



**MARCO AURÉLIO SILVA VICENTE**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TALCO NA ESTRUTURA  
E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO POLIESTIRENO  
EXTRUDADO**

**LAVRAS – MG**

**2021**

**MARCO AURÉLIO SILVA VICENTE**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TALCO NA ESTRUTURA E PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DO POLIESTIRENO EXTRUDADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade Federal de Lavras, como parte das  
exigências do Curso de Engenharia de Materiais, para a  
obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes

Orientador

**LAVRAS – MG**

**2021**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Vicente, Marco Aurélio Silva.

Avaliação da Influência do Talco na Estrutura e Propriedades  
Mecânicas do Poliestireno Extrudado / Marco Aurélio Silva  
Vicente. - 2021.

38 p.

Orientador(a): Rafael Farinassi Mendes.

TCC (graduação) - Universidade Federal de Lavras, 2021.  
Bibliografia.

1. Embalagens. 2. XPS. 3. Agentes nucleantes. I. Mendes,  
Rafael Farinassi. II. Título.

## RESUMO

A embalagem tem a função de proteger, preservar e garantir a integridade do alimento, atuando como barreira de contaminantes químicos, físicos e microbiológicos. Um dos principais setores para o mercado de embalagens é o alimentício, que muitas das vezes utiliza de materiais poliméricos para produção, devido as suas características como flexibilidade, leveza e baixo custo. Um dos polímeros que é bastante utilizado é o poliestireno, que comumente é encontrado na sua forma expandida, como por exemplo o poliestireno extrudado (XPS). Na indústria de embalagens o XPS é bastante utilizado por ser de baixo custo e conseguir propriedades como boa processabilidade, resistência e baixa densidade. Durante o seu processamento são utilizados alguns aditivos, um dos principais é o talco, que influencia na qualidade final do produto. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do talco sobre as propriedades mecânicas e na microestrutura do XPS. O XPS foi produzido em uma extrusora modelo *tandem*, onde duas extrusoras são interconectadas. Foram analisadas três composições diferentes de talco (agente nucleante) - 0,57%, 1,39% e 2,21%, em relação a massa total da mistura. Após 5 dias de cura suas propriedades físicas e mecânicas foram avaliadas. O cálculo de células abertas (CA) foi realizado usando o equipamento ultrapicnômetro. Além disso, foi avaliada a densidade do material, a sua microestrutura e a resistência mecânica a tração (módulo de elasticidade (MOE) e resistência a tração) e a flexão (módulo de elasticidade e módulo de ruptura (MOR)). O percentual de células abertas e a densidade do XPS foram afetados significativamente pelas concentrações de talco utilizado no processamento do material. O aumento das concentrações de talco promoveu aumento da quantidade de células abertas e por consequência resultou na diminuição da densidade. O aumento da concentração de talco promoveu a diminuição do tamanho das células formadas, assim como também implicou em ondulações do material. O efeito da concentração de talco foi observado apenas quando analisado o MOE à tração, não sendo verificado efeito significativo nas propriedades de resistência a tração e MOR e MOE à flexão estática.

**Palavras-chave:** Embalagens, XPS, agente nucleante, células abertas.

## ABSTRACT

The packaging has the function of protecting, preserving and guaranteeing the integrity of the food, acting as a barrier to chemical, physical and microbiological contaminants. One of the main sectors for the packaging market is food, which often uses polymeric materials for production, due to its characteristics such as flexibility, lightness and low cost. One of the polymers that is widely used is polystyrene, which is commonly found in its expanded form, such as extruded polystyrene (XPS). In the packaging industry, XPS is widely used because it has a low cost and achieves properties such as good processability, strength and low density. During its processing, some additives are used, one of the main ones is talc, which influences the final quality of the product. In this context, the objective of this work was to evaluate the effect of talc on the mechanical properties and microstructure of XPS. The XPS was produced on a tandem model extruder, where two extruders are interconnected. Three different compositions of talc (nucleating agent) were analyzed - 0.57%, 1.39% and 2.21%, in relation to the total mass of the mixture. After 5 days of curing, its physical and mechanical properties were evaluated. The calculation of open cells (CA) was performed using the ultracycrometer equipment. In addition, the density of the material, its microstructure and the mechanical resistance to traction (modulus of elasticity and tensile strength) and flexion (modulus of elasticity and modulus of rupture) were evaluated. The percentage of open cells and the density of XPS were significantly affected by the concentrations of talc used in processing the material. The increase in talc concentrations promoted an increase in the amount of open cells and, consequently, resulted in a decrease in density. The increase in the concentration of talc promoted a reduction in the size of the cells formed, as well as causing the material to ripple. The effect of talc concentration was observed only when analyzing the MOE to tensile strength, with no significant effect on the properties of tensile strength and MOR and MOE to static bending. The increase in the concentration of talc promoted a reduction in the size of the cells formed, as well as causing the material to ripple. The effect of talc concentration was observed only when analyzing the MOE to tensile strength, with no significant effect on the properties of tensile strength and MOR and MOE to static bending. The increase in the concentration of talc promoted a reduction in the size of the cells formed, as well as causing the material to ripple. The effect of talc concentration was observed only when analyzing the MOE to tensile strength, with no significant effect on the properties of tensile strength and MOR and MOE to static bending.

Keywords: Packaging, XPS, nucleating agent, open cells.

## Sumário

<b>1. Introdução.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Revisão de literatura.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1. Produto e Mercado.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2. Poliestireno.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3. Processamento por extrusão.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4. Espumas poliméricas e células abertas.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5. Talco.....</b>	<b>16</b>
<b>3. Material e métodos.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1. Materiais.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2. Processamento do material.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3. Caracterização do material.....</b>	<b>23</b>
<b>3.3.1. Porcentagem de células abertas (%CA).....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.2. Densidade.....</b>	<b>25</b>
<b>3.3.3. Microscopia Óptica.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.4. Propriedades Mecânicas.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.5. Análise de dados.....</b>	<b>27</b>
<b>4. Resultados e discussão.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1. Porcentagem de células abertas.....</b>	<b>27</b>
<b>4.2. Densidade.....</b>	<b>29</b>
<b>4.3. Microscopia óptica.....</b>	<b>30</b>
<b>4.4. Ensaio mecânicos.....</b>	<b>32</b>
<b>5. Conclusão.....</b>	<b>37</b>
<b>6. Referências.....</b>	<b>37</b>

## 1. Introdução

Nos dias atuais a demanda de bens de consumo é cada vez maior, o que resulta em um crescente aumento na produção de embalagens para armazenar os produtos. Desta forma, a mudança do estilo de vida e hábitos alimentares do consumidor, vem estimulando o desenvolvimento tecnológico nesse setor.

A principal função de uma embalagem é proteger o produto, atendendo as especificações para preservar e conservar a mercadoria, além de garantir a integridade da mesma (FABRIS; FREIRE; REYES, 2006). Dentre os setores que utilizam embalagens, o alimentício é um dos que apresenta a maior demanda. As embalagens além de proteger, preservar e garantir a integridade do alimento, atuam como barreira de contaminantes químicos, físicos e microbiológicos.

A maioria das embalagens para alimentos são feitas com o uso de materiais poliméricos, devido a suas características como flexibilidade, leveza e baixo custo (LANDIM et al., 2014). Um dos polímeros que pode ser utilizado para fabricação de embalagens é o poliestireno, que pode ser encontrado em quatro formas principais: o poliestireno cristal, que tem como propriedades transparência e rigidez; o poliestireno de alto impacto, que é resistente e opaco; o poliestireno expandido (EPS), que apresenta baixa densidade e condutividade térmica; e o poliestireno extrudado (XPS) que tem semelhança ao EPS e compete com ele em suas aplicações, principalmente como isolante térmico (MIYAKE et al., (2017).

O XPS é processado por extrusão e as linhas de extrusão em *tandem*, duas extrusoras conectadas, ainda são preferidas, pois elas fornecem uma maior taxa de saída e uma estrutura celular mais desejável. A extrusora primária funde e homogeniza as matérias-primas, por isso nela são utilizadas temperaturas maiores e é nessa etapa que ocorre a injeção do gás expensor e o parafuso na extrusora desempenha um papel importante na dispersão do agente de expansão em gotículas extremamente finas. A extrusora secundária é também chamada de extrusora de resfriamento pelo fato dessa ser a sua principal função no processo. O fundido é resfriado até a temperatura ideal para maximizar a sua resistência e o comportamento de endurecimento por deformação no estágio de expansão da espuma. Quando o polímero fundido resfriado com agentes de expansão se aproxima da saída do cabeçote, a nucleação da célula (esferulito) ocorre devido à instabilidade termodinâmica desencadeada pela pressão reduzida (LEE, 2015). Essas células, ou espaços vazios dispersos no material, podem ser abertas ou fechadas, sendo que as células abertas (CA) apresentam uma alta capacidade de absorção de líquidos e as células fechadas (CF) apresentam baixa densidade e alta impermeabilidade (GARCIA et al., 2017).

O agente nucleante desempenha um papel importante no processo de extrusão, pois vai ser responsável pela formação das células no material, ajudando a produzir um material com alta densidade de células e uma melhor distribuição delas na estrutura do material. Um dos agentes mais utilizados é o talco (WONG; PARK, 2011).

Naguiby (2003) analisou o efeito do talco nas propriedades de expansão de espumas de polipropileno (PP) extrudado e foi observado que as espumas expandidas com alto teor de talco eram mais suscetíveis à perda de gás em temperaturas elevadas. Isso indica que a temperatura de processamento deve ser diminuída para ter uma grande taxa de expansão das espumas de PP extrudadas com um alto teor de talco. Em outras palavras, a temperatura ótima para maximizar a expansão diminuiu com um conteúdo de talco mais alto. Foi observado também nesse trabalho que a densidade populacional de células e a cristalinidade aumentou com o aumento do percentual de talco, o que levou a uma diminuição da densidade aparente e do tamanho médio das células na estrutura do material.

De acordo com Wang et al., (2013), a adição de talco no processo de degradação de polipropileno extrudado, influenciou no módulo de elasticidade à tração que aumentou quando variou a concentração de talco. Segundo Gui et al., (2001) o talco afeta as propriedades mecânicas de flexão do polipropileno e a concentração de talco elevou o módulo de elasticidade à flexão, mas em determinado momento acontecia uma estabilização devido a uma saturação de talco na estrutura. Por outro lado, as propriedades do poliácido láctico (PLA) sob influência do talco não alteraram significativamente o alongamento a ruptura, módulo de elasticidade e resistência à tração do material (SUKSUT; DEEPRASERTKUL, 2010).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de porcentagens de talco sobre as propriedades físicas e mecânicas do poliestireno extrudado (XPS).

## **2. Revisão de literatura**

### **2.1. Produto e Mercado**

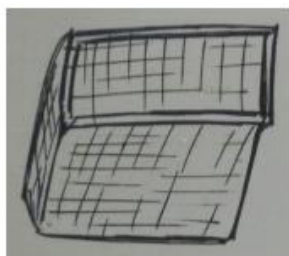
O mercado de embalagens está totalmente engajado ao crescimento da economia, sendo que, quanto maior a produção de bens de consumo e mercadorias, maior é a necessidade de embalagens. Essa presença constante se reflete na grande importância no cotidiano, para transportar e armazenar produtos (FABRIS; FREIRE; REYES, 2006).

As primeiras embalagens surgiram com a necessidade da sociedade em transportar e conservar os alimentos em ocasiões de escassez, assim houve a criação de recipientes simples feitos de escamas, folhas de plantas, peças ocas de madeira, louças de barro e pele de animais,



as quais acondicionavam bebidas, frutas e outros alimentos da natureza. Na Figura 1 é ilustrado como eram as primeiras embalagens.

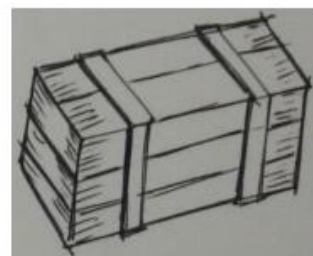
**Figura 1:** Diferentes tipos de embalagens antigas



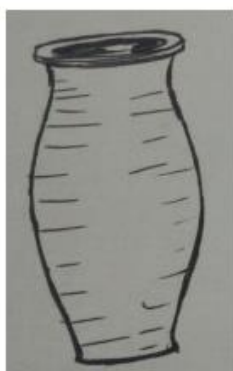
**Balaio de fibra natural**



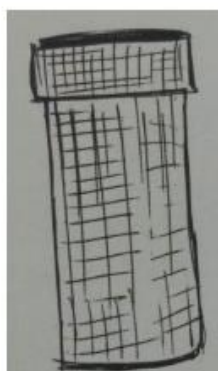
**Barril de madeira**



**Caixa de madeira**



**Pote de barro**



**Cesta de fibra natural**



**Ânfora de barro**

Fonte: REBRAPA (2006)

Em geral seu principal objetivo é proteger o produto, com a finalidade de preservar as características do alimento, por meio das propriedades de barreira aos fatores ambientais, tais como luz, umidade, oxigênio e microrganismos, mantendo o produto sem alterações indesejáveis durante o transporte e armazenamento (LANDIM et al., 2014).

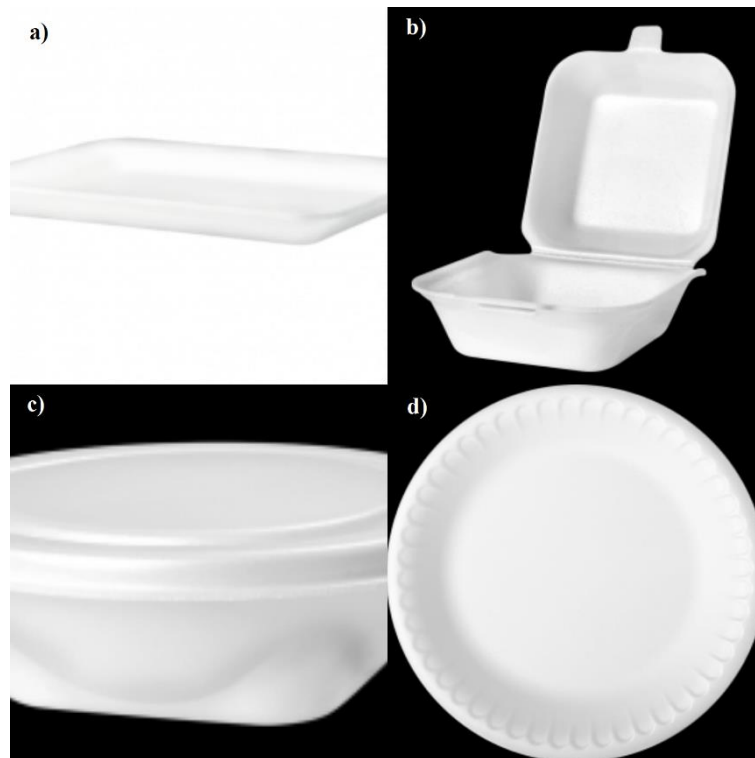
De acordo com a utilização as embalagens são classificadas em primárias, secundárias e terciárias. As primárias estão em contato direto com o produto, já as secundárias têm a função de agrupar, para facilitar a manipulação e a apresentação, podendo exercer também a função de proteger a embalagem primária, em seu interior, evitando choques e vibrações excessivas. As embalagens terciárias protegem a mercadoria durante as fases do transporte e assim por diante (LANDIM et al., 2014).

Os polímeros são uma das classes de materiais mais utilizadas para produção de embalagens, devido a propriedades que os favorecem, como baixa densidade e baixo custo. Um

dos polímeros utilizados para produção de embalagem é o poliestireno. Todo ano é produzido mundialmente o equivalente a 2 milhões de toneladas de EPS e XPS, e no Brasil 50% da produção nacional é consumida pelo setor de embalagens (ARAÚJO; BAPTISTA; ARAÚJO, 2020).

A embalagem de XPS é uma embalagem primária, pois ela está em contato diretamente com o alimento. Existem diversos tipos de embalagens com diferentes cores e modelos, como por exemplo marmitas, tampas, bandejas e pratos. Na Figura 2 é possível observar alguns exemplos de embalagens de poliestireno extrudado, similares ao produto a ser analisado no presente trabalho.

**Figura 2** – Exemplos de embalagens de poliestireno extrudado. a) Bandeja; b) Hamburgueira; c) Marmita; d) Prato.



Fonte: Copobras, 2021

## 2.2. Poliestireno

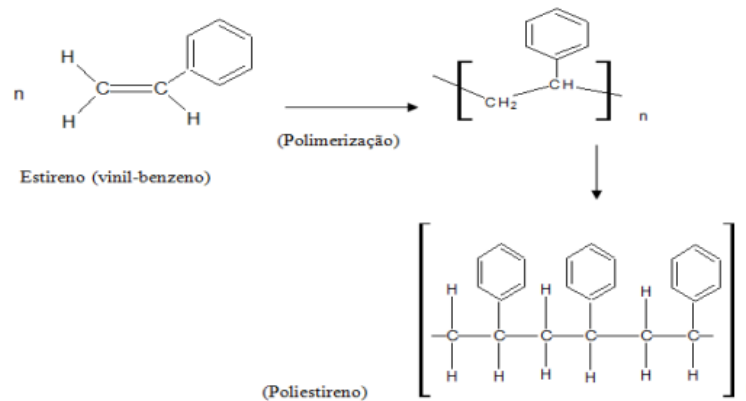
Uma das maneiras de subdividir os materiais poliméricos é analisando o seu comportamento reológico e mecânico sob influência de temperatura. Os polímeros termorrígidos quando submetidos à elevadas temperaturas não tem variação na viscosidade do material, acontecendo o rompimento de suas ligações moleculares, levando a degradação do material. Um dos principais motivos para isso acontecer é o fato de que na estrutura molecular do polímero ele apresenta muitas ligações cruzadas, que dificulta para que a estrutura consiga

sair da sua configuração emaranhada para uma configuração mais linear. Já os polímeros termoplásticos quando são submetidos a elevadas temperaturas (de maneira controlada), a sua viscosidade vai diminuir e isso faz com que o polímero flua e quando a temperatura é retirada ele volta a sua configuração original. Isso acontece devido ao fato de a estrutura desse tipo de polímero ter poucas ou nenhuma ligação cruzada, sendo mais fácil para que o polímero saia do seu emaranhamento (CANEVAROLLO, 2006).

Um dos polímeros termoplásticos mais conhecidos é o poliestireno (PS), que muitas das vezes é fabricado na forma expandida (EPS). O Poliestireno Expandido (EPS) é um plástico celular rígido, devido à polimerização do estireno em água, podendo assim, apresentar diversas formas geométricas tornando-se uma espuma moldada, constituída por um aglomerado de grânulos. A leveza, isolamento térmico e o baixo custo são características que tem fortalecido a presença do EPS no mercado consumidor (SILVA; CARVALHO; SILVA, 2016).

O monômero de estireno foi descoberto por Newman em 1786, onde ele isolou o estireno através da destilação do líquido de âmbar, uma resina sólida obtida a partir de uma família de árvores nativas do extremo oriente e Califórnia. O líquido exala um odor de baunilha e era utilizado na medicina e na perfumaria. Ele contém ácido cinâmico, que é facilmente descarboxilado para obtenção de estireno. A primeira polimerização do estireno foi feita por Eduard Simon em 1839 e foi obtido um composto sólido proveniente da destilação com vapor a partir da resina denominada estírol (JACQUES, 2010).

As reações de polimerização em cadeia caracterizam-se pela formação de espécies químicas a partir do monômero cuja estabilidade relativa torna-as reativas. Estas espécies químicas podem ser radicais livres, íons, ou complexos de coordenação. O mecanismo de polimerização é composto por três etapas básicas: iniciação, propagação e terminação. A iniciação ocorre por agentes físicos ou químicos. A reação do iniciador com o monômero forma uma espécie ativa que reage com mais monômeros aumentando o tamanho do radical livre, esta é a etapa de propagação. Na terminação o centro ativo é extinto ou pela reação com outro centro ativo ou por combinação ou por desproporcionamento (DEUSDARÁ, 2012). A reação de polimerização do poliestireno segue esse modelo onde sucessivas moléculas do monômero estireno vão ser ligadas formando assim o polímero. Mediante a presença de um catalisador a ligação dupla de carbono do monômero é rompida formando assim ligações simples que vão facilitar para que as moléculas dos monômeros se liguem. Na Figura 3 é possível visualizar esse processo.

**Figura 3** – Reação de Polimerização do PS.

Fonte: Rodrigues (2017)

Espumas ou materiais expandidos são plásticos cuja densidade aparente é também reduzida substancialmente pela presença de inúmeras células de ar dispersas na massa. Peças de espumas de poliestireno podem ser flexíveis ou rígidas e podem conter células abertas (interconectadas), com elevada capacidade de absorção de líquidos, ou células fechadas (separadas), com baixíssima densidade e impermeabilidade a líquidos. O EPS pode apresentar variações de densidade para suas mais diferentes aplicações, sendo mais ou menos resistente, dependendo do tamanho e da quantidade de células de ar geradas durante os processos de expansão e moldagem dos produtos (GARCIA et al., 2017). Essa diferença acontece, pois no poliestireno os grânulos segregados vão ser unidos através do processo de fusão e por essa razão eles vão ter um espaço intersticial que afeta o seu desempenho como isolante térmico (VO et al., 2011). Agora em relação ao XPS ele é uma espuma rígida com uma estrutura celular fechada que é caracterizada pela absorção de água quase nula e com maior isolamento térmico. Ele é formado na extrusão do poliestireno na presença de um gás expensor sob um alto controle da pressão e da temperatura (AIPEX, 2014). Por ser obtido na extrusora, o XPS apresenta uniformidade e uma superfície lisa.

O poliestireno nessas situações de expansão é composto por apenas 2% de matéria prima e todo o restante, 98%, é integrado por ar, o que resulta na propriedade de isolante térmico, baixa densidade e o baixo custo do material que atrai o uso em diversas áreas, como no segmento automotivo, da construção civil e principalmente das embalagens, já que permite que o produto seja enviado até o consumidor final sem sofrer danos ou alterações e, quando se trata de refeições, ainda conserva a temperatura dos alimentos (ARAÚJO; BAPTISTA; ARAÚJO, 2020).

### 2.3. Processamento por extrusão

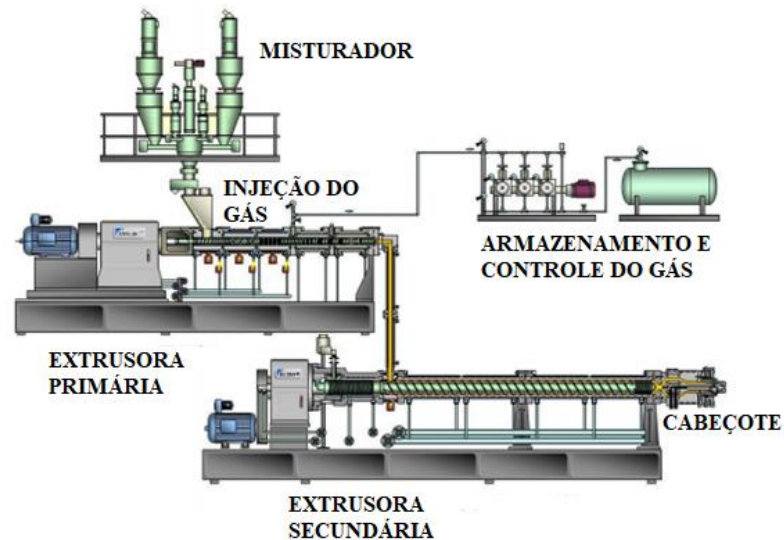
A extrusão ocorre conforme uma massa fundida é forçada através de um orifício na matriz. A técnica é especialmente adaptada para produzir peças contínuas com seção transversal de geometria constante, como por exemplo, barras, tubos, mangueiras, chapas e filamentos (CALLISTER JR., 2016).

Apesar da facilidade do seu processamento, para a produção do poliestireno extrudado as linhas de extrusão em *tandem* ainda são preferidas, pois elas fornecem uma maior taxa de saída e uma estrutura celular mais desejável. A etapa de resfriamento no processamento deste material é essencial e com uma extrusora comum é muito difícil atingir uma eficácia desta fase, devido ao tempo de residência na máquina ser significativamente limitado (LEE, 2015).

O processo de fabricação de XPS pode ser dividido pelas seguintes etapas: fusão do polímero sólido e aditivos, injeção do agente expensor, resfriamento da mistura resultante até a temperatura de espumação e completa dissolução do agente, nucleação e expansão da mistura no cabeçote, estabilização da espuma e acabamento das dimensões finais (LEE et al., 2009).

A linha *tandem* de extrusão é formada por duas extrusoras conectadas, como mostra a Figura 4, com funções bastante diferentes. A extrusora primária funde e homogeniza as matérias-primas, por isso nela são utilizadas temperaturas maiores (180°C a 245°C). Além disso, é nessa etapa que ocorre a injeção do gás expensor e o parafuso na extrusora desempenha um papel importante na dispersão do agente de expansão em gotículas extremamente finas (KIM et al., 2021).

**Figura 4** - Ilustração esquemática de uma linha de extrusão de espuma em tandem usada na produção poliestireno extrudado



Fonte: LEE et al. (2009)

A extrusora secundária é também chamada de extrusora de resfriamento pelo fato dessa ser a sua principal função no processo. O fundido é resfriado até a temperatura ideal para maximizar a sua resistência e o comportamento de endurecimento por deformação no estágio de expansão da espuma. A temperatura ótima desta zona varia dependendo do teor de agente de expansão dissolvido e da temperatura inicial de solidificação (LEE, 2015). Normalmente são utilizadas temperaturas de 80 a 120°C. Tanto na extrusora primária, quanto na secundária, existe zonas de temperatura, sendo que na primária normalmente são 5 zonas e na secundária 8, onde em cada zona a temperatura vai variar, pois cada zona vai ter uma função específica, que varia entre fundir, misturar, injetar o gás, etc.

No processamento de espuma polimérica por extrusão, a maioria dos agentes de expansão, sejam físicos ou químicos, se dissolvem na matriz de polímero antes do início da formação de espuma na saída da matriz e controlam ainda o crescimento das células nucleadas por difusão para fora do polímero fundido nos núcleos (RIZVI; ILIEV; PARK; 2002). Atualmente, o gás carbônico é mais frequentemente usado como um agente de expansão alternativo, pois não tem os efeitos ambientais negativos que estão associados aos clorofluorcarbonos (CFCs), que são substâncias destruidoras da camada de ozônio (TABATABAEI et al., 2017). Quando o polímero fundido resfriado com agentes de expansão

se aproxima da saída do cabeçote, a nucleação da célula ocorre devido à instabilidade termodinâmica desencadeada pela pressão reduzida. Após a formação das células na matriz do polímero, ocorre seu crescimento até que se atinja a pressão ambiente. Esse é o estágio de crescimento celular (expansão), que será influenciado pela solubilidade e difusão do agente de expansão (KIM et al., (2021).

Os aditivos poliméricos são bastante empregados no processamento dessa classe de materiais e eles têm como função melhorar as propriedades do material, que pode ser a resistência mecânica, processabilidade, densidade, entre outras. Esse aditivo atua no material sem fazer nenhuma alteração na sua estrutura química. Alguns exemplos de aditivos são os plastificantes, lubrificantes, retardantes de chama, agentes de expansão, nucleantes e pigmentos (CANEVAROLLO, 2006). Um dos mais importantes para esse processo é o agente nucleante, que vai influenciar na formação das células. Basicamente, a densidade da população de células é proporcional às impurezas incorporadas na fusão e dependerá da quantidade de agente de nucleação utilizada. O talco é o agente mais utilizado, normalmente na faixa de 0,2 a 3% em peso (LEE, 2015). Quando em excesso, ele promove a formação de muitos núcleos de células, que vão diminuir espessura da parede celular, fazendo com que elas se rompam dando origem a células abertas que não são desejáveis para aplicação em embalagens (KOHLHOFF; OHSHIMA, 2011). Além disso, pelo mesmo motivo, a expansão do XPS pode ser prejudicada. Contudo, utilizar pouco talco resulta em uma maior densidade de células e consequente maior rigidez do material. Para aplicações em embalagens alimentícias o ideal é que o material tenha menor rigidez para conseguir conformar o produto final, pois a rigidez vai deixar a embalagem quebradiça, pois vai diminuir a região elástica do material.

#### **2.4. Espumas poliméricas e células abertas**

Pode-se definir espuma como um polímero cuja densidade aparente sofreu uma redução significativa pela presença de numerosas células, distribuídas ao longo de sua massa (ASTM D883-80C, 2020). As espumas são constituídas por um sistema de duas fases, uma sólida e uma gasosa, em que a fase sólida contínua é um polímero e a fase gasosa está distribuída em vazios, que são as células. A formação das espumas ocorre pela volatilização do agente de expansão que pode ser provocada por agentes químicos, os quais são sólidos que se decompõem a uma temperatura elevada formando um gás. O agente de expansão afeta a densidade da espuma aumentando a concentração, fazendo a densidade diminuir até um mínimo (CARVALHO; FROLLINI, 2009).

A produção de espumas poliméricas inclui primeiramente a formação de bolhas de gás em um sistema líquido, seguida por crescimento e estabilização dessas bolhas a medida que a viscosidade do sistema polimérico aumenta. A introdução do gás pode ocorrer de diversas formas, como por decomposição térmica do agente de expansão, agitação mecânica, volatilização de líquidos de baixo ponto de ebulição e expansão de gás dissolvido no líquido pela redução da pressão do sistema. O processo de produção de espumas ocorre de acordo com os seguintes estágios: a) Inicialmente, pequenas bolhas se dispersam pela matriz polimérica líquida, ocasionando redução da densidade; b) As bolhas permanecem esféricas a princípio, mas à medida que se expandem e entram em contato umas com as outras, sofrem distorção, atingindo empacotamento denso e gerando células de geometria poliédrica; c) A densidade do material é mínima quando o empacotamento denso das bolhas é atingido; d) O aumento da viscosidade e tensão superficial do polímero promove a estabilização das bolhas e, conseqüentemente, do sistema (BOTELHO, 2019).

A nucleação das bolhas pode ocorrer por meio de dois mecanismos: um é homogêneo e o outro é heterogêneo. Agentes de nucleação, como o talco, podem ser usados para induzir nucleação heterogênea para a produção de um grande número de locais de nucleação. A adição de um agente de nucleação aumenta a taxa de nucleação da bolha, o que permite um melhor controle da morfologia celular, densidade celular, tamanho da célula e distribuição do tamanho da célula (SHARUDIN, 2010).

Os agentes nucleantes são aditivos poliméricos e atuam no material para facilitar o processamento de polímeros termoplásticos e para alterar propriedades como temperatura de amolecimento, temperatura de transição vítrea e propriedades mecânicas (ROSA et al., 2013). O agente nucleante age reduzindo a energia necessária e aumenta o número de núcleos iniciadores do processo de cristalização, desta forma é possível observar a diminuição da diferença entre a temperatura de cristalização e a de fusão. A adição deste aditivo aumenta o grau de cristalinidade e diminui os tamanhos dos esferulitos (cristais) formados, e se adicionado em excesso as propriedades mecânicas e físicas desejáveis dos materiais podem ser alteradas. Com o aumento do grau de cristalinidade aumenta-se a dureza, módulo de elasticidade e resistência à tração (RABELLO, 2011).

## **2.5. Talco**

O talco é um silicato de magnésio e confere ao polímero qualidades e propriedades que são fundamentais nos mais diversos usos, como a estabilidade dimensional, isolamento elétrico,



aumento da capacidade de absorver impacto, aumento da resistência química e ao calor, aumento da rigidez, da dureza e da resistência à tensão (LUZ; LINS, 2005).

O talco é utilizado em um grande número de aplicações industriais, como papel, tintas, cerâmica e polímeros. Em aplicações de polímero, o talco é usado como enchimento em várias quantidades (20 a 40% em peso) em homopolímero ou copolímero. Quando o talco é usado com menos de 3% em peso, ele não é mais considerado um enchimento, mas sim um agente de nucleação. O uso do talco traz diversas modificações nas propriedades do poliestileno (PS), o que aumenta o interesse industrial por este compósito em particular. O talco, ao contrário de outros minerais (por exemplo, calcita e micas), é um agente eficiente nas propriedades mecânicas e orientação macromolecular do compósito. A adição de talco no polímero aumenta a temperatura inicial de cristalização, induzindo um tempo de processamento menor. Esse tempo de processamento é reduzido proporcionalmente ao aumento da concentração de talco (FERRAGE et al., 2002).

Alguns autores já apresentaram trabalhos relacionados ao uso do talco como agente nucleador. Karrad, Cuesta e Crespy (1998) analisaram o efeito do talco fino nas propriedades de compósitos de poliestireno (PS) e polipropileno (PP) de alta densidade. O estudo analisou a resistência à tração e ao impacto do PP preenchido com poliestireno e foi notado que ambas propriedades diminuíram com o aumento do percentual de talco na mistura. Além disso, foi realizado uma correlação da influência tanto do poliestireno quanto do talco na matriz de polipropileno e observou-se que ambos tiveram influência na rigidez e resiliência do polímero. (KARRAD; CUESTA; CRESPI, 1998).

Segundo Pushpadass, Weber e Hanna (2008), as propriedades mecânicas e de expansão de espumas de poliestireno com diferentes aditivos apresentaram diferença significativa. Alterou-se de 0,5% para 1,0% a concentração de talco no material e teve uma diminuição na expansão e na densidade das espumas. Foi notado também um aumento no módulo de elasticidade do material. De acordo com Suksut e Deeprasertkul (2010), o talco, aumentou a cristalinidade de blendas de PLA com borracha natural e diminuiu o tamanho dos esferulitos. Com a diminuição do tamanho dos esferulitos se teve um aumento da resistência à tração e resistência ao impacto.

De acordo Hachani et al. (2016), o aumento da porcentagem de talco no PS diminuiu a temperatura de transição vítrea do polímero, indo de 96°C puro para 83°C em uma concentração de 15% de talco. No entanto, o talco teve influência positiva na estabilidade térmica do polímero visto que o talco retardou a degradação térmica do polímero. A curva de termogravimetria, que analisou o material nas temperaturas de 35°C até 580°C, observou que para o PS puro o resíduo

final (parte que não degradou) foi de 1,59%, para o PS com 15% de talco, a quantidade final de resíduo após o término do ensaio foi de 32,8%.

### **3. Material e métodos**

#### **3.1. Materiais**

Para obtenção das bobinas de XPS foram utilizados em sua composição o polímero virgem, o material reciclado, talco granulado, clariante e cera, conforme mostrado na Figura 5.

O polímero virgem utilizado foi o Poliestireno U285G, da empresa Unigel e apresentou índice de fluidez de 1,6g/10min e resistência a fusão maior que a temperatura de processamento (230°C).

O processo de extrusão e termoformagem de bobinas de XPS geram aparas que podem ser picadas e reaproveitadas no processo, sendo adicionadas novamente na extrusora, esse material é o que foi denominado de material reciclado. O principal objetivo da sua utilização é reduzir desperdícios de material e diminuir o custo de produção do produto.

O talco utilizado no processo foi um Masterbatch MB Natural na forma de pellet e foi fornecido pela empresa Cristalmaster, com teor de princípio ativo entre 59,7 e 60,3%. Ele atua no processo de extrusão como um agente nucleante para formar as espumas e sua concentração varia entre 0,5% a 2,3% dependendo das características do produto que se quer formar.

O clariante foi um aditivo MB Branqueador Optico na forma de pellet fornecido pela empresa Cristalmaster. A cera foi fornecida pela empresa MEGH Ceras e Emulsões e é uma cera de polietileno oxidado CPB 112 M C na forma de pó. O ponto de fusão da cera varia entre 105 e 120°C. O clariante e a cera tem como função, respectivamente, dar a cor branca ao material e fazer a lubrificação para que o material não agarre na extrusora.

**Figura 5:** Matérias primas utilizadas no processo. a) talco; b) clariante; c) poliestireno; d) cera; e) material reciclado



Fonte: Do autor (2021)

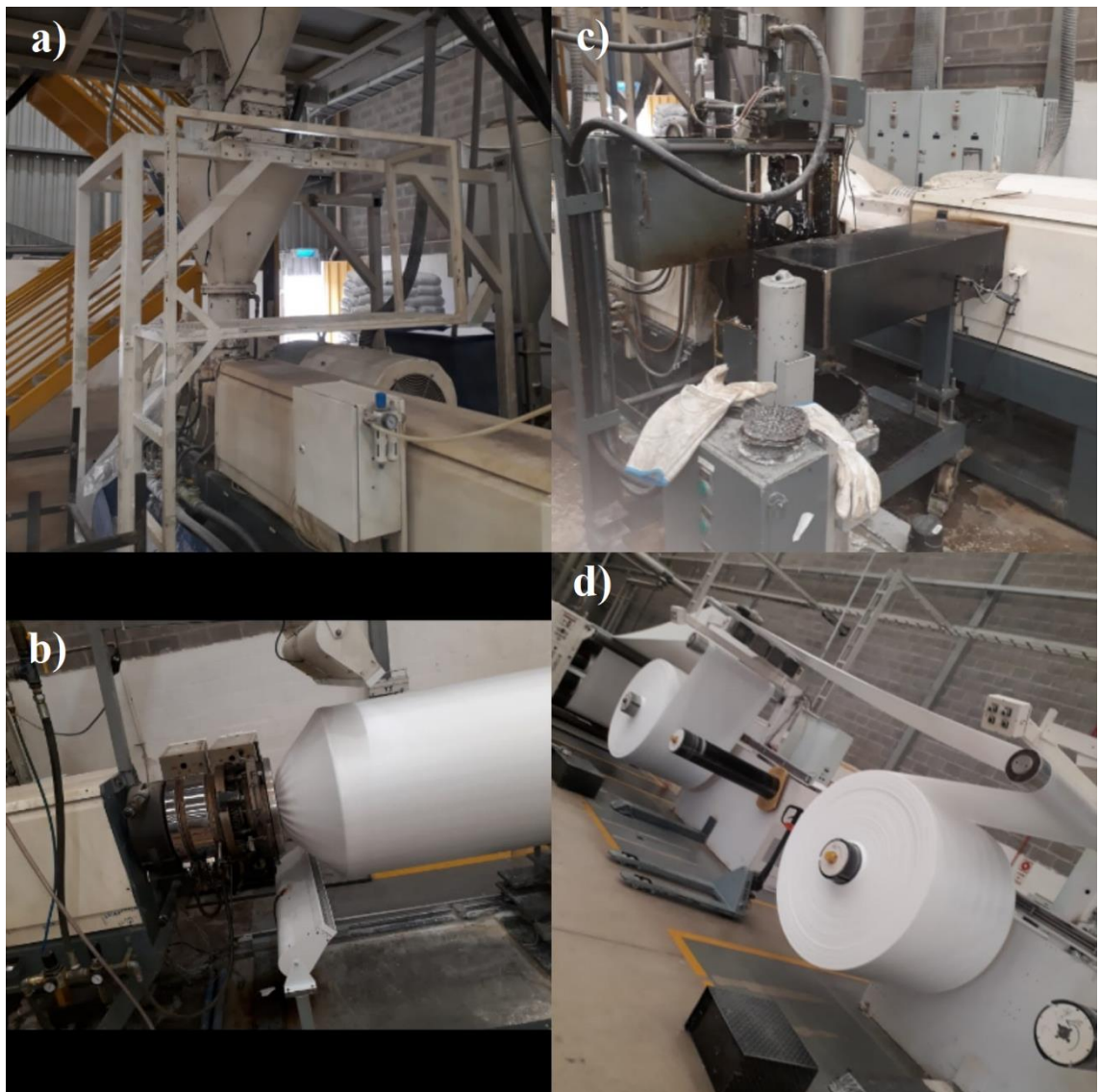
### 3.2. Processamento do material

A metodologia adotada no estudo é a mesma usada pela empresa Copobras S/A Indústria e Comércio de Embalagens, unidade Carmópolis – Minas Gerais, que forneceu todas as informações para a execução do trabalho. No processo produtivo da empresa, até a obtenção do produto final que chega aos clientes, o processamento do material consiste de três etapas principais, sendo a primeira a extrusão, a segunda etapa o tempo de cura e a terceira etapa a termoformação. Após isso o material é embalado e vai para expedição.

As matérias-primas foram colocadas em um misturador e após essa etapa o material foi aquecido até a sua temperatura de amolecimento, esse processo acontece na extrusora primária.

Essa etapa é mostrada na Figura 6 abaixo. A quantidade de cada matéria-prima que vai ser adicionada na mistura é controlada pela velocidade do misturador em rotações por minuto (RPM), onde para aumentar o percentual de alguma matéria-prima aumenta-se a velocidade do misturador. Os parâmetros utilizados estão dentro da faixa de operação utilizada na empresa, para não fugir muito dos valores utilizados no processo.

**Figura 6:** Processo de extrusão. a) Misturador e extrusora primária; b) Extrusora secundária c) cooling can; d) Enrolamento das bobinas formadas na extrusão



Fonte: Do autor (2021)

O processo de extrusão foi realizado no sistema *tandem*, onde duas extrusoras estão conectadas. Na extrusora primária (Figura 6a) o material foi fundido e foi injetado o gás. Na

extrusora secundária, mostrada na Figura 6b a principal função é o resfriamento do material e homogeneização da mistura. Após sair do cabeçote, o material foi passado por um cilindro de resfriamento, também conhecido como *cooling can*, conforme Figura 6c. Nele também ocorreu o corte do material no sentido transversal, dando origem a duas chapas que foram puxadas pelos rolos puxadores, e então embobinadas. Essas duas chapas dão origem a duas bobinas, conforme Figura 6d. Também foi aplicado à superfície externa ar de resfriamento que se destina a formar película sólida muito fina na superfície da espuma para proporcionar maior brilho, fazendo com que ocorra a estabilização das células.

Os parâmetros de temperatura na extrusora primária e secundária em cada zona (5 na primária e 8 na secundária), vazão de gás, velocidades dos rolos, pressão e quantidade de matéria prima utilizados no processo, é mostrado na Tabela 1 abaixo.

**Tabela 1:** Parâmetros do processo de extrusão para produção de bobinas de XPS

Dados do processo	
Temperaturas primárias (°C)	185/190/210/225/225
Temperaturas secundárias (°C)	30/82/80/78/65/65/65/60
Vazão do gás (libras/h)	57
Velocidade do rolo puxador (m/min)	896
Pressão extrusora primária (psi)	220
Pressão cabeçote (psi)	1905

Fonte: Do autor (2021)

Na Tabela 2 é mostrado a porcentagem de cada matéria prima utilizada no processo, variando de acordo com a porcentagem de talco.

**Tabela 2:** Percentual de matéria-prima utilizada em cada tratamento

Tratamento	1	2	3
% Talco	0,57	1,39	2,21
% PS virgem	66,7	65,88	65,06
% Material reciclado	32,73	32,73	32,73

Fonte: Do Autor (2021)

A porcentagem de clariante e cera foi ignorada para o cálculo, pois foi adotado um valor muito pequeno na porcentagem total (0,002).

Após a formação das bobinas, elas foram levadas ao estoque onde passaram por um processo de cura, onde acontece a troca de gases, sendo que o gás butano presente no material sai ao mesmo tempo que o gás oxigênio presente na atmosfera entra no material. O tempo de cura das bobinas foi de 4 dias. Na Figura 7 é possível visualizar as bobinas no estoque.

**Figura 7:** Estoque das bobinas

Fonte: Do autor (2021)

Após a cura, as bobinas passaram pelo processo de termoformação, sendo utilizada a velocidade de 100 ciclos por minuto, na qual a prensa de corte movimentada 100 vezes por minuto, sendo 5 cavidades na máquina. Sendo assim são feitas 500 unidades do produto em um minuto. A temperatura utilizada no processo variou entre 190°C e 280°C a depender da região do forno. Após a obtenção do material com os moldes, os mesmos foram cortados por uma faca, obtendo assim o produto desejado. O produto obtido no processo de termoformagem é mostrado na Figura 8.

**Figura 8:** Produto final obtido no processo de termoformagem



Fonte: Do autor (2021)

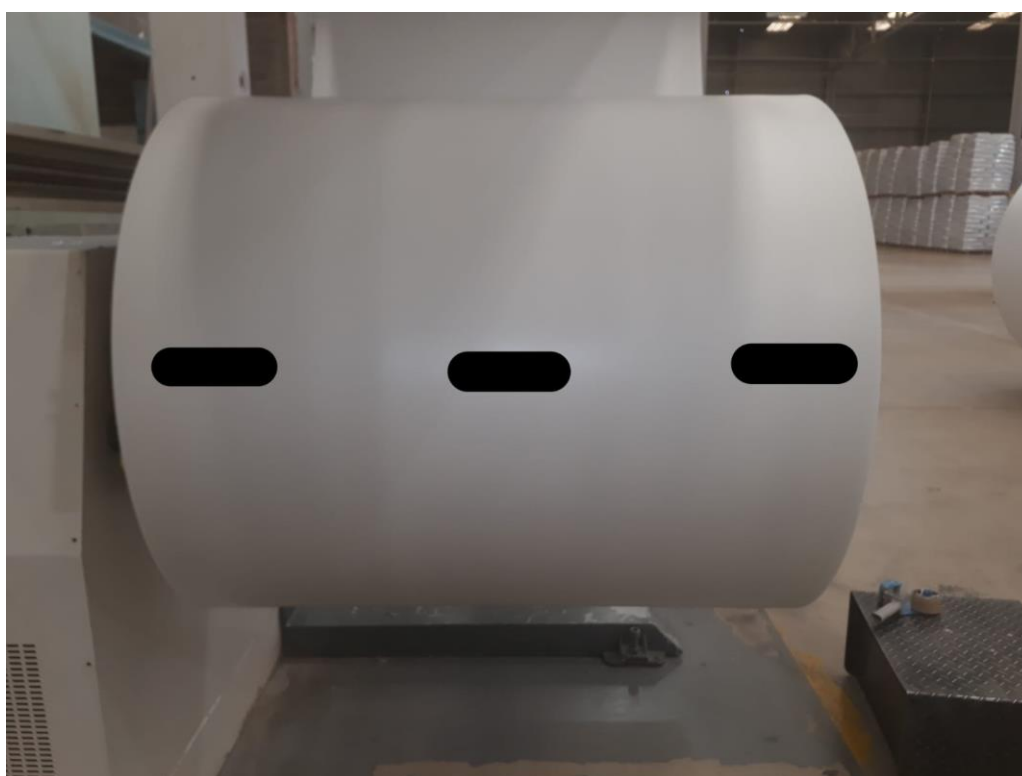
### 3.3. Caracterização do material

Para efetuar as análises foi realizado 3 tratamentos com diferentes porcentagens de talco, 0,57; 1,39; 2,21%. Todas as amostras utilizadas foram retiradas do final (última chapa) da bobina para não interromper a produção.

### 3.3.1. Porcentagem de células abertas (%CA)

Para calcular a porcentagem de células abertas presente nas bobinas foi utilizado um ultrapicnômetro 1000 da Acil Weber. Para cada repetição de cada tratamento foram retiradas 3 amostras da bobina, de dimensão 70x45 mm. As amostras foram retiradas de diferentes regiões da bobina, sendo uma de cada extremidade e uma do centro, em função da largura, conforme mostrado na Figura 9. Nas Figuras 10a e 10b é mostrado o equipamento e o formato das amostras, respectivamente.

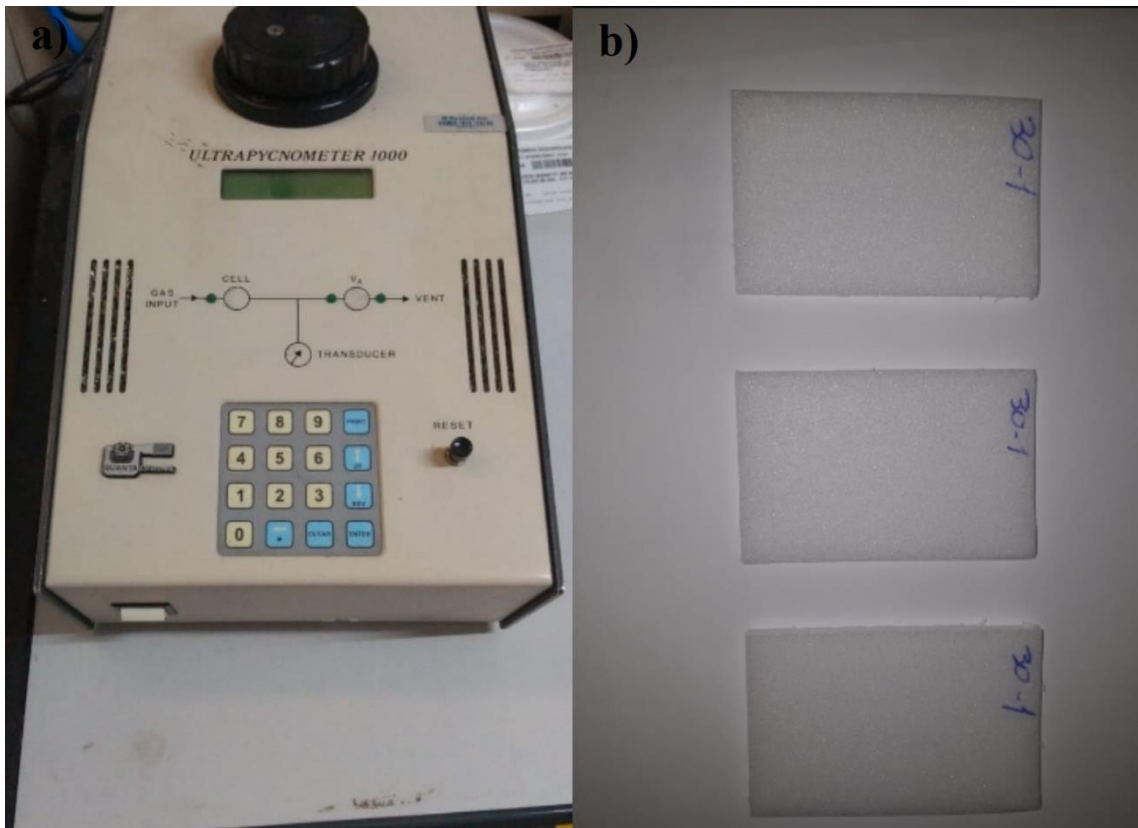
**Figura 9:** Demonstração das posições preferenciais para retirar as amostras das bobinas



Fonte: Do autor (2021)



**Figura 10:** Equipamento utilizado para calcular as células abertas das amostras. a) Ultrapicnômetro; b) Ilustração dos corpos de prova



Fonte: Do autor (2021)

Após isso as amostras foram pesadas (juntas) e foi medido com um paquímetro a espessura de cada uma delas. As 3 amostras são pesadas juntas pois no equipamento você coloca 3 amostras e insere o peso delas (total), isso equivale a uma repetição. Durante o teste é injetado gás nitrogênio nas amostras e o equipamento informa o valor do volume real do material. Feito o teste é calculado o volume geométrico do material, para compará-lo com o volume real. Essa comparação entre volume real e geométrico permite obter o valor de %CA no material. O cálculo de %CA foi realizado pela Equação 1.

$$\%CA = \left( \frac{\text{Volume geométrico} - \text{Volume real}}{\text{Volume geométrico}} \right) \times 100 \quad (1)$$

### 3.3.2. Densidade

A caracterização física das amostras de XPS foi obtida a partir do ensaio de densidade aparente conforme a ASTM D1895 (ASTM, 2010). Para a determinação da densidade quatro corpos de prova de cada tratamento foram pesados em uma balança de precisão e através das medidas de espessura, largura e comprimento foi calculado o volume e utilizada a Equação 2.

$$Densidade (g/cm^3) = \frac{massa}{volume} \quad (2)$$

### 3.3.3. Microscopia Óptica

A caracterização física do material foi feita utilizando um microscópio modelo Digital Microscope RoHS 30 FPS, onde foi analisado a estrutura do material. O teste foi realizado para analisar como a estrutura do material se alterava de acordo com a porcentagem de talco e como se dava o comportamento das células abertas. Foi calculado também o tamanho médio das células das amostras. Foram analisadas 10 amostras de cada tratamento e calculado o tamanho de 3 células em cada amostra.

### 3.3.4. Propriedades Mecânicas

Os ensaios de flexão foram realizados seguindo a norma ASTM D790 (2017) em uma máquina de ensaio universal Instron, localizada no Departamento de Engenharia da UFLA. Foram avaliadas 10 amostras para cada composição. Foi realizado o ensaio de flexão a três pontos, com vão de 80mm e velocidade de ensaio de 0,5 mm/min. Foi calculado o módulo de ruptura e módulo de elasticidade, conforme equações 3 e 4 abaixo:

$$Módulo de ruptura (MOR, MPa) = \frac{3 \times C_{max} \times v\tilde{a}o}{2 \times b \times d^2} \quad (3)$$

$$Módulo de elasticidade (MOE, MPa) = \frac{v\tilde{a}o^3 \times (C_2 - C_1)}{4 \times (D_2 - D_1) \times b \times d^2} \quad (4)$$

Em que:

$C_{m\acute{a}x}$ : carga máxima aplicada, em Newton;

$b$ : largura do corpo de prova, em milímetros;

$d$ : espessura do corpo de prova, em milímetros;

$C_1$ : Carga obtida dentro do regime elástico e menor que a  $C_2$ , em Newton;

$C_2$ : Carga obtida dentro do regime elástico e maior que a  $C_1$ , em Newton;

$D_1$ : Deformação obtida dentro do regime elástico e menor que a  $D_2$ , em milímetros;

$D_2$ : Deformação obtida dentro do regime elástico e maior que a  $D_1$ , em milímetros;

Os ensaios de tração foram realizados na mesma máquina de ensaio universal do ensaio de flexão, e seguiu os procedimentos descritos pela norma ASTM D638 (2014). A partir dos

ensaios realizados calculou-se a resistência a tração e o módulo de elasticidade de acordo com as equações 5 e 6 abaixo. Assim como no ensaio de flexão, foram testadas 10 amostras para cada um dos tratamentos.

$$\text{Resistência à tração (RT, MPa)} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{a} \quad (5)$$

$$\text{Módulo de elasticidade (MOE, GPa)} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (6)$$

Em que:

$F_{m\acute{a}x}$ : força máxima obtida, em Newton;

$a$ : área da seção transversal, em metros quadrados;

$\sigma$ : tensão na zona elástica, em MPa;

$\varepsilon$ : deformação na zona elástica, em milímetros.

### 3.3.5. Análise de dados

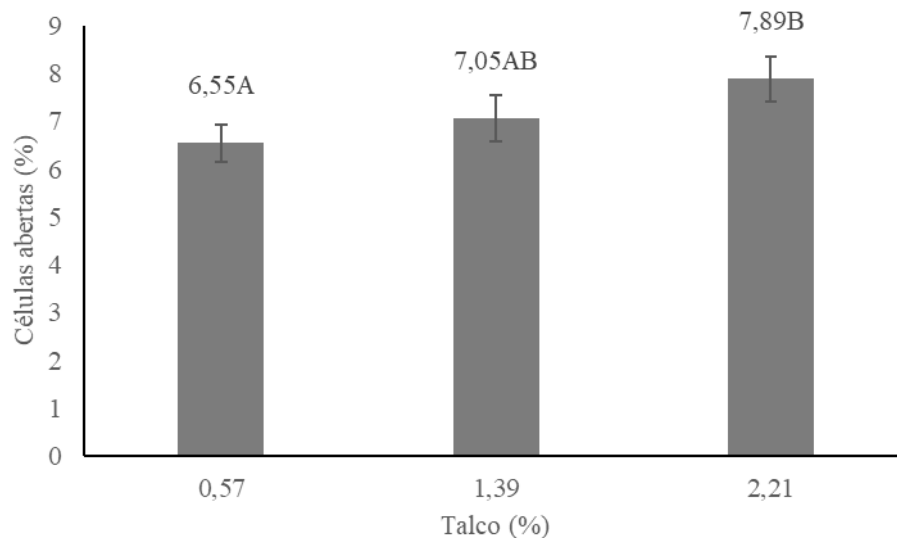
As propriedades físicas e mecânicas do XPS foram avaliadas em um delineamento inteiramente casualizado. Para a análise dos dados foi utilizado o software SISVAR (FERREIRA, 2019). Os dados foram analisados por análise de variância e teste de média Tukey, ambos a 5% de significância.

## 4. Resultados e discussão

### 4.1. Porcentagem de células abertas

Foi verificado efeito da porcentagem de talco sobre o XPS, sendo possível observar que o tratamento com 2,21% de talco diferenciou-se estatisticamente do tratamento com 0,57% de talco, obtendo o maior valor médio de células abertas, conforme Figura 11.

**Figura 11:** Porcentagem de células abertas em função da quantidade de talco utilizado na mistura



Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de média Tukey ( $p > 0,05$ ).

Fonte: Do autor (2021)

A medida que se aumenta o percentual de talco no XPS vão se formando mais núcleos e esses núcleos vão aumentar a densidade populacional de células. Com o aumento da quantidade de células, o material vai apresentar células menores com paredes mais finas. Essas paredes podem se romper com maior facilidade, dando origem a um número maior de células abertas no material (LEE, 2015).

Segundo Naguiby (2003) a densidade populacional de células do polímero aumentou até  $6 \times 10^7$  células/cm<sup>3</sup> quando variou a concentração de talco de 0,2 para 2,4% na estrutura do polipropileno. De acordo com Leung (2011) a adição de agentes de nucleação como o talco é uma forma comum de promover a densidade celular no processo de formação de espuma polimérica, em que tal aumento é causado pela diminuição da barreira de energia livre para a nucleação iniciar de forma heterogênea, bem como pela redução da perda de gás.

De acordo com Kohlhoff e Ohshima (2011) a porcentagem de células abertas (CA) em espumas de polímero está fortemente relacionada com a capacidade das paredes celulares de resistir à ruptura durante a expansão de volume na estrutura do PLA. A porcentagem de CA foi drasticamente aumentada quando adicionado o agente divinilbenzeno. Aparentemente, os

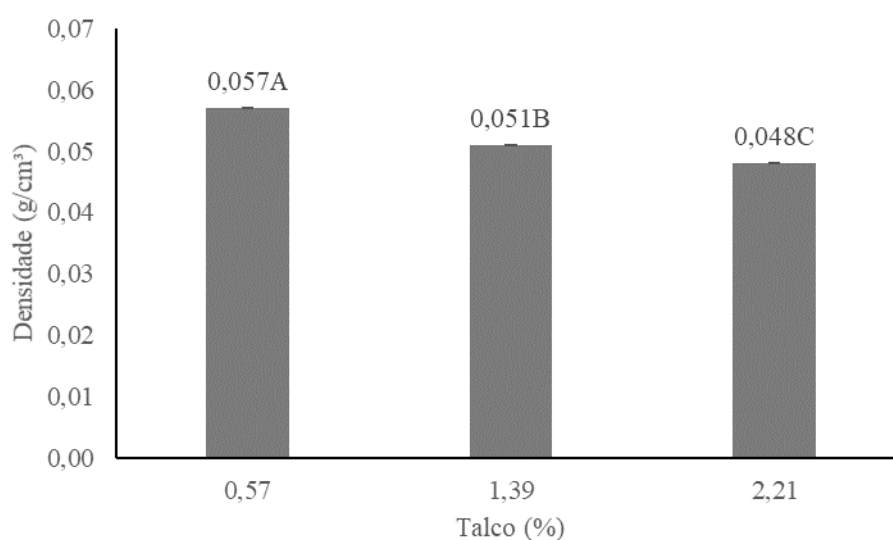
domínios com maiores concentrações do agente desempenham o papel de agente de abertura de bolhas. A abertura da célula pode ser iniciada e propagada através de domínios de polímero de baixa viscosidade que são aprisionados entre células adjacentes em crescimento. A abertura das células é mais provável de ser iniciada na parede celular mais fraca (KOHLHOFF; OHSHIMA, 2011). Segundo Lee et al., (2005) a presença de um agente na matriz do polímero, a rigidez da parede celular diminuiu, resultando em uma chance maior de ruptura da parede celular.

Segundo Miyamoto et al., (2014), a porcentagem de células abertas aumentou com o aumento do agente de nucleação do cristal e com o aumento da expansão do polipropileno. Como a espessura da parede celular foi reduzida alcançando a alta expansão, a abertura da célula foi iniciada mais facilmente.

#### 4.2. Densidade

As amostras de XPS apresentaram uma diminuição significativa na densidade a medida que se aumentou a porcentagem de talco no material (Figura 12). Foi verificado efeito da porcentagem de talco sobre o XPS, sendo que todos os tratamentos se diferenciaram estatisticamente, e a mistura com maior porcentagem de talco obteve a menor densidade média.

**Figura 12:** Densidade do XPS em função da porcentagem de talco utilizado na mistura



Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de média Tukey ( $p > 0,05$ ).

Fonte: Do autor (2021)

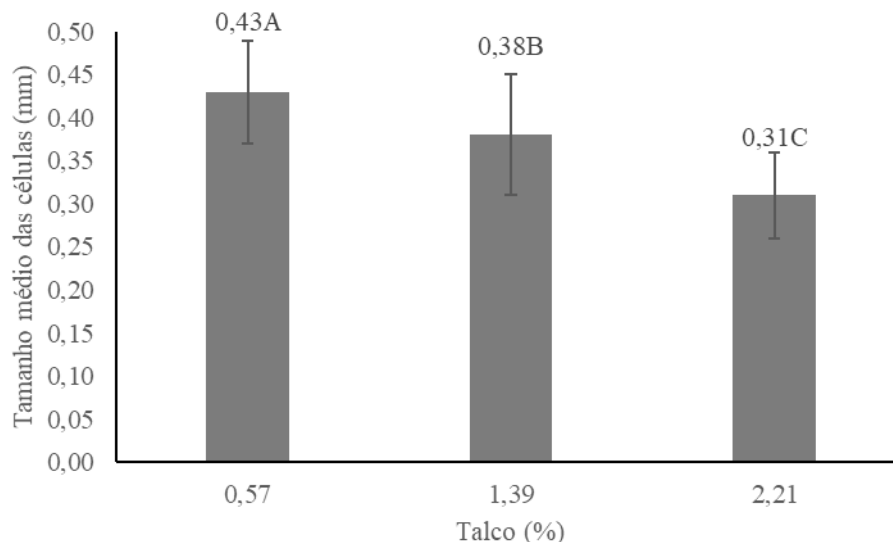
De acordo com Lee et al., (2005) a medição de célula aberta é uma determinação de porosidade usada para calcular o volume celular acessível a gás de um material. O volume restante é ocupado por células fechadas e paredes celulares. O aumento da %CA implica no aumento da porosidade do material e quando maior a porosidade, menor vai ser a densidade do material.

Aksit et al., (2019), analisaram as propriedades de poliestireno extrudado aditivado com benzeno-trisamida (BTA) e observaram que quando comparado a densidade obtida com 0,2% de BTA e 0,5% de BTA, a densidade da espuma foi de 0,0778 g/cm<sup>3</sup> para 0,0691 g/cm<sup>3</sup>. Nesse estudo, também foi verificada relação direta entre a porcentagem de célula aberta e a redução de densidade do material.

### 4.3. Microscopia óptica

Baseado nas microscopias foi calculado o tamanho médio das células das amostras, conforme Figura 13.

**Figura 13:** Tamanho médio das células do XPS em função da porcentagem de talco utilizado na mistura



Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de média Tukey ( $p > 0,05$ ).

Fonte: Do autor (2021)

Conforme mostrado na Figura 14, o tamanho das células diminuiu conforme houve o aumento da porcentagem de talco na composição do material. A análise estatística mostra que todos os tratamentos se diferenciaram estatisticamente. Isso acontece pois com o aumento do agente nucleante no material, formam-se mais núcleos, e com o aumento da quantidade de núcleos no polímero, as esferulitas (células) tendem a diminuir de tamanho para conseguirem ocupar o mesmo espaço, visto que as dimensões do material é a mesma.

Tanniru e Misra (2006) discutiram o efeito do carbonato de cálcio (agente nucleante) nas propriedades do polietileno. Foi observado uma diminuição do tamanho das esferulitas à medida que aumentou a porcentagem do carbonato de 5% para 20%, o que impactou diretamente na capacidade de nucleação do material que foi de 44% para 52%.

De acordo com Suksut e Deeprasertkul (2011), o talco conseguia promover a redução do tamanho das esferulitas de blendas de PLA. Okolieocha et al., (2015) observou uma diminuição no tamanho médio das células a medida que se aumentava o percentual de talco no XPS aditivado com grafeno. Para 0,025% de talco o tamanho médio das células foi de 310nm, para 0,1% foi 190nm e para 1% foi de 100nm. Para complementar a análise da estrutura do material, foi retirada amostra das chapas obtidas na extrusão em cada tratamento efetuado e foi observado que quando se aumentava a porcentagem de talco nas amostras de XPS, o material apresentava ondulações, que pode ser observado na foto representada na Figura 14.

**Figura 14:** Ondulação apresentada no material. a) 0,57% de talco; b) 1,39% de talco; c) 2,21% de talco.



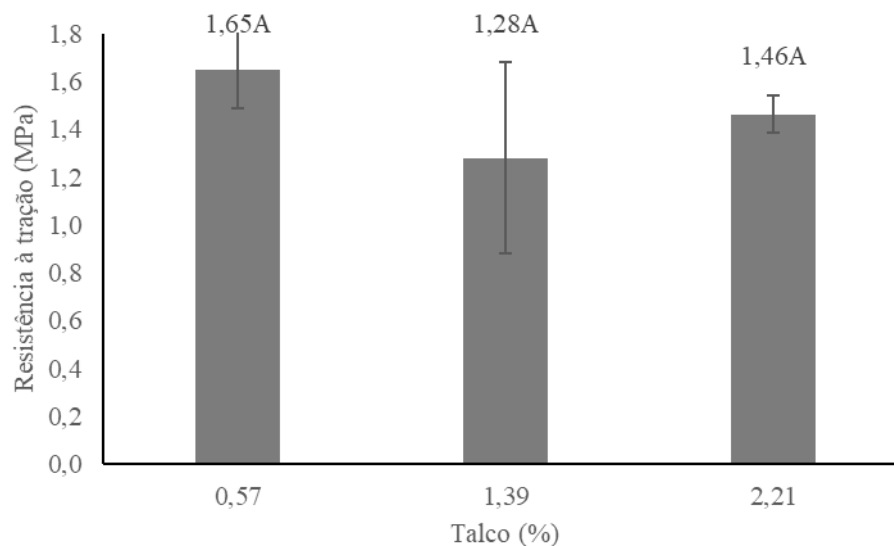
Fonte: Do autor (2021)

Segundo Ho et al., (2004) um possível mecanismo para o processo de ondulação são as mudanças estruturais induzidas por tensões, onde uma distorção extensional da cadeia permite que uma parte significativa da deformação seja acomodada pela ondulação das estruturas em camadas. A ondulação também pode ser justificada pelo excesso de núcleos que tendem a se acomodar e se sobreporem uns aos outros, gerando deformação.

#### 4.4. Ensaios mecânicos

A Figura 15 mostra os resultados da resistência à tração (em MPa) e a Figura 16 mostra o módulo de elasticidade - MOE (MPa) para o ensaio de tração.

**Figura 15:** Resistência a tração em função da porcentagem de talco utilizada na mistura

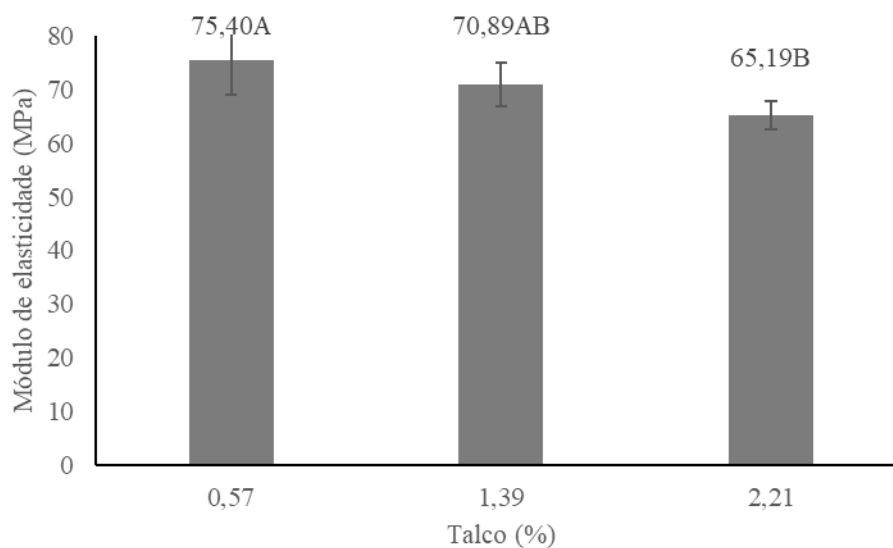


Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de média Tukey ( $p > 0,05$ ).

Fonte: Do autor (2021)



**Figura 16:** Módulo de elasticidade em função da porcentagem de talco utilizado na mistura



Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de média Tukey ( $p > 0,05$ ).

Fonte: Do autor (2021)

Observa-se que em relação a resistência a tração não houve efeito significativo da porcentagem de utilização do talco. Apesar da influência do talco na porcentagem de células, tamanho de células e densidade, ele não afetou de forma significativa a tração do material.

Em relação ao MOE, observa-se que à medida que aumentou a porcentagem de talco houve a redução dos valores médios. O teste estatístico apontou que o tratamento de 0,57 e 2,21% de talco são diferentes estatisticamente. Isso acontece pois apesar dos núcleos serem menores a estrutura vai apresentar maior densidade populacional de células, conforme discutido anteriormente, ou seja, vai ter muito mais núcleos na estrutura do XPS e mais células abertas fazendo com que o MOE diminua. Quanto mais talco na estrutura, menor a densidade e quanto menor for a densidade, menos massa vai ter na estrutura do material e isso vai deixar o material mais flexível fazendo com que o módulo de elasticidade diminua.

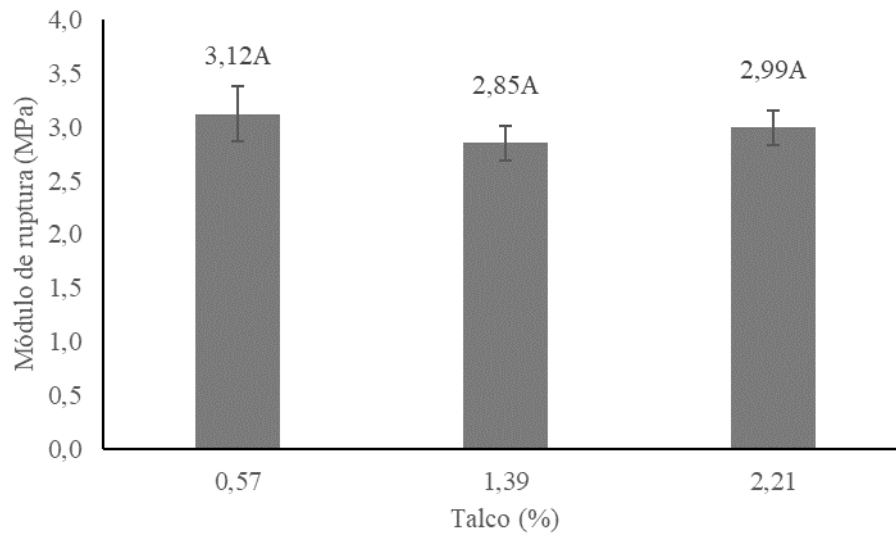
Tanniru e Misra (2006) observaram um aumento de 1095 MPa para 1995MPa quando comparados os efeitos de 5% e 20% de carbonato de cálcio (agente nucleante) no polietileno. Zhang et al., (2015) analisaram o efeito do sorbitol como agente nucleante nas propriedades do

polipropileno, variando a concentração de 0 a 30%, e observaram que o talco melhorou a resistência a tração e módulo de elasticidade do polímero.

O mesmo comportamento foi observado em Wang et al., (2013), observaram que o módulo de elasticidade foi de 1700MPa para 2500MPa, variou a concentração de 10% para 20% de talco durante a degradação do polipropileno. Por outro lado, o talco como agente nucleante com concentrações entre 0 e 1% não alterou o alongamento a ruptura, módulo de elasticidade e resistência à tração do material (SUKSUT; DEEPRASERTKUL, 2010).

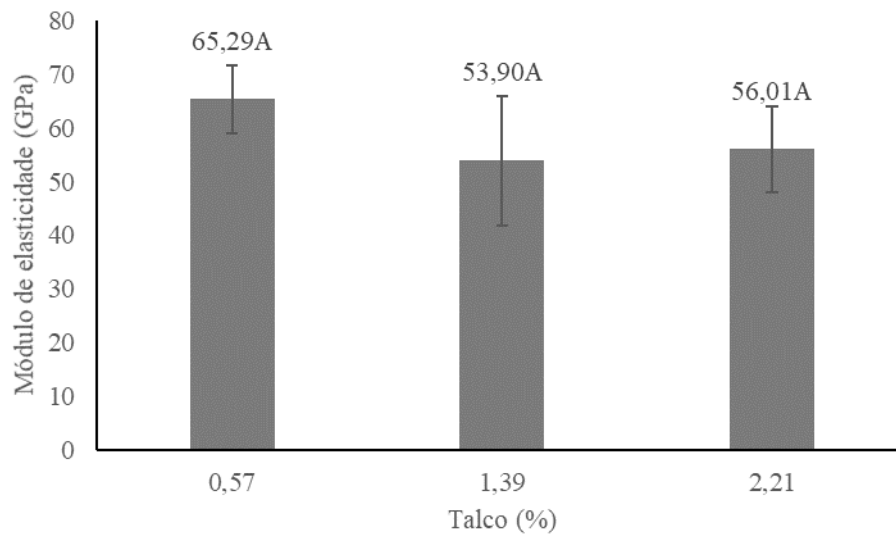
O resultado encontrado nesse trabalho foi o oposto, o aumento do percentual de talco não teve influência na resistência a tração e diminuiu o módulo de elasticidade. Essa diferença pode ter acontecido devido a influência do agente expensor, onde se aumenta a porosidade do material e diminui a densidade, formando espaços vazios que fazem com que o material perca resistência. Outro fator que pode afetar essa divergência é a concentração de talco utilizada no trabalho quando comparada com a literatura, visto que na literatura foi utilizado maiores concentrações de agente nucleante. Como já discutido, quando o talco é utilizado em maiores concentrações ele passa a ser um material de enchimento, que tem como função melhorar as propriedades do polímero. A presença da ondulação apresentada no material com a concentração de 2,21% de talco pode justificar a queda no módulo de elasticidade, visto que com o aumento da densidade populacional de células e a consequente diminuição da densidade devido a uma maior porosidade do material faz com que o polímero perca resistência mecânica.

A Figura 17 mostra os resultados obtidos para o módulo de ruptura – MOR (MPa) em flexão estática e a Figura 18 o módulo de elasticidade -MOE (GPa) em flexão estática. Não houve efeito significativo das porcentagens de talco sobre as propriedades de MOR e MOE à flexão estática.

**Figura 17:** Módulo de ruptura do XPS em função da porcentagem de talco

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de média Tukey ( $p>0,05$ ).

Fonte: Do autor (2021)

**Figura 18:** Módulo de elasticidade do XPS em função da porcentagem de talco

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de média Tukey ( $p>0,05$ ).

Fonte: Do autor (2021)

Segundo Lee (2015) o excesso de talco no material pode resultar em muitas células abertas devido à baixa espessura de parede celular que é consequência da alta densidade populacional de células e isso faz com que aumente a flexibilidade do material.

Zhang (2015) ao analisar espumas de polipropileno observou que o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura à flexão aumentaram rapidamente com a adição de talco, mas que à medida que o percentual de talco é aumentado os valores de MOE e MOR tenderam a estabilizar. Quando a quantidade de adição de sal de cálcio do ácido hexahidroftálico (agente nucleante) no polímero era baixa, era difícil para as partículas do agente de nucleação incorporadas no polímero se aglomerarem e todas as partículas desempenhavam o papel de núcleos. No entanto, quando os núcleos no polímero atingiram uma determinada quantidade, a aglomeração das partículas do agente nucleante tornou-se fácil de ocorrer e, portanto, a quantidade de núcleos ativos tornou-se quase estável.

Segundo Gui et al., (2001) o agente nucleante influencia na cristalização e propriedades mecânicas do polipropileno (PP) e esse comportamento de estabilização acontece devido a uma saturação de talco na composição. Foi analisada a influência do talco, variando a concentração de 0 até 0,8%, nas propriedades de flexão do PP e foi observado que a partir de 0,4% o módulo de elasticidade e de ruptura se estabilizavam. Acima dessa faixa de concentrações, há pouco aumento adicional nas propriedades mecânicas, o que pode ser devido à concentração saturada.

Nesse trabalho, tanto o módulo de elasticidade quanto o módulo de ruptura não apresentaram diferença entre os tratamentos, podendo considerar que a concentração de talco no XPS estava nessa região de saturação, na qual não acontece muita variação. O talco teve influência na porcentagem de células abertas e na densidade do material, que levou a uma diminuição do módulo de elasticidade tracional do XPS, mas a variação da concentração de talco na mistura não teve influência direta nas propriedades de flexão.

Uma das principais funções da embalagem de XPS aplicada à indústria alimentícia é garantir o isolamento térmico do alimento (MIYAKE et al., (2017). O aumento da porcentagem de talco na estrutura do material favorece o isolamento térmico, pois se aumenta o número de núcleos e a porosidade, diminuindo a densidade do material, fazendo com que se tenha menos massa em sua estrutura, o que diminui a dissipação de calor. As células abertas tendem a prejudicar o isolamento térmico do material, pois a estrutura estando aberta o XPS se torna permeável permitindo a passagem de calor. Sendo assim a concentração que melhor se adequou, combinando resistência mecânica e %CA (parâmetros que mais influenciam em tal

propriedade) foi a de 1,39% de talco, visto que não apresentou diferença estatística para %CA e MOE à tração, quando comparadas as outras concentrações de talco.

## 5. Conclusão

O percentual de células abertas e a densidade do XPS foram afetados significativamente pelas concentrações de talco utilizado no processamento do material. O aumento das concentrações de talco promoveu o aumento da quantidade de células abertas e por consequência resultou na diminuição da densidade.

O aumento da concentração de talco promoveu a diminuição do tamanho das células formadas, assim como também implicou em ondulações do material.

O efeito da concentração de talco foi observado apenas quando analisado o MOE à tração, não sendo verificado efeito significativo nas propriedades de resistência a tração e MOR e MOE à flexão estática.

Com base nos resultados apresentados recomenda-se utilizar a concentração de 1,39% de talco na composição da mistura, pois apresentou melhores parâmetros para aplicação da embalagem como isolante térmico.

Para trabalhos futuros recomenda-se avaliar o efeito da concentração de talco após o processo de termoformagem, para comparar com os resultados encontrados no presente trabalho.

## 6. Referências

AIPEX. **Descripción y propiedades del xps**. Disponível em: <<https://aipex.es/poliestireno-extruido-xps/descripcion-y-propiedades-del-xps/>>. Acesso em: 30 out. 2021.

AKSIT, M. et al. Extruded polystyrene foams with enhanced insulation and mechanical properties by a benzene-trisamide-based additive. **Polymers**, v. 11, n. 2, p. 1–10, 2019b.

AKSIT, M. et al. Morphology control of extruded polystyrene foams with benzene-trisamide-based nucleating agents. **Journal of Cellular Plastics**, v. 55, n. 3, p. 249–261, 2019a.

ALMEIDA, R. DOS S. Influência da Velocidade de Rotação no Processo de Extrusão do Polipropileno Virgem e Reciclado. 2010.

ASTM International. ASTM D638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. Annual Book of ASTM Standards. 2014.

ASTM International. ASTM D790 - Standard Test Method Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. Annual Book of ASTM Standards. 2017.

ASTM International. ASTM D1895 - Standard Test Methods for Apparent Density, Bulk Factor, and Pourability of Plastic Materials, 2010.

ASTM International. ASTM D883-80C - Definitions of Terms Relating to Plastics, 2020.

CALLISTER, W. D., *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. John Wiley & Sons, Inc., 2012.

CANEVAROLO JR, S. V. *Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. 2ª edição., São Paulo: Artliber, 2002.

CARVALHO, G. DE; FROLLINI, E. Lignina em espumas fenólicas. **Polímeros**, v. 9, n. 1, p. 66–75, 1999.

DEUSDARÁ, A. S. Polimerização De Estireno Em Solução. p. 60, 2012.

DIANI, J.; GALL, K. Finite Strain 3D Thermoviscoelastic Constitutive Model. **Society**, p. 1–10, 2006.

DUARTE, G.W. et al. Evaluation of effect of corona treatment on the performance of UV stabilizers in LDPE films. **Materia**, v. 24 , p. 1-9, 2019.

FABRIS, S.; FREIRE, M. T. D. A.; REYES, F. G. R. Embalagens plásticas: Tipos de materiais, contaminação de alimentos e aspectos de legislação. **Revista Brasileira de Toxicologia**, v. 19, n. 2, p. 59–70, 2006.

FERRAGE, E. et al. Talc as nucleating agent of polypropylene: Morphology induced by lamellar particles addition and interface mineral-matrix modelization. **Journal of Materials Science**, v. 37, n. 8, p. 1561–1573, 2002.

FERREIRA, Daniel Furtado. SISVAR: A COMPUTER ANALYSIS SYSTEM TO FIXED EFFECTS SPLIT PLOT TYPE DESIGNS. **REVISTA BRASILEIRA DE BIOMETRIA**, [S.l.], v. 37, n. 4, p. 529-535, dec. 2019. ISSN 1983-0823. Available at: <<http://www.biometria.ufla.br/index.php/BBJ/article/view/450>>. Date accessed: 30 out. 2021. doi: <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>.

GHAUS M. RIZVI; REMON POP-ILIEV; CHUL B. PARK. A Novel System Design for Continuous Processing of Plastic/Wood-Fiber Composite Foams with Improved Cell Morphology. **Journal of cellular plastics**, v. 38, n. 21, p. 1-17, 2002.

GUI, Q. et al. Effects of an organic phosphorus nucleating agent on crystallization behaviors and mechanical properties of poly(propylene). **Journal of Applied Polymer Science**, v. 88, n. 2, p. 297–301, 2003.

HACHANI, S. E. et al. Influence of talc incorporation on the thermal properties of polystyrene composites. **International Journal of Chemical Sciences**, v. 14, n. 3, p. 1236–1242, 2016.

HO, R. M. et al. Crystallization-induced undulated morphology in polystyrene-b-poly(L-lactide) block copolymer. **Macromolecules**, v. 37, n. 16, p. 5985–5994, 2004.

INNOVA. Manual De Extrusão. Innova, p. 1–89, 2019, disponível em:<<https://innova.com.br/wp-content/uploads/2019/06/manual-de-extrusao.pdf>>, acesso em: out, 2021.

JACQUES, F. B. Mercado Brasileiro de Poliestireno com Ênfase no Setor de Eletrodomésticos. 2010. 31 f. Dissertação (mestrado) – Departamento de engenharia química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2010.

KARRAD, S.; LOPEZ CUESTA, J. M.; CRESPIY, A. Influence of a fine talc on the properties of composites with high density polyethylene and polyethylene/polystyrene blends. **Journal of Materials Science**, v. 33, n. 2, p. 453–461, 1998.

KIM, E. et al. Effects of pressure drop rate and CO<sub>2</sub> content on the foaming behavior of newly developed high-melt-strength polypropylene in continuous extrusion. **Journal of Cellular Plastics**, v. 57, n. 4, p. 413–432, 2021.

KOHLHOFF, D.; OHSHIMA, M. Open cell microcellular foams of polylactic acid (PLA)-based blends with semi-interpenetrating polymer networks. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 296, n. 8, p. 770–777, 2011.

LEE, P. C. et al. Increase of open-cell content by plasticizing soft regions with secondary blowing agent. **Polymer Engineering and Science**, v. 45, n. 10, p. 1445–1451, 2005.

LEE, R. Know Your Options for Foaming Sheet. **Plastics Technology**, abr. 2015.

LEE, S. et al. ZERO OZONE-DEPLETING FOAMING AGENT TECHNOLOGY FOR EXTRUDED POLYSTYRENE FOAM Dow Advanced Materials , Building & Construction Business Group , Midland , MI , 48674 Abstract. p. 1–9, 2009.

LEUNG, S. N. et al. Mechanism of extensional stress-induced cell formation in polymeric foaming processes with the presence of nucleating agents. **Journal of Supercritical Fluids**, v. 63, p. 187–198, 2012.

Luz, A. B., Lins, F. A. Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações. Rio de Janeiro. CEFET/MCT. 2005. NAGUIBY, HANI. Effect of Talc Content on the Volume Expansion Ratio of Extruded PP Foams, vol. 39, n. 2, p. 1-13, 2003.

MIYAKE et al., Simultaneous determination of brominated and phosphate flame retardants in flame-retarded polyester curtains by a novel extraction method. **Sci Total Environ**, vol.1, p. 1-8, 2017.

OKOLIEOCHA, C. et al. Influence of graphene on the cell morphology and mechanical properties of extruded polystyrene foam. **Journal of Cellular Plastics**, v. 51, n. 4, p. 413–426, 2015.

PAULA MIGUEL LANDIM, A.; OLIVEIRA BERNARDO, C.; BEATRIZ ARAUJO MARTINS, I.; et al. Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil Sustainability concerning food packaging in Brazil., p. 1–11, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1897>>.

PLASTIVIDA. disponível em: <[http://www.plastivida.org.br/estudos/PS\\_XPS\\_EPS\\_Alimentos.pdf](http://www.plastivida.org.br/estudos/PS_XPS_EPS_Alimentos.pdf)>, acesso em: out, 2021.

PUSHPADASS, H. A.; WEBER, R. W.; HANNA, M. A. Expansion, morphological, and mechanical properties of starch-polystyrene foams containing various additives. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 47, n. 14, p. 4736–4742, 2008.

RABELLO, M. **Aditivação de polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2011. p. 240.

RODRIGUES, A. C. S. et al. Vias de reciclagem dos polímeros polipropileno (PP) e poliestireno (PS): um estudo bibliográfico. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, v. 18, n. 3, p. 145–160, 2017.

ROSA, D.S. et al. Estudo do efeito da incorporação de plastificante de fonte renovável em compostos de PVC. **Polímeros**, v. 23, p. 1-11, 2013.



SAN ANTONIO, A. Caracterización de compuestos eco-eficientes e yeso aligerado con residuos de poliestireno extruido (XPS). **Polímeros**. v.18, p. 1-16, 2017..

SHARUDIN., et al. Polypropylene-Dispersed Domain as Potential Nucleating Agent in PS and PMMA Solid-State Foaming. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 119, p. 1-10, 2010.

SILVA, B. D.; CARVALHO, L. P.; JUNIOR, R. M. SILVA. As Diversas Utilizações Do Poliestireno Expandido (Eps) Na Construção Civil. ISSN 2502-3632 (Online) ISSN 2356-0304 (Paper). **Jurnal Online Internasional & Nasional**. v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2019.

SUKSUT, B.; DEEPRASERTKUL, C. Effect of Nucleating Agents on Physical Properties of Poly(lactic acid) and Its Blend with Natural Rubber. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 19, n. 1, p. 288–296, 2011.

SUPARIASA, D. N. *Angewandte Chemie International Edition*. vol. 6, p. 6–22, 2014.

TABATABAEI, A. et al. Visualization of polypropylene's strain-induced crystallization under the influence of supercritical CO<sub>2</sub> in extrusion. **Polymer**, v. 122, p. 312–322, 2017.

TANNIRU, A., MISRA, R.D.K., “Reduced susceptibility to stress whitening during tensile deformation of calcium carbonate-reinforced high density polyethylene composites”, **Materials Science and Engineering A**, v. 424, n. 1-2, pp. 53–70, 2006.

TEIXEIRA, A. P. G. DA C. Caracterização topográfica e estrutural de filmes poliméricos provenientes de acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) depositados a plasma sobre substratos lisos e rugosos. **Aleph**, p. 71 f. : il., 2003.

VIGNOL, Leonardo de Alencastro. Desenvolvimento de modelos simplificados para o estudo da extrusão de polímeros. 2005. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

VO, C. V. et al. Advances in thermal insulation of extruded polystyrene foams. **Cellular Polymers**, v. 30, n. 3, p. 137–156, 2011.

WANG, K. et al. Effect of talc content on the degradation of re-extruded polypropylene/talc composites. **Polymer Degradation and Stability**, v. 98, n. 7, p. 1275–1286, 2013.

WONG, A.; PARK, C. B. The effects of extensional stresses on the foamability of polystyrene-talc composites blown with carbon dioxide. **Chemical Engineering Science**, v. 75, p. 49–62, 2012.

ZHANG, X. et al. Effect of nucleating agent on the structure and properties of polypropylene/poly(ethylene-octene) blends. **European Polymer Journal**, v. 38, n. 1, p. 1–6, 2002.

ZHANG, X.; ZHANG, D.; LIU, T. Influence of Nucleating Agent on Properties of Isotactic Polypropylene. **Energy Procedia**, v. 17, p. 1829–1835, 2012.

ZHANG, Y. F. et al. Properties and crystallization behaviors of isotactic polypropylene under action of an effective nucleating agent. **Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics**, v. 54, n. 9, p. 1019–1028, 2015.