

AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES POLIMÉRICOS TERMOPLÁSTICOS COM MEMÓRIA PARA UTILIZAÇÃO EM RÓTULOS TERMOENCOLHÍVEIS

Luis Henrique Passaia de Vargas (UNISATC), E-mail: luispassaia@gmail.com
Mariana Borges Perucchi (CCL Brasil), E-mail: mperucchi@cclinda.com
Carolina Resmini Melo Marques (UNISATC), E-mail: carolina.melo@satc.edu.br
Clauber Roberto Melo Marques (UNISATC), E-mail: clauber.marques@satc.edu.br
Aline Resmini Melo (UNISATC), E-mail: aline.melo@satc.edu.br

Resumo: Neste estudo, foi realizada uma minuciosa avaliação de materiais plásticos (PVC, PETG e OPS) destinados a aplicações em embalagem flexível. A inspeção rigorosa da matéria-prima na chegada destacou a importância da integridade e da proteção contra intempéries durante o transporte. A análise da espessura dos filmes confirmou a conformidade com as especificações do fornecedor, influenciando diretamente a eficiência desses filmes nas máquinas que os processam. Ao investigar o coeficiente de fricção (COF), foi possível observar a versatilidade desses materiais quando utilizados na impressão. No que diz respeito à resistência e estiramento, o PETG demonstrou superioridade em relação aos outros materiais. A avaliação das propriedades de encolhimento enfatizou o PETG como a escolha ideal, especialmente para altas taxas de encolhimento. Os testes com solventes revelaram a fragilidade do OPS e a resistência do PETG e PVC. No contexto das selagens, o THF demonstrou eficácia no PVC e OPS, enquanto o DXT proporcionou excelente selagem no PETG e OPS. Essas conclusões fornecem orientações valiosas para a seleção de materiais em aplicações específicas de embalagens flexíveis.

Palavras-chave: Embalagens flexíveis, PETG, PVC, OPS.

EVALUATION AND CHARACTERIZATION OF THERMOPLASTIC POLYMER FILMS WITH MEMORY FOR USE IN HEAT SHRINKABLE LABELS

Abstract: In this study, a thorough evaluation of plastic materials (PVC, PETG and OPS) intended for flexible packaging applications was carried out. Rigorous inspection of raw materials upon arrival highlighted the importance of integrity and weather protection during transport. Analysis of the film thickness confirmed compliance with the supplier's specifications, directly influencing the efficiency of these films in the machines that will process them. By investigating the coefficient of friction (COF), it was possible to observe the versatility of these materials when used in printing. When it comes to strength and stretch, PETG has demonstrated superiority over other materials. Evaluation of shrinkage properties emphasized PETG as the ideal choice, especially for high shrinkage rates. Solvent tests revealed the fragility of OPS and the resistance of PETG and PVC. In the context of seals, THF demonstrated effectiveness in PVC and OPS, while DXT provided excellent sealing in PETG and OPS. These findings provide valuable guidance for material selection in specific flexible packaging applications.

Keywords: Flexible packaging, PETG, PVC, OPS.

1. Introdução

Uma das ramificações que se encontra dentro do ramo de negócios das embalagens flexíveis para o varejo é o mercado de rótulos e etiquetas industriais, que nos últimos anos tem ganhado cada vez mais relevância nos meios de empreendimentos, além de chamar a atenção dos consumidores com diversas soluções criativas e inovadoras. Segundo a pesquisa realizada pelo banco de dados da Empresa Data Bridge Market Research (2021), no ano de 2021, o mercado de rótulos e etiquetas industriais foi avaliado em US\$52,94 bilhões. Das soluções diferenciadas deste mercado, uma que vem ganhando espaço é a utilização de rótulos denominados como termoencolhíveis ou *Shrink Sleeves*, estes que são fabricados utilizando materiais poliméricos termo retráteis

com memória plástica que quando aquecidos a partir de uma certa temperatura, se moldam de maneira adequada, nas embalagens ou garrafas a serem rotuladas. Um efeito de segunda pele sobre o material será efetuado, produzindo barreiras capazes de proteger o conteúdo caso necessário, além de possibilitar uma vasta gama de decorações ao rótulo, características essas superiores a maioria dos tipos existentes como é o caso das Etiquetas Sensíveis à Pressão (PSL), que não permite de maneira relevante tais características (PALHARES, 2013).

A fim de visualizar as características físico-químicas de alguns materiais para utilizações específicas, agrupando e determinando aqueles aptos a serem utilizados em determinados formatos de frascos e embalagens, faz-se necessário tal avaliação e caracterização, visando melhorar e facilitar a escolha de certos filmes poliméricos no desenvolvimento de novos rótulos termoencolhíveis de uma indústria gráfica, visto uma vasta gama de opções que é comumente encontrada no mercado. Para as avaliações é necessário entender as características dos filmes poliméricos que serão utilizados, que neste caso serão os filmes que utilizam resinas termoplásticas com Policloreto de Vinila (PVC), Polietileno Tereftalato Glicol (PETG) e Poliestireno Orientado (OPS). A utilização destes três materiais é muito recorrente no ramo de embalagens como um todo, e vem ganhando espaço na confecção de rótulos termoencolhíveis, visto que quando extrusados para esse meio de utilização são capazes de gerarem filmes extremamente finos, porém, que permitem boa resistência mecânica, tensão de ruptura, memória plástica, além de serem aptos a receber camadas de tintas após sofrerem o tratamento superficial correto, conforme aponta a Resolução Governamental nº 06, de 22 de fevereiro de 2018, em um de seus tópicos (CÂMERA DE COMÉRCIO EXTERIOR, 2018).

O objetivo primordial deste estudo foi analisar e caracterizar os fatores físico-químicos cruciais presentes nestes materiais poliméricos. Para que através dessas análises facilite o desenvolvimento e a seleção de estruturas termoplásticas adequadas para rótulos termoencolhíveis em uma indústria gráfica. Além disso, o estudo avalia os comportamentos de encolhimento e a memória plástica desses materiais em relação a embalagens específicas e garrafas.

2. Revisão Bibliográfica

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Embalagens Plásticas Flexíveis (ABIEF), toda estrutura condicionante flexível com espessura inferior a 250 µm cujas formas são dependentes do produto acondicionado, são caracterizadas como embalagens flexíveis. Desta forma é possível agregar a este grupo sacarias, *pouches* e *stand up pouches*, saches, bandejas flexíveis que se conformam ao produto, filmes encolhíveis (*shrink films*), filmes esticáveis (*stretch*) etc. (LIMA, 2015, apud ABIEF, 2015). Observa-se como critério de avaliação em rótulos termoencolhíveis, além dos materiais a serem utilizados, estes como PVC, PETG e OPS, uma vital importância na avaliação e consideração de outros fatores que podem afetar a qualidade final dos rótulos. O grau de orientação do filme, sua porcentagem de encolhimento no sentido longitudinal e transversal, aspectos físicos como gramatura e densidade devem ser levados em conta, além de serem previamente testados (PALHARES, 2004).

Quando avaliados os filmes termoplásticos com grau de encolhimento, é preferível filmes que apresentem baixa temperatura de encolhimento, simplificando e barateando este processo final de encolhimento, não prejudicando também produtos que podem ser sensíveis a calor. Porém, filmes com amplas faixas de temperatura irão requerer

equipamentos com controladores de temperatura mais simples. Mesmo assim a quantidade máxima de encolhimento dos filmes tende a variar entre 15% e 80%, dependendo diretamente da estrutura e da tecnologia de fabricação, esta que irá balancear ou não as duas direções de encolhimento do filme podendo evitar futuras distorções (ALVES; REIS, 1997). O filme de PETG, além de possuir boa resistência química e física, é o substrato que apresenta maior índice de encolhimento desta categoria para rótulos termoencolhíveis, chegando a beirar os 80% de encolhimento máximo em temperaturas de 95°C. Já o PVC, popular pelo seu baixo custo e boas propriedades de impressão, possui menor força de contração e com isso menores percentuais de encolhimento, sendo encontrado nas faixas de 50% a até 68%. O OPS, este que possui baixa resistência química, possui percentual de encolhimento muito próximo ao do PETG, porém, sofre com limitações de aplicação visto o seu encolhimento ser acionado em baixas temperaturas, sendo pouco recomendável para regiões em que a temperatura ambiente supere 30 °C (PALHARES, 2013).

A norma ASTM D882 (2018) estabelece a resistência máxima à tração como a maior resistência que um material suporta quando submetido à tração, com a unidade de medida em MPa, N/m² ou kgf/cm², relacionando a força máxima à área da seção transversal inicial do corpo de prova. No procedimento de ensaio de tração, a deformação na ruptura é expressa como a porcentagem da relação entre o comprimento inicial do corpo de prova e o seu comprimento após a ruptura, sendo representada em %.

A gramatura em filmes termoplásticos define-se como a massa de uma área específica, representada em gramas por metro quadrado (g/m²). Correlaciona-se com as propriedades de resistência mecânica e barreira a gases, visto que uma maior gramatura irá oferecer maior rigidez, além, de na maioria das vezes uma melhora na resistência a gases e ao vapor da água no material (MOTA, 2004). As avaliações de densidade e gramatura são úteis para o controle de qualidade, permitindo uma obtenção rápida de informações sobre como o material da embalagem flexível irá desempenhar, sendo por meio desta, conhecer a massa em uma determinada estrutura composta ou não, determinando posteriormente a concentração de aditivos, além de conhecer o rendimento de uma bobina de material convertido (MOTA, 2004).

3. Procedimento Experimental

A Fig. 1 apresenta um fluxograma com as etapas do procedimento experimental idealizado para realização deste estudo. Para realização dos testes nas diferentes famílias poliméricas que correspondem aos filmes, buscou-se organizar uma padronização sequencial a fim de realizar a mesma série de testes nas mesmas condições, evidenciando suas diferenças em realidades idênticas de testes em ambiente controlado. Normalmente os filmes poliméricos termoencolhíveis são importados em containers de aproximadamente 6 e 12 metros de outros países, tendo como transporte principal até o país destino o porte marítimo com navios cargueiros, já quando em terra, os caminhões através do meio rodoviário. Desta forma, para obter avaliações preliminares dos materiais que serão testados e de gerar as suas classificações discernidas por suas famílias poliméricas, é de suma importância a inspeção do recebimento da matéria-prima na sua chegada, visando também avaliar as condições de acondicionamento e as possíveis avarias que podem acontecer nestes transportes.

Após avaliação de recebimento, é necessário retirar as camadas que envolvem e protegem as bobinas para coletar amostras. Para realização dos testes é coletado de cada

material, aproximadamente 10 metros, sendo considerado uma quantidade adequada. As camadas retiradas que ficam envolta nas bobinas, têm a função de proteger os filmes das variações de temperatura e umidade que podem sofrer na decorrência da transferência de transporte, visto que possuem sensibilidade a determinadas temperaturas e podem perder características físicas se mal armazenadas. Filmes de PETG, PVC e OPS possuem como recomendações, um padrão de armazenamento com temperatura abaixo dos 25°C / 30°C, com uma Umidade Relativa do Ar (UR) recomendada abaixo de 75%. Desta forma, é utilizado um termo-higrômetro para medir esses fatores do ambiente de armazenamento visando prever avarias de deformação nas bobinas destes materiais.

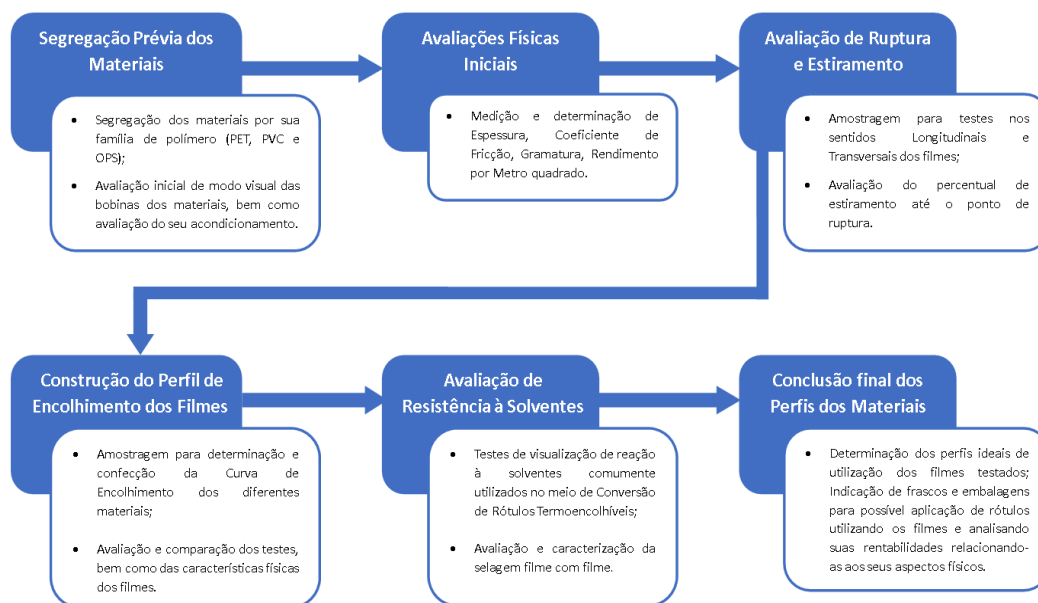


Figura 1: Fluxograma do procedimento experimental

Após as avaliações visuais dos materiais e a coleta de amostras, é iniciada uma série de avaliações nos quesitos físicos dos filmes, considerando as amostras coletadas com aproximadamente 10 metros. A primeira e mais básica é a medição de espessura do material, para isso é medida a espessura utilizando um especímetro (resolução 1 μm) ao longo de toda a amostra em alguns pontos, sendo ideal medir em pelo menos 5 pares de pontos. A medição ocorre nas laterais da amostra e faz-se necessária para avaliar a regularidade de extrusão do filme, visto que é de suma importância que o substrato avaliado tenha variação de +/- 10% na espessura para que o rendimento e a estabilidade operacional em máquina não sejam afetados. Com a avaliação da espessura, é possível calcular a densidade e a gramatura dos substratos. Para isso, são coletadas quatro amostras em forma de quadrados com dimensões de 10 x 10 cm. Em seguida, as amostras são pesadas utilizando uma balança analítica (resolução 1 mg) e suas espessuras são novamente conferidas.

Com base nessas informações, será possível calcular as densidades de cada material utilizando a Eq. (1). Com as densidades obtidas, é possível encontrar as gramaturas utilizando a Eq. (2). Já a Eq. (3) utiliza os valores convertidos da gramatura na unidade de kg/m^2 para encontrar a quantidade em quilos que uma determinada metragem quadrada irá produzir.

$$\rho = \frac{m}{C * L * E} \quad (1)$$

(3)

$$G = \rho * E \quad (2)$$

$$R = \frac{1}{G}$$

Onde: ρ = densidade (g/m^3); m = massa da amostra pesada (g); C = comprimento da amostra (m); L = largura da amostra (m); E = espessura da amostra (m); G = gramatura do material (g/m^2); R = rendimento (kg/m^2).

Por último, é realizada a avaliação do Coeficiente de Atrito (COF) dos filmes utilizando o equipamento DSM COF 3. São cortadas amostras utilizando gabaritos que auxiliam nesses cortes e, ao final, as amostras cortadas devem possuir aproximadamente 10 x 20 cm e 6,5 x 14 cm. Elas devem ser posicionadas tanto na base do aparelho do COF quanto no trenó, de forma que os lados das amostras em contato sejam os mesmos. Ou seja, para filmes sem impressão, a face tratada deve estar em contato com a face tratada, e a face não tratada com a face não tratada.

A avaliação da ruptura e do estiramento é realizada utilizando a Máquina Universal de Ensaio, visto que através dela é possível realizar ensaios de tração que podem resultar em gráficos e obter valores de força relativa necessária para romper o filme e consecutivamente obter seu estiramento máximo. As amostras para estes testes são confeccionadas levando em conta as duas direções de extrusão do filme, Direção Máquina (DM), que está relacionada com o comprimento, e a Direção Transversal (DT), relacionada com a largura do filme. Desta forma, utilizando as amostras de 10 metros coletadas inicialmente de cada material, é possível cortar 4 amostras de ambos os sentidos, com dimensões aproximadas de 10 x 2,54 cm, para cada material. Os testes mais frequentemente utilizados para avaliar a resistência dos materiais na Empresa são conduzidos em conformidade com as diretrizes estabelecidas pelas normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), abrangendo as condições de ensaio, a preparação dos corpos de prova e a velocidade do equipamento. As análises primordiais englobam características como medição da espessura, determinação de densidade e gramatura, resistência à tração (ruptura) e alongamento (estiramento).

Para uma melhor avaliação após o encolhimento, as amostras utilizadas têm aproximadamente as dimensões de 10 x 10 cm. São cortadas 11 amostras que representarão o encolhimento em temperaturas controladas pelo banho-maria. Essas 11 amostras correspondem às temperaturas de 50 °C a 100 °C, com intervalos de 5 °C entre elas. Devido à grande quantidade de material, os testes foram realizados em duplicata, o que permite uma certa confiabilidade na obtenção dos valores finais de encolhimento.

Na prática, após serem cortadas, as amostras são imersas em um banho-maria e devido à sua sensibilidade ao calor, ao serem retiradas do banho, elas exibem uma contração relativa em relação ao seu tamanho original. Ao representar esses dados graficamente, é possível identificar uma curva de contração específica para cada material. Esses ensaios, voltados para a determinação do encolhimento em materiais termoplásticos, são fundamentados no Método de Teste Padrão ASTM D2732-03. Esse método estipula um período mínimo de imersão de 10 segundos para que os materiais termoplásticos alcancem um estado de encolhimento estabilizado. No entanto, para garantir maior precisão e consistência dos resultados, foi selecionado o tempo de 20 segundos para a imersão.

A última série de testes a ser realizada nos filmes diz respeito à resistência química aos solventes comumente utilizados na indústria para a selagem de filme a filme, o que permite a construção final de um rótulo termoencolhível. Esses testes são necessários para determinar o solvente ou a combinação ideal de solventes para cada material. Para os testes, serão considerados os solventes acetato de etila, 1,3-dioxolana (DXT) e o tetraidrofurano (THF). Os testes consistem em aplicar esses solventes por gotejamento na superfície dos filmes PETG, PVC e OPS, a fim de avaliar visualmente a reação do

substrato ao solvente aplicado. Após o gotejamento, é controlado o tempo de exposição em um intervalo específico de no máximo 2 horas e para evitar a evaporação dos solventes foram sobrepostas placas de vidro sobre as regiões gotejadas para que assim seja mais preciso avaliar os danos causados pelos solventes durante esse período.

Para verificar a selagem filme com filme, são cortadas amostras de aproximadamente 10 x 10 cm, que são dobradas com uma sobreposição de aproximadamente 10 mm entre as partes. Os testes consistem em aplicar uma pequena quantidade de solvente nessas sobreposições e aproximá-las para verificar se ocorreu a selagem. Para avaliar os resultados, é possível desfazer manualmente a selagem ou observar se as faces seladas permanecem intactas durante o encolhimento.

4. Resultados e discussões

Uma etapa crítica no processo é a inspeção do recebimento da matéria-prima no momento da chegada. Essa inspeção visa não apenas avaliar a qualidade e integridade dos materiais recebidos, mas também verificar as condições de acondicionamento durante o transporte e identificar eventuais danos decorrentes das transferências entre modos de transporte. Esta avaliação permite uma classificação inicial dos materiais com base em suas famílias poliméricas, fornecendo informações valiosas para os estágios subsequentes de teste e processamento. As camadas de proteção a intempéries estavam presentes nas bobinas, desempenhando um papel fundamental, uma vez que minimizam os efeitos das variações de temperatura e umidade durante o transporte. A sensibilidade dos filmes termoencolhíveis a condições específicas de temperatura e umidade torna crucial o armazenamento adequado, com temperaturas abaixo de 25 °C a 30 °C e uma Umidade Relativa do Ar (UR) inferior a 75%. Após a inspeção do recebimento, o processo de coleta de amostras foi conduzido. Para cada material, aproximadamente 10 metros de filme foram coletados para realização dos testes.

O primeiro estágio da avaliação consistiu na medição da espessura dos materiais, conduzida ao longo de amostras com extensão aproximada de 10 metros. Foi realizada a mensuração em diversos pontos ao longo das amostras, avaliando principalmente as bordas dos materiais, sendo esta avaliação crucial para avaliar a consistência da extrusão do filme. De acordo com as especificações do fornecedor dos filmes, ambos deveriam ter uma espessura nominal de 40 µm. Porém, visto que materiais extrusados podem sofrer variações consideráveis na espessura, utilizou-se o método padrão ASTM D1400-94 como base, onde indicam uma variação adequada de até 10% para mais ou para menos. Assim, os resultados das medições revelaram-se satisfatórios e alinhados com os critérios de variação aceitável. Foram realizadas cinco medidas de cada um dos filmes termoencolhíveis, e a média para cada um deles ficou: PVC (40 µm), PETG (41 µm) e OPS (43 µm). Com base na avaliação da espessura, os cálculos subsequentes de densidade e gramatura dos substratos foram realizados. Quatro amostras em forma de quadrados com dimensões de 10 x 10 cm foram coletadas para essa análise. Ao pesar essas amostras em uma balança analítica e associá-las às suas espessuras correspondentes, foi possível calcular a densidade, a gramatura e o rendimento em metros quadrados por quilo. Os resultados estão apresentados na Tab. 1, onde os valores dispostos foram as médias avaliadas das quatro amostras de cada filme, considerando a média das espessuras.

Os resultados obtidos estão em conformidade com as especificações do fornecedor, alinhando-se às variações permitidas pelo método de teste ASTM D792. Esse método aborda a determinação de densidade e peso específico para plásticos utilizando um meio

aquoso, em contraste com o método analítico baseado na ISO 1183-1, que utiliza uma balança analítica e a relação indicada na Eq. 1 para determinar a densidade. Os valores de rendimento são igualmente relevantes, pois auxiliam na identificação da matéria-prima com maior capacidade de impressão, resultando em menor consumo de material. Esses dados desempenham um papel crucial na indústria de embalagens flexíveis, otimizando a produção, reduzindo desperdícios e assegurando uma impressão eficiente do produto final. Considerando as perspectivas comerciais, ao levar em conta o rendimento, é possível calcular o custo total da matéria-prima necessária para uma determinada quantidade de produção, podendo facilitar decisões financeiras atreladas a estoque de matéria-prima.

Tabela 1 - Médias das massas, densidades, gramatura dos filmes e o rendimento convertido em m²/kg

Grandezas Avaliadas	Resultados para o filme PVC	Resultados para o filme PETG	Resultados para o filme OPS
Massa média (g)	0,5444	0,5385	0,4729
Densidade média (g/cm ³)	1,3611	1,3135	1,0998
Gramatura média (g/cm ²)	0,0054	0,0053	0,0047
Rendimento (kg/ m ²)	18,5185	18,8679	21,2765

O último teste físico inicial, foi a avaliação do COF o qual seguiu o método de teste padrão ASTM D1894 para determinação do COF dinâmico em filmes plásticos, e os resultados foram apresentados na Tab. 2.

Tabela 2 - Coeficientes de Fricções Dinâmicos dos materiais

Coeficientes de Fricção	Resultados para o filme PVC	Resultados para o filme PETG	Resultados para o filme OPS
Interno	0,439	0,351	0,338
Externo	0,461	0,319	0,326

Visto os filmes serem transparentes, com espessuras consideradas finas e terem tratamento corona prévio em ambos os lados, a partir destas conclusões e dos valores de COF encontrados na Tab. 2 pode-se determinar a usabilidade de ambos os lados para impressão, podendo aplicar um agente deslizante caso necessário valores inferiores a 0,30. Ambos os materiais apresentaram valores dentro das faixas previstas pelo fornecedor dos materiais, este que previa resultados inferiores a 0,50. Depois de realizados os testes iniciais, avaliações físicas mais complexas foram realizadas utilizando a Máquina Universal de Ensaio. Desta forma, ainda com as amostras coletadas inicialmente, produziu-se quatro corpos de prova, de cada sentido de estiramento dos filmes avaliados nas medidas aproximadas de 10 x 2,54 cm com auxílio de gabaritos. Assim, configurou-se o equipamento em um módulo de alongamento e deformação, considerando a distância inicial de 5 cm entre garras, para que desta forma, fiquem 2,5 cm de material nas garras e o estiramento aconteça sem interferências. Com os 24 corpos de prova prontos, os testes foram realizados e seus resultados foram expostos na Tab. 3 em forma de médias, na unidade de Mpa, pois é possível realizar a relação de igualdade com N/mm² previamente configurada pelo equipamento de ensaio.

A partir desses resultados, torna-se viável identificar os materiais que podem estar sujeitos a maiores níveis de tensão quando introduzidos nas máquinas utilizadas nos processos de impressão e conversão de rótulos termoencolhíveis. Essa tensão adicional pode, por sua vez, resultar na ruptura do material, levando a paradas nas máquinas e redução da eficiência produtiva. Adicionalmente, esses valores terão um impacto significativo na velocidade de impressão, destacando a importância de optar por filmes

com características de resistência superiores. Com base nos dados encontrados e confirmados das resistências dos materiais, o PETG e o PVC seriam as escolhas mais indicadas. Porém, tanto na direção DM quanto na direção TD, o PETG apresenta a maior resistência média em comparação com o PVC e o OPS. Já quando analisado sua taxa de alongamento na ruptura, o PETG demonstra elevada superioridade na direção DM, porém valores mais baixos na direção TD que o OPS e PVC. De qualquer forma, tendo em vista os valores de resistência a tração e visando minimizar os riscos de ruptura dos materiais e garantir a integridade durante o processo de impressão e conversão de rótulos termoencolhíveis, o PETG é a opção preferencial

Tabela 3 - Médias dos resultados de resistência à tração e alongamento na ruptura

Grandezas Avaliadas	Valores para PVC	Valores para PETG	Valores para OPS
Média da resistência DM (Mpa)	57	67	30
Média da resistência DT (Mpa)	143	248	94
Alongamento percentual DM (%)	245	436,5	226
Alongamento percentual DT (%)	74,5	55,5	71,5

Com a conclusão das avaliações mecânicas dos filmes, seguiu-se para a construção e avaliação da curva de encolhimento dos materiais, estas avaliadas considerando ambas as direções de extrusão dos materiais. Os corpos de provas foram preparados nas dimensões 10 x 10 cm, e totalizaram 33 para cada material, visto que foram avaliados em duplicata. Além disso, tomou-se como base o valor de 10 cm para a realização do cálculo de percentual de encolhimento que considera as medidas iniciais do corpo de prova e a sua dimensão final com valores em porcentagem, sendo passivo a construção do gráfico com auxílio da ferramenta Microsoft Excel, onde o eixo X seria a temperatura e o Y a taxa de encolhimento em porcentagem (%).

Baseando-se na norma ASTM D2732, utilizou-se para a imersão das amostras, retentores em grade de aço com compartimento para receber o corpo de prova, visando estabilizar e visualizar de forma clara o encolhimento dos diferentes materiais. Foi utilizado o banho maria na temperatura inicial de 55 °C e quando mergulhado o corpo de prova, iniciou a cronometragem até 20 s. Após, realizou-se este procedimento em todos os corpos de prova e nas demais temperaturas previamente determinadas. Desta forma, condensou-se as médias dos valores medidos na Tab. 4 dos corpos de provas avaliados.

Tabela 4 - Média dos valores medidos em cada faixa de temperatura

Direções de cada material	Médias das medidas (mm) encontradas em cada temperatura								
	55 °C	60 °C	65 °C	70 °C	75 °C	80 °C	85 °C	90 °C	95 °C
DT PETG	100	100	95	70	43	31	25	22	21
DM PETG	100	100	99	99	104	102	99	97	96
DT PVC	100	100	98	83	60	49	45	43	41
DM PVC	100	100	99	96	93	91	91	89	88
DT OPS	100	96	90	83	73	63	53	42	32
DM OPS	100	100	100	100	100	101	100	97	97

Em seguida converteu-se os valores encontrados em percentuais para que desta forma, fosse possível confeccionar as curvas de encolhimento de cada um dos materiais analisados, e estes estão apresentados na Tab. 5.

A partir da Tab. 5, utilizou-se a ferramenta Microsoft Excel para plotar os gráficos de curva de encolhimento dos materiais. A Fig. 2 apresenta as curvas de encolhimento produzidas para os três materiais. O principal fator a ser considerado ao escolher um

filme termoencolhível é a sua capacidade de encolher de forma consistente e previsível quando aquecido. Os valores de encolhimento, expressos em porcentagem, indicam quanto cada material encolheu a diferentes temperaturas. Com base nos resultados, o PETG demonstrou as maiores taxas de encolhimento tanto na direção transversal (TD) quanto na direção da máquina (MD) em comparação com o PVC e o OPS.

Tabela 5 - Média dos percentuais de encolhimento de cada faixa de temperatura

		Médias dos percentuais (%) encontrados em cada temperatura								
Direções de cada material	55 °C	60 °C	65 °C	70 °C	75 °C	80 °C	85 °C	90 °C	95 °C	
DT PETG	0	0	5	30	57	69	75	78	79	
DM PETG	0	0	1	1	-4	-2	1	3	4	
DT PVC	0	0	2	17	40	51	55	57	59	
DM PVC	0	0	1	4	7	9	9	11	12	
DT OPS	0	4	10	17	27	37	47	58	68	
DM OPS	0	0	0	0	0	-1	0	3	3	

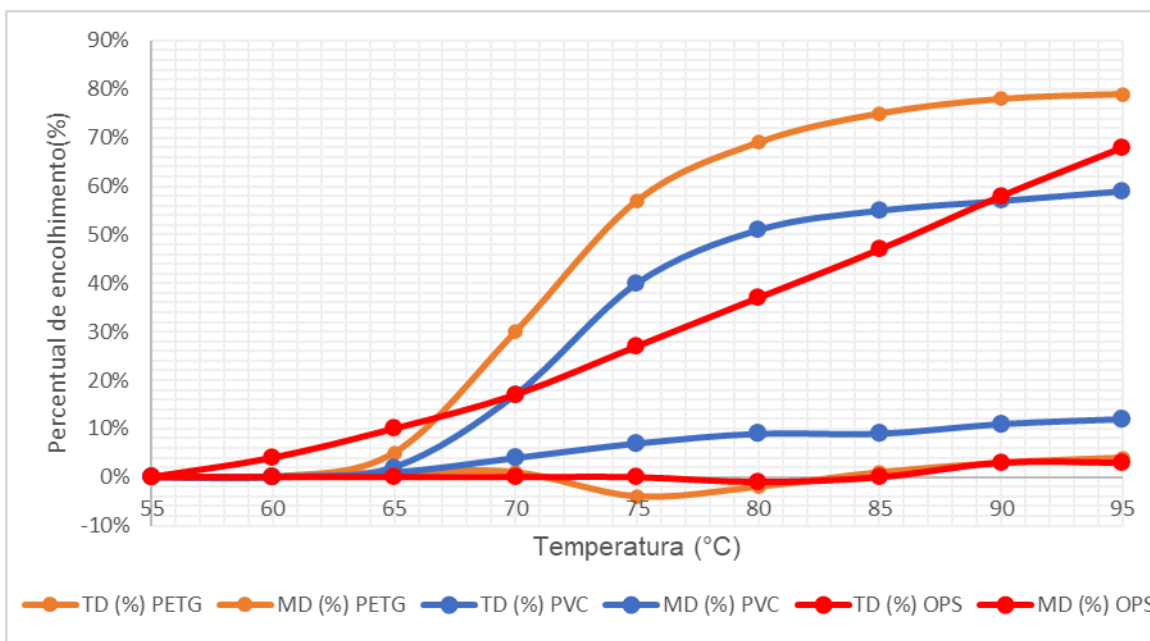


Figura 2 - Curva de encolhimento comparativa com PETG, PVC e OPS

Na direção TD, o PETG atingiu uma taxa de encolhimento de 79% a 95°C, enquanto o PVC e o OPS atingiram taxas significativamente mais baixas (PVC: 59%, OPS: 68%). Já na direção MD, o PETG também mostrou um bom desempenho, com taxas de encolhimento positivas em todas as temperaturas testadas, enquanto o PVC e o OPS tiveram taxas variáveis e menores.

Com base nessas análises, o PETG se destaca como a escolha mais apropriada para filmes termoencolhíveis devido à sua capacidade de encolhimento superior, tornando-o ideal para aplicações que requerem rótulos ou embalagens que precisam se ajustar de forma consistente às formas desejadas quando aquecidas. Além disso, é importante ressaltar que, em cenários nos quais é necessário alcançar taxas de encolhimento próximas a 70%, o uso do OPS ou do PVC não seria viável, tornando o PETG a escolha lógica para atender a tais requisitos de encolhimento elevado.

Iniciou-se os testes separando amostras das três matérias a serem testadas. Utilizando os solventes acetato de etila, DXT e THF gotejou-se 5 gotas em cada amostra de material e

para evitar uma rápida evaporação do material adicionou placas de vidro nas superfícies gotejadas. O tempo de visualização de resultados foi de aproximadamente 2 horas, devido aos solventes serem muito voláteis o que impossibilitou a visualização da ação destes solventes em maiores espaços de tempo. A Fig. 3 ilustra a ação do solvente acetato de etila nos materiais após duas horas.

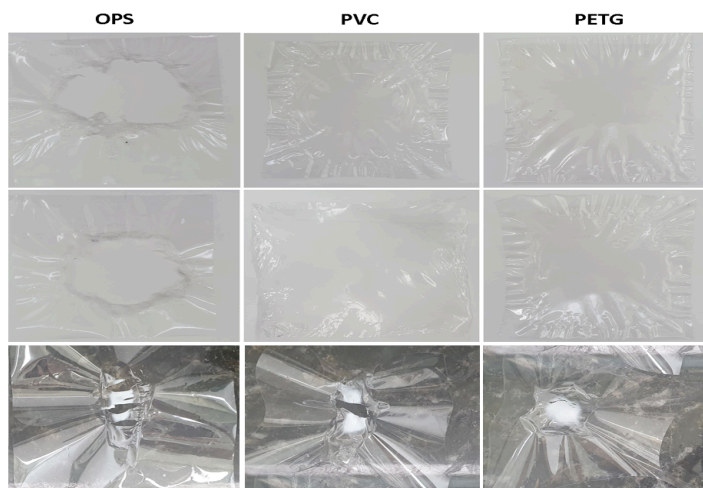


Figura 3 - Ação do solvente acetato de etila, THF e DXT no OPS, PVC e PETG

Ao final das bateladas de testes utilizando os três solventes, foi possível observar que o OPS é o filme mais frágil dentre os testados. As cinco gotas foram capazes de fazer o material deteriorar-se independentemente do solvente aplicado. Já o PETG e o PVC, demonstraram maior resistência visto que sofreram certa degradação e encolhimento, porém ambos permaneceram sem grandes deformações ou deterioração relacionados ao gotejamento do acetato de etila. Quando aplicados o THF e o DXT nas superfícies do PETG e PVC, os materiais sofreram degradações semelhantes às vistas na aplicação do acetato de etila, porém, na região de aplicação os materiais ficaram leitosos. Mesmo assim, ambos não sofreram rompimentos por contato dos solventes, ao contrário do OPS que nas três situações deteriorou-se.

Por fim, para os testes realizados de solda dos materiais, confeccionou-se os corpos de prova com aproximadamente 10 x 10 cm. Para selar os materiais dobrou-se as amostras ao meio deixando uma aba maior que a outra para que assim uma superfície fique em contato por cima da outra, e com ajuda de algodões imersos nos respectivos solventes aplicou-os para gerar a selagem. O processo se repetiu produzindo um corpo de prova de cada material para cada solvente, o que totalizaram 9 amostras. Ao final, avaliou-se visualmente qual material havia sido realmente selado e com qual solvente foi utilizado.

Foi possível observar que o acetato de etila não gerou selagem em nenhum dos três filmes. O THF apresentou bons resultados na selagem dos filmes PVC e OPS gerando uma solda fisicamente resistente. Já no PETG, por mais que foi visualizado a selagem, ela era facilmente destacável com pouca força. A utilização do DXT apresentou uma boa selagem nos materiais PETG e OPS, os quais quando aplicado força para desfazer a solda, não foi visualizado nenhum ponto de desprendimento das faces seladas. Já no PVC, o resultado foi semelhante à condição de aplicação de THF no PETG, onde a selagem ocorre, porém é facilmente desfeita, demonstrando pequena resistência física.

5. Conclusão

O processo de inspeção do recebimento de matéria-prima no momento da chegada

revelou-se crucial, não apenas para avaliar a qualidade e integridade dos materiais, mas também para verificar as condições de acondicionamento durante o transporte e identificar danos potenciais. A proteção contra intempéries desempenhou um papel vital, minimizando os efeitos das variações de temperatura e umidade durante o transporte.

A análise da espessura dos filmes termoencolhíveis, realizada em conformidade com as especificações do fornecedor, confirmou que os três filmes estavam dentro da faixa de variação aceitável, de acordo com os métodos padrões da ASTM. Isso é fundamental, uma vez que a uniformidade na espessura tem um impacto direto no desempenho operacional e na eficiência das máquinas que processam esses materiais. Além disso, os valores de rendimento, convertidos de g/cm^2 para kg/m^2 , forneceram dados relevantes para otimizar o processo de produção e reduzir desperdícios, contribuindo para uma escolha eficiente de matéria-prima no contexto de embalagens flexíveis.

A análise do COF indicou que os filmes de PVC, PETG e OPS são adequados para aplicações de impressão e outras áreas onde o controle da fricção é essencial. A capacidade de ajustar este parâmetro conforme necessário, oferece flexibilidade adicional na utilização desses materiais em diferentes contextos industriais, demonstrando sua versatilidade e compatibilidade com as especificações do fornecedor.

Ao avaliar a resistência e estiramento dos materiais, o PETG obteve resultados que apresentaram resistência média superior em ambas as direções (DM e DT), tornando-o preferencial para evitar rupturas e manter a eficiência produtiva durante o processo de impressão e conversão de rótulos termoencolhíveis.

A avaliação das propriedades de encolhimento destaca o PETG como a escolha mais apropriada em comparação com o PVC e o OPS. Os testes revelaram que o PETG apresenta taxas de encolhimento mais elevadas tanto na direção transversal quanto uma notável estabilidade na direção máquina. Isso é de extrema importância para aplicações que demandam rótulos ou embalagens que precisam se ajustar de maneira consistente às formas desejadas quando expostas ao calor.

Particularmente em cenários onde altas taxas de encolhimento, aproximando-se de 70% são requeridas, a escolha lógica recai sobre o PETG, visto que o PVC e o OPS não seriam viáveis para atender a tais exigências de encolhimento substancial.

Ao considerar recipientes como latas, é observada uma demanda relativamente menor por altas taxas de encolhimento, onde, ao relacionar seus diâmetros, é encontrado no máximo 50% de encolhimento necessário. No entanto, ao avaliar recipientes de formato sinuoso, como garrafas de alvejantes ou garrafas PET tradicionais de 2 litros, torna-se evidente que apenas filmes termoencolhíveis com taxas de encolhimento superiores a 70% são capazes de oferecer desempenho satisfatório. Isso se torna essencial em operações de encolhimento a baixas temperaturas, onde o uso do OPS e do PVC se mostra inviável devido às suas curvas de encolhimento apresentarem valores mínimos em temperaturas mais baixas, ao contrário do PETG, que mantém sua eficácia em diversas condições térmicas.

Ao final dos testes com os solventes, ficou evidente que o OPS era o material mais frágil entre os avaliados. Mesmo com apenas cinco gotas de solvente, o OPS se deteriorou independentemente do solvente aplicado. Por outro lado, o PETG e o PVC demonstraram maior resistência, sofrendo pequena degradação e encolhimento, porém sem deformações significativas ou deterioração relacionadas ao gotejamento de acetato de etila. O THF demonstrou eficiência na selagem dos filmes PVC e OPS, produzindo

uma solda fisicamente resistente. No entanto, no PETG, embora a selagem fosse visível, ela podia ser facilmente desfeita com pouca força. O uso do DXT proporcionou uma boa selagem nos materiais PETG e OPS, onde a força aplicada para desfazer a solda não resultou em desprendimento das superfícies seladas. No caso do PVC, o resultado foi semelhante à aplicação de THF no PETG, onde a selagem ocorreu, mas com pouca resistência física.

Por fim, o estudo abordou a avaliação criteriosa das propriedades de materiais plásticos (PVC, PETG e OPS) em um contexto de embalagens flexíveis onde essas descobertas são essenciais para orientar a escolha de materiais em aplicações específicas de embalagens flexíveis.

Referências

ALVES, R.M.V. & REIS, A.P.C. *Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens: Filmes Termoencolhíveis*. Instituto de Tecnologia de Alimentos, São Paulo, v. 09, n. 01, p. 5, jan. / fev. 1997. Disponível em: < https://ital.agricultura.sp.gov.br/arquivos/cetea/informativo/v9n1/v9n1_artigo1.pdf> Acesso em: 31 de mar. de 2023.

American Society for Testing and Materials. *Standart test method for tensile properties of thin plastics sheeting*. Active Standard ASTM D882-18. New York: ASTM, 2018.

American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Nondestructive Measurement of Dry Film Thickness of Nonconductive Coatings Applied to a Nonferrous Metal Base*. Active Standard ASTM D1400-94. New York: ASTM, 2018.

American Society for Testing and Materials. *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*. Active Standard ASTM D792-20. New York: ASTM, 2018.

American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Static and Kinetic Coefficients of Friction of Plastic Film and Sheeting*. Active Standard ASTM D1894-14. New York: ASTM, 2018.

American Society for Testing and Materials. *Standard test method for unrestrained linear thermal shrinkage of plastic film*. Active Standard ASTM D2732-03. New York: ASTM, 2010.

CÂMERA DE COMERCIO EXTERIOR; SECRETARIA-EXECUTIVA. *Resolução nº 06*, de 22 de fevereiro de 2018. Disponível em: <<http://www.camex.gov.br/component/content/article/62-resolucoes-da-camex/em-vigor/1978-resolucao-n-06-de-22-de-fevereiro-de-2019>> Acesso em: 22 mar. de 2023.

Data Bridge Market Research. Disponível em: <<https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-industrial-labels-market>> Acesso em: 14 mar. de 2023.

International Organization for Standardization. *Methods for determining the density of non-cellular plastics (2019)*. ISO 1183-1— Part 1: Immersion method, liquid pycnometer method and titration method (ISO Standard No. 1183-1:2019), França, 2019.

LIMA, C.R. *História da embalagem: Stand-Up Pouch*. 2015. Monografia (Pós-graduação em Engenharia de Embalagem) – Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2015. Disponível em: <https://maua.br/files/monografias/completo-historia-embalagem_-stand-pouch-210909.pdf> Acesso em: 07 de abr. de 2023.

MOTA, L.R. *Controle De Qualidade De Embalagens Flexíveis Para Biscoitos*, 2004. Universidade Católica de Goiás, Goiás, 2004. Disponível em: <<http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/8930/material/TCC-Lilian%20-%20CONTROLE%20DE%20QUALIDADE%20DE%20EMBALAGENS%20FLEXÍVEIS%20PARA%20BISCOITOS.pdf>> Acesso em: 10 de abr. de 2023.

PALHARES, M. *Guia Baumgarten de Referência em Rotulagem*. São Paulo: Bloco de Comunicação Ltda., 2013. Disponível em:

<<https://docplayer.com.br/13092553-Guia-baumgarten-de-referencia-em-rotulagem.html>> Acesso em: 15 mar. de 2023.

PALHARES, W. *Teoria da Relatividade: é a adequação que define a decisão entre autoadesivos e termoencolhíveis.* EmbalagemMarca, 2004. Disponível em: <<https://acervo-digital.espm.br/Artigos/ART/2013/111269.pdf>>. Acesso em: 14, abr. de 2023.