



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE MATERIAIS



TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE AMIDO EM COMPÓSITOS EXPANDIDOS DE AMIDOS
TERMOPLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRA DE ERVA MATE**

Arthur Vila Dewes Machado
00262578

Professor Orientador: Prof. Dra. Ruth Marlene
Campomanes Santana

Porto Alegre, 2 de outubro de 2022.

Arthur Vila Dewes Machado

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE AMIDO EM COMPÓSITOS EXPANDIDOS DE AMIDOS
TERMOPLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRA DE ERVA MATE**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais

Orientador(a): Prof. Dra. Ruth Marlene Campomanes Santana

Porto Alegre, 2 de outubro de 2022.

RESUMO

Plásticos biodegradáveis têm grande importância atualmente por gerar impacto positivo ao substituir materiais de fontes fósil e não prejudicar o meio ambiente ao ser facilmente degradados por microrganismos. Os plásticos de amido estão dentre esses materiais sustentáveis e ganharam atenção nos últimos anos como possível candidato no uso de embalagens. Os plásticos de amido se encontram geralmente na forma de filmes ou espumas. Neste trabalho optou-se por produzir espumas de amido de diferentes fontes. Foram preparadas pastas de amido gelatinizado empregando água como agente plastificante e expansor, o glicerol foi adicionado na mistura atuando como co-plastificante. As pastas foram produzidas com amido de mandioca, batata e milho e foram levadas à prensa hidráulica com aplicação de calor utilizando um molde de formato quadrado. Foram também fabricadas espumas com adição de particulado de erva mate utilizado como reforço nos três tipos de amido. O intuito do estudo foi avaliar o efeito da adição da erva mate nas propriedades das espumas. Ensaio físicos e mecânicos foram realizados onde avaliou-se propriedades de absorção de umidade, ângulo de contato, densidade, cor das amostras, resistência ao impacto e à flexão. As espumas foram também observadas com microscópio óptico para ter sua estrutura superficial e celular analisadas. Os resultados das espumas de amido de mandioca reforçadas com erva mate foram os mais satisfatórios no quesito de absorção de umidade e resistência à flexão, pois tinham estrutura mais compacta que as espumas dos outros amidos. Para a batata e o milho, espumas com maior teor de reforço produziram amostras mais leves com maior tamanho de célula e com camada externa mais fina o que levou a propriedades mecânicas pobres em módulo de elasticidade da flexão e maior absorção de umidade medida no ensaio. Um controle rigoroso na produção desses materiais é de extrema importância para evitar falhas no material como vazios, descontinuidades, desuniformidade de células ou superficial e colapso de células.

Palavras-chave: espuma, mandioca, batata, milho, erva mate, absorção de umidade, flexão, impacto.

ABSTRACT

Biodegradable plastics have great importance in the current days for generating a positive impact replacing fossil-based materials and not damaging the environment being easily degraded by microorganisms. Starch-based plastics are among these sustainable materials and have been gaining attention in recent years as a possible candidate on packaging products. Starch-based plastics are generally produced in the form of films or foams. In this study, it was opted for producing starch foams of different sources. Gelatinized starch paste was prepared using water as a plasticizer and blowing agent. The pastes were produced with cassava starch, potato starch and cornstarch. They were taken to a hydraulic press while applying heat and using a square-shaped mold. Foams were also produced with the addition of yerba mate used as a fiber reinforcement in the three types of starch. The objective of the study was to analyze the effect of the additive on the properties of the foams. Physical and mechanical tests were conducted where the properties of moisture absorption, contact angle, density, color of the samples, impact and flexural resistance were evaluated. The foams were also observed under a microscope to have their superficial and cellular structures assessed. The results of the reinforced cassava starch foams were adequate on the matter of moisture absorption and flexural strength, since they had the most compact structure of all starch foams. For the potato and corn, foams with higher content of yerba mate produced lighter samples with larger cell size and thinner outer shell which led to poor mechanical properties on the Young's modulus and higher moisture absorption measured. A careful control on the fabrication of these material is of extreme importance to avoid material defects such as voids, discontinuities, non-uniformity of cells or on the surface and cellular rupture.

Keywords: foam, cassava, potato, corn, yerba mate, moisture absorption, flexural, impact.

LISTA DE TABELAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Polímeros utilizados nos diferentes processos de produção de espumas e suas aplicações..... | 15 |
| Tabela 2 - Proporção de amido em diferentes plantas, diâmetro e morfologia de seus grãos | 19 |
| Tabela 3 - Temperatura de gelatinização do amido proveniente de diferentes plantas e quantidade de amilose presente | 21 |
| Tabela 4 - Compostos bioativos encontrados na erva mate | 27 |
| Tabela 5 - Composição das espumas não reforçadas de amido de mandioca (MA), batata (BA) e milho (MI) | 31 |
| Tabela 6 - Composição das espumas reforçadas com fibra de erva mate..... | 32 |
| Tabela 7 - Parâmetros de produção das espumas em prensa hidráulica | 33 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1- Micrografias de espumas com (a) células fechadas e (b) células abertas . | 13 |
| Figura 2- Equipamento de extrusão de espumas poliméricas..... | 16 |
| Figura 3 - Equipamento em um processo de moldagem por injeção | 17 |
| Figura 4 - Cadeias que compõem o amido: amilose (linear) e amilopectina (ramificada) | 20 |
| Figura 5 - Método mecânico de formação de espumas | 23 |
| Figura 6 - Produção de espumas com agente de expansão físico..... | 24 |
| Figura 7 - Método químico de expansão com (a) agente de expansão e por (b) reação química..... | 24 |
| Figura 8 - Unidade de repetição das cadeias de celulose..... | 26 |
| Figura 9 - a) Erva mate usada na composição das espumas reforçadas; b) Peneiramento das fibras de erva mate..... | 29 |
| Figura 10 - Bandeja de EPS comercial utilizada para caracterização..... | 29 |
| Figura 11- Fluxograma das etapas de produção de espumas neste estudo..... | 30 |
| Figura 12 – Processo de mistura com batedeira para produção das pastas de amido | 31 |
| Figura 13 - Molde utilizado para produção das espumas..... | 32 |
| Figura 14 - Prensa hidráulica com aquecimento nas placas | 33 |
| Figura 15 - Sistema utilizado para ensaio de absorção de umidade..... | 34 |
| Figura 16 - Ensaio de ângulo de contato utilizando suporte para a seringa e o microscópio óptico..... | 35 |
| Figura 17 - Diagrama da variação dos parâmetros de cor L^* , a^* e b^* | 36 |
| Figura 18 - a) Equipamento do ensaio de tração; b) Amostra posicionada para ensaio; c) Corpo de prova utilizado no ensaio..... | 37 |
| Figura 19 - Equipamento do ensaio de tração em espumas | 37 |
| Figura 20 - a) Pasta de amido de mandioca; b) Pasta de amido de batata; c) Pasta de amido de milho com 5% de erva mate | 39 |
| Figura 21 - Densidade aparente das amostras de espuma de amido e EPS..... | 40 |
| Figura 22 - Amostras das espumas de amido de mandioca com diferentes teores de erva mate | 41 |
| Figura 23 - Amostras das espumas de amido de (a) batata e (b) milho com diferentes teores de erva mate | 42 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 24 - Curvas de absorção de umidade por tempo das amostras de amido e EPS | 42 |
| Figura 25 - Ângulo de contato das espumas de amido e EPS | 44 |
| Figura 26 - Imagens do ensaio de ângulo de contato das espumas de mandioca | 45 |
| Figura 27 - Imagens do ensaio de ângulo de contato das espumas de batata | 46 |
| Figura 28 - Imagens do ensaio de ângulo de contato das espumas de milho | 47 |
| Figura 29 - Resultados de colorimetria das espumas de amido, parâmetros L^* , a^* , b^* e <i>gloss</i> | 48 |
| Figura 30 - Fotografias das amostras de amido de (a) mandioca, (b) batata e (c) milho..... | 49 |
| Figura 31 - Resultados de impacto de Izod das amostras de amido e EPS..... | 50 |
| Figura 32 - Resultados de impacto das espumas de amido normalizados pela densidade das amostras | 51 |
| Figura 33 - Resultados de módulo de elasticidade da flexão das espumas de amido e EPS | 52 |
| Figura 34 - Módulo de elasticidade da flexão normalizado pela densidade das amostras de amido | 52 |
| Figura 35 - Amostras de amido batata com 10% de erva mate após ensaio de flexão | 53 |
| Figura 36 - Amostra de EPS no ensaio de flexão..... | 54 |
| Figura 37 - Microscopia óptica da superfície das espumas de amido | 55 |
| Figura 38 - Microscopia óptica das células das espumas de amido..... | 56 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|-------------------------------------|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 9 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 11 |
| 2.1 | Objetivos gerais..... | 11 |
| 2.2 | Objetivos específicos..... | 11 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 12 |
| 3.1 | Espumas Poliméricas | 12 |
| 3.2 | Polímeros sintéticos | 14 |
| 3.3 | Materiais de origem natural | 18 |
| 3.3.1 | Amido | 19 |
| 3.4 | Plastificante | 21 |
| 3.5 | Agente de expansão..... | 23 |
| 3.6 | Fibras | 25 |
| 3.6.1 | Erva mate | 26 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 29 |
| 4.1 | Materiais..... | 29 |
| 4.2 | Produção da pasta | 30 |
| 4.3 | Expansão da espuma..... | 32 |
| 4.4 | Ensaio Físicos | 34 |
| 4.4.1 | Densidade aparente | 34 |
| 4.4.2 | Absorção de umidade..... | 34 |
| 4.4.3 | Ângulo de contato..... | 35 |
| 4.4.4 | Colorimetria | 35 |
| 4.5 | Ensaio Mecânicos..... | 36 |
| 4.5.1 | Impacto Izod..... | 36 |
| 4.5.2 | Resistência à flexão | 37 |
| 4.6 | Morfologia..... | 38 |
| 4.6.1 | Microscopia Óptica..... | 38 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 39 |
| 5.1 | Pastas de amido..... | 39 |
| 5.2 | Densidade aparente | 40 |
| 5.3 | Absorção de umidade..... | 42 |
| 5.4 | Ângulo de contato..... | 43 |

| | | |
|----------|----------------------------|-----------|
| 5.5 | Colorimetria | 48 |
| 5.5 | Impacto Izod | 50 |
| 5.6 | Resistência à flexão | 51 |
| 5.7 | Microscopia Óptica | 54 |
| 6 | CONCLUSÃO | 58 |

1 INTRODUÇÃO

O mercado de embalagens plásticas se desenvolveu e cresceu durante vários anos, tendo um aumento considerável no ano de 2020, com 6,8% de crescimento na sua produção comparado ao ano anterior e sendo o ramo que mais gera emprego no seu setor (ABRE, 2020). Os materiais plásticos ocupam a maior parte da fatia no mercado de embalagens devido à sua alta versatilidade aliado ao baixo custo de produção. Características como leveza, durabilidade, maleabilidade, fácil processamento e resistência química e microbiana tornam os materiais plásticos extremamente atraentes para diversas aplicações no ramo de embalagens e outros itens descartáveis.

Apesar de suas ótimas propriedades, os plásticos tendem a ser facilmente descartados na natureza, gerando forte impacto ambiental, pois devido a seu baixo peso, esses materiais são levados por correntes de ventos e chuva, escapando de aterros e indo parar em corpos de água. No Brasil, em 2020, o descarte de resíduo plástico foi de 13,35 milhões de toneladas o que corresponde a 16,8% de todo resíduo gerado no país, ficando somente atrás dos resíduos de matéria orgânica (ABRELPE, 2020).

Apenas uma pequena porção do plástico descartado é reciclada devido à falta de lucratividade do setor e a baixa qualidade do material pós reciclagem. No ano de 2020, foram reciclados 23,1% dos resíduos plásticos gerados (MAXI QUIM, 2021). Alternativas para a disposição dos resíduos são aterros sanitários e incineração que, junto à reciclagem, são considerados formas de administração eficazes.

Em decorrência da alta geração desses resíduos e baixa taxa de reciclagem deles, tentativas de substituir os plásticos convencionais por plásticos biodegradáveis vêm crescendo no número de pesquisas e nos empreendimentos. Uma das grandes apostas da pesquisa hoje está nos plásticos a base de amido, componente essencial das plantas para estocagem de glicose com a finalidade de reserva de energia. O amido está presente em abundância em alimentos como milho, batata, mandioca, arroz, trigo, entre outros. Além de acessível, o amido tem baixo custo e fácil processamento, tendo também uma ótima biodegradabilidade o que o torna um ótimo candidato a substituto dos plásticos convencionais.

Um dos tipos de embalagem convencionais que são bastante utilizados e podem ser substituídas pelo amido são as de isopor (EPS, poliestireno expandido),

material poroso que além de leve possui baixa condutividade térmica, o que garante uma boa aplicação em embalagens de estabelecimentos com serviço de tele-entrega. Esse material, no entanto, assim como os demais plásticos, não tem alta taxa de reciclagem, já que a sua baixa densidade o torna um material não atrativo economicamente para o processo.

Para contornar o problema, o amido pode facilmente ser processado em forma de espuma utilizando somente água como agente expensor e glicerol como agente co-plastificante. Entretanto, devido ao caráter hidrofílico do amido, suas propriedades mecânicas e durabilidade são comprometidos com essa composição e, portanto, utilizam-se aditivos e reforços na estrutura para que se torne mais interessante a adoção desse material nos produtos de embalagens. Ao incorporar outros materiais na estrutura, forma-se um material compósito com propriedades melhoradas em comparação ao material original. Materiais compósitos são uma classe de materiais que emprega a união de dois os mais tipos de materiais na escala macroscópica onde geralmente um é tratado como a matriz e o outro como reforço.

Os reforços mais comuns a serem empregados em produtos biodegradáveis são as fibras de origem natural. As fibras além de desempenhar a função de reforço na estrutura, melhorando as propriedades mecânicas, têm efeito sobre a absorção de água do produto, o que é desejável para a aplicação em embalagens. Fontes de fibras, assim como as de amido estão muito presentes na natureza já que essas têm função estrutural importante nas plantas.

A erva mate é retirada das plantas *Ilex paraguariensis* e está presente em diversos países da América do Sul. Além de possuir fibras naturais, essa planta conta com diversos compostos fenólicos com propriedades bioativas como antioxidantes, antimicrobianas e antiparasitários que podem ser interessantes na aplicação em embalagens.

Tendo analisado os problemas relacionados ao descarte dos plásticos convencionais e visando um desenvolvimento de produtos sustentáveis, o presente trabalho propõe a produção e comparação de espumas de diferentes amidos utilizando como reforço de erva mate com intuito de adequar as propriedades do produto à sua aplicação como embalagem.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Avaliar a influência da incorporação de erva mate como aditivos na expansão e desempenho de espuma de diferentes fontes de amido com o intuito de agregar nas propriedades da espuma e na expansão delas.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar as propriedades mecânicas das espumas (flexão e impacto);
- Avaliar a higroscopicidade das espumas através das propriedades físicas de absorção de umidade e ângulo de contato;
- Avaliar a influência da erva mate nas propriedades da espuma;
- Avaliar a influência da fibra vegetal na estrutura celular das espumas;
- Determinar o teor ótimo de reforço.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Espumas Poliméricas

As espumas poliméricas, também denominadas de espumas plásticas, plástico expandido ou plástico celular são estruturas poliméricas que consistem em uma fase sólida e uma fase gasosa (GAMA; FERREIRA; BARROS-TIMMONS, 2018). Essa classe de materiais possui diversas aplicações no cotidiano, já que suas características são atraentes tanto para a indústria como para o uso domiciliar. As principais vantagens no seu uso são a sua baixa densidade e bom isolamento térmico, possuindo também uma baixa constante dielétrica. As desvantagens das espumas poliméricas são a perda nas suas propriedades mecânicas, quando comparadas a outros plásticos maciços, e a variação de densidade entre peças resultante do seu processo de produção (GEORGEDROBNY, 2014).

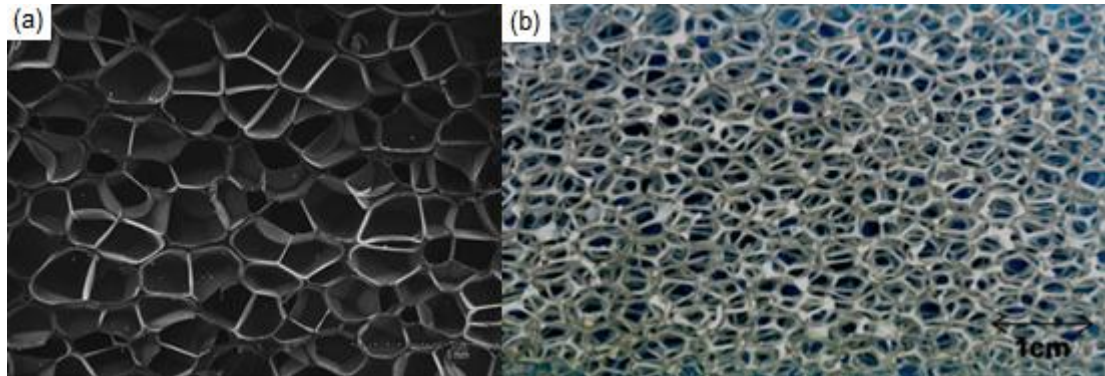
Quanto a divisão das espumas plásticas, estas podem ser colocadas em duas categorias, as termorrígidas e termoplásticas. Polímeros termorrígidos são aqueles na qual a polimerização é irreversível, causada por reação química ou calor onde o material resultante é infusível e insolúvel. Os polímeros termofixos podem ainda ser rígidos ou flexíveis e são materiais mais difíceis de se reciclar (PACHORI et al., 2019).

Os polímeros termoplásticos são formados de cadeias lineares e sofrem deformação por calor. Podem ser ainda divididos em cristalinos, semicristalinos e amorfos e possuem maior facilidade na sua (PACHORI et al., 2019). Dentro desses grupos, as espumas poliméricas podem ainda ser diferenciadas quanto a outros aspectos como sua composição, morfologia celular e outras características físicas ou de propriedades térmicas (HENRIQUES et al., 2020).

Outra classificação das espumas plásticas se refere às características das células da estrutura, podendo ser categorizadas entre células fechadas e células abertas, sendo essas características influenciadas pelas propriedades do material da espuma e das condições do processamento. As células abertas apresentam uma matriz com células conectadas através de toda a estrutura onde gases e líquidos podem permear. Células fechadas são formadas de células individuais de formato poliédrico separadas por membranas de paredes celulares. As células irão conter gases se o polímero da matriz for impermeável ao gás utilizado na formação das

células (OBI, 2017; CAO; ZHANG; LU, 2021; GEORGEDROBNY, 2014). Na Figura 1 pode-se observar micrografias de espumas com essas diferentes características celulares.

Figura 1- Micrografias de espumas com (a) células fechadas e (b) células abertas



(GUPTA; PINISETTY; CHAKRAVARTHY SHUNMUGASAMY, 2013)

O Teor de Células Fechadas (TCF) é um parâmetro que afeta diretamente as propriedades das espumas. Tipicamente, espumas com maior TCF possuem menor condutividade térmica, baixa absorção de água e mais alta resistência mecânica. Em contraponto, as desvantagens desses materiais são o maior preço e maior densidade em comparação com as espumas de células abertas (IBERIA, [s.d.]; GUPTA et al., 2014).

Dentre as propriedades das espumas poliméricas, a baixa condutividade térmica tem um papel importante nas suas aplicações. A condução de calor no material é reduzida pela dispersão da fase gasosa na estrutura. Os mecanismos de condução de calor nas estruturas celulares são: condução através da fase sólida, condução entre fase sólida e gasosa, convecção através da fase gasosa e radiação. Características como densidade, espessura da parede celular e tamanho dos poros são fatores que influenciam na condutividade térmica do material (REZGAR et al., 2019).

É estimado que a produção mundial de espumas atinja o valor de 37.254 mil toneladas em 2026 (The Future of Polymer Foams to 2026, [s.d.]). As espumas plásticas são aplicadas na indústria de automotivos, eletrônicos, calçados, aeroespacial, construção civil e embalagens devido às propriedades anteriormente mencionadas (GAMA; FERREIRA; BARROS-TIMMONS, 2018).

3.2 Polímeros sintéticos

Para a produção de espumas podem ser usados uma gama de polímeros, dentre eles, alguns dos mais comuns são o poliuretano (PU), poliestireno (PS), polietileno (PE), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC) e o copolímero de etileno-co-acetato de vinila (EVA). Na produção mundial de espumas, os polímeros mais empregados são o PU seguido do PS e do PVC (GAMA; FERREIRA; BARROS-TIMMONS, 2018).

O processo de produção de espumas consiste em três etapas: nucleação de célula, crescimento de célula e estabilização de célula. A etapa de nucleação, também chamada de iniciação, pode ser considerada como a formação das descontinuidades no material. Posteriormente, determinadas condições favorecem o crescimento das células, sendo a força motriz para a expansão o diferencial entre pressão interna, exercida pelo agente de expansão, e pressão externa, a qual o fundido está submetido (GEORGEDROBNY, 2014). Essa diferença de pressão (ΔP) é altamente influenciada pela tensão superficial do fundido (γ) e raio da célula (r) na razão indicada abaixo.

$$\Delta P = 2\gamma/r \quad (1)$$

Para a tensão superficial do material, existem diferentes parâmetros que a influenciam: tipo de polímero, pressão de trabalho e aditivos presentes na mistura. A complexidade do crescimento de célula é devido às mudanças das propriedades do fundido durante o processamento da espuma, sendo uma delas a viscosidade do material. Como pode ser observado na equação, a diferença de pressão é maior quanto menor for o tamanho das células. Ao final do processo a espuma requer estabilização das células devido à instabilidade na estrutura gerada pela etapa de crescimento que aumenta a área superficial do fundido (GEORGEDROBNY, 2014).

Alguns dos processos utilizados na produção das espumas poliméricas são: extrusão, moldagem por injeção, moldagem por compressão, moldagem por sopro, rotomoldagem e termoformagem (GEORGEDROBNY, 2014). Os polímeros utilizados para diferentes tecnologias de processamento e suas aplicações são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Polímeros utilizados nos diferentes processos de produção de espumas e suas aplicações

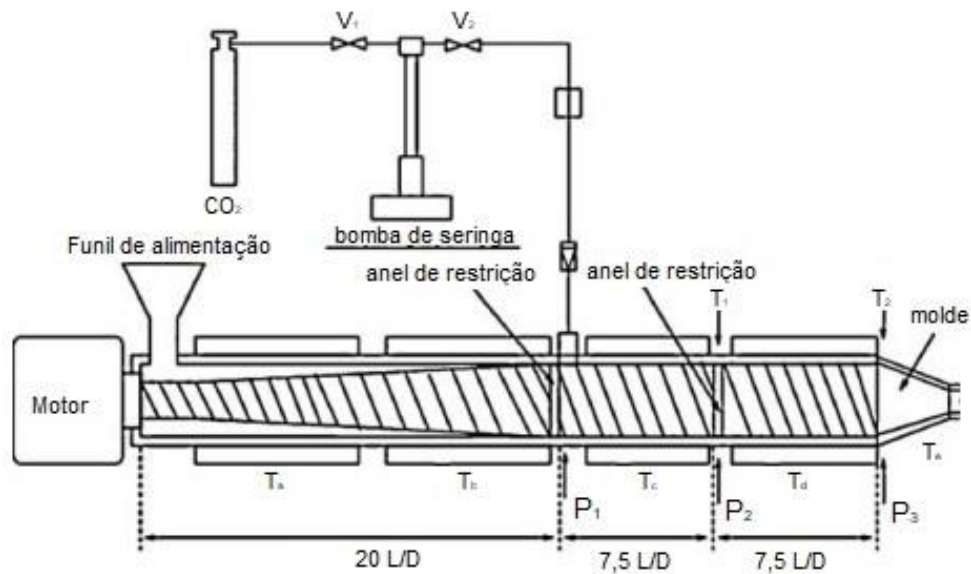
| Tecnologia | Polímeros | Aplicações |
|-------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Expansão química | Poliuretano (PU), fenólicos | Mobília, empacotamento, construção, automotivo, brinquedos, artigos esportivos |
| Extrusão | PS, PE, PP, PVC, PET | Construção, empacotamento, embalagens alimentícias, medicina, decoração |
| Moldagem por injeção | PS, PP, PE | Automotivo |
| Moldagem por compressão | PS, PP, Polietileno reticulado (XPE) | Empacotamento, embalagens alimentícias, termoformagem |

(OBI, 2017) ADAPTADO

A exemplo da extrusão, as etapas do processo são a extrusão, a mistura, o resfriamento, a expansão e o envelhecimento (GEORGEDROBNY, 2014). Geralmente, no processo de extrusão, as espumas são obtidas com a aplicação de um agente de expansão químico ou físico (SAUCEAU et al., 2011; MARIAM AL-ALI ALMA'ADEED; IGOR KRUPA, 2016). A utilização de agentes físicos de expansão é preferencial à de agentes químicos onde ocorre a geração de resíduos gasosos e devido à restrição de alguns componentes do método químico (MARIAM AL-ALI ALMA'ADEED; IGOR KRUPA, 2016).

Um processo por extrusão com CO₂ como agente de expansão foi realizado utilizando uma extrusora dividida em três secções, a primeira com uma relação de comprimento e diâmetro de 20 e as subsequentes com uma relação de 7,5. Entre cada secção havia contido um anel de restrição com função de aumentar a pressão local e conter o refluxo de CO₂. O polímero é introduzido no funil de alimentação e é fundido na primeira secção da extrusora, passando pela segunda e terceira secção sobre pressão onde é finalmente forçado pelo molde. Ao serem alcançadas condições estáveis, o extrudado é coletado e resfriado. A Figura 2 ilustra o equipamento de extrusão do processo mencionado (SAUCEAU et al., 2011).

Figura 2- Equipamento de extrusão de espumas poliméricas

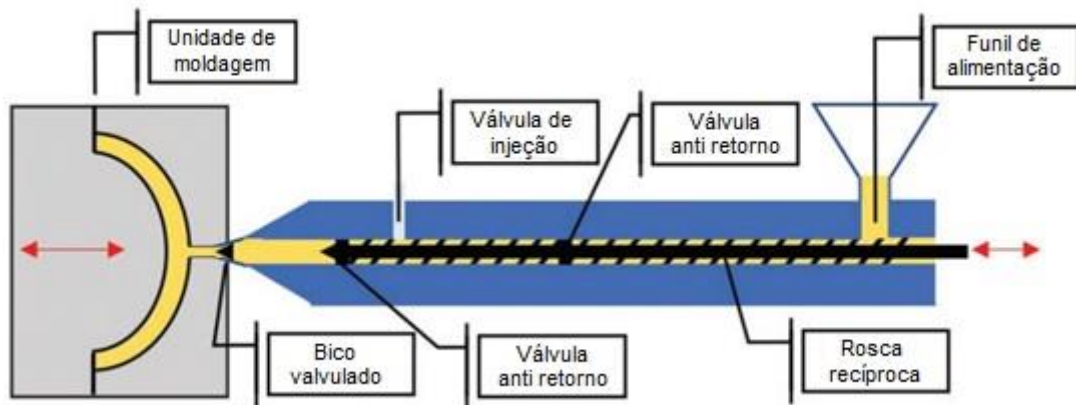


(SAUCEAU et al., 2011) ADAPTADO

No processo de moldagem por injeção, uma peça complexa e com boa qualidade superficial pode ser produzida de forma rápida e automatizada. O custo de maquinário e dos moldes torna o processo mais caro, porém com a fabricação de peças acabadas de geometria complexa sem necessidade de acabamento adicional. (OBI, 2017). Assim como no processamento por extrusão, podem ser usados dois tipos de agentes de expansão: físico e químico (DING et al., 2021).

Na injetora, o material plástico é fundido e forçado mecanicamente para dentro de um molde fechado que define o formato da peça. O material é resfriado e o molde, composto de duas partes, é aberto para a extração da peça (GEORGEDROBNY, 2014). O agente de expansão é inserido dissolvendo-se no fundido e, após a injeção no molde, a queda de pressão produz a nucleação e o crescimento de célula. Parâmetros importantes desse processo são a temperatura de injeção, pressão de injeção, velocidade de injeção, temperatura do molde, tempo de residência e tempo de resfriamento. As características da peça são dependentes do polímero utilizado, design do molde e condições do (JIN et al., 2019). A Figura 3 demonstra o equipamento utilizado para a moldagem de espumas por injeção com seus respectivos componentes.

Figura 3 - Equipamento em um processo de moldagem por injeção



(LLEWELYN et al., 2020) ADAPTADO

Outra tecnologia de fabricação de espumas é o de moldagem por sinterização, menos utilizado que os anteriores, porém com espaço no mercado de automotivos pela produção de espumas com baixa densidade e produção de artigos em formato livre (RAPS et al., 2015). Neste processo, ocorre a sinterização de esferas que podem ser esferas expansíveis ou pré-expandidas. As esferas expansíveis contêm agentes de expansão que são incorporadas durante a polimerização delas. Essa adição pode ser realizada com o uso de uma autoclave de alta temperatura e pressão ou incluindo o agente de expansão no fundido durante o processo de extrusão com o controle da temperatura. Esferas expansíveis são mais usadas para espumas de PS, enquanto esferas pré-expandidas são utilizadas em espumas de PP, PE e PS (ZHANG et al., 2021). Estes materiais são amplamente empregados nesse tipo de processamento pela maior facilidade de sinterização desses polímeros.

Peças produzidas por moldagem por sinterização possuem ótimo isolamento térmico, resistência ao calor, resistência ao impacto e absorção de energia. Espumas de PP fabricadas utilizando esse método são empregadas em peças automobilísticas leves com a finalidade de absorção de energia, como em para-choques. A baixa densidade dessa espuma é atrativa para essa aplicação, pois resulta diretamente na economia de combustível do veículo e de matéria-prima em sua fabricação (ZHANG et al., 2021; RAPS et al., 2015).

Recentemente, desenvolvimentos de espumas com poliuretano termoplástico (TPU) têm sido realizadas utilizando moldagem por sinterização. Um estudo utilizou esferas de TPU expandido (ETPU) para produzir lâminas de espuma empregando

CO₂ como agente expensor. Pressões de trabalho maiores resultaram numa maior nucleação, o que gerou maior número de células com células menores, enquanto um acréscimo na temperatura aumentou a viscosidade do polímero produzindo espumas com células maiores e um menor número total de células (ZHANG et al., 2021).

A característica de não biodegradabilidade dos materiais sintéticos utilizados na fabricação de espumas levanta preocupações com respeito a questões ambientais e descarte dos resíduos gerados após vida útil dos produtos. Em virtude disso, há maior busca pelo desenvolvimento de materiais poliméricos de origem natural e biodegradáveis que possam substituir os empregados atualmente (PACHORI et al., 2019).

3.3 Materiais de origem natural

Materiais de origem biológica como poliácido láctico (PLA), amido e celulose têm sido estudados a fim de substituir polímeros sintéticos. Por sua origem natural, alguns destes materiais são também biodegradáveis e, portanto, especialmente atrativos no uso de embalagens (PACHORI et al., 2019).

Poliácido láctico (PLA) é um poliéster alifático linear derivado de fontes renováveis como milho e cana-de-açúcar por meio da fermentação do amido proveniente destas plantas (PACHORI et al., 2019; MARIAM AL-ALI ALMA'ADEED; IGOR KRUPA, 2016). Possui ótimas propriedades mecânicas, rigidez, biocompatibilidade e é resistente a graxas e óleos. As desvantagens do PLA são sua fragilidade, baixa resistência térmica e a solventes, sensibilidade à umidade e alto custo quando comparado aos polímeros originados do petróleo (MARIAM AL-ALI ALMA'ADEED; IGOR KRUPA, 2016).

Para a fabricação de materiais expandidos, o PLA apresenta alguns desafios na obtenção de espumas com alta razão de expansão. O PLA tem baixa resistência no seu fundido e isso resulta em ruptura das células. Além disso, a taxa de cristalização do PLA é lenta e de difícil controle o que resulta em baixo número de células e morfologia não uniforme. Por último, o material tem baixa estabilidade e suas propriedades são bastante sensíveis à temperatura e ao tempo de processamento (LI et al., 2018; LI et al., 2021).

Um pré-tratamento isotérmico do PLA foi realizado a fim de melhorar as propriedades do fundido e induzir cristalização a frio. Os resultados de microscopia

eletrônica de varredura (MEV), calorimetria diferencial de varredura (DSC) e difração de raios X demonstram que o pré-tratamento resulta em uma maior expansão do material, melhor morfologia e mais alta cristalinidade da estrutura (LI et al., 2021).

3.3.1 Amido

O amido é um polímero de origem natural encontrado nas plantas e usado por elas como reserva de energia (MARIAM AL-ALI ALMA'ADEED; IGOR KRUPA, 2016). Predominantemente, o amido é obtido em grãos cereais, raízes e tubérculos, mas também pode ser encontrado em leguminosas como grão de bico e feijões. As propriedades do amido variam consideravelmente de acordo com a sua fonte, assim como o formato e tamanho dos seus grãos (JOYE, 2019). O percentual de amido em diferentes plantas e a morfologia dos grãos são indicados na Tabela 2.

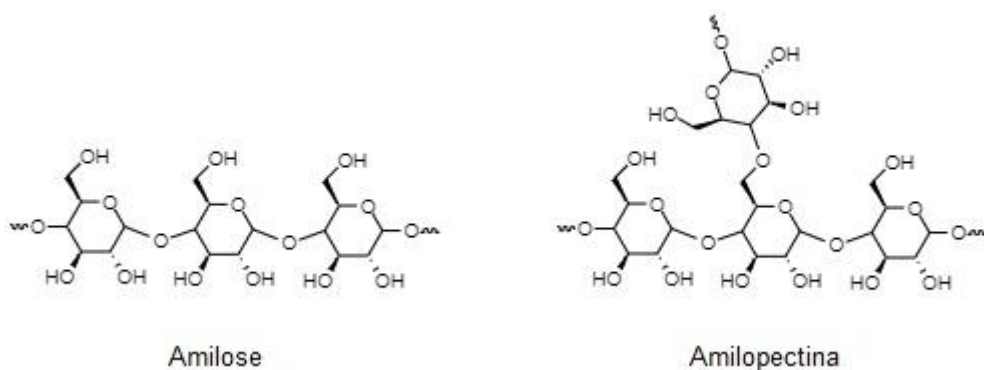
Tabela 2 - Proporção de amido em diferentes plantas, diâmetro e morfologia de seus grãos

| Planta | Amido (%) | Morfologia do amido | Diâmetro do grão (μm) |
|------------------|------------------|----------------------------|----------------------------------------------------|
| Trigo | 72 | Lenticular | 15 – 40 |
| | | Esférico | 1 – 40 |
| Cevada | 74 | Lenticular | 20 – 40 |
| | | Esférico | 2 – 10 |
| Aveia | 56 | Poliédrico | 2 – 10 |
| Milho | 80 | Poliédrico a esférico | 5 – 30 |
| Arroz | 76 | Poliédrico | 3 – 6 |
| Batata | 10 – 25 | Lenticular | 10 – 110 |
| Mandioca | 25 – 30 | Oval a redondo | 3 – 43 |
| Grão de bico | 35 | Oval a redondo | 20 |
| Feijão (carioca) | 30 | Oval a redondo | 20 |

(JOYE, 2019) ADAPTADO

Os grãos de amido são compostos de dois tipos de cadeia: a amilose e a amilopectina. A amilose é um polímero formado por moléculas de D-glicose unidas por ligações α -1,4. Sua cadeia pode ser considerada linear, apesar de conter algumas poucas ramificações. Moléculas de amilose tendem a formar estruturas helicoidais. A amilopectina também é formada de D-glicose como unidade de repetição, porém possui uma estrutura mais ramificada com ligações do tipo α -1,6 em sua cadeia que forma hélices duplas. A amilopectina possui alta massa molecular. Essas duas cadeias compõem a maior porcentagem do amido, porém podem estar presentes outros componentes principalmente lipídios como lisofosfolipídios e ácidos graxos livres (JOYE, 2019).

Figura 4 - Cadeias que compõem o amido: amilose (linear) e amilopectina (ramificada)



Fonte: elaborado pelo autor

Tipicamente, o amido não pode ser diretamente processado em materiais plásticos (JOYE, 2019). Para modificar o amido e aumentar sua capacidade de processamento, deve-se romper sua estrutura cristalina adicionando-se água juntamente com agitação mecânica e aumento de temperatura em um processo denominado de gelatinização ou gelificação. Essa ruptura das estruturas ordenadas é conhecida como transição ordem-desordem. A água misturada à massa de amido forma ligações de hidrogênio com as cadeias, já que estas contêm grupos de hidroxila livres em sua estrutura (GONZÁLEZ; VILLANUEVA, 2011) (MARIAM AL-ALI ALMA'ADEED; IGOR KRUPA, 2016).

Tabela 3 - Temperatura de gelatinização do amido proveniente de diferentes plantas e quantidade de amilose presente

| Planta | Amilose (%) | Temperatura de gelatinização (°C) |
|---------------|--------------------|------------------------------------------|
| Trigo | 26 – 31 | 58 – 62 |
| Cevada | 22 – 29 | 51 – 60 |
| Aveia | ~ 27 | 53 – 59 |
| Milho | 25 – 28 | 62 – 87 |
| Arroz | 0 – 33 | 62 – 79 |
| Batata | 19 – 23 | 62 – 66 |
| Mandioca | 18 – 25 | 60 – 65 |

(JOYE, 2019) ADAPTADO

Inicialmente, o amido foi introduzido na indústria dos polímeros como um *filler* para diminuir os custos e biodegradabilidade dos plásticos convencionais. Desenvolvimentos na plastificação e processamento do amido levaram o uso de sistemas com base no amido para propósitos diferentes (GONZÁLEZ; VILLANUEVA, 2011). Os materiais produzidos com o amido são biodegradáveis e de baixo custo, porém têm propriedades pobres e susceptibilidade à água o que acaba focando sua utilização em aplicações de baixa performance (JOYE, 2019). Uma das aplicações mais interessantes do amido é em embalagens devido a estas terem utilização de curto prazo combinando com o caráter biodegradável do amido. Com o objetivo de melhorar essas propriedades, os materiais com base em amido têm sido desenvolvidos juntamente com outros polímeros biodegradáveis como, por exemplo, o PLA e com diferentes compostos biodegradáveis como plastificantes, poliésteres e fibras (JOYE, 2019; GONZÁLEZ; VILLANUEVA, 2011).

3.4 Plastificante

Um plastificante é tipo de aditivo usado para aumentar a flexibilidade de materiais. A plastificação de polímeros modifica as propriedades térmicas, mecânicas e de barreira destes materiais. Os plastificantes atuam reduzindo forças intermoleculares ao longo das cadeias poliméricas e, portanto, aumentam o volume livre e facilitam o movimento das moléculas. Em razão disso, os plastificantes melhoram a processabilidade dos plásticos, diminuindo sua temperatura de processamento (BYUN; ZHANG; GENG, 2014).

São considerados dois tipos de mecanismos de plastificação: interna e externa. A plastificação interna ocorre quando o polímero é modificado quimicamente ou é fabricado por meio da copolimerização. No caso da adição de plastificantes ao polímero sem ocorrência de ligação química, o mecanismo é chamado de plastificação externa. De forma geral, ao aumentar a quantidade de plastificantes no polímero a temperatura de transição vítrea do material diminui. (BYUN; ZHANG; GENG, 2014).

A maioria dos plastificantes hoje no mercado são utilizados para plastificação do PVC (BYUN; ZHANG; GENG, 2014; GODWIN, 2011). Exemplos de plastificantes do PVC são dioctil ftalato (DOP), diisooctil ftalato (DIOP) e diisodecil ftalato (DIDP). Para os polímeros de origem biológica, podem ser usados como plastificantes uma grande variedade de compostos como monossacarídeos, oligossacarídeos, polióis, lipídios e água (BYUN; ZHANG; GENG, 2014).

Os plastificantes que se encaixam na categoria de lipídios são por exemplo ácidos graxos, lecitina, óleos e graxas. Esses componentes são utilizados tipicamente para revestimentos comestíveis. A vantagem em se utilizar plastificantes lipídicos é a diminuição da permeabilidade de vapor d'água no material. Dos lipídios, as ceras são as que possuem melhores resultados quanto a essa propriedade de barreira, o que é benéfico no uso em embalagens. Entretanto, há perda de propriedades mecânicas, devido à falta de integridade coesiva estrutural dos lipídios (BYUN; ZHANG; GENG, 2014).

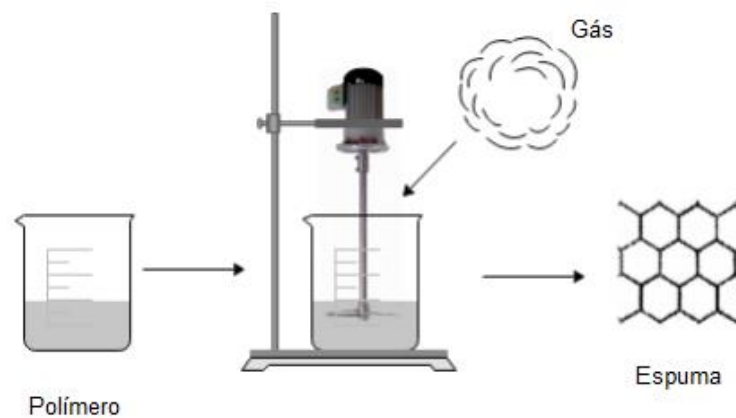
O glicerol é um plastificante de origem natural que possui grande potencial na fabricação de polímeros biodegradáveis. Ele é subproduto da produção de biodiesel e estima-se que a cada 100 kg de biodiesel produzido é gerado 10 kg de glicerol. Pode também ser produzido sinteticamente, porém sua geração como subproduto já excedeu a demanda do mercado (BEN; SAMSUDIN; YHAYA, 2022).

O mecanismo de plastificação do glicerol, principalmente em materiais a base de amido, é resultado da interação dos seus três grupos hidroxila com moléculas hidrofílicas do polímero. O tamanho reduzido da molécula de glicerol preenche os espaços vazios entre as cadeias poliméricas e promove interação entre polímero e plastificante, atuando como um lubrificante (BEN; SAMSUDIN; YHAYA, 2022).

3.5 Agente de expansão

Os agentes de expansão podem ser classificados em agente físico ou químico (JIN et al., 2019). Quanto ao método utilizado para que ocorra a expansão, este pode ser mecânico, físico ou químico. O primeiro consiste em realizar mecanicamente uma dispersão de gás na mistura por injeção ou agitação mecânica do fundido em um sistema aberto com incorporação de gás. Na maioria dos casos, esse método combina a injeção de gás e a dispersão mecânica com misturadores de alta velocidade (OBI, 2017).

Figura 5 - Método mecânico de formação de espumas

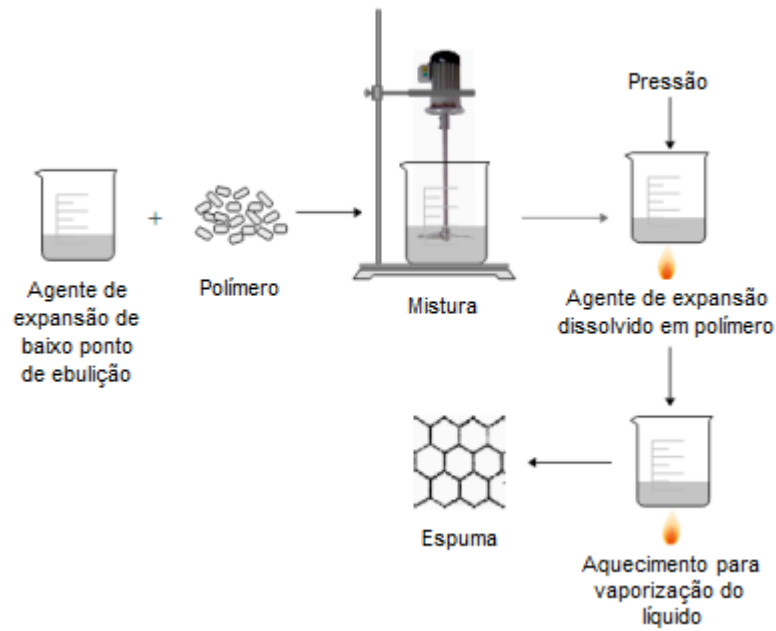


(JIN et al., 2019) ADAPTADO

Agentes de expansão físicos são gases em compressão ou líquidos voláteis (GEORGEDROBNY, 2014) supersaturados no fundido que irão volatilizar ou expandir durante o processo. Um agente nucleante pode ser adicionado para controlar a nucleação ou a taxa de crescimento de célula durante o processo. Nessa técnica, é importante o controle dos parâmetros de temperatura, tipo do agente de expansão e taxa de resfriamento. A etapa de nucleação é crítica para o produto final da produção da espuma (OBI, 2017; GEORGEDROBNY, 2014).

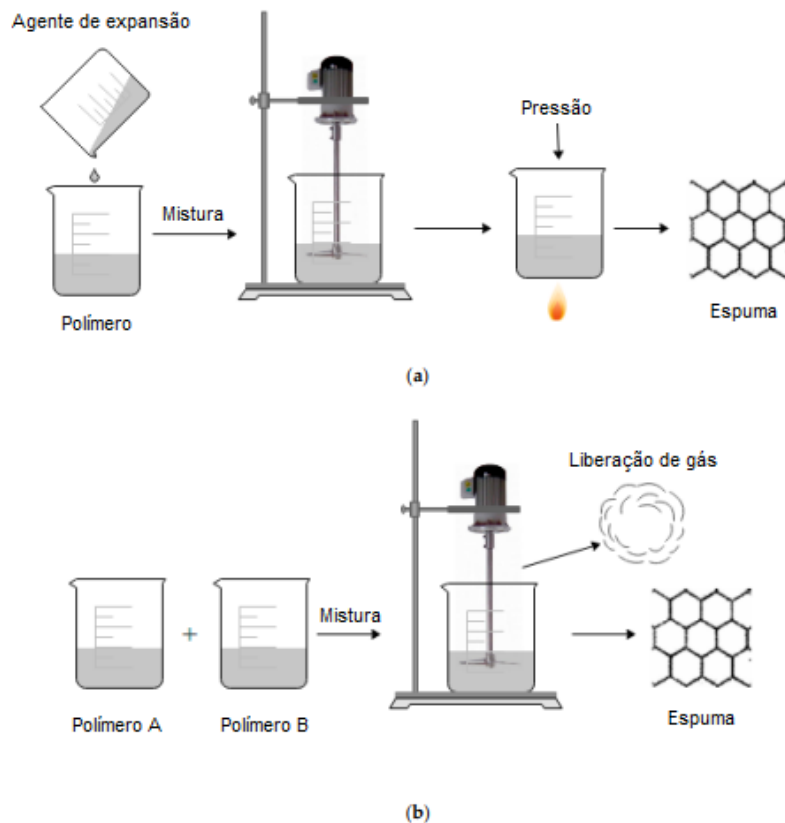
Alguns agentes físicos na forma de gases são, por exemplo, o nitrogênio (N_2) e gás carbônico (CO_2), que possuem baixa atividade no processo, não interferindo na expansão. Os líquidos voláteis que podem ser usados como agentes físicos de expansão, tipicamente possuem ponto de ebulição abaixo de $110^\circ C$ e são de forma geral hidrocarbonetos como propano, butano, pentano, isopentano, hexano, diclorometano e dicloroetano (JIN et al., 2019; LIU; CHEN, 2014).

Figura 6 - Produção de espumas com agente de expansão físico



(JIN et al., 2019) ADAPTADO

Figura 7 - Método químico de expansão com (a) agente de expansão e por (b) reação química



(JIN et al., 2019) ADAPTADO

A expansão com agente químico, por sua vez, é o método onde mistura-se ao polímero um agente de expansão que irá degradar na presença de calor. O produto dessa degradação são gases que irão gerar a expansão (Figura 7a). Alternativamente, o método químico pode ocorrer por reação de componentes que liberam gases inertes (Figura 7b). Essa via de produção de espumas resulta em um material termofixo e, por isso, não são reprocessáveis (OBI, 2017; JIN et al., 2019). A produção de espumas de poliuretano (PU) tem a maior parte no mercado global (BCC Research LLC, 2022) e emprega o método químico de expansão.

Para os materiais de amido, a água pode ser usada como um agente físico de expansão. Um estudo feito com o preparo de espumas de amido por extrusão, mostrou que a taxa de expansão e porosidade aumentam com o aumento da temperatura do processo. Ao adicionar mais água no sistema a temperatura pode ser reduzida (WYPYCH, 2017).

3.6 Fibras

Os polímeros podem ser reforçados com diferentes fibras com o intuito de melhorar suas propriedades mecânicas. Esses aditivos podem oferecer vantagens formando um material compósito com resistência elevada e baixo peso, têm propriedades anticorrosivas e alta tenacidade à fratura (LAU; CHEUNG, 2017).

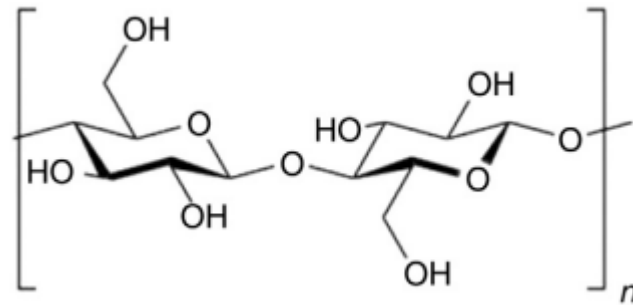
As fibras mais comuns e com baixo custo no mercado são as fibras de vidro, enquanto fibras de carbono são consideradas as de melhor performance, porém com custo elevado. Fibras de aramida, por sua vez concedem ao material alta rigidez e resistência a abrasão com seu preço ficando entre os de fibra de vidro e carbono (BRUDER, 2019). Essas fibras, entretanto, são de fontes não renováveis, não são recicláveis nem biodegradáveis e possuem alto consumo de energia na sua produção (LAU; CHEUNG, 2017).

Nos últimos anos, foram desenvolvidos compósitos com fibras naturais como as de linho, juta, sisal e abacaxi. Avanços no processamento de fibras naturais, engenharia genética e ciência dos compósitos permitiram oportunidades para os materiais de fonte renovável (LAU; CHEUNG, 2017).

A celulose é uma fibra natural que constitui cerca de 33% de toda a matéria vegetal, sendo considerada o biopolímero renovável mais abundante existente. A celulose é um polissacarídeo similar ao amido, formado por moléculas de D-glicose

que são unidas por ligações do tipo β , ao contrário do amido que possui ligações do tipo α . Fibras de algodão são constituídas de cerca de 90% de celulose, enquanto madeira contém em torno de 50% (JIANG; ZHANG, 2017).

Figura 8 - Unidade de repetição das cadeias de celulose



(JIANG; ZHANG, 2017)

As propriedades mecânicas de materiais com base no amido podem ser melhoradas com o uso de fibras naturais, resultando em um material compósito mais resistente e flexível sem alterar a biodegradabilidade do produto. Um estudo incorporou fibras e microfibras de algodão no amido termoplástico em diferentes proporções para a produção de espumas. Os resultados mostraram boa compatibilidade e homogeneidade com o amido. As espumas com adição das fibras também apresentaram melhores propriedades mecânicas. Quanto à absorção de água, as espumas com maior quantidade de fibras de algodão apresentaram menor absorção de água em razão de sua estrutura ser menos expandida e, por consequência, menos porosa. As espumas com microfibras obtiveram uma estrutura mais expandida que o amido termoplástico e, por isso, apresentaram maior absorção de água (BERGEL; ARAUJO; SANTANA, 2021).

3.6.1 Erva mate

A *Ilex paraguariensis*, ou erva mate, é uma planta da família Aquifoliaceae e sua ocorrência se dá em torno do território sul-americano em países como o Brasil, Paraguai e Argentina (HEEMANN et al., 2019). Essa planta é bastante utilizada em bebidas e como chás nesses países e possui interesse nas pesquisas por conta de suas propriedades antioxidantes relativos aos compostos fenólicos presentes (VALERGA; RETA; LANARI, 2012).

Compostos fenólicos estão presentes em diversas plantas, sendo classificados como o segundo composto orgânico mais abundante nesse reino, apenas atrás da celulose. Na sua estrutura, contém ao menos um anel aromático com grupos hidroxila ligados a ele e podem ser classificados em flavonoides ou não flavonoides. Esses componentes podem cumprir funções na planta como proteção contra radiação ultravioleta, estresse biótico ou abiótico, patógenos e herbívoros. Para o consumo humano, esses compostos são correlacionados com efeitos benéficos contra doenças crônicas não transmissíveis como doenças cardiovasculares, câncer e obesidade (DE LA ROSA et al., 2019).

Um estudo determinou a concentração de compostos fenólicos por espectroscopia no infravermelho próximo na erva mate de diferentes regiões do Paraná. Os resultados mostraram diferenças na concentração de fenólicos e foram relacionados com fatores como práticas agronômicas, linhagem genética, clima, solo, entre outros. As amostras da região centro-sul apresentaram maior concentração de compostos fenólicos com uma média de 133,31 mg/g (FRIZON et al., 2015). Na Tabela 4 são mostrados diferentes compostos fenólicos, como a rutina, quercetina e kampfferol e outros componentes bioativos presentes na erva mate (BURRIS et al., 2012).

Tabela 4 - Compostos bioativos encontrados na erva mate

| Composto químico | Composição da massa seca (%) |
|-------------------------|-------------------------------------|
| Ácido clorogênico | 2,8 |
| Ácido cafeico | 0,023 |
| Saponinas | 5 a 10 |
| Cafeína | 1 a 2 |
| Teobromina | 0,3 a 0,9 |
| Rutina | 0,06 |
| Quercetina | 0,0031 |
| Kaempferol | 0,0012 |

(BURRIS et al., 2012) ADAPTADO

A erva mate possui também outros variados componentes em sua composição, como proteínas, fibras e lipídios que podem sofrer variações depois de

passadas por secagem, processo o qual a planta é geralmente (TOMASI et al., 2021). Um estudo avaliou a composição das fibras de erva mate onde a análise realizada resultou em valores de 29,94% de celulose, 25,72% de hemicelulose e 29,74% de lignina (BORSOI et al., 2019).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e a metodologia utilizada para a produção de espumas de amido, com os seus aditivos incorporados, bem como os ensaios realizados para caracterização das amostras produzidas.

4.1 Materiais

Para este estudo, foram utilizadas féculas de mandioca, batata e milho. Os aditivos usados foram o glicerol de pureza mínima 99,5% e a erva mate, espécie *Ilex paraguariensis*, da marca Ximango, Figura 9a. A erva mate foi passada por uma peneira de 250 μm , Figura 9b, a fim de obter somente partículas finas para que a expansão das espumas não fosse dificultada.

Figura 9 - a) Erva mate usada na composição das espumas reforçadas; b) Peneiramento das fibras de erva mate



Fonte: autoria própria

Para fins de comparação, foi feita a caracterização de poliestireno expandido (EPS) comercial retirando-se as amostras de uma bandeja (Figura 10). A bandeja foi cortada e utilizada para os ensaios de flexão, impacto, absorção de umidade, ângulo de contato e densidade aparente.

Figura 10 - Bandeja de EPS comercial utilizada para caracterização

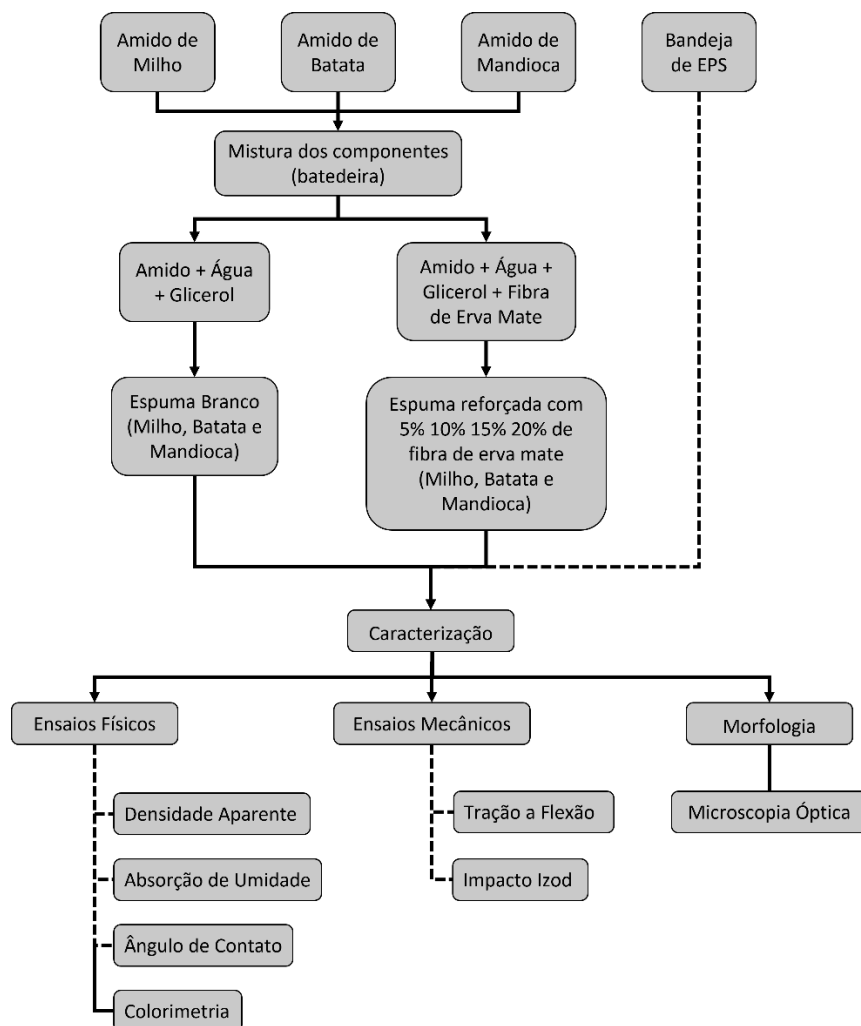


Fonte: autoria própria

4.2 Produção da pasta

Para a produção da pasta de amido gelatinizado, misturou-se amido, água e glicerol com o auxílio de uma espátula metálica e uma batedeira Britania Bellagio com 4 velocidades e 350 W de potência. A velocidade 4 da batedeira foi utilizada para realizar a mistura dos componentes por 3 a 4 minutos, até a mistura ficar homogênea e com maior viscosidade para melhor manuseio da pasta (Figura 12). A água foi aquecida até 100°C para que pudesse ocorrer a gelatinização do amido. A proporção dos materiais utilizados para a produção das espumas branco (sem adição de reforço) é mostrada na Tabela 5. Na Figura 11 é apresentado um fluxograma da produção das pastas e posterior caracterização.

Figura 11- Fluxograma das etapas de produção de espumas neste estudo



Fonte: autoria própria

Figura 12 – Processo de mistura com bateadeira para produção das pastas de amido



Fonte: autoria própria

Tabela 5 - Composição das espumas não reforçadas de amido de mandioca (MA), batata (BA) e milho (MI)

| Amostras | Fécula de Mandioca (%) | Fécula de Batata (%) | Fécula de Milho (%) | Água (%) | Glicerol (%) |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------|---------------------|
| MA | 50 | 0 | 0 | 45 | 5 |
| BA | 0 | 30 | 0 | 65 | 5 |
| MI | 0 | 0 | 30 | 65 | 5 |

Fonte: autoria própria

Testes preliminares com os amidos de batata e milho em 50% não apresentaram boa expansão por produzir pastas muito viscosas. Devido essas diferentes propriedades dos amidos, foi optado por aumentar a proporção de água na mistura da massa das pastas de batata e milho, porém mantendo os 5% do co-plastificante glicerol em todas as pastas.

Para as espumas reforçadas, foi mantida as proporções de massa seca e massa úmida das espumas branco. No entanto, diminui-se a fração de amido para poder ser inserido o pó de erva mate. Foram produzidas formulações com 5%, 10%, 15% e 20% de reforço, porcentagem com relação à massa do amido e não à massa total da mistura. A erva mate foi acrescentada somente após a gelatinização do amido, utilizando novamente a bateadeira na velocidade 4 durante 2 a 3 minutos. Na Tabela 6 são mostrados os componentes e proporções das amostras reforçadas.

Tabela 6 - Composição das espumas reforçadas com fibra de erva mate

| Amostras | Massa seca - amido + fibra (%) | Água (%) | Glicerol (%) | Erva mate (% em relação ao amido) |
|----------|--------------------------------|----------|--------------|-----------------------------------|
| MA | 50 | 45 | 5 | 5, 10, 15, 20 |
| BA | 30 | 65 | 5 | 5, 10, 15, 20 |
| MI | 30 | 65 | 5 | 5, 10, 15, 20 |

Fonte: autoria própria

4.3 Expansão da espuma

Para o processo de expansão foi utilizada uma prensa hidráulica com aquecimento. O molde utilizado foi um conjunto duas placas quadradas de dimensões 18 cm x 17,5 cm com cavidade interna de medidas 15 cm x 15 cm mostrado na Figura 13. Como desmoldante foi utilizado óleo de soja, aplicado com o auxílio de um papel sobre a superfície interna do molde.

Figura 13 - Molde utilizado para produção das espumas



Fonte: autoria própria

A mistura foi colocada no centro do molde e levada à prensa hidráulica, apresentada na Figura 14, com temperaturas e pressões variadas de acordo com a capacidade de expansão de cada tipo de amido. A pressão foi mantida durante 2 a 3 minutos e foi retirada de forma lenta para não haver expansão exagerada da espuma, o que pode gerar ruptura de célula e vazamento da mistura para o exterior do molde. Após expandido, o material ainda permaneceu na prensa por mais 10 minutos para que houvesse evaporação da água ainda presente na espuma. O

material foi então retirado e resfriado a temperatura ambiente. A Tabela 7 mostra a pressão utilizada e o tempo de residência para cada amostra.

Figura 14 - Prensa hidráulica com aquecimento nas placas



Fonte: autoria própria

Tabela 7 - Parâmetros de produção das espumas em prensa hidráulica

| Amostras | Pressão (ton) | Temperatura (°C) | Residência pré expansão (min) | Residência pós expansão (min) |
|-----------------|----------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| MA | 3 | 180 | 3 | 10 |
| BA | 5 | 180 | 3 | 10 |
| MI | 5 | 200 | 2 | 10 |
| MA reforçado | 3 | 200 | 3 | 10 |
| BA reforçado | 5 | 200 | 2 | 10 |
| MI reforçado | 5 | 200 | 2 | 10 |

Fonte: autoria própria

Para as espumas reforçadas foi aumentado a temperatura da prensa em 20°C com o objetivo de obter melhor expansão das peças. As misturas preparadas com amido de batata e de milho se mostraram mais viscosas, principalmente a de milho. Essa viscosidade gera dificuldade na expansão e por isso foi optado por aumentar a pressão na produção das amostras reforçadas de milho e batata e a temperatura ao produzir a espuma branco de milho. Outras condições de experimento foram testadas, porém temperaturas menores que 180°C não tinham bom resultado na expansão das espumas.

4.4 Ensaio Físicos

4.4.1 *Densidade aparente*

A densidade aparente foi calculada utilizando como base a norma ASTM D 3575 (2001). Para cada composição de espuma foram utilizados 5 corpos de prova de dimensões 25 mm x 25 mm e com espessura variada. Os corpos de prova foram pesados em balança analítica com precisão de 4 casas decimais. A densidade aparente foi calculada para cada corpo de prova e a densidade de cada espuma foi determinada pela média aritmética da densidade dos 5 corpos de prova.

4.4.2 *Absorção de umidade*

O ensaio de absorção foi realizado em ambiente de 75% de umidade relativa com o uso de recipientes fechados com tampa. A solução foi preparada com água destilada e sal de cozinha (NaCl) segundo norma ASTM E 104 (2014). O mesmo corpo de prova utilizado para calcular a densidade aparente foi empregado nesse ensaio, tendo as dimensões aproximadas de 25 mm x 25 mm. Os corpos de prova ficaram 16 horas em uma estufa de secagem a 60°C para retirar a umidade em excesso. A norma seguida nesse experimento foi a ASTM D5229 (2010).

Figura 15 - Sistema utilizado para ensaio de absorção de umidade



Fonte: autoria própria

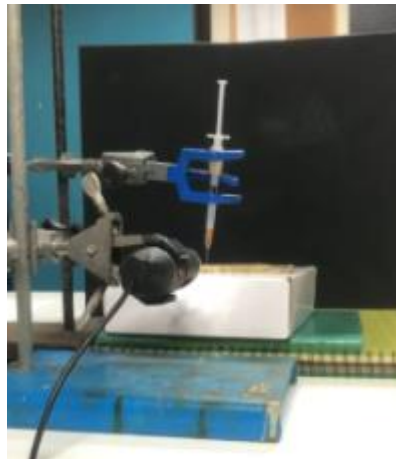
Os corpos de prova foram pesados em balança analítica com precisão de 4 casas decimais, em seguida foram colocados dentro do recipiente com a solução

ficando suspensos por um fio de nylon, como visto na Figura 15. Foram realizadas 3 pesagens com intervalo de 2 horas e mais 2 pesagens com intervalo mais longo, uma com 24 horas de tempo de ensaio e outra com 48 horas. Os recipientes com as amostras foram mantidos em estufa a 30°C durante os intervalos entre as pesagens. A absorção de umidade foi analisada de acordo com o percentual de variação de massa inicial e o resultado foi a média aritmética dos 5 corpos de prova.

4.4.3 Ângulo de contato

O ensaio de ângulo de contato foi realizado segundo a norma ASTM D7334 (2013). Com o auxílio de uma seringa, foram aplicadas 10 gotas de água na superfície de cada espuma. Imagens foram capturadas com o microscópio U500X digital e para cada gota foram capturadas duas imagens: uma no momento da aplicação (3 segundos) e passados 3 minutos da aplicação. Para calcular o ângulo da gota em relação à superfície da amostra foi utilizado o auxílio do software SurfTens 4.5 e o ângulo de contato foi calculado para cada espuma a partir da média dos dados obtidos. Na Figura 16 pode-se observar o modo de realização do ensaio.

Figura 16 - Ensaio de ângulo de contato utilizando suporte para a seringa e o microscópio óptico.



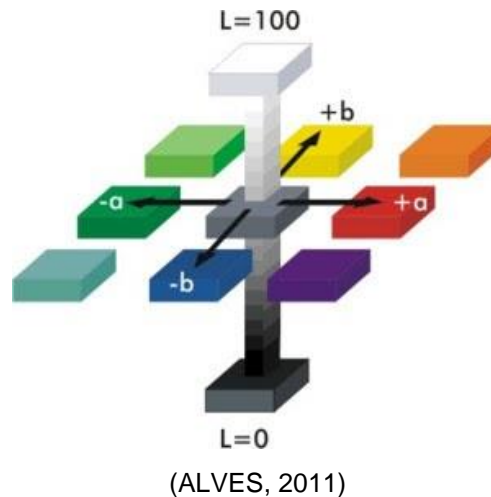
Fonte: autoria própria

4.4.4 Colorimetria

O ensaio de colorimetria, que consiste em medir parâmetros de cor e brilho do material, foi realizado utilizando um espectrômetro Spectro Guide sphere gloss n6834 da marca BYK-Gardner. A norma seguida para esse ensaio é a ASTM D 2244 (2005). Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada espuma e as médias

aritmética de cada parâmetro foi calculada. O equipamento fornece os dados calculados em parâmetros de cor CIELAB, sendo eles: luminosidade (L^*), cromaticidade verde/vermelho (a^*), cromaticidade azul/amarelo (b^*) e *gloss* (brilho). O parâmetro L^* indica quão clara ou escura é a amostra. Valores positivos do parâmetro a^* apontam para o vermelho, enquanto valores negativos para a cor verde. Para o parâmetro b^* , valores positivos indicam o amarelo e valores negativos o azul. Na Figura 17 é representado um diagrama de cores com os parâmetros mencionados.

Figura 17 - Diagrama da variação dos parâmetros de cor L^* , a^* e b^*

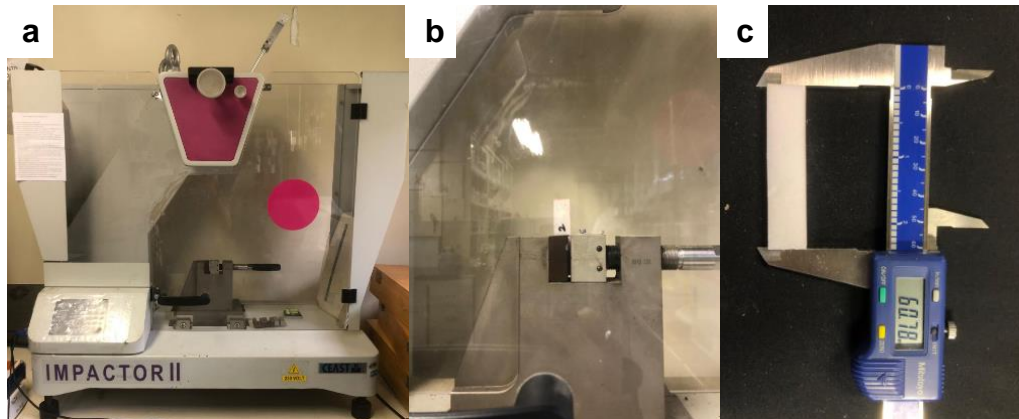


4.5 Ensaios Mecânicos

4.5.1 Impacto Izod

O ensaio mecânico de impacto de Izod foi realizado de acordo com a norma ASTM D 256 (2004) no equipamento IMPACTOR II do fabricante CEAST. Um martelo de 0,5 J de energia foi utilizado e não foi necessário fazer entalhes nos corpos de prova pois as espumas já eram suficientemente frágeis para ocorrer a ruptura do material. Os corpos de prova foram cortados manualmente e em seguida tiveram suas superfícies acabadas com lixa rotativa, obtendo dimensões aproximadas de 60 mm x 13 mm e com espessura variada. Devido às variações dimensionais, cada corpo de prova teve sua largura e espessura medidas antes de ensaiados. A Figura 18 mostra o equipamento de ensaio e o corpo de prova utilizado.

Figura 18 - a) Equipamento do ensaio de tração; b) Amostra posicionada para ensaio; c) Corpo de prova utilizado no ensaio

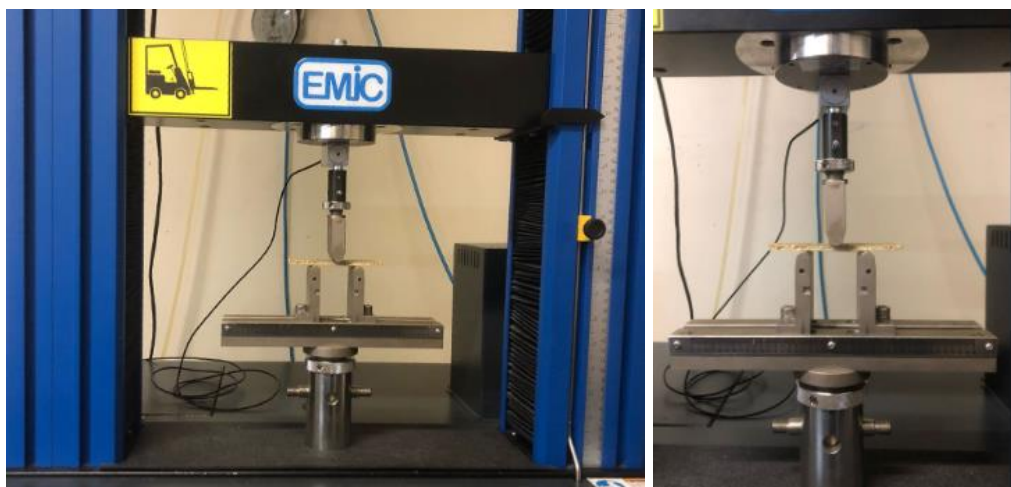


Fonte: autoria própria

4.5.2 Resistência à flexão

O ensaio de flexão foi realizado seguindo a norma ASTM D 790-02 em um equipamento INSTRON EMIC 23-5D utilizando um *span* de 45 mm. Os corpos de prova utilizados foram cortados e lixados com dimensões aproximadas de 100 mm x 25 mm. Foram feitas as medidas de largura e espessura de cada corpo de prova para cálculo da tensão à flexão e módulo. A célula de carga utilizada foi de 100 N e a velocidade do ensaio foi calculada para cada espuma levando em consideração a espessura das amostras, segundo a norma. Na Figura 19 é mostrada a máquina de ensaios com a configuração para o ensaio.

Figura 19 - Equipamento do ensaio de flexão em espumas



Fonte: autoria própria

4.6 Morfologia

4.6.1 *Microscopia Óptica*

Para observar a estrutura das espumas produzidas, foi usado o microscópio U500X digital, mesmo equipamento utilizado para o ensaio de ângulo de contato. Imagens foram capturadas da superfície das amostras e das suas laterais, onde pode-se observar melhor as células do material.

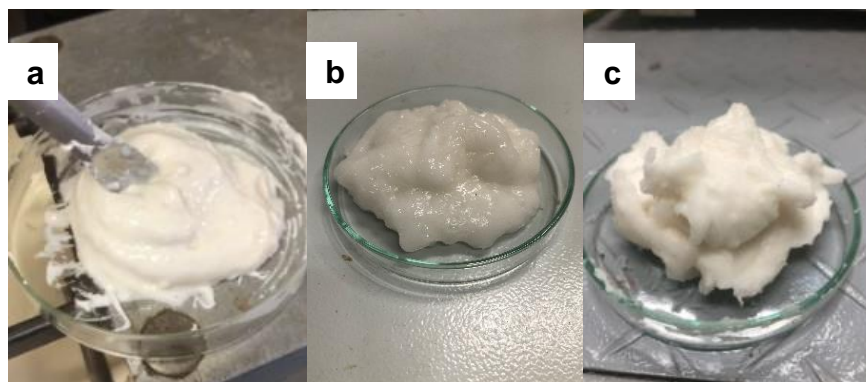
5 Resultados e Discussão

No presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados da produção e caracterização das espumas de amido pela metodologia descrita no capítulo anterior, comparando as espumas de diferentes amidos e com diferentes percentuais de carga. Alguns dos ensaios realizados também foram feitos para a espuma de EPS e são apresentados neste capítulo.

5.1 Pastas de amido

Os amidos utilizados neste estudo têm comportamento reológico distinto e, por isso, apresentaram consistência variadas em suas pastas, como pode se observar na Figura 20. Esse comportamento deve ser associado ao tamanho de seus grãos e composições químicas, tendo como principais componentes a amilose e amilopectina. Na pasta de amido de mandioca, observa-se maior fluidez, enquanto nas de milho e batata há uma maior consistência de pasta. Essas características podem ser associadas ao maior conteúdo de amilose no milho e maior tamanho de grão do amido de batata (JOYE, 2019; ABDULLAH et al., 2018; ZHOU et al., 2015). As pastas de amido produzidas com a adição de erva mate são também apresentadas na Figura 21.

Figura 20 - Pastas de amido de a) mandioca, b) batata e c) milho



Fonte: autoria própria

Figura 21 - Pastas de a) amido de mandioca com 15% de erva mate e b) amido de milho com 5% de erva mate

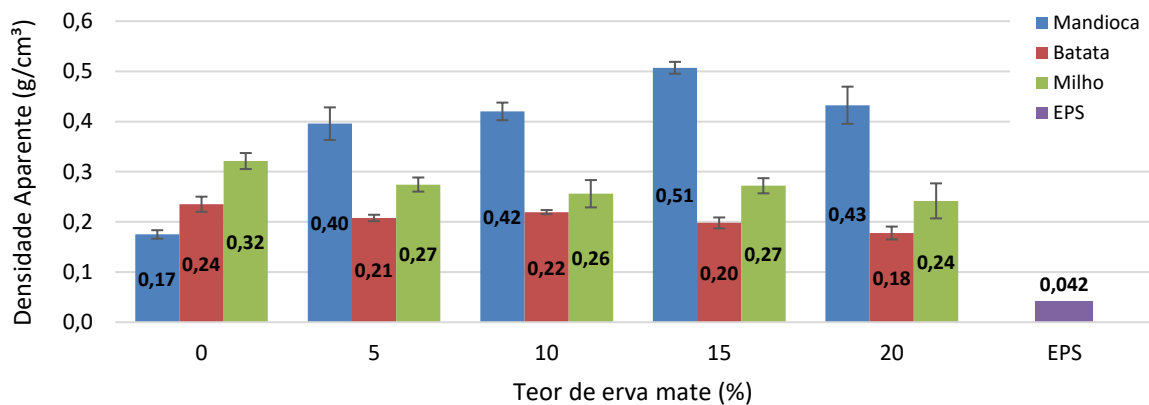


Fonte: autoria própria

5.2 Densidade aparente

As espumas apresentaram densidades variadas de acordo com a fonte de amido e quantidade de carga utilizada. Na Figura 22 são apresentados os valores de densidade calculados para as espumas e para a amostra de EPS.

Figura 22 - Densidade aparente das amostras de espuma de amido e EPS



Fonte: autoria própria

Em comparação com o EPS comercial, as espumas de amido obtiveram valores de densidade até 10 vezes maior. Pode-se observar também que dentre as espumas não reforçadas a com amido de mandioca teve a menor densidade. Um estudo comparativo entre espumas de amido dessas 3 fontes obteve resultados similares, com amostras de mandioca apresentando menor valor de densidade seguido pelas amostras de batata e milho. (BERGEL; DA LUZ; SANTANA, 2017). Os resultados se devem ao fato de que a mandioca produz pastas menos viscosas, com

menor fração de amilose no conteúdo de seu amido, o que é associado a maior capacidade de expansão.

Com o aumento da quantidade de carga na mistura de mandioca a densidade aumentou consideravelmente, obtendo valores de densidade mais de 2 vezes maior do que a espuma não reforçada. Nas pastas de mandioca há maior teor de sólidos o que dificulta a expansão, produzindo os resultados aqui observados. As amostras reforçadas apresentam estrutura mais compacta, com menor espessura e menor tamanho de célula. Na Figura 23 pode-se observar amostras de espumas de mandioca com as diferentes frações de fibra.

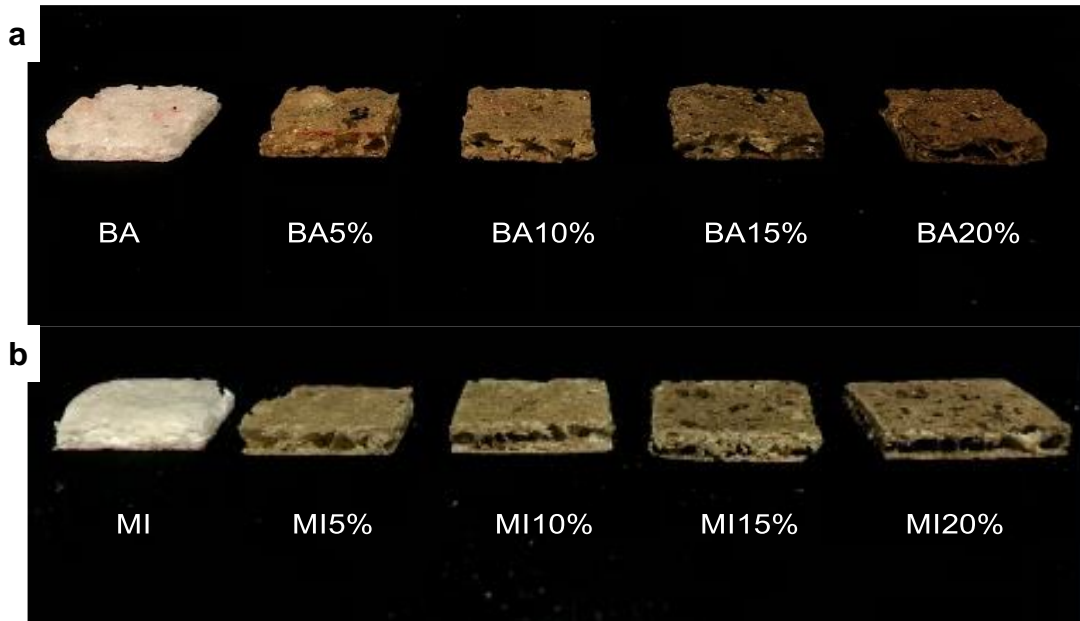
Figura 23 - Amostras das espumas de amido de mandioca com diferentes teores de erva mate



Fonte: autoria própria

As amostras de amido de batata e milho, por sua vez, continham mais água na mistura e à medida que foi adicionado o reforço na espuma os valores de densidade aparente foram ainda menores. Na Figura 24 são apresentadas as espumas de batata e milho respectivamente. Um estudo utilizando fibras e microfibras de algodão como reforço em amido termoplástico de batata mostrou que espumas reforçadas com as fibras de menor tamanho resultavam em pastas menos viscosas. Além disso, as microfibras atuam como agentes nucleantes, ajudando a formar células maiores, como visto nas espumas produzidas neste estudo (BERGEL; ARAUJO; SANTANA, 2021). Além disso, as pastas de batata e milho possuíam mais água o que é fator importante para a expansão.

Figura 24 - Amostras das espumas de amido de (a) batata e (b) milho com diferentes teores de erva mate

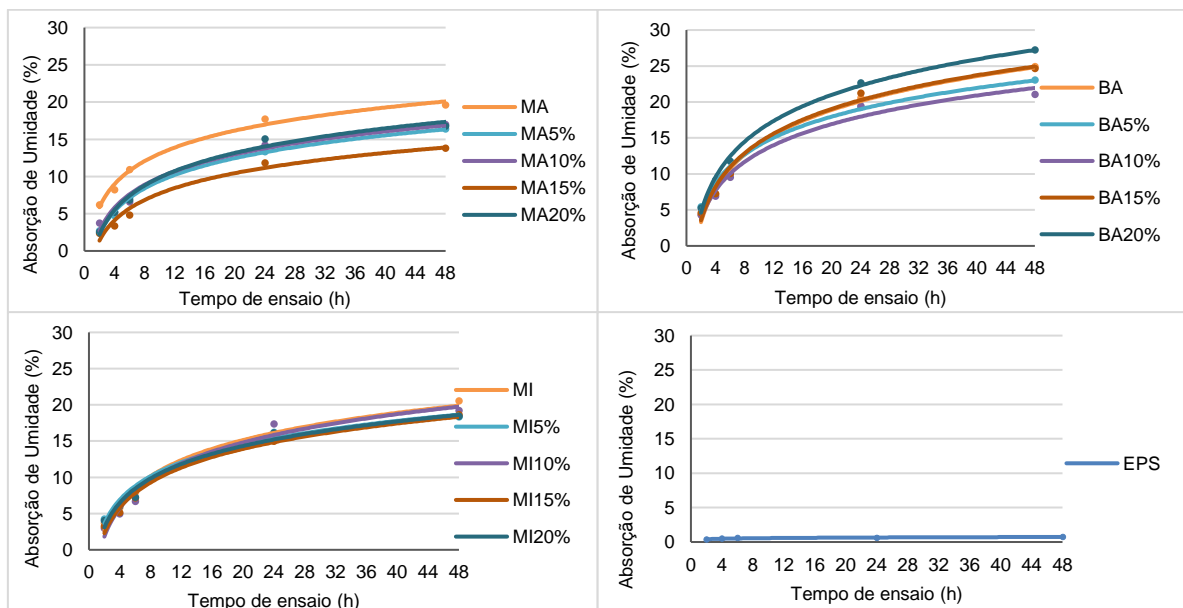


Fonte: autoria própria

5.3 Absorção de umidade

Os gráficos de absorção de umidade por tempo das amostras são apresentados na Figura 25 separados por fonte de amido. Também é representada a curva de umidade do EPS utilizado para fins de comparação.

Figura 25 - Curvas de absorção de umidade por tempo das amostras de amido e EPS



Fonte: autoria própria

Os resultados de absorção de umidade apresentam uma variação grande em relação às diferentes fontes de amido, com as espumas de mandioca absorvendo menos umidade do que as demais. As espumas de amido de milho sem reforço e as reforçadas apresentaram resultados de absorção bem próximos entre si, mas com a espuma branco tendo maior absorção dentre todas. No caso da mandioca, pode-se observar que tiveram menor absorção de água o que é explicado pela maior densidade e maior compactação dessas espumas, enquanto as espumas de batata que obtiveram maior absorção também obtiveram a menor densidade dentre todas.

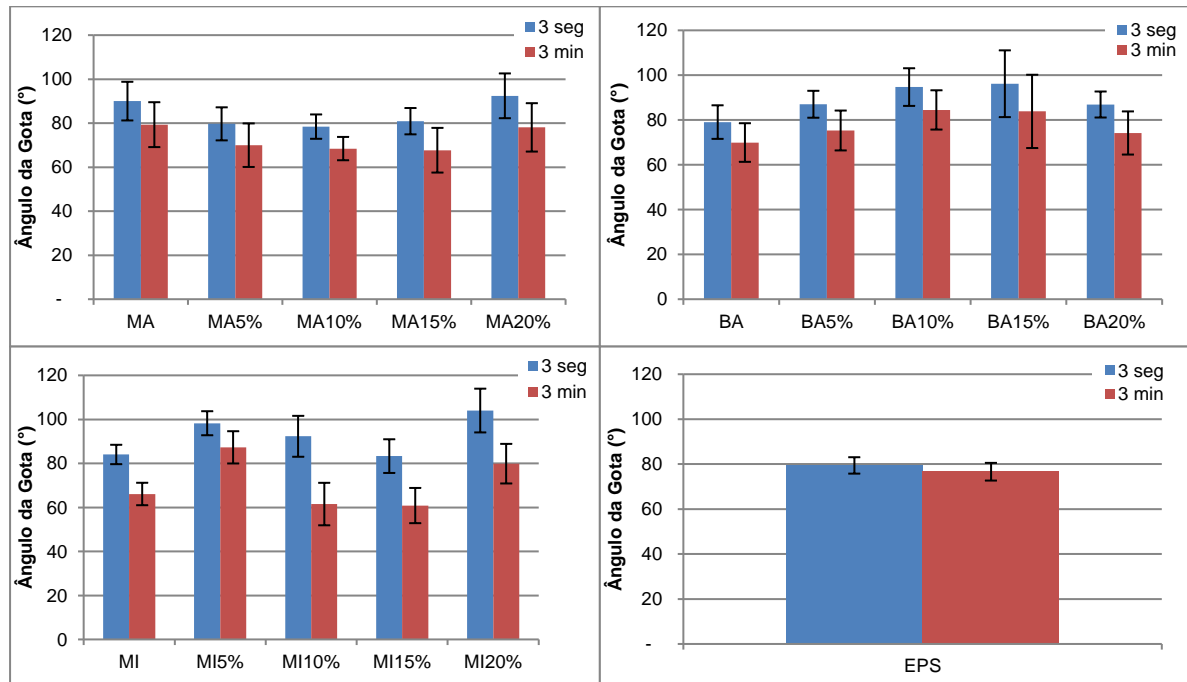
Para as amostras de amido de batata houve uma diminuição na absorção de umidade quando adicionados 5% e 10% de carga, porém com um aumento ao se adicionar 15% e 20% de fibras. Os resultados de um estudo que utilizou extrato de folhas de erva mate concluíram que filmes de amido com a adição desse componente apresentaram maior solubilidade em água e maior permeabilidade de vapor de água (KNAPP et al., 2019). Outro estudo mostra que a absorção de água em filmes de amido com 5% de extrato de erva mate resultou em menor absorção de água, porém ao adicionar 20% de extrato a absorção foi mais alta que a amostra controle (MEDINA JARAMILLO et al., 2016). Esse fenômeno pode ser explicado pela presença de compostos fenólicos presentes na planta que têm caráter hidrofílico em função de grupos polares na estrutura, além da maior área de contato das fibras polares.

Em comparação com o EPS, nota-se que este absorveu bem menos umidade do que todas as amostras de espuma de amido, variando menos de 1% no período de 48 horas. O resultado obtido é esperado já que o poliestireno não possui grupos polares em sua estrutura. O amido e as fibras, no entanto, são formados por cadeias de glicose que possuem a função hidroxila, grupo polar, resultando em ligações de hidrogênio com as moléculas de água.

5.4 Ângulo de contato

Os resultados de ângulo de contato são mostrados na Figura 26 separados por fonte de amido. O resultado do ensaio feito no EPS também é apresentado. Os valores são constituídos os ângulos da gota em dois momentos: 3 segundos e 3 minutos após aplicação.

Figura 26 - Ângulo de contato das espumas de amido e EPS

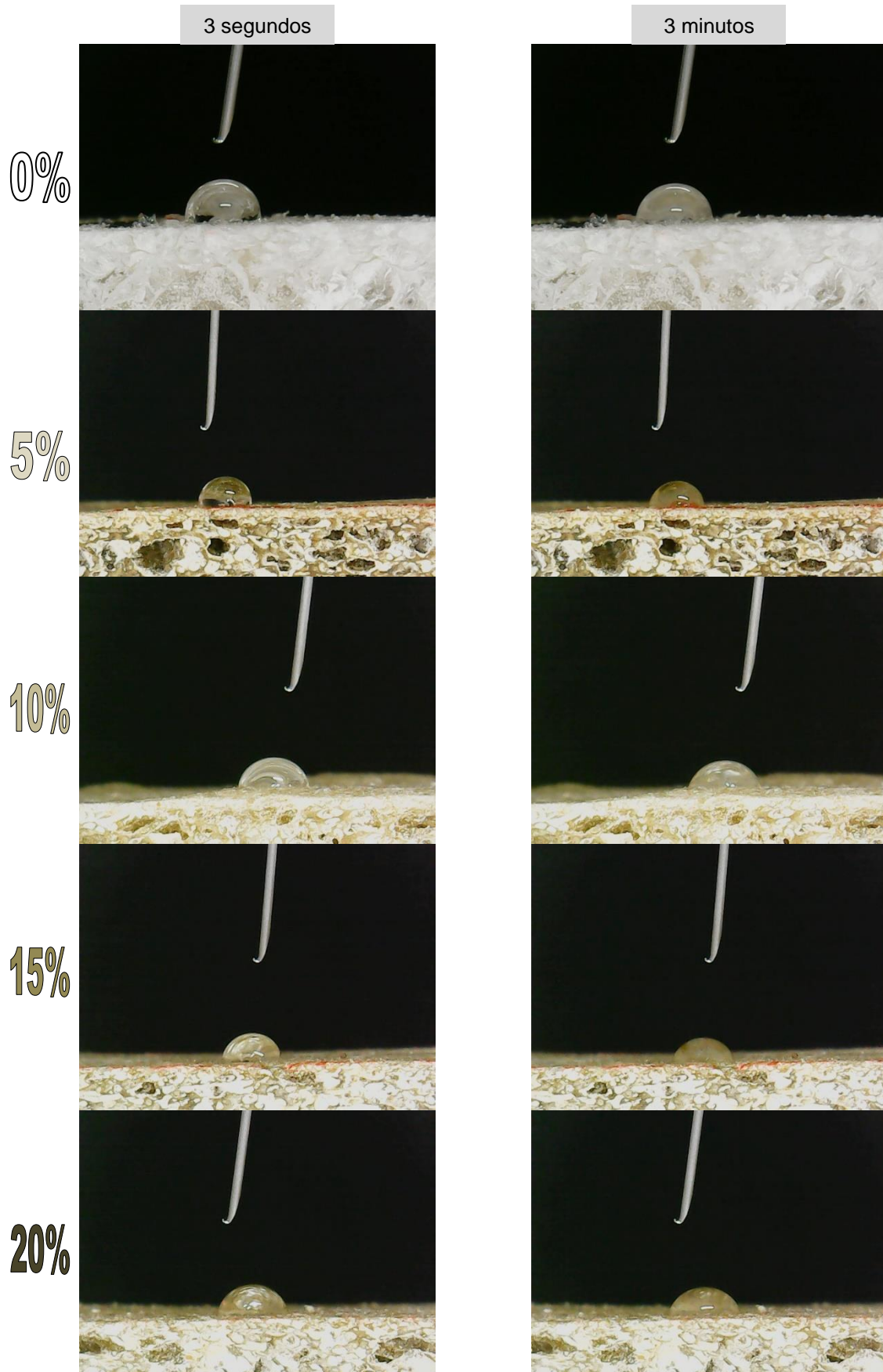


Fonte: autoria própria

Quando comparadas ao EPS, as espumas de amido tiveram resultado bastante satisfatórios com o ângulo de contato logo após a aplicação da gota, com as amostras de milho com 5% e 20% de erva mate obtendo valores maiores que 100°. Entretanto, após os 3 minutos da aplicação, a maioria das espumas obtiveram ângulo de contato abaixo dos 80°, com algumas chegando a ângulos de 60°. O EPS apresentou um valor de ângulo médio de 79° para os 3 segundos e 77° para os 3 minutos.

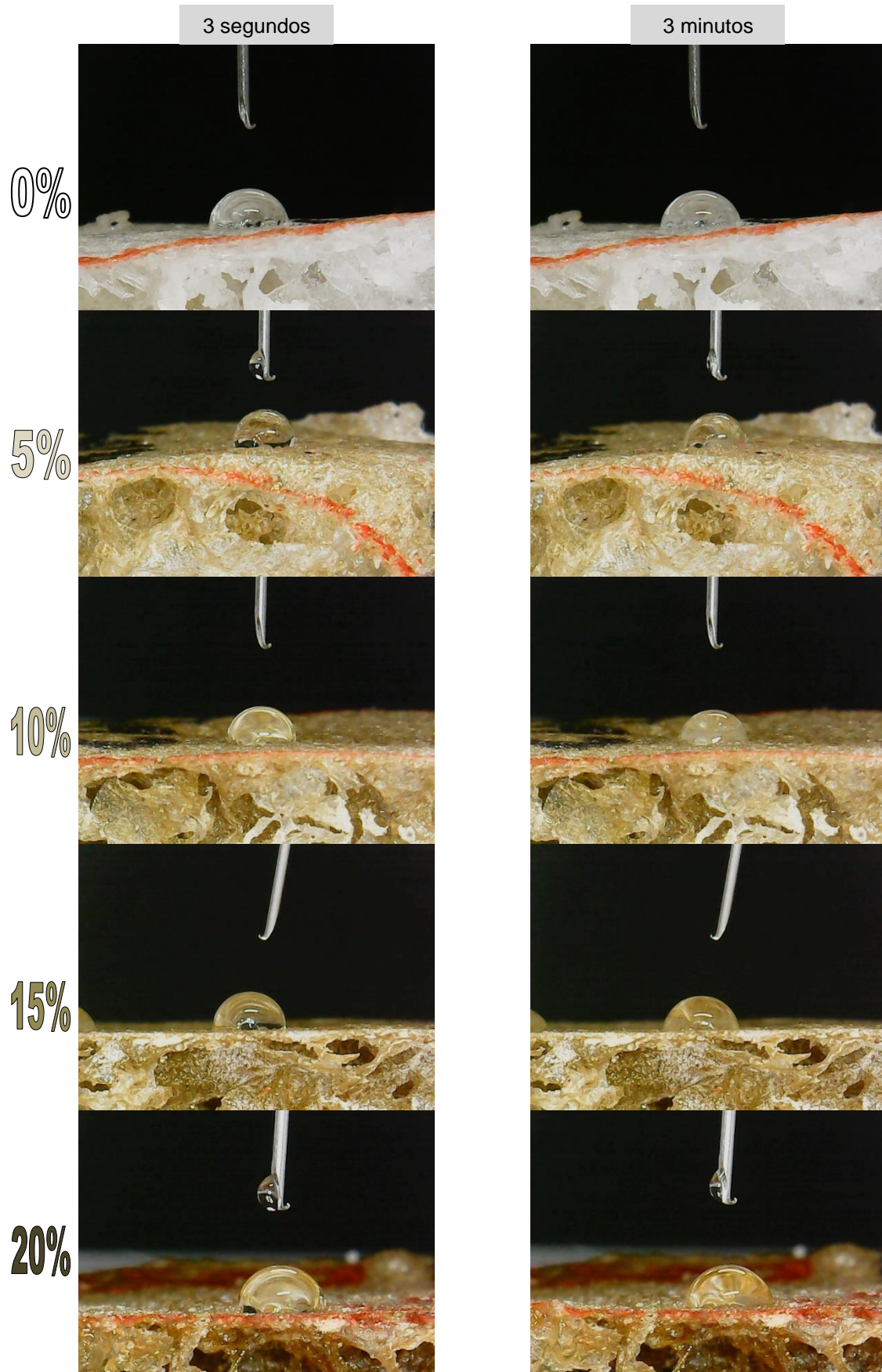
Esse resultado é influenciado também pela rugosidade da superfície dos materiais. Um estudo produziu filmes de amido com extrato de erva mate e associou o ângulo de contato mais elevado de uma das amostras com a maior rugosidade superficial do material, observação feita com o uso de imagens topográficas da superfície dos filmes (MEDINA JARAMILLO et al., 2015). Como as espumas de mandioca e batata tiveram comportamento oposto com a adição de erva mate e o milho obteve comportamento irregular, supõe-se que algumas razões para a disparidade nos resultados obtidos podem ser a diferença na rugosidade superficial das amostras, e a falta de homogeneização da mistura com a erva mate. As Figuras 27, 28 e 29 apresentam as imagens capturadas das gotas em 3 segundos e 3 minutos.

Figura 27 - Imagens do ensaio de ângulo de contato das espumas de mandioca



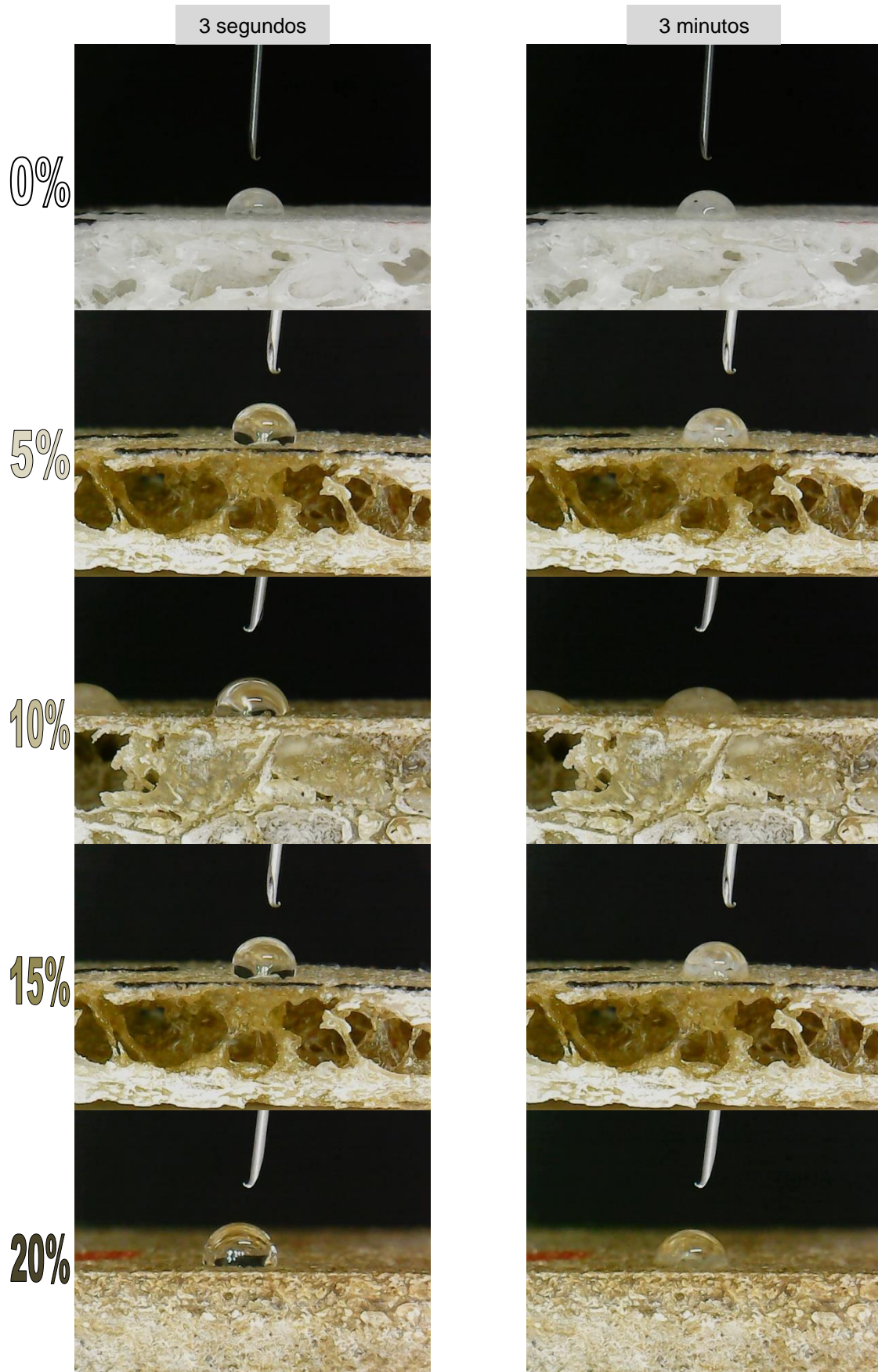
Fonte: autoria própria

Figura 28 - Imagens do ensaio de ângulo de contato das espumas de batata



Fonte: autoria própria

Figura 29 - Imagens do ensaio de ângulo de contato das espumas de milho

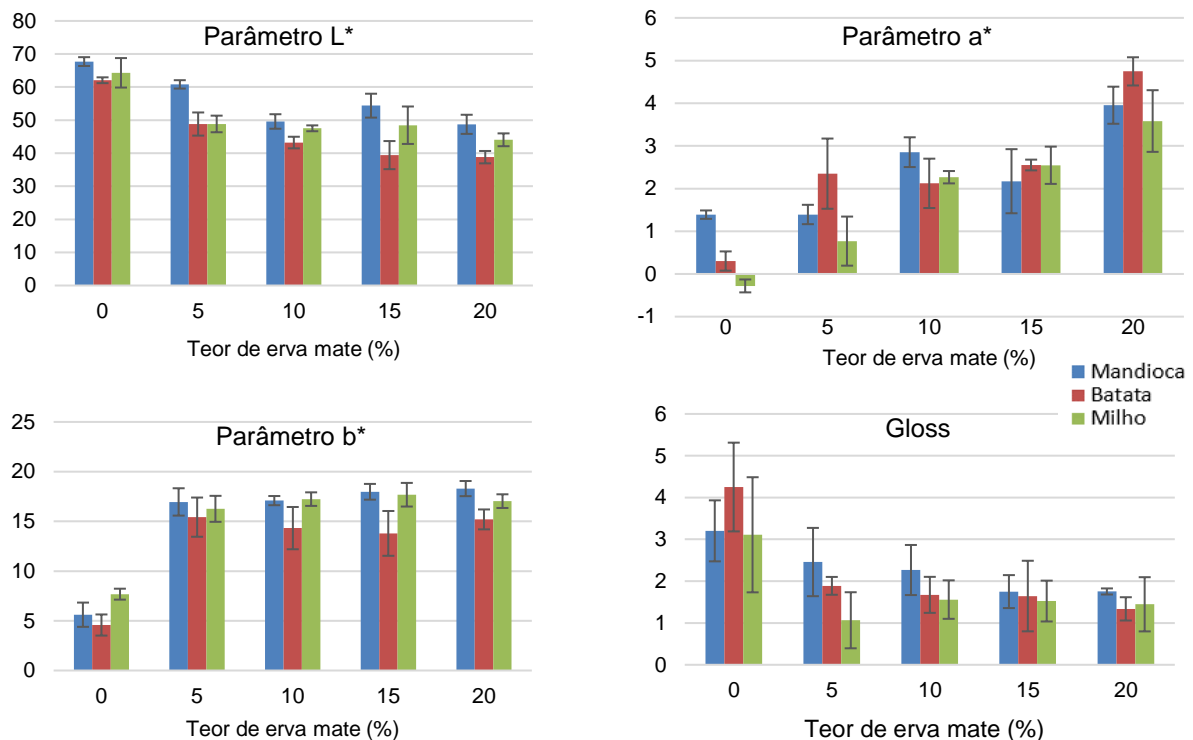


Fonte: autoria própria

5.5 Colorimetria

Os resultados do ensaio de colorimetria das amostras são apresentados na Figura 30, separados por parâmetros de cor CIELAB (L^* , a^* e b^*) e parâmetro de brilho das espumas (*gloss*).

Figura 30 - Resultados de colorimetria das espumas de amido, parâmetros L^* , a^* , b^* e *gloss*



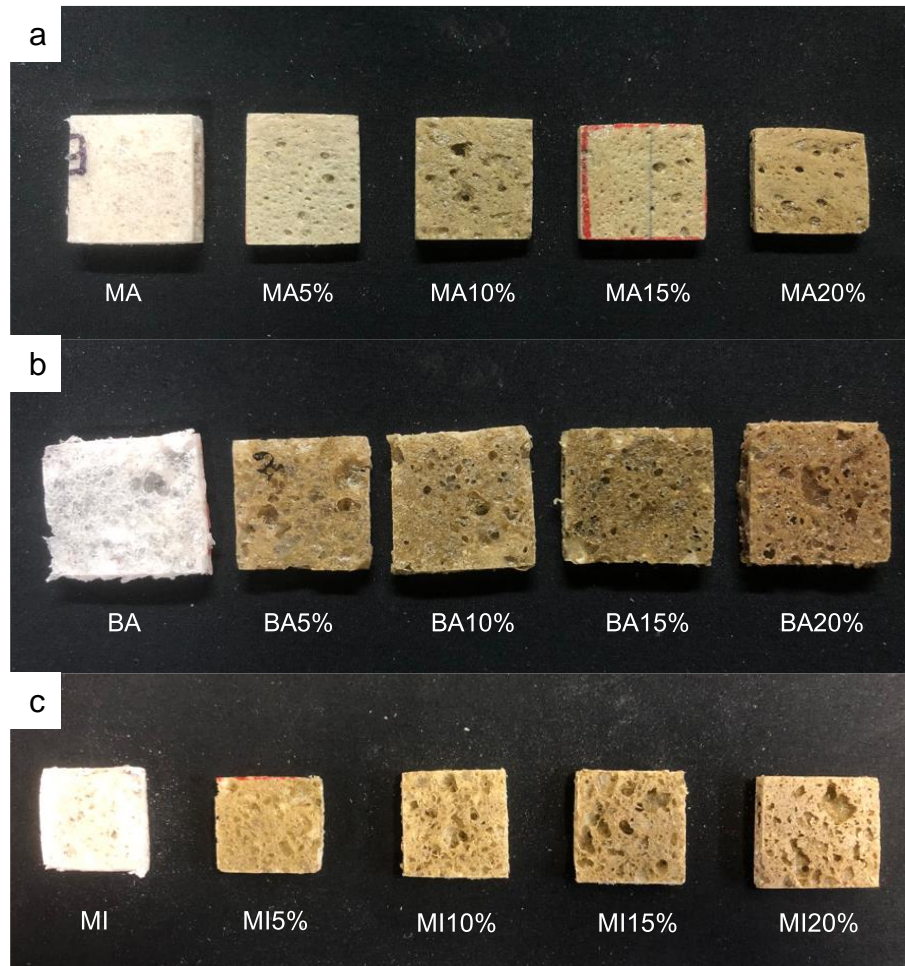
Fonte: autoria própria

Os gráficos demonstram que entre a mesma fonte de amido houve determinada variação com a adição de carga. Entretanto, de forma geral, pode-se dizer que quanto maior a adição de fibra de erva mate nos materiais, maiores os valores de a^* , indicando uma tonalidade mais avermelhada, maior valor de b^* , indicando tonalidade mais amarelada e menores valores de L^* e *gloss*, o que significa que as amostras ficaram mais escuras e com menor brilho. Os dados de cor são evidenciados pela Figura 31, onde são mostradas amostras das espumas produzidas.

Resultados similares foram obtidos para filmes de amido com 5% e 20% de extrato de erva mate. O parâmetro b^* foi aumentado enquanto o L^* diminuiu a medida da adição do extrato. Apenas o parâmetro a^* teve resultado oposto, com o aumento

de aditivo levando a valores mais negativos, ou seja, tendendo a coloração verde (MEDINA JARAMILLO et al., 2015).

Figura 31 - Fotografias das amostras de amido de (a) mandioca, (b) batata e (c) milho.

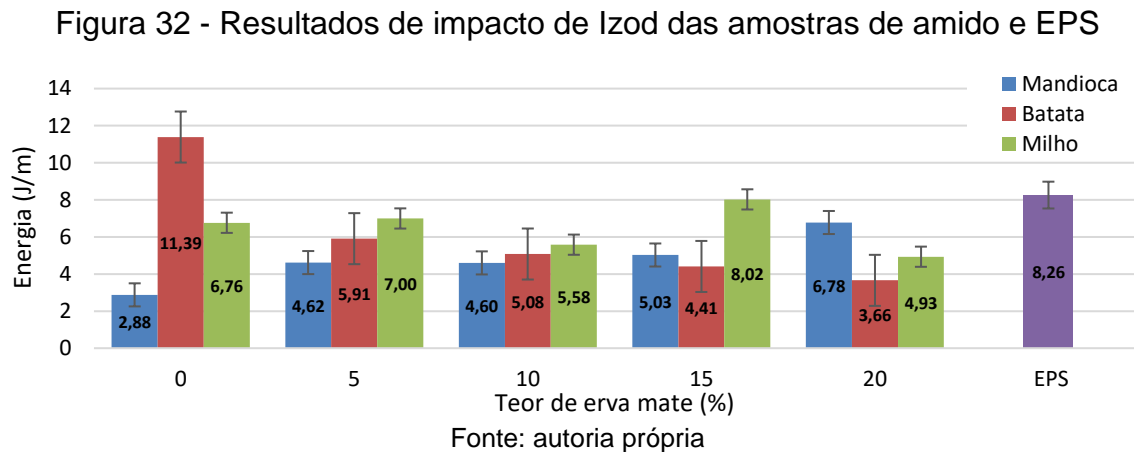


Fonte: autoria própria

Pode-se dizer que espumas sem reforço se apresentam com a cor mais branca, o que é compatível com as de material sintético disponíveis no mercado. Por outro lado, as espumas reforçadas apresentam uma cor mais para o marrom, devido a aplicação de calor nas prensas da máquina ao serem produzidas. Muitas embalagens de papel também possuem essa coloração e talvez esse fator não fosse um impedimento para entrada desses produtos no mercado.

5.5 Impacto Izod

Os resultados do ensaio de impacto Izod são mostrados na Figura 32 comparando as espumas branco e reforçadas das diferentes fontes de amido com o EPS utilizado no estudo.

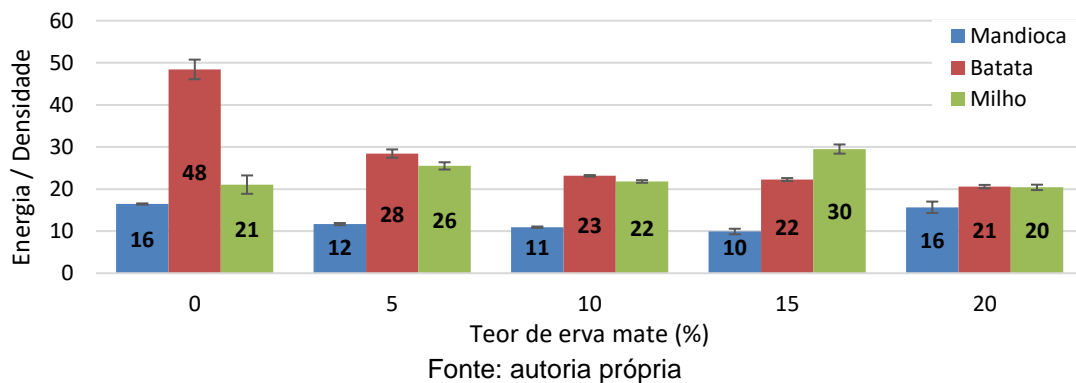


Das amostras de espuma branco, a que teve maior resistência ao impacto foi a de amido de batata, com valores inclusive superiores aos do EPS utilizado nesse estudo. As espumas de amido de milho também apresentaram resultados satisfatórios com relação à resistência ao impacto. As amostras de amido de mandioca apresentaram o menor valor das espumas branco.

Quando adicionadas as cargas, as amostras de mandioca tiveram sua resistência ao impacto aumentada, enquanto nas amostras de batata essa resistência diminuiu. Pode-se associar a maior ou menor resistência ao impacto das espumas à sua expansão, o que, levando em consideração os resultados de densidade, apoia os valores de impacto. Somente o milho obteve maior inconsistência nos resultados, com a amostra mais resistente sendo a que continha 15% de fibra e a de 20% com a menor resistência. A maior resistência

Para melhor comparação entre os materiais de mandioca, batata e milho, novamente foi optado por normalizar os resultados pela densidade e o gráfico de resistência ao impacto normalizado é apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Resultados de impacto das espumas de amido normalizados pela densidade das amostras



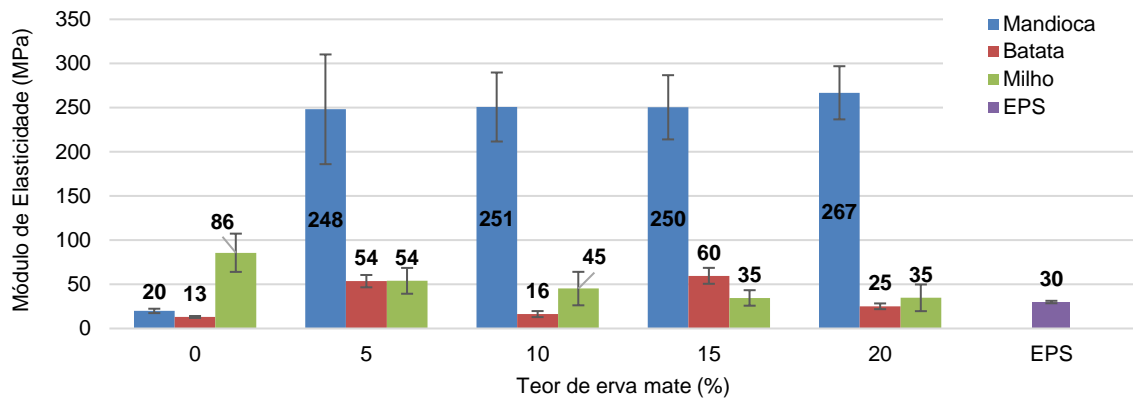
Quando normalizados, pode-se perceber que as espumas de mandioca reforçadas, apresentam resistência ao impacto mais baixas quando comparadas às demais. As amostras de milho e batata obtiveram resultados similares em suas espumas reforçadas. Os resultados aqui apresentados são compatíveis com o estudo de Bergel (BERGEL; DA LUZ; SANTANA, 2017) onde espumas de batata obtiveram maior resistência ao impacto e as produzidas com amido de mandioca e milho tiveram resistência similar.

Comparando esses dados com àqueles de absorção de umidade pode-se traçar um paralelo entre os dois, já que o amido de batata obteve valores superiores de absorção. A umidade absorvida pelo material atua como um plastificante na estrutura (MATVEEV, 2000) e, portanto, pode aumentar a resistência ao impacto da espuma. Um estudo utilizando diferentes quantidades de plastificante em PLA mostra o aumento da energia de impacto absorvida à medida que é aumentado a quantidade de plastificante nas amostras (GE et al., 2012).

5.6 Resistência à flexão

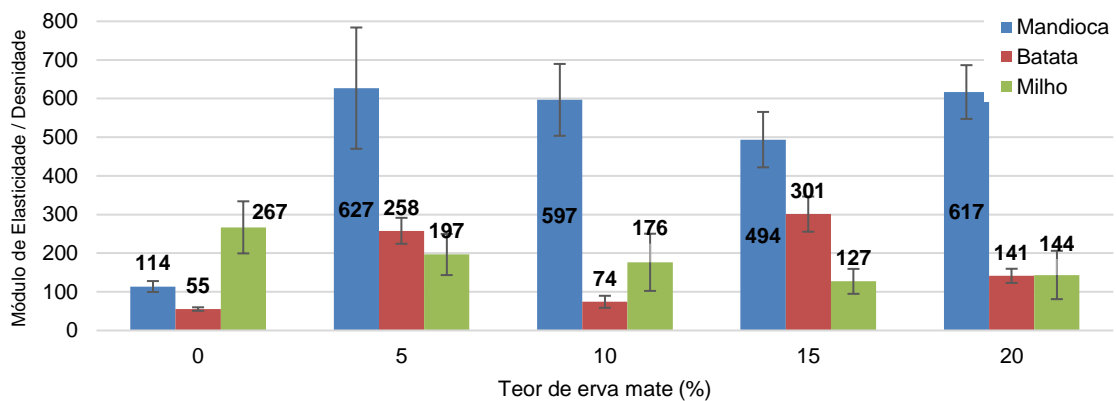
O ensaio de flexão foi realizado para as espumas produzidas e EPS, e são mostrados na Figura 34 com os valores de módulo de elasticidade da flexão e os valores normalizados pela densidade para as amostras de amido na Figura 35.

Figura 34 - Resultados de módulo de elasticidade da flexão das espumas de amido e EPS



Fonte: autoria própria

Figura 35 - Módulo de elasticidade da flexão normalizado pela densidade das amostras de amido



Fonte: autoria própria

Os resultados observados nos gráficos mostram que as espumas reforçadas de mandioca tiveram maior módulo de elasticidade na flexão, devido a essas espumas serem as mais compactadas. Porém, essas amostras também tiveram maior variação entre os corpos de prova. Com o aumento do teor de fibra o módulo foi levemente aumentado, entretanto ao normalizar os resultados pela densidade há uma diminuição nos valores de módulo.

Ao normalizar os resultados pela densidade, pode-se observar que as amostras de mandioca não diminuíram em sua diferença com as amostras de milho e batata o que mostra que a densidade tem alta influência nessa propriedade. As espumas de mandioca produzidas além de mais compactadas possuem maior espessura da camada externa, o que também contribui pra os altos valores de módulo de elasticidade na flexão.

As espumas de milho obtiveram melhor resultado dentre as não reforçadas e, com o aumento de fibra, o módulo de elasticidade na flexão diminuiu. No caso da batata, os resultados foram inconsistentes já que os maiores valores são para as reforçadas com 5% e 15% e os menores para a reforçada com 20% e a sem reforço. O motivo para a baixa resistência de algumas das espumas testadas pode ser a menor espessura da camada externa e das suas paredes celulares, o que é apoiado pelo fato de que as amostras com maior tamanho de célula, como as reforçadas de milho e batata não tiveram o rompimento total do corpo de prova, mas sim uma fratura na sua superfície inferior. Na Figura 36 observa-se foto das amostras de amido de batata utilizadas no ensaio de flexão.

Figura 36 - Amostras de amido batata com 10% de erva mate após ensaio de flexão



Fonte: autoria própria

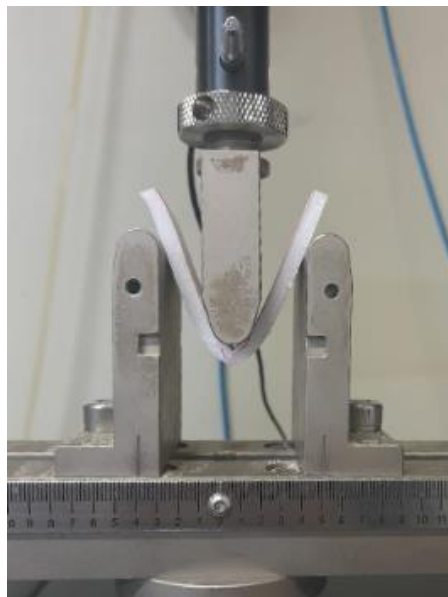
Em um estudo utilizando compósitos de amido de mandioca, batata e milho foi avaliado a resistência das amostras em ensaio de flexão (LIU; JIA; HE, 2012). Os materiais com de amido de milho tiveram maior resistência à flexão e módulo elástico. Os materiais com base no amido da batata tiveram os valores mais baixos de resistência no ensaio, enquanto aqueles com mandioca obtiveram valores intermediários. Observando a Figura 34 e 35, pode-se notar que as espumas não reforçadas produzidas neste estudo seguem o mesmo padrão quanto às suas propriedades mecânicas.

Os filmes com aditivo de extrato de erva mate do estudo de Jaramillo et al. (MEDINA JARAMILLO et al., 2015) também tiveram diminuição do módulo de

elasticidade onde é argumentado que há a diminuição de forças coesivas da rede em função de aditivos de baixa massa molecular como é o caso dos grupos antioxidantes presentes no extrato da erva mate.

O EPS também teve o ensaio de flexão realizado e obteve menor módulo de elasticidade que a grande maioria das amostras de amido produzidas neste estudo e com a velocidade realizada no ensaio não ocorreu a ruptura, somente deformação plástica como é mostrado na Figura 37.

Figura 37 - Amostra de EPS no ensaio de flexão

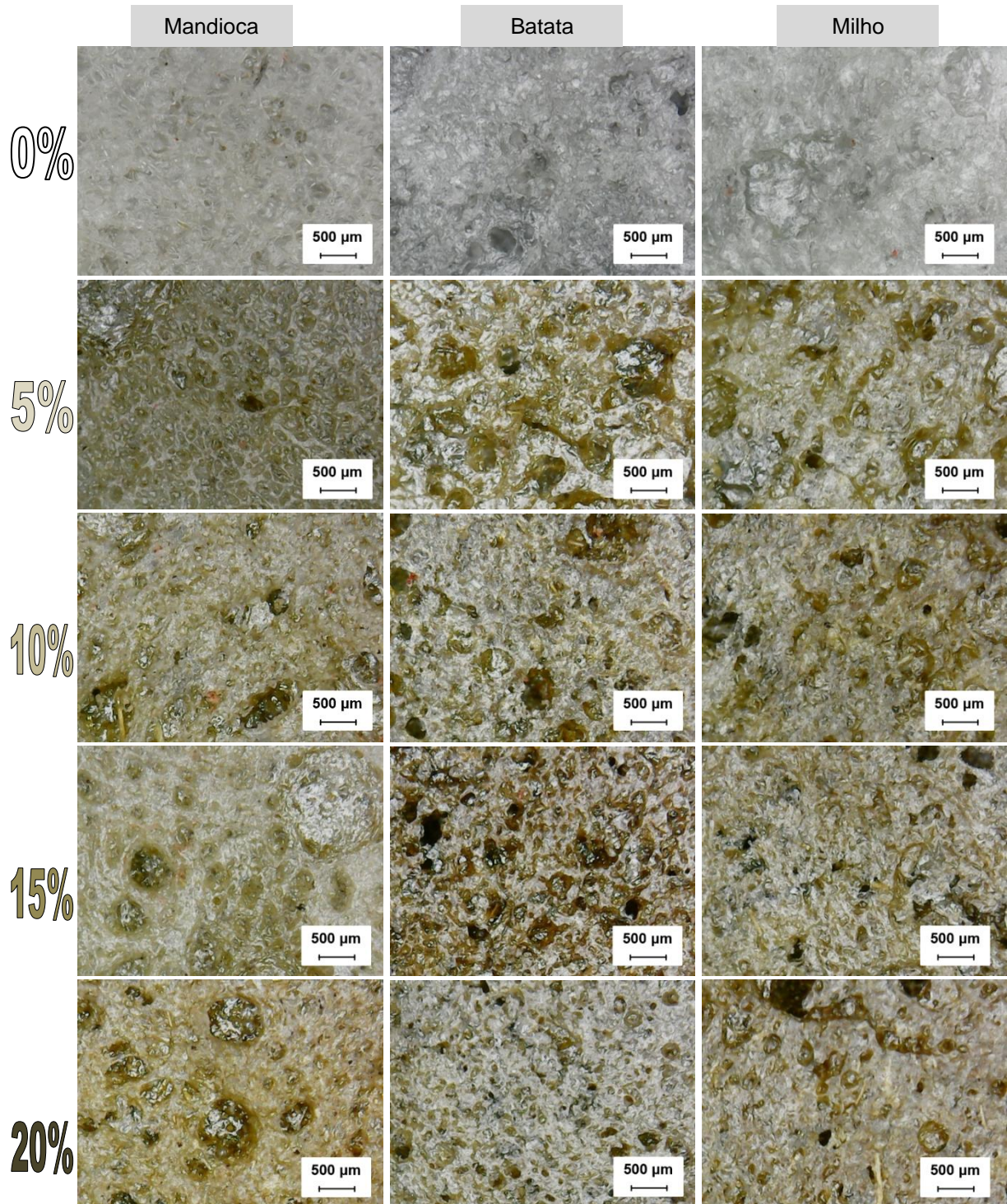


Fonte: autoria própria

5.7 Microscopia Óptica

Nesta parte são mostradas imagens das espumas produzidas com microscópio digital da superfície das amostras e das laterais onde pode-se observar melhor as células do material. Na Figura 38 observa-se a superfície das espumas de diferentes fontes de amido.

Figura 38 - Microscopia óptica da superfície das espumas de amido

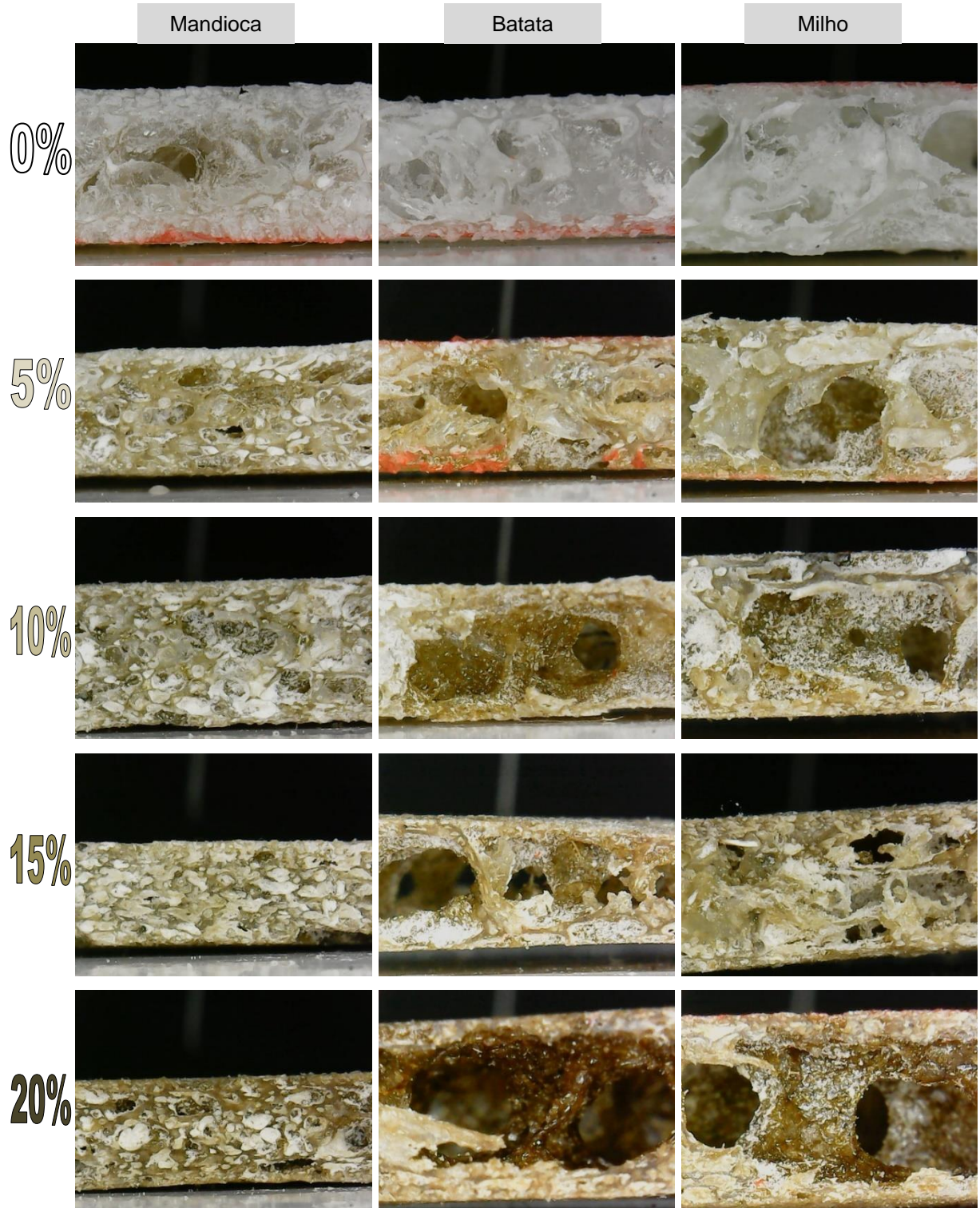


Fonte: autoria própria

Nas imagens de microscopia óptica, pode-se observar pela superfície das espumas que com o aumento do teor de carga nas amostras de mandioca as estruturas apresentam-se mais desuniformes e com poros, enquanto as amostras de batata e milho possui mais poros de menor tamanho nas suas superfícies. Para dar

seguimento à análise, a Figura 39 apresenta imagens da lateral da espuma onde pode-se observar a parte interna da estrutura.

Figura 39 - Microscopia óptica das células das espumas de amido



Fonte: autoria própria

Na Figura 39 nota-se que as espumas reforçadas de mandioca têm estrutura mais compacta, enquanto as de milho e batata se apresentam com estrutura mais expandida, células maiores (mais espaços vazios) e com suas paredes celulares e camada externa mais finas. Essa constatação apoia os resultados do ensaio de flexão, onde as espumas reforçadas de milho e batata tiveram propriedades mecânicas inferiores.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, espumas de amido de diferentes fontes foram produzidas com o uso de dois aditivos: glicerol como co-plastificante e fibras de erva mate como reforço. O teor de glicerol foi mantido a 5% na produção das pastas, enquanto a erva mate teve proporção variada na composição das espumas. Foi avaliado a influência da erva mate nesses materiais e realizada comparação entre os compósitos de diferentes matrizes utilizadas, que foram: o amido de mandioca, de batata e de milho.

Quanto à densidade das espumas, conclui-se que espumas de mandioca possuem menor densidade das diferentes fontes ($0,17 \text{ g/cm}^3$). Entretanto, neste estudo, ao se adicionar carga, os compósitos de mandioca apresentaram espumas mais compactas com menor espessura, com maior quantidade e menor tamanho de poros, enquanto as espumas de batata e milho foram menos densas com adição de reforço.

Resultados do ensaio de absorção de umidade mostraram que as amostras reforçadas, de forma geral, absorveram mais água, com exceção do amido de mandioca que permaneceu com sua estrutura bem mais compactada e camada externa mais espessa.

Resultados dos ensaios mecânicos mostraram que a incorporação da fibra de erva mate no amido expandido promoveu um aumento no módulo de flexão das espumas de mandioca, porém apresentou valores mais baixos quanto à resistência ao impacto, comportamento esperado, pois aumentou o módulo, ficou más rígido e, portanto, frágil ao impacto. A espuma de batata sem reforço obteve o resultado mais satisfatório em impacto dentre todas, com energia de $11,8 \text{ J/m}$ e, quando adicionadas as fibras e normalizadas pela densidade, obteve resultado similar ao do milho.

Uma observação a ser feita é a irregularidade das amostras produzidas que obtiveram, por vezes, resultados não homogêneos entre espumas da mesma família ou mesma fonte de amido. Conclui-se, nesse caso, que materiais naturais podem apresentar grande variação dos resultados e necessita-se de um controle maior na metodologia de sua produção. Fatores como liberação da pressão na hora da expansão, controle da pressão aplicada, disposição da pasta de amido no molde antes da expansão, tempo de mistura na batedeira e volatilização da água usada na

preparação da pasta são parâmetros que podem ter causado a mencionada variação entre as espumas produzidas. Além disso, o excesso de água empregado nas pastas de amido de batata e milho causaram expansão exagerada das amostras o que não foi benéfico para algumas das propriedades das espumas.

Finalmente, concluiu-se que o reforço de erva mate utilizado neste estudo (somente partículas pequenas) é benéfico para a expansão das amostras e tem impacto nas suas propriedades mecânicas e de hidrofobicidade. Espumas com pequenos teores do aditivo usado, entre 5% e 10%, tiveram, de forma geral, melhor desempenho do que com quantidades maiores.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, A. H. D. et al. Physical and chemical properties of corn, cassava, and potato starches. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 160, p. 012003, jun. 2018.

ABRE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGEM. ABRE. ESTUDO ABRE MACROECONÔMICO DA EMBALAGEM E CADEIA DE CONSUMO. São Paulo: ABRE, 2020. Disponível em: <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2020-2/>. Acesso em: 7 ago. 2022.

ABRELPE. PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2020. Av. Paulista, 807 - Cj.207 - São Paulo - SP | CEP 01311-915: [s.n.]. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 2 out. 2022.

ALVES, T. T. COR: Aula 21 - Espaço de cor Lab. Disponível em: <http://corisectelmo.blogspot.com/2011/01/aula-21-espaco-de-cor-lab.html>. Acesso em: 2 out. 2022.

ASTM D 256. ASTM D 256 Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. In: ASTM D 256 - 04 2004, Anais

ASTM D 3575. D3575 Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials Made From Olefin Polymers. In: ASTM D 3575 2001, Anais

ASTM D 7334. ASTM D7334-08, standard practice for surface wettability of coatings, substrates and pigments by advancing contact angle measurement: active standard. In: ASTM D 7334 - 08 2013, Anais

ASTM D5229. ASTM D 5229– 92 – Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials. In: ASTM D5229-2004 2010, Anais

ASTM E 104. ASTM E104 Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions. In: ASTM E 104 2014, Anais

BBC RESEARCH LLC. Polymeric Foams: Global Markets. 49 Walnut Park, Building 2, Wellesley, MA 02481, USA: BCC Publishing Staff, maio 2022. Disponível em: <https://www.bccresearch.com/market-research/plastics/polymeric-foams-report.html>. Acesso em: 2 out. 2022.

BEN, Z. Y.; SAMSUDIN, H.; YHAYA, M. F. Glycerol: Its properties, polymer synthesis, and applications in starch based films. European Polymer Journal, v. 175, p. 111377, jul. 2022.

BERGEL, B. F.; ARAUJO, L. L.; SANTANA, R. M. C. Effects of the addition of cotton fibers and cotton microfibers on the structure and mechanical properties of starch foams made from potato starch. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, v. 2, p. 100167, dez. 2021.

BERGEL, B. F.; DA LUZ, L. M.; SANTANA, R. M. C. Comparative study of the influence of chitosan as coating of thermoplastic starch foam from potato, cassava and corn starch. *Progress in Organic Coatings*, v. 106, p. 27–32, maio 2017.

BORSOI, C. et al. Effects of alkaline treatment and kinetic analysis of agroindustrial residues from grape stalks and yerba mate fibers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 139, n. 5, p. 3275–3286, 19 ago. 2019.

BRUDER, U. Modification of Polymers. In: *User's Guide to Plastic*. [s.l.] Hanser, 2019. p. 76–87.

BURRIS, Kellie P., HARTE, F. M., MICHAEL DAVIDSON, P., SWEWART, C. N., and ZIVANOVIC, S. 2012. Composition and bioactive properties of Yerba Mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.): A review. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 72(2), 268–274. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392012000200016>TOMASI, J. DE C. et al.

BYUN, Y.; ZHANG, Y.; GENG, X. Plasticization and Polymer Morphology. In: HAN, J. H. (Ed.). *Innovations in Food Packaging*. [s.l.] Academic Press, 2014. p. 87–108.

CAO, S.; ZHANG, Y.; LU, Y. Mechanical properties and reinforcement mechanisms evaluation of closed-cell polymer foams reinforced by recycled glass beads. *Construction and Building Materials*, v. 275, p. 122062, mar. 2021.

DE LA ROSA, L. A. et al. Phenolic Compounds. In: YAHIA, E. M. (Ed.). *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*. [s.l.] Woodhead Publishing, 2019. p. 253–271.

DING, Y. et al. A Review on Microcellular Injection Moulding. *Materials*, v. 14, n. 15, p. 4209, 28 jul. 2021.

FRIZON, C. N. T. et al. Determination of total phenolic compounds in yerba mate (*Ilex paraguariensis*) combining near infrared spectroscopy (NIR) and multivariate analysis. *LWT - Food Science and Technology*, v. 60, n. 2, p. 795–801, mar. 2015.

GAMA, N.; FERREIRA, A.; BARROS-TIMMONS, A. Polyurethane Foams: Past, Present, and Future. *Materials*, v. 11, n. 10, p. 1841, 27 set. 2018.

GE, H. et al. Thermal, mechanical, and rheological properties of plasticized poly(L-lactic acid). *Journal of Applied Polymer Science*, v. 127, n. 4, p. 2832–2839, 16 maio 2012.

GEORGEDROBNY, J. Processing Methods Applicable to Thermoplastic Elastomers. In: *Handbook of Thermoplastic Elastomers*. [s.l.] Plastics Design Library, 2014. p. 33–173.

GODWIN, A. D. Plasticizers. In: KUTZ, M. (Ed.). *Applied Plastics Engineering Handbook*. [s.l.] William Andrew Publishing, 2011. p. 487–501.

GONZÁLEZ, R. M.; VILLANUEVA, M. P. Starch-based polymers for food packaging. In: LAGARÓN, J.-M. (Ed.). *Multifunctional and Nanoreinforced Polymers for Food Packaging*. [s.l.] Woodhead Publishing, 2011. p. 527–570.

GUPTA, N. et al. Applications of Polymer Matrix Syntactic Foams. *JOM*, v. 66, n. 2, p. 245–254, 2014.

GUPTA, N.; PINISETTY, D.; CHAKRAVARTHY SHUNMUGASAMY, V. Reinforced Polymer Matrix Syntactic Foams. 1. ed. [s.l.] Springer Cham, 2013. p. 1–80

HEEMANN, A. C. W. et al. Enzyme-assisted extraction of polyphenols from green yerba mate. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 22, 2019.

HENRIQUES, I. R. et al. Viscoelastic behavior of polymeric foams: Experiments and modeling. *Mechanics of Materials*, v. 148, p. 103506, set. 2020.

IBERIA, BASF Poliuretanos. Poliuretano projectado Célula Fechada ou Célula Aberta

JIANG, L.; ZHANG, J. Biodegradable and Biobased Polymers. In: KUTZ, M. (Ed.). *Applied Plastics Engineering Handbook*. [s.l.] William Andrew Publishing, 2017. p. 127–143.

JIN, F.-L. et al. Recent Trends of Foaming in Polymer Processing: A Review. *Polymers*, v. 11, n. 6, p. 953, 1 jun. 2019.

JOYE, I. J. Starch. In: MELTON, L.; SHAHIDI, F.; VARELIS, P. (Eds.). *Encyclopedia of Food Chemistry*. [s.l.] Elsevier Science, 2019. p. 256–264.

KNAPP, M. A. 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, 19 fev. 2019.

LAU, A. K.; CHEUNG, K. H. Y. Natural fiber-reinforced polymer-based composites. In: LAU, A. K.; HUNG, A. P.-Y. (Eds.). *Natural Fiber-Reinforced Biodegradable and Bioresorbable Polymer Composites*. [s.l.] Woodhead Publishing, 2017. p. 1–18.

LI, B. et al. Biodegradable PLA/PBS open-cell foam fabricated by supercritical CO₂ foaming for selective oil-adsorption. *Separation and Purification Technology*, v. 257, p. 117949, fev. 2021.

LI, B. et al. Fabrication of high-expansion microcellular PLA foams based on pre-isothermal cold crystallization and supercritical CO₂ foaming. *Polymer Degradation and Stability*, v. 156, p. 75–88, out. 2018.

LIU, J.; JIA, C.; HE, C. Flexural Properties of Rice Straw and Starch Composites. *AASRI Procedia*, v. 3, p. 89–94, 2012.

LIU, P. S.; CHEN, G. F. Producing Polymer Foams. In: *Porous Materials*. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2014. p. 345–382.

LLEWELYN, G. et al. Advances in microcellular injection moulding. *Journal of Cellular Plastics*, v. 56, n. 6, p. 646–674, 17 mar. 2020.

MARIAM AL-ALI ALMA'ADEED; IGOR KRUPA. *Polyolefin Compounds and Materials Fundamentals and Industrial Applications*. [s.l.] Cham Springer International Publishing, 2016.

MATVEEV, Y. The plasticizing effect of water on proteins, polysaccharides and their mixtures. *Glassy state of biopolymers, food and seeds. Food Hydrocolloids*, v. 14, n. 5, p. 425–437, 1 set. 2000.

MAXI QUIM. Cálculo dos índices de reciclagem mecânica de plásticos pós-consumo no Brasil. Av. Carlos Gomes 111 – 11º andar, Auxiliadora – Porto Alegre/RS - CEP 90480-000: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.picplast.com.br/portal/picplast/arquivos/Indices-Reciclagem-2020-PICPlast-divulgacao-final.pdf>>. Acesso em: 2 out. 2022.

MEDINA JARAMILLO, C. et al. Biodegradability and plasticizing effect of yerba mate extract on cassava starch edible films. *Carbohydrate Polymers*, v. 151, p. 150–159, out. 2016.

MEDINA JARAMILLO, C. et al. Biofilms based on cassava starch containing extract of yerba mate as antioxidant and plasticizer. *Starch - Stärke*, v. 67, n. 9-10, p. 780–789, 29 maio 2015.

OBI, B. E. *Fundamentals of Polymeric Foams and Classification of Foam Types*. In: *Polymeric Foams Structure-Property-Performance*. [s.l.] William Andrew Publishing, 2017. p. 93–129.

PACHORI, S. et al. Synthesis Methods of Starch-Based Polymer Foams and Its Comparison With Conventional Polymer Foams for Food Packaging Applications. In: GUTIÉRREZ, T. (Ed.). *Polymers for Agri-Food Applications*. [s.l.] Springer Cham, 2019. p. 317–338.

PACHORI, S. et al. Synthesis Methods of Starch-Based Polymer Foams and Its Comparison With Conventional Polymer Foams for Food Packaging Applications. *Polymers for Agri-Food Applications*, p. 317–338, 2019.

RAPS, D. et al. Past and present developments in polymer bead foams and bead foaming technology. *Polymer*, v. 56, p. 5–19, jan. 2015.

REZGAR, H. et al. Thermal Conductivity of Low Density Polyethylene Foams Part I: Comprehensive Study of Theoretical Models. *Journal of Thermal Science*, v. 28, n. 4, p. 745–754, 2019.

SAUCEAU, M. et al. New challenges in polymer foaming: A review of extrusion processes assisted by supercritical carbon dioxide. *Progress in Polymer Science*, v. 36, n. 6, p. 749–766, jun. 2011.

The Future of Polymer Foams to 2026 | Market Reports and Research. Disponível em: <<https://www.smithers.com/services/market-reports/materials/the-future-of-polymer-foams-to-2025>>. Acesso em: 2 out. 2022.

TOMASI, J. DE C. et al. Effects of different drying methods on the chemical, nutritional and colour of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) leaves. *International Journal of Food Engineering*, v. 17, n. 7, p. 551–560, 16 abr. 2021.

VALERGA, J.; RETA, M.; LANARI, M. C. Polyphenol input to the antioxidant activity of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) extracts. *LWT - Food Science and Technology*, v. 45, n. 1, p. 28–35, jan. 2012.

WYPYCH, G. SELECTION OF FOAMING AND BLOWING AGENTS FOR DIFFERENT POLYMERS. In: *Handbook of Foaming and Blowing Agents*. [s.l.] ChemTec Publishing, 2017. p. 123–177.

ZHANG, T. et al. Compression Molding of Thermoplastic Polyurethane Foam Sheets with Beads Expanded by Supercritical CO₂ Foaming. *Polymers*, v. 13, n. 4, p. 656, 22 fev. 2021.

ZHOU, W. et al. Impact of amylose content on starch physicochemical properties in transgenic sweet potato. *Carbohydrate Polymers*, v. 122, p. 417–427, 20 maio 2015.