) coating on mechanical and physical properties of thermoplastic starch foams from potato starch	Brasil	Progress in Organic Coatings	Bergel et al., 2018

### **3.2 Seleção de artigos sobre espumas biopoliméricas para aplicação como sorvente de poluentes aquáticos**

Os artigos que tratam de espumas biopoliméricas para uso em adsorção foram pesquisados utilizando os termos “*Biopolymer foam adsorbent*” nos agregadores científicos Science Direct, Google Scholar e Scopus, limitando para artigos científicos publicados entre 2015 a 2021, por ordem de relevância. As pesquisas foram realizadas no dia 12 de agosto de 2021. Foram encontrados 427 artigos publicados no Science Direct, 4180 no Google Scholar e 4 no Scopus.

Assim como no caso para espumas biopoliméricas para embalagens de alimentos, foram selecionados os artigos que mais condiziam com o objetivo do trabalho. Com isso, foram pré-selecionados 29 artigos. Após análise minuciosa, foram, finalmente, escolhidos 13 trabalhos para análise a revisão sistemática. A seleção dos artigos levou em consideração a apresentação de dados e análises desejados para a realização do presente trabalho. Os artigos selecionados, título, país de origem dos autores, periódico e seu código de identificação estão apresentados na Tabela 3.

Nota-se que dos 13 trabalhos selecionados, quatro (S-3, S-5, S-10 e S-12) são artigos de revisão, utilizados para embasamento teórico e revisão bibliográfica. Em seguida, os artigos foram avaliados de acordo com o tipo de biopolímero utilizado; em relação ao uso e tipo de plastificante; em relação ao método de produção; o contaminante que foi estudado e o ambiente que foi recuperado pelo processo de sorção. Para estes artigos, visto que todos fizeram aplicações práticas para as espumas, foram analisadas as eficiências de sorção das espumas.

**Tabela 3:** Artigos selecionados para o tópico espumas biopoliméricas para sorção

<b>Código</b>	<b>Título</b>	<b>País de Origem</b>	<b>Periódico</b>	<b>Referência</b>
S-1	Biopolymer foam for remediation of aquatic environments contaminated with particulates and heavy metals	Brasil	Journal of Environmental Chemical Engineering	Ellendersen et al., 2018
S-2	Biopolymers in sorbent-based microextraction methods	Alemanha-Espanha-Itália	TrAC Trends in Analytical Chemistry	Pacheco-Fernández et al., 2020
S-3	Biopolymer composite from cellulose nanocrystals of almond ( <i>Prunus dulcis</i> ) shell as effective adsorbents for Cu <sup>2+</sup> ions from aqueous solutions	Espanha-Tunísia	Journal of Environmental Chemical Engineering	Maaloul et al., 2021
S-4	Latest developments in wastewater treatment and biopolymer production by microalgae	Estados Unidos da América - Itália	Journal of Environmental Chemical Engineering	Lutzu et al., 2021
S-5	Remediation of heavy hydrocarbon impacted soil using biopolymer and polystyrene foam beads	Estados Unidos da América	Jornal of Hazardous Materials	Wilton et al., 2018
S-6	Adsorption of aquaculture pollutants using a sustainable biopolymer	Brasil	Environmental Science and Pollution Research	Zadineo et al., 2018
S-7	Recovery potential of biopolymer (B-P) formulation from <i>Solanum tuberosum</i> (waste) starch for enhancing recovery from oil reservoirs	Nigeria	Energy Reports	Olabode et al., 2020
S-8	Development of Spirulina/chitosan foam adsorbent for phenol adsorption	Brasil	Journal of Molecular Liquids	Alves et al., 2020
S-9	Recent advances in the polyurethane-based adsorbents for the decontamination of hazardous wastewater pollutants	África do Sul – Índia - Zimbábue	Journal of Hazardous Materials	Selvasembian et al., 2021
S-10	3D porous bioadsorbents based on chitosan/alginate/cellulose nanofibers as efficient and recyclable adsorbents of anionic dye	Irã	Carbohydrate Polymers	Mokhtari et al., 2021
S-11	Recent advances in heavy metal removal by chitosan based adsorbents	Índia	Carbohydrate Polymers	Upadhyay et al., 2021
S-12	Macroporous ion-imprinted chitosan foams for the selective biosorption of U(VI) from aqueous solution	Austrália - China	International Journal of Biological Macromolecules	Dai et al., 2020
S-13	Mechanically robust, solar-driven, and degradable lignin-based polyurethane adsorbent for efficient crude oil spill remediation	Canadá - China	Chemical Engineering Journal	Ma et al., 2021

### 3.3 Análise de componentes principais

A análise de componentes principais é uma técnica estatística multivariada que consiste em transformar um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de variáveis de mesma dimensão denominadas de componentes principais. Os componentes principais apresentam propriedades importantes: cada componente principal é uma combinação linear de todas as variáveis originais, são independentes entre si e estimados com o propósito de reter, em ordem de estimação, o máximo de informação, em termos da variação total contida nos dados. A análise de componentes principais é associada à ideia de redução de massa de dados, com menor perda possível da informação. A análise agrupa os indivíduos de acordo com sua variação em diferentes quadrantes de um círculo plano, isto é, os indivíduos são agrupados segundo suas variâncias, ou seja, de acordo com seu comportamento dentro da população, representado pela variação do conjunto de características que define o indivíduo, ou seja, a técnica agrupa os indivíduos de uma população segundo a variação de suas características (VARELLA, 2008).

A análise de componentes principais foi realizada utilizando o software Statistica, a fim de realizar uma avaliação comparativa dos resultados obtidos pelos artigos sobre espumas biopoliméricas utilizadas no setor de embalagens para alimentos. Para tanto, os artigos foram divididos em grupos conforme o biopolímero utilizado, o uso de óleo como aditivo e o uso de revestimento. Também foi analisado o artigo AL-10, que já apresentava em sua discussão os dados comparativos das propriedades de interesse coletados a partir de artigos publicados por diferentes pesquisadores sobre o assunto. Foram analisadas as propriedades mecânicas das espumas (tensão de ruptura, percentual de alongação, e módulo de elasticidade ou módulo de Young), a capacidade de absorção de água (CAA) e a densidade aparente das espumas.

### 3.4 Pesquisa de mercado: empresas do setor de embalagens e de materiais sorventes

#### 3.4.1 *Empresas brasileiras que comercializam espumas biopoliméricas para a indústria de embalagens de alimentos*

Foram realizadas buscas para encontrar empresas que fabricam e/ou comercializam espumas biopoliméricas destinadas ao setor de embalagens de alimentos, com o objetivo de analisar a atual situação do mercado desse tipo de produto. Os preços de venda desses materiais biodegradáveis foram usados para fins de comparação com produtos convencionais equivalentes, produzidos a partir de fontes fósseis, em especial produtos de poliestireno.

O enfoque dessa pesquisa de mercado foi em empresas brasileiras que trabalham com diversos produtos (copos, bandejas, marmitas, entre outros). A pesquisa foi realizada usando o seguinte conjunto de palavras-chave “embalagens de biopolímeros” no site de busca Google, selecionando as empresas que fabricam e/ou comercializam espumas biopoliméricas e que disponibilizam o preço de venda de seus produtos.

#### 3.4.2 *Espumas biopoliméricas comerciais para sorção de poluentes*

Foram realizadas pesquisas objetivando elencar empresas que comercializam espumas biopoliméricas para sorção de poluentes, para análise desse mercado. Porém, neste caso, não foram localizadas empresas que trabalham com a comercialização de materiais biodegradáveis para este objetivo, tanto usando termos em português quanto em inglês.

## 4 Resultados e Discussão

Inicialmente foram analisados os artigos com foco em embalagens para alimentos, na sequência os artigos com foco em sorção de poluentes, também foi realizada uma análise comparativa entre as espumas para estes dois usos. Além disso, estão apresentadas as empresas que utilizam espumas biopoliméricas para embalagens de alimentos e as empresas que trabalham com a aplicação de espumas à base de polipropileno para sorção de alguns poluentes específicos.

### 4.1 Resultados de artigos de espumas biopoliméricas para embalagens de alimentos

Primeiramente foram feitas divisões dos artigos em grupos conforme algumas características, para facilitar e viabilizar as análises entre os dados apresentados nestes artigos, evitando falsas comparações.

#### 4.1.1 Discussão dos resultados relacionados ao biopolímero utilizado

Primeiramente foi realizada uma subdivisão em relação à matéria-prima empregada pelos autores, permitindo analisar o biopolímero que está sendo mais utilizado nas atuais pesquisas para esse tipo de embalagem. Na Tabela 4 estão apresentados os artigos, seu grupo em relação ao tipo de polímero utilizado, assim como a fonte específica de amido para os trabalhos que utilizaram esse biopolímero. Vale ressaltar que alguns artigos aparecem em mais de um grupo devido ao fato que no artigo em questão é utilizado mais de um polímero para análise. O percentual relativo de utilização de cada material também está apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4:** Divisão dos artigos de espumas de embalagens de alimentos em relação à matéria-prima utilizada, a fonte de amido, e o percentual relativo de utilização de cada tipo de biopolímero.

Grupo	Código dos artigos	Polímero utilizado	Fonte de amido	% de ocorrência
AL-A	AL-1 AL-7 AL-9 AL-15	AL-3 AL-8 AL-10	Mandioca	65
	AL-5		Milho, Batata, Trigo	
	AL-11		Batata	
	AL-12		Batata-Doce	
	AL-13		Mandioca, Milho, Batata	
AL-B	AL-6	AL-11	Celulose	12
AL-C	AL-4		Polietileno	8
	AL-6		PLA/PBS	8
	AL-13		Quitosana	8

Como pode ser observado, 65 % dos artigos produziram embalagens biopoliméricas a partir de amido. Esse resultado é devido ao fato que essa matéria-prima tem a capacidade de expandir quando submetida a elevadas temperaturas em presença de água. Além disso, o

amido é abundante, facilmente obtido em comparação a outros biopolímeros, o que reduz os custos de produção e torna esse material desejável para aplicações industriais.

É possível notar que mais da metade dos artigos em que o amido é utilizado como matéria-prima, fez uso do amido de mandioca, representando aproximadamente 53 % do total, seguido pelos artigos que fazem uso do amido de batata (20 %), milho (13 %), batata-doce (7 %) e trigo (7 %). É importante ressaltar que do total dos 8 artigos em que foi utilizado amido de mandioca, 6 são publicações de grupos de pesquisa do Brasil. Esse resultado pode ser explicado pela abundância de mandioca que existe no país, além do baixo custo desse amido em comparação com outras fontes.

#### 4.1.2 *Divisão dos artigos em relação à realização de teste de aplicação da embalagem*

Os artigos foram divididos conforme a realização de testes práticos de aplicabilidade das embalagens, levando em consideração se os autores realizaram um teste de aplicação, ou apenas sugeriram qual seria a aplicação mais adequada a partir dos resultados encontrados. Com isso, foram obtidos dois grupos, aquele em que os artigos realizaram a aplicação e aquele em que os artigos apenas sugeriram a aplicação, mas não realizaram o teste prático. No primeiro grupo, nomeado AL-ApS, estão os artigos AL-3 (bolo inglês), AL-4 (mamão) e AL-9 (melão e abóbora), contabilizando 27 % de todos os artigos, enquanto no segundo grupo, nomeado AL-ApN, estão os demais artigos, contabilizando 73 %.

Esse resultado demonstra que houve um pequeno número de artigos em que foram apresentados testes de aplicação das embalagens com produtos alimentícios. A maioria dos autores apenas sugeriu uma aplicação. Um dos principais fatores para a análise destas embalagens no setor industrial consiste na realização de testes de aplicabilidade, pois além das propriedades físico-químicas, mecânicas, térmicas e morfológicas que a embalagem possui, é necessário conhecer seu comportamento nos testes práticos.

#### 4.1.3 *Divisão dos artigos em relação ao uso de plastificante*

O uso de plastificantes altera as propriedades mecânicas do material, tornando-o, em geral, mais flexível, reduzindo a viscosidade e tensões de fricção. Esses efeitos são consideravelmente interessantes para o setor de embalagens, pois facilita o processo de moldagem, evitando quebras. Por isso é importante analisar se as embalagens desenvolvidas nos artigos possuem plastificante nas formulações, assim como seu efeito no produto final. Com isto em mente, os artigos foram divididos em dois grupos, no primeiro grupo, nomeado AL-PIS, estão presentes os artigos em que foi utilizado plastificante na composição da embalagem, contabilizando 85 % do total, e no segundo grupo, nomeado AL-PIN, para os artigos em que não foi utilizado plastificante, contabilizando 15 %. Estão presentes no primeiro grupo os artigos AL-1, AL-3, AL-4, AL-5, AL-7, A-8, AL-9, AL-10, AL-12, AL-13 e AL-15, enquanto no segundo grupo estão presentes os demais artigos. Observa-se que o uso de plastificante é predominante entre os artigos devido ao que foi comentado anteriormente em relação à necessidade de produzir embalagens flexíveis, além de outras propriedades que o plastificante pode alterar.

Devido ao termo plastificante ser genérico para vários compostos químicos, considerou-se importante especificar quais plastificantes foram utilizados em cada artigo. O glicerol foi utilizado como plastificante nos artigos AL-3, AL-4, AL-7, AL-8, AL-10, AL-12, AL-13 e AL-15), contabilizando 73 % dos artigos, enquanto no artigo AL-1 foi utilizado sorbitol, no artigo AL-7 água e no artigo AL-9 carvacrol, contabilizando 9 % para cada um. É importante ressaltar que

o carvacrol foi utilizado inicialmente como um aditivo, no entanto, a partir das análises realizadas, os pesquisadores verificaram que ele também funciona como um plastificante. Não foi utilizado outro plastificante neste artigo.

Nota-se que o glicerol é o mais utilizado dentre os plastificantes, uma vez que esse reagente é abundante e de fácil obtenção – um subproduto do processo de transesterificação é a produção de glicerol (glicerina). Para cada 1 tonelada de biodiesel que é fabricado, 100 kg de glicerol são produzidos. Além disso, o glicerol é um produto considerado de grau alimentício, o que não gera complicações adicionais para uso no setor de embalagem de alimentos.

#### 4.1.4 Divisão dos artigos em relação ao método de fabricação das embalagens

Os artigos também foram subdivididos em relação ao método de produção utilizado, visando elencar diferentes tecnologias de fabricação de embalagens, assim como destacar qual método é mais utilizado entre as pesquisas que estão desenvolvendo estes materiais biodegradáveis do tipo espuma. As divisões em relação ao método de fabricação estão apresentadas na Tabela 5.

**Tabela 5:** Divisão dos artigos de espumas biopoliméricas para o setor de embalagens em relação ao método de produção e seu percentual relativo de ocorrência.

Grupo	Artigos	Método de produção	%	
AL-PD-1	AL-1	AL-3	Prensagem	77
	AL-7	AL-8		
	AL-9	AL-10		
	AL-11	AL-12		
	AL-13	AL-15		
AL-PD-2	AL-5	AL-6	Extrusão	15
AL-PD-3	AL-4		Imersão	8

Como pode ser observado nos resultados da Tabela 5, há um maior uso do método de prensagem, devido ao fato desse processo ser mais barato e prático em relação aos outros métodos. Essa metodologia é largamente utilizada no setor industrial para a fabricação de espumas poliméricas usadas como embalagens em geral.

## 4.2 Resultados dos artigos de espumas biopoliméricas para sorção

### 4.2.1 Discussão dos resultados relacionados ao biopolímero utilizado

Primeiramente foi realizada uma subdivisão em relação à matéria-prima, permitindo analisar o biopolímero que está sendo mais utilizado nas atuais pesquisas para a sorção de poluentes. Na Tabela 6 estão apresentados os artigos, seu grupo em relação ao tipo de polímero e o biopolímero utilizado. Sendo possível notar que alguns artigos aparecem em mais de um grupo devido ao fato que no artigo em questão os autores utilizaram mais de um polímero para análise. O percentual relativo de utilização de cada material também é apresentado na Tabela 6. Nota-se que a quitosana (42 %) é o polímero mais utilizado nestes artigos, provavelmente devido à sua elevada capacidade de adsorção de poluentes sem causar danos ambientais.

**Tabela 6:** Divisão dos artigos sobre espumas para sorção de poluentes da aquicultura em relação à matéria-prima utilizada e o percentual relativo de ocorrência de cada tipo de biopolímero.

Grupo	Artigos	Polímero	%
S-A	S-1	S-6	42
	S-8	S-10	
	S-11	S-12	
S-B	S-3	S-10	14
S-C	S-9	S-13	14
S-D	S-5	Mistura de proteínas e peptídeos	10
	S-7	Amido	10
	S-10	Alginato	10

#### 4.2.2 Discussão dos resultados relacionados ao uso de plastificante

Conforme foi realizado para os trabalhos relacionados ao uso de espumas biopoliméricas para aplicação como embalagem para alimentos, os artigos focados na utilização das espumas para sorção também foram divididos em relação ao uso de plastificante. Os artigos em que foi utilizado plastificante (S-7 e S-13), que fazem parte do grupo SP-1, representam 18 % do total de artigos, enquanto os artigos que não utilizam plastificantes (grupo SP-2) representam 82 %. Como pode ser visto, a maioria dos artigos não utilizou plastificante, pois, diferente das embalagens para alimentos, neste caso, não há uma necessidade de que as espumas biopoliméricas sorventes sejam mais flexíveis e mais facilmente moldáveis durante o processamento.

#### 4.2.3 Discussão dos resultados em relação ao método de produção da espuma

Os artigos foram subdivididos em relação ao método de produção utilizado, visando destacar qual método é mais utilizado pelos grupos de pesquisa que estão desenvolvendo espumas para sorção de poluentes, além de elencar diferentes tecnologias de fabricação de materiais para sorção. As divisões obtidas em reação ao método de fabricação estão apresentadas na Tabela 7.

O método de fabricação de materiais sorventes mais utilizado pelos autores é a liofilização. Essa metodologia possui elevado consumo energético uma vez que requer o uso de vácuo para remoção de água por sublimação, sendo considerada uma técnica mais cara e complexa do que outros tipos de processamento normalmente utilizados para fabricação de espumas, o que pode inviabilizar o uso comercial destas espumas. Além disto, 40 % dos artigos não informaram o método utilizado para a produção dos sorventes, dificultando a realização de estudos futuros focados na comercialização.

**Tabela 7:** Divisão dos artigos de sorção em relação ao método de produção da espuma e a porcentagem de ocorrência do método

Grupo	Artigo	Método de Produção da espuma	% de ocorrência
SM-1	S-3	S-8 S-12	Liofilização
	S-10		
SM-2	S-1	Aquecimento	10
SM-3	S-13	Sonicação	10
SM-4	S-5	S-7 S-11	Não Informado
	S-10		

#### 4.2.4 Discussão dos resultados em relação ao contaminante testado

Outro aspecto interessante para análise das espumas sorventes é o tipo de contaminante usado para os testes de sorção das espumas, uma vez que todos os artigos analisados (com exceção dos artigos de revisão) apresentaram resultados e testes de aplicabilidade práticos. Na Tabela 8 estão apresentados os resultados da análise do tipo de contaminante testado após realização de testes práticos de sorção em espumas biopoliméricas.

O principal foco dos artigos é na sorção de hidrocarbonetos/óleos, cada vez mais este tipo de contaminante é muito comum em corpos hídricos, e vem se tornando preocupante pelos efeitos nocivos causados ao meio ambiente. A utilização de espumas biodegradáveis produzidas a partir de fontes renováveis pode representar uma alternativa promissora para a remoção deste tipo poluente, assim como, pode contribuir para minimizar o uso de espumas sintéticas não biodegradáveis para esse tipo de aplicação. Metais pesados também representam sérios problemas ambientais e devem receber a devida importância tanto no setor acadêmico quanto no comercial.

**Tabela 8:** Divisão dos artigos de espumas biopoliméricas para sorção em relação ao contaminante testado e a porcentagem em relação ao contaminante sorvido.

Grupo	Artigos	Contaminante	% de ocorrência
SC-1	S-1	S-3	Metais Pesados
SC-2	S-5	S-7	Hidrocarbonetos/Óleo
	S-13		
SC-3	S-6	Poluentes da aquicultura	11
	S-8	Fenol	11
	S-10	Tintas	11
	S-12	Uranio VI	11

#### 4.2.5 Discussão dos artigos em relação ao ambiente recuperado

Os artigos também foram divididos em relação ao ambiente que foi recuperado com a aplicação das espumas sorventes. Os artigos em que a água foi recuperada compreendem: S-1, S-3, S-6, S-8, S-9, S-12 e S-13, fazendo parte do grupo SA-1, enquanto no artigo S-5 foram apresentados dados de recuperação do solo e no artigo S-7 dados relacionados a recuperação de reservatórios de óleo, estes dois fazem parte do grupo SA-2.

A preocupação com a qualidade da água cresce cada vez mais e a utilização de espumas biodegradáveis fabricadas a partir de matérias-primas renováveis para aplicação como material sorvente pode ser uma das soluções alternativas para recuperar águas contaminadas. Corpos hídricos, em geral, são ambientes de grande interesse para recuperação, visto que há

um aumento de poluentes emergentes, como também acidentes envolvendo derramamento de óleos e combustíveis.

### **4.3 Comparações entre artigos de espumas biopoliméricas para embalagens de alimentos e sorção**

Algumas comparações entre os artigos selecionados sobre espumas biopoliméricas foram realizadas visando analisar a situação das pesquisas relacionadas com as duas aplicações estudadas neste trabalho, embalagens para alimentos e sorção de poluentes.

#### *4.3.1 Comparação entre matéria-prima utilizada*

Os polímeros biodegradáveis provenientes de fontes renováveis mais utilizados para as espumas de embalagens de alimentos e para sorção de contaminantes foram o amido e a quitosana, respectivamente. Amido é mais utilizado para embalagens devido a sua abundância, baixo custo e propriedades mecânicas. Enquanto a quitosana é mais utilizada como material sorvente devido a sua elevada capacidade de sorver os poluentes, possivelmente decorrente do seu caráter hidrofóbico conferido pelo processo reticulação.

Nota-se que os objetivos da aplicabilidade das espumas são distintos, porém ambas podem ser fabricadas com biopolímeros, demonstrando a versatilidade e o elevado potencial das diferentes matérias-primas biodegradáveis comentadas neste trabalho.

#### *4.3.2 Comparação entre o uso de plastificante*

As espumas para embalagens utilizam, em sua grande maioria, plastificantes, enquanto as espumas para adsorção não utilizam. Resultados diretamente opostos devido ao uso destas espumas, as embalagens precisam ser plásticas, para evitar rupturas e facilitar o processo de moldagem. Já as espumas para adsorção não possuem esta necessidade, logo o uso de plastificante não se faz necessário, pois representaria apenas um custo adicional.

#### *4.3.3 Comparação entre o método de fabricação das espumas*

O método de produção mais utilizado para as espumas biopoliméricas para embalagens é a prensagem, enquanto para as espumas de adsorção é a liofilização. A prensagem, no geral, é o método mais utilizado industrialmente, além de ser relativamente barato. Enquanto a liofilização, processamento utilizado na maioria dos artigos de espumas para sorção que divulgaram o método de fabricação, pode representar um obstáculo para a comercialização desse material devido ao seu alto consumo energético, sendo considerada uma técnica mais cara para a produção de espumas.

## **4.4 Resultados da análise de componentes principais**

### *4.4.1 Análise de componentes principais das espumas biopoliméricas para aplicação como embalagem para alimentos*

Os artigos foram divididos em subgrupos e analisados conforme suas propriedades mecânicas, capacidade de absorção de água e densidade aparente.

### **Análise dos artigos de amido de mandioca com resíduos como aditivo**

Inicialmente, foram utilizados os resultados dos artigos AL-1, AL-3, AL-7 e AL-8, que versaram sobre o desenvolvimento de espumas biopoliméricas usando amido de mandioca como matéria-prima e aditivos provenientes de fontes residuais. Desta forma, foi possível

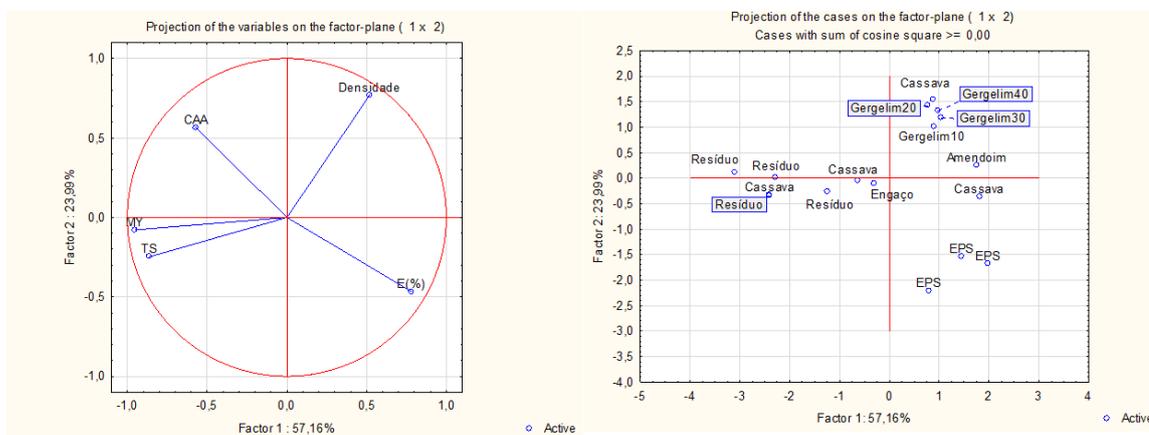
comparar as mudanças nas propriedades dos materiais finais causadas pela incorporação dos diferentes aditivos.

Foram feitas análises das propriedades mecânicas, densidade aparente e capacidade de absorção de água (CAA). A capacidade de absorção de água foi obtida por leitura nos gráficos fornecidos nos artigos no tempo de 30 minutos.

As amostras “EPS” se referem a amostras de poliestireno expandido comercial, utilizado nos artigos como material de referência. A palavra “Cassava” se refere às amostras de espuma contendo somente amido de mandioca. As palavras “Resíduo”, “Engaço”, “Amendoim” e “Gergelim” referem-se às amostras de espuma à base de amido de mandioca com adição de resíduos do processamento da mandioca, engaço da uva, casca de amendoim e torta de gergelim, respectivamente. O numeral após a palavra “Gergelim” representa a porcentagem em massa de utilização dessa fonte residual nas formulações das espumas. Os resultados da análise de componentes principais estão apresentados na Figura 4.

Os resultados mostraram que 81,15 % dos dados podem ser explicados a partir desta análise estatística. As espumas contendo resíduos de gergelim e amendoim apresentaram os maiores valores de densidade aparente, enquanto as espumas com incorporação de resíduo de mandioca tiveram os maiores valores de tensão de ruptura e módulo de elasticidade. Já para o percentual de alongação, os maiores valores estão com as amostras de EPS, resultado esperado, visto que estas amostras possuem maior flexibilidade do que as amostras de amido. As amostras de EPS obtiveram os menores valores de capacidade de absorção de água (CAA), visto que estão localizadas no quadrante oposto do gráfico.

Figura 4: Resultados da análise estatística de componentes principais para as espumas biopoliméricas à base de amido de mandioca com resíduos como aditivo.



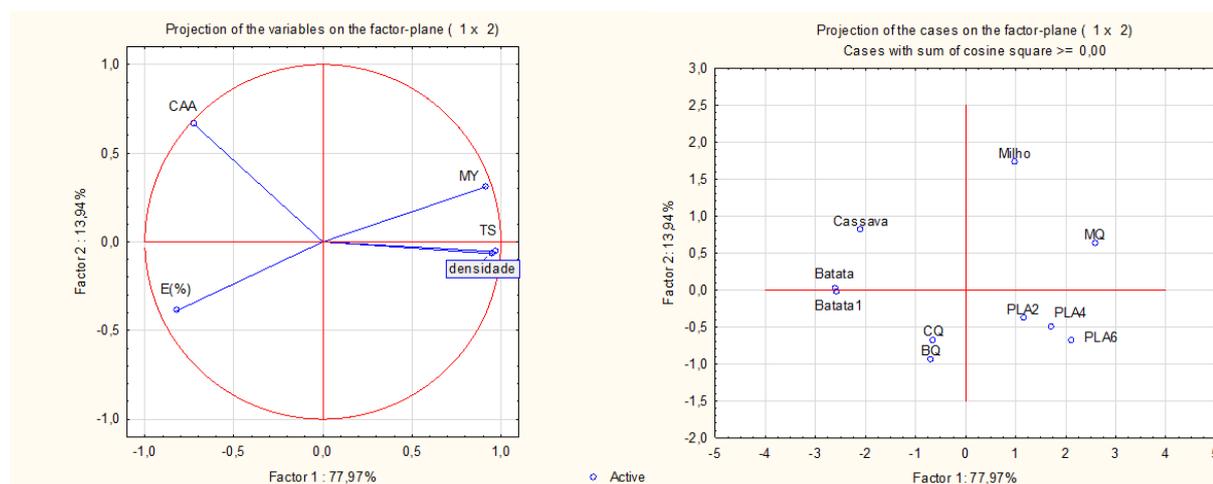
Em geral, as espumas que tiveram adição de algum resíduo apresentaram melhoras nas suas propriedades mecânicas (tensão de ruptura e módulo de elasticidade), sendo as espumas com adição de resíduo da mandioca as que obtiveram os melhores resultados de propriedades mecânicas, enquanto as espumas com adição de torta de gergelim apresentaram maiores valores de densidade aparente.

### **Análise dos artigos de espumas com revestimento**

Para a análise de componentes principais dos artigos em que foi utilizado algum tipo de revestimento nas espumas foram selecionados os artigos AL-13 e AL-15. Os resultados das análises de propriedades mecânicas, capacidade de absorção e água e densidade aparente para as amostras apresentadas nesses artigos foram avaliados.

As amostras “Batata”, “Cassava” (mandioca) e “Milho” referem-se às espumas à base de amido proveniente destas matérias-primas. As siglas “BQ”, “CQ” e “MQ” referem-se às espumas à base de amido de batata, mandioca e milho com revestimento de quitosana, respectivamente. As amostras “PLA2”, “PLA4” e “PLA6” referem-se às espumas de amido de batata com revestimento de poli(ácido lático), sendo que o numeral representa a concentração da solução usada para o revestimento da espuma. Os resultados estão apresentados na Figura 5.

Figura 5: Resultados da análise estatística de componentes principais para as espumas biopoliméricas produzidas a partir de diferentes fontes de amido a fim de avaliar a influência da utilização de revestimento.



Os resultados mostram que 91,91 % dos dados foram explicados a partir dessa análise estatística. Os resultados mostram que as espumas de amido de milho apresentaram maiores valores de tensão de ruptura, módulo de Young e densidade, independente da presença ou ausência de revestimento.

As espumas que tiveram a adição de um revestimento obtiveram um aumento em suas propriedades mecânicas, com destaque das espumas com revestimento de PLA, que obtiveram os maiores resultados para tensão de ruptura, já a espuma de amido de milho com quitosana obteve o maior resultado para o módulo de Young. As espumas de mandioca e batata com revestimento de quitosana tiveram os menores aumentos nestas propriedades.

Porém, todas as espumas com revestimento apresentaram redução na capacidade de absorção de água, o que pode ser considerado um resultado promissor para a aplicação dessas espumas no armazenamento de alimentos, visto que uma redução da capacidade de absorção de água pode prolongar o tempo de vida de prateleira do produto embalado.

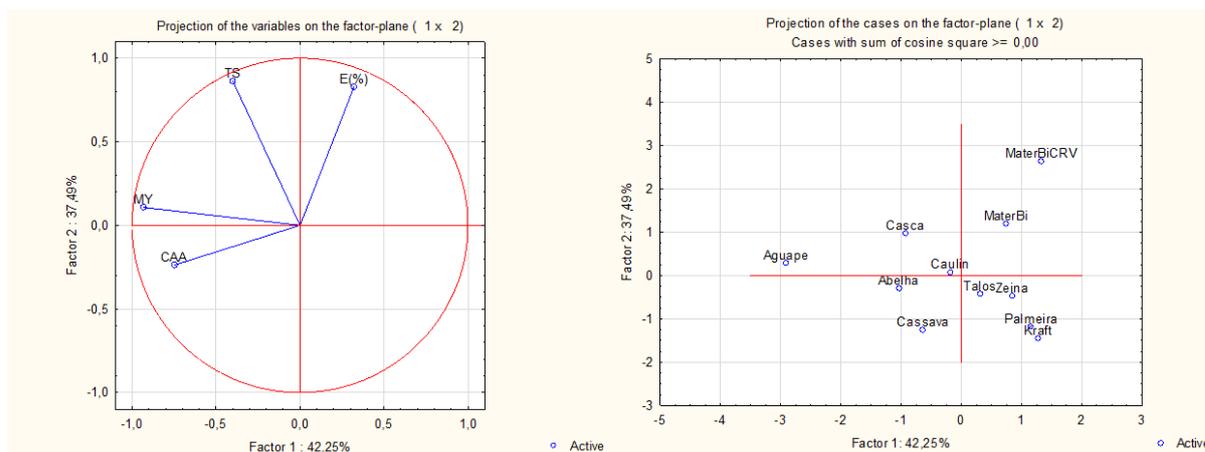
### **Análise das comparações do artigo AL-10 com o artigo AL-9**

Conforme mencionado, no artigo AL-10 já estão apresentadas comparações de propriedades mecânicas e capacidade de absorção de água com resultados apresentados em outros artigos, então é interessante fazer uma análise de componentes principais destes resultados. Além disso, foram adicionados os resultados do artigo AL-6.

As amostras “Materbi” e “MaterbiCRV” se referem à espuma biopolimérica MaterBi, produto da Novamont feito de amido, sendo o CRV referente a adição de carvacrol. As

amostras “Cassava”, “Aguapé”, “Zeína”, “Palmeira”, “Talos” e “Kraft” referem-se a amostras de espuma de amido de mandioca, sendo, respectivamente, espuma pura, espuma com adição de pó de aguapé, adição de óleo de zeína, adição de óleo de palmeira, adição de engaço de uva e adição de fibra de kraft. No caso da espuma de engaço de uva, os resultados provêm do artigo AL-3, que está neste trabalho. As amostras “Casca”, “Caulim” e “Abelha” referem-se a amostras de amido de milho com adição de casca de milho, caulim e cera de abelha, respectivamente. Os resultados da análise de componentes principais podem ser observados na Figura 6.

Figura 6: Resultados da análise estatística de componentes principais para os resultados comparativos entre espumas biopoliméricas de diversas fontes.



Nota-se que as espumas de amido de milho apresentaram os melhores resultados para módulo de Young e tensão de ruptura, sendo a espuma com adição de aguapé a que apresentou os melhores resultados no geral. Essa pode ser uma boa opção para plastificar as espumas de amido de mandioca, visto que o aguapé pode ser considerado um problema ambiental, pois quando há um crescimento exagerado da planta, ela causa a morte dos peixes e dificulta a navegação pelos rios. O uso de carvacrol aumenta as propriedades de alongamento da espuma, podendo ser utilizado em aplicações específicas.

#### **Análise de espumas com adição de óleos**

Também foi realizada a análise de componentes principais dos artigos AL-9 e AL-12, porém os resultados obtidos não são representativos, então optou-se por não utilizar estes resultados para comparação.

#### **4.5 Empresas que utilizam espumas biopoliméricas para embalagens de alimentos**

Foi realizada uma pesquisa para elencar as empresas que já trabalham com a fabricação e/ou comercialização de espumas biodegradáveis à base de materiais renováveis no Brasil. Algumas dessas empresas estão listadas na Tabela 9, assim como sua localização, as matérias-primas utilizadas e os diferentes produtos comercializados. A partir dessas informações foi possível realizar uma comparação entre o preço de venda unitário destes produtos em relação a produtos similares fabricados a partir de poliestireno, por exemplo. As informações relacionadas com esta comparação estão apresentadas na Tabela 10.

**Tabela 9:** Empresas que trabalham com espumas biopoliméricas para embalagens de alimentos.

<b>Empresa</b>	<b>Localização</b>	<b>Matérias Primas</b>	<b>Produtos</b>
Oka Biotecnologia	Botucatu – São Paulo – Brasil	Fécula de Mandioca	Copos, <i>bowls</i> , bandejas, capsulas e mini colher
Green Living Brasil	Instituto GENESIS – PUCRIO – Rua Marquês de São Vicente, 225 – sala 23 – Gávea – Rio de Janeiro – RJ – Brasil	Bagaço de cana, amido de milho	Copos, embalagem de <i>delivery</i> , <i>bowls</i> , caixas, potes, pratos
Terraw	Av. Campeche, 1235/Loja 01 – Florianópolis-SC – Brasil	Bagaço de cana, palha de trigo ou fontes certificadas FSC*	<i>Bowls</i> , marmitas, caixas, potes, pratos
eeCoo	Av. Fued Jose Sebba, N. 1527 – Jardim Goiás – Goiânia – GO – Brasil	Polpa vegetal de cana de açúcar, fibras de trigo, amido de milho	Copos, <i>bowls</i> , marmitas, bandejas, caixas, potes, pratos
Preserva Mundo	Rua Santos Dumont, 1292 Zona 03, Maringá – PR – Brasil	Amido de milho, fibra de bambu	Copos, <i>bowls</i> , bandejas
Melitta	Sede em Minden – Alemanha	Cana de açúcar	Capsulas de café

\*FSC refere-se à organização não governamental Forest Stewardship Council

**Tabela 10:** Comparação entre o preço unitário de espumas biopoliméricas comercializadas como diferentes tipos de produto (copos, marmitas, *bowl*s, bandejas, entre outros) em relação ao custo do produto convencional à base de poliestireno.

Produto	Preço unitário do produto biopolimérico (R\$)	Matéria-prima	Empresa	Preço unitário do produto de poliestireno (R\$)	Empresa	Diferença de preço (%)
Copo (50 mL)	0,59	Polpa vegetal de cana de açúcar e fibras de trigo	eeCoo	0,02	Verocopo	2850
Copo (150 mL)	0,66	Fécula de mandioca	Oka Bioembalagens	0,04	Copaza	1550
Copo (180 mL)	0,29	Amido de milho	Green Living	0,04	Coporeal	625
	0,39		eeCoo			875
	0,45		PreservaMundo			1025
Copo (240 mL)	0,60	Fibra de Bambu	Preserva Mundo	0,29	Totalplast	107
<i>Bowl</i> (360 mL)	2,14	Amido de milho	eeCoo	0,97	Total	201
<i>Bowl</i> (750 mL)	2,67	Bagaço de cana, palha de trigo ou fontes certificadas FSC	Terraw	0,45	Ultratherm	493
Marmitta (1 L)	2,68	Bagaço de Cana, Palha de Trigo ou Fontes certificadas FSC	Terraw	1,00	Sorpack	168
Bandeja (0,8 L)	4,50	Fécula de Mandioca	Oka Bioembalagens	0,11	Talante	3991
Bandeja (0,9 L)	1,34	Amido de milho	eeCoo			1118
	1,45		PreservaMundo			1218
Caixa (0,8 L)	2,10	Bagaço de cana	Green Living	0,58	Spumapack	262
com tampa	3,73	Amido de milho	eeCoo			543
Pote (500 mL)	2,65	Bagaço de cana, palha de trigo ou fontes certificadas FSC	Terraw	0,37	Plasul	616
	3,04	Polpa de cana de açúcar e fibras de trigo	eeCoo			722
Cápsulas de café	2,50	Amido	Melitta	1,37	Nescafé	45

Os resultados comparativos apresentados na Tabela 10 possibilitam comprovar que os produtos fabricados a partir de biopolímeros são mais caros que os produtos produzidos à base de poliestireno. Alguns produtos chegam a custar 30 vezes mais que os similares de poliestireno, limitando a produção para algo focado em um nicho sustentável mais específico de produtos, fato este que acaba sendo o maior obstáculo para a implementação desta tecnologia de modo universal. Visto que, em geral, as propriedades dos produtos de

biopolímeros podem ser similares aos convencionais de poliestireno, o elevado custo desses materiais ainda é uma significativa barreira a ser vencida para a expansão desta tecnologia.

#### 4.6 Empresas de espumas para sorção

Durante as pesquisas realizadas não foram encontradas empresas que comercializassem espumas biopoliméricas para sorção. No entanto, foram encontradas algumas empresas que trabalham com a aplicação de espumas à base de polipropileno para sorção de óleo e derivados. Informações relevantes sobre essas empresas estão apresentadas na Tabela 11.

**Tabela 11:** Empresas que usam espumas de polipropileno para adsorção de óleo e derivados.

Empresa	Produto	Dimensões (comprimento x largura x altura) (m)	Preço Unitário (R\$)	Preço por m <sup>2</sup> (R\$)
Net Suprimentos	Manta Absorvente	0,4 x 0,5 x 0,002	3,59	17,95
	Cordão	0,076 x 2,4	45,18	247,70
Eco Response	Manta Absorvente	0,4 x 0,5 x 0,002	1,85	9,25
Secanti Cargo	Cordão	0,076 x 1,2	22,95	251,64
Petro Poshe	Manta Absorvente	0,4 x 0,5 x 0,004	3,12	15,60
Wf EPI	Manta Absorvente	0,4 x 0,5	7,33	36,65
Lojas 360	Manta Absorvente	0,55 x 0,8	6,27	14,25
Brady	Manta Absorvente	0,4 x 0,5 x 0,004	2,86	14,30

Conforme pode ser observado na Tabela 11, o custo por metro quadrado (R\$/m<sup>2</sup>) das mantas variou entre R\$ 14,25 e 36,65, dependendo do vendedor. As espumas sorventes fabricadas a partir de materiais biopoliméricos podem representar uma alternativa sustentável aos produtos de origem sintética, porém para que isso se torne realidade é necessário que sua eficiência seja cientificamente comprovada e a sua viabilidade econômica deve ser avaliada. Desta forma, é importante destacar que este é um mercado com elevado potencial de crescimento, visto que os investimentos em tecnologias sustentáveis são oportunidades estratégicas para garantir o futuro das próximas gerações.

## 5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Neste trabalho, foram analisados 15 artigos relacionados com o desenvolvimento e caracterização de espumas biopoliméricas para aplicação como embalagem de alimentos, estatística e qualitativamente. Porém, como os artigos utilizaram diferentes matérias-primas para a formação das espumas, não foi possível realizar comparações diretas entre todos os resultados apresentados, visto que as propriedades dependem das formulações e materiais utilizados. Com isso, os artigos foram separados em grupos menores, permitindo assim a análise e discussão dos resultados.

Nota-se que, em geral, as espumas biopoliméricas para utilização na área de embalagens para alimentos apresentaram resultados bastante satisfatórios, tanto em relação as propriedades mecânicas, quanto em sua capacidade de absorção de água. Esses resultados indicam que as espumas à base de amido representam uma alternativa viável para uso em embalagens de alimentos, podendo, assim, contribuir para a minimização dos problemas ambientais gerados pelo descarte incorreto de espumas sintéticas. Porém, as espumas de amido apesar de possuírem maiores valores de tensão de ruptura e módulo de Young, possuem menores valores de alongamento, propriedade importante para a aplicação em embalagens de alimentos. Contudo, foi observado que a adição de componentes à espuma de amido pode melhorar essa propriedade.

A partir da análise das empresas que comercializam espumas biopoliméricas para embalagens de alimentos, notou-se que o maior empecilho comercial relacionado ao uso destas espumas atualmente é o seu custo, podendo ser até 30 vezes maior que o mesmo produto fabricado a partir de matérias-primas sintéticas. Maiores investimentos em pesquisas nessa área, seja no desenvolvimento de novas formulações ou na produção destas espumas, pode diminuir o custo destes produtos, podendo, assim, viabilizar o uso de produtos fabricados a partir de espumas biodegradáveis, tais como copos, marmitas, *bowls*, entre outros.

Também foram analisados 13 artigos de espumas biopoliméricas para sorção de poluentes. Porém, devido aos resultados desses artigos serem muito diversos, foi possível apenas realizar uma análise mais qualitativa dos resultados apresentados.

As espumas sorventes desenvolvidas nos trabalhos avaliados apresentaram bons resultados para a remoção de poluentes, tais como metais pesados, hidrocarbonetos ou outros, tanto de corpos hídricos quanto de outros ambientes. Porém, em alguns artigos foram utilizados métodos de produção que atualmente possuem custos excessivamente altos, podendo encarecer muito esses materiais, inviabilizando a expansão desse mercado. Devido ao trabalho não ter encontrado empresas que comercializam espumas biopoliméricas para sorção, não foi possível realizar uma comparação de custo destes materiais. No entanto, é importante ressaltar a importância de dar continuidade e explorar essa área de pesquisa.

Em geral, os resultados apresentados no trabalho demonstraram que as espumas biopoliméricas podem ser uma solução para a substituição parcial de espumas sintéticas para aplicação como sorvente de contaminantes e, principalmente, para uso como embalagem para alimentos, podendo, assim, minimizar os danos ambientais causados pelas espumas sintéticas que são incorretamente descartadas, visto que esses materiais ainda são majoritariamente utilizados no mercado.

## REFERÊNCIAS

- ABRE. Estudo ABRE Macroeconômico da Embalagem e Cadeia de Consumo. **Associação Brasileira de Embalagem (ABRE)**, 2021. Disponível em <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2020-2/>. Acesso em: 5 de ago. de 2021.
- ALVES, D. C. S.; COSEGLIO, B. B.; PINTO, L. A. A.; Cadaval Jr, T.R.S. Development of Spirulina/chitosan foam adsorbent for phenol adsorption. **Journal of Molecular Liquids**, v. 309, p. 113256, 2020.
- AL-TAYYAR, N. A.; YOUSSEF, A. M.; AL-HINDI, R. Antimicrobial food packaging based on sustainable Bio-based materials for reducing foodborne Pathogens: A review. **Food Chemistry**. Elsevier, 25 abr. 2020.
- ATKINS, P. Molecular Substances. In: **The Elements of Physical Chemistry**. [s.l.] Oxford University Press, 2001. p. 392.
- AURAS, R.; HARTE, B.; SELKE, S. An Overview of Polylactides as Packaging Materials. **Macromolecular Bioscience**, v. 4, n. 9, p. 835–864, 16 set. 2004.
- AVALLE, M.; SCATTINA, A. Mechanical properties and impact behavior of a microcellular structural foam. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 11, n. 2, p. 200–222, 2014.
- AVEROUS, L.; POLLET, E. Nanobiocomposites Based on Plasticized Starch. In: **Starch Polymers: From Genetic Engineering to Green Applications**. [s.l.] Elsevier, 2014. p. 211–239.
- BANDYOPADHYAY, A.; BASAK, G. C. Studies on photocatalytic degradation of polystyrene. **Materials Science and Technology**, v. 23, n. 3, p. 307–314, mar. 2007.
- BARBOSA, R. C. N.; CAMPILHO, R. D. S. G.; SILVA, F. J. G. Injection mold design for a plastic component with blowing agent. **Procedia Manufacturing**, v. 17, p. 774–782, 1 jan. 2018.
- BARMOUZ, M.; BEHRAVESH, A. H. The role of foaming process on shape memory behavior of polylactic acid-thermoplastic polyurethane-nano cellulose bio-nanocomposites. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 91, p. 266–277, 2019.
- BERGEL, B. F.; DA LUZ, L. M.; SANTANA, R. M. C. Effect of poly(lactic acid) coating on mechanical and physical properties of thermoplastic starch foams from potato starch. **Progress in Organic Coatings**, v. 118, n. December 2017, p. 91–96, 2018.
- BERK, Z. Food Process Engineering and Technology: Second Edition. **Food Process Engineering and Technology: Second Edition**, p. 1–690, 2013.
- BIELENBERG, R. W.; ROHDE, J. D.; REID, J. D. Design of the safer emergency gate using LS-DYNA. **Engineering/Technology Management 2005: Safety Engineering and Risk Analysis, Technology and Society, Engineering Business Management, Health and Safety**. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 5 fev. 2005.
- BRITO, G. F.; AGRAWAL, P.; ARAÚJO, E. M.; Mélo, T.J.A. Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**. n. 2, p. 127–139, 2011.
- BROCKGREITENS, J.; ABBAS, A. Responsive Food Packaging: Recent Progress and Technological Prospects. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 15, n. 1, p. 3–15, 2016.
- Brown, William H.; Poon, Thomas. **Introduction to Organic Chemistry - Google Livros**. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=LhuRCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP13&dq=Brown,+W.+H.%3B+Poon,+T.+\(2005\).+Int](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=LhuRCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP13&dq=Brown,+W.+H.%3B+Poon,+T.+(2005).+Int)

- reduction+to+organic+chemistry&ots=vCe9nli4nu&sig=MLw9Jqjpr\_6QLB7YYvesjsncedk#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 60, n. 2, p. 309–319, 1 fev. 1938.
- BRUNNER, C. T.; BARAN, E. T.; PINHO, E. D.; et al. Performance of biodegradable microcapsules of poly(butylene succinate), poly(butylene succinate-co-adipate) and poly(butylene terephthalate-co-adipate) as drug encapsulation systems. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 84, n. 2, p. 498–507, 1 jun. 2011.
- CHAIRES, S.; NGASATOOL, P.; KAEWTATIP, K. Novel composite foam made from starch and water hyacinth with beeswax coating for food packaging applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 165, p. 1382–1391, 2020.
- CHEN, S.; ZHU, W.; CHENG, Y. Multi-objective optimization of acoustic performances of polyurethane foam composites. **Polymers**, v. 10, n. 7, 2018.
- CHENG, H.; CHEN, L.; MCCLEMENTS, D. J.; Yang, T.; Zhang, Z.; Ren, F.; Miao, M.; Tian, Y.; Jin, Z. Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry. **Trends in Food Science and Technology**, v. 114, n. May, p. 70–82, 2021.
- CRUZ-TIRADO, J. P.; BARROS FERREIRA, R. S.; LIZÁRRAGA, E.; Tapia-Blácido, D.R.; Silva, N.C.C; Angelats-Silva, L.; Siche, R. Bioactive Andean sweet potato starch-based foam incorporated with oregano or thyme essential oil. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 23, n. September 2019, p. 100457, 2020.
- CZELEJ, K.; CWIEKA, K.; KURZYDŁOWSKI, K. J. CO<sub>2</sub> stability on the Ni low-index surfaces: Van der Waals corrected DFT analysis. **Catalysis Communications**, v. 80, p. 33–38, 5 maio 2016.
- CZEPIRSKI, L.; BALYS, M. R.; KOMOROWSKA-CZEPIRSKA, E. Some generalization of Langmuir adsorption isotherm. **Journal of Chemistry**, v. 3, n. 14, p. 1099- 8292., 2000.
- DAI, Y.; ZHOU, L.; TANG, X.; Xi, J.; Ouyang, J.; Liu, Z.; Huang, G.; Adesina, A.A. Macroporous ion-imprinted chitosan foams for the selective biosorption of U(VI) from aqueous solution. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 164, p. 4155–4164, 2020.
- ELLENDERSEN, L. de S.N; MILINSK, M. C.; FEROLDI, M.; Zadinelo,I.V.; dos Santos, L.D.; de Muniz, G.I.B.; Gasparrini, L.Z.; Alves, H.J. Biopolymer foam for remediation of aquatic environments contaminated with particulates and heavy metals. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 5, p. 6131–6138, 2018.
- ELIASSON, A. C. **Starch in Food: Structure, Function and Applications**. [s.l:], 2004.
- ELLINGHAM, T.; DUDDLESTON, L.; TURNG, L. S. Sub-critical gas-assisted processing using CO<sub>2</sub> foaming to enhance the exfoliation of graphene in polypropylene + graphene nanocomposites. **Polymer**, v. 117, p. 132–139, 19 maio 2017.
- ENGEL, J. B.; AMBROSI, A.; TESSARO, I. C. Development of biodegradable starch-based foams incorporated with grape stalks for food packaging. **Carbohydrate Polymers**, v. 225, n. May, p. 115234, 2019.
- ENGEL, J. B.; LUCHESE, C. L.; TESSARO, I. C. How are the properties of biocomposite foams influenced by the substitution of cassava starch for its residual sources? **Food Hydrocolloids**, v. 118, n. January, p. 106790, 2021.
- EPS Brasil - Notícia - Brasil recicla 34,5% do EPS pós-consumo | Poliestireno Expansível | Comissão Setorial**. Disponível em: <<http://www.epsbrasil.eco.br/noticia/view/18/brasil-recicla-345-do-eps-posconsumo.html>>. Acesso em: 20 ago. 2021.
- ESTATÍSTICAS – ABAM**. Disponível em: <<https://abam.com.br/estatisticas/>>. Acesso em: 27 ago. 2021.

- Expanded Polystyrene Market Size, Share | Industry Forecast, 2026.** Disponível em: <<https://www.alliedmarketresearch.com/expanded-polystyrene-eps-market>>. Acesso em: 23 ago. 2021.
- FALLER, R.; BIELENBERG, R.; SICKING, D.; et al. Development and testing of the safer barrier - Version 2, safer barrier gate, and alternative backup structure. **SAE Technical Papers**, 2006.
- IORE, G. L.; JING, F.; YOUNG, V. G.; et al. High Tg aliphatic polyesters by the polymerization of spirolactide derivatives. **Polymer Chemistry**, v. 1, n. 6, p. 870–877, 2010.
- FONSECA, C. C. **Produção e utilização do biopolímero poli(hidroxibutirato) (PHB) em embalagens alimentícias.** 2014. 64 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Engenharia Bioquímica, Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena.
- FONSECA, J. DE M.; PABÓN, N. Y. L.; NANDI, L. G.; et al. Gelatin-TiO<sub>2</sub>-coated expanded polyethylene foam nets as ethylene scavengers for fruit postharvest application. **Postharvest Biology and Technology**, v. 180, n. May, 2021.
- GAGLIO, R.; BOTTA, L.; GAROFALO, G.; Miceli, A.; Settanni, L. Carvacrol activated biopolymeric foam: An effective packaging system to control the development of spoilage and pathogenic bacteria on sliced pumpkin and melon. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 28, n. May 2020, p. 100633, 2021.
- GAHLEITNER, M.; PAULIK, C. Polypropylene. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**, p. 1–44, 26 mar. 2014.
- GAMA, N. V.; FERREIRA, A.; BARROS-TIMMONS, A. Polyurethane foams: Past, present, and future. **Materials**, 2018. Disponível em: [www.mdpi.com/journal/materials](http://www.mdpi.com/journal/materials)
- GARSIDE, M. **Polyurethane global market volume 2015-2026.** Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/720341/global-polyurethane-market-size-forecast/>>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- GEORGE, R.; JOY, V.; S.,A.; Jacob, Priya A. Treatment Methods for Contaminated Soils - Translating Science into Practice. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 186, n. 1, p. 17–19, 2014.
- HEIMANN, J.; MATZ, A. M.; MATZ, B. S.; et al. Processing of open-pore silicon foams using graphite composite as space holder. **Science and Technology of Materials**, v. 30, n. 1, p. 23–26, 1 jan. 2018.
- HO, B. T.; ROBERTS, T. K.; LUCAS, S. An overview on biodegradation of polystyrene and modified polystyrene: the microbial approach. **Critical Reviews in Biotechnology**. Taylor & Francis, 17 fev. 2018. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07388551.2017.1355293>>. Acesso em: 20 ago. 2021
- HOWARD, G. T. **Biodegradation of polyurethane: A review.** International Biodeterioration and Biodegradation. 2002. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/ibiod](http://www.elsevier.com/locate/ibiod)>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- IGWE, J. C.; ABIA, A. A. Adsorption isotherm studies of Cd (II), Pb (II) and Zn (II) ions bioremediation from aqueous solution using unmodified and EDTA modified maize cob. **Eclética Química**, v. 32, n. 1, p. 33–42, 2007.
- JIN, F.-L.; ZHAO, M.; PARK, M.; Park; S.J. Recent Trends of Foaming in Polymer Processing: A Review. **Polymers, Vol. 11, Page 953**, v. 11, n. 6, p. 953, 1 jun. 2019.
- KAKUMANU, V.; SRINIVAS SUNDARRAM, S. Dual pore network polymer foams for biomedical applications via combined solid state foaming and additive manufacturing. **Materials Letters**, v. 213, p. 366–369, 15 fev. 2018.

- KESHTKAR, M.; NOFAR, M.; PARK, C. B.; Carreau, P.J. Extruded PLA/clay nanocomposite foams blown with supercritical CO<sub>2</sub>. **Polymer**, v. 55, n. 16, p. 4077–4090, 5 ago. 2014.
- KIRKHAM, M. B. The Ascent of Water in Plants. In: **Principles of Soil and Plant Water Relations**. [s.l.] Academic Press, 2014. p. 347–374.
- KLEMM, D.; HEUBLEIN, B.; FINK, H. P.; et al. Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material. **Angewandte Chemie - International Edition**. John Wiley & Sons, Ltd, 30 maio 2005. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/anie.200460587>>. Acesso em: 1 set. 2021
- KUSKA, R.; MILOVANOVIC, S.; FRERICH, S.; et al. Thermal analysis of polylactic acid under high CO<sub>2</sub> pressure applied in supercritical impregnation and foaming process design. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 144, p. 71–80, 1 fev. 2019.
- KWON, B. G.; SAIDO, K.; KOIZUMI, K.; Sato, H.; Ogawa, N.; Chung, S.Y.; Kusui, T.; Kodera, Y.; Kogure, K. Regional distribution of styrene analogues generated from polystyrene degradation along the coastlines of the North-East Pacific Ocean and Hawaii. **Environmental Pollution**, v. 188, p. 45–49, 2014.
- LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of the American Chemical Society**, v. 40, n. 9, p. 1361–1403, 30 nov. 1918.
- LEE, D. W.; LIM, C.; ISRAELACHVILI, J. N.; et al. Strong adhesion and cohesion of chitosan in aqueous solutions. **Langmuir**, v. 29, n. 46, p. 14222–14229, 19 nov. 2013.
- LI, Y.; REN, S. **Building Decorative Materials**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2011.
- LIM, C.; LEE, D. W.; ISRAELACHVILI, J. N.; et al. Contact time- and pH-dependent adhesion and cohesion of low molecular weight chitosan coated surfaces. **Carbohydrate Polymers**, v. 117, p. 887–894, 6 mar. 2015.
- LIU, H.; XIE, F.; YU, L.; et al. Thermal processing of starch-based polymers. **Progress in Polymer Science**, v. 34, n. 12, p. 1348–1368, 1 dez. 2009.
- LIU, Y.; YE, L.; SHU, Y.; Zhao, X. In situ preparation of intrinsic flame retardant urea formaldehyde/aramid fiber composite foam: Structure, property and reinforcing mechanism. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 115, p. 274–282, 2018.
- LUTZU, G. A.; CIURLI, A.; CHIELLINI, C.; Di Caprio, F.; Concas, A.; Dunford, N.T. Latest developments in wastewater treatment and biopolymer production by microalgae. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 1, p. 104926, 2021.
- MA, X.; ZHANG, C.; GNANASEKAR, P.; Xiao, P.; Luo, Q.; Li, S.; Qin, D.; Chen, T.; Chen, J.; Zhu, J.; Yan, N. Mechanically robust, solar-driven, and degradable lignin-based polyurethane adsorbent for efficient crude oil spill remediation. **Chemical Engineering Journal**, v. 415, n. December 2020, p. 128956, 2021.
- MACHADO, C. M. **Desenvolvimento de espumas à base de amido de mandioca incorporadas com resíduo do processamento de gergelim para utilização como embalagens**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.
- MACHADO, C. M.; BENELLI, P.; TESSARO, I. C. Sesame cake incorporation on cassava starch foams for packaging use. **Industrial Crops and Products**, v. 102, p. 115–121, 2017.
- MACHADO, C. M.; BENELLI, P.; TESSARO, I. C. Study of interactions between cassava starch and peanut skin on biodegradable foams. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 147, p. 1343–1353, 2020.
- Manta Absorvente de óleo - Neomatex**. Disponível em: <<https://www.neomatex.com.br/manta-absorvente-oleo.html>>. Acesso em: 2 set. 2021.
- MAALOUL, N.; OULEGO, P.; RENDUELES, M.; et al. Biopolymer composite from cellulose nanocrystals of almond (*Prunus dulcis*) shell as effective adsorbents for Cu<sup>2+</sup> ions from

- aqueous solutions. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 2, p. 105139, 2021.
- MAUL, J.; FRUSHOUR, B. G.; KONTOFF, J. R.; et al. Polystyrene and Styrene Copolymers. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**, 15 jul. 2007.
- MCKENNA, S. T.; HULL, T. R. The fire toxicity of polyurethane foams. **Fire Science Reviews**, v. 5, n. 1, 2016.
- MILLS, N. J.; WILKES, S.; DERLER, S.; et al. FEA of oblique impact tests on a motorcycle helmet. **International Journal of Impact Engineering**, v. 36, n. 7, p. 913–925, 1 jul. 2009.
- MOEINI, A.; GERMANN, N.; MALINCONICO, M.; Santagata, G.; Formulation of secondary compounds as additives of biopolymer-based food packaging: A review. **Trends in Food Science and Technology**, v. 114, n. December 2020, p. 342–354, 2021.
- MOGHADAS, B.; SOLOUK, A.; SADEGHI, D. Development of chitosan membrane using non-toxic crosslinkers for potential wound dressing applications. **Polymer Bulletin**, v. 78, n. 9, p. 4919–4929, 24 ago. 2021.
- MOKHTARI, A.; SABZI, M.; AZIMI, H. 3D porous bioadsorbents based on chitosan/alginate/cellulose nanofibers as efficient and recyclable adsorbents of anionic dye. **Carbohydrate Polymers**, v. 265, n. December 2020, p. 118075, 2021.
- NAGARAJAN, V.; MOHANTY, A. K.; MISRA, M. Perspective on Polylactic Acid (PLA) based Sustainable Materials for Durable Applications: Focus on Toughness and Heat Resistance. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, 2016. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/sharingguidelines>>. Acesso em: 28 ago. 2021.
- OLABODE, O.; OJO, T.; OGUNTADE, T.; Oduwale, D. Recovery potential of biopolymer (B-P) formulation from Solanum tuberosum (waste) starch for enhancing recovery from oil reservoirs. **Energy Reports**, v. 6, p. 1448–1455, 2020.
- PACHECO-FERNÁNDEZ, I.; ALLGAIER-DÍAZ, D. W.; MASTELLONE, G.; et al. Biopolymers in sorbent-based microextraction methods. **TrAC - Trends in Analytical Chemistry**, v. 125, 2020.
- PACHORI, S.; PALANIVELU, J.; CHIDAMBARAM, R. Synthesis Methods of Starch-Based Polymer Foams and Its Comparison With Conventional Polymer Foams for Food Packaging Applications. **Polymers for Agri-Food Applications**, n. August, 2019.
- PAYNE, F.A.; PAYNE, H.Y. **A Handbook of Food Packaging**. Second Ed. Springer-Science+Business Madia, B.V. 2012. E-Book. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=f5vbBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=food+packaging&ots=Qn5BSQvxqs&sig=05QaYYTw4VmJLE6J4CuseSJy\\_C0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=f5vbBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=food+packaging&ots=Qn5BSQvxqs&sig=05QaYYTw4VmJLE6J4CuseSJy_C0#v=onepage&q&f=false)
- PETROUDY, S. R. D. Physical and mechanical properties of natural fibers. In: **Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction**. [s.l.]. 2017. p. 59–83. **PlasticsEurope**. Disponível em: <<https://www.plasticseurope.org/en>>. Acesso em: 3 set. 2021.
- Polylactic Acid Market Report: Trends, Forecast and Competitive Analysis**. Disponível em: <<https://www.lucintel.com/polylactic-acid-market.aspx>>. Acesso em: 17 out. 2021.
- Polyurethane Foams Market Global Forecast to 2025 | MarketsandMarkets**. Disponível em: <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/polyurethane-foams-market-1251.html>>. Acesso em: 16 out. 2021.
- RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 49, n. 4, p. 311–319, 1 set. 2001.
- ROMEO, T. (ED.). Bacterial Biofilms. **Current Topics in Microbiology and Immunology**. v. 322, 2008.

- SELVASEMBIAN, R.; GWENZI, W.; CHAUKURA, N.; Mthembu, S. Recent advances in the polyurethane-based adsorbents for the decontamination of hazardous wastewater pollutants. **Journal of Hazardous Materials**, v. 417, n. May, p. 125960, 2021.
- SÖDERGÅRD, A.; STOLT, M. Industrial Production of High Molecular Weight Poly(Lactic Acid). In: **Poly(Lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications**. [s.l.] John Wiley & Sons, Ltd, 2010. p. 27–41.
- SOTO, M.; SEBASTIÁN, R. M.; MARQUET, J. Photochemical activation of extremely weak nucleophiles: Highly fluorinated urethanes and polyurethanes from polyfluoro alcohols. **Journal of Organic Chemistry**, v. 79, n. 11, p. 5019–5027, 2014.
- TAJEDDIN, B. Cellulose-Based Polymers for Packaging Applications. **Lignocellulosic Polymer Composites: Processing, Characterization, and Properties**, v. 9781118773574, p. 477–498, 24 nov. 2014.
- TOKIWA, Y.; CALABIA, B. P.; UGWU, C. U.; Aiba, S. Biodegradability of plastics. **International Journal of Molecular Sciences**, 2009. Disponível em: [www.mdpi.com/journal/ijms](http://www.mdpi.com/journal/ijms)
- UPADHYAY, U.; SREEDHAR, I.; SINGH, S. A.; Patel, C.M.; Anitha, K.L. Recent advances in heavy metal removal by chitosan based adsorbents. **Carbohydrate Polymers**, v. 251, n. August 2020, p. 117000, 2021.
- UPDEGRAFF, D. M. Semimicro determination of cellulose in biological materials. **Analytical Biochemistry**, v. 32, n. 3, p. 420–424, 1 dez. 1969.
- VILPOUX, O.; AVEROUS, L. **Culturas de tuberosas amiláceas latino americanas**. In: CEREDA, M. P.; VILPOUX, O. (Coord.). *Tecnologia, usos e potencialidades de tuberosas amiláceas Latino Americanas*. São Paulo: Cargill, 2003. v.3. p. 500-530.
- VARELLA, C. A. A. **Análise Multivariada Aplicada as Ciências Agrárias Análise de Componentes Principais**. PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA-CPGA-CS. UFRRJ. 2008.
- VON SPERLING, M. Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal. **Water Intelligence Online**, v. 6, n. 0, p. 9781780402086–9781780402086, 30 dez. 2015.
- VORAWONGSAGUL, S.; PRATUMPONG, P.; PECHYEN, C. Preparation and foaming behavior of poly (lactic acid)/poly (butylene succinate)/cellulose fiber composite for hot cups packaging application. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 27, n. December 2020, p. 100608, 2021.
- WANG, G.; ZHAO, G.; ZHANG, L.; et al. Lightweight and tough nanocellular PP/PTFE nanocomposite foams with defect-free surfaces obtained using in situ nanofibrillation and nanocellular injection molding. **Chemical Engineering Journal**, v. 350, p. 1–11, 2018.
- WANG, L.; HIKIMA, Y.; ISHIHARA, S.; et al. Fabrication of lightweight microcellular foams in injection-molded polypropylene using the synergy of long-chain branches and crystal nucleating agents. **Polymer**, v. 128, p. 119–127, 16 out. 2017.
- WANG, S.; AMELI, A.; SHAAAYEGAN, V.; et al. Modelling of rod-like fillers' rotation and translation near two growing cells in conductive polymer composite foam processing. **Polymers**, v. 10, n. 3, 2018.
- WARD, P. G.; GOFF, M.; DONNER, M.; Kaminsky, W.; O'Connor, K.E. A two step chemobiotechnological conversion of polystyrene to a biodegradable thermoplastic. **Environmental Science and Technology**, v. 40, n. 7, p. 2433–2437, 1 abr. 2006.
- WILTON, N.; LYON-MARION, B. A.; KAMATH, R.; McVey, K.; Pennell, K.D.; Robbat Jr, A. Remediation of heavy hydrocarbon impacted soil using biopolymer and polystyrene foam beads. **Journal of Hazardous Materials**, v. 349, n. June 2017, p. 153–159, 2018.
- XU, J.; GUO, B.-H. Microbial Succinic Acid, Its Polymer Poly(butylene succinate), and Applications. In: **Microbiology Monographs**. [s.l.] Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. v. 14p. 347–388.

YANG, Y.; YANG, J.; WU, W. M.; Zhao, J.; Song, Y.; Gao, L.; Yang, R.; Jiang, L. Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 1. Chemical and Physical Characterization and Isotopic Tests. **Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 20, p. 12080–12086, 20 out. 2015.

ZADINELO, I. V.; DOS SANTOS, L. D.; CAGOL, L.; de Muniz, G.I.B.; Ellendersen, L. de S.N.; Alves, H.J.; Bombardelli, R.A. Adsorption of aquaculture pollutants using a sustainable biopolymer. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 5, p. 4361–4370, 2018.