

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS LARANJEIRAS DO SUL
CURSO ENGENHARIA DE ALIMENTOS

DAVI LUIZ KOESTER

DESENVOLVIMENTO DE BANDEJAS BIODEGRADAVEIS REFORÇADAS COM
DIFERENTES RESIDUOS AGROINDUSTRIAIS

LARANJEIRAS DO SUL

2023

DAVI LUIZ KOESTER

DESENVOLVIMENTO DE BANDEJAS BIODEGRADAVEIS REFORÇADAS COM
DIFERENTES RESIDUOS AGROINDUSTRIAIS

Trabalho de conclusão do curso de
graduação apresentado como requisito para
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Alimentos da Universidade
Federal da Fronteira Sul.

Orientadora: Profa. Dra. Vania Zanella Pinto

Laranjeiras do Sul

2023

Agradecimento

A Deus pelo dom da vida, por abençoar e guiar meu caminho todos os dias.

Aos meus pais Lauri Koester e Dorilda Elisabete Ristof Koester, por minha vida, por todo o aprendizado, por terem me apoiado nos momentos mais difíceis durante a graduação e por terem comemorado cada conquista junto comigo.

À minha orientadora Profa. Vania Zanella Pinto, pela amizade, pela paciência, por acreditar em mim e ser minha orientadora durante minha graduação.

Ao Prof. Vinicius Deon, por todo o apoio durante me TCC e projetos de pesquisa.

À Profa. Leda Battestin Quast, por todas as contribuições durante a graduação e o TCC.

Ao Prof. Gustavo Henrique Fideliz, pela amizade, pelos conselhos e por ser o professor que melhor me entendeu durante minha graduação.

À Raquel Borin, pela amizade, pelos cafés no lab de pani e por ter me ajudado tanto no meu TCC.

Ao David Fernando dos Santos, pela amizade e por ter colaborado muito em todos os meus projetos de IC e principalmente no TCC.

Aos meus colegas de laboratório em especial Luan Martins e Tayla Matsuo, pela ajuda no TCC.

À UFFS por me possibilitar tanto conhecimento e realização.

As minhas irmãs Laura, Luana e Larissa e meu irmão Daniel, por sempre estarem me apoiando quando precisei.

Aos meus sobrinhos Luiz, Matheus e Heloise, que da forma mais inocente de uma criança me motivaram de forma imensurável.

Aos meus amigos Jeislaine, Laura, Samuel, Matheus, Jessica e Jailso que me ajudaram muito durante a minha graduação.

À todos que de forma direta ou indiretamente fizeram parte da minha graduação, o meu eterno muito obrigado.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família, em especial ao meus pais, amigos e professores, que foram essenciais nestes seis anos de graduação.

RESUMO

A poluição causada por descarte inadequado de embalagens plásticas ameaça a vida marinha e desequilibra os ecossistemas, com a geração de microplásticos que podem ser originados do poliestireno expandido EPS. Para amenizar estes problemas, objetivou-se elaborar bandejas expandidas de amido biodegradáveis com diferentes resíduos agroindustriais, a fim de verificar qual destes melhora as propriedades das embalagens. Os resíduos utilizados foram sabugo de milho, palhada de soja, casca de mandioca, casca de pinhão, fiapo de erva-mate e palito de erva-mate. As bandejas foram elaboradas com adição de 10% de cada diferente resíduo e formadas por termoexpansão do amido de mandioca. O teor de umidade, atividade de água (a_w), densidade, isothermas de sorção, microestrutura e as propriedades mecânicas das bandejas foram avaliados. Todos os resíduos apresentaram partículas com tamanho predominante maior que 250 μm . O teor de lignina dos resíduos variou de 19,28% a 42,68%, de hemicelulose variou de 4,8% a 12,75% e teor de celulose de 20,92% a 55,25%. A umidade das bandejas variou de 5,77% a 10,48%. A a_w variou de 0,5 a 0,6 demonstrando estabilidade microbiológica. A bandeja com menor densidade foi a padrão (158 kg/m^3) e as com maior densidade foram a de casca de pinhão e casca de mandioca (222 kg/m^3). Para isothermas os valores de X_{bs} variaram de 0,34 a 0,50, K variou de 0,928 a 0,965, e o coeficiente de correlação (R^2) para todas as bandejas foi $> 0,95$. Para os ensaios de mecânicos a bandeja que mais suportou tensão de tração, obteve maior modulo de elasticidade e teve menor resistência a flexão foi a bandeja padrão (0,763 MPa, 54,53 MPa e 0,02 MPa respectivamente). A bandeja de palito de erva-mate foi a que mais alongou (0,017 mm), a que mais resistiu a flexão foi a bandeja de casca de mandioca (1,80 MPa).

Palavras chaves: Embalagens biodegradáveis, espumas de amido, compósitos, isothermas de sorção, propriedades mecânicas

ABSTRACT

Pollution from unmanaged disposal of plastic waste in water and on land may result in microplastic formation, which can be from EPS-expanded packaging. To fight against this problem, we aimed to elaborate biodegradable starch expanded trays reinforced by different agro-industrial residues to improve the packaging properties. The residues Corncob, cassava hull, soybean straw, Araucaria seeds hull, yerba mate thin stalks, and leaves petiole stems residues were used as fillers. The trays added by 10% of each different residue and formed by thermal expansion of cassava starch. Moisture content, water activity (a_w), density, sorption isotherms, microstructure and mechanical properties of the trays were evaluated. All residues had particle sizes around 250 μm . The lignin content ranged from 19.28% to 42.68%, the hemicellulose content from 4.8% to 12.75% and the cellulose content from 20.92% to 55.25% among the residues. The trays moisture ranged from 5.77% to 10.48%. The a_w ranged from 0.5 to 0.6 demonstrating microbiological stability. The standard tray had the lowest density (158 kg/m^3), and the highest were from Araucaria seeds hull and cassava hull (222 kg/m^3). X_{bs} values ranged from 0.34 to 0.50, K ranged from 0.928 to 0.965, with $R^2 > 0.95$. The standard tray had the highest tensile strength, modulus of elasticity and lowest bending stress (0.763 MPa, 54.53 MPa and 0.02 MPa, respectively). The reinforced tray with yerba mate was the one that elongated the most (0.017 mm), and the one that most resisted to bending was the cassava hull tray (1.80 Mpa).

Keywords:

Biodegradable packaging, starch foams, sorption isotherms, composites, mechanical properties

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS.....	9
2.1. Objetivo geral:	9
2.2. Objetivos específicos	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1. Amido	10
3.2. Resíduos agroindustriais	10
3.2.1. Sabugo de milho	10
3.2.2. Palhada de soja	11
3.2.3. Casca de mandioca	11
3.2.4. Casca de pinhão	11
3.2.5. Resíduos de erva-mate.....	12
3.3. Embalagens expandidas de amido biodegradáveis.....	12
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
4.1. Preparo dos resíduos.....	13
4.2. Caracterização dos resíduos.....	13
4.2.1. Granulometria.....	13
4.2.2. Composição Centesimal	13
4.2.3. Composição lignocelulósica	14
4.2.4. Cor dos resíduos	14
4.3. Elaboração das bandejas	15
4.4. Caracterização das bandejas	15
4.4.1. Umidade e atividade de água.....	15
4.4.2. Densidade	16
4.4.3. Propriedades mecânicas.....	16
4.4.4. Isotermas de sorção	16
4.4.5. Cor das bandejas.....	17
4.4.6. Análise estatística	17
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	18
5.1. Caracterização dos resíduos.....	18
5.2. Caracterização das bandejas	22
5.2.1. Teor de umidade, aw e densidade.....	22
5.2.2. Propriedades mecânicas das bandejas	23
5.2.3. Isotermas de sorção das bandejas	24
5.2.4. Cor das bandejas.....	26
6. CONCLUSÃO	27
REFERÊNCIAS	29

1. INTRODUÇÃO

Há algum tempo a poluição por descarte incorreto de embalagens plásticas tem sido um problema de alta relevância do ponto de vista socioambiental. Além da poluição nas cidades, lixões e aterros sanitários, estes poluentes acabam sendo levados aos mares e oceanos pelos rios e efluentes, o que resulta em grandes impactos ambientais, pode levar animais marinhos à lista de animais em perigo de extinção, e por fim, causar desequilíbrio em todo o ecossistema marinho (ERIKSEN *et al.*, 2014; CARNEIRO *et al.*, 2021).

Uma das fontes desta poluição são os microplásticos. Essa denominação é dada a partículas e fibras de polímeros orgânicos sintéticos com tamanho menor que 5 mm (THOMPSON *et al.* 2004). Estes são relatados desde o ano 1972, quando foram encontrados em redes de plânctons na região da Nova Inglaterra, Estados Unidos (CARPENTER *et al.*, 1972). Estes microplásticos podem ser originados do poliestireno expandido (EPS), que é um polímero amplamente utilizado na elaboração de embalagens e de difícil reciclagem. O EPS apresenta diversas vantagens como fácil fabricação, baixo custo de produção, baixa densidade, apresentando leveza e facilidade de transporte, resistência a impactos, isolante térmico, resistência ao calor e a umidade (MAHARANA, NEGI, MOHANTY; 2007). A produção de embalagens de EPS é feita em grande escala, de forma constante, contudo a maioria delas só pode ser utilizada uma vez, em aplicações rápidas, e descartada após o uso (YANG, *et al.*; 2018). Em geral, as embalagens de EPS não são recicladas devido a sua baixa densidade e consequente baixo rendimento, sendo de apenas 5-8% de polímero (SCHYNS, SHAVER, 2021; SAMPER, *et al.*, 2010) e frequentemente destinadas a aterros ou descartadas incorretamente no meio ambiente.

Esse descarte incorreto acaba causando danos ambientais, pois, as embalagens demoram muito tempo para se decompor e posteriormente acabam se tornando microplásticos, os quais podem absorver consigo substâncias tóxicas, como agroquímicos e metais pesados (ANBUMANI E KAKKAR, 2018; DÍAZ-MENDOZA *et al.*, 2020). Somado a isso, os microplásticos podem se incorporar ao solo, água e ar, causando efeitos adversos no organismo humano e de outros seres vivos (SALIM, KAPLAN *et al.*, 2014).

Visando esta problemática, vários estudos têm surgido no âmbito da produção de embalagens biodegradáveis como uma alternativa possível e sustentável para substituição do EPS em algumas aplicações (MARENGO, VERCELHEZE, MALI, 2013; SOUZA *et al.*, 2021; DUARTE *et al.*, 2017; SCHMIDT, 2006; MATSUI, 2002; DE LIMA SILVA *et al.*, 2020). Estas embalagens têm como principal componente o amido, que é de ampla

disponibilidade, fácil acesso e baixo custo em relação a outros materiais biodegradáveis ou renováveis. Assim, a produção de bandejas de amido expandido pode ser considerada utilizando amido de mandioca como matriz. O processo de expansão resulta em estruturas com massa reduzida e baixa densidade. A estrutura porosa fornece outras funcionalidades, como isolamento térmico, maior capacidade de absorção de água, porém, reduzida resistência mecânica (SJÖQVIST; BOLDIZAR; RIGDAHL, 2010).

Afim de melhorar estes aspectos alguns trabalhos adicionaram resíduos agroindustriais como fibras de coco, no qual foi observado aumento na resistência a flexão (PONGSA, *et al.*, 2023). Bagaço de cana de açúcar e casca de aspargos o que resultou em bandejas com melhor resistência mecânica, deformabilidade e melhor capacidade de retenção de água quando comparadas a espumas sem adição de fibras (CRUZ-TIRADO, *et al.*, 2019). Entrecasca de mandioca e engaço de uva apresentou boa resistência mecânica e baixa capacidade de absorção de água (ENGEL, *et al.*, 2022).

Levando isso em consideração, os resíduos agroindustriais que apresentam fibras lignocelulósicas de origem vegetal são utilizadas para reduzir a absorção de água e melhorar a resistência mecânica, sem alterar o fator da biodegradabilidade, pois são atóxicas, biodegradáveis e de fontes renováveis (DEBIAGI *et al.*, 2012; SOUZA *et al.*, 2021; DA CRUZ *et al.*, 2020).

Nossa hipótese é que o uso de resíduos da produção e ou processamento de alimentos reduz a afinidade com a água e melhora as propriedades mecânicas de espumas expandidas de amido de mandioca. Neste estudo, buscou-se encontrar resíduos lignocelulósicos agroindústrias aplicáveis no desenvolvimento de embalagens.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral:

Elaborar bandejas expandidas de amido biodegradáveis com diferentes resíduos agroindustriais a fim de verificar qual destes melhora as propriedades das embalagens.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar os diferentes resíduos agroindustriais.

- Elaborar bandejas expandidas de amido biodegradáveis com a inclusão de diferentes resíduos agroindustriais.
- Avaliar o efeito da adição de 10% dos resíduos nas propriedades das bandejas biodegradáveis.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Amido

O amido é um polissacarídeo composto por dois polímeros de glicose, amilopectina e amilose, quando unidas formam grânulos de amido. Estas são sintetizadas pelas folhas e armazenadas nos amiloplastos contidos em caules, raízes, tubérculos e grãos, assim é a principal reserva de carboidratos para as plantas superiores (MADRUGA, *et al.*, 2014; DA POIAN *et al.*, 2009). Este polissacarídeo de ampla utilização em processos industriais de alimentos, papelaria e indústrias têxtil. Comumente os amidos mais utilizados são os de milho, trigo, batata e mandioca. O amido de mandioca geralmente apresenta cerca de 17% de amilose e é de fácil extração e isolamento, o que o torna um amido de alta pureza (CEREDA, 2001).

3.2. Resíduos agroindustriais

3.2.1. Sabugo de milho

No Brasil a agricultura possui papel de extrema importância econômica. Dentre as culturas produzidas, o milho se destaca com diversos usos tanto na alimentação humana quanto animal com produção de aproximadamente 28.000.000 de toneladas no primeiro semestre de 2023 (IBGE, 2023). Um dos seus subprodutos é o sabugo que tem alta porcentagem de hemicelulose e baixo custo (SILVERIO, *et al.*, 2013). Estes fatores são de grande importância para utilização deste subproduto, um exemplo é a produção de carvão ativado. Assim tornando-se uma fonte alternativa ao carvão mineral, que tem maior potencial poluente e tem alto valor agregado (VALENTE NABAIS *et al.*, 2009). Outra utilização possível é em embalagens para alimentos (KALAOGLU; UNLU; ATIÇI, 2016; XU *et al.*, 2018).

3.2.2. Palhada de soja

Outro cultivo muito importante no Brasil é a soja, a qual tem um papel muito semelhante ao milho. A produção de soja no primeiro semestre de 2023 foi estipulada em torno de 148.000.000 de toneladas (IBGE, 2023). Quando realizada a colheita deste grão, a sua palhada é descartada e se decompõem com o tempo na lavoura. A relação do peso da palhada e do peso do grão varia na faixa de 120 a 150%, assim ficando remanescente nas lavouras cerca de 222 milhões de toneladas de palhada de soja no Brasil. A palhada é geralmente descartada ou utilizada como cobertura de solo devido a um baixo valor nutritivo para alimentação de ruminantes (MARTELLI-TOSI *et al.*, 2016). Contudo apresenta composição lignocelulósica com cerca de 34% de celulose, 22% de lignina e 16% de hemicelulose (WAN, *et al.*, 2011), o que possibilita sua utilização em embalagens de alimentos (MARTELLI-TOSI *et al.*, 2018).

3.2.3. Casca de mandioca

A região sul brasileira se destaca como terceira maior produtora de mandioca nacionalmente, com 14,8 % de áreas cultivadas, representando cerca de 22% da produção do Brasil. Somado a isto é líder nacional em produtividade com alto rendimento de mandioca colhida (EMBRAPA, 2023). A casca de mandioca, entretanto é descartada ou em pequenas propriedades rurais é destinada ao consumo de animais de engorda, não possuindo nenhum valor comercial. A utilização de casca de mandioca em bandejas de amido aumenta a resistência mecânica e diminui a capacidade de absorção de água (ENGEL, *et al.*, 2022).

3.2.4. Casca de pinhão

O pinhão é um dos símbolos mais representativos do estado do Paraná, encontrado por todo o estado. A casca do pinhão tem baixo valor comercial, tratada geralmente como resíduo e descartada após o consumo do pinhão. Contudo, a casca corresponde a cerca de 20% do peso da semente, e possui uma estrutura lenhocelulósica com elevadas quantidades de lignina, polifenóis e taninos. Por apresentar esta estrutura demora um

tempo considerável para se decompor no meio ambiente (DAUDT *et al.*, 2016; CORDENUNSI *et al.*, 2004; DAUDT, 2016; REZENDE, 2016; SEKULA e CÓRDOVA, 2018).

3.2.5. Resíduos de erva-mate

A erva-mate é nativa da região sul do continente sul-americano correspondendo a Argentina, Paraguai e região sul do Brasil, onde se tem uma área cultivada de 68.616 ha. E um rendimento estimado em aproximadamente 8100 Kg/ha. A produção brasileira anual em 2021 foi cerca de 560.000 toneladas de erva-mate no ano (IBGE, 2023). O processamento e produção de erva-mate gera alguns resíduos sendo dois deles, o fiapo de erva mate e os palitos e ramos com diâmetro maior que 10 mm. O fiapo da erva-mate é caracterizado como as nervuras das folhas, que é descartado após a etapa de cancheamento da erva, no qual se reduz o tamanho das folhas e se retira estas nervuras (JÚNIOR *et al.*, 2018) para melhorar o aspecto visual do produto a ser comercializado.

Os palitos são derivados de ramos finos e grossos obtidos durante a colheita da erva-mate. Os ramos finos são aproveitados na etapa de elaboração da erva-mate, em uma determinada porcentagem máxima, tamanho e diâmetro padronizados de acordo com o estilo de erva que se pretende ao final do processo. Quando estes talos e palitos se encontram fora do padrão adequado são separados por peneiramento do restante da matéria-prima. Estes palitos gerados na produção da erva-mate possuem pouco valor energético para queima e acabam sendo descartados (JÚNIOR *et al.*, 2018).

3.3. Embalagens expandidas de amido biodegradáveis

As embalagens termo expandidas de amido são elaboradas a partir de uma suspensão de amido e água adicionada em molde pré-aquecido a temperaturas em torno de 180°C (DA CRUZ *et al.*, 2020). Este processo possibilita a formação de estruturas com peso reduzido, baixa densidade e baixa resistência a água (SJÖQVIST; BOLDIZAR; RIGDAHL, 2010). As espumas produzidas têm como principal componente o amido por ser de fácil acesso, abundante e baixo custo quando comparado a outros materiais biodegradáveis ou renováveis. Contudo por apresentar boa afinidade com a água as

bandejas formadas não podem ser utilizadas em produtos que tenham umidade relativa elevada (ENGEL, *et al.*, 2022).

A fim de melhorar as propriedades de absorção de água, tem surgido estudos com adição de resíduos agroindústrias nas espumas de amido, tais como fibras de coco onde se observou aumento da resistência a flexão (PONGSA, *et al.*, 2023). Casca de aspargos e bagaço de cana de açúcar resultando em espumas com melhora da resistência mecânica e melhora na capacidade de retenção de água (CRUZ-TIRADO, *et al.*, 2019). Entrecasca de mandioca e engaço de uva apresentando melhora na resistência mecânica e diminuição na capacidade de absorção de água (ENGEL, *et al.*, 2022).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Preparo dos resíduos

Este estudo foi realizado na Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS, campus Laranjeiras do Sul. Os resíduos utilizados foram adquiridos nas cidades de Saudade do Iguaçu – PR (sabugo de milho e casca de mandioca), Camargo – RS (palhada de soja) e Laranjeiras do Sul – PR (casca de pinhão, fiapo de erva-mate e palito de erva-mate). Posterior a coleta, os resíduos foram secos em estufa 70°C por 24 horas com circulação e renovação forçada de ar quando necessário e triturados em moinho de martelo.

4.2. Caracterização dos resíduos

4.2.1. Granulometria

Para determinação de granulometria foi mensurado 100g de cada resíduo, levado para um agitador, com 5 peneiras com diferentes aberturas de poros (710 µm, 250 µm, 150 µm, 75 µm e > 75 µm), na frequência de 5 hertz por 5 minutos. A distribuição do tamanho de partículas foi determinada pela aferição da massa retida na peneira.

4.2.2. Composição Centesimal

Os teores de umidade, cinzas, lipídios, proteína bruta e carboidratos totais foram

determinados utilizando protocolos estabelecidos da AOAC (AOAC, 2000). O teor de umidade foi realizado por secagem direta em estufa a 105 °C até peso constante. O teor de cinzas foi quantificado pela massa do resíduo após incineração em mufla a 550 °C até o desaparecimento de todos os pontos pretos. Para determinação de lipídios foi utilizada extração a quente em Soxhlet com solvente éter de petróleo. O teor de proteína bruta foi quantificado pelo método de Kjeldahl utilizando o fator 6,25 para a conversão de nitrogênio em proteína. A determinação de carboidratos totais foi feita pela subtração da porcentagem de umidade, cinzas, lipídios e proteína bruta do total de 100% demonstrado na equação 1.

$$CT\% = 100\% - (U\% + C\% + L\% + PB\%) \quad (\text{Equação 1})$$

CT: Carboidratos totais

U: Umidade

C: Cinzas

L: Lipídios

PB: Proteína bruta

4.2.3. Composição lignocelulósica

Para a determinação de lignina, celulose e hemicelulose, foi pesado 0,3 g de resíduo, adicionado 3 mL de ácido sulfúrico (72% v/v), levado a um banho termostático a 30 °C por 1 h, e homogeneizado a cada 5 minutos. Após o término da hidrólise ácida, o concentrado foi diluído para 4% com 84 mL de água destilada. Para completar a hidrólise dos oligômeros, frascos de vidro foram selados e autoclavados a 121 °C e 1,1 bar durante 1 h. Posteriormente, as fases líquidas e sólidas foram separadas por filtração a vácuo. A fase líquida foi filtrada com filtros de nylon 0,45 µm para quantificar lignina, celulose e hemicelulose por HPLC (DRESCH *et al*, 2022).

4.2.4. Cor dos resíduos

A análise colorimétrica foi realizada utilizando um colorímetro (MINOLTA, CR 400, Japão), por meio da leitura dos parâmetros L – luminosidade (0 corresponde ao preto absoluto e 100 ao branco absoluto), a* (a positivo corresponde ao vermelho e a negativo ao verde), e b* (positivo indica amarelo e quando negativo azul).

4.3. Elaboração das bandejas

As bandejas foram elaboradas com a homogeneização do amido com os demais ingredientes listados na Tabela 1. Essa mistura foi depositada no molde da bandeja que já estava pré-aquecido a 180 °C, o molde foi fechado e aguardado 4 minutos até a cocção do amido e a completa evaporação da água. Após a cocção, a bandeja era retirada da forma e deixada esfriar à temperatura ambiente, com posterior retirada das rebarbas e armazenadas em local seco e ao abrigo da luz, durante 7 dias e só após este tempo as bandejas foram avaliadas.

Tabela 1: Formulação das bandejas expandidas biodegradáveis

Matérias primas	Padrão	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	F 6
Amido (g)	16,8	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4
Água (mL)	19	19	19	19	19	19	19
Estearato de magnésio (g)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Glicerol (g)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Goma Guar (g)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Sabugo de milho (g)	-	2,4	-	-	-	-	-
Palhada de soja (g)	-	-	2,4	-	-	-	-
Casca de mandioca (g)	-	-	-	2,4	-	-	-
Casca de pinhão (g)	-	-	-	-	2,4	-	-
Fiapo de erva mate (g)	-	-	-	-	-	2,4	-
Palito de erva mate (g)	-	-	-	-	-	-	2,4

F = Formulação com adição de resíduos

4.4. Caracterização das bandejas

4.4.1. Umidade e atividade de água

A umidade foi realizada pelo método de secagem direta em estufa a 105 °C até peso constante (AOAC, 2000). A determinação de atividade de água foi realizada pela leitura direta das bandejas em analisador de atividade de água à 25 °C.

4.4.2. Densidade aparente

Corpos de prova quadrados de 20 mm de largura foram recortados e as dimensões, espessura e massa foram aferidos. A densidade foi calculada pela razão entre a massa pelo volume do corpo de provas, conforme equação 2.

$$Densidade \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{massa \ (kg)}{volume \ (m^3)} \quad (Equação \ 2)$$

4.4.3. Propriedades mecânicas

Para os ensaios mecânicos foram elaboradas 20 bandejas com cada resíduo, e armazenadas por 48 h em dessecador com solução salina saturada de nitrato de magnésio a 52% UR. Após o tempo de aclimação das bandejas, os corpos de provas foram recortados, destes 10 destinados para o ensaio de tração e os outros 10 para ensaio de flexão.

Para o ensaio de tração, os corpos de prova foram recortados em formato de gravata com 100 mm de comprimento por 25 mm de largura nas bases e 15 mm no meio do corpo. Os ensaios foram realizados utilizando texturômetro de bancada TA.XT Plus (Stable Micro Systems, Surrey, UK). A separação inicial foi de 70 mm entre as garras, com velocidade do ensaio de 1 mm/s de acordo com norma D882-18 (ASTM, 2018). A resistência a tração foi determinada pelo ponto de tensão máximo (MPa) observado na curva de tensão por deformação. A elongação (mm) foi calculada pela diferença entre a distância final da tração máxima até o rompimento do corpo de prova pela distância inicial. O módulo Young (MPa) foi determinado pela inclinação linear da curva do gráfico de tensão por deformação.

A análise de flexão das bandejas foi realizada seguindo a norma ASTM D790-17 (ASTM, 2017). Os corpos de prova para os ensaios foram recortados em retângulos de 25 mm de largura por 100 mm de comprimento, e a análise decorreu utilizando método de flexão em três pontos, com separação dos apoios de 45 mm. A resistência a flexão foi determinada pelo ponto de tensão máximo (MPa) observado na curva de flexão.

4.4.4. Isotermas de sorção

As isotermas de sorção foram determinadas pelo método estático utilizando dessecadores. Nove soluções salinas saturadas foram preparadas para obter diferentes atividades de água (Tabela 2). As bandejas foram recortadas em quadrados de 20 mm, aferidas as massas iniciais e acondicionadas dentro de recipientes com as soluções saturadas. Após 21 dias a massa final de cada quadrado foi aferida. Posteriormente, foi utilizado o modelo de GAB para ajustar os dados obtidos para estimar as constantes do modelo (Equação 3) (ZHANG e HAN, 2008).

$$Xe = \frac{kCXaw}{[(1-kaw).(1-kaw+Ckaw)]} \quad (\text{Equação 3})$$

Xe = umidade (g de água /g matéria seca)

A_w = atividade de água

X , C , k = constantes de GAB

X = conteúdo de umidade na monocamada (base seca)

C = constante de Guggenheim, fator de correlação para propriedades de sorção para primeira camada que representa o volume líquido

k = fator de correlação das propriedades das multicamadas com seu respectivo volume líquido.

Tabela 2: Soluções salinas utilizadas nas isotermas e suas respectivas atividades de água.

Soluções salinas saturadas*	Atividade de água a 25°C
Cloreto de lítio	0,111
Cloreto de magnésio	0,325
Nitrato de magnésio	0,524
Iodeto de potássio	0,686
Cloreto de sódio	0,755
Sulfato de amônio	0,807
Cloreto de bário	0,904
Sulfato de potássio	0,976
Água	1,000

4.4.5. Cor das bandejas

A análise colorimétrica das bandejas foi realizada conforme descrito no item 4.2.4.

4.4.6. Análise estatística

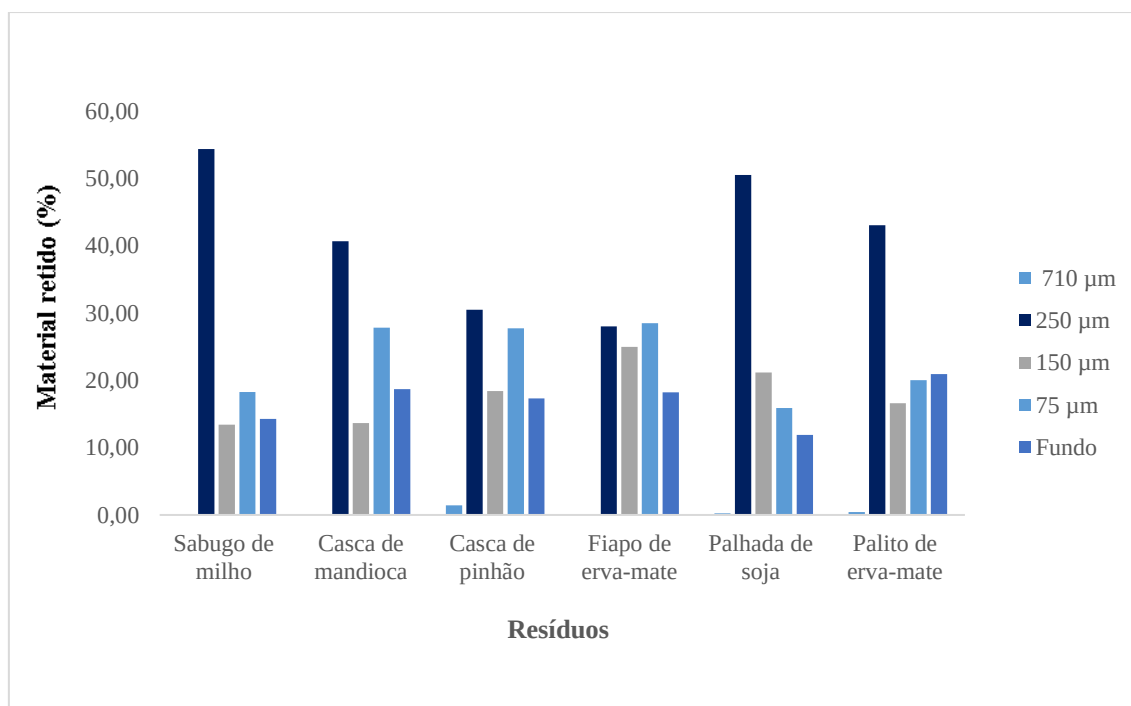
Os dados obtidos foram submetidos a análise estatística de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste Tukey com nível de significância de 5% ($p \leq 5$).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização dos resíduos

A caracterização dos resíduos foi iniciada pela análise de granulometria, com a distribuição do tamanho das partículas apresentada na Figura 1. A maioria os resíduos apresentaram maior retenção na peneira de 60 mesh, indicando que possuem tamanho menor que 710 μm e superior a 250 μm , exceto o fiapo de erva-mate que apresenta retenção igual para a peneira de 60 mesh e para a peneira de 200 mesh ($< 150 \mu\text{m}$ e $> 75 \mu\text{m}$). O sabugo de milho, a palhada de soja, a casca de mandioca e o palito de erva-mate apresentaram maior variabilidade no tamanho. Contrapondo a isto, a casca de pinhão e o fiapo de erva-mate apresentaram partículas de tamanho distribuído de forma mais balanceada entre todas as peneiras.

Figura 1: Distribuição do tamanho das partículas de cada resíduo.



A diferença na granulometria dos resíduos se deve ao fato de serem resíduos de diferentes composições químicas, pois são de diferentes origens. A granulometria pode interferir na absorção de água quando adicionados em matrizes poliméricas. As partículas menores absorvem mais água, enquanto partículas maiores absorvem menos água e demoram mais tempo para absorver. Contudo, a distribuição uniforme é mais importante do que o tamanho das partículas, propriamente, pois facilita a distribuição homogênea da água (HOSENEY e ROGERS, 1990). O tamanho das partículas é um indicativo de quantidade de carboidratos totais presentes em farinhas, quanto menor a granulometria, menos carboidratos totais a farinha apresenta e maior a porcentagem de lipídios, o que é justificado pela retenção de carboidratos estruturais em peneiras de malha mais grossa (STORCK, *et al.*, 2015).

Posteriormente foi realizada a análise da composição centesimal de cada resíduo (Tabela 3). Houve variação do teor de umidade entre os resíduos, sendo que o palito de erva-mate apresentou maior umidade ($9,53 \pm 0,06\%$) e a casca de mandioca ($4,07 \pm 0,09\%$) e o sabugo de milho ($4,36 \pm 0,04\%$) a menor. O teor de cinzas variou significativamente de $1,58 \pm 0,04\%$ para palito de erva-mate até $4,38 \pm 0,03\%$ para palhada de soja. No teor de lipídios foi observada diferença de $0,46 \pm 0,23\%$ para palito de erva-mate a $5,97 \pm 0,32\%$ para casca de pinhão. O resíduo que apresentou maior teor de proteína foi o fiapo de erva-mate com $5,92 \pm 0,32\%$, contrapondo a este, o sabugo de milho e a casca de pinhão apresentaram os menores teores de $1,10 \pm 0,22\%$ e $1,36 \pm 0,16\%$ respectivamente.

Tabela 3: Composição centesimal dos resíduos agroindustriais

Resíduos*	Umidade (%)	Cinzas (%)	Lipídeos (%)	Proteínas (%)	Carboidratos totais** (%)
Sabugo de Milho	$4,36 \pm 0,04^D$	$2,21 \pm 0,08^B$	$2,49 \pm 0,24^B$	$1,10 \pm 0,22^C$	89,94
Palhada de Soja	$8,61 \pm 0,08^B$	$4,38 \pm 0,03^A$	$1,09 \pm 0,05^C$	$3,23 \pm 0,22^B$	82,69
Casca de Mandioca	$4,07 \pm 0,09^D$	$3,87 \pm 0,12^A$	$1,26 \pm 0,10^{BC}$	$2,47 \pm 0,02^B$	88,34
Casca de Pinhão	$5,12 \pm 0,38^C$	$1,98 \pm 0,36^{BC}$	$5,97 \pm 0,85^A$	$1,36 \pm 0,16^C$	85,57
Fiapo de Erva-Mate	$8,23 \pm 0,06^B$	$4,23 \pm 0,13^A$	$1,22 \pm 0,16^{BC}$	$5,92 \pm 0,32^A$	80,39
Palito de Erva Mate	$9,53 \pm 0,06^A$	$1,58 \pm 0,04^C$	$0,46 \pm 0,23^C$	$3,33 \pm 0,25^B$	85,10

*Média $\pm$ desvio padrão. Letras maiúsculas diferentes, na mesma coluna, diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

**cálculo realizado com as medias das outras determinações.

A diferença de composição centesimal dos resíduos se deve por cada um ter origem botânica diferente e são provenientes de diferentes partes das plantas, sabugo, palhada, casca, fiapo e palito. Para umidade da casca de mandioca, do sabugo de milho e

da casca de pinhão esta variação se deve em parte pela necessidade de secagem antes da trituração, não sendo preciso para os demais resíduos. Na literatura diferentes tipos de resíduos apresentam teores em torno de 4% a 10 % de umidade, 2% a 7% de cinzas, 1 % a 4% de lipídios e 4% a 8% de proteína, estes percentuais são comuns a uma grande parte dos resíduos agroindustriais lignocelulósicos (DE OLIVEIRA 2016).

Um dos principais componentes da composição centesimal destes resíduos é a porcentagem de carboidratos, o qual teve variação de 80,39% para fiapo de erva-mate, a 89,94% para sabugo de milho (Tabela 3). Dentro da classificação de carboidratos, existem componentes que são de grande interesse para aplicações em embalagens, como as fibras celulósicas, compostos por celulose, lignina e hemicelulose. A composição lignocelulósica dos resíduos agroindustriais está na Tabela 4.

Pode se observar que o teor de lignina apresentou variação de $19,28 \pm 1,66\%$ para casca de mandioca a $42,68 \pm 1,12\%$ para casca de pinhão. Isto indica que a casca de mandioca apresenta maior maleabilidade do que os demais resíduos, e a casca de pinhão tem a estrutura mais rígida. A matriz amorfa da lignina confere rigidez, resistência, impermeabilidade e é uma barreira a ataques de microrganismos as células vegetais (ROBAK, BALCEREK, 2020). Por ser a parte hidrofóbica da estrutura celular a lignina diminui a interação do resíduo com água, e é responsável por manter a celulose e a hemicelulose unidas, conferindo força e rigidez a estrutura (CHONG, *et al.*, 2021).

Somado a isto, a casca de mandioca apresentou maior teor de celulose $55,25 \pm 5,43\%$, enquanto o fiapo de erva-mate apresentou o menor com $20,92 \pm 1,25\%$. Esta composição demonstra que a parede celular da casca de mandioca possui uma rede bem estruturada, com maior resistência mecânica e insolubilidade em solventes usuais (água, etanol e acetonitrila) (CREDOU, BERTHELOT, 2014).

O teor de hemicelulose variou de $4,81 \pm 0,67\%$ para casca de mandioca a $12,75 \pm 1,37\%$ para palhada de soja. Assim, indica que a estrutura das células da casca de mandioca tem predominância de celulose, formando uma rede mais resistente, impermeável, insolúvel e maleável. Os demais resíduos apresentam maior porcentagem de hemicelulose e lignina do que porcentagem de celulose. Os valores observados em literatura para diferentes tipos de resíduos lignocelulósicos, apresentam valores que variam de acordo com cada material, não apresentando uma faixa fixa para todos os resíduos (CASTRO, PEREIRA JR 2010).

Tabela 4: Composição lignocelulósica dos resíduos agroindustriais

Resíduos*	Lignina total (%)	Celulose (%)	Hemicelulose (%)
Sabugo de Milho	32,44 ± 3,35 ^C	25,10 ± 2,28 ^{BC}	12,28 ± 0,90 ^{AB}
Palhada de Soja	25,32 ± 1,70 ^D	29,35 ± 3,91 ^B	12,75 ± 1,37 ^A
Casca de Mandioca	19,28 ± 1,66 ^E	55,25 ± 5,43 ^A	4,81 ± 0,67 ^D
Casca de Pinhão	42,68 ± 1,12 ^A	26,61 ± 3,58 ^{BC}	9,45 ± 0,90 ^C
Fiapo de Erva Mate	38,39 ± 1,76 ^{AB}	20,92 ± 1,25 ^C	10,11 ± 0,44 ^{BC}
Palito de Erva Mate	35,84 ± 2,14 ^{BC}	27,46 ± 2,77 ^{BC}	11,82 ± 1,10 ^{AB}

*Média ± desvio padrão. Letras maiúsculas diferentes, na mesma coluna, diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05).

A análise de cor de cada resíduo foi realizada e os dados demonstrados abaixo na Tabela 5. Para a luminosidade houve variação de 42,68 ± 0,28 para casca de pinhão, este o resíduo que mais se aproximou do valor de preto absoluto (0,00), até 81,57 ± 0,72 para sabugo de milho, este o resíduo mais próximo do branco absoluto (100,00). A coloração da casca de pinhão se deve pela alta concentração de taninos presentes na casca, o que confere a cor marrom escura ao resíduo (KOEHNLEIN, et al., 2012). O palito de erva mate apresentou índice de luminosidade de 77,88 ± 0,45, apresentando coloração próxima a do sabugo. A casca de mandioca apresentou 72,66 ± 0,53 apresentando cor clara mais próxima do branco que o resíduo de palhada de soja (68,65 ± 0,47) e fiapo de erva mate (68,01 ± 0,44).

Para a coordenada colorimétrica a* a casca de pinhão obteve 12,95 ± 0,05, apresentando tonalidade vermelha em sua cor mais acentuada do que os demais resíduos isso se deve a maior concentração de taninos presente neste resíduo (KOEHNLEIN, et al., 2012). O resíduo de casca de mandioca (5,00 ± 0,08) apresentou leve tonalidades de vermelho, isso devido sua casca externa a qual entra em contato com a terra, o resíduo de sabugo de milho (2,58 ± 0,12) e palhada de soja (1,96 ± 0,06). Contrapondo, o fiapo de erva-mate (-1,90 ± 0,08) e o palito de erva-mate (-1,71 ± 0,08) apresentaram valores negativos para a coordenada, demonstrando assim tonalidade verde em sua cor, isto se deve a concentração de clorofilas mais acentuada nos resíduos derivados de erva-mate (KNAPP, et al., 2019).

Para a coordenada b* todos os resíduos apresentaram tonalidades de amarelo em sua coloração, o menos intenso foi a palhada de soja com 18,42 ± 0,32 e o mais intenso a casca de mandioca com 23,38 ± 0,24.

Tabela 5: Cor instrumental (CIELab) dos resíduos

Resíduo*	Cor
----------	-----

	L	a*	b*
Sabugo de Milho	81,57 ± 0,72 ^A	2,58 ± 0,12 ^C	22,26 ± 0,50 ^B
Palhada de Soja	68,65 ± 0,47 ^D	1,96 ± 0,06 ^D	18,42 ± 0,32 ^D
Casca de Mandioca	72,66 ± 0,53 ^C	5,00 ± 0,08 ^B	23,38 ± 0,24 ^A
Casca de Pinhão	42,68 ± 0,28 ^E	12,95 ± 0,05 ^A	19,99 ± 0,54 ^C
Fiapo de Erva Mate	68,01 ± 0,44 ^D	-1,90 ± 0,08 ^F	22,41 ± 0,20 ^B
Palito de Erva Mate	77,88 ± 0,45 ^B	-1,71 ± 0,08 ^E	20,66 ± 0,50 ^C

*Média ± desvio padrão. Letras maiúsculas diferentes, na mesma coluna, diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05).

5.2. Caracterização das bandejas

5.2.1. Teor de umidade, atividade de água (aw) e densidade aparente

O teor de umidade, atividade de água e densidade das bandejas estão apresentados na Tabela 6. Para o teor de umidade, notamos variações de 5,77 ± 0,53% para casca de pinhão a 10,40 ± 0,20% para palhada de soja e 10,48 ± 0,40% para padrão. As diferenças apresentadas, podem ser por concentração de amilose. Uma vez que estudos demonstram que o teor de amilose influencia na absorção de água em materiais a base de amido (CHAUDHARY *et al.*, 2009; MUSCAT *et al.*, 2012).

A aw apresentou diferença entre as bandejas, com uma faixa de variação de 0,51 ± 0,02 para casca de mandioca a 0,59 ± 0,01 para palito de erva mate. Contudo esta variação quando expressa em fatores bioquímicos, demonstra estabilidade microbiológica, pois não ultrapassa 0,6 de aw, o que dificulta o desenvolvimento microbiológico por indisponibilidade de água para o crescimento de fungos e bactérias (SILVA, *et al.*, 2021).

Tabela 6: Umidade, atividade de água e densidade das bandejas.

Bandejas*	Umidade (%)	Atividade de Água	Densidade kg/m ³
Padrão	10,48 ± 0,40 ^A	0,56 ± 0,03 ^{AB}	158,43 ± 8,63 ^D
Sabugo de Milho	9,26 ± 0,60 ^B	0,57 ± 0,03 ^{AB}	195,25 ± 11,90 ^{BC}
Palhada de Soja	10,40 ± 0,20 ^A	0,54 ± 0,02 ^{BC}	194,66 ± 13,63 ^{BC}
Casca de Mandioca	8,95 ± 0,42 ^{BC}	0,51 ± 0,02 ^C	222,39 ± 5,06 ^A
Casca de Pinhão	5,77 ± 0,53 ^D	0,56 ± 0,03 ^{ABC}	222,32 ± 12,04 ^A
Fiapo de Erva Mate	8,54 ± 0,24 ^C	0,58 ± 0,02 ^{AB}	182,35 ± 8,14 ^C
Palito de Erva Mate	9,58 ± 0,14 ^B	0,59 ± 0,01 ^A	211,68 ± 14,50 ^{AB}

*Média ± desvio padrão. Letras maiúsculas diferentes, na mesma coluna, diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05).

A densidade apresentou diferença de $158,43 \pm 8,63 \text{ kg/m}^3$ para bandeja padrão a $222,32 \pm 12,04 \text{ kg/m}^3$ para bandeja de casca de pinhão e $222,39 \pm 5,06 \text{ kg/m}^3$ para bandeja de casca de mandioca (Tabela 6). A expansão ocorre quando o amido é aquecido na presença de água e forma uma estrutura que aprisiona o ar e aumenta a porosidade interna do material, e diminui a densidade da espuma. Quando adicionado resíduos a densidade aumenta, este fenômeno está correlacionado com uma diminuição da expansão da massa que contém resíduos, o que pode estar relacionado com a composição lignocelulósica do insumo adicionado (Machado et al., 2017). Outros estudos de bandejas observaram que quando adicionado resíduos ocorre variação de 220 a 280 kg/m^3 (LONGHI 2016), em outros trabalhos de bandejas com adição de bagaço de malte foi notado uma variação de 210 a 280 kg/m^3 e 220 a 400 kg/m^3 (VERCELHEZE *et al.*, 2012; DA CRUZ *et al.*, 2020).

5.2.2. Propriedades mecânicas das bandejas

Após os ensaios mecânicos de tração obtivemos dados de tensão máxima (Mpa), alongamento máximo (mm) e modulo Young (MPa) (Tabela 7). Dentre todas as bandejas, a formulação padrão apresentou maior resistência à tração suportando tensão máxima de $0,7630 \pm 0,0746$. A bandeja adicionada com casca de mandioca apresentou menor resistência suportando $0,3633 \pm 0,0413 \text{ MPa}$. Contudo, ambas apresentaram alongamento máximo reduzido, $0,009 \pm 0,0006$ e $0,011 \pm 0,0014 \text{ mm}$ respectivamente, diferenciando das demais formulações que apresentaram alongamento de $0,015 \pm 0,0017$ a $0,018 \pm 0,0011 \text{ mm}$. A resistência à tração é o esforço de tração máximo que o corpo suporta no decorrer do ensaio de tensão. Fatores como a cristalinidade do polímero e o resíduo empregado influenciam na resistência (RIBBA *et al.*, 2017).

A bandeja padrão apresentou o maior módulo de elasticidade ($54,53 \pm 6,93$), enquanto a bandeja adicionada de fiapo de erva-mate apresentou o menor $35,22 \pm 2,88$ (Tabela 7). O modulo Young é influenciado diretamente pela tensão máxima aplicada e inversamente pela deformação específica sofrida pela bandeja, assim quanto mais a bandeja resiste e menos se deforma maior será seu modulo de elasticidade, sendo referência de rigidez dos materiais. Quanto maior o modulo Young mais rígido o material (CALLISTER, 2002; VLACK, 2000).

A resistência a flexão apresentou variação de $0,02 \pm 0,002 \text{ MPa}$ para a bandeja Padrão a $1,78 \pm 0,175 \text{ MPa}$ para bandeja adicionada de sabugo de milho e $1,80 \pm 0,176 \text{ MPa}$ para a bandeja adicionada de casca de mandioca. As demais bandejas ficaram na faixa de 1,17 a 1,70

MPa. Valores semelhantes de 1,2 a 2,5 MPa para flexão de bandejas com adição de entrecasca de mandioca foram encontrados por Engel *et al.*, (2022), e para espumas de fécula de batata foram encontrados valores na faixa de 1,22 a 1,40 MPa (VELASCO, *et al.*, 2022) e 1,51 a 2,62 MPa (FERREIRA, *et al.*, 2019).

Tabela 7: Resultado dos ensaios de tração e flexão das bandejas

Resíduos	Tração máxima (MPa)	Alongamento máximo (mm)	Modulo de Young (MPa)	Resistência a flexão (MPa)	Deflexão máxima (mm)
Padrão	0,7630 ± 0,0746 ^A	0,009 ± 0,0006 ^C	54,53 ± 6,93 ^A	0,02 ± 0,002 ^D	3,44 ± 0,3 ^A
Sabugo de Milho	0,5319 ± 0,0639 ^{BC}	0,015 ± 0,0017 ^A	41,15 ± 4,64 ^{BC}	1,78 ± 0,175 ^A	1,82 ± 0,2 ^{BC}
Palhada de Soja	0,4417 ± 0,0430 ^{CDE}	0,016 ± 0,0019 ^A	41,24 ± 3,74 ^{BC}	1,50 ± 0,147 ^B	2,18 ± 0,4 ^A
Casca de Mandioca	0,3633 ± 0,0413 ^E	0,011 ± 0,0014 ^{BC}	36,88 ± 3,73 ^{BC}	1,80 ± 0,176 ^A	1,90 ± 0,3 ^{BC}
Casca de Pinhão	0,5489 ± 0,0522 ^B	0,017 ± 0,0016 ^A	43,00 ± 4,74 ^B	1,70 ± 0,130 ^{AB}	1,67 ± 0,1 ^{BC}
Fiapo de Erva-mate	0,4229 ± 0,0470 ^{DE}	0,015 ± 0,0012 ^{AB}	35,22 ± 2,88 ^C	1,17 ± 0,093 ^C	1,95 ± 0,5 ^{BC}
Palito de Erva-mate	0,5065 ± 0,0588 ^{BCD}	0,018 ± 0,0011 ^A	38,84 ± 4,36 ^{BC}	1,66 ± 0,162 ^{AB}	1,56 ± 0,2 ^C

*Média ± desvio padrão. Letras maiúsculas diferentes, na mesma coluna, diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05).

5.2.3. Isotermas de sorção das bandejas

Existem diversos modelos matemáticos que descrevem os ensaios de isotermas de sorção para diferentes matérias. A precisão de ajuste varia com a atividade de água e o tipo de material utilizado, dependente de vários fatores, como estrutura física da superfície do material, afinidade com a água e a composição química (KUROZAWA *et al.*, 2005; MALI *et al.*, 2005). Para uma faixa de atividade de água de 0,1 – 0,9 o modelo de GAB apresenta um bom ajuste e representatividade dos dados (RIZVI, 1995).

Na Tabela 7 estão mostradas as variáveis e as constantes obtidas pelo modelo de GAB e coeficientes de determinação (R^2), para a bandeja padrão e para cada bandeja com seu respectivo resíduo (Sabugo de milho, Palhada de soja, Casca de mandioca, Casca de pinhão, Fiapo de erva-mate, Palito de erva-mate). As curvas de isoterma de sorção foram

obtidas após as bandejas serem condicionadas em dessecadores com soluções saturadas com diferentes atividades de água a 25°C por 21 dias, estão representadas na Figura 2.

As curvas das isotermas de sorção das bandejas de amido padrão e com adição de resíduos apresentaram correlação superior a 0,95 ($R^2 > 0,95$) para o modelo de GAB. Este parâmetro é importante para observar o comportamento das embalagens quando expostas a diferentes condições ambientais, principalmente diferentes umidades relativas, e assim, identificar prováveis utilizações para este material.

Tabela 7: Constantes e coeficientes de determinação (R^2) das isotermas de sorção a 25°C das bandejas expandidas com adição de diferentes resíduos agroindustriais ajustadas com o modelo de GAB.

Bandejas	X_{bs}	C	K	R^2
Padrão	0,034	1,03E+45	0,928	0,954
Sabugo de Milho	0,050	0,131	0,945	0,958
Palhada de Soja	0,039	0,477	0,934	0,973
Casca de Mandioca	0,040	45,078	0,949	0,990
Casca de Pinhão	0,035	1,645	0,924	0,991
Fiapo de Erva-Mate	0,050	-1,35E+45	0,965	0,978
Palito de Erva-Mate	0,037	0,673	0,955	0,991

X_{bs} = conteúdo de umidade em base seca da monocamada (g de umidade g^{-1} de massa seca); C = constante de Guggenheim fator de correlação para propriedades de sorção para a primeira camada; K = fator de correlação para propriedades das multicamadas (ZHANG e HAN, 2008).

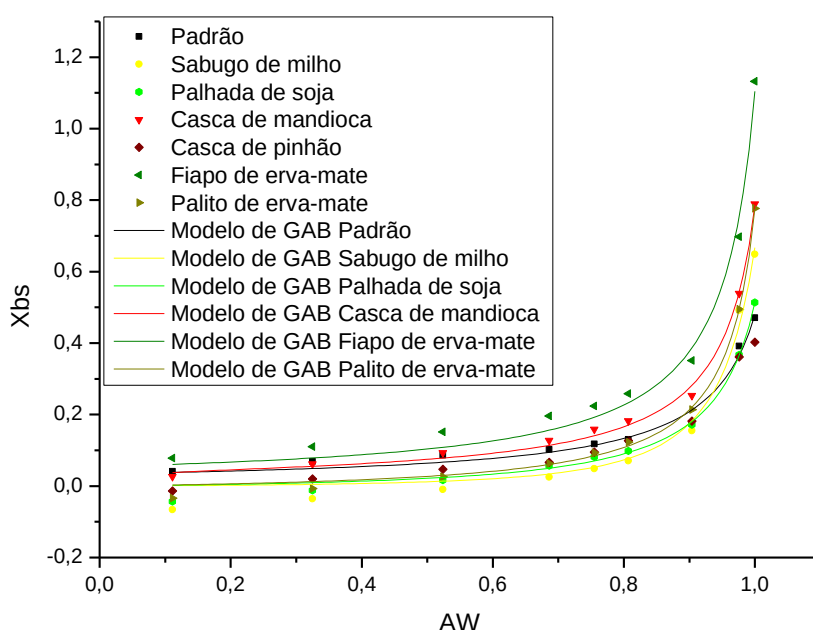
A quantidade de umidade adsorvida na monocamada pelas bandejas com adição de resíduos foi superior à das bandejas padrão, sendo as embalagens de Sabugo de milho e Fiapo de erva-mate as que apresentaram maiores valores de X_{bs} (Tabela 7).

As isotermas das bandejas demonstram comportamento do tipo III, apresentando formato gráfico côncavo, pois apresentam substâncias cristalinas solúveis em água como açúcares e sais, segundo a classificação de Brunauer et al. (1940), indicando formação de uma monocamada inicial posteriormente desenvolvendo multicamadas até espessura máxima (LABUZA; RAHMAN, 2007).

Foi observado que nas umidades relativas de 0,111 a 0,524 as bandejas apresentaram característica seca e quebradiça, já nas umidades superiores a 0,524 foi

possível notar um amolecimento da bandeja. Em a_w superior a 0,807 ocorreu desenvolvimento microbiológico de fungos sendo potencializado com o aumento da umidade relativa, assim não sendo recomendado o armazenamento das bandejas em locais úmidos (umidade relativa $> 0,8$).

Figura 2: Isoterma de sorção das bandejas expandidas com adição de diferentes resíduos agroindustriais



5.2.4. Cor das bandejas

A cor das bandejas apresentou grande influência da coloração dos resíduos (Tabela 8) sendo predominante a coloração apresentada por eles no produto final. As bandejas elaboradas com casca adicionada de pinhão apresentaram menor luminosidade $47,91 \pm 0,84$, sendo a formulação mais escura, assim como nos resíduos e a bandeja adicionada de sabugo de milho apresentou maior luminosidade dentre as bandejas com resíduo $75,32 \pm 0,52$, seguindo mesma tendência da bandeja adicionada de casca de pinhão, essa tendência foi observada para os parâmetros a^* e b^* também. Contudo, a bandeja padrão apresentou maior L , $81,39 \pm 0,50$, assim se aproximando mais do branco absoluto (100,00).

A bandeja de casca de pinhão apresentou maior a^* $8,82 \pm 0,12$, o que indica tons de vermelho na sua coloração, assim como as bandejas adicionadas de sabugo de milho

($1,41 \pm 0,13$), palhada de soja ($1,65 \pm 0,06$), casca de mandioca ($6,32 \pm 0,31$) e fiapo de erva-mate ($2,50 \pm 0,15$). Por outro lado, a bandeja padrão foi a que apresentou menor a^* $-0,18 \pm 0,12$, não destacando tonalidade nem para vermelho (+) nem para verde (-), por ser muito próxima de 0,00, o que também ocorreu com a bandeja adicionada de palito de erva-mate ($0,87 \pm 0,60$).

A coordenada b^* apresentou apenas valores positivos para todas as bandejas (Tabela 8), o que indica tonalidades de amarelo em sua composição de cor. A bandeja que teve maior tonalidade foi a de fiapo de erva mate $26,73 \pm 0,37$, e a com menor tonalidade de amarelo foi a Padrão a qual indicou $5,91 \pm 0,55$, as demais bandejas apresentaram tonalidades de amarelo na faixa de 12 a 25.

A cor das bandejas foi determinada principalmente pela coloração dos resíduos, sendo o único insumo que variou entre as formulações, e consequentemente resultou na diferença de cor entre cada tratamento.

Tabela 8: Cor instrumental (CIELAB) bandejas expandidas com adição de diferentes resíduos agroindustriais

Bandejas*	Cor		
	L	a^*	b^*
Padrão	$81,39 \pm 0,50^A$	$-0,18 \pm 0,12^F$	$5,91 \pm 0,55^F$
Sabugo de Milho	$75,32 \pm 0,52^B$	$1,41 \pm 0,13^D$	$18,44 \pm 0,26^D$
Palhada de Soja	$67,61 \pm 0,44^D$	$1,65 \pm 0,06^D$	$17,54 \pm 0,42^D$
Casca de Mandioca	$64,12 \pm 0,75^D$	$6,32 \pm 0,31^B$	$25,07 \pm 0,44^B$
Casca de Pinhão	$47,91 \pm 0,84^F$	$8,82 \pm 0,12^A$	$12,86 \pm 0,24^E$
Fiapo de Erva Mate	$69,19 \pm 1,31^E$	$2,50 \pm 0,15^C$	$26,73 \pm 0,37^A$
Palito de Erva Mate	$72,65 \pm 1,36^C$	$0,87 \pm 0,60^E$	$23,83 \pm 1,29^C$

*Média $\pm$ desvio padrão. Letras maiúsculas diferentes, na mesma coluna, diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

6. CONCLUSÃO

As embalagens de amido expandido são biodegradáveis e possuem grande potencial para a substituição, ao menos parcial, das embalagens produzidas com EPS. A adição de pelo menos 10% de resíduos agroindustriais permite o aumento de 58 a 90 vezes a resistentes à esforços de flexão das bandejas expandidas. Por outro lado, a presença de partículas proveniente dos resíduos aumentou a densidade e reduziu a resistência à tração e aumentou alongamento das bandejas expandida. Ainda, a quantidade de umidade

adsorvida na monocamada pelas bandejas aumentou com adição de resíduos, o que indica maior afinidade com a água destas embalagens, comparada com a padrão.

A variação das cores das bandejas indica a preservação dos resíduos, os quais podem ser considerados corantes naturais para a diversificação de opções de embalagens. Desta forma, o desenvolvimento deste tipo de embalagem amplia as possibilidades de produção de materiais não formadores de microplásticos, evitando assim a presença destes no solo, água e ar.

REFERÊNCIAS

- ANBUMANI, S., KAKKAR, P. Ecotoxicological effects of microplastics on biota: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v.25, p.14373-14396, 2018.
- ASTM INTERNACIONAL. **ASTM D882-12, método de teste padrão para propriedades de tração de folhas de plástico finas**. ASTM Internacional, 2012.
- ASTM, Internacional. Métodos de teste padrão para propriedades de flexão de plásticos não reforçados e reforçados e materiais de isolamento elétrico. **ASTM D790-07**, 2017.
- BIDUSKI, B. et al. Impact of acid and oxidative modifications, single or dual, of sorghum starch on biodegradable films. **Food Chemistry**, v. 214, p. 53–60, 2017.
- BRUNAUER, L.S.; DEMING, W.E.; DEMING, E.; TELLER, E. On a theory of the van der Waals adsorption of gases. **Journal of American Chemical Society**, v. 62, p. 1723-1732, 1940.
- CALLISTER J.W.D. Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução. **LTC**, ed. 5, 2002.
- CARNEIRO, T. M. Q. A.; SILVA, L. A.; GUENTHER, M. A poluição por plásticos e a Educação Ambiental como ferramenta de sensibilização. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**, São Paulo, v. 16, n. 6, p.285-300, 2021.
- CARPENTER, E. J.; ANDERSON, S. J.; HARVEY, G. R.; MIKLAS, H. P.; PECK, B. B.; **Science** **1972**, *178*, 749.
- CASTRO, Aline Machado de; PEREIRA JR, Nei. Produção, propriedades e aplicação de celulases na hidrólise de resíduos agroindustriais. **Química Nova**, v. 33, p. 181-188, 2010.
- CEREDA, M. P. **Culturas de tuberosas amiláceas latino-americanas**. São Paulo: Fundação Cargill, 2001.
- CHAUDHARY, A. L. et al. Amylose content and chemical modification effects on thermoplastic starch from maize - Processing and characterisation using conventional polymer equipment. **Carbohydrate Polymers**, v. 78, n. 4, p. 917– 925, 2009.
- CHONG, Ting Yen; LEI, Ming Chiat; CHAN, Yen San. The potential of lignocellulosic fiber from corn residues as an improved reinforced bioplastic composite. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 29, n. 2, pág. 363-381, 2021.
- CORDENUNSI, B. R.; MENEZES, E. W.; GENOVESE, M. I.; COLLI, C.; SOUZA, A. G.; LAJOLO, F. M. Chemical Composition and Glycemic Index of Brazilian Pine (Araucária angustifolia) Seeds. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, v. 52, n. 11, p. 3412–3416, 2004.

CREDOU, Julie; BERTHELOT, Thomas. Celulose: de material biocompatível a material bioativo. **Journal of Materials Chemistry B**, v. 2, n. 30, pág. 4767-4788, 2014.

CRUZ-TIRADO, Jam Pier et al. The addition of sugarcane bagasse and asparagus peel enhances the properties of sweet potato starch foams. **Packaging Technology and Science**, v. 32, n. 5, p. 227-237, 2019.

DA CRUZ, Juliana Cabral et al. Bandejas expandidas de amido de batata reforçadas com bagaço de malte. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 9, n. 9, pág. e875997630-e875997630, 2020.

DA POIAN, A. et al. **Bioquímica I**. v. 3. Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ, 2009. 210 p.

DAUDT, R. M. et al. Determination of properties of piñon starch: Analysis of its applicability as pharmaceutical excipient. **Industrial Crops and Products**, v. 52, p. 420–429, jan. 2016.

DE LIMA SILVA, Magno; DOS SANTOS SILVA, Wellyson Journey; PEREIRA, Allana Kellen Lima Santos. Aproveitamento de resíduos vegetais como alternativa na fabricação de embalagens biodegradáveis. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 86238-86250, 2020.

DE OLIVEIRA, Luisa Costa. Avaliação da aplicabilidade de farinha de sabugo de milho no enriquecimento de produtos alimentícios. **Nutrição Brasil**, v. 15, n. 1, p. 22-29, 2016.

DEBIAGI F.; IVANO L. R. P. F. M.; NASCIMENTO P. H. A.; MALI S. Embalagens biodegradáveis de amido reforçadas com fibras lignocelulósicas provenientes de resíduos agroindustriais. **BBR - Biochemistry and Biotechnology Reports**, v.1, n.2, p. 57- 67, jul./dez. 2012.

DÍAZ-MENDOZA, C., et al. Plastics and microplastics, effects on marine coastal areas: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v.27, p.39913-39922, 2020.

DRESCH, ALINE P. et al. Different treatments of pearl millet biomass for cellulose recovery: effects on lignocellulosic composition. **Cellulose Chemistry and Technology**, 57 (3-4), 227-236, dez. 2022.

DUARTE, Gabrielly et al. Substituição das bandejas de poliestireno por bandejas biodegradáveis a partir do amido de mandioca. 2017.

EMBRAPA. **Mandioca em números**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/congresso-de-mandioca-2018/mandioca-em-números>>. Acesso em: 04 jun. 2023.

ENGEL, Juliana Both; LUCHESE, Claudia Leites; TESSARO, Isabel Cristina. Making the reuse of agro-industrial wastes a reality for starch-based packaging sector: A storage case study of carrot cake and cherry tomatoes. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 206, p. 740-749, 2022.

ERIKSEN, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., ... Reisser, J. (2014). Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. **PLoS ONE**. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>.

FERREIRA, Ana M. et al. Biosourced disposable trays made of brewer's spent grain and potato starch. **Polymers**, v. 11, n. 5, p. 923, 2019.

GLENN, G. M.; ORTS, W. J.; NOBES, G. A. R. Starch, fiber and CaCo₃ effects on the physical properties of foams made by a baking process. **Industrial Crops and Products**, v. 14, n. 3, p. 201–212, 2001.

de

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/16/0?tipo=grafico&indicador=12718> Acesso em: 05 de jun.2023.

JÚNIOR, Eraldo Antonio Bonfatti; LENGOWSKI, Elaine Cristina; JÚNIOR, Aderbal Ludka. Mapeamento do processo produtivo de erva-mate. **Revista Internacional de Ciências**, v. 8, n. 1, p. 82-98, 2018.

KALAOGLU, O.; UNLU, C.H.; ATICI, O.G. Synthesis, characterization and electrospinning of corn cob cellulose-graft-polyacrylonitrile and their clay nanocomposites. **Carbohydrate Polymers**, v. 147, p. 37-44, 2016.

KNAPP, Mateus Antônio et al. Yerba mate extract in active starch films: Mechanical and antioxidant properties. **Journal of food processing and preservation**, v. 43, n. 3, p. e13897, 2019.

KOEHNLEIN, E. A. et al. Antioxidant Activities and Phenolic Compounds of Raw and Cooked Brazilian Pinhão (*Araucaria angustifolia*) Seeds. **African Journal of Food Science**, v.6 n.21, p. 512-518, 2012.

KUROZAWA, L. E., EL-AOUAR, A. A. MURR, F. E. X. Obtenção de isothermas de dessecção de cogumelo in natura e desidratado osmoticamente. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 25(4), p. 828–834, 2005.

LABUZA, T.P.; M.S. RAHMAN. Water Activity and Food Preservation, in Handbook of Food Preservation. **CRC Press**, p. 447-476, 2007.

- LONGHI, E. M. Desenvolvimento de espumas de amido de mandioca incorporadas com coproduto do beneficiamento do arroz para utilização como embalagens. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.
- MACHADO, Caroline Martins; BENELLI, Patrícia; TESSARO, Isabel Cristina. Sesame cake incorporation on cassava starch foams for packaging use. **Industrial crops and products**, v. 102, p. 115-121, 2017.
- MADRUGA, Marta Suely et al. Propriedades químicas, morfológicas e funcionais do amido de sementes de jaca brasileira (*Artocarpus heterophyllus* L.). **Química dos alimentos**, v. 143, p. 440-445, 2014.
- MAHARANA, T.; Negi, Y. S.; Mohanty, B. Review Article: Recycling of Polystyrene. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v.46, n.7, p.729-736, 2007.
- MALI, S. et al. Water sorption and mechanical properties of cassava starch films and their relation to plasticizing effect. **Carbohydrate Polymers**, 60 (3), p. 283–289, 2005.
- MARENGO, Vitor Almeida; VERCELHEZE, Ana Elisa Stefani; MALI, Suzana. Compósitos biodegradáveis de amido de mandioca e resíduos da agroindústria. **Química Nova**, v. 36, p. 680-685, 2013.
- MARTELLI-TOSI, M.; MASSON, M. M.; SILVA, N. C.; ESPOSTO, B. S.; BARROS, T. B.; ASSIS, O. B. G.; TAPIA-BLÁCIDO, D. R. Soybean straw nanocellulose produced by enzymatic or acid treatment as a reinforcing filler in soy protein isolate films. **Carbohydrate Polymers**, v. 198, p. 61-68, 2018.
- MARTELLI-TOSI, M.; TORRICILLAS, M. S.; MARTINS, M. A.; ASSIS, O. B. G.; TAPIABLÁCIDO, D. R. Using Commercial Enzymes to Produce Cellulose Nanofibers from Soybean Straw. **Journal of Nanomaterials**, v. 2016, p 1-10, 2016.
- MATSUI, Kátia Nicolau et al. Desenvolvimento de materiais biodegradáveis a partir do bagaço de mandioca. 2002.
- MUSCAT, D. et al. Comparative study of film forming behaviour of low and high amylose starches using glycerol and xylitol as plasticizers. **Journal of Food Engineering**, v. 109, n. 2, p. 189–201, 2012.
- PONGSA, Uraiwan et al. Properties of biodegradable foam composites made from coconut residue as a function of the reinforcing phase of cassava starch. **Engineering and Applied Science Research**, v. 50, n. 3, p. 270-277, 2023.
- REZENDE, S. C. D. **Valorização da casca do pinhão, um subproduto da semente de Araucária angustifolia, para produção de materiais poliméricos**. 2016. Dissertação

(Mestre em Qualidade e Segurança Alimentar) - Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior Agrária, Bragança.

RIBBA, L. , et al. Disadvantages of Starch-Based Materials, Feasible Alternatives in Order to Overcome These Limitations. **Starch-Based Materials in Food Packaging**, p. 37-76, 2017.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of food in desydration. In: RAO, M. A; RIZVI, S.S. Engineering Properties of Foods, p. 265-279, 1995.

ROBAK, Katarzyna; BALCEREK, Maria. Current state-of-the-art in ethanol production from lignocellulosic feedstocks. **Microbiological Research**, v. 240, p. 126534, 2020.

SALIM, S. Y., G. G. KAPLAN and K. L. MADSEN (2014). "Air pollution effects on the gut microbiota." **Gut Microbes** 5(2): 215 - 219.

SAMPER, MD et al. Reciclagem de poliestireno expandido de embalagens. **Progresso em Plásticos de Borracha e Tecnologia de Reciclagem**, v. 26, n. 2, pág. 83-92, 2010.

SCHMIDT, Vivian Consuelo Reolon et al. Desenvolvimento de bandejas biodegradáveis a partir de fécula de mandioca, fibra celulósicas e calcário. 2006.

SCHYNS, Zoé OG; SHAVER, Michael P. Reciclagem mecânica de embalagens plásticas: uma revisão. **Comunicações rápidas macromoleculares**, v. 42, n. 3, pág. 2000415, 2021.

SEKULA, N.; CÓRDOVA, K. R. V. Estudo do processo de extração de corante de cascas de pinhões. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 8, 2018. Ponta Grossa. SJÖQVIST, M.; BOLDIZAR, A.; RIGDAHL, M. Processing and water absorption behavior of foamed potato starch. **Journal of Cellular Plastics**, v. 46, n. 6, p. 497–517, 2010.

Silva F.C., Neto F.E.S.S., Silva M.M., Souza B.A., Araújo D.S., Souza L.C., Lemos T.O., Pereira A.L.F., Abreu V.K.G. Physico-chemical and Technological Functional Properties for Food Applications of Talinum paniculatum Flour for Food Applications. **GEINTEC**, v. 11, n. 1, pág. 1467, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.7198/geintec.v11i1.1467>. Acesso em: 18 jun. 2023.

SILVÉRIO, H.A.; NETO, W.P.F.; DANTAS, N.O.; PASQUINI, D. Extraction and characterization of cellulose nanocrystals from corncob for application as reinforcing agent in nanocomposites. **Industrial Crops and Products**, v. 44, p. 427-436, 2013.

SMITH, A. M. The biosynthesis of starch granules. **Biomacromolecules**, v. 2, n. 2, p. 335–41, jan. 2001.

- SOUZA, Sarah de Medeiros Pinheiro; DE LIMA DUTRA, Mariana Borges; GUTIÉRREZ, Alfredo Lázaro Ludeña. Desenvolvimento de bandeja biodegradável a partir de amido de milho e fibra da Moringa Oleífera Development of biodegradable tray from corn starch and Moringa Oleifera fiber. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 61213-61218, 2021.
- STORCK, Cátia Regina et al. Qualidade microbiológica e composição de farinhas de resíduos da produção de suco de frutas em diferentes granulometrias. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas-SP, v. 18, n. 4, p. 277–284, out./dez., 2015.
- Thompson, R.C., Olsen, Y., Mitchell, R.P., Davis, A., Rowland, S.J., John, A.W.G., McGonigle, D., Russell, A.E. Lost at Sea: where is all the plastic? *Science* 304, 838. 2004.
- VALENTE NABAIS, João et al. Remoção de poluentes em novos carvões ativados feitos de precursores lignocelulósicos. 2009.
- VELASCO, Valeria et al. Starch-based composite foam for chicken meat packaging. **Journal of Food Science and Technology**, v. 59, n. 12, p. 4594-4602, 2022.
- VERCELHEZE, A. E. S.; FAKHOURI, F. M.; DALL'ANTÔNIA, L. H.; URBANO, A.; YOUSSEF, E. Y.; YAMASHITA, F.; MALI, S. Properties of baked foams based on cassava starch, sugarcane bagasse fibers and montmorillonite. **Carbohydrate Polymers**, v. 87, n. 2, p. 1302–1310, 2012.
- VLACK, L. W. V. Princípios de Ciência dos Materiais. **Edgard Blücher**, ed. 13, pg. 2-13, 2000.
- WAN, C.; ZHOU, Y.; LI, Y. Liquid hot water and alkaline pretreatment of soybean straw for improving cellulose digestibility. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 10, p. 6254–6259, 2011.
- XU, J.; KRIETEMEYER, E. F.; BODDU, V. M.; LIU, S. X.; LIU, W. C. Production and characterization of cellulose nanofibril (CNF) from agricultural waste corn stover. **Carbohydrate Polymers**, v. 192, p. 202–207, 2018.
- YANG, J. et al. Preparation of recycled graphite/expanded polystyrene by a facile solvent dissolution method. **Journal of Materials Science**, v.54, p.1197-1204, 2019.
- ZHANG, Y.; HAN, J. H. Sorption isotherm and plasticization effect of moisture and plasticizers in pea starch film. **Journal of Food Science**, v. 73, n. 7, 2008.